RAE

1. **TIPO DE DOCUMENTO:** Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO MECATRÓNICO
2. **TÍTULO:** DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO PARA UN CULTIVO DE MAÍZ HACIENDO USO DE SENSORES DE HUMEDAD, REALIZANDO TRANSMISIÓN INALÁMBRICA DE DATOS
3. **AUTORES:** Ivo Luis Villalba Espitia y Santiago José Gastelbondo Flórez.
4. **LUGAR:** Bogotá, D.C
5. **FECHA:** Octubre de 2019
6. **PALABRAS CLAVE:** Capacidad de campo, Coordinador, Comunicación Inalámbrica, Maíz Porva, Punto de Marchitez, Reserva Fácilmente Utilizable, Router, Sensores, Sistema de Riego, Xbee.
7. **DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO:** En el siguiente proyecto se encuentra el diseño de un sistema de riego capaz de combatir el estado de estrés hídrico en un cultivo de maíz. El diseño cuenta con sensores de humedad los cuales se encargan de obtener la lectura del suelo y enviarla inalámbricamente al centro de control por medios de módulos Xbee. Las lecturas del sensor son procesadas en un programa para la activación del sistema.
8. **LINEAS DE INVESTIGACIÓN:** Facultad de Ingeniería: Automatización de Procesos. Campo Temático del Programa: Diseño de Sistemas de Riego.
9. **METODOLOGÍA:** Es de carácter empírico-analítico, con un enfoque metodológico basado en el estudio y diseño de un sistema de riego capaz de combatir el estado de estrés hídrico de un cultivo de maíz.
10. **CONCLUSIONES:** Para el proceso de detección de humedad existen otras técnicas que sobresalen por encima de la seleccionada, que por cuestiones de costos no se implementaron en el proyecto. Mediante la interfaz de escalamiento se observa que con dimensiones mayores a ¼ de hectárea los valores obtenidos son sobredimensionados debido a que el riego del sistema es simultaneo. En el sistema de adquisición de datos de forma remota se observó que la tecnología inalámbrica Zigbee cumplió y supero los requerimientos del proyecto dado, que, si fuera necesario hacer el cambio a un dispositivo con mayor alcance, solo sería reemplazar el modulo sin necesidad de otro cambio en la programación.

DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO PARA UN CULTIVO DE MAÍZ HACIENDO USO DE SENSORES DE HUMEDAD, REALIZANDO TRANSMISIÓN INALÁMBRICA DE DATOS.

Gastelbondo Flórez Santiago José
Villalba Espitia Ivo Luis

Universidad de San Buenaventura, Sede Bogotá.
Facultad de Ingeniería.
Programa de Mecatrónica
Bogotá, Colombia
2019

DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO PARA UN CULTIVO DE MAÍZ HACIENDO USO DE SENSORES DE HUMEDAD, REALIZANDO TRANSMISIÓN INALÁMBRICA DE DATOS.

Gastelbondo Flórez Santiago José
Villalba Espitia Ivo Luis

Director: Duque Jaramillo Alfonso

Universidad de San Buenaventura, Sede Bogotá.
Facultad de Ingeniería.
Programa de Mecatrónica
Bogotá, Colombia
2019

DEDICATORIA

Dedicamos este proyecto a nuestros padres y hermanos, compañeros de estudio y a nuestros profesores que nos inculcaron todo el conocimiento.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos profundamente a nuestros profesores quienes fueron parte de todo este proceso, que con paciencia, dedicación y profesionalismo nos prepararon para nuestra carrera.

A nuestro director del proyecto de grado, el Ingeniero Alfonso Duque Jaramillo, quien fue vital para la realización y ejecución del proyecto, agradecemos su tiempo, conocimiento y dedicación.

Finalmente, a nuestros padres y hermanos quienes fueron el motor de este gran triunfo, por el apoyo incondicional por la confianza depositada en nosotros y en nuestros conocimientos.

Tabla De Contenido

INTRODUCCIÓN 4
Capítulo 1 5
1.1 Antecedentes 5
1.1.1 Cultivo de Maíz 5
1.1.2 Sistemas de Riego 6
1.1.3 Sensores 7
1.1.4 Comunicación Inalámbrica 8
1.2 Planteamiento del problema 10
1.3 Justificación y pregunta de Investigación 11
1.4 Objetivos 12
1.4.1 Objetivo General 12
1.4.2 Objetivos Específicos 12
1.5 Alcances 13
1.6 Limitaciones 13
1.7 Metodología 14
Capítulo 2 16
2.1.1 Sistema de detección de humedad 17
2.1.1.1 Punto de marchitez y capacidad de campo 20
2.1.1.2 Calibración del Sensor 31
2.1.2 Sistema de adquisición de datos de forma inalámbrica 33
2.1.2.1 Módulo Xbee S2C 35
2.1.2.2 Roles Xbee 36
2.1.2.3 Modos de Xbee 36
2.1.2.4 Topologías Xbee 37
2.1.2.5 Configuración de los Xbee 38
2.1.2.6 Integración del sensor de humedad con el módulo Xbee S2C 40
2.1.2.7 Recepción de datos con Matlab 42
2.1.2.8 Integración de los módulos Xbee con la bomba 43
2.1.2.9 Envió de datos con Matlab 45
2.1.3 Interfaz para la operación, visualización y monitoreo del sistema. 46
2.1.3.1 Diagrama de flujo interfaz de monitoreo. 55
2.1.4 Integración del sistema de detección de humedad, automatización de la bomba y la interfaz de monitoreo del sistema de riego en una estructura. 56
2.1.4.1 Cálculos para la selección de la bomba 57
2.1.5 Diseño del Sistema Escalable 67
2.1.5.1 Interfaz sistema escalable 72
2.1.5.2 Ejemplo del funcionamiento de la interfaz 76
2.1.5.3 Distribución de los sensores de humedad en el cultivo 82
CONCLUSIONES 84
RECOMENDACIONES 86
REFERENCIAS 87
Bibliografía 87
ANEXOS 91

Lista de tablas

Tabla 1. Comparación de los sensores de humedad ---- 17
Tabla 2. Comparación de los sensores de humedad ---- 17
Tabla 3. Contenido volumétrico de humedad ---- 22
Tabla 4. Puntos intermedios para la calibración del sensor. ---- 32
Tabla 5. Comparación de las tecnologías inalámbricas. ---- 34
Tabla 6. Comparación de las tecnologías inalámbricas ---- 34
Tabla 7. Mediciones de voltaje ---- 46
Tabla 8. Lectura Digital de los Puntos de Marchitez y Capacidad de Campo en los diferentes tipos de suelo ---- 48
Tabla 9. Paràmetros del diseño. ---- 57
Tabla 10. Pérdidas por fricción tubería primaria ---- 79
Tabla 11. Pérdidas por accesorios tubería primaria ---- 80

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama de conexión de pines ----------18
Figura 2. Medición de voltaje con el sensor en agua----------19
Figura 3. Medición de voltaje con el sensor fuera del agua----------19
Figura 4. Medición de voltaje en el punto de marchitez del suelo arenoso. ----------25
Figura 5. Medición de voltaje para la capacidad de campo del suelo arenoso.----------25
Figura 6. Medición de voltaje para el punto de marchitez del suelo limoso. ----------28
Figura 7. Medición de voltaje para la capacidad de campo del suelo limoso. ----------28
Figura 8. Medición de voltaje para el punto de marchitez del suelo arcilloso. ----------30
Figura 9. Medición de voltaje para la capacidad de campo del suelo arcilloso.----------31
Figura 10. Curva de calibración del sensor. ----------33
Figura 11. Configuración de pines Xbee S2C. ----------35
Figura 12. Especificaciones Xbee S2C. ----------35
Figura 13. Roles de los Xbee S2C ----------36
Figura 14. Topologías Zigbee ----------37
Figura 15. Conexión del Coordinador al computador----------38
Figura 16. Divisor de voltaje ----------40
Figura 17. Circuito eléctrico FC-28 y Xbee S2C ----------41
Figura 18. PCB del sensor y el Xbee S2C ----------41
Figura 19. Trama API para la recepción de datos.----------42
Figura 20. Conexión de la bomba y el módulo relé. ----------43
Figura 21. Circuito módulo relé y la bomba----------44
Figura 22. PCB del módulo relé y la bomba ----------44
Figura 23. Trama AT para el envío de datos. ----------45
Figura 24. Ecuación de transformación de señal Análoga a Digital ----------48
Figura 25. Rangos de operación con los que funciona el sistema en los diferentes tipos de suelo. ----------52
Figura 26. Interfaz para el monitoreo y visualización de la humedad ----------54
Figura 27. Diagrama de flujo – Interfaz de seguimiento ----------55
Figura 28. Diseño para la muestra experimental----------56
Figura 29. Estructura dividida por tramos ----------57
Figura 30. Secuencia de fotos ----------64
Figura 31. Secuencia de fotos ----------65
Figura 32. Secuencia de fotos.----------66
Figura 33. Secuencia de fotos.----------67
Figura 34. Distribución del cultivo.----------73
Figura 35. Interfaz de seguimiento ----------74
Figura 36. Diagrama de flujo – Interfaz sistema escalable. ----------75
Figura 37. Numeración de los tramos en el cultivo ----------76
Figura 38. Cálculo del sistema escalable.----------81
Figura 39. Ejemplo de la interfaz de una hectárea----------82
Figura 40. Distribución de los Sensores en el cultivo. ----------83
Figura 41. Adaptación Xbee con Explorer USB. ----------91

Nomenclatura

- CS: Cantidad de surcos
- $P_{Humedo:}$ Peso del suelo húmedo
- $P_{Seco:}$ Peso del suelo seco
- $C_{Agua:}$ Cantidad de agua a suministrar
- PT: Profundidad del terreno en metros
- SS: Distancia de separación entre surcos metros
- CG: Cantidad de goteros por surco
- AT: Ancho del terreno metros
- SG: Distancia de separación entre goteros en metros
- CGT: Cantidad de goteros totales en el sistema
- Q_{Sis} : Caudal del sistema m^3/s
- Q_{Sur} : Caudal por surco m^3/s
- TG: Caudal de salida del gotero m^3/s
- ATP: Área de la tubería primaria
- TP: Diámetro Tubería primaria en metros
- ATS: Área de la tubería secundaria
- TS: Diámetro de la tubería secundaria en metros
- LTP: Longitud de la tubería primaria en metros
- LTS: Longitud de la tubería secundaria en metros
- MS :Medición digital del sensor
- R_e : Número de Reynolds

- ρ : Densidad $^{kg}/_{m^3}$
- μ : Viscosidad del fluido $^{N \cdot s}/_{m^3}$
- $\in$: Rugosidad en milímetros
- $\frac{\in}{D}$: Rugosidad relativa
- $\in_{Absoluta}$: Rugosidad absoluta
- f : Factor de fricción
- V_P : Velocidad en la tubería primaria $^{m}/_{s}$
- V_S : Velocidad en la tubería secundaria $^{m}/_{s}$
- HF_P : Pérdidas por fricción de la tubería primaria en m
- HF_S : Pérdidas por fricción de la tubería secundaria en m
- HA_P : Pérdidas por accesorios de la tubería primaria en m
- HA_S : Pérdidas por accesorios de la tubería secundaria en m
- g: Gravedad
- K: Coeficiente de resistencia por accesorios (codos, uniones)
- h_T : Sumatoria de pérdidas por fricción y por accesorios del sistema en m
- h_A : Cabezal dinámico de la bomba en m
- Z_1 : Altura en el punto de succión a partir del punto de referencia en m
- Z_2 : Altura en el punto de descarga a partir del punto de referencia en m
- P_2 : Presión necesaria en el punto de descarga bar
- γ : Peso específico del fluido.

- P_{neta} : Potencia neta de la bomba *watts*
- CS: Calibración del sensor para el suelo arenoso.

INTRODUCCIÓN

El riego es una forma de combatir el déficit de agua o humedad, en los suelos. En los cultivos esta aportación no se realiza de modo continuo, existiendo diferentes métodos para el cumplimiento de esta labor, tales como el riego manual y los diferentes tipos de riego automatizados, por ejemplo, el riego por goteo, riego hidropónico, riego por aspersión o por nebulización. (Peery, 2017) Por lo tanto, se ha desarrollado un sistema de riego automatizado para un cultivo de maíz, realizando una lectura de humedad en el suelo por medio de sensores de humedad. La lectura hecha por los sensores será procesada mediante módulos Xbee (Router), siendo enviada de forma inalámbrica a un módulo Xbee (Coordinador) que estará conectado a un centro de control donde se puede visualizar la variación de la variable humedad a través de una interfaz. Esta interfaz permite al usuario exportar los datos registrados durante el funcionamiento y adicional seleccionar el tipo de suelo, ya sea limoso, arcilloso o arenoso. Los datos enviados al centro de control son usados para realizar la activación o desactivación de la bomba.

Los Xbee son un pequeño chip, capaz de comunicarse de forma inalámbrica unos con otros. Pueden hacer cosas, como reemplazar un par de cables en una comunicación serial.

Para la puesta en marcha del sistema de riego, se desarrolló un programa el permite calcular los parámetros para la implementación del sistema en el cultivo, dependiendo de las dimensiones del terreno.

Finalmente, se ha construido una estructura, con el fin de demostrar el funcionamiento del envío de datos inalámbricos, entre la bomba, los sensores y la interfaz de monitoreo.

Capítulo 1

1.1 Antecedentes

1.1.1 Cultivo de Maíz

En Colombia se ha cultivado maíz en casi todos los ecosistemas en donde ha existido la agricultura, con mayor intensidad en las tierras bajas tropicales del Caribe y en las zonas templadas y frías de la región Andina. (Espinosa, 2005)

Los primeros brotes de la semilla de maíz a partir de su siembra ocurren entre 8 y 10 días. El terreno para el cultivo de maíz se prepara teniendo en cuenta la separación de los surcos entre 0.8 hasta 1 m, y la separación entre la siembra es de 20 a 25 cm. La profundidad a la que se siembra la semilla es aproximadamente de 5 cm. El tallo es simple erecto, de elevada longitud alcanzando los 4 metros de altura, siendo robusto y sin ramificaciones. (derivados, s.f.)

Máquinas diseñadas para la siembra de maíz, como por ejemplo las sembradoras, son calibradas para depositar una semilla cada 20 cm, espaciando los surcos entre 70 o 80 cm, esta distancia puede variar entre 70 y 90 cm, dependiendo de la pendiente del terreno. (Rojas, 2015)

Algunos problemas debido a la escasez de agua en los cultivos, acompañada de temperaturas elevadas ocasionan marchitez prematura, siendo frecuente la necrosis del ápice de las hojas (planthogar, s.f.). Otros problemas producidos por la baja humedad son: el marchitamiento, plantas atrofiadas, las hojas rizadas, tamaño más pequeño en las hojas, puntas secas y quemadas causando pérdida de calidad en los cultivos (Peery, 2017). Los cultivos tienen momentos críticos por escasez de agua, que, si no se subsanan, se traducen en pérdidas de rendimiento o falta de germinación (Admindefinca, 2014).

1.1.2 Sistemas de Riego

El sistema de riego por goteo usa goteros con caudales variables entre 0,6 hasta 12L/h, aunque la mayoría de los modelos comerciales no superan los 6L/h. Los goteros se dividen en dos categorías: compensantes y no compensantes. Los primeros mantienen el caudal constante con independencia de la presión en la tubería. Los segundos, modifican su caudal en función de la presión. (itdUPM, 2017)

La Universidad Tecnológica del Norte del Coahuila, México desarrolló un sistema de riego que tiene el objetivo de optimizar el uso del agua a través de un mecanismo de riego automatizado, este facilita la irrigación mediante un sensor que monitorea el estado de humedad de la tierra, regando al objeto únicamente cuando necesite el agua; si el nivel de humedad es bajo, se enciende el sistema a través de electroválvulas, si por el contrario el nivel de humedad es alto, el sistema se apaga. (Medrano, 2017)

Por otra parte, la Pontificia Universidad Javeriana, diseñó un sistema capaz de automatizar el riego por goteo de un invernadero empleando un módulo inalámbrico de tecnología RF cuyo funcionamiento estará determinado por la información programada por el operario de riego o mediante mediciones de humedad del suelo. (Rodolfo Agudelo Dueñas, 2005)

En la Conferencia Internacional sobre Procesamiento y Comunicación de Señales, se realizó un diseño el cual automatiza el proceso de riego, reduciendo la intervención manual y las pérdidas de agua. Es más útil en los lugares donde se ve más la escasez de agua. Consta de 2 sensores que toman los valores de temperatura del entorno y el nivel de humedad del suelo. La salida de estos sensores se entrega al ADC y luego al microcontrolador. El microcontrolador compara los valores de los sensores con los valores del umbral y acciona el relé que controla el motor. (I. Srilikhitha, 2017)

1.1.3 Sensores

Varias metodologías han sido desarrolladas para evaluar la humedad del suelo tanto en campo como en laboratorio, dentro de las que se destacan: mediciones gravimétricas, bloques de resistencia eléctrica, tensiómetros, sondas de neutrones, radares, satélites infrarrojos, entre otros. De estas metodologías, una buena alternativa para la adquisición de datos es el uso de sensores de humedad del suelo, dado que estos permiten estudiar el contenido de agua al interior del perfil del suelo a diferentes escalas temporales y espaciales. (Botero, 2014)

Algunos sistemas de riego automatizados basados en la detección del contenido de humedad del suelo, tienen un mecanismo de encender y apagar una bomba de agua al momento de la detección del contenido de humedad del suelo. (R. Vagulabranan, 2016)

En el proyecto realizado por el Instituto de Automática (INAUT) de la Universidad Nacional de Argentina se describen las características de un sensor capacitivo de humedad de suelos. Cada sensor incluye un sistema de comunicación digital que permite conectar hasta 32 sensores en una red RS-485. (Capraro)

Sin embargo, el uso de sensores de humedad no solo es utilizado para sistemas de riego, por ejemplo, (Yemlahi, 2009) diseñó e implementó una estación meteorológica que mide temperatura, humedad relativa y nivel de lluvia acumulada. El sistema utiliza un sensor resistivo para medir la temperatura, dos sensores capacitivos para medir la humedad relativa y un sensor para medir la lluvia.

Por otra parte, el Ingeniero Electromecánico Héctor Manuel Vega en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, desarrolló un sistema que a la vez que controla un intervalo

de humedad para que las plantas tengan un buen crecimiento, también realiza protección contra heladas las cuales al presentarse pueden producir grandes pérdidas en las cosechas. El dispositivo se ha desarrollado para que de una forma sencilla y económica se automatice cualquier sistema de riego ya instalado en diferentes tipos de suelos simplemente conectándolo a cambio del pulsador de encendido de la bomba de riego. (Vega, 1994)

1.1.4 Comunicación Inalámbrica

Uno de los objetivos de la agricultura de precisión, es el riego de acuerdo con las necesidades particulares de cada porción del suelo en el cultivo.

En el artículo de investigación de agronomía de la Revista de Ciencias Agrícolas, se describe el diseño e implementación de una red de sensores inalámbricos que es capaz de obtener mediciones de humedad del suelo de diferentes zonas de un cultivo de fresas y, según los datos recogidos, determina el tiempo de riego y la zona particular que se debe regar utilizando el método de goteo. La comunicación entre los nodos de la red se basa en la pila de protocolos ZigBee, y el prototipo final es un sistema de control de riego de encendido/apagado en lazo cerrado, que incluye una banda de histéresis. (Castro, 2015)

Existen diferentes protocolos de comunicación inalámbrica las cuales son implementadas de acuerdo con las necesidades. En la revista “Mechanical and Civil Engineering”, se publicó el diseño de un sistema de riego automático, el cual funciona mediante el uso de Bluetooth o GSM. Este dispositivo es ubicado en la tierra del cultivo, el cual monitorea la humedad y la temperatura de la tierra del cultivo , adicional a esto monitorea el estado del clima a través de la temperatura y humedad del clima, enviando mensajes de texto al usuario informando acerca de las condiciones del cultivo, el aumento de temperatura, contenido de agua en la tierra, etc. (Pavithra D. S, 2014)

Por parte del II Simposio Nacional de Ingeniería Hortícola, se presenta un caso práctico de un ensayo en cerezo, con diferentes tratamientos de riego, donde se han adoptado de forma paralela un sistema cableado y otro inalámbrico con el objetivo de obtener criterios de selección que permitan discernir cuando es más apropiado utilizar una tecnología u otra. La red de sensores inalámbrica (WSN) cuenta con un nodo de comunicación por punto de medida, utilizando protocolo Zigbee y una configuración topológica en estrella. El acceso a los datos se realiza a través de un radio – enlace WIFI con un proveedor local de internet. (R. Torres, 2016)

Efraín Mayhua López, de la Universidad Carlos II de Madrid (España) presentó el desarrollo de un sistema de gestión inteligente de riego por goteo utilizando una red de sensores inalámbricos tipo ZigBee. (Lopez, 2016)

1.2 Planteamiento del problema

La humedad del suelo en un cultivo puede experimentar variaciones continuas a través del tiempo por distintas razones.

Un exceso de agua puede darse debido a lluvias abundantes o continuas, o también por un riego no controlado. En estos casos donde los niveles de agua superan los límites establecidos del cultivo, provocan un estado llamado punto de saturación el cual indica, que todos los espacios del suelo se encuentran llenos de agua, llegada esta situación, la planta le es imposible desarrollarse por falta de aire.

Por otro lado, la escasez de agua en los suelos se debe a razones como la evapotranspiración por altas temperaturas, el drenaje a capas profundas, por escorrentía superficial, por vientos o ausencia de lluvia. A causa de esto se llega a niveles bajos de agua o humedad en el suelo, que por tiempos prolongados provoca un estado llamado punto de marchitamiento, el cual indica que la planta no puede absorber agua por escasez, haciendo complicado su desarrollo. (Zaballos, 2006) (Vega, 1994)

En el campo, los cultivadores destinan periodos de tiempo para la supervisión y riego del cultivo, ignorando factores como la humedad durante el resto del tiempo. En algunos casos las visitas para la supervisión y riego del cultivo no se realizan en los tiempos adecuados, sumándole a esto las temperaturas altas, el drenaje a las capas profundas, entre otros factores que conllevan a la sequía, generando el estado de estrés hídrico. Por lo tanto, un sistema de riego automatizado y controlado por medio de sensores de humedad daría solución a la pregunta problema propuesta en la formulación del problema de investigación.

1.3 Justificación y pregunta de Investigación

Se desea diseñar un sistema de riego automatizado y controlado por medio de sensores de humedad para un cultivo de maíz, con el objetivo de evitar el estado de estrés hídrico. Cuando el cultivo se ve afectado por este efecto la aparición de estigmas puede retrasarse, generando una falta de sincronización entre la liberación del polen provocando una mala polinización, lo que reduce el potencial de rendimiento.

Adicional, las hojas de la planta se enrollan sobre sí mismas debido al estrés hídrico para reducir la pérdida de agua. Este enrollamiento reduce la capacidad fotosintética y síntesis de carbohidratos, lo que puede resultar también en una reducción de rendimiento. (Guide, 2009)

A consecuencia de esto la producción del cultivo se ve afectada, reduciendo significativamente las ganancias.

¿Cómo evitar que el cultivo de maíz llegue al estado de estrés hídrico?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de riego automatizado para un cultivo de maíz, realizando la lectura de humedad del suelo por medio de sensores, efectuando la transmisión de datos vía inalámbrica.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar un sistema de detección de humedad.
- Diseñar e implementar un sistema de adquisición de datos de forma remota.
- Desarrollar una interfaz para la operación, visualización de variables y monitoreo del sistema de riego.
- Realizar la integración del sistema de detección de humedad, la automatización de la bomba y la interfaz para la operación y monitoreo del sistema de riego, en una estructura para la muestra experimental.
- Diseñar un sistema de riego que permita ser escalado.

1.5 Alcances

- Se diseñó una estructura para demostrar el funcionamiento de la adquisición de datos por medio de los sensores de humedad, siendo estos datos enviados de forma inalámbrica para la activación o desactivación de la bomba.
- El diseño del sistema de riego se realizó con base en la semilla de maíz porva o también conocido como maíz Simijaca.

1.6 Limitaciones

- El sistema de riego diseñado no será implementado por cuestiones de costos y disponibilidad de terreno.
- Para la demostración de la integración de los sistemas, no se dispone de un suministro de agua, por lo tanto, se hará uso de un tanque con agua como suministro, este será diseñado por los autores del proyecto.
- Este proyecto propuso evitar que el cultivo llegara al punto de estrés hídrico, pero no realiza ningún procedimiento llegado al punto de saturación, causado por abundantes lluvias u otra situación.

1.7 Metodología

De acuerdo con el tipo de investigación empírico-analítica, se realizaron las tareas y actividades correspondientes a los objetivos específicos planteados, para dar cumplimiento al objetivo general.

Para el desarrollo del sistema de detección de humedad a partir de sensores de humedad se inició realizando una investigación sobre los diferentes sensores y sus compatibilidades con los dispositivos de control. Una vez seleccionado el sensor, se realizaron las pruebas pertinentes para verificar su funcionamiento. Posterior a esto se usó el sensor para determinar los valores analógicos de punto de marchitez y capacidad de campo en los diferentes tipos de suelos.

Para la adquisición de datos del sensor, se consultaron sobre las diferentes formas de comunicación teniendo en cuenta que los dispositivos fueran capaces de realizar una conversión análoga-digital (ADC).

Luego de realizar la conversión análoga-digital (ADC) se buscó la forma de enviar la información vía inalámbrica, teniendo en cuenta parámetros como el rango de transmisión de datos, consumo energético y costos.

Después de enviar la información vía inalámbrica, se desarrolló un programa capaz de procesar los datos enviados, con el objetivo de implementar un control ON-OFF con histéresis para el encendido y apagado de la bomba haciendo uso de la información. Se realizaron pruebas de funcionamiento para comprobar el sistema de control ON-OFF con HISTERESIS.

Posteriormente se diseñó el sistema de riego escalable para el cultivo de maíz, iniciando con una consulta concerniente a la plantación del cultivo, para poder definir la distancia de separación entre los surcos y la distancia de separación entre cada siembra de maíz a lo largo de los surcos.

Con el fin de diseñar el sistema de riego escalable, fue necesario consultar acerca de: la mecánica de fluidos para seleccionar las tuberías y calcular las pérdidas del sistema, potencia mecánica para la selección de la bomba y consultar acerca de análisis de suelos para la distribución de los sensores de humedad.

Una vez se definió el sistema de mangueras y tuberías se analizaron las posibles formas de distribución sobre el cultivo de maíz.

Por otro lado, para la interacción del sistema de riego con el usuario, se desarrolló una interfaz en el mismo lenguaje de programación que se desarrolló el sistema de control, con el fin de brindarle facilidad de manejo, visualización y operación.

Por último, se construyó una estructura compuesta por: un circuito de tuberías con dos goteros para simular el sistema de riego escalable, dos materas con tierra ubicadas debajo de los goteros para simular el cultivo, la instalación del sistema de detección de humedad en las materas y el sistema de adquisición de datos de forma remota.

Finalmente, la integración del sistema se dejó en funcionamiento por un periodo para ver su funcionamiento.

Capítulo 2

Con este proyecto se diseñó un sistema de riego escalable, compuesto por un sistema de detección de humedad, donde se realiza una lectura a través de sensores de humedad expresada en voltaje apartado 2.1.1.1 distribuidos en diferentes puntos del cultivo. Estos voltajes adquiridos por el sensor serán transformados en una señal digital a través de un conversor análogo-digital (ADC) realizada por los módulos Xbee Routers para ser enviados a un módulo Xbee Coordinador. Los datos recibidos por el Xbee Coordinador serán adquiridos en un computador realizando una comunicación serial entre el computador y el módulo Xbee Coordinador. Una vez procesados los datos en el computador se seleccionan los bytes de la trama API correspondientes a la lectura análoga, ver apartado 2.1.2.7 y se realiza un promedio entre todas las lecturas recibidas por los Xbee Routers, provenientes de los sensores. El fin de este promedio es mantenerlo en el rango, entre la reserva fácilmente utilizable y capacidad de campo, debido a que en este umbral la planta se desarrolla apropiadamente en las diferentes etapas de crecimiento.

Estos puntos de estrés hídrico y capacidad de campo se determinan dependiendo del tipo de suelo. En el proyecto se usaron tres tipos de suelos, suelo limoso, arcilloso y arenoso. Para conocer estos puntos, los diferentes suelos fueron llevados al punto de marchitez y de capacidad de campo, ver apartado 2.1.1.1. Logrado esto, se ingresó el sensor en cada suelo en los diferentes puntos y se obtuvieron los valores analógicos correspondientes al punto de marchitez y de capacidad de campo con los cuales trabajará el sistema de control ON – OFF con el fin de enviar la señal de encendido o apagado de la bomba.

2.1 Desarrollo Ingenieril

El proyecto de grado fue desarrollado de acuerdo con la metodología, en donde se fueron cumpliendo cada uno de los objetivos propuestos, para así cumplir con el objetivo general.

2.1.1 Sistema de detección de humedad

Para dar cumplimiento al primer objetivo específico se seleccionó el sensor de humedad capaz de realizar la lectura de humedad y entregar una señal análoga, con el fin de captar los valores de humedad del suelo en el cultivo. Se consultaron los sensores de humedad capacitivos, resistivos y conductivos. Seleccionando para este proyecto el sensor conductivo debido a sus capacidades, funcionamiento y costo. En la Tabla 1 se muestra una matriz de comparación de criterios para la selección del sensor de humedad.

Parámetros	Capacitivo	Resistivo	Conductivo
Error	≥ 0.5%	-	≥ 1.5%
Costo	$10.000 COP	$21.100 COP	$4.500 COP
Funcionalidad con el Proyecto	Con salida análoga	Con salida análoga	Con salida análoga

Tabla 1. Comparación de los sensores de humedad

Fuente: Autores, con base en: (Kouro)

Parámetros	% de Importancia	Capacitivo	Resistivo	Conductivo
Error	30%	5	4	5
Costo	40%	3	5	5
Funcionalidad para el proyecto	30%	5	5	5
Puntuación Total	100%	**4,333333333**	**4,666666667**	**5**

Tabla 2. Comparación de los sensores de humedad

Fuente: Autores.

El sensor FC-28 conductivo cuenta con una pequeña placa, la cual entrega directamente el valor analógico expresado en voltaje al controlador. El valor analógico del sensor es obtenido

mediante una tarjeta que trabaja a 5V. La tarjeta tiene conectada una placa que funciona como resistencia, que en presencia de conductividad disminuye su valor, creando una caída de voltaje en el pin análogo, con la cual se realiza la lectura analógica del sensor entre 0 y 5 voltios.

Se usaron tres de cuatro pines del sensor, la alimentación (VCC) que debe ser de 5V, el pin tierra (GND) y el pin análogo.

- VCC debe ser de 5V.
- GND debe estar conectado a la tierra común.
- A0 es el pin de datos analógicos.

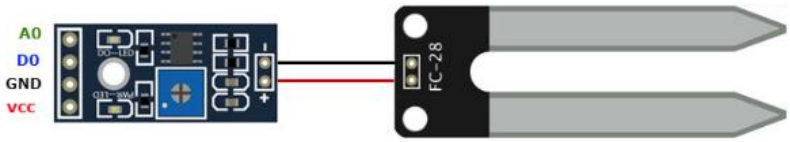


Figura 1. Diagrama de conexión de pines

Fuente: Autores

Una vez configurado el sensor de humedad, se realizaron pruebas ingresando el sensor de humedad en un vaso de agua, visualizando los cambios de voltaje con la ayuda de un multímetro para verificar la lectura analógica.

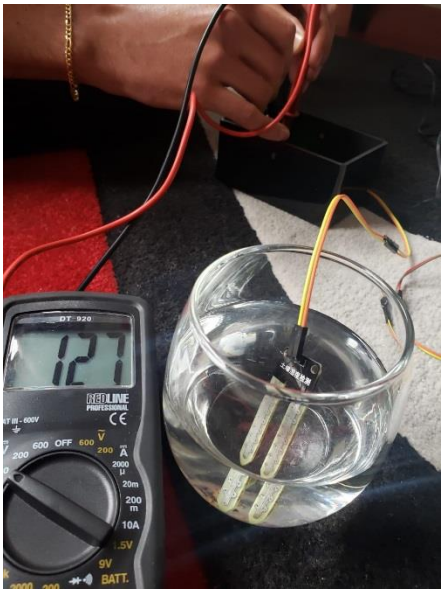


Figura 2. Medición de voltaje con el sensor en agua

Fuente: Autores

Figura 3. Medición de voltaje con el sensor fuera del agua

Fuente: Autores.

2.1.1.1 Punto de marchitez y capacidad de campo

La capacidad de campo y punto de marchitez son los límites que definen la necesidad de agua en un cultivo para su desarrollo. El agua contenida en el suelo entre la capacidad de campo y el punto de marchitez es el agua capaz de absorber el sistema radical del cultivo, por lo que para el cálculo de las necesidades de agua es necesario tener en cuenta estos límites, que varían en función del tipo de suelo. (EcuRed, 2011)

- Punto de Marchitez: Corresponde al agua fijada alrededor de las partículas o agua de adhesión, de manera que no está disponible para las plantas por lo que éstas no pueden desarrollarse. (Vega, 1994)
- Capacidad de Campo: Corresponde al agua de cohesión alrededor y entre las partículas en una adecuada combinación agua – aire, de manera que la planta puede desarrollarse en forma óptima. (Vega, 1994)
- Punto de Saturación: Es el estado en el cual todos los espacios del suelo se encuentran llenos de agua; en esta situación la planta no puede desarrollarse por falta de aire. (Vega, 1994)
- Reserva Fácilmente Utilizable: Es el estado o el punto en el que se evita que el suelo se acerque demasiado a su punto de marchitamiento. Con la reserva fácilmente utilizable se pueden calcular los puntos límites para el funcionamiento del sistema; se ubica el valor de la reserva fácilmente utilizable lejos del punto de marchitamiento y se sitúan los porcentajes de humedad límites para el encendido y apagado del sistema de riego. (Vega, 1994)

A partir de estas definiciones, se realizaron los cálculos para llevar el suelo arenoso, limoso y arcilloso a los puntos de marchitez y capacidad de campo, con el fin de hallar los límites de encendido y apagado de la bomba, con base en (Juan M. Enciso, 2007) de la siguiente forma:

1. Se calcula la densidad del suelo aparente.

$$\rho AS = \frac{P_{Seco}}{Volumen_{Suelo}} \tag{1}$$

2. Se calcula el contenido gravimétrico de agua.

El contenido gravimétrico es una medida directa de la humedad del suelo, y es el método estándar para calibrar otras técnicas de determinación del agua en el suelo. (Juan M. Enciso, 2007)

$$C_{Grav} = \frac{C_{Vol}}{\frac{\rho AS}{\rho_{Agua}}} \tag{2}$$

3. Se calcula el peso de suelo húmedo.

$$P_{Humedo} = P_{Seco} + \frac{C_{Grav} \cdot P_{Seco}}{100} \tag{3}$$

4. Cálculo de cantidad de agua a suministrar.

$$C_{agua} = P_{Humedo} - P_{Seco} \tag{4}$$

5. Cálculo de la cantidad de volumen de agua.

$$\rho_{Agua} = 997 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{1m^3}{1000000\,ml} \cdot \frac{1000g}{1kg} = 0.997\,{}^{g}\!/_{ml} \tag{5}$$

$$Vol_{Agua} = \frac{C_{agua}}{\rho_{agua}} \tag{6}$$

Donde:

- ρAS : Densidad del suelo aparente
- P_{seco} : Peso del suelo seco

- C_{Grav} : Contenido gravimétrica en %
- C_{Vol} : Contenido volumétrico
- ρ_{Agua} : Densidad del agua
- P_{Humedo} : Peso del suelo húmedo
- Vol_{Agua} : Cantidad de volumen de agua
- C_{agua} : Cantidad de agua a suministrar

El contenido volumétrico depende del tipo de suelo, ver Tabla 3.

El contenido volumétrico es comúnmente utilizado para expresar el contenido de agua en el suelo, es una medida numérica, porcentual, de la humedad del suelo.(Juan M. Enciso, 2007)

Textura del suelo	Contenido Volumetrico en %	
	Punto de Marchitez	Capacidad de Campo
Arenoso	4 - 5	10
Limoso	11 - 15	22 - 30
Arcilloso	18 - 22	35 - 40

Tabla 3. Contenido volumétrico de humedad

Fuente: Autores, con base en (Vega, 1994) (Juan M. Enciso, 2007)

Los valores de contenido volumétrico porcentual tomados para los puntos de marchitez y capacidad de campo para los diferentes tipos de suelo, son el punto medio de los valores del punto de marchitez y capacidad de campo de la Tabla 3.

- Suelo Arenoso

El suelo arenoso fue colado. Seguido de esto, fue llevado a un horno casero en donde estuvo alrededor de 6 horas, se extrajo, se pesó y se ingresó nuevamente al horno. A las 8 horas se extrajo y se evidencio variación de peso, y se volvió a ingresar al horno. A las 10 horas se pesó de nuevo y no hubo variación de peso por lo que se concluyó que estaba en sequia total. Estas fueron las condiciones de sequía para la muestra de suelo arenoso.

Adicional a esto, la tierra fue compactada con una presión de aproximada a $\frac{600N}{100cm^2}$, que corresponde a la presión que puede hacer el peso de una persona contra el suelo con su pie al realizar fuerza, con el fin de evitar espacios entre las partículas de suelo arenoso dentro del recipiente.

Para el cálculo del punto de marchitez y capacidad de campo se tomó una muestra ubicada en un recipiente circular de PVC con dimensiones de 39mm de altura y $16.7mm$ de radio. El peso de esta muestra fue tomado a través de una balanza gramera y su volumen fue calculado de la siguiente manera:

$$Vol = A \cdot h \tag{7}$$

Donde:

- h : Altura del recipiente.
- A : Área del recipiente $A = \pi \cdot r^2 = 876.159mm^2$
- Volumen de suelo seco= $876.159mm^2 \cdot 39mm = 34170.2mm^3$
- Densidad aparente de suelo: $\rho AS = \frac{50g}{34170.2mm^3} = 0.001463\,{}^{g}\!/_{mm^3}$ (8)
- Contenido gravimétrico: $C_{Grav} = \frac{4.5\%}{\frac{0.001463\,{}^{g}\!/_{mm^3}}{0.000977\,{}^{g}\!/_{mm^3}}} = 3.06664\%$ (9)

- Peso suelo húmedo:

$$P_{Humedo} = 50g + \frac{3.06664 \cdot 50g}{100} \qquad (10)$$
$$P_{Humedo} = 51.53g$$

Para calcular la cantidad de agua que hay que suministrarle al suelo seco se resta él P_{Humedo} y el P_{Seco}, obteniendo lo siguiente:

$$C_{Agua} = P_{Humedo} - P_{Seco}$$
$$C_{Agua} = 51.53g - 50g = 1.53g \qquad (11)$$

Para llevar este suelo arenoso seco al punto de marchitez se agregaron 1.53g de agua haciendo uso de una jeringa. Para esto se calculó el C_{Agua} en mililitros, ver ecuación 4 y 5.

Una vez llevado el suelo arenoso al punto de marchitez, se inició con la activación del sensor, para luego ingresarlo asegurando que toda la placa conductiva del sensor quedara enterrada en el suelo compacto, por último, se esperó a que la señal se estabilizara para obtener el valor analógico arrojado por el sensor. El resultado obtenido del punto de marchitez expresado en voltaje usando el sensor fue de 3.74 V.

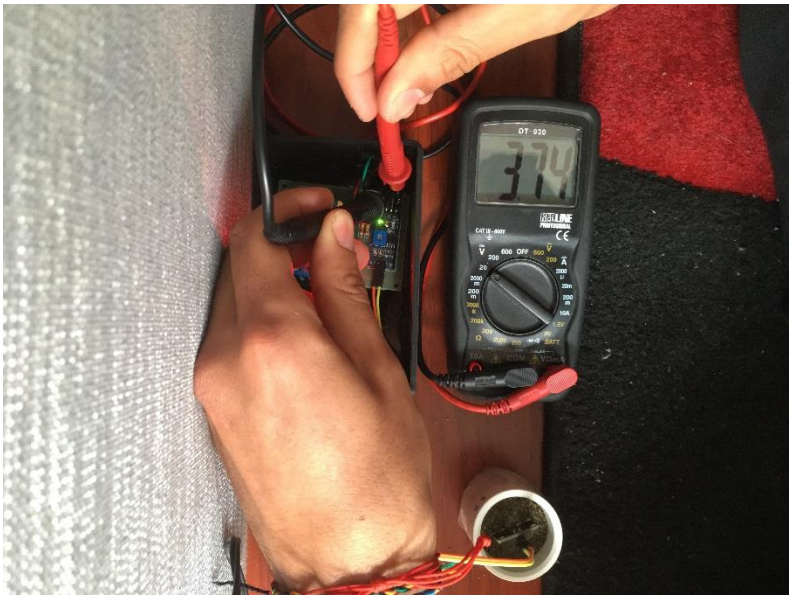


Figura 4. Medición de voltaje en el punto de marchitez del suelo arenoso.

Fuente: Autores

Se repite el proceso para obtener la de capacidad de campo, usando un valor de contenido volumétrico del 10 %. El resultado obtenido de la capacidad de campo expresado en voltaje usando el sensor fue de 2.63 V.

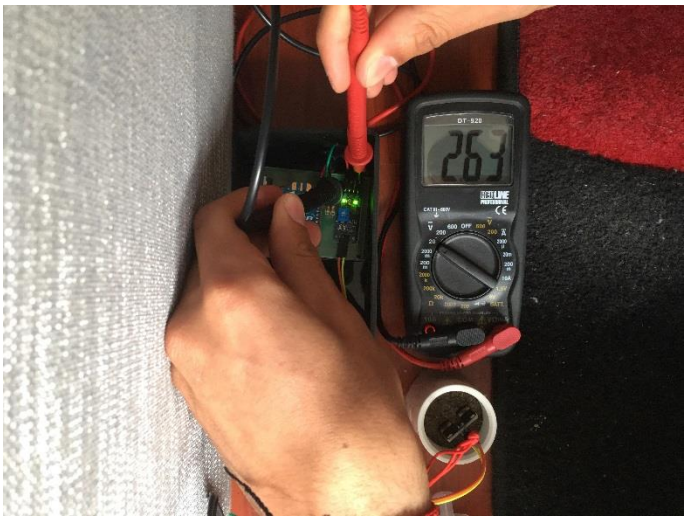


Figura 5. Medición de voltaje para la capacidad de campo del suelo arenoso.

Fuente: Autores.

- Suelo Limoso

El suelo limoso fue colado. Seguido de esto, fue llevado a un horno casero en donde estuvo alrededor de 6 horas, se extrajo, se pesó y se ingresó nuevamente al horno. A las 8 horas se extrajo y se evidencio variación de peso, y se volvió a ingresar al horno. A las 10 horas se pesó de nuevo y no hubo variación de peso por lo que se concluyó que estaba en sequia total. Estas fueron las condiciones de sequía para la muestra de suelo limoso.

Adicional a esto, la tierra fue compactada con una presión de aproximada a $\frac{600N}{100cm^2}$, que corresponde a la presión que puede hacer el peso de una persona contra el suelo con su pie al realizar fuerza, con el fin de evitar espacios entre las partículas de suelo arenoso dentro del recipiente.

Para el cálculo del punto de marchitez y capacidad de campo se tomó una muestra ubicada en un recipiente circular de PVC con dimensiones de $40mm$ altura y $16.7mm$ de radio. El peso de esta muestra fue tomado a través de una balanza gramera y su volumen fue calculado de la siguiente manera:

$$Vol = A \cdot h \tag{12}$$

Donde:

- h : Altura del recipiente.
- A : Área del recipiente $A = \pi \cdot r^2 = 876.159mm^2$
- Volumen de suelo seco$= 876.159mm^2 \cdot 40mm = 35046.4mm^3$

➢ Densidad de suelo: $\rho AS = \frac{49g}{35046.4mm^3} = 0.001398\,{}^{g}\!/_{mm^3}$ (13)

- Contenido gravimétrico: $C_{Grav} = \dfrac{13\%}{\dfrac{0.001398\ {}^{g}/_{mm^3}}{0.000977\ {}^{g}/_{mm^3}}} = 9.2711\%$ (14)

- Peso suelo húmedo: $$P_{Humedo} = 49g + \frac{9.2711 \cdot 49g}{100}$$ $$P_{Humedo} = 53.5134g$$ (15)

Para calcular la cantidad de agua que hay que suministrarle al suelo seco se resta él P_{Humedo} y el P_{Seco}, obteniendo lo siguiente:

$$C_{Agua} = P_{Humedo} - P_{Seco}$$ $$C_{Agua} = 53.5134g - 49g = 4.51g$$ (16)

Para llevar el suelo limoso al punto de marchitez se agregaron 4.51 g de agua haciendo uso de una jeringa. Para esto se calculó el C_{Agua} en mililitros, ver ecuación 4 y 5.

Una vez llevado el suelo limoso al punto de marchitez, se inició con la activación del sensor, para luego ingresarlo asegurando que toda la placa conductiva del sensor quedara enterrada en el suelo compacto, por último, se esperó a que la señal se estabilizara para obtener el valor analógico arrojado por el sensor. El resultado obtenido del punto de marchitez expresado en voltaje usando el sensor fue de 2.91 V.

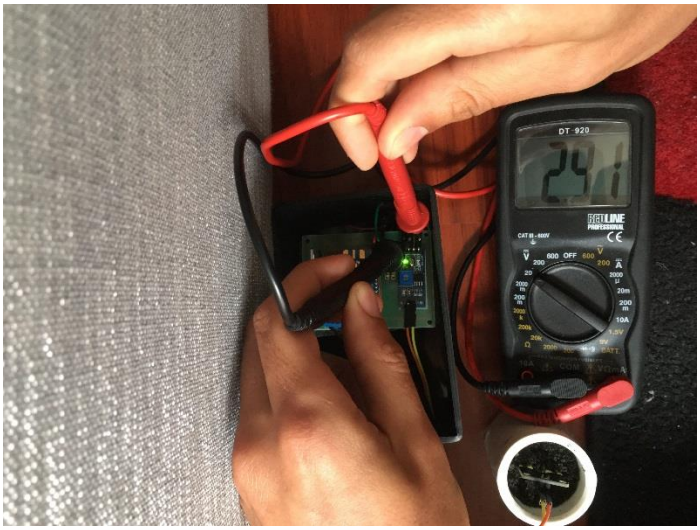


Figura 6. Medición de voltaje para el punto de marchitez del suelo limoso.

Fuente: Autores

Se repite el proceso para obtener la de capacidad de campo, usando un valor de contenido volumétrico del 26 %. El resultado obtenido de la capacidad de campo expresado en voltaje usando el sensor fue de 2.11 V.

Figura 7. Medición de voltaje para la capacidad de campo del suelo limoso.

Fuente: Autores

- Suelo Arcilloso

El suelo arcilloso fue colado. Seguido de esto, fue llevado a un horno casero en donde estuvo alrededor de 6 horas, se extrajo, se pesó y se ingresó nuevamente al horno. A las 8 horas se extrajo y se evidencio variación de peso, y se volvió a ingresar al horno. A las 10 horas se pesó de nuevo y no hubo variación de peso por lo que se concluyó que estaba en sequia total. Estas fueron las condiciones de sequía para la muestra de suelo arcilloso.

Adicional a esto, la tierra fue compactada con una presión de aproximada a $\frac{600N}{100cm^2}$, que corresponde a la presión que puede hacer el peso de una persona contra el suelo con su pie al realizar fuerza, con el fin de evitar espacios entre las partículas de suelo arenoso dentro del recipiente.

Para el cálculo del punto de marchitez y capacidad de campo se tomó una muestra ubicada en un recipiente circular de PVC con dimensiones 35mm de altura y $16.7mm$ de radio. El peso de esta muestra fue tomado a través de una balanza gramera y su volumen fue calculado de la siguiente manera:

$$Vol = A \cdot h \tag{17}$$

Donde:

- h : Altura del recipiente.
- A : Área del recipiente $A = \pi \cdot r^2 = 876.159mm^2$
- Volumen de suelo seco$= 876.159mm^2 \cdot 35mm = 30665.55mm^3$
- Densidad de suelo: $\rho AS = \frac{40g}{30665.55mm^3} = 0.0013043\,{}^{g}\!/_{mm^3}$ (18)
- Contenido gravimétrico: $C_{Grav} = \frac{20\%}{\frac{0.0013043\,{}^{g}\!/_{mm^3}}{0.000977\,{}^{g}\!/_{mm^3}}} = 15.2878\%$ (19)

- Peso suelo húmedo:

$$P_{Humedo} = 40g + \frac{15.2878 \cdot 40g}{100} \qquad (20)$$
$$P_{Humedo} = 46.11g$$

Para calcular la cantidad de agua que hay que suministrarle al suelo seco se resta él P_{Humedo} y el P_{Seco}, obteniendo lo siguiente:

$$C_{Agua} = P_{Humedo} - P_{Seco}$$
$$C_{Agua} = 46.11g - 40g = 6.11g \qquad (21)$$

Para llevar el suelo arcilloso al punto de marchitez se agregaron 6.11 g de agua haciendo uso de una jeringa. Para esto se calculó el C_{Agua} en mililitros, ver ecuación 4 y 5.

Una vez llevado el suelo arcilloso al punto de marchitez, se inició con la activación del sensor, para luego ingresarlo asegurando que toda la placa conductiva del sensor quedara enterrada en el suelo compacto, por último, se esperó a que la señal se estabilizara para obtener el valor analógico arrojado por el sensor. El resultado obtenido del punto de marchitez expresado en voltaje usando el sensor fue de 2.83 V.

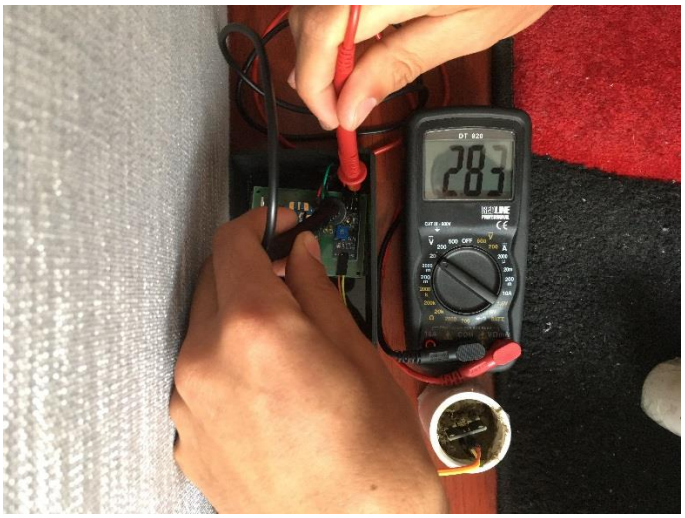


Figura 8. Medición de voltaje para el punto de marchitez del suelo arcilloso.
Fuente: Autores

Se repite el proceso para obtener la de capacidad de campo, usando un valor de contenido volumétrico del 37.5 %. El resultado obtenido de la capacidad de campo expresado en voltaje usando el sensor fue de 1.75 V.

Figura 9. Medición de voltaje para la capacidad de campo del suelo arcilloso.
Fuente: Autores

Todas estas mediciones fueron utilizadas para hallar el rango de operación para la activación y desactivación del sistema de riego, para dar uso a estas mediciones, se llevaron hasta los módulos Xbee donde se realiza el procesamiento de los datos, pero antes pasaron por un divisor de voltaje, y posteriormente convirtiendo la señala análoga a digital para hacer uso de los datos. Los datos para el manejo del sistema serán observados en el apartado 2.1.3

2.1.1.2 Calibración del Sensor

Para calibrar el sensor se realizó el mismo procedimiento que se usó en los puntos de marchitez y capacidad de campo en los diferentes tipos de suelo. Esta vez se tomaron puntos

intermedios de contenido volumétrico entre el punto de marchitez y capacidad de campo del suelo arenoso entre 4.5 y 10 respectivamente. Los puntos intermedios tomados y su correspondiente resultado son mostrados en la Tabla 4.

Contenido Volumetrico (Cvol) %	Voltaje (V)
3	4,22
4,5	3,67
6	3,26
7,5	2,94
9	2,75
10,5	2,61
12	2,56

Tabla 4. Puntos intermedios para la calibración del sensor.

Fuente: Autores

Con la ayuda de la herramienta Excel, se tomaron los valores de la Tabla 4 y se realizó la curva de calibración como se observa en la Figura 10.

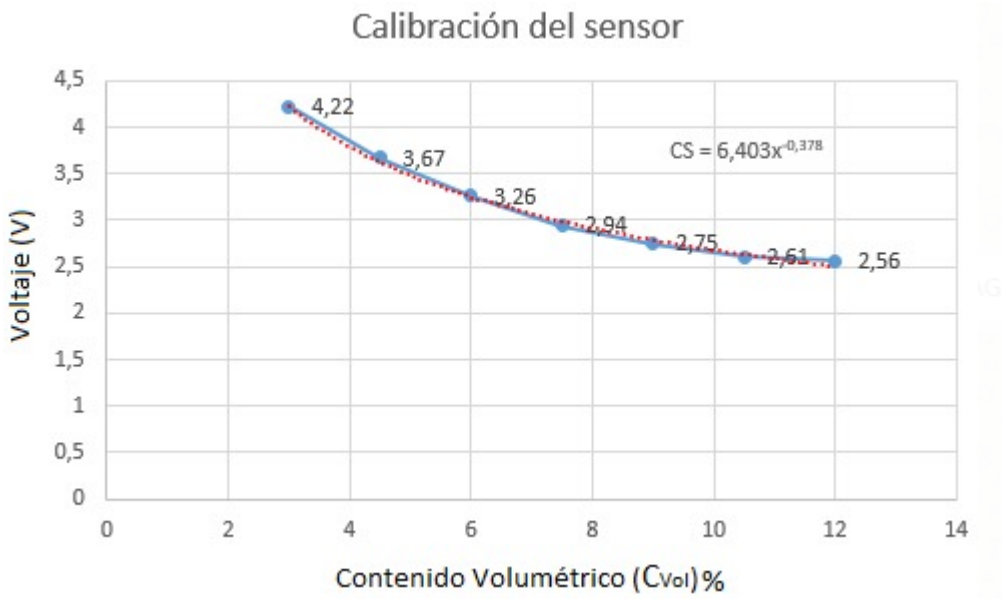


Figura 10. Curva de calibración del sensor.

Fuente: Autores.

2.1.2 Sistema de adquisición de datos de forma inalámbrica

Para dar cumplimiento al objetivo específico número dos, se necesitaba transmitir datos de forma inalámbrica, con el fin de enviar los valores de humedad adquiridos por los sensores sin necesidad de un cableado en él cultivo; igualmente enviar la señal de encendido o apagado de la bomba. Se encontraron diferentes métodos para realizar estas acciones. Estos métodos son: un microcontrolador en conjunto con módulo wifi, microcontrolador en conjunto con módulo Bluetooth o un Xbee S2C, seleccionando este último para la ejecución del proyecto, debido a que este módulo Xbee S2C es capaz de realizar la lectura análoga digital (ADC) y transmitir la información de forma inalámbrica, sin la necesidad de otro dispositivo. A continuación, se muestra en la Tabla 5 una matriz de comparación de criterios entre los módulos Wifi, Bluetooth y la tecnología usada por el módulo Xbee S2C (Zigbee).

Parámetros	Módulo Wifi ESP8266	Módulo Bluetooth Hc-06	Módulo Xbee S2C
Capacidad máxima de transmisión	-	160 kbps 1 Mbps	250 kbps 1 Mbps
Rango de Alcance	15 - 30 metros	10 metros	60 metros interior 1200 metros exterior
Costo	$32.000 COP	$26.000 COP	$90.000 COP
Consumo de Potencia	225 mA	40 mA	45 mA
Modo Sleep	SI	NO	SI
Habilitado para ADC	SI	NO	SI

Tabla 5. Comparación de las tecnologías inalámbricas.

Fuente: Autores, con base en: (DIGI), (Caldas), (Promotec, s.f.)

Parámetros	% de Importancia	Wifi	Bluetooth	Zigbee
Capacidad máxima de transmisión	5%	-	4	5
Rango de Alcance	20%	3	2	5
Costo	25%	5	5	3
Consumo de Potencia	5%	2	5	5
Modo Sleep	5%	5	0	5
Habilitado para ADC	40%	5	0	5
Puntuación Total	100%	4.2%	2.1	4.5

Tabla 6. Comparación de las tecnologías inalámbricas

Fuente: Autores con base en (MovilTronics, s.f.) (DomoDesk, s.f.)

2.1.2.1 Módulo Xbee S2C

Los módulos de radio Xbee tienen un voltaje de operación entre 2.1V y 3.6V, los cuales trabajan con la tecnología Zigbee. Estos módulos están compuestos por 20 pines de los cuales 13 pines son entradas y salidas digitales y tiene 4 entradas análogas. Sus especificaciones técnicas son mostradas a continuación.

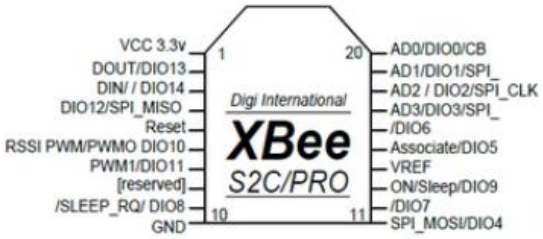


Figura 11. Configuración de pines Xbee S2C.

Fuente: MCI Electroncis

S2C			
Especificaciones	Voltaje de operación: 2.1 – 3.6V Corriente de operación: 33mA@3.3V Rango en interiores: 60 metros Rango en línea vista: 1200 metros Max valor lectura analógica: 1.2V	Pines I/O: 13 Entradas analógas: 4 *Configurable como red mesh* *Red auto reparable*	Firmware: Zigbee, Digimesh, 802.15.4 Velocidad de transmisión RF: 250kbps Frecuencia: 2.4GHz - 2.5GHz Temperatura operación: -40 a 85°C

Figura 12. Especificaciones Xbee S2C.

Fuente: MCI Electronics

Estos módulos Xbee pueden ser programados de acuerdo al rol. Para el proyecto, fue necesario programar un Xbee Coordinador en modo (API) y tres Routers en modo (AT). A continuación, se explican cada uno de los roles que se pueden asignar al Xbee y seguido de esto se explican los modos (AT y API).

2.1.2.2 Roles Xbee

- **Coordinador:** Se requiere uno en cada red. bajo el requerimiento de que no supere una cantidad mayor a 255 nodos. Se encarga de configurar la red. No podrá entrar en modo "dormir" debido a que, si se activa esta opción, toda la red estaría "durmiendo".
- **Router:** Pueden existir múltiples en una red. bajo el requerimiento de que no supere una cantidad mayor a 255 nodos. Pueden redirigir los mensajes a otros Routers o "End Devices" (Dispositivo final). No pueden entrar en modo "dormir".
- **End Device:** Pueden existir múltiples en una red. No pueden redirigir mensajes y pueden entrar en modo "dormir". (Electronics)

2.1.2.3 Modos de Xbee

- **Transparente (AT):** Los dispositivos actúan como un reemplazo de cable serial. Cuando los datos son recibidos, el dispositivo envía los datos a través del puerto serial. Utiliza la interfaz de modo de comando AT para configurar los parámetros del dispositivo.
- **Comando (API):** Basada en tramas, amplía el nivel en que una aplicación host puede interactuar con las capacidades de red del dispositivo. Cuando está en modo API, el dispositivo contiene todos los datos que entran y salen en marcos que definen operaciones o eventos dentro del dispositivo. (Electronics)

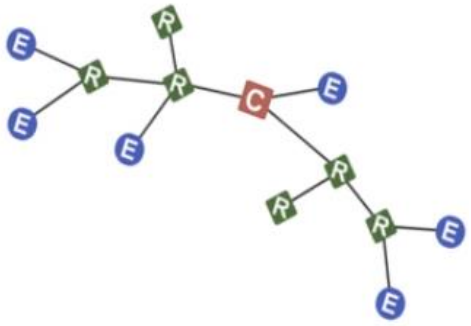


Figura 13. Roles de los Xbee S2C
Fuente: MCI Electronic

2.1.2.4 Topologías Xbee

Los módulos Xbee tienen diferentes topologías, como los son estrella, árbol y malla. Para el proyecto se utilizó la topología de estrella, debido a que no era necesario hacer transmisión de datos a través de dispositivos Routers, únicamente enviando la información directamente al Coordinador.

- **Topología Estrella:** En esta configuración todos los dispositivos en la red solo pueden comunicarse con el coordinador PAN

- **Topología Malla:** Una red punto a punto puede tomar diferentes formas mediante la definición de las restricciones de los dispositivos que pueden comunicarse entre sí.

- **Topología Árbol:** En este caso, un coordinador de Zigbee, establece la red inicial. Los Routers Zigbee son los encargados de formar las ramas y transmitir los mensajes.

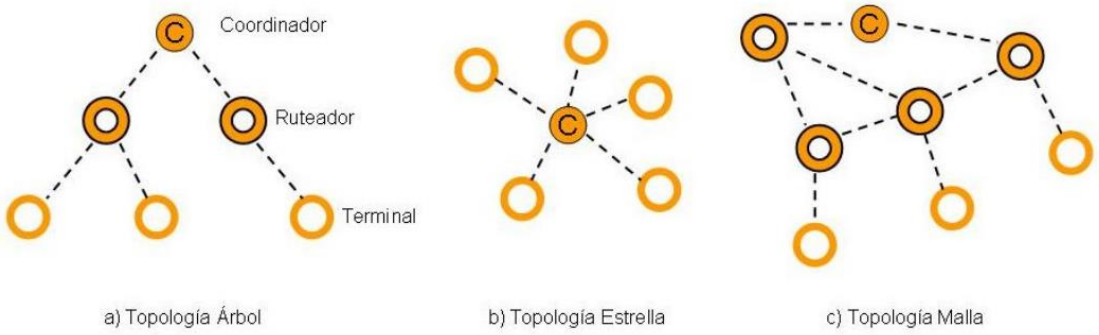


Figura 14. Topologías Zigbee
Fuente: (Santana, 2015)

2.1.2.5 Configuración de los Xbee

La programación del Xbee S2C se realizó mediante un programa creado por el fabricante DIGI llamado XCTU, descargándose directamente de la página de DIGI. Una vez se realizó la descarga, se procedió a conectar el dispositivo al computador para así poder acceder a la configuración del módulo. Ver Anexos, apartado configuración inicial Xbee. Se inició configurando el Xbee coordinador de la siguiente manera:

- Configuración del Xbee Coordinador

La conexión de este dispositivo con rol de "Coordinador" se conecta directamente al computador, y se debe configurar en modo comando (API).

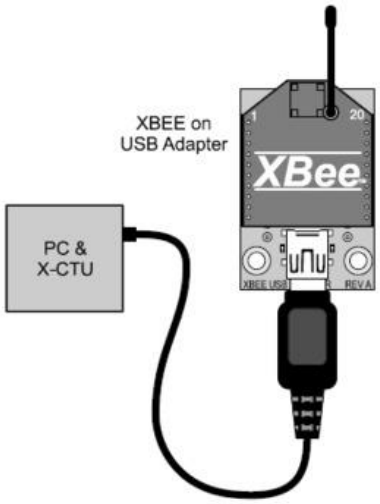


Figura 15. Conexión del Coordinador al computador
Fuente: Tutorial Arduino – Conexión Xbee punto a punto

1. Como paso inicial se configuró el parámetro PAN ID o el identificador de red, este parámetro puede ser un valor cualquiera de cuatro dígitos, el cual debe ser el mismo en los Xbee Router.

2. Para que este dispositivo adquiriera el rol de coordinador se seleccionó “Enabled” en el ítem “Coordinator Enable”.
3. Por último, se habilitó el modo API para este Xbee coordinador seleccionando “API Enabled” en el ítem “API Enable”.

Una vez realizada esta configuración, quedó el Xbee coordinador listo para usar con dicho rol.

- Configuración del Xbee Router

La conexión de este dispositivo con rol de “Router” se conecta al computador de igual forma que el Xbee coordinador, y se debe configurar en modo comando (AT).

1. Para la configuración del PAN ID o identificador de red de este módulo, fue necesario ingresar el mismo valor con el cual se configuró el Xbee coordinador
2. Luego de digitar el mismo PAN ID que se digitó en el Xbee coordinador, se habilitó la búsqueda de canales, para que este Xbee Router fuera capaz de encontrar el Xbee coordinador con el mismo PAN ID. Esta acción se configuró en el ítem “Channel Verification” seleccionando “Enabled” se habilitó la búsqueda de canales.
3. Debido a que este Xbee tendrá el rol de Router, se selecciona “Disable” en el ítem “Coordinator Enable”.
4. Se configuro el Xbee Router en modo de trabajo (AT) en el ítem “API Enable”, seleccionando “Transparent mode”.
5. Se configuró el pin 20 como salida digital conectado a un led piloto para la verificación bilateral entre Xbee Coordinador y los Xbee Routers, y el pin 19 como entrada análoga (ADC) conectado a el pin análogo de la tarjeta FC-28.

6. Por último, se configuró el tiempo de muestreo de cada Xbee Router en el ítem "IO Sample Rate", asignando el tiempo de muestreo de un segundo.

2.1.2.6 Integración del sensor de humedad con el módulo Xbee S2C

Se realizó la integración del sensor de humedad con los módulos Xbee, para hacer posible la recepción de datos vía inalámbrica. Para integrar el sensor de humedad con el módulo inalámbrico Xbee S2C se tuvo en cuenta el voltaje máximo de la lectura análoga, siendo de 1.2 voltios, ver Figura 11. Debido a que la salida análoga del sensor de humedad es de 1.75 a 4.61 voltios, se realizó un divisor de voltaje para ajustar el valor análogo del sensor al Xbee de la siguiente manera:

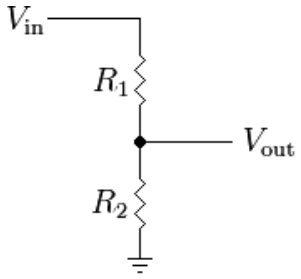


Figura 16. Divisor de voltaje

Fuente: Autores

Donde:

$V_{in} = 4.61V$
$R_1 = 82k\Omega$
$R_2 = 27k\Omega$

$$V_{out} = \frac{4.61V \cdot 27k\Omega}{82k\Omega + 27k\Omega} = 1.14V \quad (22)$$

Luego se realizó el montaje eléctrico entre el sensor de humedad y el módulo Xbee S2C en el programa Online Circuit Maker y así mismo se diseñó la PCB. A continuación, se muestra el circuito de esta lectura de datos y la PCB.

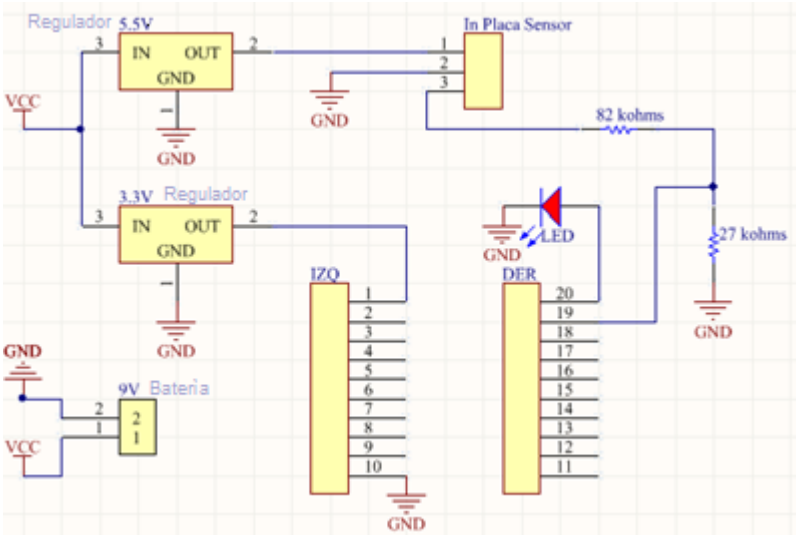


Figura 17. Circuito eléctrico FC-28 y Xbee S2C

Fuente: Autores

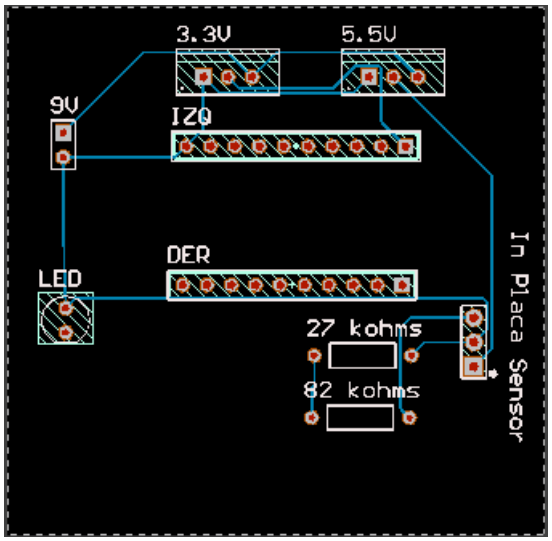


Figura 18. PCB del sensor y el Xbee S2C

Fuente: Autores

Los circuitos eléctricos fueron realizados en el programa Circuit Maker Online, la ruta de acceso es la siguiente:

- Ingresar al navegador y buscar el nombre del programa.

- Iniciar sesión con los siguientes datos:
  Usuario: sjgastelbondo@hotmail.com
  Contraseña: SantiG2299

- Dar clic en mis proyectos y se encontrará el proyecto llamado Circuito Final Xbee.

2.1.2.7 Recepción de datos con Matlab

Luego de realizar el montaje eléctrico del sensor de humedad con el módulo Xbee S2C, se desarrolló un programa en el software Matlab, donde se leen los datos recibidos por el módulo Xbee S2C coordinador. El Xbee coordinador maneja los datos en trama API, ver Figura 18.

Trama API para recepción de datos I/O	Byte	Ejemplo	Descripción
	0	0x7E	Byte de inicio - indica el comienzo del paquete de datos (frame)
	1	0x00	
	2	0x14	
	3	0x92	Tipo de frame 0x92 indica que es un muestreo de las entradas del XBee
	4	0x00	Dirección de origen de 64-bit (número de serie)
	5	0x13	MSB es el byte 4, LSB es el byte 11
	6	0xA2	
	7	0x00	
	8	0x40	
	9	0x8B	
	10	0x78	
	11	0x4E	
	12	0xA4	Dirección de 16-bit de la red de origen
	13	0x02	
	14	0x01	Opciones de recepción: 01 = Packet acknowledged 02 = Broadcast packet
	15	0x01	Número de muestras. Siempre debe ser 1 dadas las limitaciones de XBee
	16	0x00	Máscara para el canal digital, indica que pines estan configurados como DIO
	17	0x30	
	18	0x01	Máscara para el canal análogo, indica cuales pines están configurados como ADC
	19	0x00	Lectura de los canales digitales. Estos dos bytes contienen los estados de
	20	0x20	los pines configurados como DIO
	21	0x02	Lectura del canal análogo.
	22	0x0C	Cada canal entrega 2 bytes con el resultado de la lectura del ADC
	23	0x20	Checksum (0xFF - la suma de todos los bytes desde el byte 3 a hasta el último)

Figura 19. Trama API para la recepción de datos.
Fuente: Autores, con base en (Electronics)

El programa fue desarrollado para realizar la lectura de la trama API. Debido a que no es necesario utilizar todos los bytes, se seleccionaron los bytes 21 y 22 correspondientes a la lectura del canal análogo.

El desarrollo de este programa se profundiza en la sección 2.1.5, y el código comentado se encuentra en la sección de anexos.

2.1.2.8 Integración de los módulos Xbee con la bomba

Se realizó la integración de la bomba con los módulos Xbee, para hacer posible él envió de la señal de encendido y apagado de la bomba la cual se hace a través de un módulo relé de la siguiente forma:

- Debido a que la bomba cuenta con 3 cables, la fase se abre para ser interrumpida por el módulo relé conectado al nodo común y al contacto normalmente abierto, que mediante una señal de corriente en el pin (IN), abre o cierra el contacto para permitir el paso de corriente, ver Figura 20.

Figura 20. Conexión de la bomba y el módulo relé.

Fuente: Autores.

El módulo relé cuenta con 6 pines los cuales son:

- GND: Tierra del módulo
- VCC: 5V
- IN: es la señal de activación.
- NO: Normalmente abierto
- NC: Normalmente cerrado
- C: Nodo común.

Para el control del módulo relé se integró un módulo Xbee, en donde se conectó el pin 20 del Xbee al pin (IN) del módulo relé, dando la señal de activación a partir del módulo Xbee.

A continuación, se muestra el circuito eléctrico y la PCB diseñada.

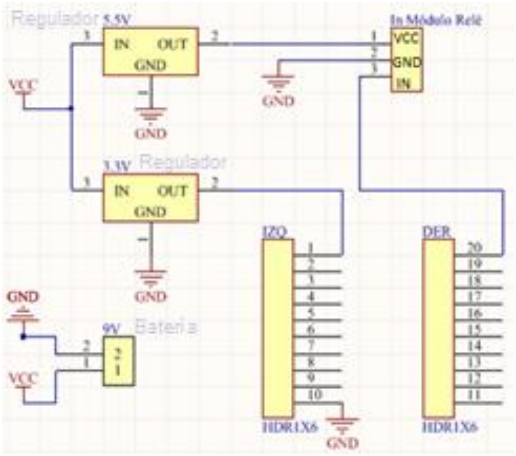


Figura 21. Circuito módulo relé y la bomba

Fuente: Autores

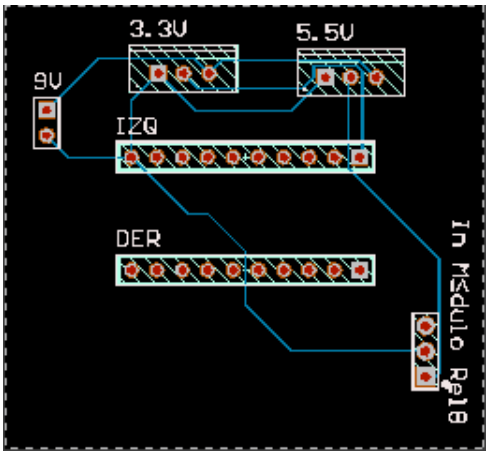


Figura 22. PCB del módulo relé y la bomba

Fuente: Autores

Los circuitos eléctricos fueron realizados en el programa Circuit Maker Online, la ruta de acceso es la siguiente:

- Ingresar al navegador y buscar el nombre del programa.
- Iniciar sesión con los siguientes datos:
  Usuario: sjgastelbondo@hotmail.com

Contraseña: SantiG2299

- Dar clic en mis proyectos y se encontrará el proyecto llamado Circuito Final bomba.

2.1.2.9 Envió de datos con Matlab

Luego de realizar el montaje eléctrico de la bomba con el módulo Xbee S2C, se agregó al programa de Matlab la forma de enviar la señal de encendido o apagado a través del pin 20, “Digital Out High” y “Digital Out Low” respectivamente. Para el envío de datos se usó la trama de comandos AT, ver Figura 23.

Trama API para envío de comandos AT remotos	Byte	Ejemplo	Descripción
	0	0x7E	Byte de inicio – indica el comienzo del paquete de datos (frame)
	1	0x00	Largo – Número de bytes (ChecksumByte# – 1 – 2)
	2	0x10	
	3	0x17	Tipo de mensaje - 0x17 significa que es solicitud de comando AT
	4	0x01	Frame ID – secuencia del paquete
	5	0x00	Dirección de destino de 64-bi t(número de serie)
	6	0x13	MSB es el byte 5, LSB es el byte 12
	7	0xA2	
	8	0x00	0x0000000000000000 = Coordinador
	9	0x40	0x000000000000FFFF = Broadcast
	10	0x8B	
	11	0x78	
	12	0x4E	
	13	0xFF	Dirección de la red de destino
	14	0xFE	(configúralo como 0xFFFE para enviar un bodcast)
	15	0x02	Opción del comando remoto (configuralo como 0x02 para aplicar los cambios)
	16	0x44 (D)	Nombre del comando AT (Dos caracteres ASCII)
	17	0x34 (2)	
	18	0x05	Parámetro del comando
	19	0x25	Checksum

Figura 23. Trama AT para el envío de datos.
Fuente: Autores, con base en (Electronics)

A través de la trama API para el envío de comandos AT se realizó la activación de la señal en el pin 20 vía inalámbrica, para el encendido o apagado de la bomba.

2.1.3 Interfaz para la operación, visualización y monitoreo del sistema.

Para la operación, monitoreo del sistema de riego y visualización de la variable humedad expresada en voltaje porcentual el cual va de 0% a 100%, con un rango de voltaje 0V a 1.2V se desarrolló una interfaz la cual dio cumplimiento al objetivo número tres. La primera fase del programa consta de la inicialización de variables y la inicialización de la bandera en 0, el usuario selecciona el tipo de suelo ya sea, suelo arcilloso, suelo limoso o suelo arenoso, con esto el programa interpreta el punto de estrés hídrico, la reserva fácilmente utilizable y el punto de capacidad de campo. De igual forma que se midieron los voltajes en los puntos de estrés hídrico y capacidad de campo directamente a la salida del sensor en la sección 2.1.1.1, aquí se midieron los voltajes a la entrada análoga en el Xbee y los valores obtenidos se muestran en la Tabla 4

Mediciones de Voltaje (V)		
Suelo	**Salida Analoga del Sensor**	**Entrada Analoga del Sensor**
Al aire Libre	4,61	1,14
Punto de Marchitez Suelo Arenoso	3,74	0,91
Punto de Marchitez Suelo Limoso	2,91	0,71
Punto de Marchitez Suelo Arcilloso	2,83	0,69
Capacidad de Campo Suelo Arenoso	2,63	0,64
Capacidad de Campo Suelo Limoso	2,11	0,51
Capacidad de Campo Suelo Arcilloso	1,75	0,41
Sumergido en Agua	1,27	0,31

Tabla 7. Mediciones de voltaje

Fuente: Autores

A continuación, se mostrará el procedimiento hecho para hallar los puntos de marchitez y capacidad de campo que se usaran para hallar el rango de operación del sistema en los diferentes tipos de suelo.

Como se observa en la Tabla.7, los puntos de marchitez de los diferentes suelos tienen una medición de voltaje mayor a los puntos de capacidad de campo. Esto se debe a que a mayor

presencia de conductividad el sensor reduce su voltaje en la salida análoga, por lo tanto, cuando se tenga un suelo con humedad alta el voltaje será bajo y cuando se tenga un suelo con poca humedad se tendrá un voltaje alto, esto a la salida análoga del sensor. Para invertir este proceso se realizó en la programación lo siguiente:

Dado que el Xbee funciona de 0 a 1.2 voltios con 10 bits, la máxima lectura digital que tendrá será de 1023 en decimal cuanto lleguen a 1.2 voltios a la entrada análoga. Por lo tanto, se agregó un condicional de **1023-LecturaDigital** para invertir la lectura. Ejemplo:

- Si se recibe un voltaje de **1.2V** que corresponde a sequia total, este marcará una lectura máxima digital correspondiente a **1023** en decimal, pero debido al condicional de **1023-LecturaDigital**, el resultado seria **1023-1023=0**, por lo tanto el sistema determinara que 0 corresponderá a una **sequita total**, o si se recibe un voltaje de **0V** que corresponde a humedad máxima, la lectura digital marcará una lectura digital de **0**, pero por el condicional de **1023-LecturaDigital**, el resultado seria **1023-0=1023**, por lo tanto el sistema determinara que 1023 corresponde a una **humedad máxima**. Dejando determinado de esta forma que a mayor humedad mayor lectura digital.

Posterior a definir una lectura ascendente en la programación, se tomaron los valores digitales arrojados por el programa al momento de medir los diferentes puntos de capacidad de campo y punto de marchitez en los diferentes suelos, y se observarán en la siguiente tabla:

Parametrización del sensor		
Entrada análoga del Xbee	Valor Trama API	Valor Decimal
1,14	3EA	1002
0,91	326	806
0,71	27B	635
0,69	26A	618
0,64	240	576
0,51	1D1	465
0,41	17B	379

Tabla 8. Lectura Digital de los Puntos de Marchitez y Capacidad de Campo en los diferentes tipos de suelo

Fuente: Autores

Con la Tabla 8 se tomaron los valores, se ingresaron a Excel y se obtuvo una ecuación para mostrar el proceso que realiza internamente el programa para transformar la señal de entrada análoga del Xbee a la señal digital final que se utilizará para la operación del sistema resultando de la siguiente forma:

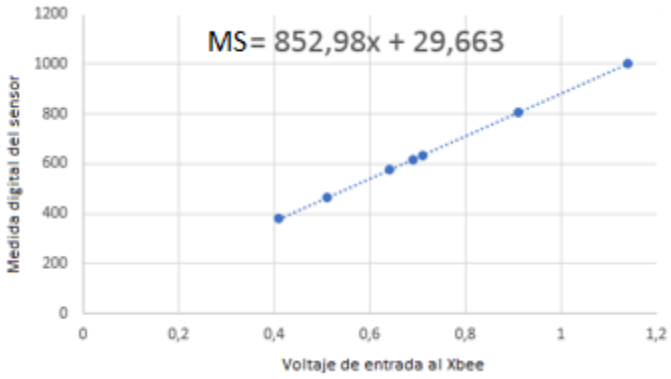


Figura 24. Ecuación de transformación de señal Análoga a Digital

Fuente: Autores

- Suelo Limoso:

Para obtener el rango de operación en el programa se halló el punto de marchitez y capacidad de campo para el suelo limoso haciendo uso de la ecuación de transformación de señal análoga a digital que se observa en la Figura.24 de la siguiente forma:

- Suelo Limoso punto de marchitez:

$$\begin{aligned} MS &= 852.98x + 29.663 \\ MS &= 852.98(0.71) + 29.663 \\ MS &= 635 \end{aligned} \tag{23}$$

Donde MS: Valor en decimal de la conversión análoga digital

Para convertir este valor digital en porcentaje se realiza lo siguiente:

$$\begin{aligned} V(\%) &= \frac{1023 - 635}{1023} \cdot 100 \\ V &= 37.9\% \end{aligned} \tag{24}$$

De esta forma obtenemos el límite de punto de marchitez que se usara en la programación para el suelo limoso.

- Suelo Limoso capacidad de campo:

$$\begin{aligned} MS &= 852.98x + 29.663 \\ MS &= 852.98(0.51) + 29.663 \\ MS &= 464 \end{aligned} \tag{25}$$

Donde MS: Valor en decimal de la conversión análoga digital

Para convertir este valor en porcentaje se realiza lo siguiente:

$$\begin{aligned} V(\%) &= \frac{1023 - 464}{1023} \cdot 100 \\ V &= 54.57\% \end{aligned} \tag{26}$$

De esta forma obtenemos el límite de capacidad de campo que se usara en la programación para el suelo limoso.

- Suelo Arenoso:

Para obtener el rango de operación en el programa se halló el punto de marchitez y capacidad de campo para el suelo arenoso haciendo uso de la ecuación de transformación de señal análoga a digital que se observa en la Figura.24 de la siguiente forma:

- Suelo Arenoso punto de marchitez:

$$\begin{aligned} MS &= 852.98x + 29.663 \\ MS &= 852.98(0.91) + 29.663 \\ MS &= 805 \end{aligned} \tag{27}$$

Donde MS: Valor en decimal de la conversión análoga digital

Para convertir este valor de voltaje en porcentaje se realiza lo siguiente:

$$\begin{aligned} V(\%) &= \frac{1023-805}{1023} \cdot 100 \\ V &= 21.22\% \end{aligned} \tag{28}$$

De esta forma obtenemos el límite de punto de marchitez que se usara en la programación para el suelo arenoso.

- Suelo Arenoso capacidad de campo:

$$\begin{aligned} MS &= 852.98x + 29.663 \\ MS &= 852.98(0.64) + 29.663 \\ MS &= 575 \end{aligned} \tag{29}$$

Donde MS: Valor en decimal de la conversión análoga digital

$$V(\%) = \frac{1023 - 575}{1023} \cdot 100$$
$$V = 43.73\% \quad (30)$$

De esta forma obtenemos el límite de capacidad de campo que se usara en la programación para el suelo arenoso.

- Suelo Arcilloso:

Para obtener el rango de operación en el programa se halló el punto de marchitez y capacidad de campo para el suelo arcilloso haciendo uso de la ecuación de transformación de señal análoga a digital que se observa en la Figura.24 de la siguiente forma:

- Suelo Arcilloso punto de marchitez:

$$MS = 852.98x + 29.663$$
$$MS = 852.98(0.69) + 29.663 \quad (31)$$
$$MS = 618$$

Donde MS: Valor en decimal de la conversión análoga digital

Para convertir este valor de voltaje en porcentaje se realiza lo siguiente:

$$V(\%) = \frac{1023 - 618}{1023} \cdot 100$$
$$V = 39.56\% \quad (32)$$

De esta forma obtenemos el límite de punto de marchitez que se usara en la programación para el suelo arcilloso.

- Suelo Arcilloso capacidad de campo:

$$MS = 852.98x + 29.663$$
$$MS = 852.98(0.41) + 29.663 \quad (33)$$
$$MS = 379$$

Donde MS: Valor en decimal de la conversión análoga digital

Para convertir este valor de voltaje en porcentaje se realiza lo siguiente:

$$V(\%) = \frac{1023 - 379}{1023} \cdot 100 \quad (34)$$
$$V = 62.91\%$$

De esta forma obtenemos el límite de capacidad de campo que se usara en la programación para el suelo arcilloso.

Finalmente, para evitar que el cultivo tenga esfuerzos al momento de absorber agua del suelo se selecciona el rango de operación entre la reserva fácilmente utilizable y la capacidad de campo, donde la reserva fácilmente utilizable es el punto medio entre el punto de marchitez y la capacidad de campo, evitando así que el suelo se acerque al límite de punto de marchitez y dando facilidad a la planta para su desarrollo. A continuación, en la Tabla 5 se muestran cómo quedan los rangos de operación del sistema para cada tipo de suelo:

Suelo	Estado del Suelo	(%)
Suelo Arenoso	Punto de Marchitez	21,22
	Reserva Facilmente Utilizable	32,47
	Capacidad de Campo	43,73
Suelo Limoso	Punto de Marchitez	37,9
	Reserva Facilmente Utilizable	46,24
	Capacidad de Campo	54,57
Suelo Arcilloso	Punto de Marchitez	39,59
	Reserva Facilmente Utilizable	51
	Capacidad de Campo	62,51

Figura 25. Rangos de operación con los que funciona el sistema en los diferentes tipos de suelo.

Fuente: Autores.

Por otro lado, en la interfaz el usuario debe ingresar la cantidad de sensores de su cultivo, con el fin de reconocer la cantidad de dispositivos distribuidos, y hallar la humedad promedio en el terreno, realizando el promedio de todas las lecturas hechas por los sensores y enviadas por los Xbee Router.

Una vez ingresadas estas variables, el usuario decide si da inicio al proceso, el cual consiste en iniciar la comunicación serial, con el fin de recibir datos. Luego de recibir estos datos se realiza el procesamiento de acuerdo con la humedad, teniendo en cuenta el punto de estrés hídrico y de capacidad de campo del tipo de suelo seleccionado al inicio. El procesamiento de los datos realizados envía la acción de encendido o apagado de la bomba.

Cuando el usuario desea finalizar el proceso, el programa le permite exportar los datos obtenidos en la gráfica a el programa Excel con el fin de hacer un registro de humedad.

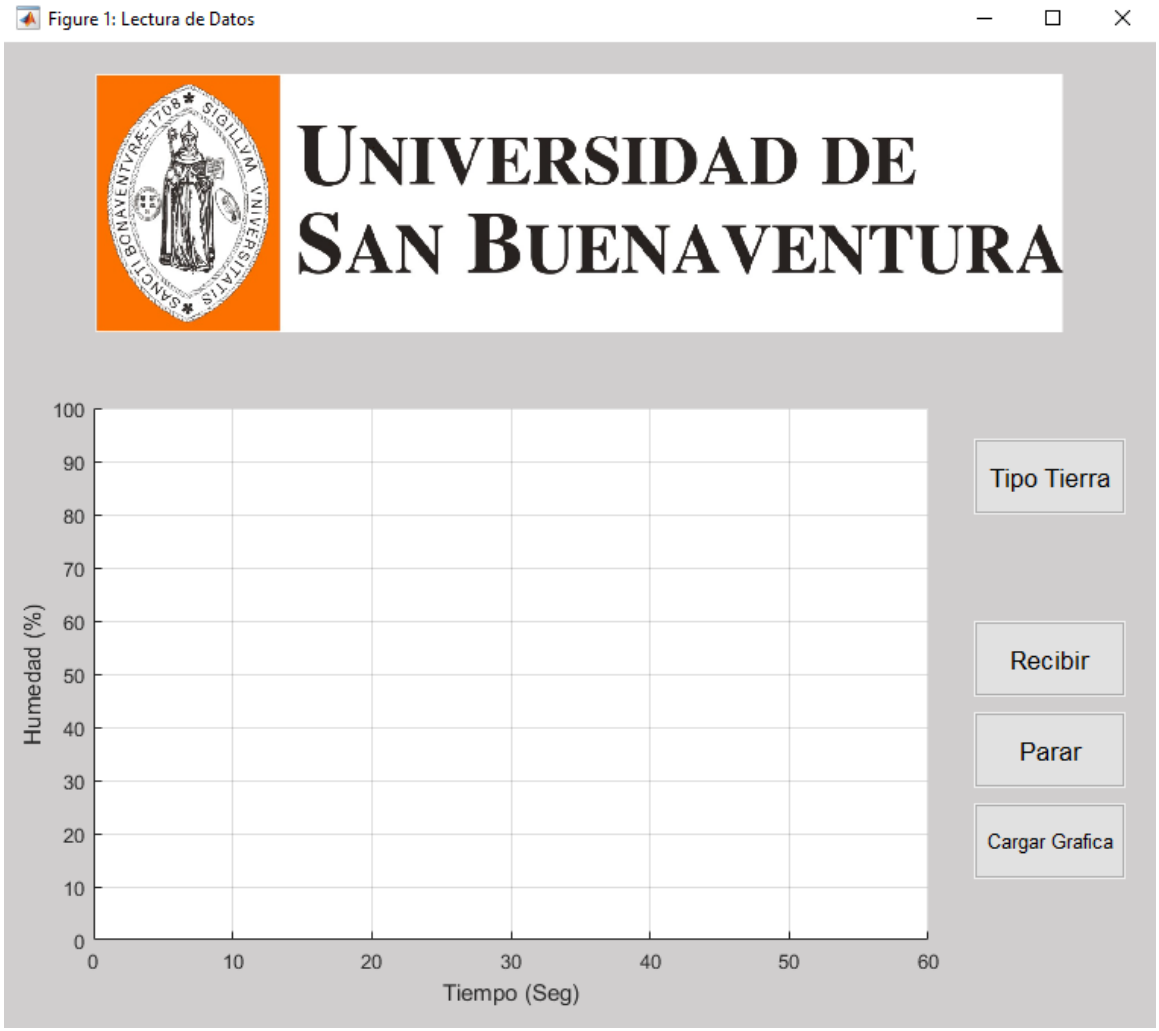


Figura 26. Interfaz para el monitoreo y visualización de la humedad

Fuente: Autores.

2.1.3.1 Diagrama de flujo interfaz de monitoreo.

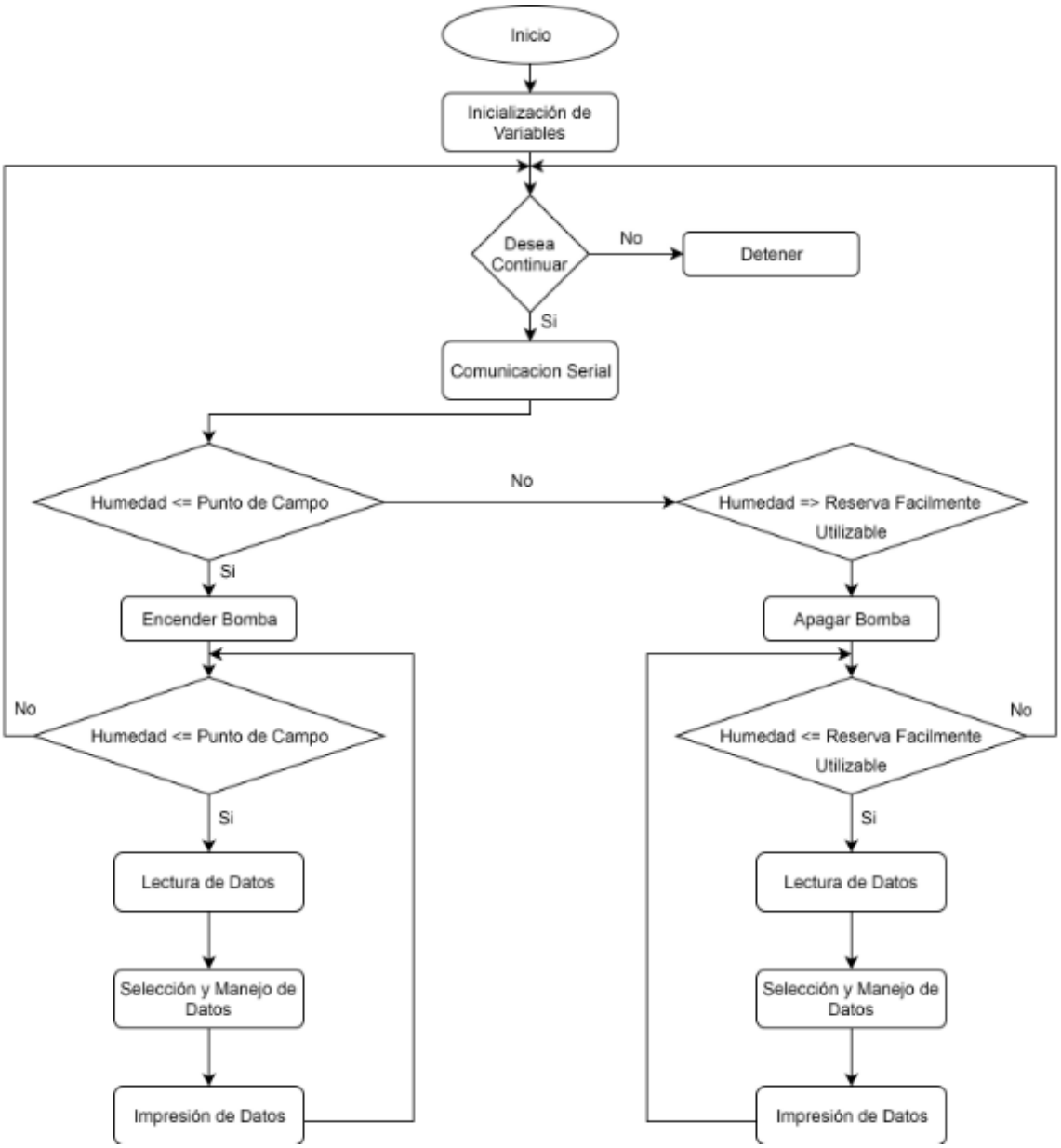


Figura 27. Diagrama de flujo – Interfaz de seguimiento

Fuente: Autores

2.1.4 Integración del sistema de detección de humedad, automatización de la bomba y la interfaz de monitoreo del sistema de riego en una estructura.

En la Figura 28 se muestra la estructura construida por los autores del proyecto, con el fin de demostrar el funcionamiento de la recepción de datos de los sensores de humedad y mediante los módulos Xbee S2X realizar él envió de datos de forma inalámbrica a la bomba. Esta estructura es una ilustración y ejemplo del funcionamiento del sistema completo. Para esto fue necesario calcular toda la mecánica de fluidos, es decir, cálculo de pérdidas por accesorios, cálculo de pérdidas por fricción, cálculo de la bomba necesaria para el sistema. Para todos estos cálculos se tuvo en cuenta datos importantes como el caudal de los goteros ($2\,{}^{l}\!/_{h}$) y el diámetro de la tubería ($1in$).

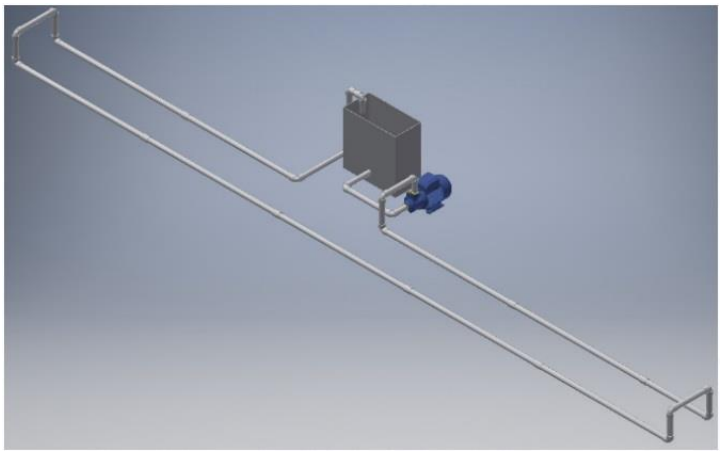


Figura 28. Diseño para la muestra experimental

Fuente: Autores.

2.1.4.1 Cálculos para la selección de la bomba

En la Tabla 9 se muestran los parámetros con los cuales se realizaron los cálculos de la bomba.

Datos del Fluido	Agua
Temperatura	20°C
Densidad	998.2 kg/m^3
Viscocidad	1.102x10^-3 N*S/m^3

Datos de la tubería	PVC
Diámetro	1" - 0.0302m
Rugosidad Absoluta	0.0015/D
Coeficiente de Resistencia K (Unión)	0.08
Coeficiente de Resistencia K (Codos)	0.3
Caudal Volumétrico	16 l/h

Tabla 9. Paràmetros del diseño.

Fuente: Autores con base en (*Mott*).

El cálculo de este diseño fue realizado por tramos de acuerdo con la estructura, a continuación, se muestran los cálculos para cada uno de los tramos.

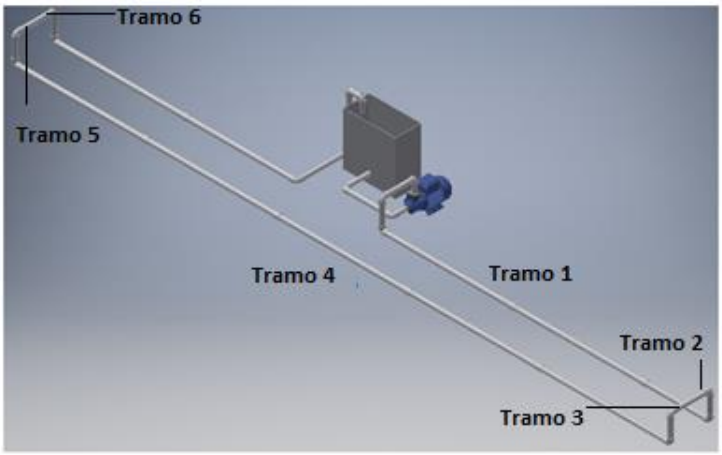


Figura 29. Estructura dividida por tramos

Fuente: Autores.

- Solución al Tramo 1 (PVC).

Para este tramo se usó una tubería de 1 pulgada equivalente a 0.0302 metros como diámetro nominal y una longitud de 2.85 metros, la cual cuenta con 5 codos, 1 reducción y 2 uniones. El procedimiento se desarrolló en los siguientes pasos:

1. Cálculo de la velocidad:

$$V = \frac{Q}{A} \rightarrow \frac{Q}{\pi \cdot \frac{\left(D^2\right)}{4}} \tag{35}$$

$$V = 0.006198 \, {}^{m}/_{s}$$

2. Cálculo de la rugosidad relativa:

$$\frac{\in}{D} = \frac{0.0015mm}{30.2mm} = 0.00005 \tag{36}$$

3. Cálculo del Número de Reynolds:

$$R_e = \frac{V \cdot \rho \cdot D}{\mu} \tag{37}$$

$R_e = 169.5487$ Flujo Laminar

4. Cálculo de factor de fricción flujo laminar:

$$f = \frac{64}{R_e} \tag{38}$$

$$f = 0.377$$

5. Cálculo de las pérdidas por fricción:

$$h_f = f\left(\frac{L}{D}\right) \cdot \left(\frac{V^2}{2g}\right) \tag{39}$$

$$h_f = 0.00007m$$

6. Cálculo de pérdidas menores:

- Pérdidas provocadas por codos:

$$h_m = K \cdot \left(\#_{Accesorio}\right)\left(\frac{V^2}{2g}\right) \tag{40}$$

$$h_m = 0.000002936m$$

- Pérdidas provocadas por uniones:

$$h_m = K \cdot \left(\#_{Accesorio}\right)\left(\frac{V^2}{2g}\right) \tag{41}$$

$$h_m = 0.0000003132m$$

- Pérdidas provocadas por reducción de entrada:

$$K = 0.5\left(\left(1-\left(d_1^2 \diagup D_2^2\right)\right)\right) = 0.411573m \tag{42}$$

$$h_m = K \cdot \frac{V^2}{2g} = 0.000000805m$$

7. Cálculo de pérdidas totales:

$$h_T = h_f + h_m \tag{43}$$

$$h_T = 0.000074055m$$

- Solución al tramo 2 (Manguera).

Para este tramo se usó una manguera especial para cultivos con una longitud de 0.05 metros, teniendo un diámetro de media pulgada, este valor fue medido con un pie de rey para rectificar el valor del diámetro interno, siendo equivalente a 0.01818m. Debido a la reducción de la tubería PVC de una pulgada a la manguera hubo un cambio en la velocidad. El procedimiento se desarrolló en los siguientes pasos:

1. Cálculo de la velocidad usando la ecuación 35:

$$V = 0.03505\,{}^{m}\!/_{s} \tag{44}$$

2. Cálculo de la rugosidad relativa:

$$\frac{\in}{D} = \frac{0.0015mm}{18.18mm} = 0.000083 \tag{45}$$

3. Cálculo del Número de Reynolds usando la ecuación 37:

$$R_e = 403.207 \text{ Flujo Laminar} \tag{46}$$

4. Cálculo de factor de fricción usando la ecuación 38 de flujo laminar:

$$f = 0.15872 \tag{47}$$

5. Cálculo de las pérdidas por fricción usando la ecuación 39:

$$h_f = 0.000039m \tag{48}$$

Debido a que no hay accesorios en este tramo, no se calculan las pérdidas por accesorios.

6. Cálculo de pérdidas totales usando la ecuación 43: $h_T = 0.000039m$ (49)

- Solución al tramo 3 (Manguera)

Para este tramo con una longitud de 0.05 metros, se tomó en cuenta que el caudal cambió siendo de $2.22x10^{-6}\,{}^{m^3}\!/_{s}$, debido a que el agua ya ha pasado por el gotero el cual tiene un caudal de descarga de 8 litros hora. El procedimiento se desarrolló en los siguientes pasos:

1. Cálculo de la velocidad usando la ecuación 35:

$$V = 0.017525\,{}^{m}\!/_{s} \tag{50}$$

2. Cálculo de la rugosidad relativa:

$$\frac{\in}{D} = \frac{0.0015}{18.18mm} = 0.000083 \tag{51}$$

3. Cálculo del Número de Reynolds usando la ecuación 37:

$$\mathrm{R}_e = 201.603 \text{ Flujo Laminar} \quad (52)$$

4. Cálculo de factor de fricción usando la ecuación 38 de flujo laminar:

$$f = 0.317455 \quad (53)$$

5. Cálculo de las pérdidas por fricción usando la ecuación 39:

$$h_f = 0.00001535m \quad (54)$$

Debido a que no hay accesorios en este tramo, no se calculan las pérdidas por accesorios.

6. Cálculo de pérdidas totales usando la ecuación 43: $h_T = 0.00001535m$ (55)

- Solución al tramo 4 (PVC)

Para este tramo con una longitud de 5.4 metros, se usó una tubería de 1 pulgada equivalente a 0.0302 metros como diámetro nominal, la cual cuenta con 4 codos, 1 reducción y 4 uniones. El procedimiento se desarrolló en los siguientes pasos:

1. Cálculo de la velocidad usando la ecuación 35:

$$V = 0.003099 \, {}^{m}\!/_{s} \quad (56)$$

2. Cálculo de la rugosidad relativa:

$$\frac{\in}{D} = \frac{0.0015}{30.2mm} = 0.00005 \quad (57)$$

3. Cálculo de Número de Reynolds usando la ecuación 37:

$$\mathrm{R}_e = 84.744 \text{ Flujo Laminar} \quad (58)$$

4. Cálculo de factor de fricción usando la ecuación 38 de flujo laminar:

$$f = 0.7549 \quad (59)$$

5. Cálculo de las pérdidas por fricción usando la ecuación 39:

$$h_f = 0.000066m \tag{60}$$

6. Cálculo de pérdidas menores usando las ecuaciones 40, 41, 42:

- Pérdidas provocadas por codos: $h_m = 0.00000058m$ (61)
- Pérdidas provocadas por uniones: $h_m = 0.0000001566m$ (62)
- Pérdidas provocadas por reducción de salida:

$$K = \left(1 - \left(d_1^2 / D_1^2\right)\right)^2 = 0.6775m \tag{63}$$

$$h_m = K \cdot \frac{V^2}{2g} = 0.000000331m$$

7. Cálculo de pérdidas totales usando la ecuación 43: $h_T = 0.000067068m$ (64)

- Solución al tramo 5 (Manguera)

Para este tramo con una longitud de 0.05 metros, el único factor que cambia es el diámetro, por ende, la velocidad a calcular varía. El procedimiento se desarrolló en los siguientes pasos:

1. Cálculo de la velocidad usando la ecuación 35:

$$V = 0.017525\, m/s \tag{65}$$

2. Cálculo de la rugosidad relativa:

$$\frac{\in}{D} = \frac{0.0015mm}{18.18mm} = 0.000083 \tag{66}$$

3. Cálculo del Número de Reynolds usando la ecuación 37:

$$R_e = 201.603 \text{ Flujo Laminar} \quad (67)$$

4. Cálculo de factor de fricción usando la ecuación 38 de flujo laminar:

$$f = 0.317455 \quad (68)$$

5. Cálculo de las pérdidas por fricción usando la ecuación 39:

$$h_f = 0.00001456m \quad (69)$$

Debido a que no hay accesorios en este tramo, no se calculan las pérdidas por accesorios.

6. Cálculo de pérdidas totales usando la ecuación 43: $h_T = 0.00001456m$ (70)

- Las pérdidas totales del sistema se calculan sumando cada pérdida total hallada en los diferentes tramos.

$$h_T = 0.000210033m \quad (71)$$

Después de calcular todas las pérdidas de cada tramo, se aplica la ecuación de Bernoulli para finalmente calcular el cabezal dinámico de la bomba, entonces:

$$h_A = (Z_2 - Z_1) + \frac{V_P^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + h_T \quad (72)$$

$$h_A = (0.33 - 0.057) + \frac{0.006198^{2\ m/s}}{2 \cdot 9.81} + 0.000210033m$$
$$h_A = 0.273211m$$

Por último, se calcula la potencia neta de la bomba aplicando la siguiente ecuación:

$$P_{neta} = h_A \cdot \gamma \cdot Q$$
$$P_{neta} = 0.01187w \quad (73)$$

Una vez obtenidos los cálculos, se procedió a construir la estructura para la muestra experimental y dar inicio a la integración del sistema de detección de humedad, la automatización

de la bomba y la interfaz para la operación y monitoreo del sistema de riego, con el fin de simular un sistema completo y verificar su funcionamiento. Teniendo en cuenta la potencia neta calculada en la ecuación 85 se seleccionó una bomba de 0.5 HP debido a que es la bomba comercial más cercana a la potencia obtenida en los cálculos. A continuación, se presenta una secuencia de fotos de la integración del sistema completo construido y su funcionamiento con los límites de puntos de Reserva Fácilmente Utilizable (R.F.U) y Capacidad de Campo.

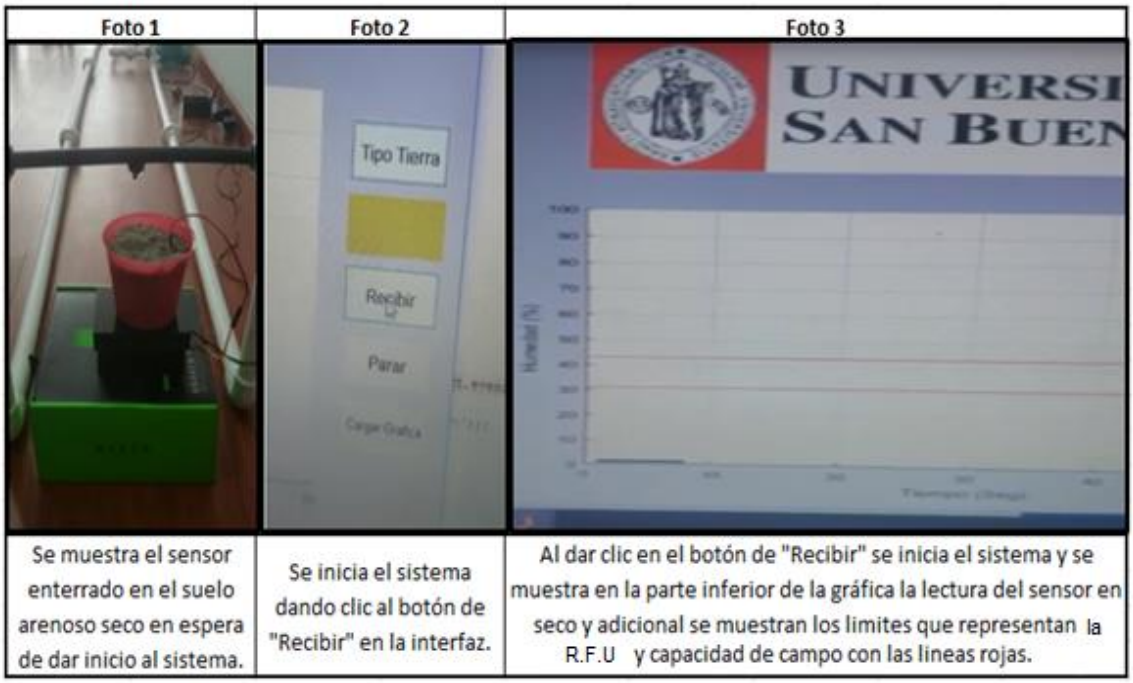


Figura 30. Secuencia de fotos

Fuente: Autores.

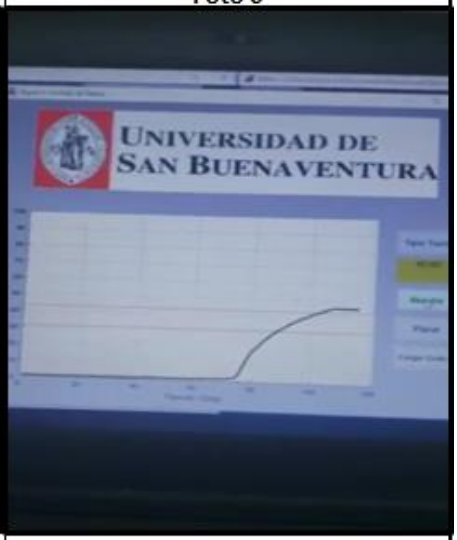
Foto 4	Foto 5	Foto 6
		
El sensor detecta sequia en el suelo arenoso y activa el sistema para dar inicio al riego por goteo.	Al sensor detectar la humedad necesaria para la capacidad de campo, detiene el sistema, apagando el riego por goteo.	Se muestra en la gráfica la curva de cómo la humedad fue aumentando hasta llegar y mantenerse en la capacidad de campo y en este punto detener el sistema.

Figura 31. Secuencia de fotos

Fuente: Autores:

Foto 7	Foto 8	Foto 9
Aquí se procede a retirar el sensor del suelo humedo y dejarlo al ambiente para aparentar sequia.	Una vez el sensor extraido se evidencia que el sistema vuelve e inicia e inicia el goteo en el suelo arenoso.	El sensor vuelva a ser ingresado al suelo arenoso

Figura 32. Secuencia de fotos.

Fuente: Autores.

Foto 10	Foto 11
Una vez el sensor ingresado nuevamente, el sistema se detiene al detecter presencia de humedad y es detenido nuevamente.	Finalmente se muestra la gráfica obtenida.

Figura 33. Secuencia de fotos.

Fuente: Autores

2.1.5 Diseño del Sistema Escalable

El diseño del sistema escalable fue desarrollado mediante una interfaz, la cual le permite obtener todos los datos necesarios al usuario como, la separación de surcos, separación de la siembra entre las semillas de maíz y además de esto los cálculos mecánicos, como los diferentes diámetros de las tuberías, longitudes y el cálculo de la bomba para el terreno.

La selección del tipo de maíz fue basada en una consulta con el experto William Ramírez Técnico Agrícola, e ingenieros de la empresa el Semillero, ubicada en la ciudad de Bogotá, que, de acuerdo con su experiencia y conocimiento, concluyeron que la semilla de maíz adecuada para uso en Bogotá era el maíz porva.

Por lo anterior, y tomando como referencia la cita (derivados, s.f.), la separación de surcos que se tomó para el diseño fue de 80cm y la separación entre semillas de 20cm, con el fin de calcular la cantidad de goteros, ver ecuación 75 – 76 y de surcos en el cultivo, ver ecuación 74.

Adicional a lo anterior según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en la actualidad los sistemas de riego que más se utilizan son: riego por aspersión, riego por micro aspersión, riego por goteo; siendo este último un sistema de riego localizado por lo cual se da un mayor ahorro de agua (FAO, 2011), razón por la cual se decidió realizar el diseño usando n sistema de riego por goteo, seleccionando goteros $2\,{}^{l}\!/_{h}$

Posterior a la selección de criterios de separación de surcos y separación de semillas, se continuó con el cálculo de caudales tanto del sistema como de cada surco, ver ecuación 89. Luego se realizó el cálculo de la tubería primaria tomando el criterio de velocidad de $2\,{}^{m}\!/_{s}$. Este procedimiento se repite para la tubería secundaria cambiando el criterio de velocidad a $1.2\,{}^{m}\!/_{s}$. Los criterios de velocidad seleccionados fueron tomados con base en (Mott). Ver ecuaciones 90 y 91.

Ahora que se obtuvieron los diámetros tanto para la tubería primaria como la tubería secundaria, se calculan sus respectivas longitudes, ver ecuación 92 y 93, para suministrar al usuario la cantidad de tubería correspondiente para su cultivo.

Posteriormente se calculan las pérdidas menores y mayores del sistema, las cuales son necesarias para el cálculo de la bomba. Estos cálculos se realizan en las etapas 9, 10 y 11.

Por último, se realizó el cálculo del cabezal dinámico de la bomba, teniendo en cuenta los parámetros de la ecuación de Bernoulli, para el cálculo de la potencia neta de la bomba ecuación.

Para desarrollar el sistema escalable se realizó el siguiente procedimiento, en diferentes etapas.

- Etapa 1: Cálculo de cantidad de surcos

$$CS = \left(\frac{PT - SS}{SS} \right) \cdot 2 \tag{74}$$

- Etapa 2: Cálculo de cantidad de goteros por surco

$$CG = \frac{\left({}^{AT}\!/_{2} \right) - SG}{SG} \tag{75}$$

- Etapa 3: Cálculo de cantidad total de goteros

$$CGT = \left(CG \cdot CS \right) \tag{76}$$

- Etapa 4: Cálculo de caudales

$$\begin{aligned} Q_{Sur} &= CG \cdot TG \\ Q_{Sis} &= CGT \cdot TG \end{aligned} \tag{77}$$

- Etapa 5: Cálculo para la selección de la tubería primaria

$$\begin{aligned} ATP &= \frac{Q_{Sis}}{2\,{}^{m}\!/_{s}} \\ TP &= \sqrt{\frac{4ATP}{\pi}} \end{aligned} \tag{78}$$

Una vez calculado TP, se selecciona el diámetro de la tubería comercial, inmediatamente superior.

- Etapa 6: Cálculo para la selección de la tubería secundaria

$$ATS = \frac{Q_{Sur}}{1.2\,{}^{m}\!/_{s}}$$
$$TS = \sqrt{\frac{4ATS}{\pi}} \qquad (79)$$

Una vez calculado TP, se selecciona el diámetro de la tubería comercial, inmediatamente superior.

- Etapa 7: Cálculo de longitud para la tubería primaria

$$LTP = \frac{CS \cdot SS}{2} \qquad (80)$$

- Etapa 8: Cálculo de longitud para la tubería secundaria

$$LTS = (CG \cdot SG) \cdot CS \qquad (81)$$

- Etapa 9: Cálculo de pérdidas en la tubería primaria

  - Primero se debe calcular el número de Reynolds: $\mathrm{Re} = \frac{V_p \cdot \rho \cdot TP}{\mu}$ (82)

  - Segundo se debe calcular la rugosidad relativa: $\in_{\mathrm{Re}lativa} = \frac{\in_{Absoluta}}{TP}$ (83)

  - Tercero se debe calcular el factor de fricción

    - ✓ Laminar: $f = \frac{64}{R_e}$ $R_e < 2000$ (84)

    - ✓ Transitorio: $f = \frac{0.316}{R_e^{1/4}}$ $2000 > R_e < 4000$ (85)

    - ✓ Turbulento: $f = \frac{1.325}{\left\{-\ln\left[\frac{\in}{3.7 \cdot TP} + \frac{5.74}{R_e^{0.9}}\right]\right\}^2}$ $R_e > 4000$ (86)

- Cálculo de la velocidad primaria

$$V_P = \frac{Q_{Sis}}{TP} \tag{87}$$

- Cálculo de pérdidas por fricción en la tubería primaria

$$HF_P = f\left(\frac{LTP}{TP}\right)\cdot\left(\frac{V_P{}^2}{2g}\right) \tag{88}$$

- Cálculo de pérdidas por accesorios en la tubería primaria

$$HA_P = K\cdot\left(\frac{V_P{}^2}{2g}\right) \tag{89}$$

- Etapa 10: Para el cálculo de las pérdidas en la tubería secundaria se debe repetir el mismo procedimiento desde la etapa 9, sustituyendo la siguiente nomenclatura:

$$\begin{aligned} &TP \rightarrow TS \\ &V_P \rightarrow V_S \\ &Q_{Sis} \rightarrow Q_{Sur} \\ &LTP \rightarrow LTS \\ &HF_P \rightarrow HF_S \\ &HA_P \rightarrow HA_S \end{aligned} \tag{90}$$

El procedimiento de las pérdidas tanto para la tubería primaria como la tubería secundaria se realiza en cada sección donde el caudal cambia, ya sea por una bifurcación en la tubería primaria, o en una salida de agua por los goteros en la tubería secundaria.

- Etapa 11: Sumatoria de las pérdidas totales por fricción y accesorios del sistema

$$h_T = HF_P + HA_P + HF_S + HA_S \tag{91}$$

- Etapa 12: Cálculo del cabezal dinámico de la bomba $\left(h_A\right)$

- Se aplicó la ecuación de energía entre la succión del tanque y el gotero más lejano ubicado en el cultivo, para calcular el (h_A) (Cabezal dinámico de la bomba), entonces:

$$h_A = (Z_2 - Z_1) + \frac{V_P^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + h_T \qquad (92)$$

En las características del cultivo, la velocidad final nunca va a ser superior a $2\,{}^{m}\!/_{s}$ debido a que se manejaron estándares para evitar velocidades altas, ver ecuación 90 y 91 Por lo tanto, para la variable V_P se supuso una velocidad de $4\,{}^{m}\!/_{s}$, correspondiendo al término $\frac{V_P^2}{2g}$ un valor cercano a $1m$, asumiendo este término siempre como $1m$. Entonces:

$$h_A = (Z_2 - Z_1) + 1m + \frac{P_2}{\gamma} + h_T \qquad (93)$$

- Etapa 13: Cálculo de potencia neta de la bomba

$$P_{neta} = \frac{\gamma * Q_{Sur} * h_A}{745.7w} \qquad (94)$$

2.1.5.1 Interfaz sistema escalable

Para facilitar al usuario los cálculos de las ecuaciones planteadas en el apartado 2.1.5, se desarrolló un programa con ayuda del software Matlab, el cual permite calcular las etapas propuestas de forma inmediata, dependiendo de parámetros a ingresar como el ancho del terreno y largo del terreno.

Se inicializan las variables: número de codos extra, número de uniones extra, longitud de tubería extra, altura de la bomba y altura de descarga, tomando valores por defecto iguales a cero, las cuales pueden ser modificadas por el usuario en el botón “Ajustes” de la aplicación,

dependiendo de las características adicionales del cultivo como, por ejemplo, la distancia de instalación entre la bomba y el inicio de la tubería primaria para el cultivo.

Después de la inicialización de variables se calcula la distribución del cultivo de igual forma que en las etapas 1 y 2. La distribución del sistema de riego cuenta con una tubería principal (T_P) y ramificaciones llamadas tuberías secundarias (T_S) como se indica en la Figura 34.

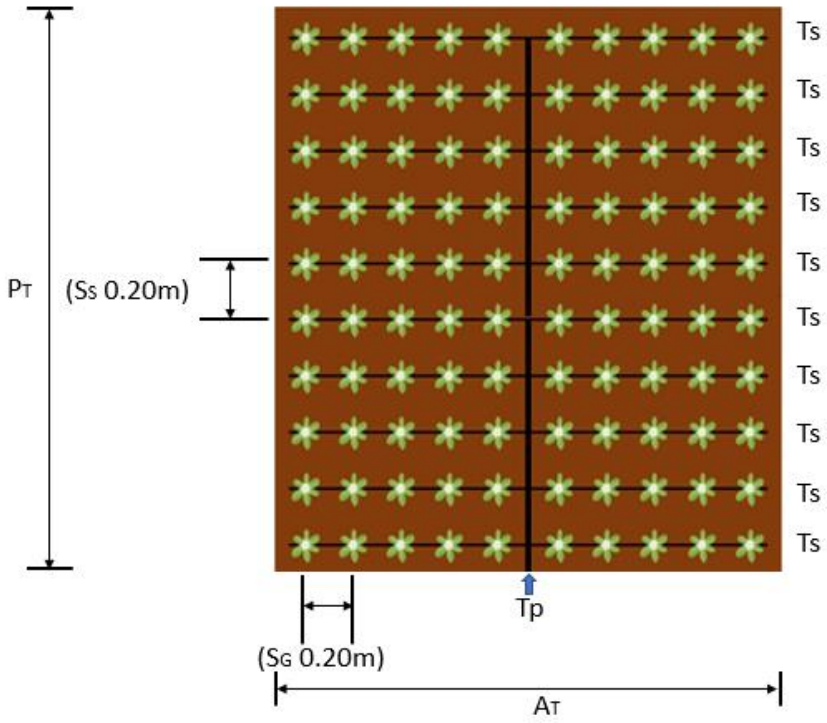


Figura 34. Distribución del cultivo.
Fuente: Autores.

Hecha la distribución del cultivo se calculan los caudales del sistema de igual forma que en las etapas 3 y 4, considerando el caudal de los goteros y la cantidad de los goteros del sistema, esto con el fin de seleccionar la tubería tanto principal como secundaria, teniendo en cuenta los

parámetros de diseño de velocidades para tuberías. La selección de la tubería principal y secundaria se desarrollaron en las etapas 5 y 6.

Luego de seleccionar las tuberías para el sistema se calcularon las longitudes para cada una de estas, la longitud de la tubería secundaria se calculó teniendo presente la cantidad de goteros por surco y la longitud de la tubería primaria con base en la separación de surcos en el cultivo.

Para el cálculo de las pérdidas y las especificaciones de la bomba para el sistema, se hizo uso de las ecuaciones en las etapas 9, 10, 11, 12 y 13.

Una vez finalizado el código, se diseñó una interfaz en código Matlab con el fin de adquirir los datos necesarios para el desarrollo del programa sin necesidad de ingresar al código, ver Figura 35.

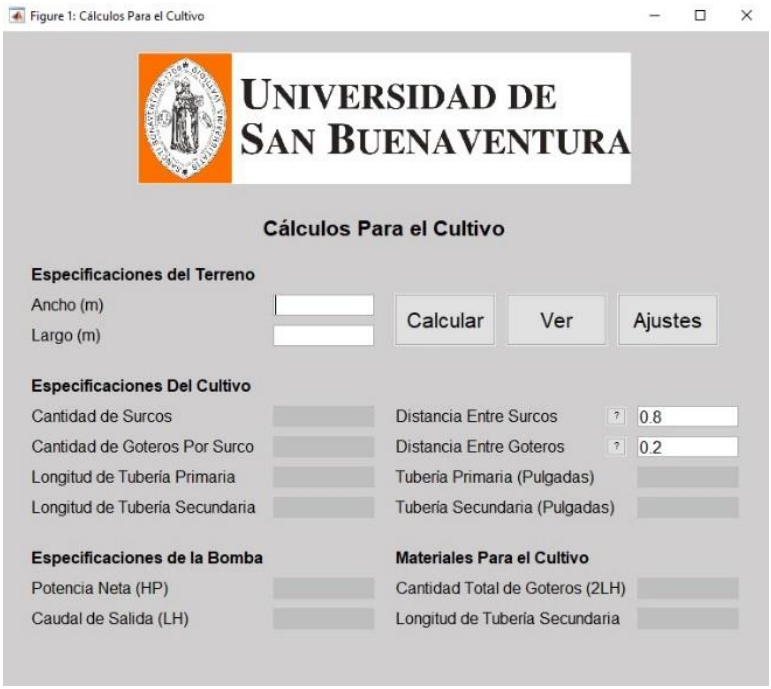


Figura 35. Interfaz de seguimiento

Fuente: Autores

La interfaz será explicada mediante un diagrama de flujo para su mejor entendimiento, ver Figura 36.

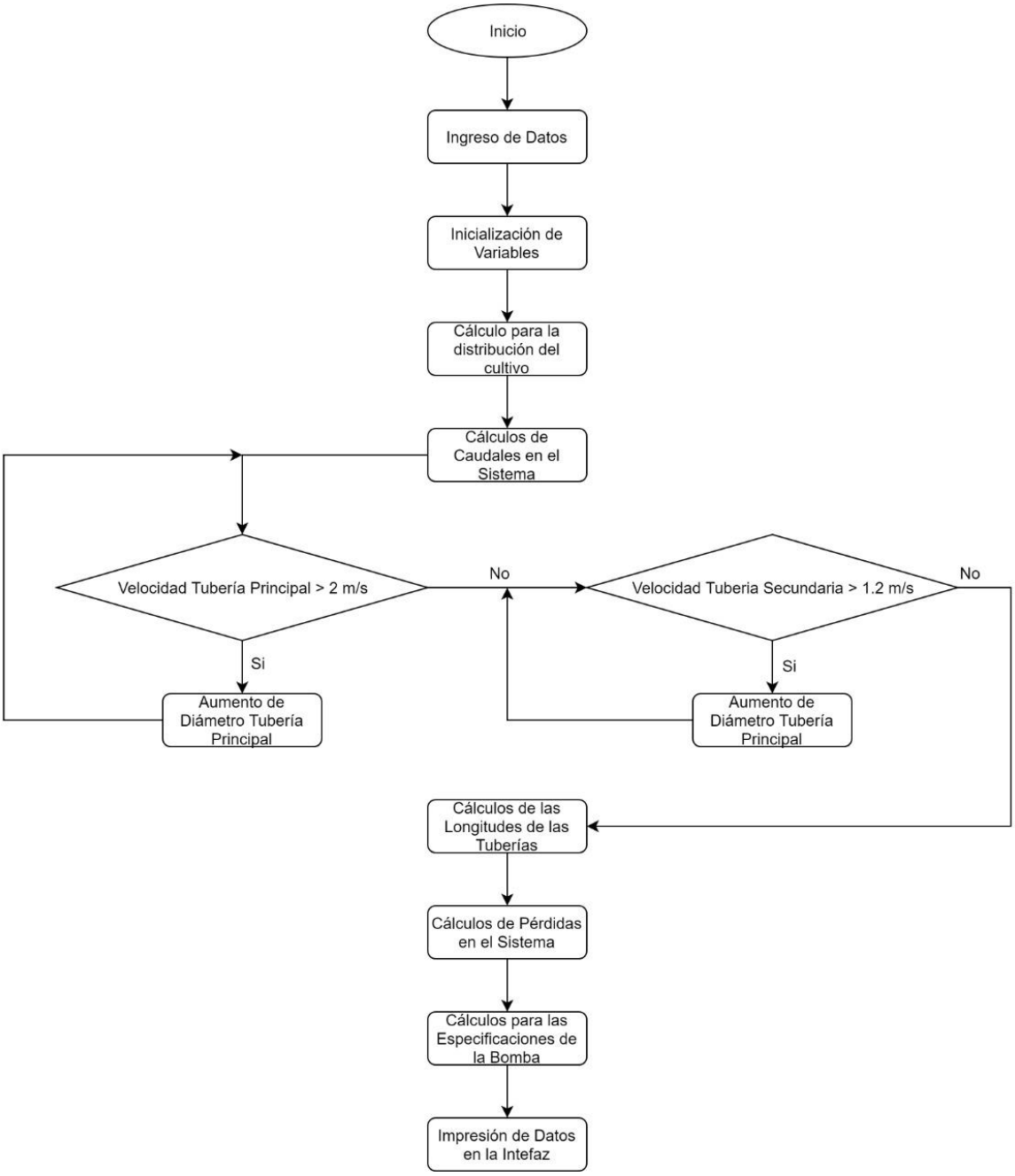


Figura 36. Diagrama de flujo – Interfaz sistema escalable.

Fuente: Autores

Para la conformación en el cultivo, se utilizaron la mayoría de los parámetros en el sistema escalable, tales como: cantidad surcos la cual indica la cantidad de hileras distribuidas a lo largo del cultivo, cantidad se goteros por surco, longitud de la tubería primaria, la cual indica la tubería principal que se encuentra entre la salida de la bomba y el surco más lejano, longitud de la tubería secundaria, la cual indica la longitud que tendrá cada surco, distancia entre surcos, distancia entre goteros, tubería primaria, lo cual indica el diámetro que tendrá esta tubería, tubería secundaria, lo cual indica el diámetro que tendrá esta tubería, potencia neta, la cual indica la potencia necesaria para la bomba para dar cumplimiento a los requerimientos del cultivo. Existen otros elementos para completar la conformación del cultivo, los cuales son: un computador el cual tendrá conectado un Xbee coordinador, una bomba de agua ubicada cerca al suministro de agua y los módulos Xbee Routers los cuales estarán distribuidos a lo largo del cultivo junto a los sensores de humedad.

2.1.5.2 Ejemplo del funcionamiento de la interfaz

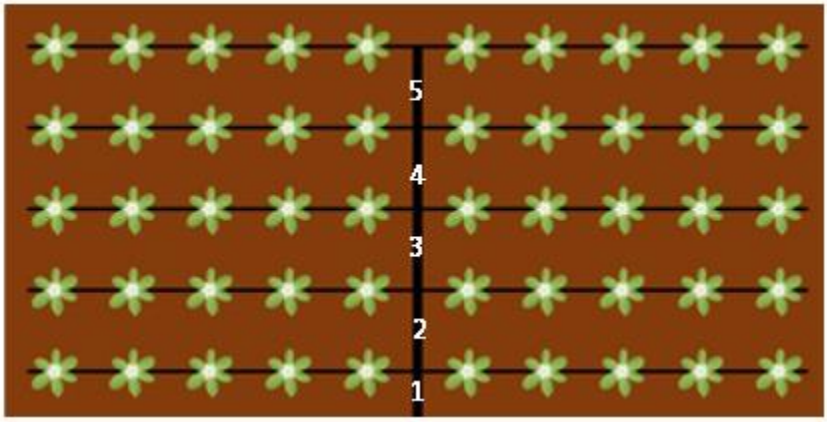


Figura 37. Numeración de los tramos en el cultivo

Fuente: Autores.

Para la comprobación de la interfaz del sistema escalable, se realizaron los cálculos teóricamente mediante las ecuaciones planteadas en el apartado 2.1.5, con el fin de demostrar y

comparar los resultados arrojados por la interfaz. El terreno con el cual se harán estos cálculos es de 5x5 metros y usando goteros de 2 litros/hora.

1. Cálculo de cantidad de surcos usando la ecuación 74:

$$CS = 10\,surco \tag{95}$$

2. Cálculo de cantidad de goteros por surco usando la ecuación 75:

$$CG = 11\,goteros \tag{96}$$

3. Cálculo de cantidad total de goteros usando la ecuación 76:

$$CGT = 110\,goteros \tag{97}$$

4. Cálculo de caudales usando la ecuación 77:

$$\begin{aligned} Q_{Sur} &= 22\,{}^{l}\!/_{h} \\ Q_{Sis} &= 220\,{}^{l}\!/_{h} \end{aligned} \tag{98}$$

5. Cálculo del área de la tubería primaria usando la ecuación 78:

$$ATP = 0.000031m^2 \tag{99}$$

6. Cálculo de la tubería primaria usando la ecuación 78:

$$TP = 0.006237m \approx 0.0127m \tag{100}$$

7. Cálculo del área de la tubería secundaria usando la ecuación 79:

$$ATS = 0.000005m^2 \tag{101}$$

8. Cálculo de la tubería secundaria usando la ecuación 79:

$$TS = 0.002546m \approx 0.0127m \tag{102}$$

9. Cálculo de longitud para la tubería primaria usando la ecuación 80:

$$LTP = \frac{10 \cdot 0.80m}{2} = 4m \tag{103}$$

10. Cálculo de longitud para la tubería secundaria por surco usando la ecuación 81:

$$LTS = (11 \cdot 0.20m) \cdot 10 = 2.2m \tag{104}$$

11. Cálculo de la tubería secundaria total:

$$(2.2m) \cdot (10_{surco}) = 22m \tag{105}$$

12. Cálculo de pérdidas en la tubería secundaria, ver ecuaciones 35, 37, 38:

- Cálculo velocidad

$$V_s = \frac{6.11 \cdot 10^{-6}\ {}^{m^3}\!/_{s}}{\pi \cdot \frac{0.0127^2 m}{4}} = 0.0482\ {}^{m}\!/_{s} \tag{106}$$

- Número de Reynolds

$$N_R = \frac{0.0482\ {}^{m}\!/_{s} \cdot 998.2\ {}^{kg}\!/_{m^3} \cdot 0.0127m}{1.102 \cdot 10^{-3}\left({}^{N \cdot s}\!/_{m^3}\right)} = 555.48 \tag{107}$$

- Factor de fricción

$$f = \frac{64}{R_e} = 0.11521 \tag{108}$$

- Cálculo de pérdidas por fricción en la tubería secundaria ver ecuación 39:

$$HF_s = 0.11521\left(\frac{2.2m}{0.0127m}\right) \cdot \left(\frac{0.0482^2\ {}^{m}\!/_{s}}{2 \cdot 9.81}\right) = 0.002363m \tag{109}$$

$$HF_s = 0.002363m \cdot 10_{surco} = 0.02363m \tag{110}$$

- Cálculo de pérdidas totales en la tubería secundaria 43:

$$HT_{secundaria} = 0.02363m \quad (111)$$

13. Cálculo de pérdidas en la tubería primaria, ver ecuaciones 35, 37, 38:

Debido al caudal de los goteros, las pérdidas de la tubería principal y la cantidad de goteros la velocidad va cambiando en cada una de las bifurcaciones, adicional a esto el factor de fricción y el número de Reynolds, realizando el mismo procedimiento de la tubería secundaria. Para esto se realizó la siguiente tabla con dichos cálculos.

Pérdidas por fricción en la tubería primaria					
Cantidad de surcos: 10					
Q del sistema: 220l/h					
Q por surco: 22l/h					
Tramo	**Caudal (l/h)**	**Velocidad (m/s)**	**No. De Reynolds**	**F. Fricción**	**Pérdidas (m)**
1	220	0.48232	5548.49	0.0368	0.02748
2	176	0.38523	4431.59	0.0394	0.01877
3	132	0.28892	3323.66	0.0416	0.01114
4	88	0.19261	2215.73	0.0460	0.00547
5	44	0.09630	1107.81	0.0577	0.00171

Tabla 10. Pérdidas por fricción tubería primaria

Fuente: Autores

- Obteniendo las pérdidas por fricción totales en la tubería primaria de: 0.064604m
- Para el cálculo de las pérdidas por accesorios en la tubería primaria se realizó la siguiente tabla para calcular la pérdida en cada uno de los tramos de la tubería primaria, debido a que el caudal va cambiando, teniendo en cuenta la Tabla 10.

Pérdidas por accesorios en la tuberia primaria			
Cantidad de cruces: 5			
Coeficiente K: 1.0			
Tramo	**Caudal l/h**	**Velocidad m/s**	**Pérdidas m**
1	220	0.48232	0.01185
2	176	0.38523	0.00756
3	132	0.28892	0.00425
4	88	0.19261	0.001891
5	44	0.09630	0.000473

Tabla 11. Pérdidas por accesorios tubería primaria

Fuente: Autores.

Obteniendo las pérdidas por accesorios totales en la tubería primaria de: 0.02603m

14. Seguido de lo anterior, se procede a calcular las pérdidas totales del sistema, tomando en cuenta las pérdidas por fricción en la tubería secundaria, pérdidas por accesorios en la tubería secundaria, pérdidas por fricción en la tubería primaria y pérdidas por accesorios en la tubería primaria. Entonces:

$$h_T = 0.02603m + 0.06460m + 0.02363m$$
$$h_T = 0.114353m \quad (112)$$

15. Por último, se realiza el cálculo de la bomba con la siguiente ecuación:

$$h_A = (Z_2 - Z_1) + 1m + \frac{P_2}{\gamma} + h_T \quad (113)$$

Debido a que el ejemplo realizado fue tomado con un terreno llano no existen diferenciales de altura, entonces:

$$h_A = 1m + \frac{P_2}{\gamma} + h_T \quad (114)$$

Donde:

P_2: Presión de los goteros

h_T: Pérdidas del sistema

γ : Peso específico del fluido

Sustituyendo estos valores se obtiene el cabezal dinámico de la bomba:

$$h_A = 1m + \frac{310000}{9792} + 0.114353m \qquad (115)$$
$$h_A = 32.77728m$$

Para el cálculo de la potencia de la bomba se realizó lo siguiente:

$$P_{neta} = \frac{\gamma \cdot Q_{Sur} \cdot h_A}{745w} \qquad (116)$$

$$P_{neta} = \frac{9792 \cdot 0.0000061\,{}^{m^3}\!/_{s} \cdot 32.7728m}{745.7w}$$
$$P_{neta} = 0.0026251\ Hp$$

Este resultado de la Potencia neta se demuestra en el programa realizado por los autores con el fin de demostrar que los resultados tanto de la interfaz como teóricamente sean iguales, ver Figura 38.

Figura 38. Cálculo del sistema escalable.

Fuente: Autores.

Adicional al ejemplo mostrado en la Figura 38, se ejecutó el programa con dimensiones del terreno de 1 hectárea, con el fin de demostrar cálculos más reales, ver Figura 39.

Figura 39. Ejemplo de la interfaz de una hectárea

Fuente: Autores.

2.1.5.3 Distribución de los sensores de humedad en el cultivo

Una vez obtenidos los resultados de las ecuaciones de la sección 2.1.5, se consultó el procedimiento de distribución de los sensores en un cultivo. Esta distribución se basó específicamente en la toma de muestras para los análisis de suelos.

El procedimiento para la captura de muestras de los análisis de suelos se realiza recorriendo el lote al azar en forma de zig-zag y cada 15 o 30 pasos se toma una submuestra, limpiando la

superficie del terreno y depositándola en el balde. Aproximadamente este proceso en una hectárea conlleva de 15 a 20 muestras por hectárea. (Safety, s.f.) (Ltda.)

Teniendo en cuenta el procedimiento de toma de muestras 15 a 30 pasos corresponden alrededor de 9 a 18 metros, por ende, la distribución de los sensores se realiza de la misma forma, pero debido al alto rango de alcance para la transmisión de datos vía inalámbrica con los módulos Xbee S2C, no es necesario ubicar los dispositivos tan cerca uno de otro. Con base en lo dicho anteriormente los autores recomiendan ubicar de 7 a 10 sensores de humedad por hectárea. En la Figura 42 se muestra un ejemplo para la distribución de los sensores pintados de color rojo.

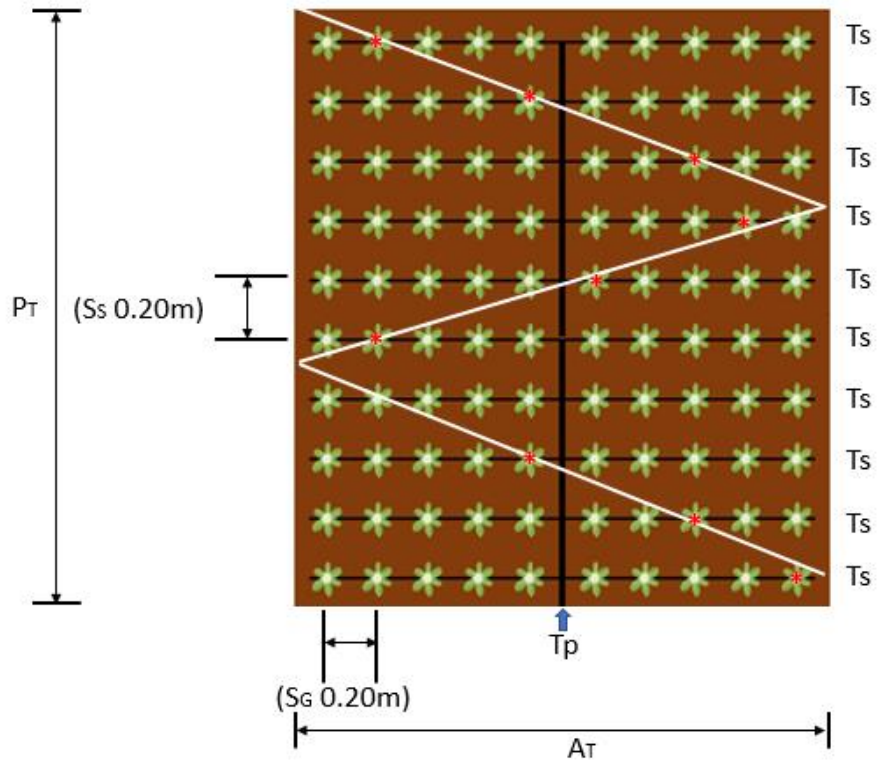


Figura 40. Distribución de los Sensores en el cultivo.

Fuente: Autores.

CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del proyecto se observó que el sensor conductivo de humedad FC-28 durante proceso de lectura de datos funciono apropiadamente, con algunos defectos con respecto al momento de enterrar el dispositivo en el suelo, es decir, requerían ser introducidos al suelo y asegurarse de que estos quedaran bien enterrados debido a que, en algunos casos, estos no hacían contacto suficiente con el suelo y no realizaba la lectura adecuadamente. Por otro lado, su lectura fue estable cuando se lograba adecuar el sensor, por lo que permitió un buen uso de la información en el desempeño del sistema.

Con respecto a los módulos Xbee S2C, presentaron un desempeño eficiente, la trasmisión de datos no tuvo fallos, e inicialmente se desconocía la trasmisión de datos bilateral con los módulos, por lo que se requería de un dispositivo adicional para la activación de la bomba, pero en el proceso se logró la trasmisión bilateral mejorando el diseño y disminuyendo costos, logrando unificar todo el sistema haciendo uso únicamente de los módulos Xbee para el procesamiento y trasmisión de los datos.

Uno de los factores más importante para el desarrollo de este proyecto fue la adquisición de los puntos de marchitez y punto de campo de los diferentes tipos de suelo, este proceso fue de gran importancia, debido a que con estos valores se desarrolló el programa capaz de realizar el encendido o apagado de la bomba en los momentos adecuados. Desafortunadamente la dificultad para adquirir diferentes tipos de suelos fue alta por lo cual, solo se pudo realizar el procedimiento con los tipos de suelo arenoso, limoso y arcilloso. Por tal razón el proyecto no es viable en terrenos con tipos de suelos diferentes a los desarrollados, debido a que existe una amplia gama de diferentes

tipos de suelos y los diferentes rangos de operación de punto de marchitez y capacidad de campo que maneja cada una de estas.

Por otro lado, se observó que la forma más fácil de manipular los datos de punto de marchitez y capacidad de campo es con una herramienta llamada tensiómetro, dado que ya existen tablas de punto de marchitez y capacidad de campo para los diferentes tipos de suelos para este dispositivo. Su alto costo no es viable para su distribución en diferentes puntos del cultivo, por lo tanto, si se lograra una combinación entre los datos de los tensiómetros y algún sensor de humedad más económico, llegaría a ser un proyecto comercial.

RECOMENDACIONES

Este proyecto queda abierto para futuras modificaciones y mejoras como: realizar los diseños para las instalaciones eléctricas donde se ubicará la bomba. Además, entre el tramo de tubería entre la bomba y el cultivo, puede considerarse un estudio para agregar instalaciones como, filtros de arena, manómetros, válvulas de retro lavado, válvula de alivio de aire o ventosa, filtro de malla y estaciones de anillos, con el fin purificar el agua y evitar problemas en las tuberías.

En este proyecto se puede adicionar un sistema de detección de fallas en los sensores con el fin de mantener una buena ejecución del sistema.

Para aumentar la variabilidad del sistema, se pueden añadir los parámetros de punto de marchitez y capacidad de campo de otros tipos de suelos como lo son: suelo franco-arenoso, suelo franco-limoso y suelo pantanoso.

REFERENCIAS

Bibliografía

Admindefinca. (Septiembre de 2014). *Finca y Campo*. Obtenido de La importancia del riego en los cultivos: http://www.fincaycampo.com/2014/09/la-importancia-del-riego-en-los-cultivos/

Ayuda, I. u. (2015). Obtenido de Importancia del Maíz: https://www.importancia.org/maiz.php

Botero, J. A. (2014). *Utilización de sensores de humedad del suelo en la implementación de modelos climáticos en zonas de montaña Mediterránea.* Medellin.

Caldas, E. (s.f.). Obtenido de https://www.electronicoscaldas.com/es/modulos-rf/482-modulo-bluetooth-hc-06.html

Capraro, C. S. (s.f.). *Control Automático de Riego Agrícola con Sensores Capacitivos de Humedad de Suelo. Aplicaciones en Vid y Olivio* . Argentina.

Carletti, E. J. (s.f.). *Robots, pasión por la robótica en Argentina.* Obtenido de http://robots-argentina.com.ar/Sensores_humedad.htm

Castro, N. C. (2015). *Una red de sensores inalámbricos para la automatización y control del riego localizado.* Pasto.

derivados, I. d. (s.f.). *infoAgro.com*. Obtenido de EL CULTIVO DEL MAÍZ: http://www.infoagro.com/herbaceos/cereales/maiz.htm

DIGI. (s.f.). *DIGI XBEE S2C 802.15.4 RF MODULES.* Obtenido de https://www.digi.com/pdf/ds_xbee-s2c-802-15-4.pdf

DomoDesk. (s.f.). *A Fondo: ZIGBEE*. Obtenido de https://www.domodesk.com/216-a-fondo-zigbee.html

EcuRed. (29 de Abril de 2011). *Capacidad de campo y Punto de marchitez*. Obtenido de https://www.ecured.cu/Capacidad_de_campo_y_Punto_de_marchitez

Electronics, M. (s.f.). *Guía de Referencia para Xbee S2C PRO.* Chile.

Espinosa, L. M. (2005). El cultivo de maíz en Colombia. *Revista SEMILLAS*.

FAO. (2011). *FAO*. Obtenido de Mejora de la agricultura de regadio: http://www.fao.org/3/Y3918S/y3918s10.htm

Guide, C. F. (2009). *Corn Field Guide.* Obtenido de Iowa State University Extension : https://semillastodoterreno.com/2018/08/danos-al-cultivo-de-maiz-por-exceso-o-falta-de-agua

I. Srilikhitha, M. M. (2017). *Semantic Scholar*. Obtenido de Sistema de riego automático mediante sensores de humedad del suelo y sensor de temperatura con microcontrolador AT89S52: https://www.semanticscholar.org/paper/Automatic-irrigation-system-using-soil-moisture-and-Srilikhitha-Saikumar/f1be51b643f764e1e0ece5f2a83fb8c0a7341c7d#paper-header

itdUPM, T. I. (13 de Febrero de 2017). *Grupo de investigación Hidráulica de Riego.* Obtenido de Centro de Innovación en Tecnología para el Desarrollo Humano: http://www.itd.upm.es/wp-content/uploads/2017/01/Resumen-TALLER-13.02.sistema-riego-1.pdf

Juan M. Enciso, D. P. (Agosto de 2007). *Texas Agrilife Extension.* Obtenido de Uso de sensores de humedad del suelo para eficientizar el riego .

Kouro, S. (s.f.). Universidad Técnica Federico Santa Maria. Departamento de Electrónica. *Automatización Industrial: Sensores de Humedad*.

Lopez, E. M. (2016). Sistema de riego por goteo automático utilizando una red de sensores inalámbricos. *Revista de Investigación (Arequipa)*.

Ltda., A. I. (s.f.). *VENNGAGE.* Obtenido de Procedimiento para la toma de muestras de suelo: https://infograph.venngage.com/p/100536/procedimiento-para-toma-muestra-de-suelo

Mechatronics, N. (s.f.). *Naulamp Mechatronics.* Obtenido de https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/57-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-dht11.html

Medrano, M. Z. (2017). Sistema de riego automatizado. *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*.

Mott, R. L. (s.f.). Mecánica de Fluidos Aplicada. En R. L. Mott, *Mecánica de Fluidos Aplicada* (pág. 152). Pearson .

MovilTronics. (s.f.). *Comunicación Inalámbrica*. Obtenido de Módulo Xbee S2C: https://moviltronics.com.co/comunicacion-inalambrica-/483-modulo-xbee-s2c.html

Pavithra D. S, M. S. (2014). *GSM based Automatic Irrigation Control System for Efficient Use of Resources and Crop Plannig by Using an Android Mobile* . India.

Peery, J. (12 de Septiembre de 2017). *PROMIX*. Obtenido de ¿Como influye la humedad en la calidad de los cultivos?: https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/como-influye-la-humedad-en-la-calidad-de-los-cultivos/

planthogar. (s.f.). *Eco Agricultor*. Obtenido de Cómo afectan las temperaturas extremas y la humedad en el huerto: https://www.ecoagricultor.com/temperaturas-extremas-y-humedad-en-el-huerto-urbano-o-macetohuerto/

Promotec. (s.f.). *Promotec*. Obtenido de https://www.prometec.net/modelos-esp8266/

R. Torres, R. D. (2016). *Manejo del riego utilizando redes de sensores inalámbricas y cableadas.* . Cartagena.

R. Vagulabranan, M. K. (2016). *Automatic Irrigation System on Sensign Soil Moisture Content.* India.

Rodolfo Agudelo Dueñas, D. C. (2005). *Automatización de Sistemas de Riego para el Cultivo de Flores tipo Exportación.* Bogota, D.C.

Rojas, J. G. (2015). *Manual Técnico del Cultivo de Maíz bajo Buenas Prácticas Agrícolas.* Medellin, Colombia.

S., X. F. (5 de Mayo de 2014). *El Mercurio, Campo.* Obtenido de https://www.elmercurio.com/Campo/Noticias/Noticias/2013/07/22/Como-prepararse-para-la-siembra-del-maiz-grano.aspx

Safety, L. I.-F. (s.f.). *Agrolab*. Obtenido de Muestreos Suelos: http://agrolab.com.mx/sitev002/m_suelos.html

Santana, M. D. (2015). *Implementación de una red de sensores inalámbrica para la monitorización de estructuras arquitectónicas.*

Vega, H. M. (1994). *Diseño Construcción y Puesta a Punto de un Control Automático para Sistemas de Riego.* Duitama.

Veloso, C. (17 de Mayo de 2016). *E-Tools.* Obtenido de Medir Humedad del Suelo con Arduino: https://www.electrontools.com/Home/WP/2016/05/17/medir-la-humedad-del-suelo-con-arduino/

Veloso, C. (s.f.). *ETooLS.*

XCTU, E. X. (s.f.). *Sparkfun*.

Yemlahi, N. (2009). *Ingeniería Técnica de Telecomunicación especialidad Sistemas Electrónicos.*

Zaballos, J. P. (26 de Junio de 2006). *Niveles de Humedad del Suelo y Agua Disponible: El agua en el suelo 3*. Obtenido de Madrid Blogs: http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2006/06/26/33002

ANEXOS

Configuración Inicial Xbee

Para la configuración y programación del dispositivo es necesario hacer uso de un dispositivo llamado Xbee Explorer USB, el cual se encarga de comunicarse directamente con los pines seriales del Xbee, permitiendo realizar la programación del dispositivo mediante el programa XCTU de Digi, el cual será tratado a continuación.

Figura 41. Adaptación Xbee con Explorer USB.
(XCTU, s.f.)

Configuración del dispositivo Xbee S2C mediante el programa XCTU

1. Se realiza la búsqueda de puertos COM del computador para que el programa encuentre el dispositivo Xbee conectado.

2. Se seleccionó el puerto en el cual fue detectado el dispositivo.

3. Los parámetros por defecto se dejan como están.

4. Se agrega el dispositivo encontrado para su respectiva configuración.

5. Por último, se selecciona el dispositivo encontrado para realizar la configuración de los parámetros.

Anexos Digitales

En este anexo se encuentran los archivos digitales, los cuales estarán guardados en el CD, estos archivos son los siguientes:

1. Códigos de programación comentados los cuales fueron implementados durante el desarrollo del proyecto, realizados en Matlab.
2. Planos realizados en Inventor.