



# **Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica  
Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

## **Diseño e implementación de un sistema electrónico de control de humedad de suelo y su relación con el uso eficiente del agua de riego agrícola en el año 2021 en el distrito de El Agustino**

### **TESIS**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

### **AUTOR**

Daniel Gibran CORDOVA SUSANIBAR

### **ASESOR**

Milton RIOS JULCAPOMA

Lima, Perú

2023



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Cordova, D. (2023). *Diseño e implementación de un sistema electrónico de control de humedad de suelo y su relación con el uso eficiente del agua de riego agrícola en el año 2021 en el distrito de El Agustino*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

---

## Metadatos complementarios

<b>Datos de autor</b>	
Nombres y apellidos	Daniel Gibran Cordova Susanibar
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	47325024
URL de ORCID	No Aplica
<b>Datos de asesor</b>	
Nombres y apellidos	Milton Rios Julcapoma
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08835538
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0000-0003-1725-7235">https://orcid.org/0000-0003-1725-7235</a>
<b>Datos del jurado</b>	
<b>Presidente del jurado</b>	
Nombres y apellidos	Juan Antonio Apestequia Infantes
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10423762
<b>Miembro del jurado 1</b>	
Nombres y apellidos	Juan Francisco Tisza Contreras
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08596442
<b>Miembro del jurado 2</b>	
Nombres y apellidos	Oscar Armando Casimiro Pariasca
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06592392
<b>Datos de investigación</b>	
Línea de investigación	C.0.5.5 Sistemas Embebidos
Grupo de investigación	Aplicaciones de las Tecnologías De Información y Comunicaciones - ATICS

Agencia de financiamiento	No Aplica
Ubicación geográfica de la investigación	Huerto: El Oasis Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: El Agustino Urbanización: Las Praderas Latitud: -12.030574, Longitud: -76.964906
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Febrero 2021 - Julio 2021
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería eléctrica, Ingeniería Electrónica <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.01">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.01</a> Sistemas de automatización, Sistemas de control <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.03">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.03</a>



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS  
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA  
Teléfono 619-7000 Anexo 4226  
Calle Germán Amezaga 375 – Lima 1 – Perú



## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS Nº 066/FIEE-EPIE/2023

Los suscritos Miembros del Jurado, nombrados por la Dirección de la Escuela Profesional de Electrónica de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, reunidos en la fecha, bajo La Presidencia del **MG. JUAN ANTONIO APESTEGUIA INFANTES**, integrado por el **MG. JUAN FRANCISCO TISZA CONTRERAS**, el **ING. OSCAR ARMANDO CASIMIRO PARIASCA** y Miembro Asesor el **ING. MILTON RIOS JULCAPOMA**.

Después de escuchar la Sustentación de la Tesis del **Bach. DANIEL GIBRAN CORDOVA SUSANIBAR** con código N° 11190085 que para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico sustentó la tesis **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO DE CONTROL DE HUMEDAD DE SUELO Y SU RELACIÓN CON EL USO EFICIENTE DEL AGUA DE RIEGO AGRÍCOLA EN EL AÑO 2021 EN EL DISTRITO DE EL AGUSTINO**.

El jurado examinador procedió a formular las preguntas reglamentarias y, luego de una deliberación en privado, decidió aprobar otorgándole el calificativo de **dieciséis (16)**.

Ciudad Universitaria, 20 de mayo del 2023

**MG. JUAN ANTONIO APESTEGUIA INFANTES**

**Presidente de Jurado**

**MG. JUAN FRANCISCO TISZA CONTRERAS**

**Miembro Jurado**

**ING. OSCAR ARMANDO CASIMIRO PARIASCA**

**Miembro de Jurado**

**ING. MILTON RIOS JULCAPOMA**

**Miembro Asesor**



### CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Milton Ríos Julcapoma en mi condición de asesor acreditado con el Acta de Sustentación de trabajo de Suficiencia Profesional N°066/FIEE-EPIE/2023 del trabajo de suficiencia profesional cuyo título es: Diseño e implementación de un sistema electrónico de control de humedad de suelo y su relación con el uso eficiente del agua de riego agrícola en el año 2021 en el distrito de El Agustino, presentado por el bachiller Daniel Gibran Córdova Susanibar para optar al título profesional de Ingeniero Electrónico. CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de 9% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**. Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado correspondiente.

Firma del Asesor

DNI: 08835538.

Nombres y apellidos del asesor:

Mg. Milton Ríos Julcapoma



## RESUMEN

Uno de los principales sectores productivos en nuestro país es el sector agrícola. Gran parte de este sector pertenece al pequeño y micro agricultor, ellos dependen fuertemente de su conocimiento y experiencia ya que no se basan en el uso de herramientas tecnológicas para mejorar la eficiencia de producción.

La pérdida de calidad del suelo por uso excesivo de agua es uno de los problemas más importantes, por ello en el presente trabajo se busca aportar eficiencia en el uso de agua de riego gracias a un control correcto de la humedad de campo. Este trabajo busca sensibilizar e introducir al pequeño agricultor en la transformación digital y pueda dar los primeros pasos en la sistematización en agricultura a bajo costo.

El trabajo está dividido en 3 etapas: etapa de control, adquisición de datos y comunicación. La etapa de control consta de un sistema control de humedad y flujo de agua para el riego. La etapa de adquisición de datos recopila la información y finalmente, la etapa de comunicación envía los datos del sistema electrónico a la nube.

El sistema electrónico se puso a prueba en un huerto por 35 días. Luego de este periodo se muestra el análisis de resultados.

**Palabras clave:** Sistema de control, humedad de campo, zigbee, sigfox, plataforma IoT.



## **ABSTRACT**

One of the main productive sectors in our country is the agricultural sector. Much of this sector belongs to the small and micro farmers, they strongly depend on their knowledge and experience since they are not based on the use of technological tools to improve production efficiency.

The loss of soil quality due to excessive use of water is one of the most important problems, for this reason, in the present work we seek to provide efficiency in the use of irrigation water thanks to a correct control of field humidity. This work seeks to sensitize and introduce the small farmer to digital transformation and can take the first steps in the systematization of agriculture at a low cost.

The work is divided into 3 stages: control stage, data acquisition, and communication. The control stage consists of a humidity control system and water flow for irrigation. The data acquisition stage collects the information and finally, the communication stage sends the data from the electronic system to the cloud.

The electronic system was tested in an orchard for 35 days. After this period, the analysis of results is shown.

**Keywords:** Control system, crop field humidity, zigbee, sigfox, IoT platform.

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis padres Jesús y Zoila y mi hermana Giselle, que me brindaron todo su apoyo para convertirme en un profesional y su gran sabiduría para tomar buenas decisiones. También dedico este trabajo a mi novia Irenia, por su aliento constante a poder continuar esforzándome y ver el lado positivo de cualquier obstáculo. Y a toda mi familia, por haberme acompañado durante este camino.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a la UNALM, por haberme permitido ingresar a sus instalaciones para aprender más sobre las soluciones de riego, así también agradezco a INICTEL-UNI por permitirme utilizar parte de su equipamiento para esta tesis, a mi alma mater, la UNMSM por haberme permitido conocer grandes profesores durante mi formación profesional y sobre todo al Ing. Milton Ríos por su gran apoyo y constante asesoría para el desarrollo de esta tesis.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>ii</b>
<b>DEDICATORIA</b>	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b>	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>ix</b>
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 Planteamiento del Problema	1
1.2 Definición del Problema	4
1.2.1 Problema General	4
1.2.2 Problemas Específicos	4
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Justificación e Importancia de la Investigación	5
1.4.1 Justificación Teórica	5
1.4.2 Justificación Práctica	5
1.5 Limitaciones de la Investigación	6
<b>CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO</b>	<b>8</b>
2.1 Antecedentes del Estudio	8
2.2 Bases Teóricas	11

2.2.1 Agricultura de precisión	11
2.2.2 Microcontrolador	11
2.2.3 Computación en la nube	12
2.2.4 IoT (Internet de las cosas)	13
2.2.5 Plataforma IoT	14
2.2.6 Eficiencia del uso del agua en riego agrícola	14
2.2.7 Medición de la humedad de suelo	16
2.2.8 Sensores de medición de humedad del suelo	23
2.2.9 Sistema de Control	31
2.2.10 Redes LPWAN	40
2.2.11 Red Sigfox	45
2.2.12 Dashboard IoT	55
2.2.13 Zigbee	58
2.3 Definición de Términos	62
2.3.1 Sistema de control de riego	62
2.3.2 Humedad óptima de suelo	62
2.3.3 Cantidad de agua para alcanzar la humedad óptima de suelo	63
2.3.4 Monitoreo y control de las variables de riego	63
<b>CAPÍTULO 3 HIPÓTESIS Y VARIABLES</b>	<b>64</b>
3.1 Hipótesis	64
3.1.1 Hipótesis General	64
3.1.2 Hipótesis Específicas	64
3.2 Variables	65
3.2.1 Variable Dependiente	65
3.2.2 Variable Independiente	65
3.3 Operacionalización de las Variables	66
<b>CAPÍTULO 4 MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>67</b>

4.1 Área de Estudio	67
4.2 Enfoque de la Investigación	67
4.3 Tipo de Investigación	68
4.4 Diseño de Investigación	68
4.5 Población y Muestra	69
4.6 Procedimientos de Recolección de Información	69
4.6.1 Desarrollo del Proyecto	70
4.6.2 Implementación del Sistema Electrónico	87
4.6.3 Experimentación	115
4.6.4 Credibilidad de la Investigación	133
4.7 Análisis de Datos	134
<b>CAPÍTULO 5 RESULTADOS</b>	<b>139</b>
5.1 Presentación y Análisis de Resultados	139
<b>CAPÍTULO 6 DISCUSIÓN</b>	<b>145</b>
<b>CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>147</b>
7.1 Conclusiones	147
7.2 Recomendaciones	148
<b>REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>150</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>158</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Cuadro Comparativo LPWAN Licenciadas y No Licenciadas</i>	<b>43</b>
<b>Tabla 2</b> <i>Características del Protocolo Zigbee</i>	<b>59</b>
<b>Tabla 3</b> <i>Operacionalización de las Variables</i>	<b>66</b>
<b>Tabla 4</b> <i>Cuadro Comparativo de Protocolos Inalámbricos</i>	<b>78</b>
<b>Tabla 5</b> <i>Consumo en Módulo Principal</i>	<b>90</b>
<b>Tabla 6</b> <i>Costos de Implementación del Sistema Electrónico</i>	<b>143</b>
<b>Tabla 7</b> <i>Matriz de Consistencia</i>	<b>158</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Diagrama de Bloques de un Microcontrolador Básico</i>	14
Figura 2 <i>Condición del Suelo Respecto al Contenido de Agua</i>	20
Figura 3 <i>Contenido de Agua en Base al Tipo de Suelo</i>	22
Figura 4 <i>Sonda de Neutrones</i>	25
Figura 5 <i>Sensor de Resistencia Eléctrica de Suelo</i>	27
Figura 6 <i>Tensiómetro de Suelo</i>	28
Figura 7 <i>Sonda de Neutrones y sus Partes</i>	31
Figura 8 <i>Tensiómetro y sus Partes</i>	33
Figura 9 <i>Esquema Interno de un Sensor Resistivo</i>	35
Figura 10 <i>Capacitor de Placas Paralelas</i>	36
Figura 11 <i>Capacitor Coplanar</i>	37
Figura 12 <i>Permitividad de Diferentes Materiales en Comparación al Agua</i>	39
Figura 13 <i>Componentes Básicos de un Sistema de Control</i>	40
Figura 14 <i>Sistema Retroalimentado</i>	42
Figura 15 <i>Lazos de Control en Cascada</i>	44
Figura 16 <i>Control Principal y Control Secundario</i>	45
Figura 17 <i>Diagrama Esquemático de un Control de Lazo Cerrado de CC Típico</i>	48
Figura 18 <i>Diagrama Esquemático de un Control de Lazo Cerrado de CA Típico</i>	49
Figura 19 <i>Diagrama de Bloques de un Sistema de Control de Muestreo de Datos</i>	50



Figura 20 <i>Sistema de Piloto Automático Digital para un Misil Guiado</i>	50
Figura 21 <i>Cuadro Rango vs Velocidad de Datos de Tecnologías Inalámbricas</i>	52
Figura 22 <i>Cuadro de Tecnologías LPWAN</i>	54
Figura 23 <i>Mapeo de Casos de Uso y Tecnologías de Red</i>	56
Figura 24 <i>Cobertura Red Sigfox en Perú</i>	58
Figura 25 <i>Diagrama de Modulación UNB en la Tecnología Sigfox</i>	60
Figura 26 <i>Diagrama de Réplica de Mensajes Sigfox en Diferentes Frecuencias</i>	61
Figura 27 <i>Diagrama de Mensajes Sigfox Recibidos por Estaciones Base</i>	62
Figura 28 <i>Diagrama de Arquitectura de red de Sigfox</i>	64
Figura 29 <i>Arquitectura Plana Sigfox</i>	65
Figura 30 <i>Gráfico de Consumo de Corriente vs Tiempo en Sigfox</i>	66
Figura 31 <i>Gráfico de Impacto de Ruido en la Señal</i>	67
Figura 32 <i>Esquema de Seguridad de Sigfox</i>	68
Figura 33 <i>Esquema de Revisión de Mensaje Uplink en Sigfox</i>	70
Figura 34 <i>Ejemplo Dashboard IoT</i>	74
Figura 35 <i>Topologías de Red Zigbee</i>	77
Figura 36 <i>Esquema de Comunicación Zigbee</i>	78
Figura 37 <i>Diagrama de Bloques del Sistema General</i>	85
Figura 38 <i>Tarjeta de Desarrollo UFOX</i>	86
Figura 39 <i>Diagrama de Bloques de Etapa de Control</i>	87
Figura 40 <i>Gráfico de Regla de Acción de Controlador PD</i>	89
Figura 41 <i>Diagrama de Flujo de Control de Riego</i>	92
Figura 42 <i>Diagrama de Bloques Etapa de Adquisición de Datos</i>	95
Figura 43 <i>Sensor de Humedad de Suelo Corroído</i>	96
Figura 44 <i>Sensor de Humedad de Suelo Capacitivo</i>	97
Figura 45 <i>Diagrama de Flujo para Adquisición de Datos de Humedad</i>	98

Figura 46 <i>Diagrama de Bloques Etapa de Comunicación</i>	100
Figura 47 <i>Diagrama Flujo de Mensajes</i>	101
Figura 48 <i>Diagrama de Flujo para Mensajes Uplink y Downlink</i>	102
Figura 49 <i>Diagrama Módulo Principal</i>	104
Figura 50 <i>Diagrama Módulo de Lectura de Humedad</i>	105
Figura 51 <i>Diagrama de Conexión Módulo Principal</i>	106
Figura 52 <i>Módulo LM2596</i>	108
Figura 53 <i>Módulo IRF520N</i>	108
Figura 54 <i>Calibración de Flujómetro para Riego</i>	111
Figura 55 <i>Login Backend Sigfox</i>	112
Figura 56 <i>Administrador de Dispositivos Sigfox</i>	112
Figura 57 <i>Registro de Mensajes en el Backend</i>	113
Figura 58 <i>Login Plataforma Losant</i>	114
Figura 59 <i>Programación de Workflow Losant</i>	114
Figura 60 <i>Dashboard IoT en Losant para Monitoreo del Riego</i>	115
Figura 61 <i>Panel de Control de Setpoint de Humedad y Horario de Riego</i>	116
Figura 62 <i>Workflow Losant para Manejo de Datos</i>	117
Figura 63 <i>Formato Array Uplink Sigfox para el Sistema</i>	118
Figura 64 <i>Formato Array Downlink Sigfox para el Sistema</i>	119
Figura 65 <i>Diagrama de Conexión Módulo Lectura de Humedad</i>	120
Figura 66 <i>Lectura Xbee en Modo Activo</i>	124
Figura 67 <i>Lectura Xbee Modo Bajo Consumo</i>	125
Figura 68 <i>Test entre Módulo Principal y Módulo de Lectura de Humedad</i>	127
Figura 69 <i>Esquemático de Módulo Principal en Circuit Maker</i>	128
Figura 70 <i>Diagrama PCB Módulo Principal en Circuit Maker</i>	129
Figura 71 <i>Vista Frontal 3D PCB Módulo Principal</i>	130
Figura 72 <i>Vista Trasera 3D PCB Módulo Principal</i>	130

Figura 73 <i>Placa Física de Módulo Principal</i>	131
Figura 74 <i>Esquemático de Módulo Lectura de Humedad en Circuit Maker</i>	132
Figura 75 <i>Diagrama PCB Módulo Lectura de Humedad en Circuit Maker</i>	132
Figura 76 <i>Vista Frontal 3D PCB Módulo Lectura de Humedad</i>	133
Figura 77 <i>Vista Trasera 3D PCB Módulo Lectura de Humedad</i>	134
Figura 78 <i>Placa Física Módulo Lectura de Humedad</i>	135
Figura 79 <i>Pesado de Muestra con Tierra Seca</i>	138
Figura 80 <i>Calibración del Sensor de Humedad</i>	139
Figura 81 <i>Toma de Dato de Humedad de la Muestra</i>	140
Figura 82 <i>Muestra de Tierra Saturada</i>	141
Figura 83 <i>Pesado de Muestra de Tierra Húmeda</i>	142
Figura 84 <i>Toma de Dato de Tierra Húmeda</i>	143
Figura 85 <i>Nivel de Agotamiento Permisible</i>	144
Figura 86 <i>Diagrama Entrada Escalón al Proceso Humedad de Suelo</i>	145
Figura 87 <i>Montaje de Módulo Principal en Tablero</i>	146
Figura 88 <i>Montaje de Módulo de Lectura de Humedad en Caja.</i>	147
Figura 89 <i>Montaje de Módulo de Lectura de Humedad en Suelo</i>	148
Figura 90 <i>Montaje Módulo Principal en Suelo</i>	149
Figura 91 <i>Gráfico de Humedad de Suelo y Temperatura de Suelo</i>	150
Figura 92 <i>Gráfico de Planta de Sistema de Control</i>	151
Figura 93 <i>Sistema Control y Monitoreo</i>	154
Figura 94 <i>Gráfico Control de Humedad de Suelo, Temperatura de Suelo y Riego</i>	156
Figura 95 <i>Gráfico Temperatura de Suelo y Temperatura Ambiente</i>	157
Figura 96 <i>Gráfico Humedad y Temperatura Ambiente</i>	157
Figura 97 <i>Gráfico Riego y Volumen Acumulado</i>	158
Figura 98 <i>Gráfico de Dispersión de Humedad y Temperatura Ambiente</i>	159

Figura 99 <i>Gráfico de Dispersión de Humedad de Suelo y Temperatura Suelo</i>	160
Figura 100 <i>Gráfico de Dispersión de Humedad Ambiente y Temperatura Suelo</i>	161
Figura 101 <i>Gráfico Detallado de Resultados del Control de Humedad</i>	163

## **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Planteamiento del Problema**

El Programa Subsectorial de Irrigaciones (2019), señala que la falta de productividad y la baja calidad de los productos agrícolas obtenidos por los pequeños y micro productores agrícolas en nuestro país se debe a la utilización de técnicas tradicionales y deficientes durante el proceso de producción. Además, el PSI indica que diversos estudios concluyen que la eficiencia del agua utilizada para riego en las actividades agrícolas de los pequeños y micro agricultores oscila entre el 28% y el 32%, lo que indica un alto desperdicio de agua. Esta deficiente aplicación del agua se debe al mal estado de las redes de conducción y distribución del agua, así como al uso de surcos en la tierra como única forma de riego (pág. 2).

Según el MINAGRI (2015) no se tiene un inventario actualizado de la situación de la infraestructura de riego en el país, pero existe un deficiente mantenimiento de los sistemas de riego que determinan que la capacidad hidráulica de los canales disminuya, produciéndose pérdidas en la conducción y distribución. En muchos casos se riega con el doble o más del volumen recomendado para tecnologías tradicionales, siendo números que pueden mejorar (pág. 8).

Según la FAO (2018), el inadecuado manejo del agua puede tener graves consecuencias, ya que contribuye a la escasez de agua, la contaminación del suelo, la degradación de la tierra y la propagación de enfermedades. Las prácticas deficientes de drenaje e irrigación pueden causar anegamientos y salinización, lo que puede reducir la productividad de las tierras de riego en todo el mundo en casi un 50%. Si no se lleva a cabo un drenaje adecuado de los campos irrigados, la sal se acumula en los suelos a

medida que el agua se evapora, lo que puede llevar a la esterilidad de las tierras. (pág. 1 - 5)

El MINAGRI y el SENAMI en el *Programa presupuestal multisectorial para la reducción de la degradación de los suelos agrarios (2017)* especifican como una de las causas directas de la degradación de los suelos al uso inadecuado del agua. El usar demasiada agua provoca acumulación de elementos pesados, sales y anegamientos que originan la pérdida de la productividad del suelo. La salinidad es uno de los principales problemas ocasionados por el exceso de agua en el riego. Este problema hace inservible la tierra de cultivo. Si los campos no se drenan de manera correcta o no se ejerce un control adecuado, las sales pueden acumularse al evaporarse el agua de riego, y provoca que estas vuelvan estériles las tierras de cultivo (pág. 33).

En un estudio realizado por el Banco Mundial sobre el futuro del riego en nuestro país, MINAGRI (2015) señala que existen ciertos aspectos que no están recibiendo la atención necesaria por parte del gobierno y la comunidad científica. Entre ellos, se destacan los sistemas de drenaje y la eficiencia técnica de uso de sistemas afectados por problemas de anegamiento, inundación y salinización de los suelos. (pág. 12).

Algunos de los problemas que se podrían resolverse al aplicar el uso de agua de manera más eficiente:

- Mayor superficie que se podría sembrar con los saldos que se generan por una mayor eficiencia en aplicación del riego.
- La mayor producción a obtener por el mejoramiento de los suelos afectados por drenaje y salinización, o por su reincorporación a la actividad productiva.
- La mayor productividad en los cultivos, ya que el mal manejo actual del agua incide negativamente en los rendimientos.

(pág. 9)

MINAGRI (2012), menciona que este problema viene dándose en mayor medida para el pequeño y micro agricultor, los cuales muchas veces no cuentan con los recursos económicos y conocimiento necesario para desarrollar la agricultura de manera eficiente. El no apoyarse con nuevas

herramientas que permitan sacar un mayor provecho al suelo de cultivo limita su producción, la cual en gran medida está destinada al autoconsumo y a pequeños negocios locales. En el país, casi un tercio de la población vive en las zonas rurales y aproximadamente el 50% de sus ingresos proviene de la agricultura (pág. 6).

En un informe publicado por MINAGRI en 2012, se identifican cuatro tipos distintos de agricultura que se desarrollan en el sector agropecuario, los cuales varían según el nivel tecnológico, la capacidad de acceso a servicios y la integración al mercado de cada productor. Estos tipos de agricultura son los siguientes:

- Agricultura de subsistencia.
- Agricultura familiar de pequeños negocios rurales.
- Agricultura de producción comercial (pequeños y medianos productores).
- Agricultura intensiva y de agroexportación: producción agraria empresarial.

(pág. 18)

MINAGRI (2012) en el artículo *Plan Estratégico Sectorial Multianual* mencionan que el problema a abordar viene dado tanto para la Agricultura con Producción de Subsistencia y la Familiar de Pequeños Negocios Rurales, los cuales abarcan el sector del pequeño y micro agricultor. Estos son los sectores más afectados por la falta de desarrollo tecnológico los cuales les permitan maximizar la producción. Siendo que este sector tiene poco o carece del conocimiento, se debe ayudar al agricultor a familiarizarse con el uso de las herramientas y sistemas. (pág. 61).

Frente a todo lo expuesto, queda claro que, el no contar con sistemas de riego eficientes en el uso del agua, lleva al desaprovechamiento de las tierras de cultivo. Siendo este un problema que se da en mayor medida para el pequeño agricultor, se propondrá un sistema de control de humedad de suelos el cual permita introducir al agricultor en la transformación digital y de esta manera pueda dar los primeros pasos en la sistematización de procesos en agricultura a un bajo costo.

## **1.2 Definición del Problema**

### ***1.2.1 Problema General***

- ¿De qué manera el sistema de control de humedad de suelo se relaciona con el uso eficiente del agua para riego agrícola?

### ***1.2.2 Problemas Específicos***

- ¿De qué manera el sistema de control se relaciona con el tipo de riego agrícola?
- ¿De qué manera la humedad óptima de suelo se relaciona con el volumen de agua para el riego agrícola?
- ¿De qué manera la medición y monitoreo de variables se relacionan con el uso eficiente del agua para riego agrícola?

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo general***

- Determinar la relación del sistema de control de humedad de suelo con el uso eficiente del agua para riego agrícola.

### ***1.3.2 Objetivos específicos***

- Determinar la relación del sistema de control con el tipo de riego agrícola.



- Evaluar la relación de la humedad óptima de suelo con el volumen de agua para el riego agrícola.
- Determinar la relación de la medición y monitoreo de variables con el uso eficiente del agua para riego agrícola.

## **1.4 Justificación e Importancia de la Investigación**

### ***1.4.1 Justificación Teórica***

En la actualidad, son muchos los sistemas que trabajan a través de un control de lazo cerrado, es decir, regulan la acción de control comparando la entrada con la salida realimentada; es por ello que esta tesis pretende aportar conocimiento en el desarrollo de sistemas de control de lazo cerrado implementados en microcontroladores, para este caso en particular, orientados al control de la humedad de suelo de cultivo.

El sistema electrónico propuesto en esta tesis hace uso de protocolos y tecnologías de comunicación importantes dentro del campo IoT; es por ello que busca aportar conocimiento en el uso de la red LPWAN de Sigfox para la comunicación con una plataforma de monitoreo de datos en la nube; así también se pretende aportar conocimiento en el montaje y despliegue de redes de sensores inalámbricos WSN con el uso de Zigbee.

A nivel del campo de agricultura de precisión, esta tesis pretende elaborar un sistema electrónico para el control de riego tecnificado con materiales económicos que aporte eficiencia en el riego.

### ***1.4.2 Justificación Práctica***

Debido a que el desarrollo del pequeño y micro agricultor rural en nuestro país ha estado alejado de las nuevas tecnologías, no tienen la oportunidad de aprovechar estos recursos en su beneficio. La agricultura

tradicional rural hace uso de herramientas poco eficientes que no permiten sacar el máximo provecho a los suelos; es por ello que esta tesis pretende proponer al agricultor una herramienta tecnológica útil para el control correcto de los procesos de cultivo a través de los datos de campo. Esta tesis permitirá aportar en el uso más eficiente del recurso hídrico para riego agrícola, así también permitirá conservar y mantener las tierras de cultivo en mejores condiciones gracias al uso de tecnologías para el control correcto de la humedad de suelo y flujo de agua, y de esta manera evitar su degradación.

### **1.5 Limitaciones de la Investigación**

- El presente trabajo desarrolla un estudio acerca de la aplicación de técnicas de control de lazo cerrado implementados con microcontrolador. Para este caso, orientados al sector agrícola.
- En este trabajo no se pretende reemplazar ningún sistema avanzado de control de parámetros de suelos de cultivo, sino más bien se busca iniciar al pequeño agricultor en el uso de herramientas tecnológicas de bajo costo aplicadas a la agricultura.
- Debido a que el modelado matemático del proceso a controlar (humedad de suelo de cultivo) puede ser complejo debido a las variables que la componen, en este trabajo se realiza el modelado por experimentación, basado en la identificación de la curva de reacción.
- El sistema de control fue adaptado al tipo de suelo que usamos en nuestra prueba, por lo que su implementación en un entorno distinto dependerá de un nuevo análisis del suelo y su capacidad de campo (CC). Considerar también que el sistema de control es viable para cultivos donde se desee mantener la humedad en valores iguales o inferiores a la capacidad máxima de retención de agua del suelo, por ello se excluyen cultivos que usen la técnica de riego por inundación (saturación de suelo).

- El sistema se probó en condiciones temperatura ambiental normales. El sistema no se probó en rangos extremos de temperatura, por lo que se asegura el funcionamiento en el en condiciones ambientales similares a la prueba realizada.
- Para las pruebas del sistema de control se usó una planta de chirimoya y se aplicó el riego vía manguera convencional. El sistema no se limita a este tipo de planta ni el tipo de riego, sino más bien al tipo de suelo y las excepciones de riego mencionadas anteriormente.
- Debido a que el planteamiento es poder mantener un bajo costo en la implementación del sistema, se utilizan componentes y sensores económicos que brinden una respuesta aceptable.
- El sistema electrónico está sujeto a implementarse dentro de una zona con cobertura de servicio activo de la red LPWAN de Sigfox para el envío de datos de los sensores hacia Internet. El no encontrarse dentro de una zona de cobertura no limita el funcionamiento del sistema de control ya que las configuraciones del setpoint de la humedad y el periodo de tiempo de funcionamiento pueden ser pre programadas. Así mismo se debe contar con una fuente estable de voltaje de CA (220V – 60Hz) para alimentación del sistema electrónico.

## **CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Antecedentes del Estudio**

En su trabajo “Implementación, control y monitoreo de un sistema de riego por goteo subterráneo con microcontroladores”, Simon (2018) destaca la creciente necesidad de la combinación de la electrónica y la agricultura gracias a los avances tecnológicos actuales. La automatización del sistema de riego, según el autor, tiene múltiples ventajas, entre ellas, el aumento de la eficiencia de los recursos, la gestión del recurso hídrico, la mejora de la producción en cantidad y calidad. En su proyecto de investigación, se utilizó un microcontrolador y una aplicación móvil para automatizar un sistema de riego por goteo subterráneo. Se instalaron varios sensores analógicos y digitales para medir la presión, la humedad del suelo, el caudal, el arco de riego y el nivel de agua en el reservorio. El microcontrolador procesa la información de los sensores y controla el sistema de riego a través de relés para encender y apagar las electroválvulas y la bomba. Además, los sensores tienen ecuaciones de ajuste y factores de conversión que pueden ser utilizados en códigos de programación gracias a su capacidad de calibración con un margen de error dentro de las especificaciones técnicas (pág. 14).

En su investigación titulada "Diseño e implementación de un sistema de riego automatizado y monitoreo de variables ambientales mediante IoT en los cultivos urbanos de la Fundación Mujeres Empresarias Marie Poussepin", Cortes et al. (2020) presentaron un proyecto dirigido a la agricultura urbana en la Fundación Mujeres Empresarias Marie Poussepin, Colombia. Actualmente, las mujeres que se dedican a esta actividad no cuentan con

sistemas de riego tecnológicos que les permitan medir la humedad, controlar el tiempo de riego, monitorear los factores climáticos y aplicar las dosis adecuadas de agua. Para abordar esta necesidad, se incorporó un sistema de sensores de humedad que envía información al sistema de control, el cual inicia el proceso de riego según los parámetros y necesidades del cultivo. Toda la información obtenida por los sensores se almacena en la nube a través de IoT y se guarda en un servidor web con fines estadísticos e investigativos para identificar los parámetros óptimos de cada cosecha en el futuro. El objetivo de este proyecto es reducir el impacto ambiental y evitar el uso excesivo de agua generado por el riego manual. La implementación de esta tecnología tiene como finalidad aumentar la producción de alimentos de alta calidad en la fundación, desde la germinación hasta la cosecha, optimizando y reduciendo las pérdidas significativas por falta de atención en el proceso de cultivo, que es una de las problemáticas actuales de la fundación (págs. 15-16).

En el artículo "IoT en aplicaciones de Agricultura de Precisión utilizando una Red Inalámbrica de Sensores de Humedad" (Mat et al., 2016), se resalta la importancia de la tecnología de redes inalámbricas de sensores (WSN) y redes inalámbricas de sensores de humedad de suelo (WMSN) en el contexto de la agricultura de precisión. En este sentido, el riego es un aspecto crítico en la agricultura, ya que un uso inadecuado del agua puede resultar en una pérdida de recursos. Por esta razón, se ha optado por utilizar la tecnología de redes inalámbricas de sensores para implementar un sistema de irrigación eficiente. Asimismo, el uso de WSN ha mejorado considerablemente la aplicación del control y monitoreo en la agricultura. En particular, una red inalámbrica de sensores de humedad (WMSN) ha sido utilizada en el estudio de Agricultura de Precisión (PA) para lograr un riego óptimo. El artículo describe pruebas que se realizaron para evaluar la eficiencia de un método de control retroalimentado en la irrigación de suelos para invernadero, en comparación con la irrigación programada. El método de irrigación retroalimentada riega la planta cuando el nivel de humedad alcanza un valor predefinido. Los resultados de la prueba muestran que se ha logrado ahorrar un promedio de 1,500 ml de agua por día por árbol con el método de irrigación retroalimentada. (pág. 1).

En el paper "Diseño e implementación de un esquema de IoT basado en la nube para agricultura de precisión", Khattab et al. (2016) indican que la tecnología del Internet de las Cosas (IoT) está transformando diversos aspectos de nuestra vida cotidiana. Dentro de estos cambios, la Agricultura de Precisión se posiciona como uno de los paradigmas en los que se pueden aprovechar las ventajas del IoT para mejorar la eficiencia en la producción y uniformidad en los campos de cultivo, optimizar la calidad de los cultivos y reducir el impacto negativo en el medio ambiente. En este artículo se presenta una arquitectura de IoT diseñada específicamente para aplicaciones en agricultura de precisión, la cual consta de tres capas que permiten recopilar y transmitir los datos necesarios al back-end basado en la nube para su procesamiento y análisis. Finalmente, se pueden enviar acciones de retroalimentación basadas en los datos analizados de vuelta a los nodos front-end. (pág. 1).

En su artículo titulado "Aplicaciones de agricultura de precisión utilizando una red inalámbrica de sensores de humedad", Rawidean (2015) sostiene que el riego inadecuado puede ocasionar un despilfarro de agua, el cual podría evitarse implementando tecnología de redes de sensores inalámbricos (WSN) para lograr un sistema de riego apropiado. Esta tecnología ha mejorado significativamente las aplicaciones de monitoreo y control, y podría usarse para lograr un riego eficiente a través de una red inalámbrica de sensores de humedad WMSN. La agricultura convencional está evolucionando hacia la agricultura digital, específicamente la agricultura de precisión (AP), en la cual WSN es una solución efectiva y económicamente viable para una amplia gama de aplicaciones, desde el monitoreo de salud y del medio ambiente, hasta las operaciones militares. WSN es una tecnología moderna que combina el conocimiento de sensores, control de automatización, transmisión de redes digitales, almacenamiento y procesamiento de información. En definitiva, la agricultura de precisión (AP) es un concepto que permite al agricultor acceder y controlar manual, programada o automáticamente los parámetros de su finca, lo que se traduciría en una producción agrícola más eficiente.

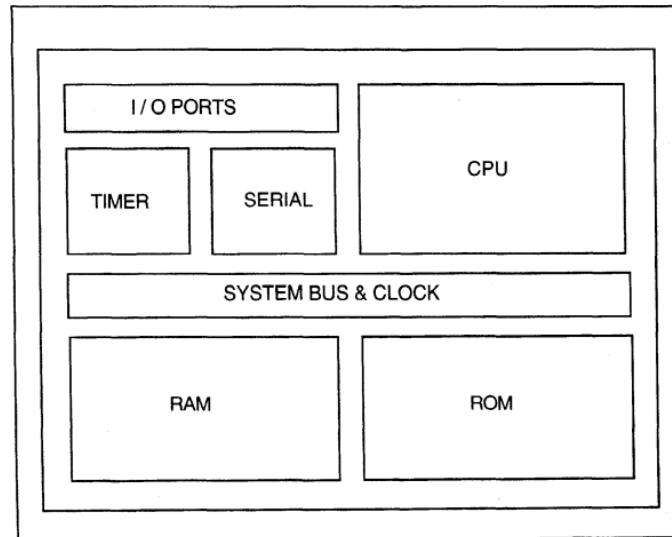
## **2.2 Bases Teóricas**

### ***2.2.1 Agricultura de precisión***

La National Research Council (1997) define a la agricultura de precisión (PA abreviatura en inglés) ha sido definida recientemente por la NRC (National Research Council) de U.S.A como una estrategia de gestión que usa tecnología de la información para usar datos de múltiples fuentes para apoyar en la toma de decisiones asociadas con la producción de los campos de cultivo. Es un concepto el cual engloba diferentes tecnologías aplicadas al campo. La Agricultura de Precisión se apoya en el uso de tecnologías y equipamiento como satélites, sensores, datos geográficos e imágenes para recolectar información la cual permita tomar mejores decisiones para la producción.

### ***2.2.2 Microcontrolador***

Bannatyne & Viot (1998) definen a un microcontrolador como un circuito integrado que al menos contiene los elementos necesarios de un sistema de computadora completo: CPU, memoria, un oscilador de reloj y entradas/salidas analógicas y/o digitales. Los microcontroladores comúnmente contienen módulos periféricos adicionales para comunicación serial y temporizadores. Un ejemplo de un simple micro controlador es el siguiente:



**Figura 1**

*Diagrama de Bloques de un Microcontrolador Básico*

*Nota.* Fuente Introduction to Microcontrollers, R. Bannatyne and G. Viot, 1998.

Existen dos tipos de arquitectura de microcontroladores: arquitectura de Von-Neuman, también conocida como CISC (Complex Instruction Set Computer); y la arquitectura de Harvard conocida también como RISC (Reduced Instruction Set Computer), siendo la más moderna de ambas la arquitectura RISC. La gran mayoría de microcontroladores comerciales usan la arquitectura RISC en su diseño debido a su menor cantidad de instrucciones y la simpleza del diseño. Este tipo de microcontroladores pueden ejecutar instrucciones completas inclusive en un ciclo de reloj a diferencia de los CISC, por ello son más fáciles de integrar con compiladores y lenguajes de alto nivel. (Watelectronic, 2018)

### **2.2.3 Computación en la nube**

De acuerdo a la Internet Engineering Task Force (2019), define como computación en la nube (Cloud Computing) como un modelo de servicio de acceso a recursos de red bajo demanda del usuario y de pago por uso. A



través de este modelo de servicio el usuario hace uso de un pool de recursos informáticos (red, almacenamiento, software de aplicación, infraestructura, plataformas), con poco esfuerzo administrativo o poca interacción con los proveedores de servicios, de esta manera estos recursos son proporcionados rápidamente.

Aazam, Khan, Alsaffar, & Huh (2014) definen 4 categorías de servicios de computación en la nube principalmente son: Software como Servicio (SaaS), Plataforma como Servicio (PaaS), Red como Servicio (NaaS), e Infraestructura como Servicio (IaaS). En la nueva tendencia de IoT, hablamos de Nube de las cosas CoT (Cloud of Things) en el cual todo el procesamiento de la información recolectada por los sensores es realizado en la nube, ya que los dispositivos finales de IoT no tienen los recursos necesarios para analizar, filtrar y procesar los datos por ser equipamiento de bajo costo y bajos recursos de procesamiento (microcontroladores, sistemas embebidos, etc.). Esto conlleva muchas veces a que la CoT soporte protocolos de comunicación ligeros los cuales permita que equipos de campo puedan comunicarse con la nube sin demandar una gran carga de paquetes de datos.

#### ***2.2.4 IoT (Internet de las cosas)***

De acuerdo a la Internet Engineering Task Force (2016) IoT se define como la red de objetos físicos o "cosas" integradas con componentes electrónicos, software, sensores, actuadores y conectividad para permitir que los objetos intercambien datos con el fabricante, el operador u otros dispositivos conectados. Internet de las cosas se refiere a un sistema con dispositivos que a menudo están limitados en las capacidades de comunicación y computación, y que ahora se conectan a Internet o al menos a una red IP, y a varios servicios que se construyen sobre las capacidades de estos dispositivos.

### ***2.2.5 Plataforma IoT***

Según Gartner (2019), una plataforma de IoT es una colección de software local o un servicio en la nube (conocido como plataforma de IoT como servicio o PaaS) que permite el monitoreo, la gestión y el control de diferentes tipos de dispositivos finales, a menudo a través de unidades de negocios de aplicaciones desplegadas en la plataforma. Estas plataformas de IoT proporcionan típicamente capacidades de infraestructura a escala web para respaldar soluciones básicas y avanzadas de IoT y operaciones comerciales digitales.

Por su parte, Rai (2016) define la plataforma IoT como el software que conecta el hardware de borde, los puntos de acceso y las redes de datos con otras partes de la cadena de valor, que generalmente son las aplicaciones del usuario final. En general, estas plataformas se encargan de las tareas de administración en curso y visualización de datos, lo que permite a los usuarios automatizar su entorno. En este sentido, las plataformas de IoT pueden considerarse como un intermediario entre los datos recopilados en el borde y las aplicaciones móviles o SaaS que interactúan con los usuarios finales.

### ***2.2.6 Eficiencia del uso del agua en riego agrícola***

La eficiencia consiste básicamente en utilizar la menor cantidad de recursos y combinarlos de la forma más efectiva para producir algún bien o servicio. Cuando hablamos del uso eficiente del agua, la Autoridad Nacional del Agua (2015), lo define como aquel uso en el que se ha adoptado alguna medida que minimice las pérdidas por su utilización, lo que favorece su conservación y/o mejoras en su calidad. El sector agrícola tiene una gran responsabilidad que asumir en la conservación de las fuentes de agua. La agricultura representa alrededor del 70% de las extracciones de agua dulce en el mundo, de acuerdo con el informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos (Unesco, 2016). La proporción es similar en el Perú. En nuestro país, el 76% de los recursos hídricos disponibles es

consumido por la agricultura, de acuerdo con la ANA. Si consideramos el sector agropecuario en su conjunto, incluyendo la crianza de ganado, la cifra alcanza el 90% (págs. 6-8).

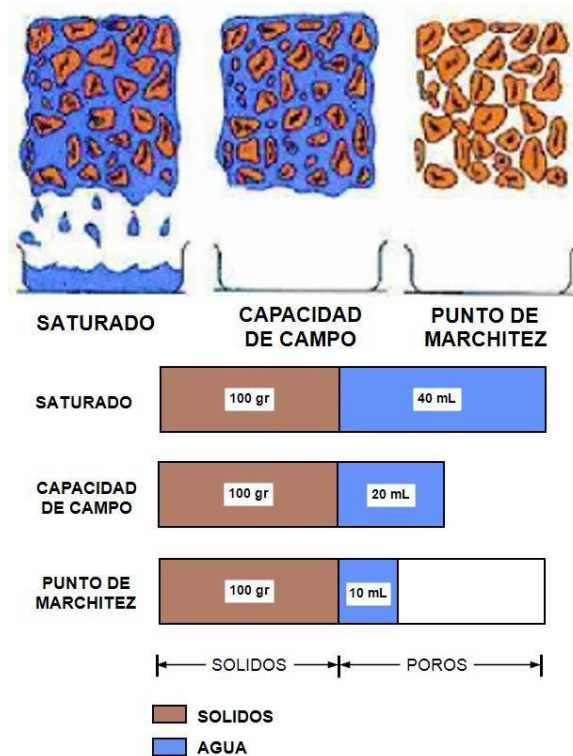
### ***2.2.6.1 Disponibilidad de agua en el suelo.***

Según lo planteado por la Administración Local del Agua (ALA) en 2010, la disponibilidad de agua en el suelo se puede identificar por medio de las siguientes fuentes:

- El agua gravitacional que se infiltra por gravedad hacia las capas más profundas.
- El agua capilar que queda retenida por las partículas del suelo, y que es absorbida por las raíces de las plantas.
- El agua higroscópica que permanece fuertemente retenida por las partículas del suelo y que no puede ser absorbida por las raíces.

Estos conceptos son importantes para entender la cantidad de agua presente en el suelo, los cuales se definen como:

- La capacidad de campo (CC) que representa la cantidad máxima de agua que el suelo puede retener después de drenarse por efecto gravitacional, permitiendo un balance adecuado entre el agua y el aire en los poros del suelo. El tiempo de drenaje varía de acuerdo a la textura del suelo.
- El punto de marchitez permanente (PMP) que indica la cantidad de agua que las plantas no pueden absorber del suelo porque está fuertemente unida a los poros del suelo.
- La saturación que ocurre cuando todos los poros del suelo están llenos de agua y no hay aire, lo que puede ser perjudicial para las plantas. Por lo tanto, es importante regar en cantidades adecuadas y contar con canales de drenaje para sacar el exceso de agua.



**Figura 2**

*Condición del Suelo Respecto al Contenido de Agua*

*Nota.* Fuente Administración Local del Agua (ALA), 2010

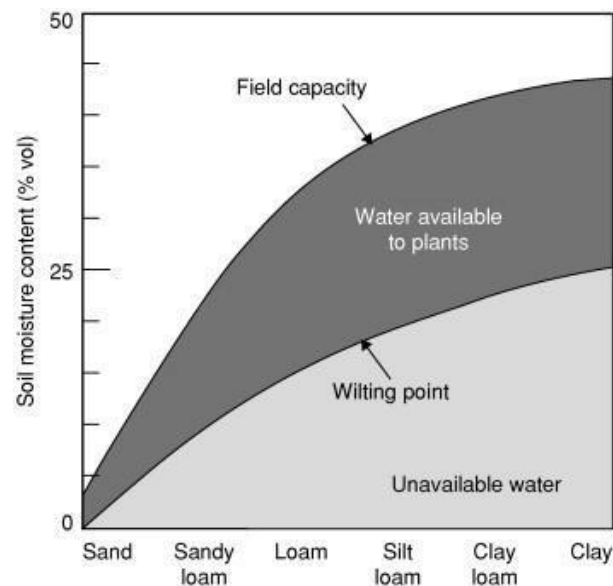
Dependiendo del tipo suelo con el cual estemos trabajando, estos tendrán un porcentaje distinto de volumen de agua el cual pueden contener sin llegar a saturación, y de la misma manera habrá una cantidad mínima antes de llegar al punto de marchitez permanente. (págs. 19-23)

### **2.2.7 Medición de la humedad de suelo**

En el artículo publicado por la Universidad de Arizona, *Métodos para medir la humedad del suelo para la programación del riego* (2010), explica lo siguiente acerca de cómo medir la humedad de suelo:

Un método que se usa comúnmente para determinar cuándo regar es monitorear la disminución de agua en el suelo. Cuando una planta crece, utiliza el agua del suelo alrededor de su zona de raíces. A medida que las plantas utilizan el agua, la humedad en el suelo baja

hasta un nivel en el cual se requiere aplicar un riego o el cultivo comienza a estresarse por falta de agua. Si no se aplica agua, la planta continuará haciendo uso de la poca humedad que queda hasta que finalmente utilice toda el agua disponible en el suelo y muera de sed. Cuando el perfil del suelo está lleno de agua y alcanza lo que se llama capacidad de campo (CC), se dice que el perfil está al 100% de su contenido de humedad disponible o a aproximadamente 0.1 bares de tensión. La tensión es una medida que determina la fuerza con la que las partículas del suelo retienen a las moléculas de agua: a mayor retención de humedad, más alta es la tensión. En el punto de capacidad de campo, cuando existe una tensión de solo 0.1 bar, el agua no es retenida fuertemente por las partículas del suelo y es fácil para las plantas extraer el agua. A medida que las plantas agotan el agua, la tensión en el suelo aumenta. La figura muestra tres curvas típicas para suelos arenosos, arcillosos y francos (pág. 2).



**Figura 3**

*Contenido de Agua en Base al Tipo de Suelo*

*Nota.* Fuente Principles of Soil and Plant Water Relations (Second Edition), M.B. Kirkham, 2014

Según Radulovich (2008), existen dos tipos de métodos para medir la cantidad de agua en el suelo: los métodos directos e indirectos. El método directo se refiere al método gravimétrico, que implica tomar una muestra del suelo, pesarla, secarla en el horno y volver a pesarla para determinar el contenido de agua de la muestra. Luego, para obtener el contenido volumétrico, se multiplica por la densidad aparente. El método gravimétrico es el método estándar utilizado como referencia para calibrar los métodos indirectos. Esta sección se enfoca en la descripción de algunos de los métodos indirectos utilizados para medir la humedad del suelo.

### ***2.2.7.1 Método directo gravimétrico***

IDEAM (2018) describe cómo se puede realizar el método gravimétrico de manera sencilla:

El método gravimétrico es el único método directo de medición de la humedad del suelo. Dicho método consiste en tomar una muestra de suelo, pesarla antes y después de su secado y calcular el contenido de humedad. La muestra de suelo se considera seca cuando su peso permanece constante a una temperatura de 105 °C. El método gravimétrico es el más exacto para medir el contenido de humedad del suelo y resulta necesario para calibrar el equipo utilizado en los demás métodos. Sin embargo, no puede usarse para obtener un registro continuo de la humedad del suelo de un lugar determinado, porque es necesario extraer muestras del suelo para su análisis en el laboratorio. Las muestras de suelo húmedo se pesan individualmente en los contenedores de transporte. Los contenedores se abren y se colocan en un horno secador que es capaz de mantener una temperatura de  $105 \pm 0.5$  °C. Para muestras que contienen turba o cantidades significativas de yeso, el horno debe tener una temperatura de  $50 \pm 0.5$  °C, por lo cual se requerirá entonces de un mayor tiempo para que la muestra alcance un estado seco. Después del secado, las muestras se pesan de nuevo en sus contenedores. La diferencia entre el peso húmedo y el peso seco de una muestra es la medida de su contenido de agua original. Se pueden usar otros procesos de secado más

rápidos que el horno corriente, por ejemplo, lámparas infrarrojas y hornos microondas. Si las muestras contienen gravas y piedras, el procedimiento antes mencionado se puede modificar si los pesos o volúmenes de la grava y/o las piedras pueden determinarse separadamente (para. Método gravimétrico).

$$\%Humedad = \frac{(PSH - PSS)}{PSH} \times 100$$

Donde:

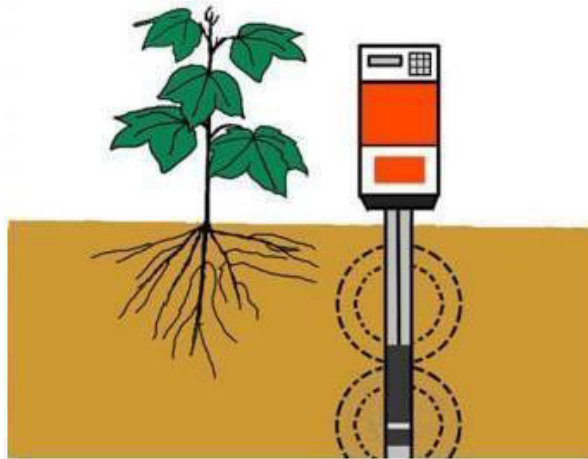
PSH = Peso suelo húmedo

PSS = Peso suelo seco

### **2.2.7.2 Emisión de Neutrones**

Martin (2010) brinda la siguiente información respecto a la medición de humedad de suelo mediante sonda de neutrones:

La sonda de neutrones se ha utilizado extensamente en trabajos de investigación para determinar la humedad del suelo. Una sonda de neutrones contiene una fuente radioactiva que envía una cierta cantidad de neutrones rápidos. Estos neutrones rápidos son aproximadamente del tamaño de un átomo de hidrógeno, un componente esencial del agua. Cuando los neutrones rápidos chocan contra los átomos de hidrógeno, se vuelven más lentos. Un detector dentro de la sonda mide la proporción de los neutrones rápidos que salen y de los neutrones lentos que regresan. Esta relación se usa entonces para estimar el contenido de la humedad en el suelo. Sin embargo, debido a que cada suelo tiene otras fuentes de hidrógeno que no están relacionadas con el agua, es importante calibrar la sonda para cada suelo. Para medir la humedad del suelo con una sonda de neutrones, se instala un tubo de acceso en el suelo. Entonces, la sonda (la cual contiene la fuente radioactiva y el detector) se baja hasta la profundidad deseada. Estas sondas son bastante caras y, debido a que contienen material radioactivo, se necesita una licencia para operarlas (pág. 2).



**Figura 4**

*Sonda de Neutrones*

*Nota.* Fuente Métodos para medir la humedad del suelo para la programación del riego, Martin 2010

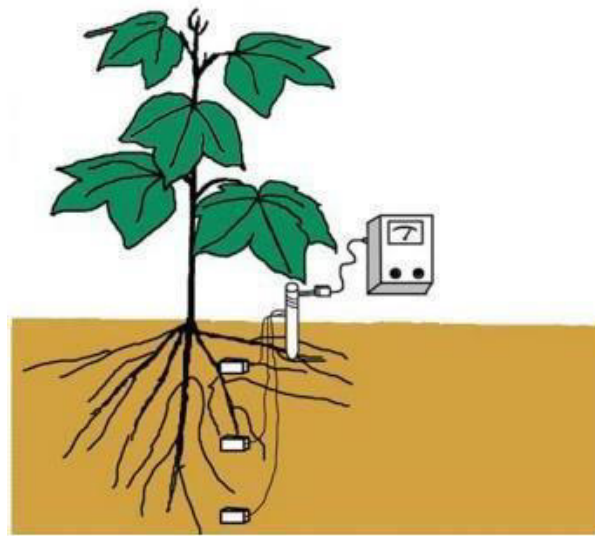
### **2.2.7.3 Resistencia eléctrica**

Martin (2010), brinda información acerca del método de lectura mediante la medición de la resistencia eléctrica del suelo:

Otro método que ha sido utilizado por muchos años para determinar el contenido de humedad en el suelo es la medición de la resistencia eléctrica. Algunos dispositivos tales como los bloques de yeso y algunos tipos de sensores utilizan la resistencia eléctrica para medir la humedad del suelo. El principio físico de estos dispositivos es que el contenido de humedad se puede determinar por la resistencia al paso de corriente eléctrica entre dos electrodos en contacto con el suelo. Entre más agua haya en la tierra, más baja es la resistencia. En las primeras etapas de desarrollo de estos dispositivos, se descubrió que se podía formar un puente de sal entre los dos electrodos y dar resultados falsos. Hoy en día, los electrodos están instalados en un material más estable y no son tan susceptibles a formar puentes de sal. Su uso práctico es limitado puesto que operan muy bien en la parte alta del rango de humedad disponible en el suelo, pero su precisión disminuye en la parte baja de este rango. Para medir la humedad del



suelo, los bloques se entierran a una profundidad deseada, con las terminales eléctricas extendiéndose hasta la superficie del suelo. Cuando los bloques están en equilibrio con el suelo, las terminales se conectan a un medidor y se toma la lectura. Al terminar la temporada estos dispositivos se pueden extraer, aunque es difícil recuperarlos en suelos arcillosos; por otro lado, estos bloques son relativamente baratos (págs. 2-4).



**Figura 5**

*Sensor de Resistencia Eléctrica de Suelo*

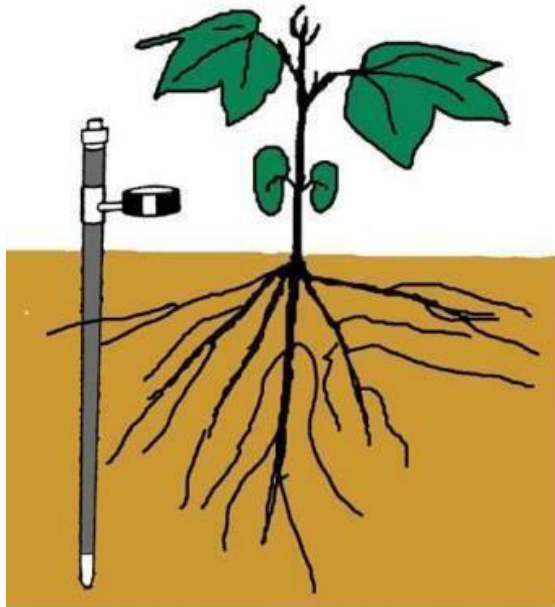
*Nota.* Fuente Métodos para medir la humedad del suelo para la programación del riego, Martin 2010

#### **2.2.7.4 Tensión del suelo**

Martin (2010) se especifica el uso del tensiómetro como técnica para medir la humedad de suelo:

A medida que el suelo se seca las partículas del suelo retienen el agua con mayor fuerza. Los tensiómetros miden la intensidad de la fuerza con la que el suelo retiene el agua. La mayoría de los tensiómetros tienen una punta de cerámica o porosa conectada a una columna de agua. Los tensiómetros son instalados a la profundidad deseada. A medida que el suelo se seca, comienza a jalar agua de la columna de

agua a través del bulbo de cerámica, provocando succión en la columna de agua. Esta fuerza se mide entonces con un indicador de succión. Algunos modelos más nuevos han reemplazado el indicador de succión con un sensor electrónico. Estos dispositivos electrónicos usualmente son más sensibles que los indicadores de aguja. Los tensiómetros funcionan bien en los suelos con alto contenido de agua, pero tienden a perder buen contacto con el suelo cuando la tierra se pone muy seca. Al igual que los bloques de resistencia eléctrica, los tensiómetros generalmente son difíciles de recuperar en suelos arcillosos (pág. 4).



**Figura 6**

*Tensiómetro de Suelo*

*Nota.* Fuente Métodos para medir la humedad del suelo para la programación del riego, Martin 2010

#### **2.2.7.5 Atenuación de rayos gama**

En su obra, Martin (2010) describe un método para medir la humedad del suelo basado en la atenuación de rayos gamma. La técnica implica

la colocación de una fuente de rayos gamma, típicamente cesio 137, y un detector de rayos gamma en un par de tubos de acceso paralelos que se insertan en el suelo. La intensidad del rayo gamma que atraviesa la sección de suelo se reduce exponencialmente debido a la densidad aparente del suelo, la cantidad de agua en el suelo y los coeficientes de atenuación del suelo y del agua, que son constantes. La señal resultante puede ser traducida en una medida de la densidad aparente de la humedad del suelo en cada nivel de medición, o puede ser convertida en una medida del contenido volumétrico de la humedad del suelo si se conoce la densidad aparente del suelo seco. El equipo de medición puede rastrear los perfiles de densidad húmeda y de humedad volumétrica del suelo en varias décimas de centímetros de profundidad debajo de la superficie del suelo, siempre y cuando la densidad seca permanezca constante. Aunque la técnica ofrece una alta resolución espacial, es importante tener en cuenta que las mediciones de humedad del suelo pueden ser confundidas por las variaciones en la densidad aparente del suelo seco. Algunos equipos avanzados incluyen dos fuentes de energía con diferentes intensidades de rayos gamma, lo que permite el estudio de las variaciones de la densidad aparente y la humedad del suelo. No obstante, estos equipos son más adecuados para su uso en laboratorios y no en el campo. (págs. 4-5).

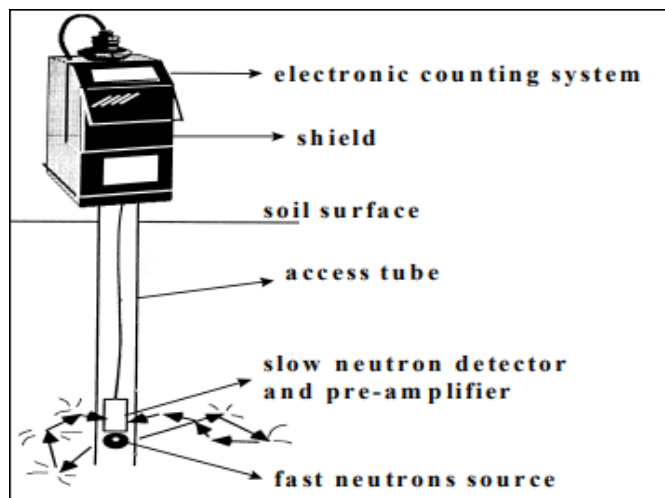
### ***2.2.8 Sensores de medición de humedad del suelo***

#### ***2.2.8.1 Sonda de Neutrones***

La Agencia de Energía Atómica Internacional (2002) en su artículo *Soil and Water Management & Crop Nutrition Section* describe algunas partes de la sonda de neutrones como sensor de humedad:

Mencionan que, aunque la constitución de la sonda de neutrones puede variar dependiendo de su uso específico, todos incluyen un amplificador, una fuente de alto voltaje, un contador, un timer, baterías

recargables y un microprocesador. Dado que la emisión de neutrones es un proceso aleatorio (siguiendo la ley de Poisson), el tiempo influye fuertemente en la precisión estadística del estimado del contenido del agua en el suelo, por ello la mayoría de sondas ofrecen varias opciones de conteo. Con cada conteo correspondiente a un impulso originado desde un neutrón lento que llega al detector, el microprocesador convierte los datos de conteo sin procesar, en conteo por minuto (cpm) o por segundo (cps). Actualmente, las sondas tienen procesador que utilizan ecuaciones de calibración proporcionadas por el fabricante, o desarrollado por el usuario, para diferentes tipos de suelos, y los resultados son dados directamente en conteo de agua en suelo (% ,  $\text{cm}^3$ ,  $\text{cm}^{-3}$ ) o en términos del agua almacenada en una dada capa de suelo (págs. 1-4).



**Figura 7**

*Sonda de Neutrones y sus Partes*

*Nota.* Fuente Neutron and gamma probes: Their use in agronomy, 2002

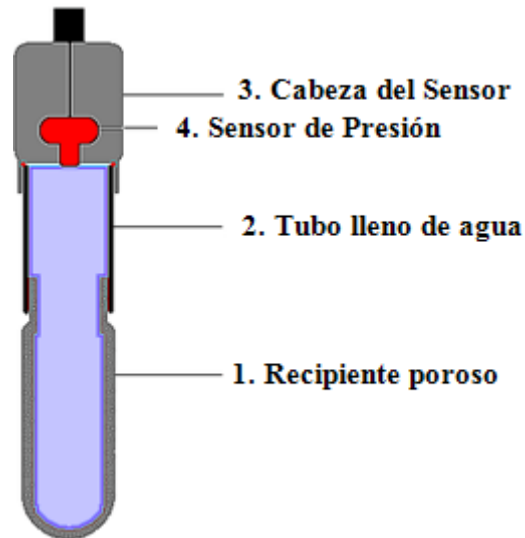
El principio de funcionamiento es directo. La fuente de neutrones emite neutrones rápidos que interactúan con partículas y agua que rodea la sonda. Debido a que los neutrones no tienen carga, el campo eléctrico asociado con la carga de las partículas del suelo no afecta su

movimiento. Tres procesos ocurren durante esta interacción: absorción de neutrones por núcleos, dispersión de neutrones a través de colisiones y desintegración de neutrones (pág. 5).

### **2.2.8.2 Tensiómetro**

Se detalla información sobre el funcionamiento del tensiómetro como sensor de humedad:

Un tensiómetro es un instrumento de medición usado para determinar el potencial del agua (tensión de humedad del suelo) en la zona no saturada. Este dispositivo típicamente está compuesto de un tubo de vidrio o plástico con una copa de cerámica porosa y es llenado con agua. La parte superior del tubo tiene un medidor de vacío incorporado o una tapa de goma que se usa con un instrumento tensiómetro de punción portátil, que usa una aguja hipodérmica para medir la presión dentro del tensiómetro. El tensiómetro está enterrado en el suelo y se usa una bomba manual para hacer un vacío parcial. A medida que las plantas extraen el agua del suelo y la evaporación, aumenta el vacío dentro del tubo. Cuando el suelo está mojado, el flujo también puede ocurrir en la dirección inversa: a medida que se agrega agua al suelo, el vacío dentro del tubo extrae la humedad del suelo y disminuye. Cuando se determina que la presión del agua en el tensiómetro está en equilibrio con la presión del agua en el suelo, la lectura del tensiómetro representa el potencial matricial del suelo. Estos tensiómetros se utilizan en la programación del riego para ayudar a los agricultores y otros administradores de riego a determinar cuándo regar. Junto con una curva de retención de agua, se pueden usar tensiómetros para determinar la cantidad de agua. Con la práctica, un tensiómetro puede ser una herramienta útil para estos propósitos. Los tensiómetros de suelo también se pueden utilizar en el estudio científico de suelos y plantas. (Wikipedia, 2020).



**Figura 8**

*Tensiómetro y sus Partes*

*Nota.* Fuente Adaptación de Tensiometer, Wikipedia, 2020

### **2.2.8.3 Sensor de humedad resistivo**

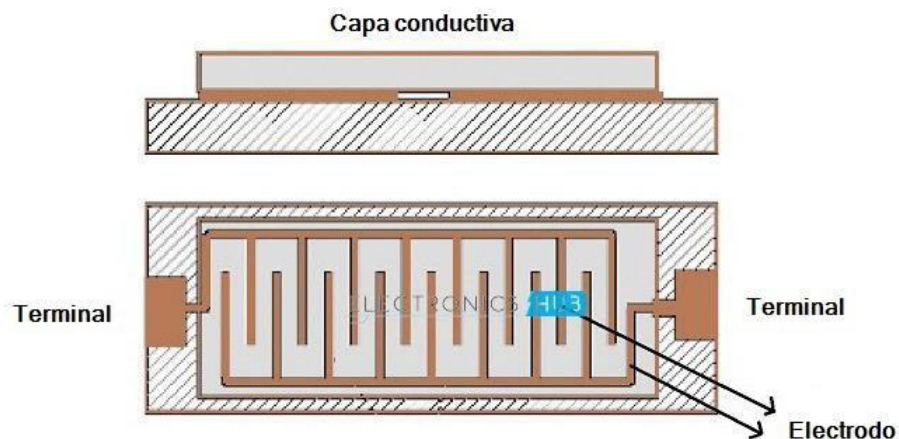
Electronics Hub (2018) presenta la definición de los sensores de humedad resistivos de la siguiente manera:

Los sensores de humedad resistivos miden la resistencia o la conductividad eléctrica, y son un tipo importante de sensor de humedad. La conductividad en los conductores no metálicos se relaciona con el contenido de agua. Los sensores de humedad resistivos están compuestos generalmente de materiales de baja resistividad que cambian significativamente con los cambios en la humedad, lo que resulta en una relación inversamente exponencial entre la resistencia y la humedad. La capa superior se deposita sobre dos electrodos que se colocan en un patrón especial para aumentar el área de contacto. La resistividad entre los electrodos cambia cuando la capa superior absorbe agua y se puede medir con la ayuda de un circuito eléctrico simple. Los materiales comúnmente utilizados incluyen sal, sustratos especialmente tratados, polielectrolitos sólidos y polímeros conductores. Los electrodos se hacen generalmente de metales nobles como el oro, la plata o el platino, y los modernos sensores

están recubiertos con una sustancia cerámica para brindar protección adicional.

Los sensores de humedad resistivos tienen algunas ventajas, como su bajo costo, su pequeño tamaño, su capacidad para operar a distancia del circuito de señal y su alta intercambiabilidad debido a la falta de estándares de calibración. Sin embargo, presentan algunas desventajas, como la sensibilidad a los vapores químicos y otros contaminantes, la posible variación de las lecturas de salida si se usan con productos solubles en agua y la corrosión de los sensores de bajo costo por efecto de electrólisis.

(para. Sensor humedad resistiva)



**Figura 9**

*Esquema Interno de un Sensor Resistivo*

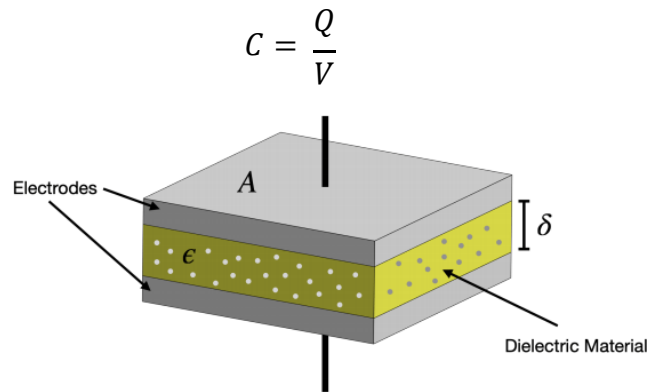
*Nota.* Fuente Electronics Hub, Resistive Humidity Sensors, 2018

#### **2.2.8.4 Sensor de humedad capacitivo**

Hrisko (2020) explica el principio de funcionamiento del sensor de humedad en el paper *Capacitive Soil Moisture Sensor Theory, Calibration, and Testing*:

Este tipo de sensores trabajan básicamente como dice su nombre, midiendo la capacitancia del suelo, la cual se mide indirectamente. El

principio de medición de humedad por capacitancia está basado en el principio de trabajo de un capacitor. La Capacitancia (C) está definida como la cantidad de carga (Q) que un material puede almacenar bajo un dado potencial eléctrico aplicado (V) (pág. 1).



**Figura 10**

*Capacitor de Placas Paralelas*

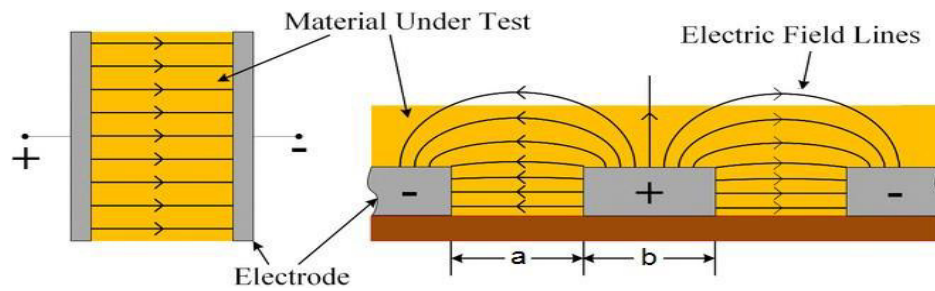
*Nota.* Fuente Capacitive Soil Moisture Sensor Theory, Calibration, and Testing, 2020

Típicamente un capacitor es representado como se muestra en la figura, donde A es el área de superficie de los electrodos,  $\delta$  viene a ser la distancia entre los electrodos y  $\epsilon$  representa la permitividad del material dieléctrico (pág. 2).

$$C = \frac{\epsilon A}{\delta}$$

Si el capacitor no tiene superficies paralelas los cálculos se vuelven más complicados. En la siguiente figura se muestra un capacitor coplanar el cual el área expuesta actúa como material dieléctrico, esto permite la medición de la constante dieléctrica la cual es más grande para el agua que la tierra. Esto permite aproximar la cantidad de agua en un suelo basado en el cambio de la capacitancia (pág. 2).





**Figura 11**

*Capacitor Coplanar*

*Nota.* Fuente Khan & Kang, 2015

Mientras mayor sea la superficie de los electrodos y menor la distancias entre ellas, existirá una mayor capacitancia. La capacitancia es un parámetro importante a medir, sin embargo, la capacitancia rara vez es medido directamente. En cambio, es común colocar el capacitor en serie o en paralelo con otros componentes para leer la frecuencia de resonancia del circuito. La frecuencia de resonancia para un circuito capacitivo inductivo se da como:

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_t}}$$

Donde F representa la frecuencia de resonancia del sistema, que es medible, L es la inductancia del sistema, y  $C_t$  es la capacitancia total del sistema. Kelleners en "Calibración de sensores de sonda de capacitancia usando la teoría de circuitos eléctricos", usa varias relaciones empíricas para realizar una aproximación de capacitancia total basada en la frecuencia resonante (pág. 3).

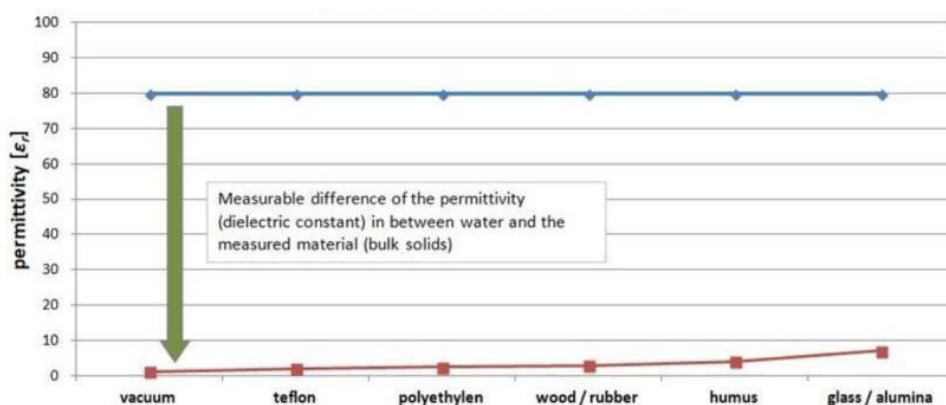
Por lo tanto, la aproximación de la constante dieléctrica para un sensor capacitivo de humedad de suelo se puede escribir libremente como:

$$\epsilon = f(F)$$

Y este resultado se ha observado muchas veces: la propiedad dieléctrica del medio es una función de la frecuencia de resonancia del condensador. Esta es la primera mención de una cantidad fácilmente medible que se relaciona con la propiedad de un material expuesto (a diferencia de la característica de un condensador estándar). Este es el principio de funcionamiento de un sensor capacitivo de humedad del suelo.

Un suelo determinado puede contener varios tipos de materiales que varían en una permitividad dieléctrica relativa entre 2 y 6 cuando está seco. Como una referencia, la constante dieléctrica del aire es cercana a 1 (la misma que el espacio vacío). Sin embargo, la constante dieléctrica para el agua es cercano a 80 para temperaturas y presión estándar. Esta alta permitividad permite a la electricidad fluir más libremente, la cual implica que la capacitancia se incremente. Esta es la razón porque la capacitancia es una buena medida para la humedad de suelo, debido al impacto relativo del agua sobre la permitividad eléctrica en materiales presentes en el suelo.

Algunas ventajas de este tipo de sensor es que la salida del voltaje es bastante lineal en relación a la humedad, son de larga duración en comparación a los sensores resistivos y pueden detectar un gran rango de valores de humedad relativa (págs. 4-5).



**Figura 12**

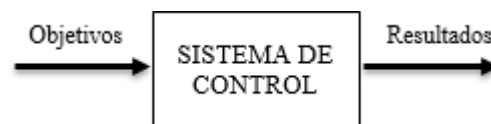
*Permittividad de Diferentes Materiales en Comparación al Agua*

*Nota.* Fuente Capacitive Soil Moisture Sensor Theory, Calibration, and Testing, 2020

### 2.2.9 Sistema de Control

Golnaraghi & Kuo (2010) en su libro *Automatic Control Systems* define los principios del sistema de control de la siguiente manera:

En años recientes, los sistemas de control han asumido un rol importante en el desarrollo y avance de la civilización moderna y la tecnología. Prácticamente cada aspecto de las actividades de nuestro día a día está afectada por algún tipo de sistemas de control. Los sistemas de control son encontrados en gran cantidad en todos los sectores de la industria como son industrias de productos de manufactura, líneas de ensamble automático, tecnología espacial y armamento, control de computadoras, sistemas de transporte, sistemas de energía, robótica, nanotecnología y muchos otros (pág. 1).



**Figura 13**

*Componentes Básicos de un Sistema de Control*

*Nota.* Fuente Automatic Control Systems, 2010

En un sistema de control, se pueden identificar tres componentes básicos: objetivos de control, componentes del sistema de control y resultados o salidas. Estos componentes están interconectados y su relación básica se muestra en la figura adjunta. En términos técnicos, los objetivos de control se pueden considerar como entradas o señales de actuación, mientras que los resultados se pueden denominar salidas o variables controladas. En general, el propósito principal de un sistema

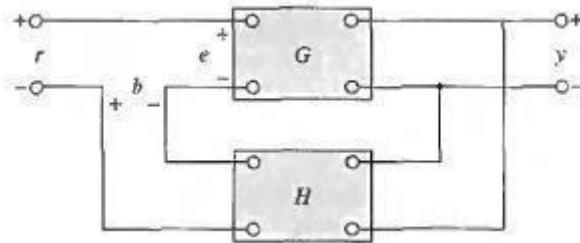
de control es regular las salidas de acuerdo con las entradas utilizando los diferentes elementos del sistema de control. (pág. 2).

### **2.2.9.1 Sistema de control de lazo cerrado (*Sistemas de control feedback*)**

Un sistema que mantiene una relación constante entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y utilizando la diferencia como medio de control, se conoce como un sistema de control realimentado. Un ejemplo común es el sistema de control de temperatura de una habitación, en el que se mide la temperatura actual y se compara con la temperatura de referencia deseada. Luego, el termostato activa o desactiva el equipo de calefacción o enfriamiento para mantener la temperatura de la habitación en un nivel cómodo, independientemente de las condiciones externas. Estos sistemas también se conocen como sistemas de control en lazo cerrado, y los términos se utilizan indistintamente en la práctica. En un sistema de control en lazo cerrado, la señal de error de actuación se alimenta al controlador, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la propia señal de salida o una función de la señal de salida y sus derivadas e integrales), con el objetivo de reducir el error y llevar la salida del sistema al valor deseado. Es importante destacar que el término "control en lazo cerrado" siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema. (pág. 6).

Al hablar de la reducción del error en el sistema, en realidad estamos señalando únicamente uno de los muchos efectos importantes que la retroalimentación puede tener sobre un sistema. La retroalimentación también tiene efectos en la performance de un sistema a nivel de estabilidad, ancho de banda, ganancia general, impedancia y sensibilidad. Para entender los efectos de la retroalimentación en un sistema de control, debemos examinar el fenómeno. En general, podemos decir que cada vez que existe una relación de causa y efecto entre las variables de un sistema, se dice que la retroalimentación existe. Bajo este punto podemos encontrarnos con sistemas que a

simple vista pueden parecer de lazo abierto, pero si los analizamos más detenidamente podemos ver la retroalimentación. (pág. 7)



**Figura 14**

*Sistema Retroalimentado*

*Nota.* Fuente Automatic Control Systems, 2010.

Una representación típica de un sistema de control de lazo cerrado es el mostrado en la figura anterior. El punto de suma es el encargado de determinar el error entre la salida actual y la salida deseada. Esto puede producir ya sea una señal de error positiva o negativa. Analizando el esquema anterior tenemos que:

$$y = G \times e$$

La salida del punto de suma, es decir el error es igual a:

$$e = r - H \times y$$

Si consideramos que  $H = 1$ , realimentación unitaria, entonces tenemos que:

$$e = r - y$$

Eliminando el término de error tenemos que la salida es igual a:

$$y = G \times (r - H \times y)$$

Entonces tenemos que:

$$G \times r = y + G \times H \times y$$

$$G \times r = y \times (1 + GH)$$

Donde acomodando los términos tenemos que la función de transferencia es:

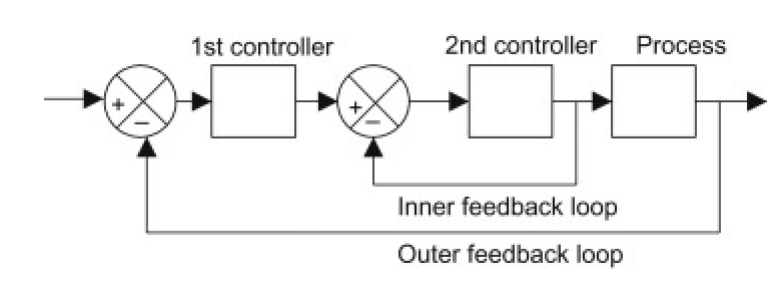
$$\frac{y}{r} = \frac{G}{1 + GH}$$

*Nota.* Ecuación 1

Utilizaremos esta función de transferencia para poder analizar los efectos significativos de la retroalimentación. (pág. 8)

### **2.2.9.2 Control en Cascada**

William Bolton (2021) en el libro *Instrumentación y Sistemas de Control* citado por Science Direct (2014) en su artículo *Integrated design and simulation of chemical processes* explican que un sistema de control en cascada es usado cuando hay más de una medición, pero solo está disponible una variable de control. En general un control en cascada es recomendado para procesos lentos que se controlan mediante un proceso relativamente rápido. El control en cascada implica el uso de dos controladores con la salida del primer controlador proporcionando el punto de ajuste para el segundo controlador, el circuito de realimentación para un controlador está ubicado dentro del otro. Un sistema de este tipo puede dar una respuesta mejorada a las perturbaciones (par. Cascade Control).

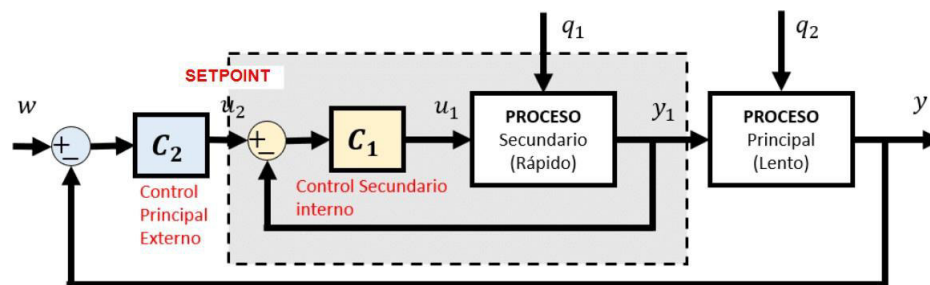


**Figura 15**

*Lazos de Control en Cascada*

*Nota.* Fuente Science Direct Cascade Control, 2014.

En Castaño (2015) se explica que cuando el proceso a ser controlado sea mucho más lento que los procesos intermedios, podemos utilizar esta lógica en el control ya que cualquier acción en el loop exterior (proceso lento) tardará mucho más en reflejarse que en el loop interno (proceso rápido). Cualquier perturbación en el proceso principal, por ser lento, tardará en percibirse el efecto. En caso del proceso secundario, cualquier efecto de perturbación es rápidamente controlada. El siguiente diagrama nos ayuda a poder entender la acción en cada proceso:



**Figura 16**

*Control Principal y Control Secundario*

*Nota.* Fuente Control Automática Educación, 2015.

El subproceso mostrado en el cuadrado de líneas punteadas muchas veces obedece a un subsistema que ya cuenta con el control realimentado embebido, es decir, para el usuario es invisible la acción de control del

subproceso ya que únicamente se ejecutan comandos de control en la entrada.

### ***2.2.9.3 Sistemas de control en lazo cerrado en comparación con sistemas en lazo abierto***

Golnaraghi & Kuo (2010) comparan los sistemas de control de lazo cerrado y abierto, destacando que una ventaja del sistema de control en lazo cerrado es que el uso de la realimentación vuelve la respuesta del sistema relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema. Esta insensibilidad permite el uso de componentes relativamente poco precisos y baratos para obtener el control adecuado de una planta determinada, lo cual no es posible en el caso de un sistema en lazo abierto. Sin embargo, la estabilidad es un problema importante en el sistema de control en lazo cerrado, que puede conducir a corregir en exceso errores que producen oscilaciones de amplitud constante o cambiante (pág. 10).

Es importante destacar que los sistemas de control en lazo cerrado son ventajosos cuando se presentan perturbaciones y/o variaciones impredecibles en los componentes del sistema, mientras que los sistemas de control en lazo abierto son adecuados para los sistemas en los que se conocen las entradas y en los cuales no hay perturbaciones. El número de componentes usados en un sistema de control en lazo cerrado es mayor que el que se emplea para un sistema de control equivalente en lazo abierto, lo que se traduce en costes y potencias más grandes para el sistema de control en lazo cerrado. Para disminuir la potencia requerida de un sistema, se emplea un control en lazo abierto siempre que sea posible. En general, una combinación adecuada de controles en lazo abierto y en lazo cerrado es menos costosa y ofrecerá un comportamiento satisfactorio del sistema global (pág. 11).

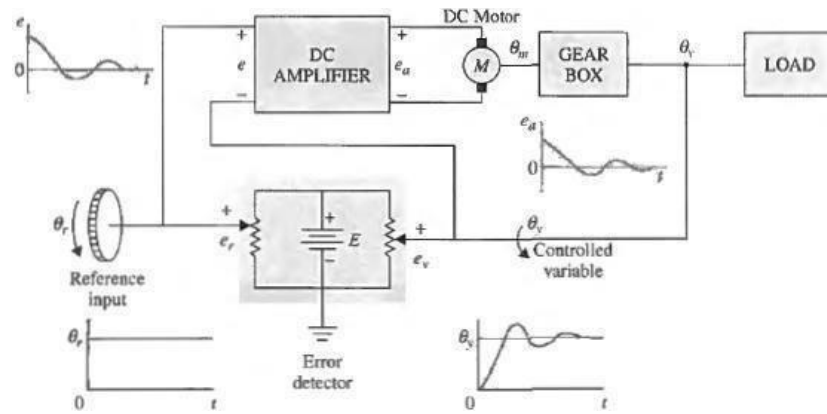


#### **2.2.9.4 Sistema de Control de Datos Continuos vs Discretos**

Golnaraghi & Kuo (2010) definen los sistemas de datos continuos como aquellos en los que las señales son funciones de la variable de tiempo continuo  $t$ . Estas señales pueden ser clasificadas como señales de corriente alterna (CA) o corriente continua (CC). Sin embargo, en la terminología de los sistemas de control, los sistemas de CA y CC tienen significados especiales. Un sistema de control de CA implica que las señales en el sistema están moduladas por algún esquema de modulación, mientras que un sistema de control de CC implica que las señales no están moduladas, pero aún se consideran señales de CA. La Figura 17 muestra un diagrama esquemático de un sistema de control de CC de lazo cerrado con sus formas de onda típicas. Los componentes usuales en un sistema de control de CC incluyen potenciómetros, amplificadores CC, motores CC y tacómetros CC, entre otros. (pág. 12).

Por otro lado, la Figura 18 ilustra un diagrama esquemático de un sistema de control de CA típico que cumple una tarea similar al sistema de CC. En este caso, las señales en el sistema están moduladas y la información se transmite mediante una señal portadora de CA. A pesar de esto, la variable controlada de salida se comporta de manera similar al sistema de CC. Los sistemas de control de CA son ampliamente utilizados en aviones y sistemas de control de misiles debido a que el ruido y los disturbios a menudo crean problemas. Al utilizar sistemas de control de CA modulados con frecuencias portadoras de 400 Hz o más, el sistema será menos susceptible al ruido de baja frecuencia.

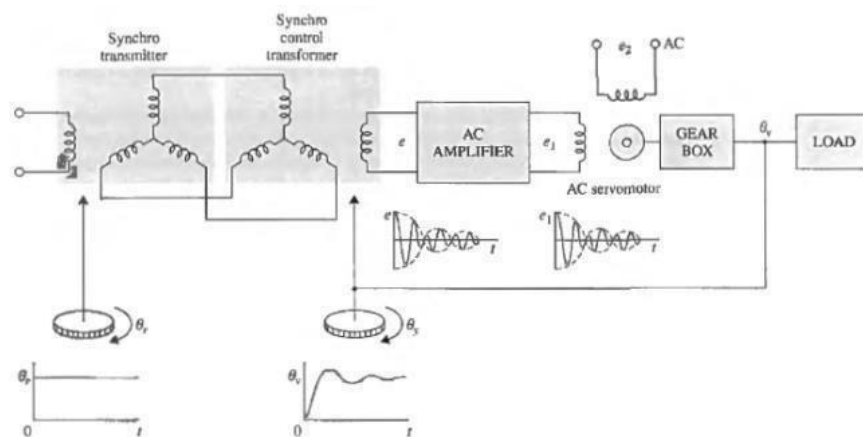
Los componentes típicos de un sistema de control de CA incluyen sincronizadores, amplificadores de CA, motores de CA, giroscopios, acelerómetros, entre otros. (pág. 12).



**Figura 17**

*Diagrama Esquemático de un Control de Lazo Cerrado de CC Típico*

*Nota. Fuente Automatic Control Systems, 2010.*



**Figura 18**

*Diagrama Esquemático de un Control de Lazo Cerrado de CA Típico*

*Nota. Fuente Automatic Control Systems, 2010.*

En la práctica, es común que los sistemas de control combinen componentes de corriente alterna (CA) y corriente continua (CC), utilizando moduladores y demoduladores para sincronizar las señales en diferentes puntos del sistema. A diferencia de los sistemas de datos continuos, los sistemas de datos discretos presentan señales en forma de pulsos o códigos digitales en uno o más puntos del sistema. Estos

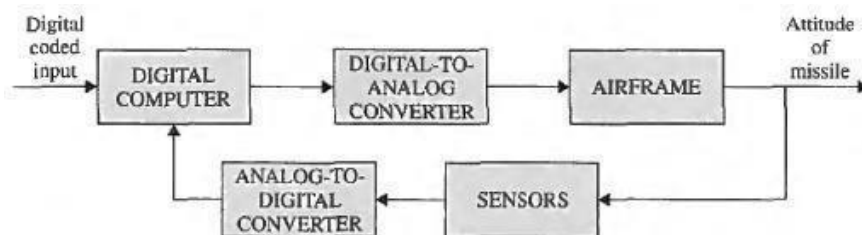
sistemas se subdividen en sistemas de control de datos muestreados y sistemas de control digitales, donde este último implica el uso de una computadora o controlador digital para codificar las señales en código binario. (pág. 12)



**Figura 19**

*Diagrama de Bloques de un Sistema de Control de Muestreo de Datos*

*Nota.* Fuente Automatic Control Systems, 2010.



**Figura 20**

*Sistema de Piloto Automático Digital para un Misil Guiado*

*Nota.* Fuente Automatic Control Systems, 2010.

En general, un sistema de muestreo de datos recibe información únicamente en momentos específicos, en forma de pulsos. Por ejemplo, en un sistema de control, la señal de error solo puede suministrarse en forma de pulsos, lo que significa que el sistema no recibe información sobre la señal de error entre pulsos consecutivos. A pesar de esto, los sistemas de datos muestreados también se pueden clasificar como sistemas de CA porque la señal del sistema está modulada por pulsos (pág. 13). La Figura 19 muestra cómo funciona un sistema de muestreo de datos típico. Se aplica una señal de entrada de datos continuos al sistema  $r(t)$ , la señal de error  $e(t)$  es muestreada

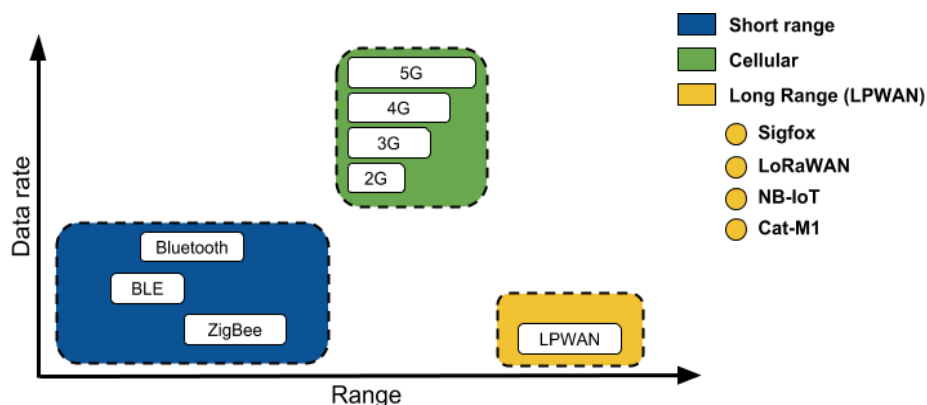
por un dispositivo de muestreo y la salida es una secuencia de pulsos.

La frecuencia de muestreo puede ser uniforme o no. El uso de muestreo en un sistema de control tiene varias ventajas, como compartir costosos equipos entre varios canales de control y la reducción de la susceptibilidad al ruido en los datos de pulsos (pág. 14).

Debido a las ventajas que brindan en tamaño y flexibilidad, los controladores digitales se han vuelto cada vez más populares. En la actualidad, muchos sistemas aéreos contienen controladores digitales que pueden empaquetar miles de elementos discretos en un espacio no mayor que el tamaño de un libro. La Figura 20 muestra los elementos básicos de un control de piloto automático digital para misiles guiados. (pág. 14)

### **2.2.10 Redes LPWAN**

Devopedia (2019) citando a Beser (2008) define a la red de área amplia de bajo consumo (LPWAN) como un tipo de red de área amplia de telecomunicaciones inalámbricas diseñada para permitir comunicaciones de largo alcance a una tasa de bits baja entre objetos conectados, como sensores que funcionan con batería. En un extremo del espectro se encuentran los estándares celulares (3G, 4G) que ofrecen un buen alcance y buenas velocidades de datos, pero también consumen mucha energía. En el otro extremo están las tecnologías de corto alcance como Wi-Fi y Bluetooth que consumen menos energía, pero están limitadas por el alcance. LPWAN llena el espacio intermedio donde se desea un rango más largo a menor potencia para enviar pequeñas cantidades de datos.



**Figura 21**

*Cuadro Rango vs Velocidad de Datos de Tecnologías Inalámbricas*

*Nota.* Fuente Connectivity Now and Beyond; exploring Cat-M1, NB-IoT, and LPWAN Connections, 2018

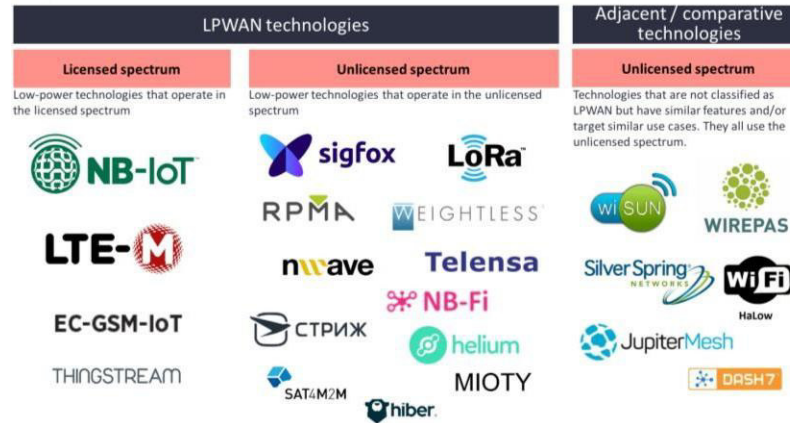
Adelantado et al. (2017) menciona que la baja potencia, la baja tasa de bits y el uso previsto distinguen a LPWAN de una red de área amplia que está diseñada para transportar más datos utilizando más energía. La velocidad de datos LPWAN varía de 0,3 kbps a 50 kbps por canal. Las redes celulares basadas en GPRS solían ofrecer esta conectividad para transportar datos M2M desde finales de la década de 1990. Sin embargo, los operadores de todo el mundo están cerrando sus redes 2G heredadas.

Devopedia (2019) especifica que LPWAN se centra en la conectividad de IoT para dispositivos (puntos finales) que consumen poca energía, envían / reciben mensajes cortos a bajas velocidades y tienen ciclos de trabajo bajos. Existen dos categorías principales de LPWAN:

- WAN celulares (por ejemplo, NB-IoT y LTE Categoría M1) que utilizan espectro con licencia.
- WAN inalámbricas que operan en bandas de frecuencia sin licencia (por ejemplo, Lora WAN y Sigfox).

La comparación entre cualquiera de las LPWAN disponibles se basa principalmente en la cobertura, el ancho de banda, la velocidad de datos y la cantidad de mensajes por día. La selección de la LPWAN adecuada depende

de la aplicación, pero normalmente el objetivo es obtener tasas decentes con un consumo de energía mínimo.



**Figura 22**

*Cuadro de Tecnologías LPWAN*











*Nota.* Fuente IoT Analytics LPWAN Market Report, 2018-2023

Mekki et al. (2017) hace una comparativa de la tecnología LPWAN, entre las más resaltantes y mayor desplegadas tenemos:

- LoRa: espectro sub-GHz sin licencia. Modulación Chirp Spread Spectrum (CSS). Puede definir el tamaño del paquete.
- Sigfox: Bandas sin licencia de 868 MHz o 902 - 928 MHz con un solo operador por país. Cobertura de 30-50 km (rural), 3-10 km (urbano) y hasta 1000 km (línea de sitio). Enlace ascendente 140 mensajes de 12 bytes por día. Enlace descendente de 4 mensajes de 8 bytes por día.
- NB-IoT: Bandas autorizadas, incluidas las bandas de 200 kHz no utilizadas que se utilizaban anteriormente para GSM o CDMA. Basado en bloques de recursos LTE.

i-Scoop (2018), en su reporte de menciona que las LPWAN se implementan a nivel mundial en muchos países, algunos incluso a nivel nacional, para habilitar servicios en medición inteligente, administración de instalaciones y logística, dispositivos portátiles, cubos de basura inteligentes,

alumbrado público inteligente, industrias con electrodomésticos conectados, monitoreo ambiental y más. Seleccionar una LPWAN implica comprender las características y requisitos clave de la aplicación IoT a implementar. Se pueden considerar los siguientes parámetros para la selección: duración de la batería, capacidad, rango, costo, espectro con licencia / sin licencia, calidad de servicio, confiabilidad y seguridad.

Speed	1Mbit/s+	~100kbit/s	<10kbit/s
Example technology	4G	2G, LTE-M	LoRa, SIGFOX, NB-IoT
Spectrum	Licensed	Licensed	Licensed or unlicensed
Example use cases	 Smart phone  Connected car  CCTV	 Smart grid  Smart watch  High value object tracking	 Low value object tracking  Smart meter  Smart parking  Smart street lights

**Figura 23**

*Mapeo de Casos de Uso y Tecnologías de Red*

*Nota.* Fuente i-SCOOP, 2018

**Tabla 1**

*Cuadro Comparativo LPWAN Licenciadas y No Licenciadas*

	Licenciadas		No Licenciadas	
	LTE-M	NB-IoT	Sigfox	LoRaWan
<b>Modulación</b>	QPSK	QPSK	BPSK	CSS
<b>Cobertura</b>	GSM	1 – 10 km	10 – 40 km	5 – 20 km
<b>MCL</b>	160 dB	164 dB	149 dB	157 dB

<b>Vida útil baterías</b>	10 años	10 años	10 años	10 años
<b>Velocidad de Datos</b>	1 Mbps	180 Kbps	100 bps	250 Kbps
<b>Seguridad</b>	3GPP (128-256 bit)	3GPP (128-256 bit)	16 bit	32 bit
<b>Escalabilidad</b>	Alta	Alta	Media	Media
<b>Costos por Módulo</b>	\$10	\$5	\$2	\$10

---

*Nota.* Fuente Kore, 2018

En el artículo de la web Smart Cities Perú (2018), mencionan que de las tecnologías LPWAN, actualmente podemos trabajar tanto con LoRa como con Sigfox en Perú. LoRa tiene la opción de ser desplegado por usuarios privados y crear redes locales independientes, mientras que, si hablamos de despliegues de red a nivel nacional operados por un proveedor específico, la única disponible en nuestro país hasta este momento es Sigfox la cual viene expandiendo su cobertura desde inicios del año 2018. El operador a cargo del servicio es WND Perú.





**Figura 24**

*Cobertura Red Sigfox en Perú*

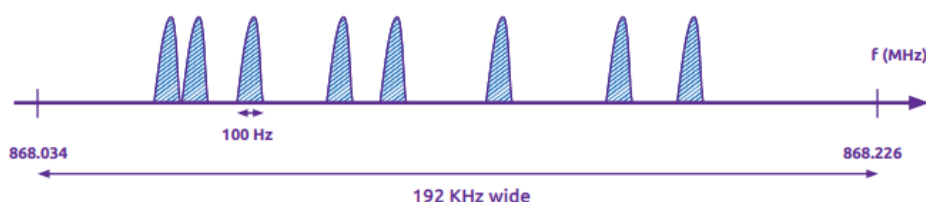
*Nota.* Fuente Sigfox, 2021

### **2.2.11 Red Sigfox**

Sigfox (2017) en su artículo *Technical Overview*, define en sus propios términos qué es Sigfox, cuáles son los tipos de aplicaciones a las cuales va dirigida esta tecnología, la arquitectura del servicio, así como los estándares y arquitectura para mantener una comunicación segura:

Sigfox es una tecnología de comunicación inalámbrica de largo alcance y baja potencia diseñada para brindar conectividad a dispositivos de IoT, sensores remotos y actuadores. La interfaz inalámbrica Sigfox ha sido desarrollada para que la comunicación consuma una cantidad mínima de energía, permitiendo que los dispositivos remotos funcionen con la energía de la batería durante períodos prolongados sin requerir cambios de batería o mantenimiento. La comunicación entre los nodos Sigfox remotos y las estaciones base se realiza mediante codificación de desplazamiento de fase binaria diferencial (BPSK) y codificación de

desplazamiento de frecuencia gaussiana, utilizando una red de radio ISM. Sigfox utiliza 200 kHz de las bandas disponibles públicamente y sin licencia para intercambiar mensajes de radio por aire, y la velocidad de transferencia de datos varía según la región. La tecnología de estilo celular permite que los nodos remotos se comuniquen con las estaciones base, lo que facilita el control remoto y la recopilación de datos desde cualquier lugar con conectividad a Internet. Sigfox es una solución de bajo costo para muchas aplicaciones M2M e IoT, que requieren una conexión de baja velocidad de datos en cualquier lugar con cobertura de red. (pág. 8).



**Figura 25**

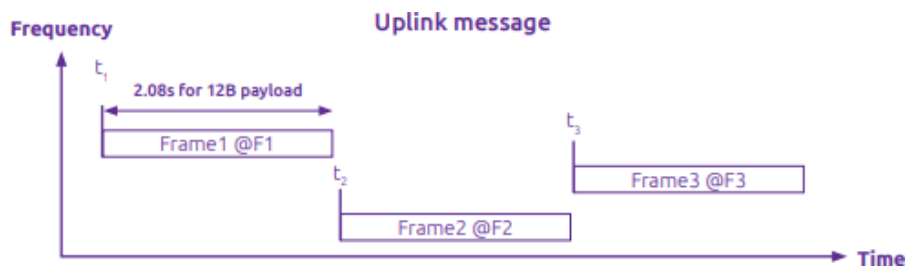
*Diagrama de Modulación UNB en la Tecnología Sigfox*

*Nota.* Fuente Sigfox Technical Overview, 2017

La modulación UNB permite que las estaciones base Sigfox se comuniquen a largas distancias sin verse afectadas por el ruido. La banda utilizada depende de la ubicación. En Europa, por ejemplo, la banda utilizada está entre los 868 y 868,2 MHz; mientras que, en el resto del mundo, la banda utilizada está entre los 902 y 928 MHz con restricciones según las regulaciones locales. Para el caso de Perú se utiliza la banda de los 902 y 928 MHz (pág. 8).

Un mensaje con una carga útil de 12 bytes tarda 2,08 segundos en el aire con una velocidad de 100 bps. Las estaciones base Sigfox monitorean el espectro completo de 192 kHz y buscan señales UNB para demodular.

Sigfox emplea acceso aleatorio para asegurar la calidad de servicio en la transmisión de datos. La comunicación no se encuentra sincronizada entre la red y el dispositivo, de manera que el dispositivo transmite un mensaje en una frecuencia aleatoria y después envía dos copias en frecuencias y tiempos diferentes, lo que se conoce como "diversidad de tiempo y frecuencia". (pág. 9).

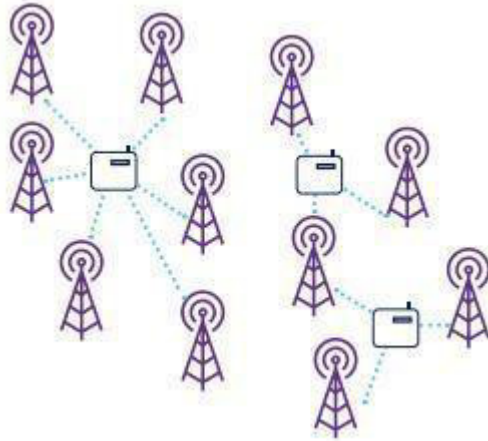


**Figura 26**

*Diagrama de Réplica de Mensajes Sigfox en Diferentes Frecuencias*

*Nota.* Fuente Sigfox Technical Overview, 2017

La diversidad espacial es otro factor importante para la calidad del servicio de la red Sigfox. En promedio, cada mensaje es recibido por al menos tres estaciones base cercanas. Esta técnica junto con la diversidad de tiempo y frecuencia de las repeticiones contribuye a garantizar la calidad del servicio. (pág. 9).



**Figura 27**

*Diagrama de Mensajes Sigfox Recibidos por Estaciones Base*

*Nota.* Fuente Sigfox Technical Overview, 2017

Para los objetos remotos, Sigfox utiliza un protocolo de comunicación que admite mensajes pequeños con una carga útil de 0 a 12 bytes. Esta carga es suficiente para transferir datos de sensores, estado de alertas, coordenadas GPS o datos de aplicaciones.

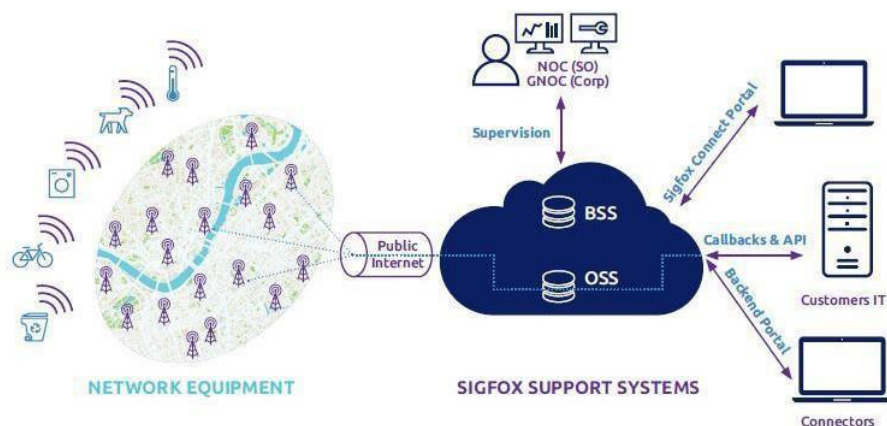
En la regulación europea, la ocupación de la banda pública está limitada al 1% del tiempo, lo que se traduce en seis mensajes de 12 bytes por hora o 140 mensajes por día. Aunque la regulación varía en otras regiones, la oferta comercial de Sigfox sigue siendo la misma en este momento.

Para los mensajes de enlace descendente, el tamaño de la carga útil es fijada en 8 bytes. Esto es suficiente para activar una acción, administrar un dispositivo o configurar parámetros de la aplicación de forma remota. El ciclo de trabajo para la estación base es del 10%, lo que garantiza cuatro mensajes de enlace descendente por dispositivo al día. Si quedan recursos adicionales, el dispositivo puede recibir más. El mensaje de enlace descendente lo inicia el dispositivo, y hay un retraso de 20 segundos entre la primera trama transmitida y la ventana de recepción que dura como máximo 25 segundos. La

frecuencia del enlace descendente es la frecuencia del primer mensaje del enlace ascendente más una frecuencia delta conocida. (pág. 10).

### 2.2.11.1 Arquitectura de red Sigfox

Sigfox cuenta con una arquitectura horizontal que se compone de dos capas principales. La primera de ellas, conocida como la capa de equipo de red, está conformada principalmente por estaciones base y otros elementos, como antenas, que se encargan de recibir mensajes de los dispositivos y transferirlos al sistema de soporte de Sigfox. Por otro lado, la segunda capa, denominada Sistema de Soporte Sigfox, constituye la red central encargada de procesar los mensajes y enviarlos a través de devoluciones de llamada al sistema del cliente. Asimismo, esta capa provee el punto de entrada para que diferentes actores del ecosistema, como Sigfox, operadores de Sigfox, canales y clientes finales, interactúen con el sistema mediante interfaces web o APIs. Además, esta capa incluye módulos y características que son esenciales para garantizar el despliegue, operación y monitoreo de la red, así como un repositorio y herramientas para analizar los datos recopilados o generados por la misma. Cabe destacar que la conexión entre ambas capas se realiza a través de la Internet pública, pero se protege mediante una conexión VPN (pág. 12).



**Figura 28**

*Diagrama de Arquitectura de red de Sigfox*

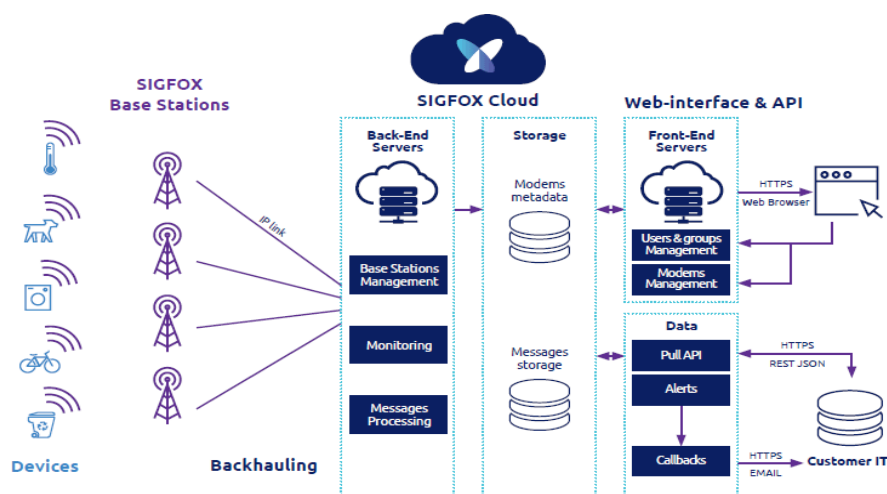
*Nota.* Fuente Sigfox Technical Overview, 2017

Los datos se envían por aire a las estaciones base y luego pasan por el backhaul. El backhaul generalmente usa conectividad DSL y 3G o 4G como respaldo. Cuando ninguno de los dos está disponible, la conectividad satelital se puede utilizar como tecnología de respaldo alternativa.

El back-end maneja el procesamiento de mensajes. Potencialmente, hay muchas réplicas del mismo mensaje que llegan a la red central, pero solo se debe almacenar una. Los servidores de la red central también monitorean el estado de la red y administran las estaciones base a nivel mundial.

La infraestructura de red también almacena los mensajes en dos ubicaciones: los metadatos se pueden usar para construir servicios por un lado y los mensajes de los clientes para que los clientes puedan recuperarlos más tarde, por otro lado.

Finalmente, la interfaz web y la API permiten a los clientes acceder a sus mensajes. Pueden acceder a la plataforma a través de su navegador web o utilizar una API REST para sincronizarlos con su sistema de TI y enviar mensajes de enlace descendente al dispositivo. (pág. 13)



**Figura 29**

*Arquitectura Plana Sigfox*

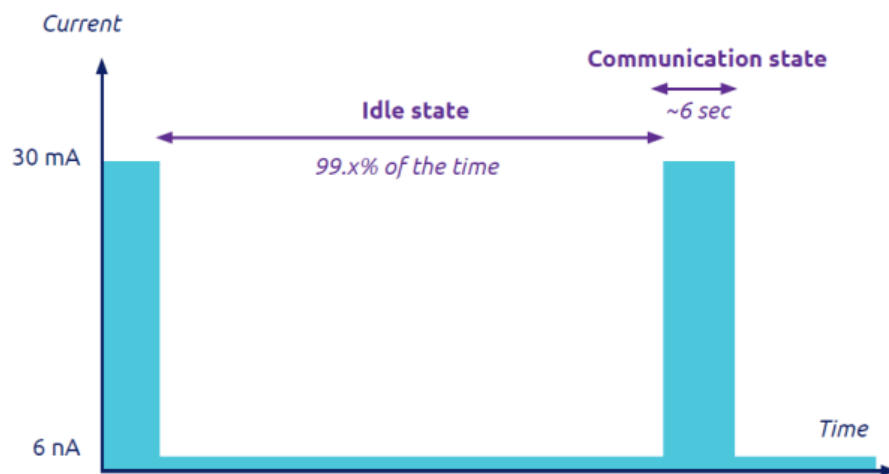
*Nota.* Fuente Sigfox Technical Overview, 2017

**2.2.11.2 Alta eficiencia de energía**

Hay dos factores relevantes de Sigfox con respecto al uso de energía:

- No se requiere emparejamiento, lo que significa que no se intercambian mensajes de sincronización entre el objeto y la estación base antes de transmitir los datos. Esta es una gran ventaja en comparación con otras tecnologías que incluyen todos esos pasos adicionales.
- El consumo inactivo es muy bajo, a menudo unos pocos nano amperios, lo que lo hace casi insignificante.

(pág. 15)

**Figura 30**

*Gráfico de Consumo de Corriente vs Tiempo en Sigfox*

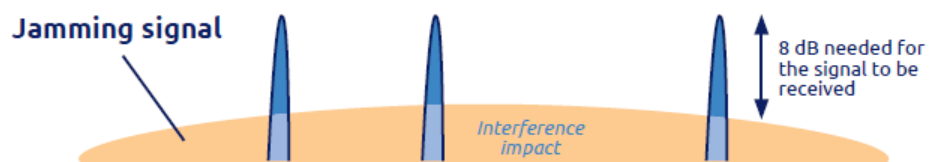
*Nota.* Fuente Sigfox Technical Overview, 2017

**2.2.11.3 Resistencia a la interferencia**

La tecnología Sigfox cuenta con la capacidad de resistir a interferencias gracias a la robustez inherente de su sistema de

modulación ultra estrecha (UNB) y la diversidad espacial de sus estaciones base. Es importante destacar que UNB es altamente resistente en entornos con otras señales, incluyendo aquellas de espectro ensanchado, lo que convierte a Sigfox en una mejor opción para operar en la banda pública industrial, científica y médica (ISM), ya que las redes de espectro ensanchado se ven afectadas por las señales UNB.

La alta resistencia a las interferencias es esencial para operar eficientemente en la banda ISM pública, y se demuestra a través de la capacidad de transmitir a pesar de la presencia de señales de interferencia. La modulación de banda ultra estrecha tiene una robustez intrínseca debido a que la superposición con el ruido es mínima, lo que permite que la señal sea recibida siempre y cuando esté al menos 8 dB por encima del piso de ruido. (pág. 16).



**Figura 31**

*Gráfico de Impacto de Ruido en la Señal*

*Nota.* Fuente Sigfox Technical Overview, 2017

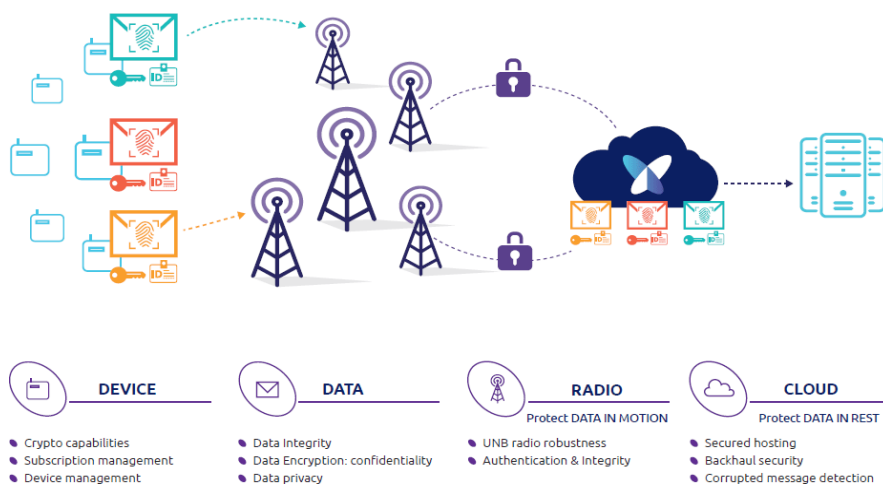
Las tecnologías basadas en la modulación de espectro ensanchado se ven muy afectadas por el ruido porque la superficie que tienen en común es mucho mayor. UNB es la mejor opción de señalización posible para operar en la banda ISM pública (pág. 16).

#### **2.2.11.4 Seguridad en Sigfox**

Sigfox ha incorporado principios de seguridad por diseño en todas las etapas de definición de su protocolo y en el desarrollo de su infraestructura, además de aplicar principios de seguridad por defecto



en todos los componentes que ofrece a los usuarios, operadores y fabricantes de dispositivos y clientes finales. Esto incluye la cadena completa de IoT, desde los dispositivos hasta la infraestructura de red y los servicios basados en la nube (pág. 17).



**Figura 32**

*Esquema de Seguridad de Sigfox*

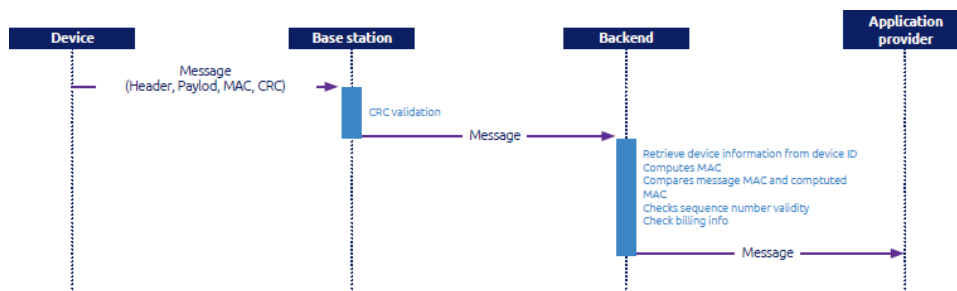
*Nota.* Fuente Sigfox Technical Overview, 2017

Es importante señalar que, aunque los dispositivos integrados con la tecnología Sigfox son objetos de IoT, no están directamente conectados a Internet ni se comunican a través del protocolo de Internet. De hecho, estos dispositivos no están conectados a ninguna red ni estación base. En su lugar, los dispositivos tienen un comportamiento incorporado que, cuando requiere la transmisión o recepción de datos desde Internet, emiten un mensaje de radio. Este mensaje es luego capturado por varias estaciones de acceso y enviado al Sistema de Soporte Sigfox, que a su vez lo entrega a un destino predefinido, generalmente una aplicación de IoT. Esta arquitectura asegura que los dispositivos Sigfox tengan un bajo riesgo de exposición a amenazas de seguridad en línea, lo que aumenta la protección de los datos transmitidos a través de su red. (pág. 17).

Si el dispositivo requiere una respuesta, la aplicación de IoT tiene la oportunidad, durante un período de tiempo limitado, de entregar la respuesta al dispositivo a través del Sistema de soporte Sigfox y las estaciones base. Este diseño implica que los dispositivos nunca tienen la capacidad de enviar datos a entidades desconocidas a través de Internet. Por lo tanto, están protegidos de Internet por un firewall muy estricto. La autenticación de mensajes y las medidas para evitar la reproducción son la base de la seguridad de los datos en movimiento y son fundamentales para ganarse la confianza de todo el ecosistema. El diseño del protocolo Sigfox proporciona estas características de forma predeterminada. Estos se completan con una medida opcional anti espionaje (pág. 18).

Los datos críticos se almacenan en todas las entidades de la cadena de IoT, desde los dispositivos que almacenan su clave de autenticación hasta los activos de seguridad del Sistema de Soporte Sigfox relacionados con la red, así como los datos del cliente. Esto implica diferentes mecanismos de seguridad dentro del ecosistema Sigfox, así como las mejores prácticas y procesos que garantizan la integridad, disponibilidad y confidencialidad de estos datos respetando las regulaciones locales (pág. 19).

Como la clave es única para cada dispositivo, comprometer un dispositivo tiene un impacto muy limitado. No obstante, el diseñador del dispositivo implementará buenas prácticas de seguridad y almacenamiento seguro. Las estaciones base almacenan credenciales para comunicarse con Sigfox Core Network. Los enfoques de vanguardia que se basan en Trusted Platform Module (TPM) aseguran esta entidad. Sigfox Core Network almacena las claves de autenticación de los dispositivos Sigfox Ready™, así como los metadatos de tráfico (pág. 20).



**Figura 33**

*Esquema de Revisión de Mensaje Uplink en Sigfox*

Nota. Fuente Sigfox Technical Overview, 2017

### 2.2.12 Dashboard IoT

De acuerdo a Pelaez (2018) en su artículo *IoT dashboards: Atributos, ventajas y ejemplos*, para el Internet de las cosas, o cualquier sistema de control, el dashboard o dashboard IoT es el componente clave HMI (Interfaz hombre-máquina) que organiza y presenta información digital de nuestro mundo físico en una pantalla de fácil comprensión en una computadora o dispositivo móvil. Con la ayuda de los dashboard, los usuarios y operadores pueden (de forma remota) monitorear y controlar activos y procesos específicos y, según los requisitos de seguridad, acceder y controlar un entorno desde cualquier parte del mundo.

En este artículo menciona los siguientes atributos y ventajas de los dashboard IoT:

#### 2.2.12.1 Atributos y ventajas de los dashboard IoT

- **Supervisan y controlan los activos físicos:** IoT puede entenderse simplemente como la digitalización de nuestro mundo físico; si bien muchas fuentes de datos comunes son puramente digitales, como los precios de las acciones financieras, IoT utiliza dispositivos de entrada/salida y sensores de nuestro mundo físico para mostrar información de un entorno o sus sistemas. Los dashboard IoT llenos de gráficos, cuadros, interruptores de control,

mapas, tablas e innumerables otros widgets son las herramientas digitales que usamos para visualizar y mostrar datos provenientes del mundo físico en nuestras computadoras.

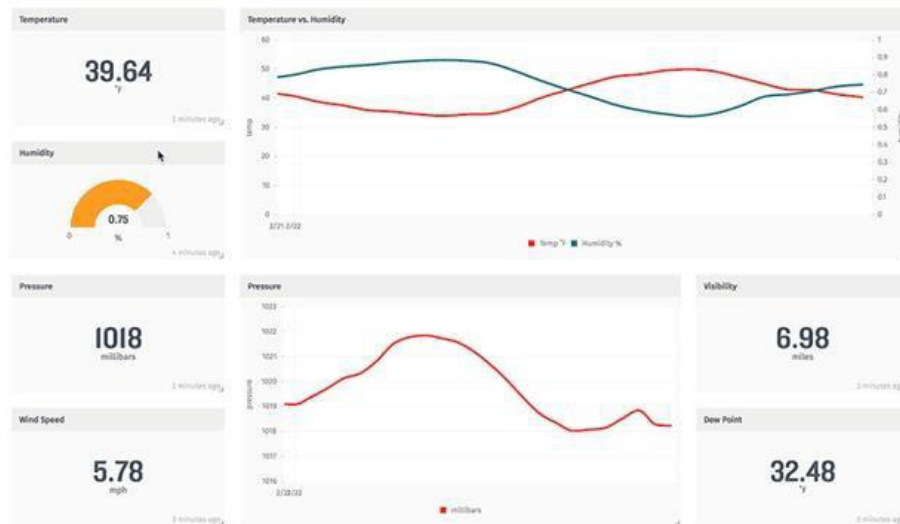
- ***Son utilizados tanto por empresas como por particulares:*** Si bien el uso del panel para ver datos estadísticos no es nuevo para las empresas, hacer que los datos estén fácilmente disponibles para los empleados, la administración y los clientes al mismo tiempo sí lo es. Las empresas ahora están adoptando IoT para incorporar análisis de datos en la nube para mejorar la eficiencia operativa y la seguridad de los trabajadores, y luego transmitir estos datos a los clientes o proveedores para una mayor transparencia del producto. De manera similar, las personas están adoptando IoT para mejorar la eficiencia de su propia mente y cuerpo gracias a los rastreadores de actividad física y los sistemas de alarma domésticos. En ambos escenarios, los usuarios finales tienen acceso a los dashboard IoT específicos como HMI que presentan datos relacionados con el estado de un sistema o eventos (puerta abierta, detección de humo, 4 millas recorridas); todo el tiempo sin requerir habilidades de programación para operar ninguno de los sistemas.
- ***Están basados en la nube y son globales:*** La adopción de Internet de las cosas (IoT) se debe, en parte, a la expansión de la computación en la nube y sus capacidades de recopilación, procesamiento y análisis de datos competentes. Con la accesibilidad global de las plataformas de almacenamiento de datos en la nube como AWS, Azure, Blumix y Google Cloud, las empresas o los usuarios privados ya no necesitan salas de servidores para almacenar datos ni el ingeniero de TI disponible para ejecutarlos. Con la arquitectura global de la mayoría de los proveedores de servicios en la nube o IoT, se puede acceder a los paneles de IoT simplemente con una URL y cualquier navegador o aplicación móvil estándar, en cualquier parte del mundo.

(Pelaez, 2018)

### **2.2.12.2 Ejemplos de Dashboard IoT**

De acuerdo a Fine Report (2020), tenemos los siguientes ejemplos:

- **Visualización del estado operativo del equipo:** Mediante la visualización de los datos del sensor, el departamento de gestión de instalaciones y fabricación puede captar el estado de funcionamiento de toda la planta, el equipo de cada línea de producción y el equipo defectuoso en tiempo real. Al enviar una alarma de umbral, puede detectar anomalías en el equipo con anticipación.
- **Supervisar el consumo de energía:** En edificios como fábricas y almacenes, puede verificar los resultados de consumo de energía en el tablero para conocer el corte de energía y tomar las medidas adecuadas y efectivas de ahorro de energía. Cuando el consumo se acerca al valor preestablecido, se emitirá un mensaje de advertencia.
- **Visualización de la gestión predictiva:** El departamento de producción de la fábrica monitorea si los resultados de producción reales de cada línea de producción están en línea con el plan original, analiza a fondo las razones de las brechas y las usa para mejorar todos los aspectos de la siguiente etapa de producción.
- **Supervisión del estado del tráfico:** Al visualizar los datos del tráfico en la carretera de cámaras y sensores, puede comprender las condiciones reales del tráfico en áreas y rutas, y responder rápidamente a fallas a gran escala.
- **Análisis del uso del estacionamiento:** Análisis en tiempo real de la información de gestión de estacionamiento mediante la visualización de datos del operador de estacionamiento, como el número de estacionamientos y el número de vehículos desocupados.



**Figura 34**

*Ejemplo Dashboard IoT*

*Nota. Fuente Losant, 2020*

### **2.2.13 Zigbee**

Según el informe de la Zigbee Alliance (2015), Zigbee es una tecnología inalámbrica que ha sido desarrollada como un estándar global abierto con el fin de satisfacer las necesidades específicas de las redes de IoT inalámbricas que requieren bajo costo y bajo consumo de energía. La tecnología Zigbee utiliza la especificación de radio física IEEE 802.15.4 y opera en bandas sin licencia que incluyen 2.4 GHz, 900 MHz y 868 MHz.

La especificación 802.15.4, sobre la cual se basa Zigbee, fue ratificada por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) en 2003. Este protocolo de radio basado en paquetes está diseñado para dispositivos de bajo costo que operan con baterías y permite la comunicación entre dispositivos en diversas topologías de red. Como resultado, los dispositivos pueden tener una duración de batería de varios años. (pág. 1).

### 2.2.13.1 Características del protocolo zigbee

A continuación, un cuadro de las especificaciones técnicas del protocolo:

**Tabla 2**

*Características del Protocolo Zigbee*

<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>
Protocolo de red	Zigbee PRO 2015 (o superior)
Topología de red	Self-Forming, Self-Healing MESH
Dispositivos de red	Coordinador, Router, Dispositivo terminal, Dispositivo Zigbee Green Power
Tamaño de red (teórico)	Hasta 65,000 nodos
Tecnología de Radio	IEEE 802.15.4-2011
Banda de Frecuencia / Canales	2.4 GHz (banda ISM) 16-canales (2 MHz ancho)
Velocidad de Datos	250 Kbps
Modelo de Seguridad	Centralizado, Distribuido
Soporte de Encriptación	AES-128 Capa de Red AES-128 disponible en capa de Aplicación
Rango de comunicación	Hasta 300 metros (línea de vista) Hasta 75-100 metros indoor
Soporte Low Power	Dispositivos terminales (modo Sleep)

	Dispositivos Zigbee Green Power (recolección de energía)
Soporte lógico	Cada dispositivo físico puede admitir hasta 240 puntos finales (dispositivos lógicos)

---

*Nota:* Fuente Zigbee Alliance, 2015

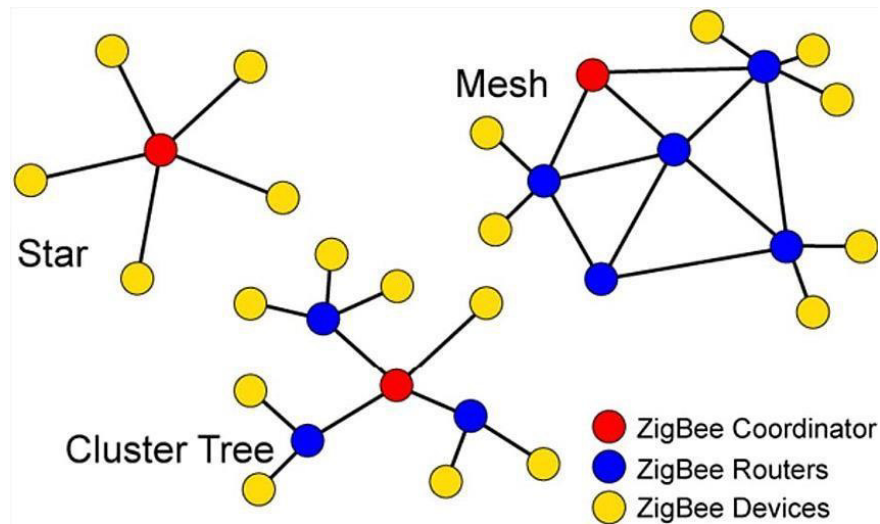
### **2.2.13.2 Redes mesh**

Según el artículo de Digi (2018) titulado "¿Qué es Zigbee?", uno de los componentes clave del protocolo Zigbee es su capacidad para soportar redes de malla. En una red de malla, los nodos se conectan entre sí para crear múltiples rutas entre ellos. La conexión entre los nodos se actualiza y optimiza dinámicamente a través de una tabla de enrutamiento de malla sofisticada incorporada en el protocolo.

Las redes de malla son descentralizadas, lo que significa que cada nodo puede auto-descubrirse en la red. Además, si un nodo deja la red, la topología de malla permite que los nodos restantes reconfiguren las rutas de enrutamiento según la nueva estructura de la red. La topología de malla y el enrutamiento ad-hoc proporcionan una mayor estabilidad en condiciones cambiantes o en caso de fallos en los nodos individuales.

La capa de red de Zigbee admite topologías de estrella, árbol y malla. En una topología de estrella, la red está controlada por un dispositivo único conocido como coordinador Zigbee. El coordinador Zigbee es responsable de iniciar y mantener los dispositivos en la red. Todos los demás dispositivos, llamados dispositivos finales, se comunican directamente con el coordinador Zigbee. En las topologías de malla y árbol, el coordinador Zigbee inicia la red y elige ciertos parámetros clave, pero la red puede expandirse mediante el uso de enrutadores Zigbee. En las redes de árbol, los enrutadores mueven datos y controlan mensajes a través de la red mediante una estrategia de enrutamiento jerárquica. Las redes de malla permiten una comunicación completa de igual a igual.



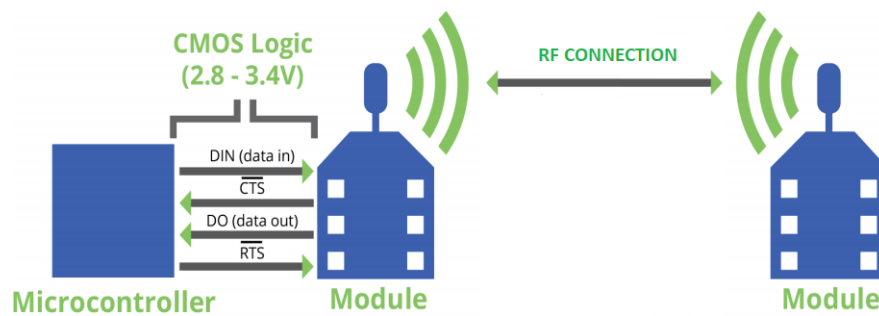


**Figura 35**

*Topologías de Red Zigbee*

*Nota.* Fuente Hao & Foster, 2008

En este tipo de red Zigbee, el coordinador tiene que estar conectado a un IC SoC que gestione la formación de tramas, la descomposición de tramas y envío de comandos.



**Figura 36**

*Esquema de Comunicación Zigbee*

*Nota.* Fuente Digi, 2018

Lee et al. (2013) menciona que ZigBee es un estándar emergente diseñado específicamente para redes de área personal inalámbricas (WPAN) con un enfoque en habilitar redes de sensores inalámbricos (WSN). Zigbee de esta manera intenta proporcionar una red inalámbrica de baja velocidad de

datos, bajo consumo de energía y bajo costo en la comunicación a nivel de dispositivo (pág. 1).

## **2.3 Definición de Términos**

Se definen las siguientes categorías de análisis basado en este proyecto de tesis:

### ***2.3.1 Sistema de control de riego***

Un sistema de control de riego se define como aquel control que permite regular la cantidad de agua en la cantidad necesaria en el momento correcto para aportar a una producción agrícola sustentable, de esta manera alcanzar altos niveles de eficiencia en el uso del agua. Existen sistemas de control de riego tanto de lazo abierto en el cual el operador toma la decisión de cuánta agua y por cuánto tiempo será aplicado, y los de lazo cerrado que se basan en los valores de humedad del suelo (Maktu, 2018).

### ***2.3.2 Humedad óptima de suelo***

La humedad óptima del suelo, entre otros factores, es aquella que genera el crecimiento óptimo de las plantas y generan máximo rendimiento en los cultivos. (Soil Science Society of America, 2018)

### ***2.3.3 Cantidad de agua para alcanzar la humedad óptima de suelo***

Es el volumen de agua necesario y beneficioso para la planta, pero que es dependiente del tipo de suelo (capacidad de campo, punto de marchitez y saturación). (Administración Local del Agua, 2010)

### ***2.3.4 Monitoreo y control de las variables de riego***

El monitoreo y control de variables de riego son procedimientos (en el presente trabajo tecnológico) para conocer los valores actuales de las variables de riego y ejercer control sobre ellos. (Pelaez, 2018)

## **CAPÍTULO 3 HIPÓTESIS Y VARIABLES**

### **3.1 Hipótesis**

#### ***3.1.1 Hipótesis General***

- El diseño e implementación de un sistema electrónico de control de humedad de suelo, hará eficiente el uso de agua para riego agrícola.

#### ***3.1.2 Hipótesis Específicas***

- El diseño e implementación de un sistema control de lazo cerrado para el control del flujo de agua y la humedad de suelo contribuirá al uso eficiente del agua para riego agrícola.
- El diseño e implementación de una red de monitoreo de la humedad del suelo con interfaz de comunicación de datos hacia una plataforma IOT ayudará a monitorizar remotamente las informaciones obtenidas por el sistema de control de humedad.

## **3.2 Variables**

### ***3.2.1 Variable Dependiente***

- Control de humedad de suelo

### ***3.2.2 Variable Independiente***

- Agua para riego agrícola

### 3.3 Operacionalización de las Variables

**Tabla 3**

*Operacionalización de las Variables*

<b>Variable</b>	<b>Definición</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicadores</b>
Control de Humedad de Suelo	Habilidad de medir y administrar la cantidad de humedad que el suelo tiene en un tiempo de muestreo determinado a través del uso de sensores y actuadores para modificar la variable. (Wikipedia, 2022)	<b>Sistema de Control Medición</b>	- Control de lazo abierto. - Control de lazo cerrado. - Control en Cascada.
		<b>Humedad Óptima de Suelo</b>	- Nivel de Agotamiento Permisible. - Intervalo de Humedad Disponible.
		<b>Medición y Monitoreo de Variables</b>	- Sensado de Flujo. - Humedad y Volumen de Agua.
Agua para riego agrícola	Es aquella agua que se aplica mediante diferentes sistemas de regadío para el correcto desarrollo de los cultivos (G.J, 2019)	<b>Tipo de Riego Agrícola</b>	- Riego Tradicional. - Riego Tecnificado.
		<b>Volumen de Agua para el Riego Agrícola</b>	- Capacidad de Campo. - Punto de Marchitez. - Saturación.
		<b>Uso Eficiente del Agua para Riego Agrícola</b>	- Herramientas Eficientes. - Ahorro de Agua.

*Nota.* Fuente Elaboración propia

## **CAPÍTULO 4 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.1 Área de Estudio**

La presente tesis se desarrolló en el distrito de El Agustino en el año 2021 en un pequeño huerto ubicado en las siguientes coordenadas:  
-12.030574, -76.964906.

### **4.2 Enfoque de la Investigación**

Este proyecto de tesis se basa en analizar la acción de nuestro sistema de control aplicado a un caso y proceso particular, buscamos encontrar la relación entre el control de humedad y el uso eficiente del agua para riego, debido a esto el tipo de investigación que realizamos es la cuantitativa. Para este caso estamos trabajando con una muestra de un tipo de suelo para poder observar la acción del sistema de control y entender el comportamiento de la humedad, es por ello que el análisis de suelos para la acción de control es indispensable, así como también el análisis del tipo de cultivo al que va orientado. El resultado de la eficiencia del agua para riego será evaluado en comparación a un cultivo del mismo tipo.

### **4.3 Tipo de Investigación**

Debido a que esta tesis nace con a raíz de un problema identificado el cual es proveer eficiencia al uso de agua para riego para el pequeño agricultor, es decir, se busca resolver una necesidad práctica cotidiana en las prácticas de riego de un agricultor, el tipo de investigación considerada es la investigación aplicada (CRAI, 2015), de esta manera se busca colaborar en el desarrollo de propuestas al área de control de riego para soluciones de bajo costo.

### **4.4 Diseño de Investigación**

Debido a que este proyecto busca analizar la relación entre la humedad de suelo y el volumen de agua aplicado al riego, el diseño de investigación es del tipo experimental (Question Pro, 2019). Para este proyecto se hace uso de diversas tecnologías en el desarrollo de las etapas de nuestro sistema: dispositivos embebidos de control, una red de sensores inalámbricos WPAN, una plataforma en la nube de monitoreo, y tecnología de comunicación LPWAN.

Como primer paso realizamos la selección de componentes en base a criterios de diseño, para esto, plantearemos las pautas a considerar respecto a funcionalidades y características técnicas de los componentes. Como segundo paso, se realizará la implementación del sistema electrónico y montaje para la experimentación de campo donde se recogerán los datos de nuestros sensores. Como tercer paso, con los datos obtenidos procederemos a analizar los resultados de la experimentación.



#### **4.5 Población y Muestra**

Debido a que este proyecto de tesis se orienta al área agrícola en el tema de control de la humedad del suelo, consideramos como sujetos de estudio a los *suelos de cultivo* en las que se aplica un riego del tipo tradicional (no tecnificado). La muestra con la que se realiza este proyecto es con un suelo del tipo franco, el cual se analizará para obtener sus propiedades de capacidad de campo, punto de marchitez y saturación.

#### **4.6 Procedimientos de Recolección de Información**

Para este proyecto nos basamos en la técnica de observación experimental ya que durante el proceso de investigación se realizará la manipulación y modificación del volumen de agua para riego y verificaremos su efecto sobre la humedad de suelo. Las pruebas iniciales que se realizarán con el volumen de agua para riego se llevarán a cabo en condiciones controladas, con el objetivo de poder analizar de la manera más fiel cuál es la cantidad óptima de humedad en base a la cantidad de riego, y de esta manera probar el efecto positivo de su control.

Para la colección de datos se usará un sensor de humedad de tierra y para controlar el consumo de agua se usará un sensor de flujo. Como datos extra, recogeremos los datos de temperatura ambiente, humedad ambiente, y temperatura de suelo con la finalidad de correlacionar los datos medioambientales y validar los valores medidos.

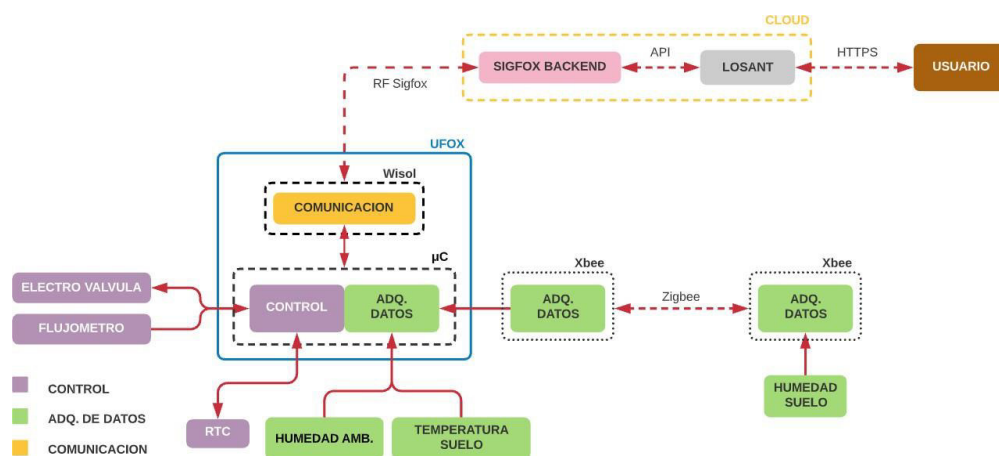
## 4.6.1 Desarrollo del Proyecto

### 4.6.1.1 Criterios para Selección de Componentes

Debido a que el proyecto está dirigido a ser usado dentro de un campo de cultivo rural, se propone seguir las siguientes pautas para el diseño y selección de equipamiento:

- Usar placas de desarrollo que integren comunicación remota inalámbrica y uso de microcontrolador para la lógica de programación, de esta manera disminuir el hardware necesario para el despliegue del sistema.
- Dependier lo menos posible de cableado para la distribución de energía y comunicación de todas las partes del sistema electrónico (despliegue de sensores en el campo de cultivo), esto debido a posibles atenuaciones por la extensión del cableado.
- Ya que el sistema está dirigido al pequeño y micro agricultor, se debe mantener costos de implementación bajos y que a su vez puedan dar un rendimiento aceptable.

Dicho esto, a continuación, se desarrolla un análisis por etapas de nuestro sistema electrónico (control, adquisición de datos y comunicación).



**Figura 37***Diagrama de Bloques del Sistema General*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

Tanto para la etapa de control, adquisición de datos y comunicación requerimos de un microcontrolador con la cantidad de puertos digitales, puertos analógicos, interrupciones y puertos seriales necesarios para la comunicación con los dispositivos externos.

En base a las delimitaciones de estudio planteadas en el capítulo 1 de la tesis, la red a utilizar para la comunicación remota es la red LPWAN de Sigfox, es por ello que se utilizará una placa de desarrollo que integre un microcontrolador para la programación del control y comunicación vía la red LPWAN de Sigfox. La opción más comercial disponible en Perú es el kit de desarrollo UFOX de Teca. Esta placa integra un microcontrolador Atmega32U4 y un Modem Wisol WSSF10R4 RC4 para la conexión con la red de Sigfox.



### Figura 38

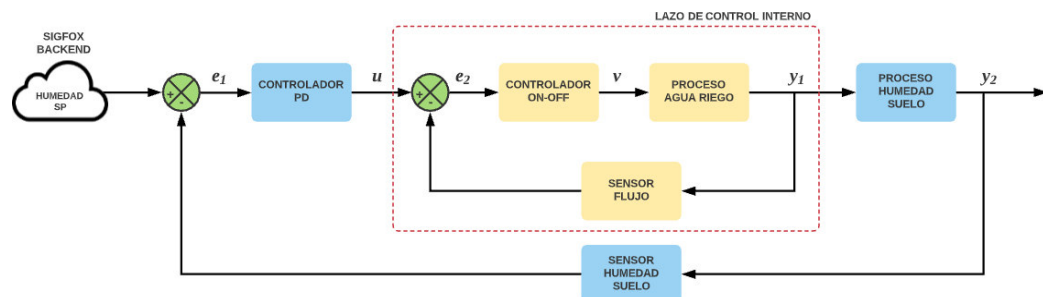
*Tarjeta de Desarrollo UFOX*

*Nota.* Fuente Teca 2020

Ya que la tarjeta cuenta con pines de alimentación, pines digitales y analógicos, tenemos la versatilidad de poder conectar los sensores y componentes necesarios.

#### 4.6.1.2 Etapa de Control

La etapa de control está formada por un control de lazo cerrado en cascada, compuesto por un lazo interno y externo. El lazo de control interno se encarga de controlar el volumen de agua aplicado al riego (variable rápida). Este lazo está formado por un controlador ON-OFF, una electroválvula como actuador y un sensor de flujo de agua para la realimentación del lazo. Por otro lado, el lazo de control externo o principal tiene se encarga de controlar la humedad de suelo de cultivo (variable lenta). Este lazo está formado por un controlador PD (proporcional-derivativo) y un sensor de humedad de suelo para la realimentación del lazo. El set point de humedad, así como la programación del horario de funcionamiento del control es configurado desde una plataforma IoT en la nube.



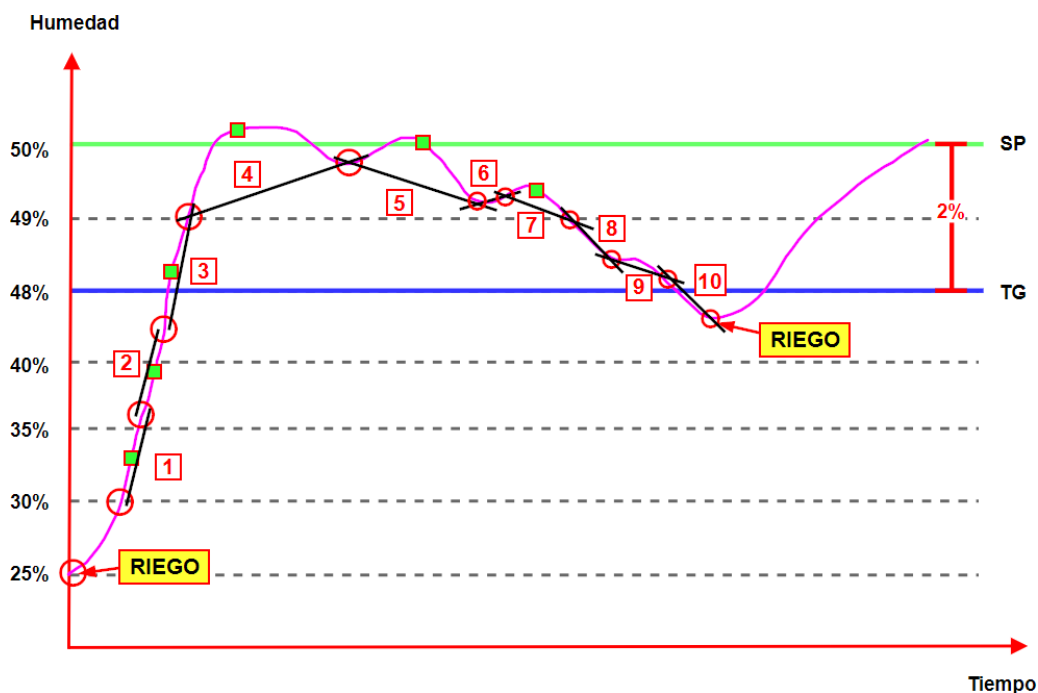
### Figura 39

*Diagrama de Bloques de Etapa de Control*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

Como se puede apreciar en el diagrama, la humedad setpoint es enviada desde el backend de Sigfox, este valor es configurado por el usuario desde la plataforma IoT de Losant la cual reenvía estos datos al backend de Sigfox. El setpoint y horarios de riego también pueden ser precargados dentro del programa. Dado que el setpoint es establecido en porcentaje de humedad, debemos saber cuánto es el riego que se debe de aplicar para llegar a ese porcentaje. Este cálculo lo haremos gracias a la experimentación de campo (capítulo 4). El error de humedad de suelo  $e_1$  lo recibe el controlador PD (Proporcional - Derivativo). Lleva este nombre ya que hace el cálculo de riego proporcional al error, y derivativo porque verifica el error anterior de humedad para saber si el proceso de humedad de suelo es ascendente o descendente (pendiente positiva o negativa). Si está en ascenso no se aplica el control, en cambio, si está en descenso, utilizamos la parte proporcional del controlador para calcular el volumen de riego necesario para llegar a la humedad setpoint.

La acción de control PD, es decir  $u$  es enviado al lazo interno como setpoint de volumen de agua de riego. El error  $e_2$  es enviado al controlador ON-OFF el cual activa la electroválvula de riego para el paso de flujo de agua. La cantidad de agua aplicada al riego es leída con el sensor de flujo de agua. Una vez llegado al setpoint el proceso para. El riego aplicado es dirigido a nuestro proceso principal, el cual es el suelo de cultivo. Debido a que el proceso es lento, no podremos ver reflejada la humedad al instante, sino más bien, debemos esperar a que la acción de control se refleje y podamos monitorear la salida del proceso. Las actualizaciones de humedad son leídas cada 30 minutos y con ello repetimos el proceso.



**Figura 40**

*Gráfico de Regla de Acción de Controlador PD*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

La Figura 40 muestra un ejemplo de la acción del controlador PD con respecto al setpoint de humedad. En este proyecto se ha manejado un escalón de riego mínimo de 25mL, el porcentaje de error mínimo para aplicar riego dependerá de la cantidad de agua requerida por el proceso. En este caso se usará una referencia de al menos 2% de error respecto al SP para tomar acción de control.

El sensor de humedad toma lecturas cada 30 minutos y cada 3 lecturas (0' – 30' – 1h) se verifica la pendiente entre el primer y último valor de ese intervalo. Considerar que el 3er valor del intervalo se convierte en el 1er valor del próximo intervalo como muestra el gráfico. El algoritmo se realiza de esta manera debido a que la humedad es una variable lenta y depende muchas veces del factor ambiental: días con mucha radiación solar acelerarán el proceso de secado, mientras que días con alta humedad o lluvia mantendrán la humedad o inclusive agregarán más agua no perteneciente al riego.

En este ejemplo el setpoint programado es del 50% de humedad. La primera lectura de humedad de suelo fue de 25%, con esta referencia se aplica riego necesario para alcanzar el setpoint. Podemos ver en el gráfico que en el intervalo **1** y **2** se toman lecturas de la humedad de suelo y estas se encuentran por debajo del Trigger y Setpoint, sin embargo, este no es un indicador para aplicar riego ya que la pendiente es positiva, esto es indicador que la humedad de suelo aún se está incrementando.

Para los intervalos **3** y **4** ya hemos llegado al setpoint esperado, gracias a que se realizó el cálculo inicial del volumen de riego a aplicar.

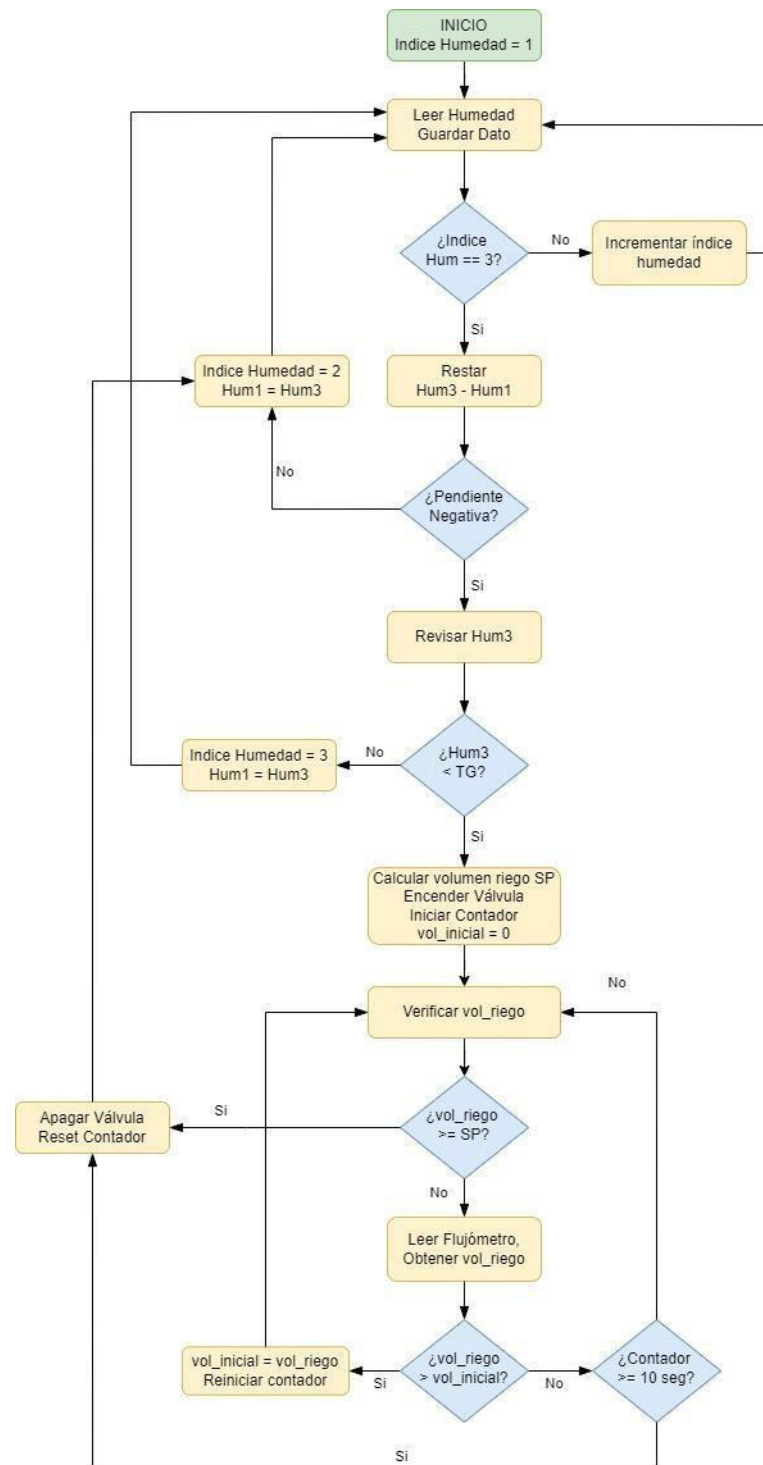
El intervalo **5** es el primer indicador de disminución de la humedad de suelo debido a la pendiente negativa. El riego aún no es aplicado debido a que la lectura aún se encuentra entre los valores de SP y TG. A partir del inicio de pendiente negativa, la revisión de pendiente se realiza cada 30 minutos. En el intervalo **6** vemos que hay un incremento de humedad sin aplicación de riego por algún factor externo, esto hace que la evaluación de la pendiente vuelva a ser cada hora.

Los intervalos **7**, **8** y **9** son de pendiente negativa, sin embargo, aún no se encuentran por debajo del TG, debido a ello el riego no se inicia.

En el intervalo **10** podemos ver que el último valor se encuentra por debajo del valor de TG, por ello, se activa la acción de control y se calcula el volumen de riego para volver a alcanzar el setpoint. Cada vez que se activa el control de riego se aplica el volumen de agua calculado de manera completa, así no debemos esperar la estabilización de la humedad en riegos parciales.

Se implementó así también un algoritmo en caso exista un corte del flujo de agua para que el sistema no permanezca en un bucle infinito. Se inicia un contador una vez se abre la válvula de riego, si luego de 10 segundos no hay ningún incremento de volumen de agua, es decir, no disminuye el error  $e_2$  por más mínimo que sea (en caso el flujo de agua sea muy lento), se procede a apagar la válvula.

Se muestra a continuación un diagrama de flujo sobre la acción de control de riego.



**Figura 41**

*Diagrama de Flujo de Control de Riego*

*Nota. Fuente Elaboración propia*



#### **4.6.1.3 Etapa de Adquisición de Datos**

La etapa de adquisición de datos se encarga de poder recopilar periódicamente los datos del sensor de humedad de suelo, del sensor de humedad ambiente y del sensor de temperatura de suelo. En base al escenario de implementación que se planteó, debemos considerar depender lo menos posible de cableado para la distribución de energía y despliegue de sensores en el campo de cultivo debido a posibles atenuaciones por la extensión del cableado. Siendo que la variable de humedad de suelo es la más importante a sensor, y esta puede ser medida en cualquier parte del campo agrícola, ya sea por contar con diferentes tipos de cultivos o por relacionar varias medidas para obtener un promedio de las mismas, se propone implementar una red inalámbrica de sensores usando una red WPAN. En un análisis de la tecnología a usar para este propósito, se debe poner en consideración lo siguiente:

- Garantizar cobertura de a grandes distancias sin la necesidad de intermediarios.
- Bajo consumo de energía, con posibilidad de entrar en modo de bajo consumo de energía.
- Capacidad de gestión de gran cantidad de nodos por cada red de ser necesario.
- No se requiere alta velocidad en transmisión de datos.
- Fácil integración con la etapa de control de nuestro sistema.

Algunas propuestas comerciales que pueden cumplir con lo solicitado son las que se muestren en la siguiente tabla:

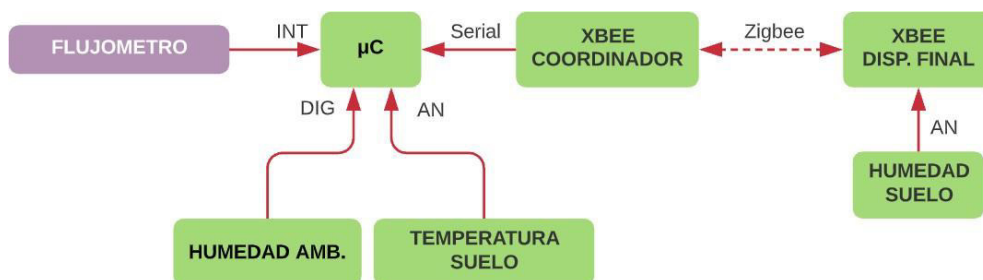
**Tabla 4**

*Cuadro Comparativo de Protocolos Inalámbricos*

Protocolo	Frecuencia	Rango (m)	Velocidad	Consumo Energía	Topología	Seguridad
ZigBee	2.4GHz, 915MHz (US), 868 MHz (EU)	30-100	250 kbps (2.4) 40kbps (915) 20kbps (868)	Bajo	Mesh	Encriptado
Z-Wave	915MHz (US) 868MHz (EU)	30-100	40kbps (915) 20kbps (868)	Bajo	Mesh	Encriptado
Bluetooth Low Energy (BLE)	2.4GHz	60	100kbps	Bajo	PAN	Encriptado
Thread	2.4GHz	30	250kbps	Bajo	Mesh	Encriptado
DigiMesh	2.4GHz 900 MHz (US)	30-100	250 kbps (2.4) 40kbps (915)	Bajo	Mesh	Encriptado

*Nota:* Fuente Table Comparing Wireless Protocols for IoT Devices, 2018

Dentro de los productos del mercado se seleccionó los módulos Xbee debido a la facilidad de configuración de parámetros. Estos dispositivos utilizan el protocolo Zigbee para la transmisión de datos. Es un dispositivo todo en uno, el cual incluye pines digitales y analógicos y no depende de un microcontrolador externo para realizar tareas simples como leer algún sensor conectado. Permiten así también entrar en modo hibernación durante un periodo y luego encenderse por un lapso de tiempo, esto nos ayudará a disminuir el consumo de energía de nuestro módulo de monitoreo. La red Zigbee propuesta está formada por un módulo Xbee coordinador (maestro) y un módulo Xbee dispositivo final (esclavo) que reporta periódicamente al coordinador los datos del sensor de humedad.



**Figura 42**

*Diagrama de Bloques Etapa de Adquisición de Datos*

*Nota.* Fuente Edición propia

Debido a que el módulo dispositivo final puede ser ubicado en cualquier parte del campo de cultivo y a cualquier distancia del coordinador se plantea el uso de baterías de litio-ion en una configuración de bajo consumo con el Xbee, con el fin que el reemplazo o recarga de la batería sea en periodos prolongados.

Otro punto a considerar en la etapa de adquisición de datos es poder obtener lecturas correctas de la humedad de suelo, para ello debemos de realizar una correcta selección del sensor de humedad. Dentro de las opciones comerciales de bajo costo tenemos sensores del tipo resistivo y capacitivo.

Debido al efecto de electrólisis por la conducción eléctrica en suelos con alta humedad y PH para los sensores resistivos, estos tienden a corroerse en un corto tiempo.



**Figura 43**

*Sensor de Humedad de Suelo Corroído*

*Nota.* Fuente Raspberrypi Stackexchange, 2017

Sin embargo, esto puede controlarse encendiendo únicamente el sensor cuando se desea tener una lectura.

El sensor capacitivo por otro lado, no cuenta con las desventajas mencionadas con el sensor resistivo por el principio de funcionamiento del mismo, así también el sensor capacitivo permite lecturas más exactas con un menor consumo de corriente (5mA para el sensor capacitivo frente a 35mA para el resistivo) y esto es vital para ahorrar energía de la batería del módulo Xbee en modo dispositivo final.

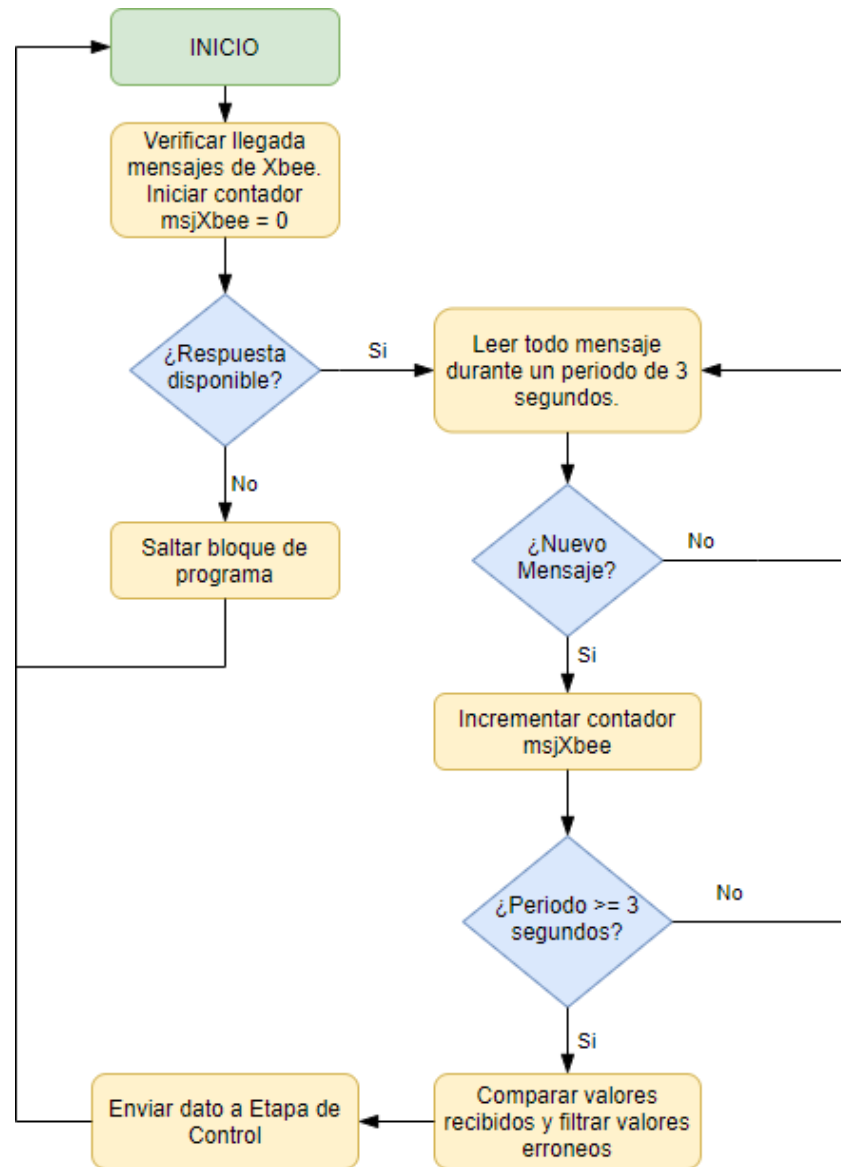


**Figura 44**

*Sensor de Humedad de Suelo Capacitivo*

*Nota.* Fuente IndiaMart, 2019

Por las ventajas mencionadas se hará uso del sensor capacitivo para este proyecto. Se presenta a continuación el diagrama de flujo de programación del proceso de adquisición de datos:



**Figura 45**

*Diagrama de Flujo para Adquisición de Datos de Humedad*

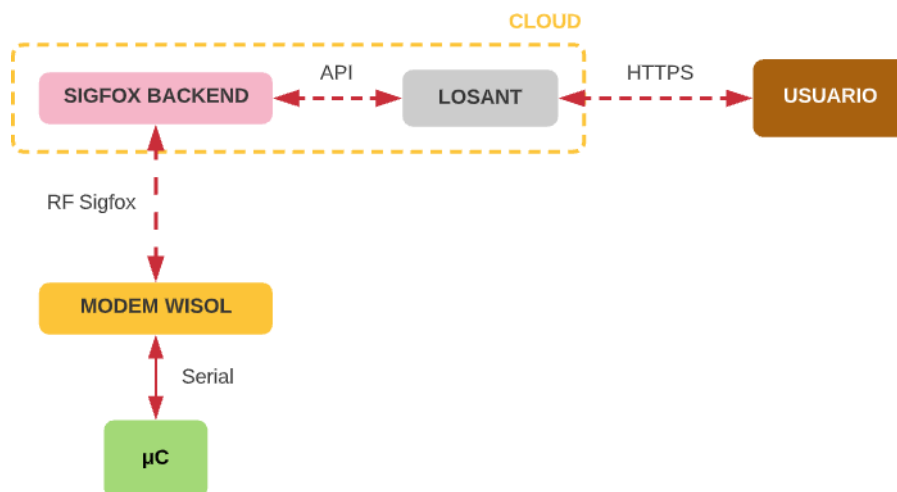
*Nota.* Fuente Elaboración propia

Para prevenir cualquier lectura errada por parte del sensor, el Xbee esclavo enviará múltiples mensajes en un periodo de 2.5 segundos. El algoritmo recibirá todo mensaje del esclavo dentro de un periodo de 3 segundos, luego de recibir los mensajes se analizarán si todos son próximos entre sí, es decir que

sean valores similares y positivos. De encontrar un valor muy alejado del promedio se elimina. El resto de mensajes de valor similares son promediados y el valor resultante es pasado a la Etapa de control. Las lecturas de los demás sensores de esta etapa son directas por lo que no se requiere un diagrama de flujo del proceso, basta con verificar su valor y almacenarlo para su posterior uso.

#### 4.6.1.4 Etapa de Comunicación

La etapa de comunicación tiene como objetivo enviar los datos recopilados de los sensores hacia el backend de Sigfox y a la plataforma IoT de Losant para su monitoreo. Se consideró el uso de la plataforma de Losant debido a que tiene una versión gratuita para desarrolladores la cual nos permite probar el dashboard IoT, configurarlo a gusto y acceso libre a todas sus herramientas.



**Figura 46**

*Diagrama de Bloques Etapa de Comunicación*

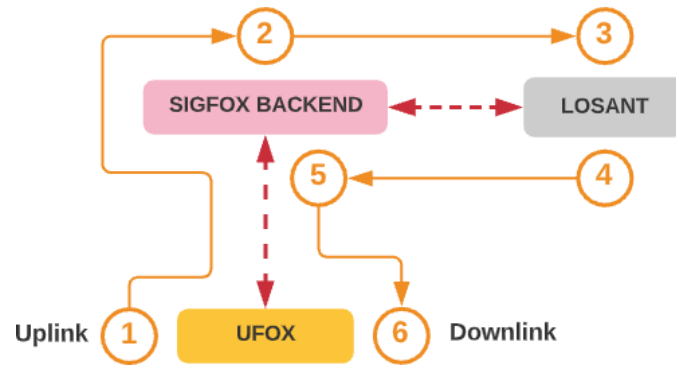
*Nota.* Fuente Elaboración propia

Para poder enviar los datos recopilados de los sensores, estos primero deben ser formateados para poder ocupar el payload máximo de cada mensaje

uplink (mensaje enviado del dispositivo hacia el backend de Sigfox) el cual es de 12 bytes. Los mensajes son enviados en formato de arreglo hexadecimal al backend donde el usuario puede verificar la recepción, exportar la data, verificar la calidad de señal del dispositivo de campo y realizar las configuraciones en el backend para que este pueda derivar los mensajes hacia otra plataforma, en nuestro caso Losant. La comunicación entre el backend de Sigfox y Losant es a través de HTTP Requests. Una vez en Losant el arreglo hexadecimal debe descomponerse para poder por fin ser mostrado al usuario en el dashboard IoT.

A través del dashboard IoT de Losant no solo realizamos el monitoreo de los sensores, sino también podemos configurar el valor de setpoint de la humedad de suelo, el rango horario en el cual el control debe ser ejecutado y también podemos apagar el sistema de control. Para que estos valores sean enviados al dispositivo de campo este primero debe de solicitar un mensaje downlink (envío de mensaje desde backend de Sigfox al dispositivo de campo). Los mensajes downlink son enviados únicamente a solicitud del dispositivo de campo, por ello se debe programar los periodos de solicitud en nuestro sistema electrónico. La solicitud inicia en el dispositivo de campo, el cual envía un mensaje uplink solicitando el mensaje downlink; una vez lo recibe el backend de Sigfox, este solicita la información a la plataforma de Losant la cual la envía al backend y por último del backend hacia el dispositivo de campo. El mensaje downlink de Losant con el valor del setpoint de humedad y rango horario de control, al igual que en los mensajes uplink, debe ser enviado en formato de array hexadecimal para ser descompuesto en el dispositivo de campo.



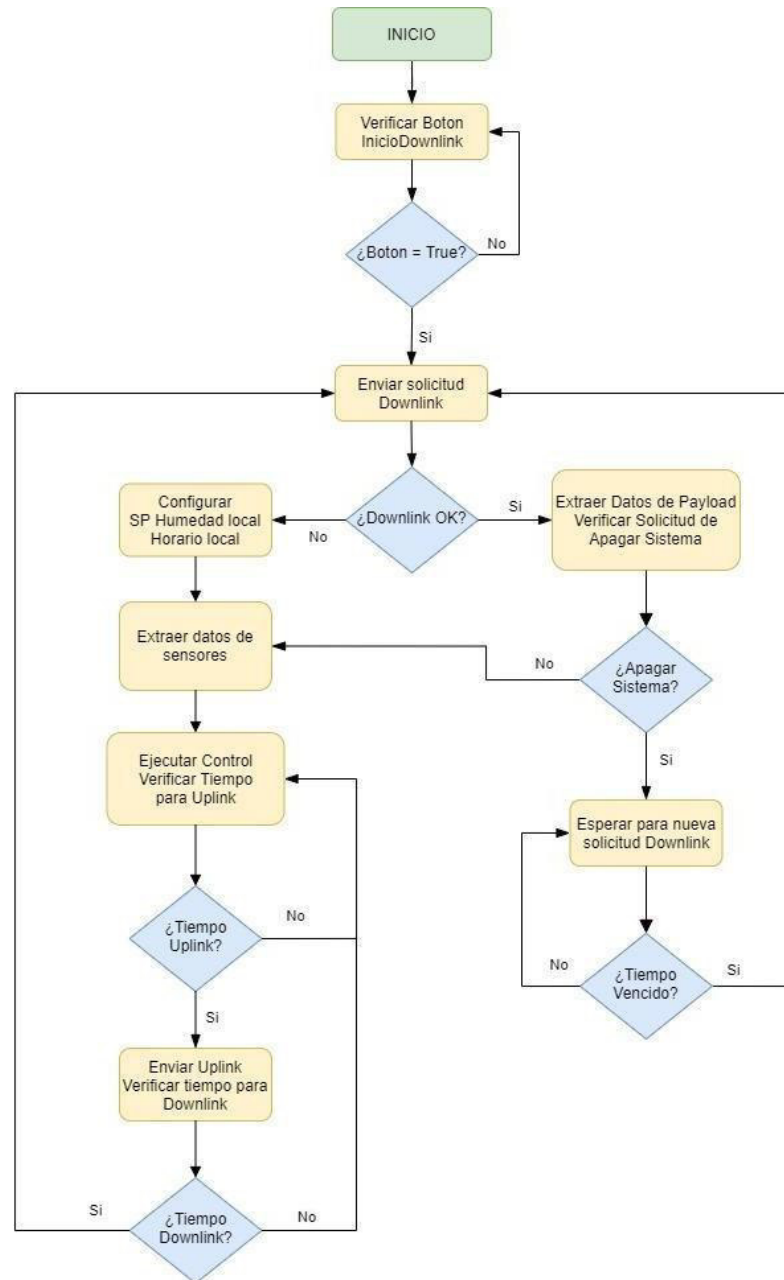


**Figura 47**

*Diagrama Flujo de Mensajes*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

Se presenta a continuación diagrama de flujo de la lógica para el envío y recepción de mensajes.



**Figura 48**

*Diagrama de Flujo para Mensajes Uplink y Downlink*

*Nota. Fuente Elaboración propia*

## **4.6.2 Implementación del Sistema Electrónico**

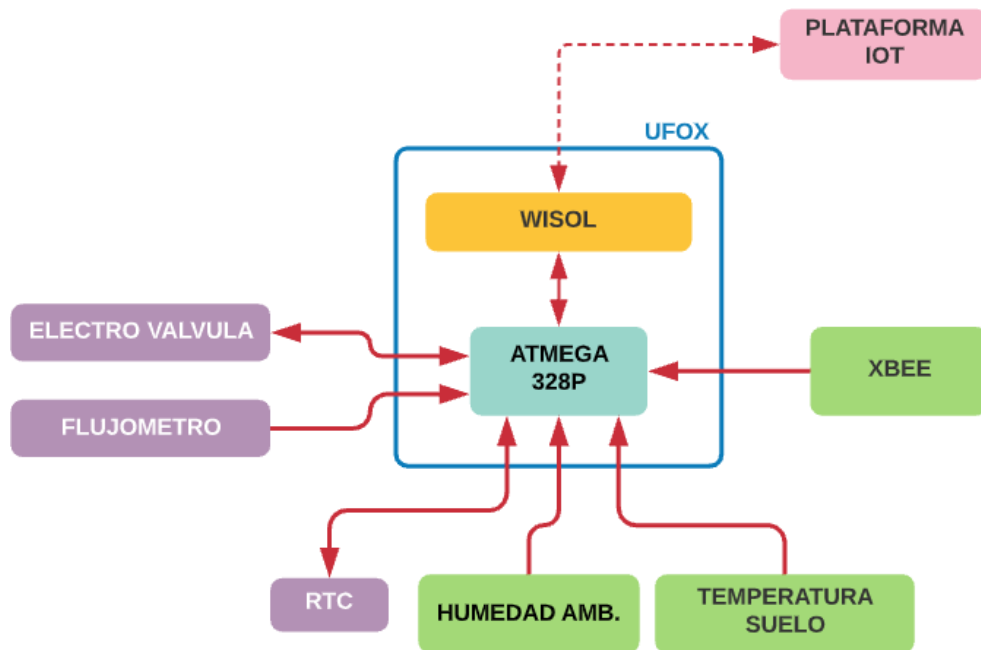
### **4.6.2.1 Principales Características**

- El sistema de control mantiene un setpoint de humedad especificado por el usuario dentro de un rango de  $\pm 2\%$ .
- Las muestras de datos pueden ser vistos de manera local en tiempo real conectando la tarjeta de desarrollo UFOX vía USB a una PC. Los datos obtenidos son enviados a la plataforma IoT de Losant desde donde podemos exportar toda la data para su análisis.
- La configuración del setpoint de humedad y la programación del horario de acción del control puede pre programarse o hacerse a través del dashboard IoT de Losant. La programación de estos parámetros desde Losant solo puede hacerse cada 6 horas debido a que únicamente se puede solicitar 4 mensajes downlink por día.
- El sistema obtiene la humedad de suelo cada 30' para luego tomar decisiones de riego cada 3 lecturas (1 hora). Esto con el fin de ahorrar energía en el módulo de dispositivo final.
- Para la toma de datos de humedad, el sensor es colocado bajo tierra a una profundidad de 6cm. Puede colocarse en puntos más profundos dependiendo del tipo de profundidad de raíz de la planta y evaluación del comportamiento de la humedad.
- La batería usada es de Litio-Ion de 3.7v de 2800mAH recargable.
- El sistema principal el cual contiene la etapa de control y comunicación y parte de la etapa de adquisición de datos tiene una dimensión de 6.5cm x 12.5cm. El sistema de monitoreo de humedad tiene una dimensión de 6.2cm x 6.7cm.

La implementación del sistema electrónico se realizará en 2 módulos los cuales contarán con diseño de placas independientes:

- **Módulo Principal:** Es aquel que integra las etapas de control, comunicación y parte de la etapa de adquisición de datos. Está formado por la tarjeta de desarrollo UFOX, RTC, sensor de flujo, electroválvula,

sensor de humedad ambiente, sensor de temperatura de suelo y demás componentes necesarios para el correcto funcionamiento de la placa. En la implementación de este módulo debemos también considerar las configuraciones necesarias para la plataforma IoT.

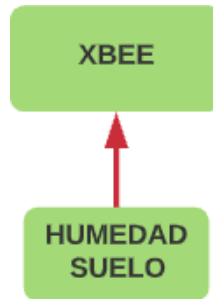


**Figura 49**

*Diagrama Módulo Principal*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

- **Módulo de Lectura de Humedad:** Es aquel que integra parte de la etapa de adquisición de datos. Está formado por un módulo Xbee en modo dispositivo final conectado al sensor de humedad de suelo y componentes necesarios para el correcto funcionamiento de la placa.



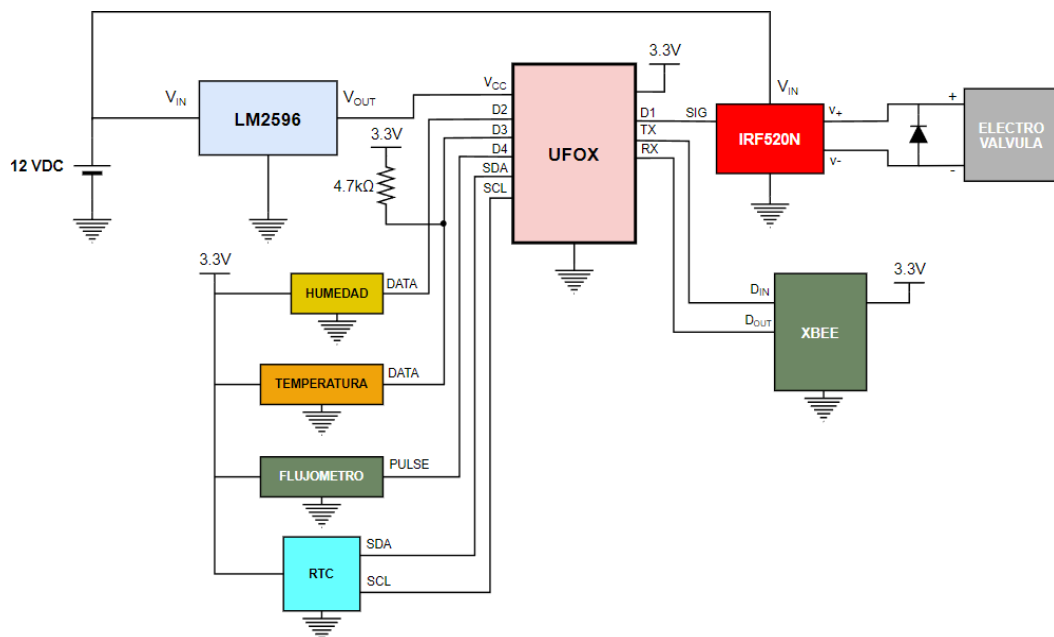
**Figura 50**

*Diagrama Módulo de Lectura de Humedad*

*Nota. Fuente Elaboración propia*

#### 4.6.2.2 Módulo Principal

El diagrama de conexión para el módulo principal es el siguiente:



**Figura 51**

*Diagrama de Conexión Módulo Principal*

*Nota. Fuente Elaboración propia*

Como se puede observar en el diagrama, todos los sensores, módulo Xbee y RTC son alimentados directamente por la fuente integrada de la placa UFOX a 3.3V, para esto aseguramos que el consumo de corriente no exceda los límites de la fuente.

**Tabla 5**

*Consumo en Módulo Principal*

Sensor	Consumo (mA)
Sensor de humedad ambiente DTH11	2
Sensor de temperatura suelo DS18B20	4
Sensor de flujo YF-S201	15
RTC DS3231	2
Xbee S2C	33
<b>Total</b>	<b>56</b>

*Nota.* Fuente Elaboración propia

Siendo que la fuente integrada puede soportar hasta 1A, no tendremos problemas. Así también debemos considerar que la fuente de 12VDC proporcione la corriente necesaria para todos los componentes, incluidos la placa UFOX y la electroválvula. Siendo que el consumo pico de la placa UFOX es de 200mA y el de la electroválvula es de 600mA, sumado al consumo de componentes, tenemos un total de 856mA.

Para adecuar la alimentación de la fuente de 12VDC a la placa UFOX, se utiliza el módulo LM2596 el cual funciona como un stepdown DC-DC. Este

módulo es un regulador de voltaje basado en switching, es decir recibe un voltaje en la entrada y utiliza un conmutador interno para reducir el voltaje en la salida. Si existe una variación en el voltaje de entrada, el módulo tiene la capacidad de mantener constante su salida.

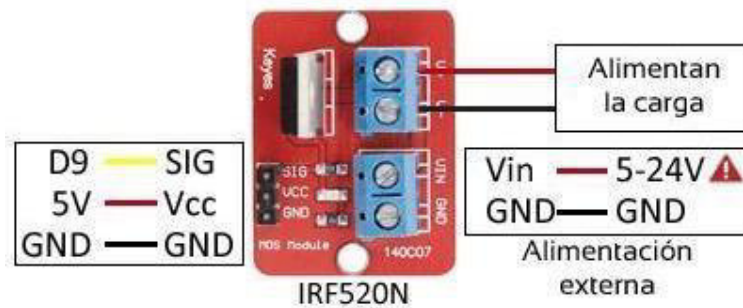


**Figura 52**

*Módulo LM2596*

*Nota.* Fuente Sparkfun, 2018

Debido a que la electroválvula funciona con 12VDC, es necesario el uso de un driver el cual permita que UFOX pueda encenderla. Para ello se utilizó el módulo Mosfet IRF520N, este driver, a diferencia de un relé, no cuenta con piezas mecánicas que puedan presentar desgaste a largo plazo, es por ello su elección. El gate del Mosfet va conectado a un pin digital del módulo UFOX con salida de 5VDC. Para la alimentación de la electroválvula se utiliza una fuente externa de 12VDC, esta misma fuente nos servirá para alimentar todo nuestro módulo principal.



**Figura 53**

*Módulo IRF520N*

*Nota.* Fuente Sparkfun, 2018

Para la correcta lectura de los sensores asociados a este módulo, debemos de verificar si requieren una calibración especial. El sensor de temperatura de suelo y humedad ambiente pueden ser fácilmente configurados usando las librerías que los fabricantes proporcionan. Para el caso del flujómetro, el fabricante proporciona datos para poder obtener el caudal y volumen de agua con las siguientes fórmulas:

$$f(\text{Hz}) = K \times Q(\text{L}/\text{min})$$

Donde  $K$  es el factor de conversión del flujómetro y varía dependiendo del diámetro de salida de agua. Debido a que nosotros obtendremos el dato de la frecuencia de pulsos en nuestro pin de interrupción, nos queda calcular el caudal:

$$Q\left(\frac{\text{L}}{\text{min}}\right) = f(\text{Hz})/K$$

Debido a que se van a trabajar pequeños intervalos de lectura de caudal para más precisión, se debe realizar una calibración para nuestro proyecto. La fórmula para obtener el volumen de agua es la siguiente:



$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

$$\Delta V = Q * \Delta t$$

$$V = V_o + Q * \Delta t$$

Donde  $\Delta t$  es la variación de tiempo en milisegundos de los intervalos de lectura del sensor de flujo. Siendo que el caudal obtenido es en minutos y los intervalos de riego que se usarán son cortos, se requiere mayor precisión en la cantidad de agua a aplicar, por ello se acortará los intervalos de lectura de los pulsos a 0.125 segundos, es decir, cada octavo de segundo se leerá el flujómetro con el fin de tener un feedback del volumen acumulado y así poder cerrar la válvula de ingreso de agua de manera oportuna. Si modificamos la ecuación del volumen de agua para obtenerla en mL, así como acortar la variación de tiempo en periodos de 0.125 segundos, obtenemos:

$$V = V_o + Q \left( \frac{mL}{s/8} \right) * \frac{1000}{60/8} * \frac{\Delta t}{125}$$

$$V = V_o + Q \left( \frac{mL}{s/8} \right) * \frac{1000}{60/8} * \frac{\Delta t}{125}$$

$$V = V_o + Q \left( \frac{mL}{s/8} \right) * \Delta t * 1.067$$

En pruebas de cálculo de volumen, se utilizó un recipiente de medición para el cálculo del factor de conversión para el caudal, dándonos un valor de  $K = 0.65$ .



**Figura 54**

*Calibración de Flujómetro para Riego*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

Las configuraciones para poder monitorear los datos enviados por el módulo principal son realizadas en el backend de Sigfox y la plataforma de Losant.

sigfox Lost password

Remember me for one week

## Figura 55

*Login Backend Sigfox*

*Nota. Fuente Sigfox 2021*

The screenshot shows the 'Device - List' page in the Sigfox backend. The page has a navigation menu on the left with 'DEVICES' and 'DELETED DEVICES'. The main content area has a search bar with fields for 'Id', 'State' (dropdown), and 'Last seen from date'/'Last seen to date'. Below the search bar is a table with columns: 'Communication status', 'Device type', 'Group', 'Id', 'Last seen', 'Name', and 'Token state'. The table shows one device: 'Ufox\_1' with group 'GBRAN', ID '4081D3', last seen '2021-06-16 21:28:29', name 'device-004081D3', and token state 'OK'. There are also buttons for 'New', 'New series', 'Edit series', 'Transfer series', 'Replace series', and 'Delete series' at the top right.

## Figura 56

*Administrador de Dispositivos Sigfox*

*Nota. Fuente Sigfox 2021*

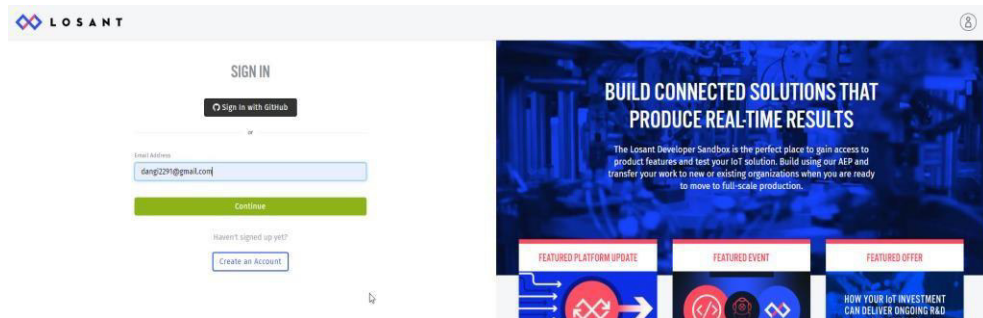
The screenshot shows the 'Device 4081D3 - Messages' page in the Sigfox backend. The page has a navigation menu on the left with 'INFORMATION', 'LOCATION', 'MESSAGES', 'EVENTS', 'STATISTICS', and 'EVENT CONFIGURATION'. The main content area has a search bar with 'From date' and 'To date' fields. Below the search bar is a table with columns: 'Time', 'Seq Num', 'Data / Decoding', 'LQI', 'Callbacks', and 'Location'. The table shows several messages for device 4081D3, including their sequence numbers, data, LQI values, and locations. There are also buttons for 'RESET', 'FILTER', and 'ID' at the top right.

Time	Seq Num	Data / Decoding	LQI	Callbacks	Location
2021-03-24 01:40:55	1894	00000000018194080030000	100	OK	GBRAN
2021-03-24 01:35:06	1892	0123	100	OK	GBRAN
2021-03-24 01:30:01	1890	0123	100	OK	GBRAN
2021-03-24 01:27:28	1888	0123	100	OK	GBRAN
2021-03-24 01:23:11	1887	000000000181940800370000	100	OK	GBRAN
2021-03-24 01:14:16	1885	0123	100	OK	GBRAN
2021-03-24 01:12:17	1883	0123	100	OK	GBRAN
2021-03-24 01:11:23	1881	0123	100	OK	GBRAN

## Figura 57

*Registro de Mensajes en el Backend*

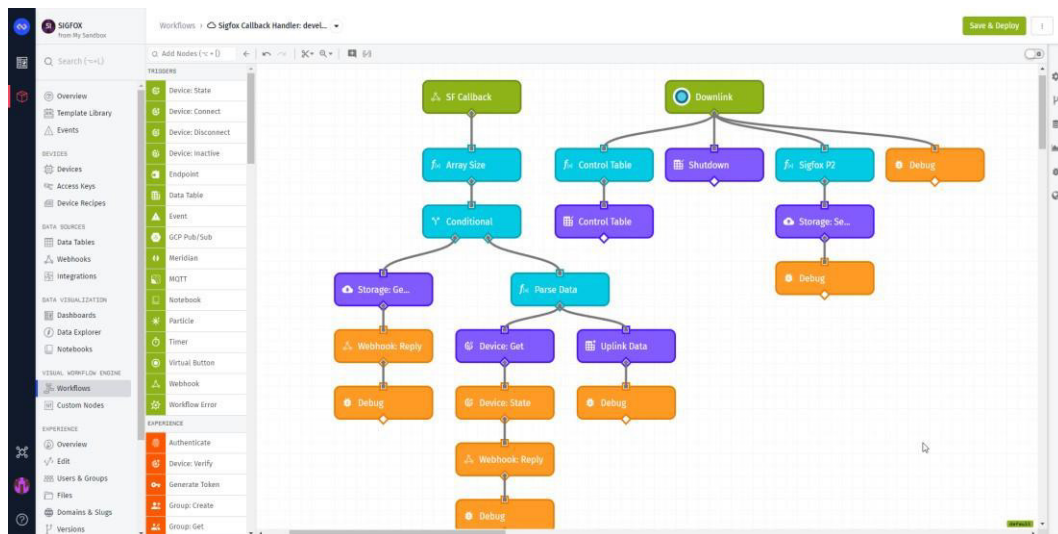
*Nota. Fuente Sigfox 2021*



**Figura 58**

*Login Plataforma Losant*

*Nota. Fuente Losant 2021*



**Figura 59**

*Programación de Workflow Losant*

*Nota. Fuente Elaboración propia*



**Figura 60**

*Dashboard IoT en Losant para Monitoreo del Riego*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

La comunicación del módulo principal es directamente con el backend de Sigfox, el cual mediante el modelo de arquitectura RESTful mediante métodos HTTP recibe o envía los datos a la plataforma de Losant para poder decodificar la data y presentarla al usuario. Dentro de la plataforma podemos visualizar las variables de humedad de suelo, humedad ambiente, temperatura de suelo, cantidad de riego y volumen total acumulado de agua. Dentro del dashboard también tenemos la opción de setear el SP de humedad, así como el rango horario de funcionamiento del control. Para nuestras pruebas mantuvimos el mismo setpoint y un horario extendido para que el control actúe en cualquier momento del día.



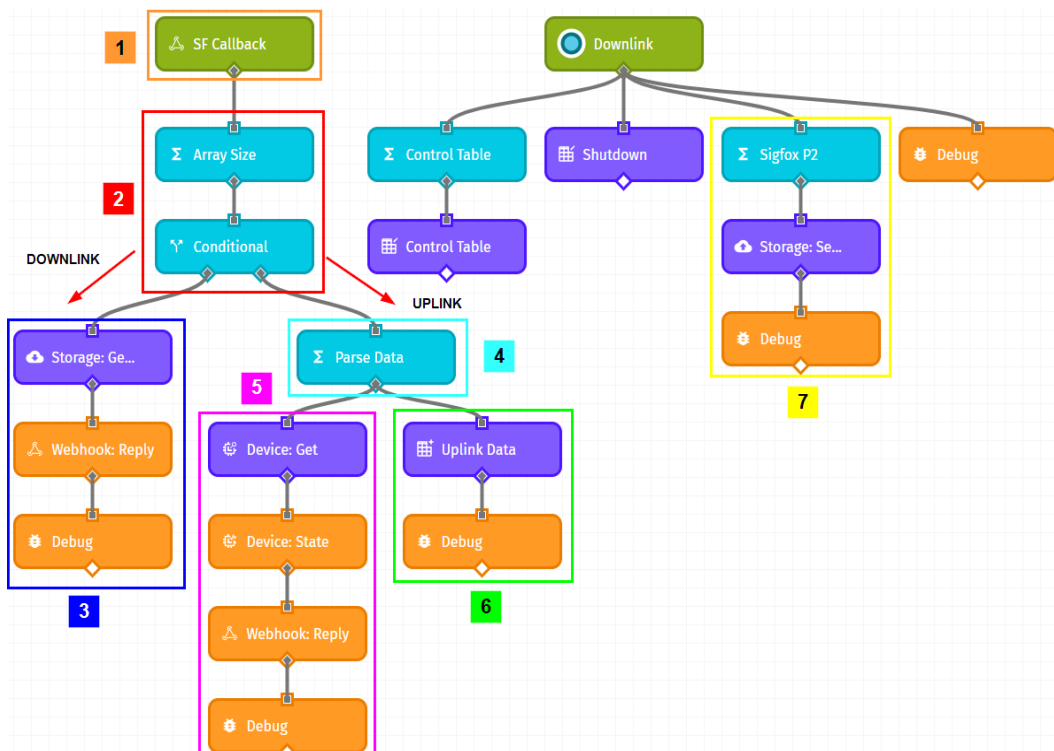
The image shows a control panel for irrigation scheduling and humidity setpoint. It features four dropdown menus for scheduling: 'Inicio Riego (Hora)' set to 06, 'Inicio Riego (minuto)' set to 00, 'Término Riego (Hora)' set to 23, and 'Término Riego (minuto)' set to 00. Below these is a slider for 'Humedad Campo (%)' ranging from 25 to 100, with a white knob positioned at approximately 40%. At the bottom, there are two large buttons: a green one labeled 'Enviar' and a red one labeled 'Apagar Sistema'.

### Figura 61

*Panel de Control de Setpoint de Humedad y Horario de Riego*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

Para decodificar la data enviada del backend, se implementó en la plataforma Losant un workflow el cual nos permita clasificar tanto las peticiones de Uplink como las de Downlink.

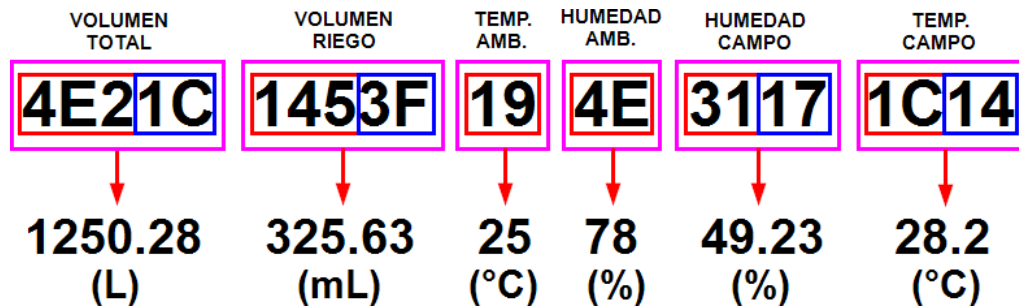


**Figura 62**

*Workflow Losant para Manejo de Datos*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

La información del backend llega a través del bloque Callback N°1 el cual es analizado en la sección N°2 para determinar si corresponde a una petición de Downlink o Uplink. El mensaje es identificado por el tamaño del payload. En el caso de Uplink el payload tiene un máximo de 12 bytes. Nuestro mensaje uplink contiene un array de valores hexadecimales cargado con los datos. La forma del array hexadecimal es el siguiente:



**Figura 63**

*Formato Array Uplink Sigfox para el Sistema*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

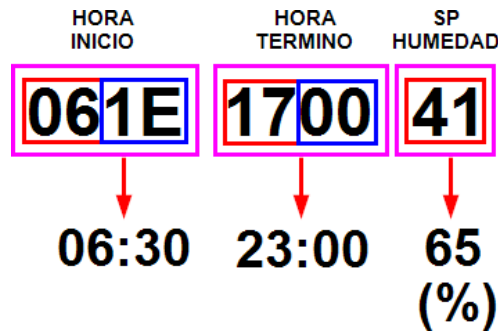
Cada valor hexadecimal ocupa 4 bits de información. Siendo que tenemos disponibles 12 bytes, tenemos 96 bits de datos los cuales se pueden usar hasta en 24 valores hexadecimales. Para nuestro caso se utilizaron solo 22 valores para contener nuestra información. Como se ve en el formato usado, utilizamos valores decimales para el volumen de riego acumulado, el riego aplicado y la humedad campo. La cantidad de bits dedicados a cada variable se realizó en base al comportamiento de mínimos y máximos que puede alcanzar.

Este array es descompuesto con ayuda del bloque N°4 *Parse Data*, para luego actualizar los valores en nuestro dashboard y enviar una confirmación al backend de Sigfox con el bloque N°5. El bloque N°6 nos sirve para guardar los datos recibidos del Uplink para poderlos procesar luego.

Cuando el dispositivo envía un payload simple "123", informa que lo que requiere es un mensaje Downlink, es decir, está a la espera que el backend de Sigfox envíe un mensaje de retorno al equipo. Los Downlink son enviados únicamente a petición del dispositivo final.

A diferencia de un mensaje Uplink, un mensaje Downlink únicamente puede contener 8 bytes de información, si lo agrupamos en hexadecimales, tenemos hasta 16 valores para enviar nuestra información. La forma del array hexadecimal es el siguiente:





**Figura 64**

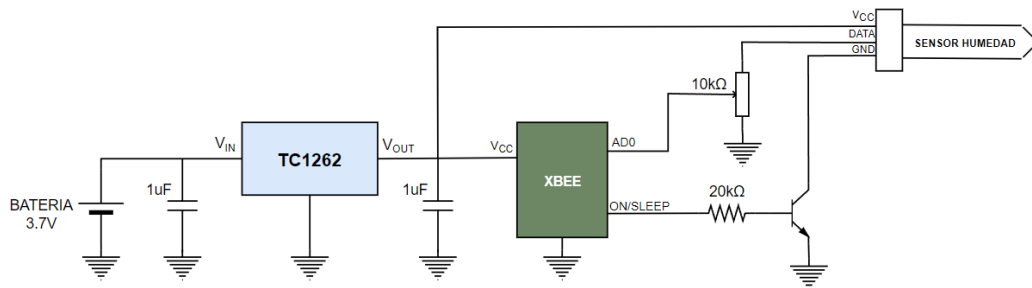
*Formato Array Downlink Sigfox para el Sistema*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

Para nuestro proyecto únicamente utilizamos 10 valores hexadecimales para el envío de la hora de inicio de riego, hora de término de riego y el setpoint de humedad. Los valores configurados en nuestro panel de control son codificados a hexadecimal y guardados para ser enviados al dispositivo una vez lo solicite. Esta función es hecha por el bloque N°7 en nuestro workflow. Cuando se envía la solicitud de Downlink, Losant obtiene el array hexadecimal guardado con los datos y es enviado al backend de Sigfox, el cual lo reenvía al módulo principal. Esta función es hecha por el bloque N°3 del workflow.

#### **4.6.2.3 Módulo de Lectura de Humedad**

El módulo de lectura de humedad está compuesto por un Xbee S2C, sensor de humedad capacitivo, batería de Litio-Ion de 3.7V y los componentes necesarios para adecuar la energía.



**Figura 65**

*Diagrama de Conexión Módulo Lectura de Humedad*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

Debido a que se propone que todo el módulo sea autónomo en el consumo de energía, debemos hacer un correcto cálculo de consumos del Xbee, sensor y pérdidas, para así asegurar que el módulo funcione por un periodo largo. En base a las especificaciones técnicas de los componentes, tenemos los siguientes consumos:

- Xbee: 28mA (28dBm)
- Sensor de humedad: 7mA
- Regulador de Voltaje 80µA (Sin carga)

Para poder obtener la menor cantidad de consumo de energía por parte del módulo Xbee, se deshabilitaron los puertos que no se están usando conforme las recomendaciones para bajo consumo en la guía del equipo, así también se utilizó un transistor a manera de switch para conectar y desconectar la alimentación del sensor, de esta manera solo mantenerlo energizado para la lectura de humedad cuando el Xbee se encuentra activo. El pin ON/SLEEP se encuentra en HIGH cuando el Xbee está activo y en LOW cuando entra en hibernación.

El regulador de voltaje TC1262 está orientado a aplicaciones que usan baterías ya que el dropout o diferencia de voltaje entre la entrada y salida del regulador es bastante pequeño. Esto nos ayuda a poder alimentar nuestro módulo Xbee y el sensor de humedad con el voltaje de salida de 3.3v. La corriente

máxima que puede suministrar el TC1262 es de 500mA el cual es más que suficiente para el funcionamiento del Xbee y del sensor. Siempre que el consumo de corriente de la carga sea menor a 100mA, podemos tener un dropout típico de 60mV en el TC1262, es decir, podemos utilizar la batería hasta que esta se encuentre a un mínimo de 3.36V. Por recomendación del fabricante se debe utilizar como mínimo capacitores de tantalio de 1uF en la entrada y salida del regulador cuando se use una batería como fuente de alimentación.

En base a la guía de implementación de Xbee para la reducción de consumo de corriente, se recomienda poder mantener la entrada analógica en un estado fijo siempre que el Xbee se encuentre en modo sleep, así también si queremos que nuestra batería funcione por un periodo largo, debemos evitar que el sensor esté consumiendo energía mientras no se tome lectura. Es por ello que utilizaremos un transistor 2N3904, para poder hacerlo funcionar en corte y saturación.

En base a datasheet del 2N3904, el voltaje de saturación  $V_{BE(Sat)}$  es de 0.65V como mínimo, consideraremos para el cálculo 0.7V. En estado de saturación del transistor, debemos asegurar una corriente mínima de 7mA para el funcionamiento del sensor de humedad, por ello manejaremos un margen de corriente  $I_C$  de 10mA. Para este valor de corriente de colector podemos ver en el documento del transistor que la ganancia  $h_{fe}$  o también simbolizado como  $\beta$  es igual a 100. Sabemos que en base a nuestra configuración de emisor común:

$$I_B \cong \frac{I_{C_{SAT}}}{\beta}$$

Sabemos que  $I_{C_{SAT}}$  es de 10mA y  $\beta$  es igual a 100, entonces:

$$I_B \cong \frac{10}{100} mA = 0.1 mA$$

Para hacer el cálculo de la resistencia de base del transistor utilizaremos la siguiente ecuación:

$$I_B = \frac{V_i - 0.7}{R_B}$$

De acuerdo al datasheet del Xbee, el voltaje de salida de su puerto digital es  $0.82 \times V_{cc}$  como mínimo. Ya que alimentamos al Xbee con 3.3V, tendríamos como mínimo 2.7V en la salida, es decir  $0.82 \times 3.3$ . Utilizando la ecuación anterior podemos calcular el valor mínimo de  $R_B$ :

$$R_B = \frac{V_i - 0.7}{I_B} = (2.7 - 0.7) \times 10^4 = 20k\Omega$$

Si consideramos que el voltaje de salida del puerto digital es lo más cercano a 3.3V, entonces tenemos que:

$$R_B = \frac{V_i - 0.7}{I_B} = (3.3 - 0.7) \times 10^4 = 26k\Omega$$

Usaremos el valor de  $20k\Omega$  ya que, si el valor de salida del puerto digital es 3.3V obtendríamos la siguiente de corriente de colector:

$$I_{C_{SAT}} = I_B \beta = \frac{3.3 - 0.7}{20k\Omega} V \times 100 = 13mA$$

El cual igual nos asegura el funcionamiento del sensor y no es un valor excesivo.

Podemos conectar al Xbee un sensor analógico siempre que respetemos los límites de voltaje del equipo (1200mV), es por ello que se utiliza un potenciómetro a manera de divisor de tensión para reducir el voltaje de entrada al puerto ADC AD0 del Xbee. Se utilizó el potenciómetro para poder escoger a gusto del usuario el máximo y mínimo que se requiera para la lectura. Para este caso lo configuramos para obtener lecturas máximas a los 1000mV. El máximo valor obtenido por el sensor es en la ausencia de humedad (0% humedad). El Xbee trabaja con una resolución de 10 bits, así nos entrega una lectura de:

$$AD_{mV} = \frac{(AD \text{ lectura} * 1200mV)}{1023} \rightarrow 1000mV = AD \text{ Lectura} * \frac{1200mV}{1023}$$

$$AD \text{ Lectura} = 853$$

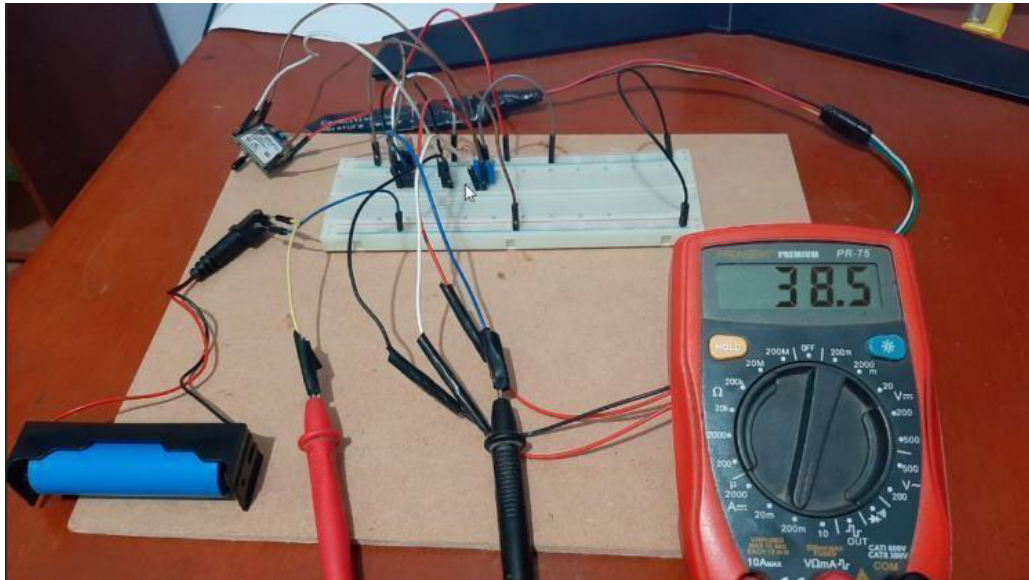
El mínimo valor obtenido por el sensor es cuando se encuentra completamente sumergido en agua (100% humedad), El valor obtenido en la prueba a nivel de voltaje fue de 452 mV, utilizando la misma ecuación obtenemos:

$$452mV = AD \text{ Lectura} * \frac{1200mV}{1023}$$

$$AD \text{ Lectura} = 385$$

Estos datos son igualmente corroborados en el test de recepción. Los valores los utilizaremos en nuestra configuración del mapeo del 0% y 100% de humedad.

Una vez hemos realizado la configuración correcta calcularemos el consumo promedio de energía de la batería en base a los tiempos de encendido y apagado del módulo. Se midió el consumo de corriente mientras el Xbee está activo y el sensor encendido. El tiempo que se mantiene encendido es de 1 segundo. La lectura de corriente se toma en la entrada del regulador de voltaje y se obtuvo un total de 38.5mA.



**Figura 66**

*Lectura Xbee en Modo Activo*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

Cuando el Xbee vuelve a dormir, se obtiene una lectura de  $108\mu A$  o  $0.1mA$ . El tiempo el cual permanece el sistema dormido es de 29 minutos y 58 segundos, o 1798 segundos.



**Figura 67**

*Lectura Xbee Modo Bajo Consumo*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

Usaremos la siguiente ecuación para determinar el consumo promedio de corriente:

$$I_{AVG} = (T_{ON} * I_{ON} + T_{SLEEP} * I_{SLEEP}) / (T_{ON} + T_{SLEEP})$$

Donde:

$I_{AVG}$ : corriente promedio de consumo.

$I_{ON}$ : corriente consumida con los equipos activos

$I_{SLEEP}$ : corriente consumida con los equipos en sleep.

$T_{ON}$ : tiempo de los equipos encendidos.

$T_{SLEEP}$ : tiempo de los equipos apagados.

Reemplazando los datos tenemos:

$$I_{AVG} = (2.5s * 38mA + 1797.5s * 0.1mA) / (1800s)$$

$$(95mA + 179.75mA) / (1800)$$

$$I_{AVG} = 0.1526mA$$

Siendo que todo el sistema se alimenta con 3.3V, tenemos que la potencia consumida es:

$$3.3V * 0.1526mA = 0.5 mW$$

La batería proporciona 3.7V y 2800mAh, con esto podemos saber la potencia suministrada en horas:

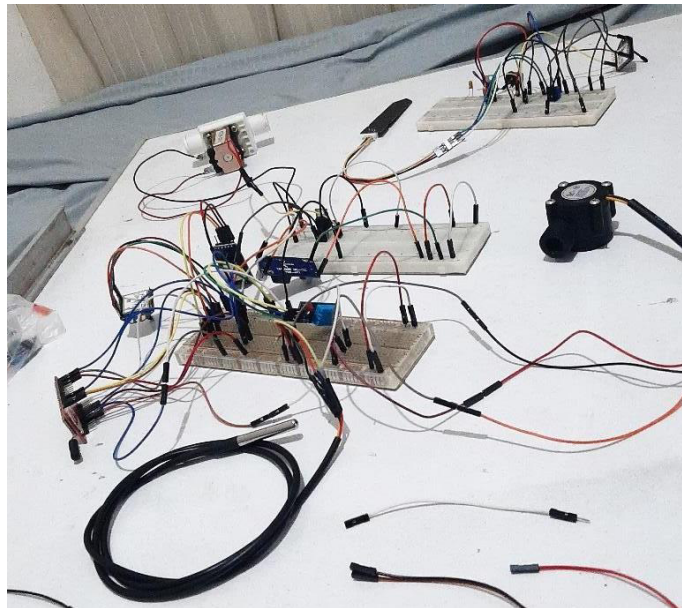
$$3.7V * 2800mAh = 10360 mWh$$

Con este cálculo podemos determinar el tiempo el cual nuestro módulo puede funcionar:

$$T_{ACTIVO} = \frac{10360 \text{ mWh}}{0.5 \text{ mW}} \approx 20720 \text{ horas} \approx 863 \text{ dias}$$

Esta capacidad del sistema dependerá que la batería mantenga un voltaje mínimo para que el regulador aún nos brinde 3.3V, ya que el dropout típico es de 60mV, la batería puede bajar hasta 3.36V como mínimo.

Con todas las configuraciones realizadas en el módulo principal y el módulo de lectura de humedad de nuestro sistema electrónico, realizamos pruebas en el protoboard antes de la fabricación en PCB.



**Figura 68**

*Test entre Módulo Principal y Módulo de Lectura de Humedad*

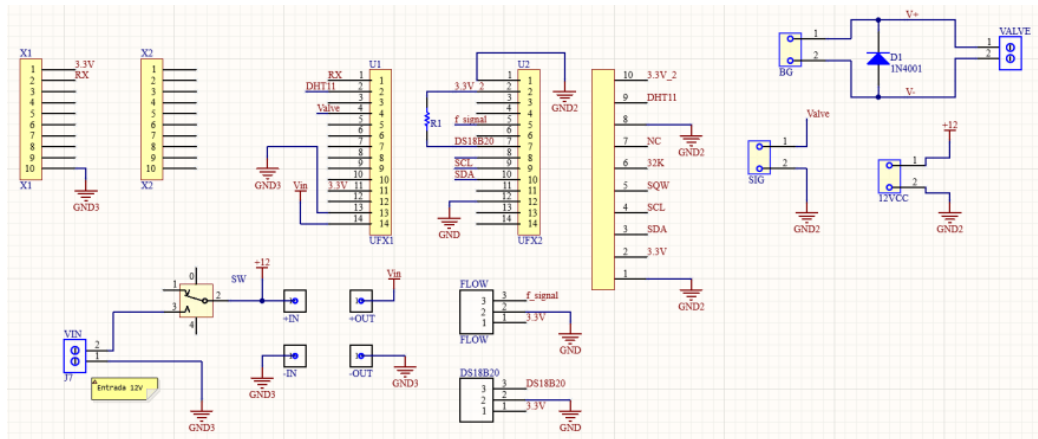
*Nota.* Fuente Elaboración propia

#### **4.6.2.4 Diseño y Fabricación de PCB**

Con los cálculos y los test realizados, se procede a la esquematización para la fabricación de las placas. Para el diseño se utilizó el programa de Circuit Maker.

El primero diseño mostrado pertenece al módulo principal:

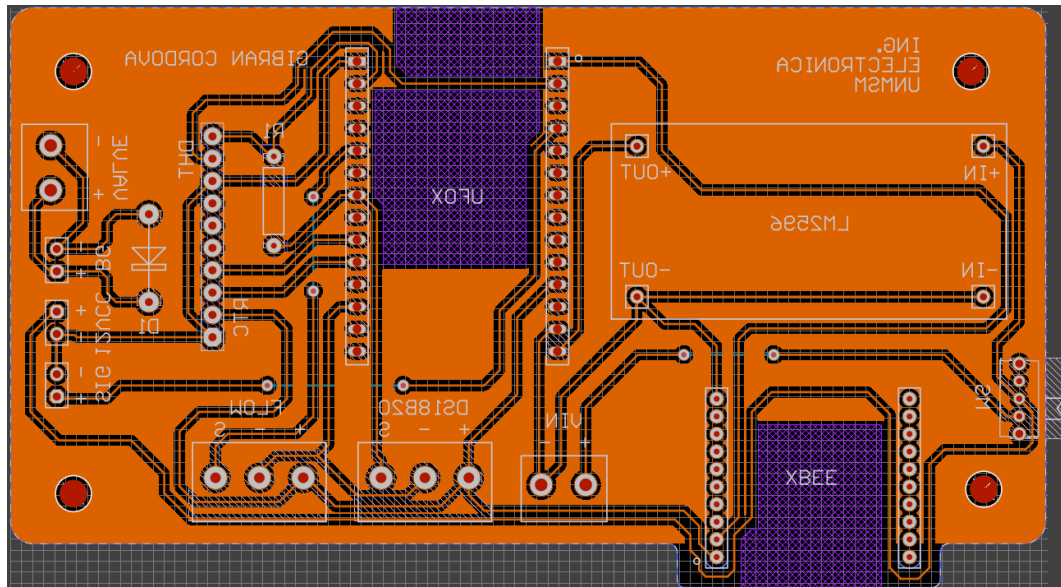




**Figura 69**

*Esquemático de Módulo Principal en Circuit Maker*

*Nota. Fuente Elaboración propia*

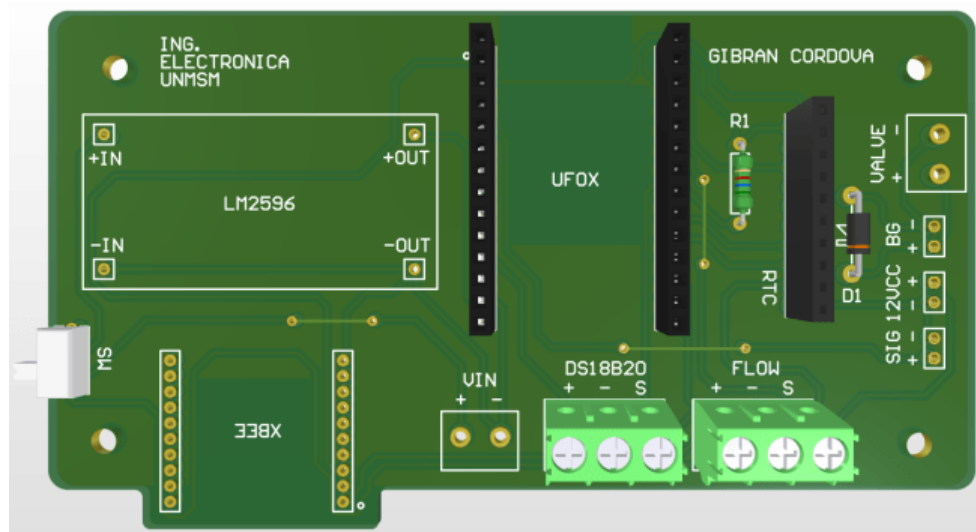


**Figura 70**

*Diagrama PCB Módulo Principal en Circuit Maker*

*Nota. Fuente Elaboración propia*

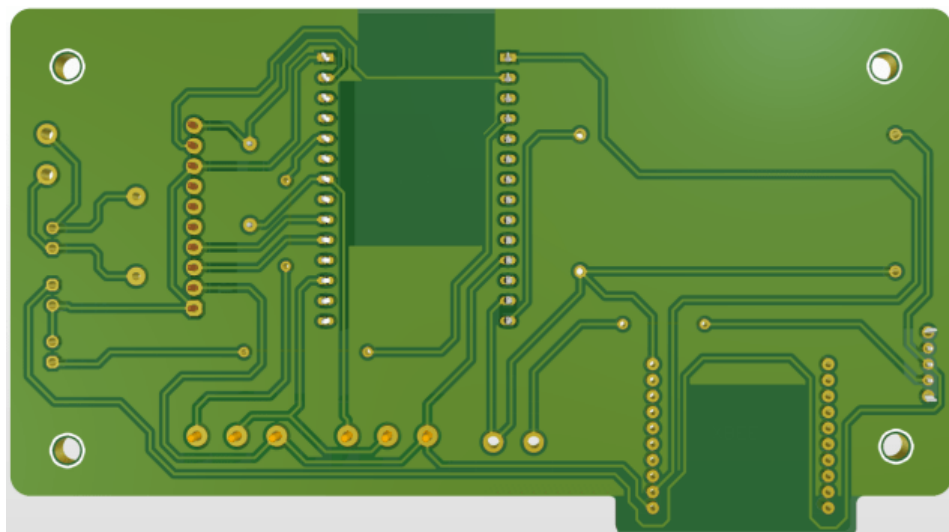
Tanto para el Módulo Xbee como para la placa UFOX se tomó en cuenta mantener áreas libres de cobre para evitar problemas en la recepción y transmisión de datos inalámbricos. El área mínima libre de cobre está determinada por el fabricante.



**Figura 71**

*Vista Frontal 3D PCB Módulo Principal*

*Nota. Fuente Elaboración propia*



### Figura 72

*Vista Trasera 3D PCB Módulo Principal*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

Se dispuso de pines de conexión para el módulo de energía, así como para el módulo IRF520N. La alimentación de la placa y la conexión de sensores es a través de terminales de ajuste con tornillos.

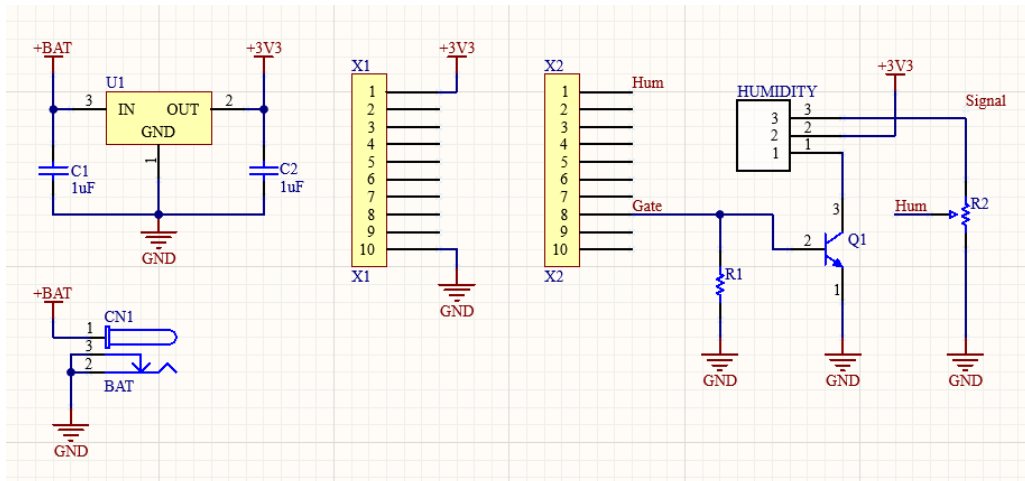


### Figura 73

*Placa Física de Módulo Principal*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

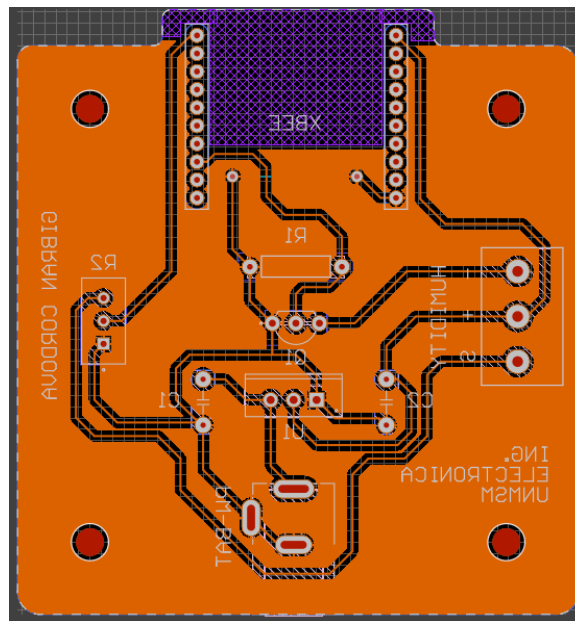
El segundo diseño mostrado pertenece al módulo de lectura de humedad:



**Figura 74**

*Esquemático de Módulo Lectura de Humedad en Circuit Maker*

*Nota. Fuente Elaboración propia*

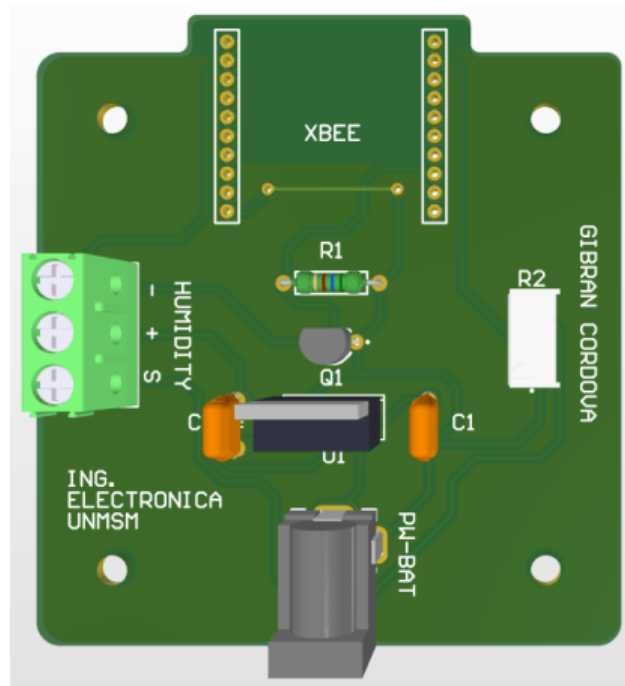


**Figura 75**

*Diagrama PCB Módulo Lectura de Humedad en Circuit Maker*

*Nota. Fuente Elaboración propia*

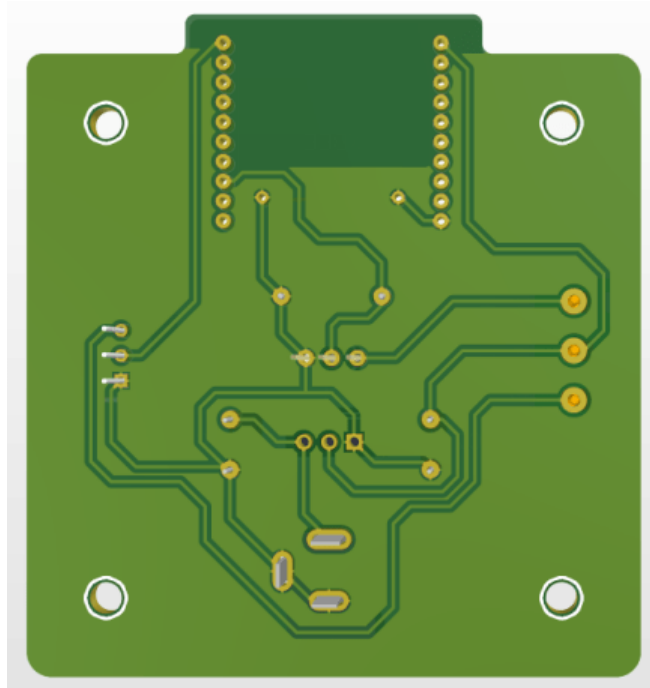
De la misma manera que el módulo principal, se mantuvo un área libre de cobre para el Xbee, también se colocó lo más cercano al borde de la placa.



**Figura 76**

*Vista Frontal 3D PCB Módulo Lectura de Humedad*

*Nota. Fuente Elaboración propia*



**Figura 77**

*Vista Trasera 3D PCB Módulo Lectura de Humedad*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

La conexión del sensor de humedad se realiza en la bornera de tornillos. La conexión de la batería se realiza en el plug de alimentación, se realiza de esta manera para tener la facilidad de adaptar cualquier dimensión de batería a la placa.



**Figura 78**

*Placa Física Módulo Lectura de Humedad*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

### **4.6.3 Experimentación**

Una vez ya contamos con el hardware necesario para poder realizar el montaje de nuestro sistema electrónico, pasemos a detallar la experimentación realizada. Para el proceso de riego debe considerarse los siguientes factores acerca de la variable “humedad de suelo”:

- Es una variable lenta, por lo que cualquier aplicación de riego tardará en estabilizarse.
- Es una variable sujeta a efectos medio ambientales por lo que debe ser monitoreada durante su evolución.
- La cantidad de riego para conseguir la humedad deseada está sujeta al área de aplicación del riego y la técnica que se use para el riego.
- La humedad necesaria para la planta varía de acuerdo con el tipo de cultivo y su etapa de crecimiento. En este proyecto se pretende únicamente establecer un valor de humedad de prueba para comprobar que el sistema la puede mantener a través del tiempo lo mejor posible.

- El modelado matemático del proceso a controlar puede ser complejo debido a las variables implicadas, siendo estas el tipo de suelo, clima, acción del agua sobre el tipo de suelo, etc., es por ello que optamos por el modelado mediante experimentación, es decir, someter al proceso que queremos controlar a una entrada escalón de magnitud fija (volumen de agua) y ver la respuesta en su salida (humedad de suelo).

#### **4.6.3.1 Determinando Capacidad de Campo (CC)**

El primer paso para determinar la relación riego – humedad de suelo es determinar la capacidad de campo de nuestro suelo. Dependiendo del tipo de suelo se tiene una capacidad de campo (CC) distinta la cual determina cuánta agua puede retener el suelo sin saturarse. Cuando un suelo se encuentra en saturación, los poros no pueden retener más agua por lo que, por efecto de la gravedad, el exceso comenzará a discurrir al subsuelo. Durante la etapa de saturación no existe mucha cantidad de aire en los poros del suelo, por lo que la planta tiene una deficiencia de oxígeno, es por ello que no debemos llegar a ese estado al momento del riego.

Una prueba práctica para determinar la CC es usar el método gravimétrico. Lo primero es tomar una muestra de suelo, secarlo y pesarlo, luego del pesaje procedemos a mojar el suelo con agua de tal manera que nos permita llevar nuestra muestra a saturación. Una vez saturado se determina un plazo de 120 horas para desaturar nuestro suelo. Con este tiempo aseguramos que toda el agua que no puede contener nuestro suelo haya salido por completo. Luego de este periodo volvemos a pesar el suelo húmedo. La siguiente formula define la CC.

$$CC(\%) = \frac{PSH - PS}{PSS} \times 100$$

Donde:

PSH = Peso suelo húmedo

PSS = Peso suelo seco



El resultado nos permitirá dimensionar la cantidad de agua máxima que un determinado volumen de suelo puede soportar antes de que llegue a saturación.

La humedad aprovechable (HA) para la planta se encuentra entre la CC y el punto de marchitez permanente (PMP) el cual es cuando la planta ya no puede extraer la humedad de suelo porque es retenida con mayor tensión por los poros (suelo casi seco).

$$CC > HA > PMP$$

Una vez explicado el proceso, usaremos un vaso con tierra, lo secaremos y lo pesaremos antes de aplicarle agua.

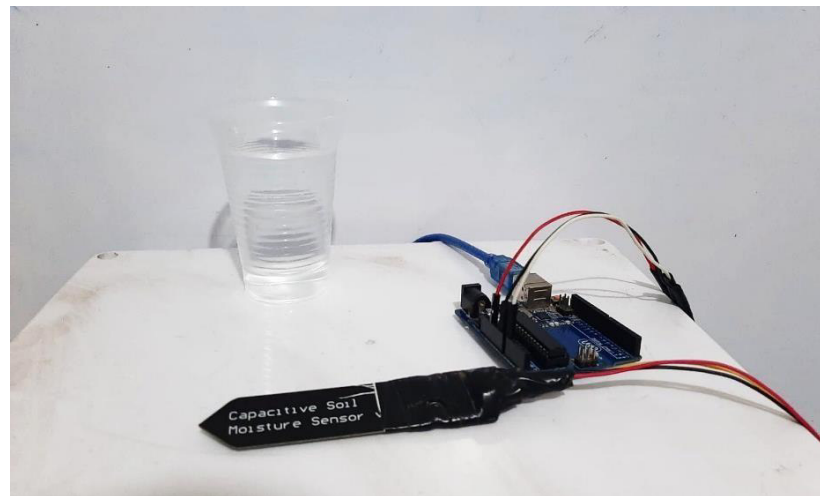


**Figura 79**

*Pesado de Muestra con Tierra Seca*

*Nota.* Fuente: Elaboración propia

El vaso de tierra tiene un peso de 145 gramos. También usaremos nuestro sensor de humedad para determinar cuál es la humedad de la tierra. Inicialmente usaremos una placa de Arduino para calibrar nuestro sensor antes de conectarlo al módulo de lectura de humedad. Utilizaremos los valores en seco (aire) y totalmente húmedo (en agua) que obtenemos en el puerto analógico del Arduino. El valor inicial obtenido en aire fue de 574. El valor del sensor sumergido en el agua fue de 310. Con estos valores, utilizamos la función *map* de y escalamos las lecturas entre 0 y 100%. Para poder comparar esta calibración con valores reales de humedad, utilizaremos la muestra de tierra y así obtener los datos de manera manual en base a la capacidad de campo.

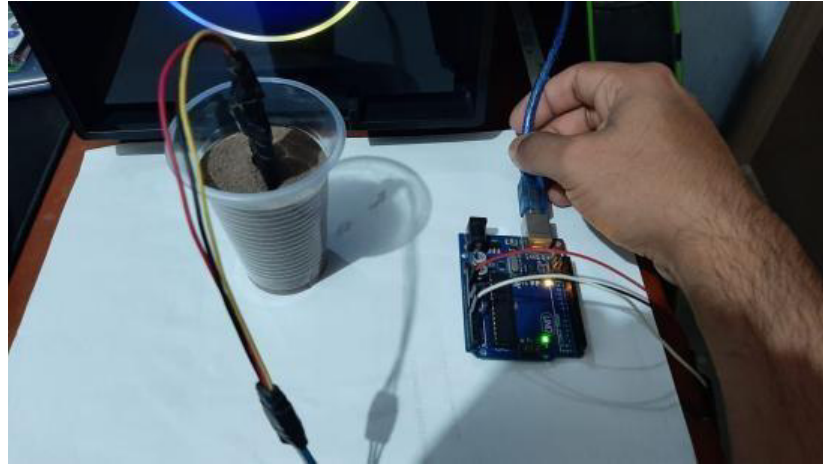


**Figura 80**

*Calibración del Sensor de Humedad*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

La humedad inicial medida en nuestra muestra de tierra fue de 45%.



**Figura 81**

*Toma de Dato de Humedad de la Muestra*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

Una vez pesado y sensado, procederemos a aplicar agua con el objetivo que nuestra tierra llegue a saturación. El vaso de la muestra tiene un orificio en la parte inferior para el desfogue del agua excedente.

**Figura 82**

*Muestra de Tierra Saturada*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

Esperaremos 120 horas para que el agua excedente se filtre del recipiente y hacer el nuevo pesaje. Pasado este tiempo, el agua que se mantiene viene a ser la capacidad máxima del suelo puede mantenerla en sus poros. Esto es la capacidad de campo (CC) del suelo.

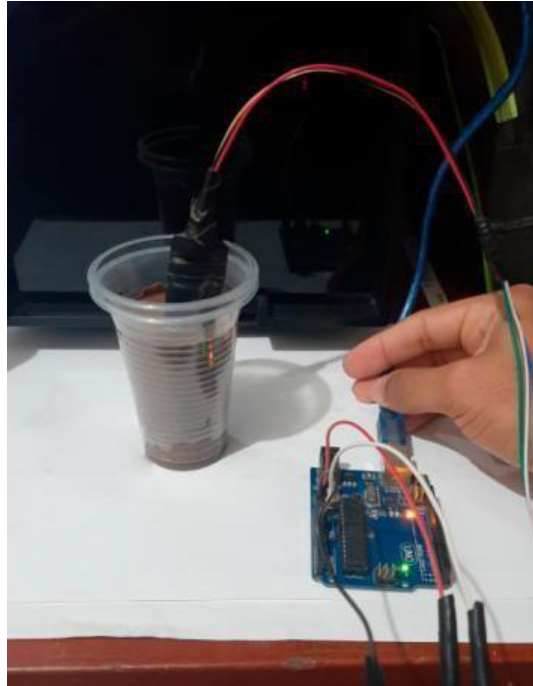


**Figura 83**

*Pesado de Muestra de Tierra Húmeda*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

Procedemos a pesar la tierra, dándonos un valor de 185g.



**Figura 84**

*Toma de Dato de Tierra Húmeda*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

Entonces con los datos obtenidos calculamos la capacidad de campo:

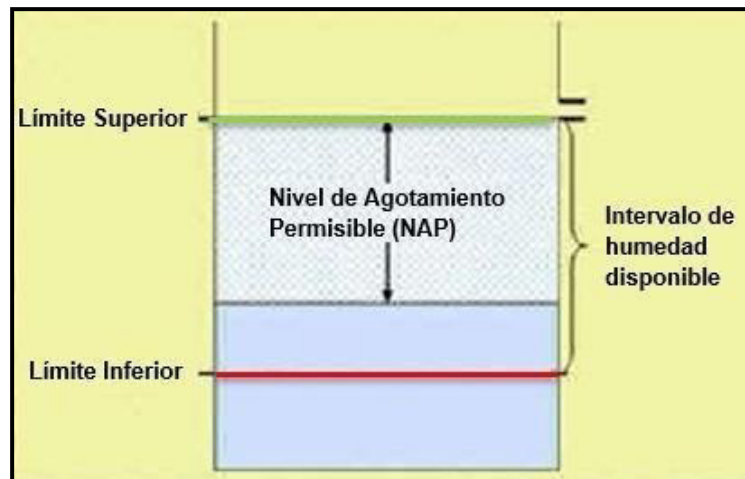
$$CC(\%) = \frac{185g - 145g}{145g} \times 100 = 27.58\%$$

$$Humedad\ Total = 45\% + 27.58\% = 72.58\%$$

Con esta prueba podemos escalar la cantidad de agua que nuestra tierra puede soportar sin llegar a saturación. El valor de humedad total nos ayuda a poder determinar si el valor obtenido con nuestro sensor se aproxima a la realidad. La lectura obtenida por el sensor fue de 74%, encontrándose dentro del valor de error dado por el fabricante.

Gracias a las lecturas de nuestro sensor de humedad, podemos determinar la humedad de suelo en el rango óptimo de aprovechamiento para la

planta. Según las teorías de cultivo tecnificado, podemos establecer un nivel de agotamiento permisible en base a la importancia del tipo de cultivo. Los valores más utilizados están entre 0.6 y 0.8.



**Figura 85**

*Nivel de Agotamiento Permisible*

*Nota.* Fuente Agrocultivo Perú, 2016

Consideraremos nuestro valor de humedad de suelo seco como el límite inferior y el valor de humedad a capacidad de campo como límite superior, de esta manera podemos establecer nuestros valores de NAP con 0.6, teniendo lo siguiente:

$$0.4 \times 27.58\% < HA < 27.58\%$$

$$11.03\% < HA < 27.58\%$$

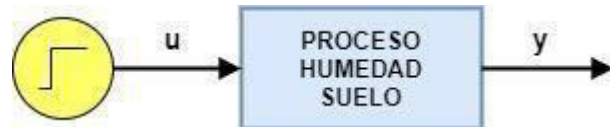
Donde *HA* viene a ser la humedad aprovechable. Siendo que el valor de humedad inicial fue de 45%, entonces tenemos el siguiente rango:

$$56.03\% < HA < 72.58\%$$

Siempre que nuestra humedad se mantenga en este rango, tendremos un valor óptimo de agua que la planta pueda utilizar.

#### **4.6.3.2 Obteniendo el modelo del proceso a controlar**

Como se explicó al inicio, realizaremos una prueba con una entrada tipo escalón para verificar el comportamiento del proceso humedad de suelo. Para nuestro control, la entrada escalón  $u$  viene a ser un volumen de agua específico el cual se aplicará al proceso Humedad Suelo, con esto observaremos el comportamiento de la salida  $y$  la cual es la humedad de suelo. Esta primera prueba puede verse como un sistema de lazo abierto en donde nuestra planta o proceso no es identificada, y gracias al test que haremos sabremos cuál es la función de transferencia del proceso.

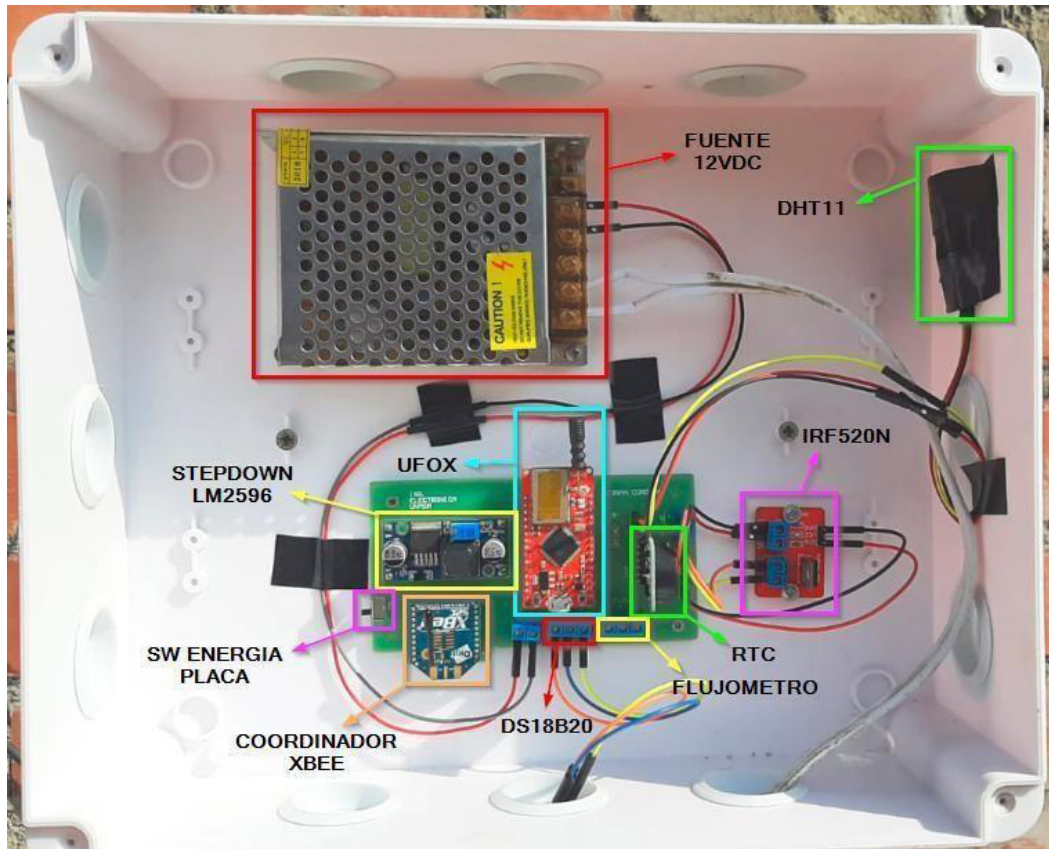


**Figura 86**

*Diagrama Entrada Escalón al Proceso Humedad de Suelo*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

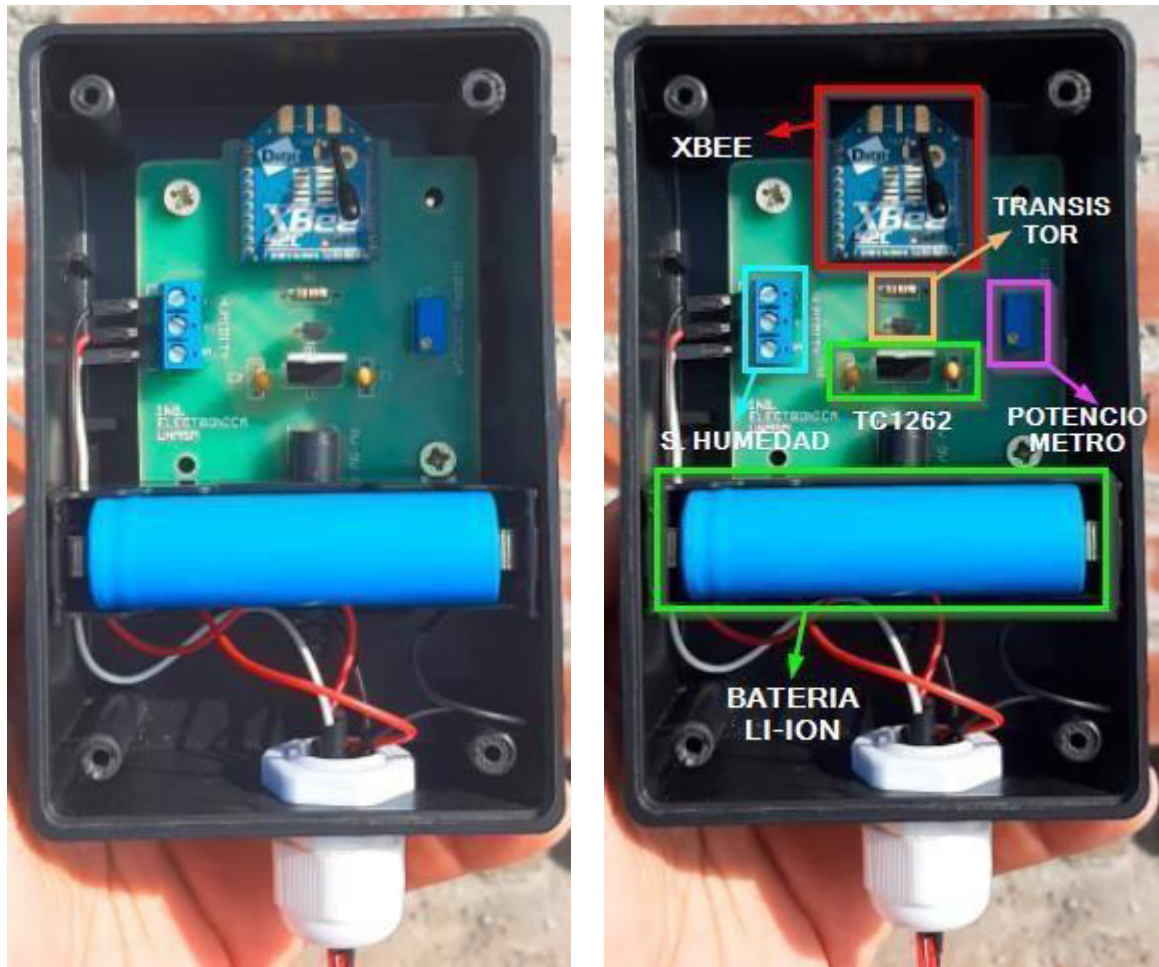




**Figura 87**

*Montaje de Módulo Principal en Tablero*

*Nota. Fuente Elaboración propia*



**Figura 88**

*Montaje de Módulo de Lectura de Humedad en Caja.*

*Nota. Fuente Elaboración propia*



**Figura 89**

*Montaje de Módulo de Lectura de Humedad en Suelo*

*Nota.* Fuente Elaboración propia



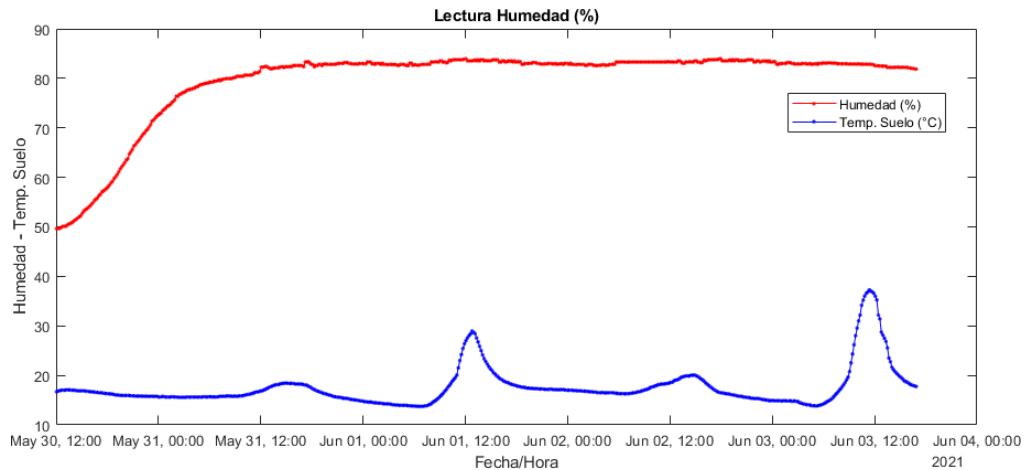
**Figura 90**

*Montaje Módulo Principal en Suelo*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

Para nuestra prueba de escalón montamos ambos módulos de nuestro sistema electrónico en el huerto. Para saber cuánta será la variación de humedad de suelo, primero debemos obtener una estabilidad de lectura del sensor, es decir saber cuál es la humedad inicial, ya que esta será nuestro punto de partida. En las pruebas se obtuvo unas lecturas estables entre los 49.5% a 50% de humedad inicial. Para este experimento se utilizó 400mL de agua aplicados de manera manual. Esta cantidad de agua es la que actuará a manera de entrada escalón en nuestro sistema. El riego fue realizado a las 12:00:00 p.m. del 30 de mayo de

2021. El dato de humedad fue leído cada 640 segundos durante todo el periodo de la prueba.



**Figura 91**

*Gráfico de Humedad de Suelo y Temperatura de Suelo*

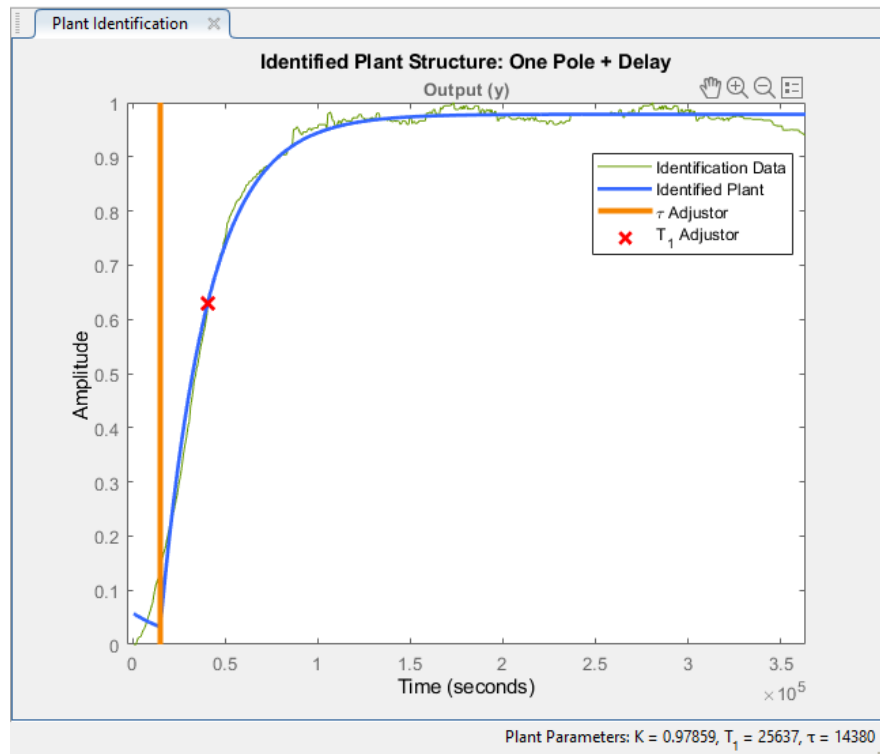
*Nota.* Fuente Elaboración propia

Como se puede apreciar en el gráfico, se acumularon datos del sistema por alrededor de 4 días. Se puede apreciar un periodo donde la humedad en color rojo se mantuvo constante alrededor del 83% en gran parte de los días de la toma de datos. La toma finalizó el 3 de junio de 2021 en horas de la tarde ya que se tenían indicios de una reducción de la humedad.

En la parte inferior de color azul tenemos los datos de temperatura de suelo, la cual nos ayuda a contrastar el porqué del comportamiento de la humedad en nuestro sistema. Como se puede apreciar, las lecturas más altas de temperatura son tomadas alrededor del mediodía. Siendo que la variable temperatura es un factor externo el cual no puede ser controlado, el proyecto se limita a utilizar el dato únicamente como referente del comportamiento de la humedad.

Con los datos obtenidos usaremos la plataforma de MATLAB para poder determinar cuál es el modelo del proceso a controlar. Para procesar el dato de humedad, lo normalizamos con el fin de mantenerlo entre 0 y 1.

Una vez hecho esto se procesa con la herramienta *pidTuner* de MATLAB obteniendo el siguiente resultado:



**Figura 92**

*Gráfico de Planta de Sistema de Control*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

Se utilizó *autotuning*, para poder setear de manera correcta el identificador de la planta en base a los datos de nuestro experimento. Sabemos por la forma obtenida que estamos frente a un sistema de primer orden el cual tiene la siguiente forma:

$$G_{(s)} = \frac{K}{Ts + 1}$$

Donde  $G_{(s)}$  es la función de transferencia de la planta.

Debido a que el retardo no es relevante para el proceso no lo consideramos. Utilizando los datos obtenidos y reemplazando tenemos:

$$G_{(s)} = \frac{0.97859}{25637s + 1}$$

La función de transferencia en tiempo continuo tiene la siguiente forma:

$$G_{(t)} = AK(1 - e^{-\frac{t}{c}})$$

Donde:

$G_{(t)}$ : valor de humedad en el tiempo  $t$ .

$A$ : amplitud de la señal escalón.

$K$ : ganancia del proceso.

$t$ : variable tiempo.

$r$ : constante de tiempo en segundos.

Reemplazando los datos obtenidos tenemos:

$$G_{(t)} = A * 0.97859(1 - e^{-\frac{t}{25637}})$$

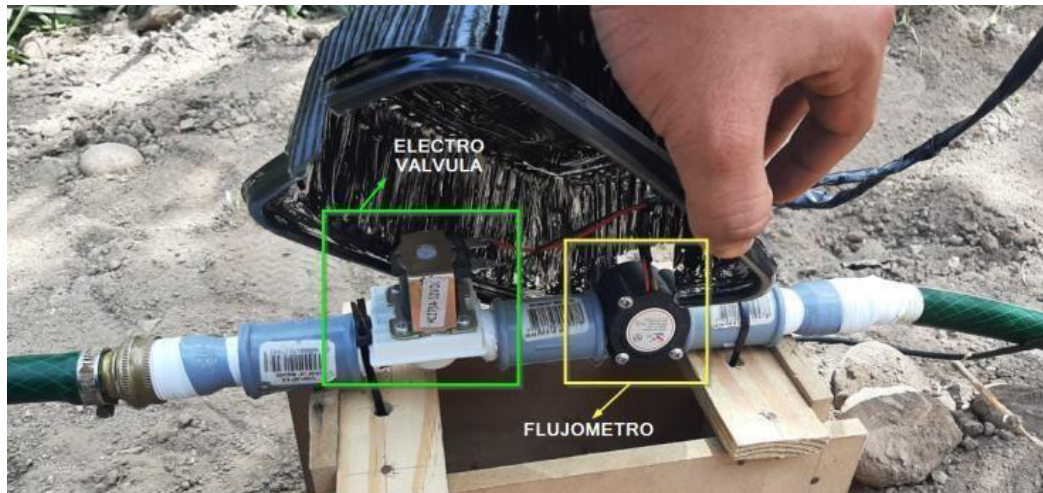
Ya que necesitamos aplicar una cantidad de agua específica para nuestro control, podemos utilizar los datos obtenidos para determinar la amplitud  $A$  del porcentaje de humedad necesario para alcanzar el setpoint.

#### **4.6.3.3 Prueba del Sistema Electrónico**

Con la configuración realizada, se procedió a probar el sistema electrónico utilizando una planta de chirimoya. De la misma manera que se implementó para la prueba de humedad, esta vez se agregó la válvula y el sensor de flujo para nuestro control. La profundidad de ubicación del sensor de humedad es la misma que usamos en la prueba escalón.







**Figura 93**

*Sistema Control y Monitoreo*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

#### ***4.6.4 Credibilidad de la Investigación***

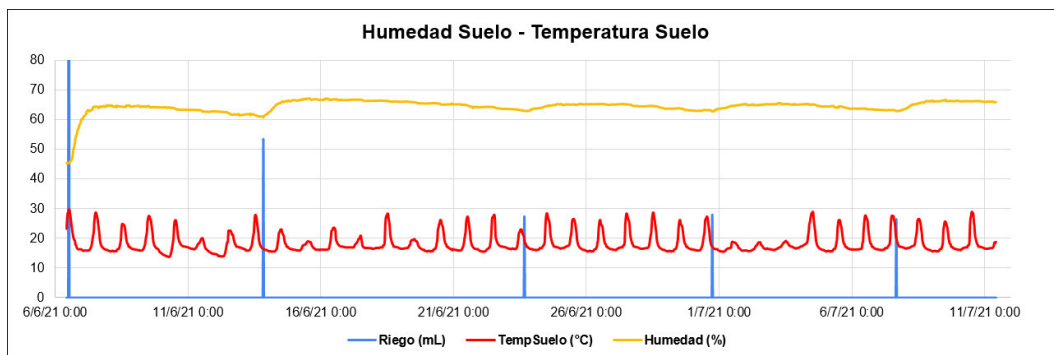
Se presentan los datos obtenidos durante la experimentación, el análisis de datos, así también el código fuente del sistema electrónico en el siguiente link de google sites:

<https://sites.google.com/unmsm.edu.pe/fiee-daniel-cordova/inicio?authuser=1>

Esta información es presentada para que los miembros revisores hagan lo conveniente para su verificación.

## 4.7 Análisis de Datos

Luego de la prueba del sistema electrónico obtenemos los datos de la humedad de suelo, temperatura de suelo, humedad ambiente, temperatura ambiente y riego aplicado, estos datos son presentados en los siguientes gráficos.

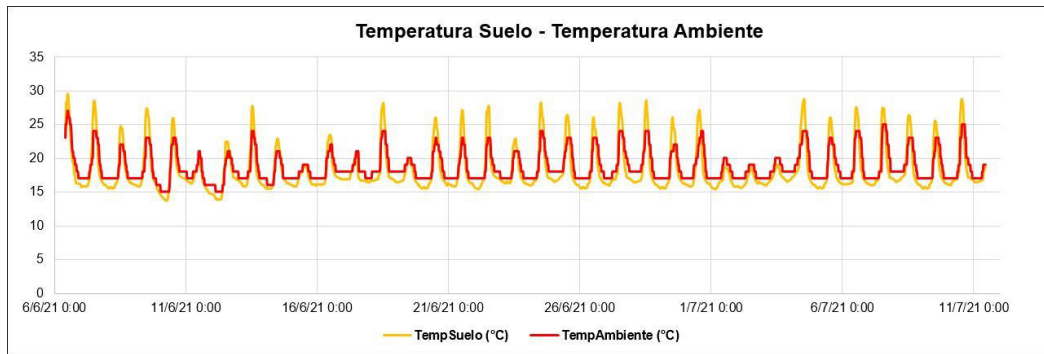


**Figura 94**

*Gráfico Control de Humedad de Suelo, Temperatura de Suelo y Riego*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

Este gráfico es analizado en la sección de resultados donde se detallan los tiempos y procesos de riego aplicados.

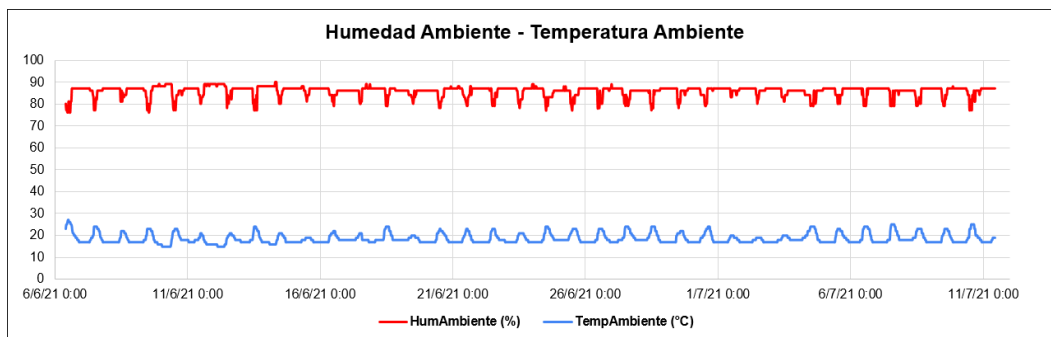


**Figura 95**

*Gráfico Temperatura de Suelo y Temperatura Ambiente*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

En la figura 95 podemos ver que se obtuvieron lecturas de temperatura de suelo mayores a la de la temperatura ambiente debido al efecto de la radiación solar y el calentamiento del suelo.

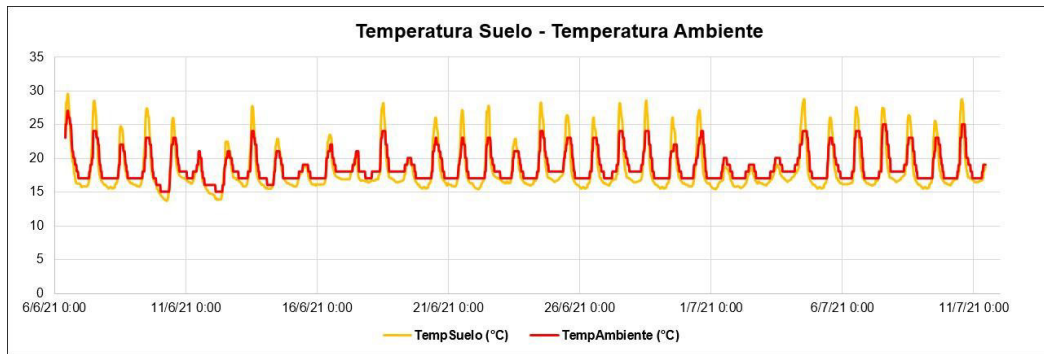


**Figura 96**

*Gráfico Humedad y Temperatura Ambiente*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

En la figura 96 podemos observar la relación inversa entre temperatura y humedad ambiente. Esto será mejor analizado en el gráfico de dispersión.



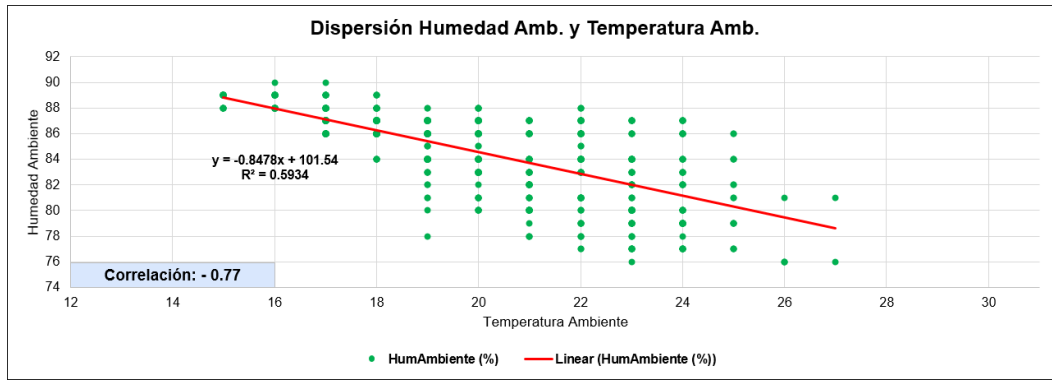
**Figura 97**

*Gráfico Riego y Volumen Acumulado*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

En la figura 97 podemos observar los momentos de riego aplicados por el sistema y el valor acumulado de agua de todo el proceso. Podemos ver que el primer riego fue el de mayor cantidad debido a la diferencia entre la humedad de suelo inicial y la del setpoint configurada. Para los demás riegos la cantidad aplicada fue mucho menor ya que el sistema se encontraba bastante cerca del setpoint deseado.

Para entender mejor la relación entre las variables del proceso revisaremos la correlación entre ellas. Tomemos en cuenta que mientras la correlación se acerque más a 1, significa que la relación entre las variables es directa, es decir, mientras una variable aumenta la otra también lo hace; si la correlación se acerca a -1 la relación es inversa, es decir, mientras una variable aumenta la otra disminuye; por último, si es cercano a 0 indica que la correlación entre las variables es débil.

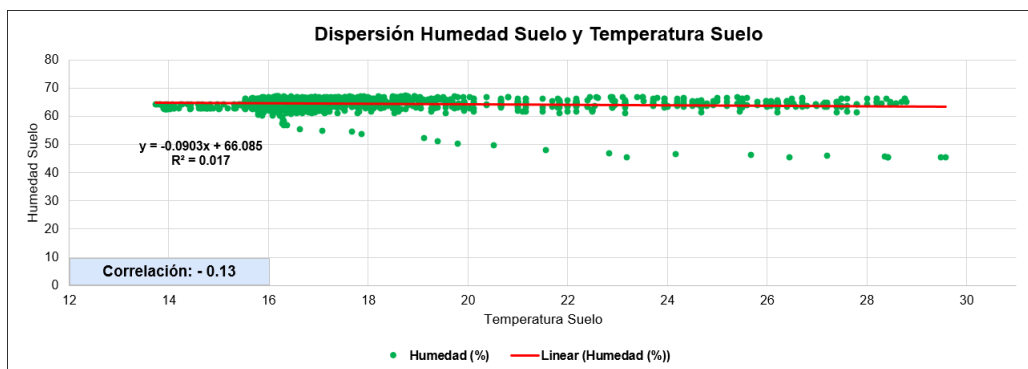


**Figura 98**

*Gráfico de Dispersión de Humedad y Temperatura Ambiente*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

Para la figura 98, podemos ver una relación inversa entre la humedad ambiente y la temperatura ambiente, esto es observable en la pendiente obtenida en el gráfico de dispersión. La correlación de los datos obtenidos es de -0.77, indicándonos que hay una correlación fuerte entre las variables.

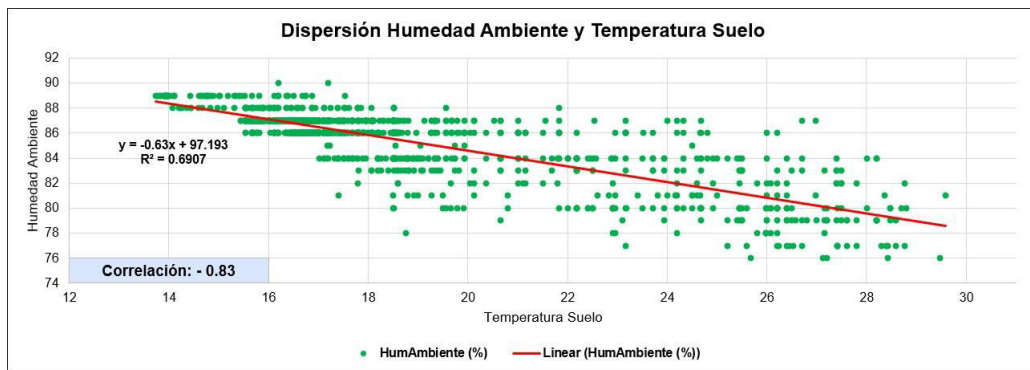


**Figura 99**

*Gráfico de Dispersión de Humedad de Suelo y Temperatura Suelo*

*Nota.* Fuente: Elaboración propia

Para la figura 99 podemos ver que la correlación entre la humedad y temperatura de suelo es bastante débil obteniendo un valor de -0.13, esto debido a que el sistema de control no permitió que la humedad de suelo caiga por debajo de los parámetros configurados. Podemos observar en la ecuación de la recta que para los valores de x (temperatura de suelo) tenemos casi constante el valor de humedad de suelo alrededor del 65%. Aquellos puntos que aparecen como outliers vienen a ser las lecturas de humedad al inicio del proceso de control, es decir, mientras la humedad subía para estabilizarse en valores cercanos al setpoint.



**Figura 100**

*Gráfico de Dispersión de Humedad Ambiente y Temperatura Suelo*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

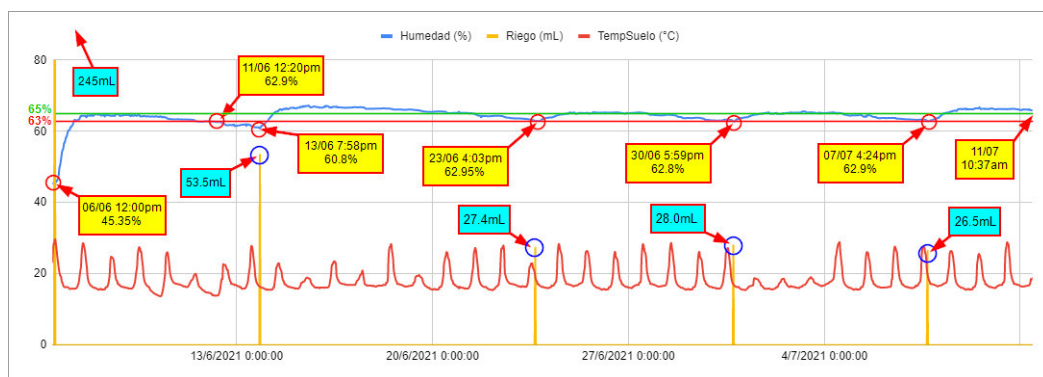
En la figura 100 tenemos el gráfico de dispersión de la humedad ambiente y temperatura de suelo. Como podemos observar, existe una relación inversa entre ambas variables. Al igual que la temperatura y humedad ambiente, la correlación entre estas variables es bastante fuerte obteniendo un valor de -0.83.

## CAPÍTULO 5 RESULTADOS

### 5.1 Presentación y Análisis de Resultados

El sistema electrónico se implementó el 6 de junio de 2021 a las 10 a.m. El objetivo del sistema fue mantener un Setpoint del 65% de humedad ya que es un valor dentro del rango de humedad aprovechable para este suelo. A lo largo de la experimentación se trabajó con un Trigger de 63% ya que debemos tener un error de al menos 2% respecto al setpoint. Veremos que a lo largo de la toma de datos se obtuvieron valores máximos alrededor del 67% y mínimos cerca al 63%, por tanto, se manejó hubo un error de aproximadamente 4%.

Se realizó el primer riego a mediodía del 6 de junio. Como se puede apreciar en el gráfico, el primer riego fue de 245mL para poder elevar la humedad desde un 45% hasta alrededor del 65%. Como podemos ver, se han mapeado los eventos de riego en todo el periodo de nuestra prueba.



**Figura 101***Gráfico Detallado de Resultados del Control de Humedad*

*Nota.* Fuente Elaboración propia

El 11/06 se registró la primera lectura de humedad por debajo del valor de trigger (TG = 62.9%), esto debió inicializar el riego del sistema, sin embargo, por condiciones inesperadas no se contó con suministro de agua en los siguientes dos días. Gracias a que el sistema de control cuenta con un algoritmo para detectar si hay flujo de agua, se evitó un bucle en la programación. El suministro de agua volvió alrededor de las 7:40pm del 13/06. La última lectura de humedad se realizó a las 7:28 p.m. del mismo día, y debido a que la actualización de humedad es cada 30 minutos, se pudo ejecutar el riego a las 7:58 p.m. con un valor de 53.5mL.

Un factor importante dentro del ciclo de riego fue el efecto de la temperatura de suelo. Como se puede apreciar en el ciclo del 13/06 hasta el 23/06, hubo caídas de temperatura en comparación al valor promedio de los días posteriores y anteriores a este, es debido a ello que la humedad de suelo se mantuvo por mayor tiempo. Otro factor que considerar es el efecto de la garúa durante las horas de la madrugada.

El 23/06 a las 4:03 p.m. se llegó nuevamente a un valor por debajo del TG, y con ello se aplicó 27.4mL de riego. Podemos apreciar que el valor de SP del sistema se mantuvo aproximadamente 3 días, esto debido a que las condiciones de temperatura fueron óptimas. Mientras se alcance una mayor temperatura durante el día, esta aminora cualquier efecto de humedad ganada durante la noche y así también la del riego mismo.

El 30/06 a las 5:59p.m. se alcanzó nuevamente el valor del TG, y con ello se aplicó 28mL. A pesar de tener días con baja temperatura, los últimos días del ciclo fueron de alta temperatura, siendo de los mayores durante el periodo de prueba. Este efecto disminuyó el valor de humedad de suelo, y así cerrar el ciclo en alrededor de 7 días.



El último periodo de riego empezó el 07/07 a las 4:24 p.m. con un riego de 26.5mL. Podemos apreciar hasta el punto en el cual se tomó las pruebas que la humedad de suelo estuvo por encima del valor de SP, alrededor del 66% al 67% de humedad. Como se explicó anteriormente el escenario promedio implica temperaturas medias y altas durante el día y poca humedad durante la noche. Estos escenarios nos permiten mantener la humedad en el valor esperado.

Como hemos podido apreciar, el periodo de prueba tuvo un total de 35 días en los cuales se aplicaron 5 riegos. El total del riego aplicado fue de 380.4mL de agua, esta es una cantidad de consumo de agua baja, para los 35 días de prueba del sistema. Si replicamos la estrategia para una plantación completa de chirimoyas, en la cual se tiene en promedio de 200 a 500 árboles por hectárea ( $10,000m^2$ ) según Info Agro (2015), dependiendo del marco de plantación, podemos estimar un consumo entre 76 a 190 Litros. Tomemos en cuenta que el riego que se aplicó para este caso fue a una planta de chirimoya, por lo que el porcentaje de consumo de agua por parte de la planta cambiará a lo largo de su ciclo de vida y también dependerá del tipo de suelo, así como la disposición del terreno de riego.

Si comparamos los resultados obtenidos con un riego tradicional, dependiendo de la técnica aplicada, el consumo de agua puede duplicarse o triplicarse fácilmente. Muchas veces el riego no tecnificado depende únicamente de la apreciación del agricultor para evaluar de manera experimental la humedad necesaria en el cultivo. (Globalcaja, 2018)

En el blog de agricultura De Agronomía (2015), brindan una manera sencilla de calcular cuánto es el riego que se debe considerar para el cultivo de chirimoya:

Riega el árbol cuando el suelo se seca durante una sequía. Si tu área experimenta un período de sequía, riega el suelo ligeramente para ayudar al árbol a sobrevivir. Agrega suficiente agua para humedecer el suelo a unas 3 pulgadas (7,6 cm) de profundidad. Puedes probar el suelo empujando tu dedo en él. Si no puedes empujar hacia las raíces fácilmente, el suelo necesita agua.

El método de tanteo puede ser útil en base a la experiencia del usuario, pero no es una manera efectiva de mantener los parámetros del cultivo de manera estable.

Ya que este sistema electrónico está orientado al pequeño y micro agricultor, el cual muchas veces depende únicamente de la experiencia propia para aplicar un riego manual, este sistema le permitirá optimizar recursos en el riego, en este caso mejorar la eficiencia del uso del agua, y por ende mejorar la producción en cualquier tipo de cultivo. Toda comparación que podamos realizar entre un riego tradicional y un sistema de control, dará la ventaja al sistema de control ya que permite restringir el error humano a la mínima expresión, ello permite acercar más el riego al estado óptimo y de esta manera obtener mayores beneficios.

Gran parte de la producción del pequeño y micro agricultor va dirigida al autoconsumo y venta de negocio familiar en su mayoría, en este escenario, las experiencias y conocimientos son transmitidos de padre a hijo, es por ello que, implementar una herramienta que permita introducir a las nuevas generaciones de agricultores al campo tecnológico, en este caso al control del uso del agua para la eficiencia de riego, abrirá paso a la transformación tecnológica y a dar los primeros pasos hacia la transformación digital tan necesaria para este sector.

Se presenta finalmente la tabla de costos de implementación de nuestro sistema electrónico:

**Tabla 6***Costos de Implementación del Sistema Electrónico*

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Subtotal (S/.)</b>	<b>Total (S/.)</b>
Ufox Devkit Sigfox RC4	1	176.10	176.10
Suscripción a Sigfox (Anual)	1	58.00	58.00
IRF520N	1	6.00	6.00
Xbee S2C	2	179.50	359.00
DHT11	1	10.00	10.00
SEN-HS-CAP	1	27.00	27.00
SEN-FLOW-100	1	20.00	20.00
Electroválvula 12VDC	1	25.00	25.00
Fuente de Alimentación	1	45.00	45.00
DS18B20	1	11.00	11.00
RTC DS3231	1	13.00	13.00
Batería Li-ion 3.7v	1	16.00	16.00
Fabricación placa de Control	1	40.00	40.00
Fabricación placa de Monitoreo	1	20.00	20.00
Caja de montaje Control	1	35.00	35.00
Caja de montaje Monitoreo	1	4.00	4.00

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Subtotal (S/.)</b>	<b>Total (S/.)</b>
Conexión tuberías	5	2.00	10.00
Estructuras de soporte equipos	1	28.00	28.00
Cable mellizo y enchufe	1	22.00	22.00
Manguera	1	30.00	30.00
Prensa estopa	1	1.00	1.00
Agregados (cables, cinta aislante)	1	8.00	8.00
<b>Total</b>			<b>964.10</b>

## CAPÍTULO 6 DISCUSIÓN

A continuación, veremos algunos resultados obtenidos en sistemas de control de riego implementados por otros autores. En el trabajo de Simon, G. (2018), *Implementación, control y monitoreo de un sistema de riego por goteo subterráneo con microcontroladores*, se implementa un sistema de control para mantener la humedad de suelo dentro de los parámetros de humedad aprovechable por la planta, en el trabajo de Simon G. al igual que en esta tesis, se obtuvieron buenos valores de control de humedad dentro de un error del 5% respecto al setpoint.

En el trabajo de Cortes & Vargas, (2020) *Diseño e implementación de un sistema de riego automatizado y monitoreo de variables ambientales mediante IoT en los cultivos urbanos de la fundación Mujeres Empresarias Marie Poussepin* hacen uso de un sistema de riego el cual permite mantener la humedad de suelo deseado para el cultivo. Los resultados de este trabajo muestran un ahorro de agua y mejora en la producción de cultivos, en el trabajo Cortes & Vargas al igual que en esta tesis, se obtuvieron consumos de agua bajos gracias al sistema de control.

Frente a los resultados de los sistemas de control de riego antecedentes, podemos ver que la respuesta del sistema de control de esta tesis se mantuvo dentro de los estándares ofrecidos por los trabajos de otros autores en donde utilizaron equipamiento de bajo costo para controlar la humedad de suelo de cultivo. La diferencia entre los trabajos de los autores mencionados y el de esta tesis es el método de riego utilizado, sin embargo, el sistema de control propuesto tiene la capacidad de ser adaptable a cualquier método de riego mientras el objetivo sea el mismo, el control de la humedad de suelo. Se espera en futuros

trabajos que tomen como referencia esta tesis puedan realizar pruebas del sistema de control de riego utilizando otros métodos de riego.

## CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 Conclusiones

- El sistema de control electrónico mantuvo la humedad del suelo en un valor óptimo en todo el periodo del test realizado, lográndose el objetivo mantener una humedad del 65%. Este setpoint fue programado desde la plataforma IoT y se mantuvo en ese valor durante toda la experimentación. En base a las lecturas obtenidas, se concluye que el sistema propuesto tiene la capacidad de cumplir con las reglas de control previstas.
- El riego total realizado durante el periodo de prueba fue de 380mL de agua. Esto es posible gracias a que se mantuvo constante la humedad de suelo. Por tanto, se concluye que hay eficiencia del uso del agua la cual está regida por el valor de humedad del suelo.
- La prueba del sistema fue por un periodo de 35 días, durante este tiempo el módulo de lectura de humedad proporcionó lecturas consistentes. En las pruebas se obtuvo un consumo promedio de 0.5mW el cual es un valor de potencia bajo, aceptable y que está dentro del rango de energía que puede proporcionar una única batería (3.7volts 2,800 mAh), de esto se concluye que se consiguió realizar un diseño eficiente de bajo consumo de energía y que permite un funcionamiento constante por un periodo aceptable (35 días) sin cambio de baterías.
- Debido a que la cantidad de agua requerida por el cultivo y la humedad retenida en el suelo son parámetros configurables, el sistema electrónico puede ser usado con cualquier otro tipo de suelo, concluimos que esta

característica permite que el sistema sea personalizable para ser usado en diferentes tipos de cultivo.

- En razón que la etapa de comunicación tiene enlace directo con el backend de Sigfox, la plataforma IoT no interactúa con ella de manera directa, debido a esta arquitectura, el sistema es personalizable para poder trabajar con cualquier plataforma IoT en la nube que use el modelo RESTful para la comunicación con Sigfox.

## 7.2 Recomendaciones

- El uso del sensor de humedad capacitivo evita los efectos de corrosión presentes en sensores de humedad resistivos de bajo costo. Si bien es una opción económica que dio buenos resultados, podemos mejorarlos utilizando sensores de humedad profesionales para agricultura. Estos pueden ser adaptados a las entradas analógicas del sistema electrónico.
- El riego que se usó en nuestro proceso de humedad de suelo fue aplicado a través de chorro de manguera, sin embargo, se propone combinarlo con otros sistemas de riego como micro aspersión o riego por goteo dependiendo el tipo de cultivo.
- Las técnicas de control usadas en el proyecto fueron el control proporcional derivativo y control ON-OFF. Mientras se puedan interrelacionar más datos medio ambientales con respecto al crecimiento de la planta se propone actualizar el tipo de control a uno que utilice el aprendizaje de máquina, de tal manera que los ajustes de humedad durante el ciclo de vida de la planta sean automáticos.
- Si bien el módulo de lectura de humedad de suelo puede funcionar por un periodo bastante largo sin el reemplazo de baterías gracias a su configuración de bajo consumo, puede ser actualizado en futuros



proyectos para su funcionamiento mediante energía solar. Esto permitirá trabajar con una mayor frecuencia de recolección de datos.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- i-SCOOP. (2018). *i-SCOOP*. Obtenido de i-SCOOP: <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-iot/lpwan/>
- Aazam, M., Khan, I., Alsaffar, A., & Huh, A. (2014). *Cloud of Things: Integrating Internet of Things and cloud computing and the issues involved*. Islamabad, Pakistan: Proceedings of 2014 11th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology (IBCAST). Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6778179>
- Adelantado, F. (2017). *Understanding the Limits of LoRaWAN*. IEEE. Obtenido de <https://arxiv.org/pdf/1607.08011.pdf>
- Administración Local del Agua. (2010). *Principios del riego*. Ica, Perú. Obtenido de <https://es.slideshare.net/AVJEICA/principios-del-riego>
- Aprendiendo Arduino. (marzo de 2018). *Redes LPWAN*. Obtenido de Aprendiendo Arduino: <https://www.aprendiendoarduino.com/2018/03/05/redes-lpwan/>
- Autoridad Nacional del Agua. (2015). *Uso eficiente del agua en la agricultura con fines de conservación*. Lima, Perú: MINAGRI. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/3127>
- Bannatyne, R., & Viot, G. (1998). *Introduction to microcontrollers*. USA. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/716623/authors#authors>
- BoTrue. (2018). *Comparativa entre Sigfox y Lorawan*. Obtenido de COMPARATIVA ENTRE SIGFOX Y LORAWAN: <https://botrueactivities.com/comparativa-entre-sigfox-y-lorawan/>

- Castaño, S. (Enero de 2015). *Control Automática Educación*. Obtenido de Control en Cascada: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/control-en-cascada/>
- Cortes, V., & Vargas, F. (2020). *Diseño e Implementación de un Sistema de Riego Automatizado y Monitoreo de Variables Ambientales Mediante IoT en los Cultivos Urbanos de la Fundación Mujeres Empresarias Marie Poussepin*. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA, Facultad de Ingeniería. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/25546/1/Tesis%20Fabian%20Vargas-%20Valeria%20Cortes.pdf>
- CRAI. (2015). *CRAI COLOMBIA*. Obtenido de <http://www2.duoc.cl/biblioteca/crai/definicion-y-proposito-de-la-investigacion-aplicada>
- De Agronomía. (2015). *Cómo Cultivar Chirimoyas Siembra, Riego, Plagas, Cosecha, Propiedades Y Más*. Obtenido de Agronomía: <https://deagronomia.com/cultivos/como-cultivar-chirimoyas/>
- Devopedia. (2019). *Devopedia*. Obtenido de Devopedia: <https://devopedia.org/low-power-wide-area-network#Beser-2008>
- Digi. (2018). *What is Zigbee?* Obtenido de Digi: <https://www.digi.com/solutions/by-technology/zigbee-wireless-standard>
- Electronics Hub. (2018). *Electronics Hub*. Obtenido de Resistive Humidity Sensors (Electrical Conductivity Sensors): <https://www.electronicshub.org/humidity-sensor-types-working-principle/>
- Evans, D. (2011). *The Internet of Things. How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything*. Obtenido de [https://www.cisco.com/c/dam/en\\_us/about/ac79/docs/innov/IoT\\_IBSG\\_0411FINAL.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf)
- Fine Report. (2020). *Fine Report*. Obtenido de IoT Dashboards: <https://www.finereport.com/en/iot-dashboards>
- Gartner. (2019). *Gartner*. Obtenido de IoT Platform: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/iot-platforms>

- Globalcaja. (2018). *Técnicas de regadío según tu terreno agrícola*. Obtenido de Globalcaja: <https://blog.globalcaja.es/tecnicas-regadio/>
- Glow Labs. (2018). *Table Comparing Wireless Protocols for IoT Devices*. Obtenido de Glow Labs: <https://glowlabs.co/wireless-protocols/>
- Golnaraghi, F., & Kuo, B. C. (2010). *Automatic Control Systems* (9th ed.). USA: John Wiley & Sons.
- Hao, Y., & Foster, R. N. (2008). *Wireless body sensor networks for health-monitoring applications*. ResearchGate. doi:10.1088/0967-3334/29/11/R01
- Hernandez, M. (2018). *Connectivity Now and Beyond; exploring Cat-M1, NB-IoT, and LPWAN Connections*. Obtenido de Ubidots: <https://ubidots.com/blog/exploring-cat-m1-nb-iot-lpwan-connections/>
- Hrisko, J. (2020). *Capacitive Soil Moisture Sensor Theory, Calibration, and Testing*. New York: Research Gate. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/342751186\\_Capacitive\\_Soil\\_Moisture\\_Sensor\\_Theory\\_Calibration\\_and\\_Testing](https://www.researchgate.net/publication/342751186_Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_Theory_Calibration_and_Testing)
- Huapaya, F. (2007). *Diseño de una red de sensores inalámbrica para un área de cultivo frutícola en una ONG*. PUCP, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/1087>
- Ibrahim, M., Mohamed, R., & Ahmad, N. (2015). *Aplicaciones de agricultura de precisión utilizando una red inalámbrica de sensores de humedad*. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7725400>
- IDEAM Colombia. (Agosto de 2018). *Portal Frutícola*. Obtenido de <https://www.portalfruticola.com/noticias/2018/08/30/metodos-de-medicion-de-humedad-del-suelo-del-campo-al-laboratorio/#:~:text=El%20m%C3%A9todo%20gravim%C3%A9trico%20es%20el,una%20temperatura%20de%20105%C>
- IETF. (2016). *IETF*. Obtenido de IoT: <https://www.ietf.org/topics/iot/>
- IETF. (2019). *IETF*. Obtenido de The Standards on a Cloud Service Framework and Protocol for Construction, Migration, Deployment, and Publishing of Internet-Oriented Scalable Web Software Systems in Non-Programming

Mode: <https://tools.ietf.org/id/draft-yangcan-core-web-software-built-in-cloud-00.html#rfc.section.2>

Info Agro. (2015). *El Cultivo del Chirimoyo*. Obtenido de Info Agro:

[https://infoagro.com/frutas/frutas\\_tropicales/chirimoyo.htm](https://infoagro.com/frutas/frutas_tropicales/chirimoyo.htm)

International Atomic Energy Agency. (2002). *Soil and Water Management & Crop Nutrition Section*. Austria. Obtenido de <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-16.pdf>

i-Scoop. (2018). *LPWA network technologies and low-power standards*.

Obtenido de <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-iot/lpwan/>

Katamreddy, S., Walsh, J., Riordan, D., & Ward, S. (2019). *Control de procesos de lazo cerrado para agricultura de precisión: Una perspectiva de Agricultura 4.0*. Institute of Technology Tralee, IMaR Research Centre. Maynooth, Ireland: IEEE. doi:10.1109/ISSC.2019.8904938

Keyur K Patel, Sunil M Patel. (2016). *Internet of things-IOT: definition, characteristics, architecture, enabling technologies, application & future challenges*. India: Research Gate. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Carlos\\_Salazar70/publication/330425585\\_Internet\\_of\\_Things-IOT\\_Definition\\_Characteristics\\_Architecture\\_Enabling\\_Technologies\\_Application\\_Future\\_Challenges/links/5c3f8a24299bf12be3ccc584/Internet-of-Things-IOT-Definition](https://www.researchgate.net/profile/Carlos_Salazar70/publication/330425585_Internet_of_Things-IOT_Definition_Characteristics_Architecture_Enabling_Technologies_Application_Future_Challenges/links/5c3f8a24299bf12be3ccc584/Internet-of-Things-IOT-Definition)

Khan, R. R., & Kang, S. W. (2015). *Highly Sensitive Multi-Channel IDC Sensor Array for Low Concentration Taste Detection*. Research Gate. Doi: 10.3390/s150613201

Khattab, A., Abdelgawad, A., & Yelmarthi, K. (2016). *Diseño e implementación de un esquema de IoT basado en la nube para agricultura de precisión*. Michigan University, College of Science and Engineering. Michigan: IEEE. doi:10.1109/ICM.2016.7847850

Kore. (2018). *Kore*. Obtenido de Kore:

<https://www.korewireless.com/news/lpwan-licensed-vs.-unlicensed>

- Lee, J. S., & Wang, Y. M. (2013). *Experimental Evaluation of ZigBee-Based Wireless Networks in Indoor Environments*. National Taipei University of Technology, Department of Electrical Engineering, Taiwan.  
doi:<https://doi.org/10.1155/2013/286367>
- Maktu, R. (2018). *Slideshare*. Obtenido de Slideshare:  
<https://www.slideshare.net/raja017/irrigation-controller-system>
- Martin, E. C. (2010). *Métodos para medir la humedad del suelo para la programación del riego*. Arizona, USA: University of Arizona. Obtenido de <https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/147011/az1220S-2010.pdf?sequence=1>
- Mat, I., Mohd, M., Nizar, A., & Yussof, I. (2016). *IoT en aplicaciones de agricultura de precisión utilizando una red inalámbrica de sensores de humedad*. Ministry of Science, Technology and Innovation. Kuala Lumpur, MALAYSIA: IEEE. doi:10.1109/ICOS.2016.7881983
- Mekki, K. (2017). *A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.12.005>
- MIDAGRI. (2021). *Problemas en la Agricultura Peruana*. Obtenido de <https://www.minagri.gob.pe/portal/22-sector-agrario/vision-general/190-problemas-en-la-agricultura-peruana>
- MINAGRI. (2012). *Plan Estratégico Sectorial Multianual*. Obtenido de [https://www.peru.gob.pe/docs/PLANES/14282/PLAN\\_14282\\_2015\\_PES-EM.PDF](https://www.peru.gob.pe/docs/PLANES/14282/PLAN_14282_2015_PES-EM.PDF)
- MINAGRI. (2015). *Análisis de Tendencias que impactan en la Agricultura*. Obtenido de <https://www.minagri.gob.pe/portal/download/pdf/pnapes/actividades/comision/analisis-tendencias.pdf>
- MINAGRI. (2015). *Lineamientos de Políticas y Estrategia Nacional de Riego 2015-2025*. Obtenido de [https://www.peru.gob.pe/normas/docs/RM\\_0507\\_2015\\_MINAGRI.pdf](https://www.peru.gob.pe/normas/docs/RM_0507_2015_MINAGRI.pdf)

- MINAGRI. (2017). *"Reducción de la degradación de los suelos agrarios" Anexo 2*. Obtenido de <https://www.minagri.gob.pe/portal/download/programas-presupuestales/inf-programa/anexo2-pp89-2017.pdf>
- N.A. (Diciembre de 2020). *Wikipedia*. Obtenido de Wikipedia: [https://en.wikipedia.org/wiki/Tensiometer\\_\(soil\\_science\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Tensiometer_(soil_science))
- National Research Council. (1997). *Precision Agriculture in the 21st Century: Geospatial and Information Technologies in Crop Management*. Obtenido de [https://books.google.com.pe/books/about/Precision\\_Agriculture\\_in\\_the\\_21st\\_Centur.html?id=HHErAAAAYAAJ&source=kp\\_book\\_description&redir\\_esc=y](https://books.google.com.pe/books/about/Precision_Agriculture_in_the_21st_Centur.html?id=HHErAAAAYAAJ&source=kp_book_description&redir_esc=y)
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2018). *Mal manejo del riego: amenaza para los suelos, el agua y la seguridad alimentaria*. Obtenido de <http://www.fao.org/FOCUS/S/SpecPr/spro13-s.htm>
- Pelaez, A. (March de 2018). *IoT Dashboards – Attributes, Advantages, & Examples*. Obtenido de Ubidots: <https://ubidots.com/blog/iot-dashboards/>
- Programa Subsectorial de Irrigaciones. (2019). *¿Sabe usted qué es el programa de riego tecnificado?* Obtenido de [http://www.psi.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/biblioteca\\_guias\\_programa\\_de\\_riego\\_tecnificado.pdf](http://www.psi.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/biblioteca_guias_programa_de_riego_tecnificado.pdf)
- Question Pro. (2019). Obtenido de Diseño de investigación. Elementos y características: <https://www.questionpro.com/blog/es/diseño-de-investigación/>
- Radulovich, R. (2008). *Método gravimétrico para determinar in situ la humedad volumétrica del suelo*. Agronomía Costarricense. Obtenido de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6739/6427>
- Rai, B. (2016). *Link Labs*. Obtenido de lot Platform: <https://www.link-labs.com/blog/what-is-an-iot-platform>
- Raspberrypi Stackexchange. (2017). *Raspberrypi Stackexchange*. Obtenido de Raspberrypi Stackexchange:

<https://raspberrypi.stackexchange.com/questions/68133/is-soil-moisture-sensor-corrosion-normal>

Rawidean, M. (2015). *Aplicaciones de agricultura de precisión utilizando una red inalámbrica de sensores de humedad*. doi:10.1109/MICC.2015.7725400

Romeo, S. (2018). *IoT Analytics LPWAN Market Report, 2018-2023*. Obtenido de IoT Analytics: <https://iot-analytics.com/5-key-insights-from-350-smart-city-iot-projects/>

Science Direct. (2014). *Science Direct*. Obtenido de Integrated Design and Simulation of Chemical Processes: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/cascade-control>

Sigfox. (2017). *Sigfox Technical Overview*. Obtenido de <https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>

Sigfox. (2021). *Cobertura Sigfox*. Obtenido de Sigfox: <https://www.sigfox.com/en/coverage>

Simon, G. (2018). *Implementación, control y monitoreo de un sistema de riego por goteo subterráneo con microcontroladores*. UNALM, Facultad de Ingeniería Agrícola. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3610>

Smart Cities Perú. (2018). *Tecnologías IOTA y LoRA para Smart Cities en el Perú*. Smart Cities Perú. Obtenido de <https://smart-cities.pe/tecnologias-iota-lora-smart-cities-peru/>

Soil Science Society of America. (2018). *Earth Science Week*. Obtenido de Earth Science Week: <https://www.earthsciweek.org/classroom-activities/soil-moisture>

T. Dillon, C. Wu and E. Chang. (2010). *Cloud Computing: Issues and Challenges*. Perth: 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5474674>



Watelectronic. (2018). *Watelectronic*. Obtenido de What is RISC and CISC Architecture & Their Differences: <https://www.watelectronics.com/risc-and-cisc-architecture-their-differences/>

Wikipedia. (2020). *Cloud Computing*. Obtenido de Wikipedia: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cloud\\_computing](https://en.wikipedia.org/wiki/Cloud_computing)

Zigbee Alliance. (2015). *ZigBee Specification*. Obtenido de <https://zigbeealliance.org/wp-content/uploads/2019/11/docs-05-3474-21-0csg-zigbee-specification.pdf>

G.J, Á. (18 de Noviembre de 2019). *Fertibox*. Obtenido de Fertibox: <https://www.fertibox.net/single-post/agua-riego#:~:text=de%20la%20instalaci%C3%B3n.-,El%20agua%20de%20riego,naturales%2C%20de%20pozos%2C%20etc>

Wikipedia. (26 de Noviembre de 2022). *Wikipedia*. Obtenido de Wikipedia: [https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_de\\_control](https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_control)

## ANEXOS

**Tabla 7**

*Matriz de Consistencia. Diseño e implementación de un sistema electrónico de control de humedad de suelo y su relación con el uso eficiente del agua para riego agrícola en el año 2021 en el distrito de El Agustino*

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores	Metodología
<b>Problema General</b>	<b>Objetivo General</b>	<b>Hipótesis General</b>				
¿De qué manera el sistema de control de humedad de suelo se relaciona con el uso eficiente del agua para riego agrícola?	Determinar la relación del sistema de control de humedad de suelo con el uso eficiente del agua para riego agrícola.	El sistema de control de humedad de suelo se relaciona significativamente con el uso eficiente del agua para riego agrícola.	<p><b>Variable Dependiente:</b></p> <p>Control de Humedad de Suelo</p>	<p><b>Sistema de Control</b></p> <p><b>Humedad Óptima de Suelo</b></p> <p><b>Medición y Monitoreo de Variables</b></p>	<p>Control de lazo abierto</p> <p>Control de lazo cerrado</p> <p>Control en Cascada</p> <p>Nivel de Agotamiento Permissible</p> <p>Intervalo de Humedad Disponible</p> <p>Sensado de Flujo</p> <p>Humedad y Volumen de Agua</p>	<p><b>ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN</b> Cuantitativo</p> <p><b>TIPO DE INVESTIGACIÓN</b> Aplicada</p> <p><b>NIVEL DE INVESTIGACIÓN</b> Correlacional</p> <p><b>DISEÑO DE INVESTIGACIÓN</b> Experimental</p> <p><b>MÉTODO DE INVESTIGACIÓN</b> Hipotético deductivo</p> <p><b>POBLACIÓN Y MUESTRA DE ESTUDIO</b> Mini huerto de cultivo</p>

Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas		Tipo de Riego Agrícola	Riego Tradicional.	<b>MUESTREO</b> No probabilístico	
¿De qué manera el sistema de control se relaciona con el tipo de riego agrícola?	Determinar la relación del sistema de control con el tipo de riego agrícola.	El sistema de control se relaciona significativamente con el tipo de riego agrícola.			Riego Tecnificado	<b>INSTRUMENTO</b> Adquisición de datos mediante sensores	
¿De qué manera la humedad óptima de suelo se relaciona con el volumen de agua para el riego agrícola?	Evaluar la relación de la humedad óptima de suelo con el volumen de agua para el riego agrícola.	La humedad óptima de suelo se relaciona significativamente con el volumen de agua para el riego agrícola.		<b>Variable Independiente:</b> Agua para riego agrícola	<b>Volumen de Agua para el Riego Agrícola</b>	Capacidad de Campo. Punto de Marchitez. Saturación	
¿De qué manera la medición y monitoreo de variables se relacionan con el uso eficiente del agua para riego agrícola?	Determinar la relación de la medición y monitoreo de variables con el uso eficiente del agua para riego agrícola.	La medición y monitoreo de variables se relaciona significativamente con el uso eficiente del agua para riego agrícola.			<b>Uso Eficiente del Agua para Riego Agrícola</b>	Herramientas Eficientes. Ahorro de Agua	

Nota. Fuente Elaboración propia

## Flujómetro

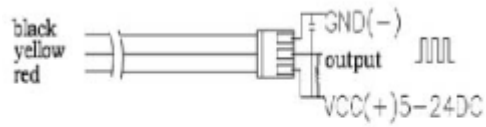


### Specification

Mini Working Voltage	DC 4.5V
Max Working Current	15mA(DC 5V)
Working Voltage	5V~24V
Flow Rate Range	1~60L/min
Load Capacity	$\leq 10\text{mA(DC 5V)}$
Operating Temperature	$\leq 80^{\circ}\text{C}$
Liquid Temperature	$\leq 120^{\circ}\text{C}$
Operating Humidity	35%~90%RH
Water Pressure	$\leq 1.75\text{MPa}$
Storage Temperature	$-25^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$
Storage Humidity	25%~95%RH

## Wiring Diagram

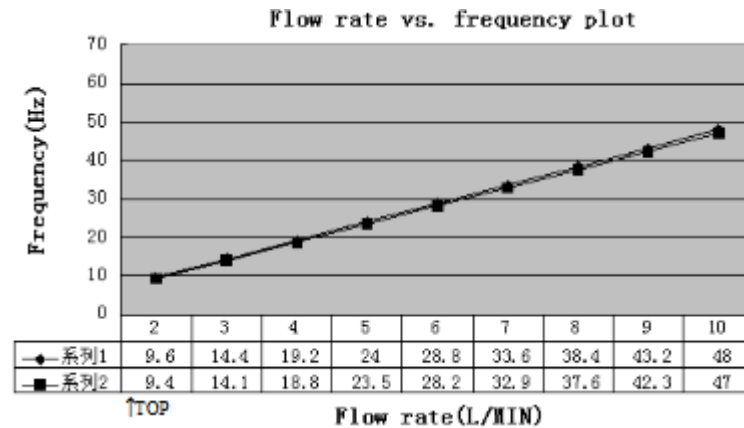
The external diameter of thread the connections use is 1.4mm.



## Output Table

Pulse frequency (Hz) in Horizontal Test=  $4.8Q$ ,  $Q$  is flow rate in L/min. (Results in +/- 3% range)

Output pulse high level	Signal voltage >4.5 V( input DC 5 V)
Output pulse low level	Signal voltage <0.5V( input DC 5V)
Precision	3% (Flow rate from 1L/min to 10L/min)
Output signal duty cycle	40%~60%



Details:

[https://www.openhacks.com/uploadsproductos/g1\\_water\\_flow\\_sensor\\_-\\_wiki.pdf](https://www.openhacks.com/uploadsproductos/g1_water_flow_sensor_-_wiki.pdf)

## Sensor de Humedad Capacitivo



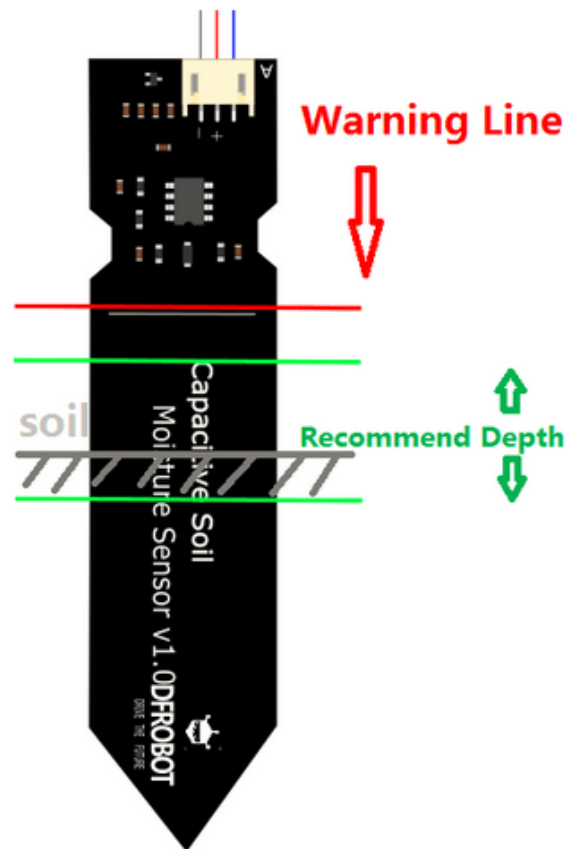
### Specification

---

- Operating Voltage: 3.3 ~ 5.5 VDC
- Output Voltage: 0 ~ 3.0VDC
- Operating Current: 5mA
- Interface: PH2.0-3P
- Dimensions: 3.86 x 0.905 inches (L x W)
- Weight: 15g

## Calibration

Calibration Range



Detalles:

[https://wiki.dfrobot.com/Capacitive\\_Soil\\_Moisture\\_Sensor\\_SKU\\_SEN019](https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN019)





---

Descripción	Unidad
Técnica de transmisión	FHSS
Tecnología de transmisión	UNB (Ultra narrow band) - Sigfox
Canales de transmisión	54 canales (9 macro-canales x 6 micro-canales)

---