



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO  
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA IOT PARA EL CONTROL Y  
AUTOMATIZACIÓN DE UN PROTOTIPO DE VOLTEADORA DE COMPOST**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero en Electrónica y Automatización

**AUTORES:** Darwin Sebastian Naranjo Ponce

Paul Ariel Tigse Pachacama

**TUTOR:** Carlos Germán Pillajo Angos

Quito-Ecuador

2026

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Nosotros, Darwin Sebastian Naranjo Ponce con documento de identificación N° 2351001033 y Paúl Ariel Tigse Pachacama con documento de identificación N° 1726651183; manifestamos que:

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

Quito, 05 de marzo del año 2026

Atentamente,



---

Darwin Sebastian Naranjo Ponce

2351001033



---

Paúl Ariel Tigse Pachacama

1726651183

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

Nosotros, Darwin Sebastian Naranjo Ponce con documento de identificación N° 2351001033 y Paúl Ariel Tigse Pachacama con documento de identificación N° 1726651183, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Diseño e implementación de un Sistema IoT para el control y automatización de un prototipo de volteadora de compost”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Electrónica y Automatización, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Quito, 05 de marzo del año 2026

Atentamente,



---

Darwin Sebastian Naranjo Ponce  
2351001033



---

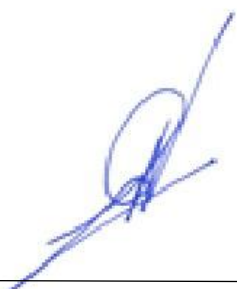
Paúl Ariel Tigse Pachacama  
1726651183

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Carlos Germán Pillajo Angos con documento de identificación N° 1709255119, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA IOT PARA EL CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE UN PROTOTIPO DE VOLTEADORA DE COMPOST, realizado por Darwin Sebastian Naranjo Ponce con documento de identificación N° 2351001033 y por Paúl Ariel Tigse Pachacama con documento de identificación N° 1726651183, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 05 de marzo del año 2026

Atentamente,



---

Ing. Carlos Germán Pillajo Angos. PhD

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>5</b>
PROBLEMA .....	5
ANTECEDENTES .....	5
IMPORTANCIA Y ALCANCES .....	7
DELIMITACIÓN.....	7
OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	8
REVISIÓN DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	9
1.1.1 Contexto de la Tecnificación en la Agricultura Rural .....	9
1.1.2 Fundamentos Termodinámicos y Bioquímicos del Compostaje .....	9
1.1.3 Hardware de Control y Comunicaciones en Entornos Hostiles.....	10
1.1.4 Protocolo de Red, Topología y Normativa.....	11
1.1.5 Control Industrial y Aislamiento de Potencia .....	12
1.1.6 Automatización de Maquinaria de Volteo .....	13
1.1.7 Estado del Arte e Investigaciones Relacionadas .....	13
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>15</b>
MARCO METODOLÓGICO.....	15
2.1.1 Enfoque metodológico.....	15
2.1.2 Descripción del Prototipo y Selección de Variables Clave.....	16
2.1.3 Diseño de la Red de Comunicaciones y Enfoque LoRa .....	17
2.1.4 Diseño e Integración Electrónica del Nodo IoT.....	17
2.1.5 Diseño del Software y Control en el Borde.....	19
2.1.6 Implementación de la Lógica de Control Industrial en PLC LOGO 8.....	20
2.1.7 Creación de la Interfaz HMI en Node-RED.....	21
2.1.8 Ensayos de Validación y Evaluación de Calidad de Servicio.....	24
RESULTADOS.....	25
2.2.1 Evaluación del Rendimiento del Enlace LoRa (RSSI y SNR).....	26
2.2.2 Pruebas de Precisión en la Lectura de Sensores e Instrumentación .....	27
2.2.3 Evaluaciones de Latencia y Respuesta del Control (PLC y LoRa).....	27
2.2.4 Validación de la Lógica de Control y Cambio de Giro en PLC LOGO 8.....	29
2.2.5 Pruebas de la Interfaz de Supervisión (Node-RED).....	30
2.2.6 Pruebas Integrales del Sistema (Hardware + Software).....	31

2.2.7 Comparación con Métodos Tradicionales y Estudio de Viabilidad .....	33
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>34</b>
CRONOGRAMA .....	34
PRESUPUESTO .....	35
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>36</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>38</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>39</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>46</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Comparación RSSI y SNR .....	26
Tabla 2. 2 Pruebas realizadas y los resultados de los tiempos de reacción para los comandos de "Marcha", "Paro" e "Inversión de Giro".....	28
Tabla 2. 3 Pruebas de actuadores, sensores, controlador y comunicación. ....	32
Tabla 2. 4 Cronograma .....	34
Tabla 2. 5 Presupuesto.....	35

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema completo del sistema .....	16
Figura 2.2 Esquemático placa PCB módulo LoRa .....	18
Figura 2.3 Esquemático pistas PCB .....	19
Figura 2.4 Interfaz de monitoreo de temperatura y humedad.....	22
Figura 2.5 Interfaz Control Maestro .....	22
Figura 2.6 Interfaz de Desplazamiento.....	23
Figura 2.7 Diagrama de flujo en Node-RED .....	24
Figura 2.8 Interfaz de NODE-RED .....	30
Figura 2.9 Diagrama de flujos de Node-RED .....	31
ANEXO 1 Esquema del circuito del módulo LoRa .....	44
ANEXO 2 Diagrama de Bloques de Funciones (FUP) para la Inversión de Giro en LOGO! Soft Comfort. ....	45

## **RESUMEN**

Este trabajo constituye un progreso significativo en la digitalización del proceso de compostaje dentro del ámbito agroindustrial, ya que combina tecnologías de Internet de las Cosas, sensores, actuadores y una interfaz gráfica creada en Node-RED para la gestión y automatización de un prototipo de máquina volteadora de compost. La propuesta permite la supervisión en tiempo real de variables operativas esenciales como temperatura, humedad y velocidad, lo que ayuda a minimizar los riesgos relacionados con el sobrecalentamiento, el desequilibrio en la humedad y los fallos que ocurren por la falta de supervisión constante. Asimismo, al incluir la gestión a distancia y la trazabilidad digital, se optimiza la toma de decisiones y se reducen los periodos de inactividad causados por el mantenimiento reactivo, lo que incrementa la eficiencia del proceso.

Esta investigación se alinea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), al fomentar la innovación tecnológica y la infraestructura inteligente, evidenciando la utilidad de la ingeniería electrónica y el Internet de las Cosas para actualizar los procesos productivos y avanzar hacia modelos más sostenibles y eficaces.

## **PALABRAS CLAVES**

Internet de las Cosas (IoT), Node-RED, Volteadora de compost, Monitoreo en tiempo real y Trazabilidad digital

## **ABSTRACT**

This work constitutes a significant step forward in the digitalization of the composting process within the agro-industrial sector, as it combines Internet of Things technologies, sensors, actuators, and a graphical interface developed in Node-RED for the management and automation of a compost turner machine prototype. The proposed solution enables real-time monitoring of essential operating variables such as temperature, humidity, and speed, which helps minimize risks related to overheating, moisture imbalance, and failures caused by the lack of continuous supervision. Likewise, by incorporating remote management and digital traceability, decision-making is improved and downtime periods caused by reactive maintenance are reduced, thereby increasing process efficiency.

This research aligns with Sustainable Development Goal 9 (Industry, Innovation and Infrastructure) by promoting technological innovation and smart infrastructure, demonstrating the usefulness of electronic engineering and the Internet of Things to modernize production processes and move toward more sustainable and efficient models.

## **KEY WORDS**

Internet of Things (IoT), Node-RED, Compost Turner, Real-time monitoring y Digital traceability

## INTRODUCCIÓN

Ecuador cuenta con una activa industria agropecuaria que constantemente produce residuos orgánicos como resultado de sus actividades agrícolas, ganaderas y de procesamiento de alimentos. En este contexto, el compostaje se ha convertido en una alternativa sostenible que transforma estos desechos en abono orgánico, mejora la calidad del suelo y reduce el daño al medio ambiente generado por un manejo inadecuado de los residuos. Sin embargo, para lograr que este proceso sea realmente eficiente y produzca compost de buena calidad, es esencial controlar las condiciones durante la descomposición, ya que variaciones en factores como la temperatura y la humedad pueden afectar el rendimiento, alargar el tiempo de tratamiento y ocasionar pérdidas en la operación.

En comunidades que están comprometidas con el compostaje, como El Salinerito, la producción de abono orgánico se presenta como una oportunidad importante para fortalecer prácticas agrícolas sostenibles y mejorar el uso de recursos locales. No obstante, uno de los principales retos en la práctica diaria es la necesidad de supervisión constante del proceso y la toma de medidas correctivas de forma oportuna, especialmente cuando el volteo del material se hace de manera manual o con equipos que carecen de información en tiempo real. Esta limitación puede resultar en un proceso inconsistente, con problemas de exceso de calor, desbalance en la humedad o ciclos de volteo poco eficientes, lo que incrementa el trabajo operativo y reduce la continuidad de la labor.

Para abordar esta situación, la adopción de tecnologías para la automatización y el monitoreo aparece como una solución efectiva para mejorar la gestión del compostaje en entornos comunitarios. La integración de sensores y sistemas de control permite monitorear variables operativas en tiempo real, guardar datos históricos y llevar a cabo acciones con mayor precisión, reduciendo la necesidad de supervisión humana. De este modo, se pueden optimizar los ciclos operativos, minimizar interrupciones por fallos o por correcciones tardías, y mejorar la seguridad del proceso, manteniendo un control más uniforme sobre las condiciones que inciden en la calidad del compost.

Con esta perspectiva, este trabajo propone el diseño y la implementación de un sistema IoT para el control y automatización de un prototipo de volteadora de compost, conectando controladores con una interfaz gráfica desarrollada en Node-RED para el monitoreo y la gestión operativa en tiempo real. Este sistema permitirá seguir de cerca

variables fundamentales como la temperatura, la humedad y la velocidad, además de facilitar el manejo remoto del prototipo, proporcionando una herramienta tecnológica que puede ser ampliada y adaptada a las necesidades de El Salinerito.

El propósito de esta propuesta es beneficiar a la comunidad mediante una solución que mejore la eficiencia operativa, reduzca el esfuerzo físico asociado al volteo y simplifique la toma de decisiones basadas en información, favoreciendo un proceso de compostaje más controlado, continuo y sostenible. De esta manera, el prototipo se presenta como un primer paso hacia la modernización del compostaje en la comunidad, fortaleciendo la capacidad local para incorporar tecnologías accesibles que impulsen la productividad y la conservación del entorno.

# CAPÍTULO 1

## **Problema**

En el sector agroindustrial, el compostaje ha llegado a ser una práctica fundamental para la preservación del medio ambiente, ya que convierte desechos orgánicos en fertilizantes naturales. Sin embargo, las máquinas industriales para el compostaje a menudo carecen de un sistema completo de análisis y control, lo que provoca ineficiencias en su funcionamiento, peligros de sobrecalentamiento, desequilibrio en la humedad y un uso ineficaz de la energía eléctrica (Kagermann et al., 2013). La falta de seguimiento digital dificulta el monitoreo en tiempo real de variables cruciales del proceso, como la temperatura, la humedad y la velocidad de giro. Esta limitación resulta en una baja productividad, mantenimiento reactivo y períodos prolongados de inactividad.

Adicionalmente, los trabajadores no cuentan con la información necesaria para tomar decisiones de manera oportuna. Los métodos de control manual no conservan un historial de datos, lo que impide realizar análisis comparativos y identificar patrones de fallo (Beliatis et al., 2021). Ante esta situación, la adopción de tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) y de sistemas de monitoreo a distancia se presenta como una solución efectiva para aumentar la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad en el proceso de compostaje.

## **Antecedentes**

La raíz de los problemas tecnológicos en la agroindustria de Salinas de Guaranda no surge de manera reciente, sino que es el resultado de un proceso de desarrollo que se remonta a las décadas de 1970 y 1980. A lo largo de la historia, el crecimiento productivo de la región, promovido por la asistencia técnica internacional y las misiones salesianas, se enfocó en una fase de mecanización conocida como "Agroindustria 2. 0". En este periodo, se dio preferencia a la entrega de maquinaria robusta ("hierro") para actividades como la producción de quesos y dulces, permitiendo reemplazar la tracción manual por sistemas electromecánicos sencillos. No obstante, esta modernización inicial dio lugar a la formación de "islas de automatización": equipos que funcionan eficazmente de forma independiente, pero que carecen de la habilidad para generar

datos integrados o comunicarse externamente, lo que restringe la toma de decisiones gerenciales basadas en información actualizada.

A esta desconexión tecnológica se suma un desafío estructural causado por el entorno geográfico. Salinas de Guaranda, situada en las laderas de la Cordillera Occidental a una altitud promedio de 3.550 m. s. n. m., presenta un relieve accidentado caracterizado por formaciones rocosas y valles profundos. Esta configuración geográfica es la causa principal de los problemas de conectividad, ya que las montañas crean zonas de sombra que bloquean la línea de visión directa (LoS). La efectividad de las redes celulares comerciales (PLMN) y tecnologías tradicionales como el WiFi se ha visto comprometida en este contexto, enfrentando fuertes atenuaciones debido a la difracción y obstrucción en la zona de Fresnel, lo que ha dejado a las unidades productivas dispersas sin una infraestructura confiable para la transmisión de información.

El modelo socioeconómico de "El Salinerito" también influye en la naturaleza del problema. A diferencia de la industria convencional que es centralizada, este enfoque de Economía Popular y Solidaria funciona a través de una red descentralizada de micro-fábricas y centros de recolección diseminados en el área rural. Aunque esta descentralización ha tenido éxito socialmente, ha dificultado la gestión técnica integrada. La escasez de personal especializado en mecatrónica y redes dentro de la región rural ha mantenido una brecha de conocimientos, donde el mantenimiento de sistemas electrónicos avanzados depende de técnicos externos, lo que aumenta los tiempos de inactividad y la vulnerabilidad de la producción.

Finalmente, las causas de los fallos frecuentes en intentos anteriores de digitalización se deben a la agresividad química del entorno. Los métodos de compostaje y el tratamiento de sueros lácteos típicos de la región generan un ambiente rico en agentes corrosivos como el amoníaco y el sulfuro de hidrógeno. Sumado a la alta humedad y las bajas temperaturas del páramo, este entorno provoca fenómenos de corrosión acelerada y fallos intermitentes en equipos electrónicos convencionales (como Creep Corrosion). La combinación de una geografía que interfiere con las señales, la dispersión operativa de las unidades productivas y un ambiente adverso para el hardware electrónico constituye la base del problema que este proyecto busca abordar a través de la implementación de tecnologías LPWAN robustas.

## **Importancia y alcances**

La adecuada gestión de desechos orgánicos constituye uno de los retos más importantes para el progreso agroindustrial en las áreas rurales de Ecuador. En lugares productivos como Salinas de Guaranda (El Salinerito), la conversión de residuos a través del compostaje es esencial para su modelo de Economía Circular. Sin embargo, este procedimiento enfrenta serias limitaciones tecnológicas: la geografía irregular de la región y la escasa cobertura de redes celulares dificultan la implementación de sistemas de monitoreo convencionales, lo que obliga a una gestión manual que es ineficiente y susceptible a errores en la supervisión de la calidad del abono.

Este trabajo de titulación se enfoca en el desarrollo y creación de un prototipo de volteadora de compost automatizada. La solución incorpora la robustez de un PLC LOGO 8 para el manejo de energía y la tecnología LoRa para comunicaciones a larga distancia.

Esta propuesta es significativa porque valida una arquitectura tecnológica diseñada especialmente para superar los obstáculos de conectividad en áreas rurales como Salinas. Aunque la validación se lleve a cabo en un entorno controlado, el diseño está orientado a beneficiar en el futuro a comunidades agroindustriales, mostrando que es posible aplicar tecnología en regiones geográficas complejas, garantizando trazabilidad y operación remota sin requerir infraestructuras de telecomunicaciones costosas o que no existen.

## **Delimitación**

La creación del prototipo y las pruebas experimentales junto con la validación funcional se realizarán en las instalaciones de la Universidad Politécnica Salesiana, Campus Sur, ubicada en la ciudad de Quito. En particular, se emplearán los laboratorios de la carrera de Electrónica y Automatización para ensamblar el sistema, además de utilizar las áreas abiertas del campus para llevar a cabo las pruebas de alcance y estabilidad de la comunicación LoRa, replicando así las condiciones de transmisión a larga distancia que serán necesarias para la aplicación final.

La ejecución del proyecto abarcará un período que va desde octubre de 2025 hasta enero de 2026, abarcando todas las etapas, desde el diseño ingenieril detallado hasta la verificación de los resultados experimentales en el campus universitario.

La investigación se sitúa en el ámbito de la Automatización Industrial enfocada en la Agrotecnología. El trabajo se restringe al desarrollo de un prototipo funcional, que confirme la integración de las tecnologías de control industrial junto con la comunicación IoT (LoRa/ESP32), aplicadas al proceso de compostaje.

El proyecto se lleva a cabo bajo la normativa y supervisión de la Universidad Politécnica Salesiana. El límite institucional se enfoca en la entrega de una solución tecnológica que cuente con la validación académica, la cual podrá servir como base para futuras implementaciones o expansiones industriales en comunidades beneficiarias, como El Salinerito.

### **Objetivos del proyecto**

#### **Objetivo general**

- Desarrollar un sistema IoT para el control y automatización de un prototipo de volteadora de compost integrando controladores con una interfaz gráfica desarrollada en Node-RED, con el propósito de la optimización del manejo operativo del proceso de compostaje.

#### **Objetivos específicos**

- Realizar una investigación bibliográfica en base de datos académicas relevantes sobre los fundamentos del IoT y automatización industrial, para el establecimiento de las bases teóricas y tecnológicas necesarias en el desarrollo del sistema propuesto.
- Integrar el sistema IoT, mediante sensores, actuadores, módulos de comunicación y controladores en el prototipo, que permitan la gestión remota de las variables operativas de la volteadora de compost.
- Implementar la comunicación y programación del prototipo mediante Node-RED para el manejo operativo del prototipo en tiempo real.
- Ejecutar pruebas de comunicación y funcionamiento del prototipo implementado, evaluando la confiabilidad de la transmisión de datos, la respuesta de los actuadores y la eficiencia del control de la volteadora de compost simulando condiciones reales de operación.

## **Revisión de la literatura o fundamentos teóricos.**

### **1.1.1 Contexto de la Tecnificación en la Agricultura Rural**

La actualización del ámbito agroindustrial, dentro del contexto de la Cuarta Revolución Industrial y la Agricultura de Precisión, tiene como propósito aumentar la eficacia en la producción a través de decisiones fundamentadas en datos. No obstante, la adopción de estos sistemas se enfrenta a un obstáculo estructural importante en el Sur Global: la disparidad digital y de infraestructura. Mientras que las soluciones estándar de IoT dependen de sistemas centralizados basados en la nube que exigen una conectividad LTE/4G constante, la realidad en áreas rurales de naciones como Ecuador muestra regiones con cobertura irregular o ausente.

Esta restricción es especialmente crítica en los centros de compostaje, que, debido a regulaciones de zonificación y control de plagas y olores, suelen situarse en las afueras de las áreas agrícolas, lejos de los enlaces de redes de comunicación tradicionales. En este escenario, la adopción de redes de largo alcance y bajo consumo se presenta como la única alternativa posible. En particular, la tecnología LoRa hace posible el desarrollo de un "Internet de las Cosas", en el cual la recolección de datos y el control de la maquinaria se realizan en una red privada que no está conectada a la internet global. Esta independencia tecnológica es fundamental no solo para garantizar la operativa continua, sino también para proteger el medio ambiente, ya que la falta de supervisión en tiempo real del proceso de compostaje frecuentemente conduce a condiciones anaerobias, lo que genera metano, un gas de efecto invernadero cuyo potencial de calentamiento global es 25 veces superior al del dióxido de carbono.

### **1.1.2 Fundamentos Termodinámicos y Bioquímicos del Compostaje**

El compostaje se define como una técnica de descomposición controlada de diversos materiales orgánicos en su estado sólido, que involucra una serie de microorganismos que prosperan en temperaturas moderadas y cálidas. Para que un sistema automatizado funcione de manera óptima, es fundamental que preserve el equilibrio en la fórmula estequiométrica del proceso de descomposición aeróbica, asegurándose de que el oxígeno no se convierta en un factor limitante para la reacción.

Este proceso se divide en tres etapas térmicas que el sistema de monitoreo debe identificar:

- **Fase Mesofílica:** Esta es la primera etapa donde microorganismos como bacterias y hongos descomponen compuestos solubles simples, como azúcares y almidones. Este procedimiento genera calor, lo que resulta en un aumento rápido de la temperatura. Un error común en la gestión manual consiste en voltear la mezcla demasiado pronto durante esta fase, provocando la pérdida del calor necesario para progresar a la siguiente etapa importante.
- **Fase Termofílica:** Esta fase se considera la etapa de desinfección. Las regulaciones a nivel internacional requieren que la biomasa se mantenga por encima de los 55°C durante un periodo de al menos 3 a 4 días continuos para asegurar la eliminación de patógenos entéricos, como E. coli y Salmonella, y para inactivar semillas de malezas. Por otro lado, temperaturas que superan los 70°C pueden ser perjudiciales, puesto que pueden eliminar el microbiota beneficioso y aumentar el riesgo de combustión espontánea o una mineralización excesiva del nitrógeno.
- **Fase de Maduración o Enfriamiento:** La actividad biológica comienza a disminuir y la temperatura se ajusta para estabilizarse en niveles cercanos a la temperatura del ambiente. En este punto, el control de la humedad se convierte en la variable más importante para facilitar la polimerización de las sustancias húmicas.

La obtención precisa de datos sobre la humedad constituye un reto técnico considerable. Cuando los niveles están por debajo del 30%, se dificulta la actividad metabólica debido a la sequedad, mientras que niveles que superan el 65% saturan los poros de la estructura sólida, lo que impide el intercambio de gases y provoca putrefacción anaeróbica. Los documentos técnicos desaconsejan el empleo de sensores resistivos debido a su rápida destrucción por electrólisis y corrosión ácida, prefiriendo tecnologías capacitivas o de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) que evalúan la constante dieléctrica del ambiente sin necesidad de contacto eléctrico directo.

### 1.1.3 Hardware de Control y Comunicaciones en Entornos Hostiles

La infraestructura de hardware para la automatización agrícola debe lograr un balance entre un bajo consumo energético y una alta resistencia industrial. En lo que se refiere a la captura de datos, el microcontrolador ESP32 se ha establecido como el estándar en investigaciones por su arquitectura de doble núcleo; uno de los procesadores gestiona la

red LoRaWAN y el otro se encarga de los sensores, asegurando modos de bajo consumo que son cruciales para nodos alimentados por energía solar.

Se utiliza LoRa (Long Range) como un tipo de modulación, que tiene su origen en un método militar conocido como espectro ampliado. A diferencia de las modulaciones tradicionales (ASK/FSK), LoRa convierte la información en “chirps” (señales sinusoidales con frecuencia que varía linealmente a lo largo del tiempo). Un chirp sencillo puede ser descrito matemáticamente como una señal compleja donde la frecuencia instantánea  $f(t)$  varía linealmente a un ritmo  $\mu$ .

La eficacia del sistema depende del Factor de Expansión (SF) y el Ancho de Banda (BW). Al incrementar el SF, la tasa de bits disminuye, pero se logra una ganancia de procesamiento relevante ( $G_p = 10 \log_{10}(2^{SF})$ ). Esto permite decodificar señales que están por debajo del nivel de ruido térmico (-174 dBm/Hz), cumpliendo con la ecuación de sensibilidad del receptor (S) que tiene en cuenta la Figura de Ruido (NF) y un SNR límite (hasta -20 dB para SF12). Esta capacidad es fundamental para asegurar el Link Budget necesario para atravesar densas capas de biomasa o cubrir largas distancias sin necesidad de línea de vista. Estudios recientes han evaluado el medio de transmisión en una pila de compost, encontrando que la atenuación de la señal de radiofrecuencia (RF) es considerable debido al elevado contenido de humedad y a la densidad de la biomasa. Por esta razón, es indispensable utilizar bandas de frecuencia Sub-GHz (como 915 MHz en América), ya que las longitudes de onda más largas son más efectivas al atravesar material orgánico en comparación con las frecuencias de 2.4 GHz (WiFi/Bluetooth).

En el ámbito de actuación y alimentación, especialmente para el control de motores trifásicos en voltadoras, los microcontroladores a menudo sirven como controles para los Controladores Lógicos Programables (PLC). Esta división asegura que la lógica de seguridad crítica (como paradas de emergencia y protección térmica de motores) esté contenida en hardware industrial certificado, que es protegido contra el ruido electromagnético, mientras que la lógica de monitorización y control remoto se encuentra en el sistema IoT.

#### **1.1.4 Protocolo de Red, Topología y Normativa**

Sobre la capa física funciona LoRaWAN, que establece cómo se controla el acceso al medio (MAC). La red emplea una topología en forma de Estrella-de-Estrellas, donde los nodos envían transmisiones tipo broadcast a los gateways. Para optimizar la duración de

la batería, se elige la Clase A, en la que el nodo se mantiene en modo de bajo consumo y solo abre dos intervalos de recepción (RX1, RX2) después de realizar una transmisión. El firmware debe elaborar paquetes que cumplan con la norma, que deben incluir un Preamble para la sincronización y un PHYPayload que tenga datos cifrados (AES-128) y un Código de Integridad (MIC).

En cuanto a la regulación, el diseño se ajusta al Plan Nacional de Frecuencias de ARCOTEL (Ecuador). Debido a que la banda baja de 900 MHz presenta interferencias con redes celulares, se ajusta el transceptor para el plan de canales AU915 (o sub-banda 2 de US915), funcionando específicamente en el rango de 915-928 MHz.

### **1.1.5 Control Industrial y Aislamiento de Potencia**

Si bien los microcontroladores y sistemas embebidos como el ESP32 son muy eficientes para manejar telemetría y conectividad inalámbrica, no tienen la resistencia eléctrica necesaria para controlar directamente cargas inductivas de gran potencia en ambientes agroindustriales ruidosos. Por esta razón, el diseño del sistema utiliza un enfoque combinado que asigna la etapa de potencia y control a un Controlador Lógico Programable (PLC). En este trabajo, se optó por el módulo lógico inteligente Siemens LOGO 8. Este aparato, conocido como "nano-PLC", se caracteriza por su elevada resistencia a las interferencias electromagnéticas (EMI) generadas durante el arranque de motores, lo cual es fundamental, ya que las placas de desarrollo estándar podrían sufrir apagones inesperados o fallos.

La decisión de utilizar el LOGO 8 se fundamenta en su capacidad para ejecutar lógica de control determinista. A diferencia del código en un microcontrolador, que puede verse afectado por la latencia en la red o por excepciones en el software, el PLC opera mediante un ciclo de escaneo que es constante y predecible. Esto garantiza que los tiempos de respuesta sean fiables para funciones de seguridad críticas, como las paradas de emergencia, los enclavamientos mecánicos para la inversión de giro de las máquinas volteadoras y la protección térmica de los motores. Al utilizar un estándar industrial de instalación en riel DIN y funcionando con voltajes robustos (como 12/24V DC o 110/220V AC), el PLC actúa como una protección que preserva la integridad mecánica del prototipo.

Para lograr una integración eficaz entre la lógica de bajo voltaje del nodo IoT y la lógica industrial del PLC, es esencial establecer una etapa de desacoplamiento físico mediante

relés de interfaz. El relé electromecánico juega un papel vital al proporcionar un aislamiento galvánico completo entre el circuito de control (ESP32) y la fase de potencia. Este tipo de aislamiento asegura que no haya un camino conductor directo, protegiendo así el microcontrolador de transitorios de alto voltaje, picos de corriente y fuerzas contraelectromotrices (back-EMF) causadas por las bobinas de los contactores o motores. En este contexto, el ESP32 activa la bobina del relé con baja potencia, mientras que los contactos secos del relé cierran el circuito de entrada del PLC, lo que facilita una operación híbrida que resulta segura y confiable.

### **1.1.6 Automatización de Maquinaria de Volteo**

La mecanización del proceso de volteo es esencial para garantizar que la pila se mezcle adecuadamente y reciba el oxígeno que necesita. Existen diversos tipos de maquinaria, que van desde máquinas autoportantes diseñadas para tuneles hasta equipos que pueden acoplarse a tractores agrícolas. En el área de la automatización offline, el reto radica en dotar a estas máquinas de una "inteligencia local".

Los sistemas modernos incluyen sensores de presión hidráulica o eléctrica en el rotor de la máquina de volteo. Cuando la máquina nota que hay una resistencia elevada (material muy denso), el sistema de control ajusta la velocidad automáticamente para prevenir el atasco del motor, lo que se conoce como control adaptativo de carga. En áreas rurales de economías en desarrollo, como se ha observado en estudios realizados en Ecuador y México, la tendencia apunta hacia la actualización de maquinaria ya existente. Esto significa que se están equipando volteadoras hidráulicas convencionales con nodos LoRa que reciben señales de inicio y parada basadas en la necesidad biológica de la pila, en lugar de seguir horarios fijos que resultan ineficaces.

### **1.1.7 Estado del Arte e Investigaciones Relacionadas**

La revisión de estudios recientes muestra una tendencia global hacia el uso de soluciones IoT descentralizadas en el sector agrícola. El proyecto Compoball de la Unión Europea se convirtió en un referente al resolver el problema del cableado en las pilas, creando sensores inalámbricos esféricos flotantes y validando modelos matemáticos para compensar el retraso térmico causado por las cubiertas protectoras.

En América Latina, resalta el proyecto Smart Garden de la Universidad de la República en Uruguay, que demostró de manera exitosa una arquitectura de Edge Computing empleando contenedores Docker en servidores locales para procesar redes LoRaWAN.

Esto evidencia que no es necesario depender de la nube para llevar a cabo la agricultura de precisión. A su vez, investigaciones en la Amazonía peruana y en los Andes de Ecuador han ratificado la posibilidad de establecer enlaces LoRa de gran alcance en terrenos difíciles, logrando coberturas de más de 5 km incluso con obstáculos en la línea de vista, lo que respalda la selección tecnológica para comunidades como El Salinerito. Por último, estudios sobre compostaje semiautomatizado en Brasil apoyan la idea de que los sistemas sencillos de control, basados en umbrales de temperatura, son más efectivos y fáciles de mantener a largo plazo en áreas rurales en comparación con los sistemas predictivos complejos que utilizan Inteligencia Artificial.

## CAPÍTULO 2

### MARCO METODOLÓGICO

#### 2.1.1 Enfoque metodológico.

El apartado que se presenta a continuación describe los pasos necesarios para crear el Sistema IoT destinado al control y automatización de un prototipo de volteadora de compost. La propuesta integra instrumentación de campo, módulos de comunicación de largo alcance (LoRa), controladores, sensores, actuadores y una interfaz gráfica a través de Node-RED, lo que permite el monitoreo y la gestión remota del proceso de compostaje. También se explican las herramientas y estrategias de integración electrónica y de programación que hacen posible verificar el funcionamiento del sistema conforme a los objetivos establecidos, asegurando que la solución propuesta mejore la eficiencia operativa y la trazabilidad digital de variables esenciales.

Esta iniciativa se fundamenta en un método cuantitativo, ya que se analizan variables que están conectadas al desempeño del sistema, incluyendo la fiabilidad en la transmisión de información, la reacción de los actuadores y la efectividad del control mientras el prototipo opera en tiempo real. Además, se aplica un enfoque práctico y tecnológico, dado que se realiza sobre un prototipo diseñado para proporcionar una opción moderna y económica para el sector agroindustrial. Para alcanzar este propósito, se combinan tecnologías emergentes relacionadas con la Industria 4. 0, especialmente IoT, comunicación digital y supervisión remota, facilitando un monitoreo constante de las variables operativas, como temperatura, humedad y velocidad, y brindando información útil para la toma de decisiones correctas.

En la actualidad, el proceso de compostaje se enfrenta a desafíos relacionados con la falta de un monitoreo integral y control a distancia, lo que genera ineficiencias en las operaciones, desequilibrios en variables clave y un mantenimiento que es reactivo. En este contexto, el proyecto sugiere una mejora centrada en la automatización parcial de la supervisión y control, incorporando un sistema IoT que posibilite la visualización en tiempo real de las variables, la realización de acciones operativas de forma remota y el mantenimiento de un registro digital del funcionamiento del prototipo, aumentando la eficiencia y minimizando errores causados por la intervención manual.

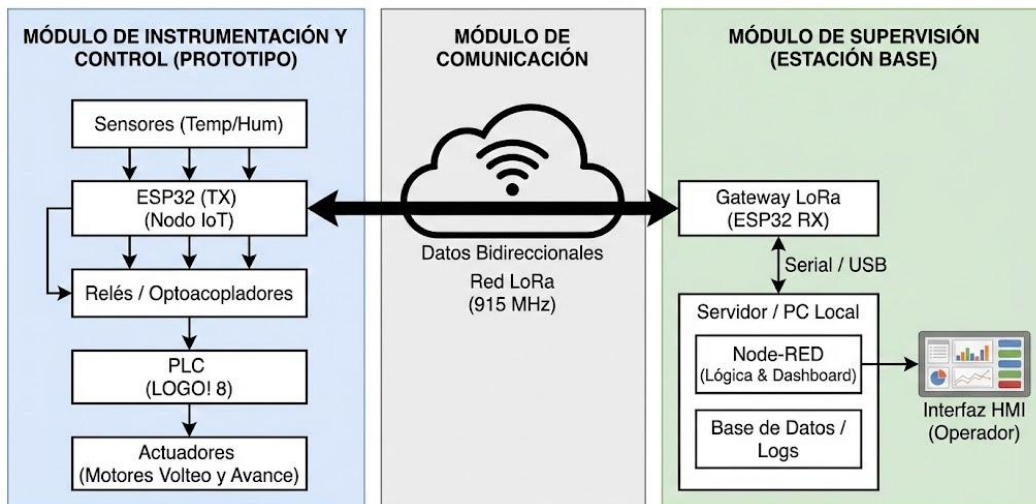


Figura 2.1 Esquema completo del sistema

Elaborado por Darwin Naranjo y Paul Tigse

El esquema anterior representa cómo opera el sistema IoT en su totalidad: inicia con la recolección de datos mediante los sensores instalados en el prototipo, esos datos luego son procesados y enviados a la plataforma de supervisión para su visualización y registro, mediante el nodo transmisor y la modulación LoRa hacia el nodo receptor. Desde la interfaz gráfica, se pueden emitir comandos de control para operar el prototipo en tiempo real, lo que facilita la gestión remota de las variables operativas. Por lo anterior, se define que el sistema se organiza en tres módulos principales: instrumentación y adquisición, comunicación y control, y supervisión/operación en Node-RED. A continuación, se detallan los procedimientos relacionados con cada uno de estos componentes.

### 2.1.2 Descripción del Prototipo y Selección de Variables Clave.

En esta etapa se establecen los parámetros que regulan la eficacia del proceso de compostaje y la seguridad del dispositivo electromecánico. Las variables primarias elegidas para el control son: temperatura, humedad relativa y la velocidad de giro del sistema de volteo.

La selección de estas variables se debe a la necesidad de preservar el equilibrio tanto térmico como biológico de la pila de compost. El sistema de medición se diseñará para resistir las adversidades del entorno agroindustrial, como el polvo, las vibraciones y la corrosión, eligiendo sensores que cuenten con un apropiado grado de protección e

integrándolos al microcontrolador principal a través de protocolos estandarizados como I2C, OneWire o analógicos.

### **2.1.3 Diseño de la Red de Comunicaciones y Enfoque LoRa.**

Para superar las limitaciones de alcance que presentan las redes WiFi-tradicionales en ambientes agrícolas, se establece un sistema de comunicación inalámbrica que utiliza tecnología LoRa (Long Range) y módulos transceptores SX127x controlados por microcontroladores ESP32. Esta fase es esencial para asegurar la integridad de los datos a distancias extensas.

La estrategia de comunicación aborda los problemas de atenuación y ruido a través de las siguientes tácticas de diseño:

- **Configuración del Enlace de Radio:** Ajuste variable del Spreading Factor (SF) y el Ancho de Banda (BW) para equilibrar la velocidad de transmisión de datos con la receptividad. Se opta por un SF elevado para garantizar el alcance, a pesar de que esto implique una reducción en la velocidad de transmisión.
- **Protocolo de Confirmación:** Implementación de un sistema de reenvío y Acknowledge (ACK) a nivel de firmware. Si el nodo que envía no recibe confirmación del Gateway, intentará enviar los datos nuevamente, reduciendo la pérdida de paquetes común en transmisiones UDP o sin conexión.
- **Optimización de Antenas:** Evaluación de la adaptación de impedancia y ubicación de las antenas para maximizar la Zona de Fresnel, disminuyendo las áreas sin cobertura en la zona de trabajo.

### **2.1.4 Diseño e Integración Electrónica del Nodo IoT.**

Para asegurar la solidez física del nodo de control y prevenir fallos esporádicos vinculados a conexiones temporales (como las empleadas en un protoboard) en un ambiente donde se producen vibraciones mecánicas, como sucede en una máquina volteadora, se llevó a cabo el diseño y fabricación de una placa de circuito impreso (PCB) específica.

El proyecto comenzó con la creación de un esquema electrónico detallado, empleando herramientas para el diseño asistido por computadora (EDA). Se incorporó como unidad

central de procesamiento el módulo Heltec WiFi LoRa 32 V3, beneficiándose de su diseño compacto y su pantalla OLED incorporada.

En el Anexo 1 diagrama electrónico se puede observar cómo se establecieron las conexiones entre los pines GPIO del microcontrolador y los distintos periféricos del sistema. Se asignaron puertos concretos para leer el sensor DHT22 (Temperatura y Humedad), terminales para la comunicación I2C con la pantalla OLED auxiliar y un grupo de salidas digitales destinadas a activar los relés que controlan al PLC. Además, se añadieron entradas para pulsadores (P2-P8), facilitando pruebas manuales y ajustes en el lugar.

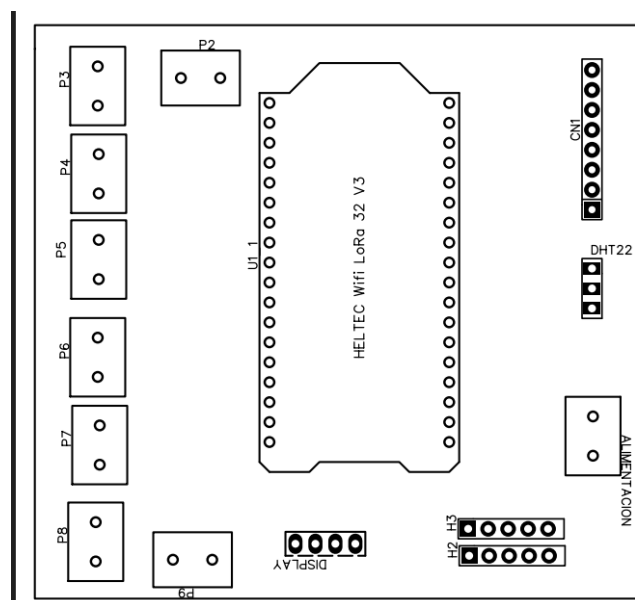


Figura 2.2 Esquemático placa PCB módulo LoRa

Elaborado por Darwin Naranjo y Paul Tigse

Más adelante, se llevó a cabo el diseño del layout de la PCB, organizándola como una placa portadora.

En la disposición de los componentes, se colocaron terminales de conexión robustos (CN1, Alimentación, Salidas a Relés) alrededor de la placa para simplificar el cableado industrial hacia el PLC LOGO 8 y la fuente de alimentación externa. El diseño de las pistas de cobre fue optimizado para garantizar la claridad de la señal.

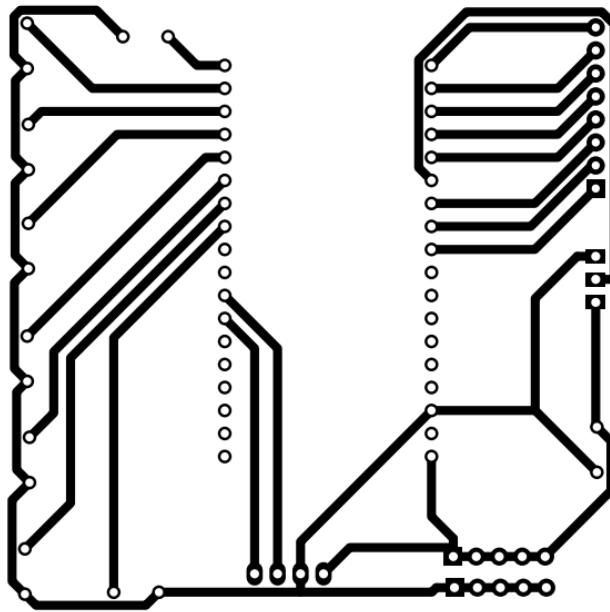


Figura 2.3 Esquemático pistas PCB

Elaborado por Darwin Naranjo y Paul Tigse

Se implementaron pautas de diseño para reducir la interferencia electromagnética, realizando un enrutamiento directo y ordenado entre el microcontrolador y las etapas de optoacoplamiento. Las pistas de alimentación se dimensionaron para manejar la corriente necesaria sin experimentar caídas de tensión, y se separaron las señales de control de 3.3V de las áreas de potencia. Esta implementación física es crucial para alcanzar una operación confiable y mediciones de latencia estables, eliminando el ruido eléctrico como factor de error en la comunicación con el PLC.

### 2.1.5 Diseño del Software y Control en el Borde.

Después de establecer la conexión física, se crea una lógica de control descentralizada que enfatiza la seguridad y la autonomía del sistema. A diferencia de las configuraciones que dependen de un servidor central en la nube, este modelo permite al controlador local operar de manera autónoma, realizando paradas de emergencia o tareas esenciales incluso si la conexión con el servidor se interrumpe. Esta estrategia de Edge Computing asegura que la integridad del prototipo no se vea comprometida por fallos en la red de comunicación, permitiendo que continúe funcionando de forma segura y constante.

La arquitectura del software está organizada en tres subsistemas conectados entre sí. En primer lugar, el módulo de recolección y preprocesamiento se encarga de leer los

sensores y aplicar filtros digitales, como el promedio móvil, para eliminar el ruido eléctrico presente en el entorno antes de proceder al análisis de los datos. Después, el módulo que gestiona las comunicaciones compila la información en tramas binarias compactas, mejorando el uso del ancho de banda y disminuyendo considerablemente el tiempo de transmisión del módulo LoRa, lo cual es esencial para conservar energía y minimizar colisiones en la red. Finalmente, un subsistema de supervisión en Node-RED se encarga de interpretar esta información, descodificando las tramas que recibe para su visualización y gestión en la base de datos histórica.

Para el entrenamiento de la red neuronal convolucional Yolo versión 5, cuyo entorno de entrenamiento es Google Colab por las prestaciones de software y hardware virtuales que ofrece dicho entorno, para ello se utilizó un tutorial de entrenamiento facilitado por el creador de la red neuronal, Ultralytics. Este tutorial se enfoca en facilitar los pasos del entrenamiento de la red de la red neuronal, teniendo en cuenta que se sube el dataset generado en formato Zip al entorno donde se debe descomprimir este archivo para ser usado en el entrenamiento.

#### **2.1.6 Implementación de la Lógica de Control Industrial en PLC LOGO 8.**

Con el objetivo de asegurar la operatividad y la protección de los componentes electromecánicos de la volteadora, se utiliza un autómata programable Siemens LOGO 8 como el corazón del control de energía. La configuración de este aparato se lleva a cabo a través del software LOGO Soft Comfort, utilizando el lenguaje de Diagrama de Función (FUP) para organizar las secuencias de activación, enclavamiento y seguridad.

La lógica creada en el PLC tiene como objetivo principal controlar el arranque directo y la inversión de rotación de los motores, funcionando como un puente sólido entre las señales de bajo voltaje que provienen del sistema IoT (ESP32) y la unidad de potencia. Se programan bloques de funciones específicas que integran temporizadores para evitar cambios repentinos de sentido de giro que podrían perjudicar la transmisión mecánica, así como relés de autoenclavamiento que garantizan la continuidad del funcionamiento hasta recibir una orden de detención.

Además, se añade a la programación del PLC una lógica de seguridad que tiene prioridad. Esta configuración asegura que, en caso de que se activen paradas de emergencia manuales o se identifiquen fallos de temperatura en los motores, el

autómata interrumpa de forma inmediata el flujo de energía, sin tener en cuenta las instrucciones remotas que pudiera estar enviando el sistema IoT. Así, el PLC LOGO 8 ofrece un nivel de aislamiento galvánico y estabilidad industrial, garantizando que el control fundamental de la maquinaria no dependa exclusivamente de la confiabilidad de la red wireless.

### **2.1.7 Creación de la Interfaz HMI en Node-RED.**

La Interfaz Hombre-Máquina (HMI) fue desarrollada con la plataforma Node-RED, seleccionada por su enfoque en eventos y su programación gráfica de flujos. Esta herramienta actúa como el núcleo de monitoreo del sistema, reuniendo información del enlace LoRa mediante una conexión serial/USB proveniente del Gateway y controlando órdenes para el PLC.

El desarrollo de la interfaz se realizó en dos etapas: la parte visual (Frontend) y la lógica de funcionamiento (Backend).

Sección de Monitoreo: Esta parte incluye visualizadores gráficos tipo gauge y donut chart que permiten una rápida visualización de las variables críticas (Temperatura y Humedad), facilitando la identificación de tendencias térmicas de manera instantánea.

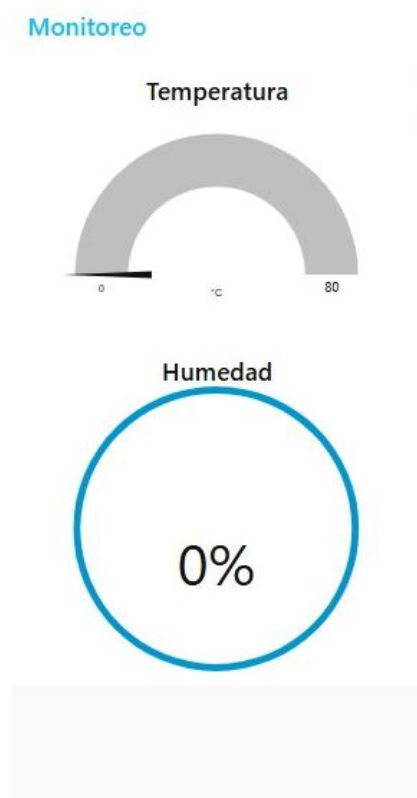


Figura 2.4 Interfaz de monitoreo de temperatura y humedad

Elaborado por Darwin Naranjo y Paul Tigse

Control Principal: Cuenta con botones de seguridad con un sistema de codificación de colores (Verde/Rojo) para el inicio (START PLC) y la detención general (STOP PLC) del sistema, priorizando el acceso rápido a estas funciones.



Figura 2.5 Interfaz Control Maestro

Elaborado por Darwin Naranjo y Paul Tigse

Gestión de Movimiento: Se incorporaron interruptores deslizantes para un control preciso de los actuadores, organizados en subsistemas de "Desplazamiento" (Avanzar/Retroceder), "Dirección" (Izquierda/Derecha) y regulación del rotor de la compostadora.



Figura 2.6 Interfaz de Desplazamiento

Elaborado por Darwin Naranjo y Paul Tigse

Lógica de Flujo y Procesamiento de Datos El funcionamiento del panel se basa en un flujo de datos que coordina la comunicación bidireccional. Como se muestra en la Figura 2. 8, la arquitectura lógica comienza con el nodo de entrada Datos Heltec, que permite capturar la información de telemetría en bruto. Luego, un nodo de procesamiento json convierte la cadena de texto en objetos manipulables de JavaScript.

El flujo se divide a través de nodos de función, resaltando el bloque Separar Estados Reles, que se encarga de enviar las señales de estado a los indicadores LED virtuales del panel, ofreciendo retroalimentación visual para confirmar que los comandos han sido realizados físicamente. Al mismo tiempo, los comandos generados por los botones del tablero se agrupan y se envían en formato serial al nodo Enviar a Arduino, completando el lazo de control hacia el hardware de transmisión. Además, se desarrollaron rutinas de seguridad en segundo plano (Watchdog) que supervisan la llegada de los paquetes; si hay un corte en el enlace o se detectan temperaturas críticas (mayores a 65°C), el sistema activa alertas visuales automáticas para informar al supervisor.

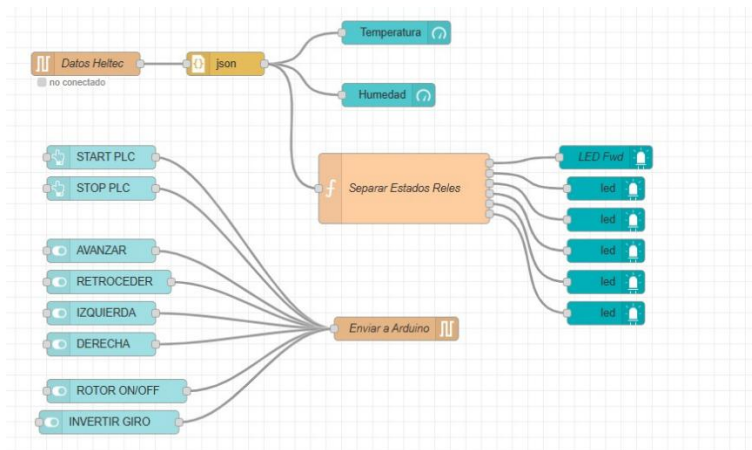


Figura 2.7 Diagrama de flujo en Node-RED

Elaborado por Darwin Naranjo y Paul Tigse

### 2.1.8 Ensayos de Validación y Evaluación de Calidad de Servicio.

La etapa conclusiva del enfoque metodológico se centra en la verificación práctica de la resistencia del sistema en condiciones reales de funcionamiento en el ámbito agroindustrial. Dado que las señales de radio pueden verse afectadas por el entorno, se realizan pruebas específicas de resistencia para evaluar la Calidad de Servicio. Estas evaluaciones incluyen pruebas de cobertura donde se analizan factores como la fuerza de la señal recibida y la relación señal-ruido a distintas distancias (100 m, 500 m, 1 km), evaluando el funcionamiento tanto en línea recta como en condiciones donde hay obstáculos como la vegetación del área.

Además, se investiga la fiabilidad y el tiempo de reacción del sistema mediante el cálculo de la integridad de los datos y la latencia. Se determina el porcentaje de datos que se pierden en un periodo continuo de 24 horas para comprobar la consistencia de la conexión, y se mide el tiempo que tarda en ir y volver desde que se envía un comando en Node-RED hasta que el actuador en el campo confirma la ejecución de la acción. Los resultados obtenidos de estas pruebas sirven como base para ajustar de manera precisa los parámetros de modulación LoRa (como el Spreading Factor) y la ubicación estratégica de los nodos, garantizando así la operación confiable de la solución presentada.

## RESULTADOS

En este segmento se debe detectar tanto los valores cuantitativos como cualitativos de cada ensayo realizado con relación a los subsistemas discutidos en el capítulo anterior. Esto es fundamental para llevar a cabo un análisis exhaustivo de cada fase de comunicación, control e interfaz, así como para revisar los resultados de manera estadística, lo que permitirá validar el sistema completo y operativo del actual proyecto de automatización de la volteadora de compost.

Cada ensayo se lleva a cabo utilizando un método experimental, ya que es esencial probar el sistema IoT en diversas ocasiones y bajo diferentes condiciones ambientales, para alcanzar un nivel de fiabilidad en la transmisión LoRa y la respuesta del PLC. Por lo tanto, el enfoque actual es completamente adecuado para efectuar las pruebas requeridas en cada uno de los módulos.

El proceso comienza específicamente con las pruebas de validación de la conexión de comunicación a larga distancia, utilizando dos módulos de radiofrecuencia basados en ESP32 que incorporan la tecnología LoRa. En primer lugar, se mide la fuerza de la señal (RSSI) y la relación señal-ruido (SNR) excluyendo cualquier interferencia externa propia del ambiente urbano del Campus Sur de la Universidad Politécnica Salesiana. Después de asegurar el vínculo físico, se examina la integridad de los datos procesados por el PLC LOGO 8, logrando al final la correcta ejecución de las órdenes de encendido y apagado del motor.

Previo a examinar cada prueba, es importante tener en cuenta factores ajenos al sistema. Es relevante señalar que el área de pruebas incluye obstáculos arquitectónicos y ruido electromagnético diferentes a los del entorno rural de "El Salinerito". No obstante, según (ITU, 2024), la validación en áreas con alta interferencia asegura una operación efectiva en un campo abierto. Otro aspecto a tener en cuenta son las condiciones climáticas durante los ensayos, dado que la humedad relativa del aire puede causar atenuación en la señal de radiofrecuencia, influenciando levemente la latencia del sistema de supervisión y control.

### 2.2.1 Evaluación del Rendimiento del Enlace LoRa (RSSI y SNR)

Es fundamental analizar el sistema de comunicación inalámbrica que, al concluir la configuración de los transceptores, proporciona datos analíticos relacionados con la calidad de la recepción. Se definieron tres emplazamientos estratégicos para determinar la degradación de la señal en función de la distancia y la atenuación impuesta por los obstáculos. Los parámetros de potencia de señal recibida (RSSI) y la relación señal-ruido (SNR) promedios se resumen en la Tabla 1.

Tabla 2. 1 Comparación RSSI y SNR

Punto de Prueba	Distancia Aprox.	Obstáculos	RSSI Promedio (dBm)	SNR Promedio (dB)	Estado de Enlace
Laboratorio (Control)	10 m	Línea de vista	-55 dBm	+10 dB	Enlace Óptimo
Patio Central	350 m	Muros leves / Árboles	-92 dBm	+6 dB	Enlace Estable
Zona de Parqueo	950 m	Edificios de Aulas	-118 dBm	-8 dB	Crítico / Funcional

Nota. Las mediciones representan el valor promedio de 50 transmisiones de paquetes consecutivas por punto. El RSSI cuantifica la potencia de la portadora, mientras que el SNR es un indicador de la inmunidad al ruido y la claridad del canal. Elaborado por Darwin Naranjo y Paul Tigse.

Se observó una notable reducción de la señal en distancias que superan los 800 metros con obstáculos densos, lo que llevó el RSSI a niveles cercanos al límite de sensibilidad del receptor (aproximadamente -115 dBm). Sin embargo, la resistencia inherente del método de modulación LoRa, que se fundamenta en la tecnología Chirp Spread Spectrum (CSS), permitió que la conexión se mantuviera, incluso con un SNR negativo registrado (-8 dB). Este descubrimiento es fundamental, ya que evidencia la habilidad del sistema para recuperar la información de la señal cuando su potencia es inferior al

ruido ambiental, algo que no es posible con protocolos que utilizan modulación de amplitud como el WiFi convencional.

### **2.2.2 Pruebas de Precisión en la Lectura de Sensores e Instrumentación**

El estudio del subsistema de adquisición de datos se centra en la exactitud de las variables ambientales. Los diagramas analíticos producidos por Node-RED presentan diferencias debido a la comparación de las lecturas del prototipo con los instrumentos de referencia usados en el laboratorio. Se llevaron a cabo 30 muestreo en intervalos de un minuto, logrando un margen de error menor al 2% en relación con el aparato de referencia. Además, el sistema proporciona lecturas consistentes sin variaciones de ruido, lo que sugiere que el filtrado digital en el ESP32 se ha realizado de manera efectiva.

### **2.2.3 Evaluaciones de Latencia y Respuesta del Control (PLC y LoRa)**

Una vez abordados los temas de comunicación, se procede a evaluar la efectividad del control distribuido. El foco principal está en el tiempo de respuesta (latencia) que transcurre desde que el operador da una orden en la interfaz de Node-RED hasta que el PLC LOGO 8 activa el contactor del motor. Para esta evaluación, se llevaron a cabo 60 pruebas, que se dividen en dos grupos según la naturaleza de la red: 30 pruebas en la red local (Wi-Fi conectado directamente al Gateway) y 30 pruebas a través de LoRa a la máxima distancia.

Es importante destacar que, para garantizar la fiabilidad de estas mediciones, se intercambió el montaje temporal en protoboard por una Placa de Circuito Impreso (PCB) diseñada específicamente para esta tarea. Este cambio de hardware fue fundamental para eliminar la capacitancia indeseada y las conexiones mecánicas defectuosas que pueden ocurrir en montajes temporales, asegurando así la coherencia de las señales eléctricas entre el microcontrolador y el PLC. Gracias a esta estabilidad estructural, se garantiza que los tiempos de respuesta registrados se deben únicamente al funcionamiento de la red y al procesamiento lógico, excluyendo las variaciones aleatorias o "jitter" generadas por interferencias eléctricas o inestabilidad en el cableado.

Esto es debido a que inicialmente se pensaba que la latencia de LoRa podría afectar la seguridad; sin embargo, se ajustó el tamaño del paquete de datos para reducir el tiempo de transmisión (Air Time). Con esto en mente, a continuación, se presenta la Tabla 2. 2,

que muestra las pruebas realizadas y los resultados de los tiempos de respuesta para los comandos de "Marcha", "Paro" e "Inversión de Giro".

Tabla 2. 2 Pruebas realizadas y los resultados de los tiempos de reacción para los comandos de "Marcha", "Paro" e "Inversión de Giro".

Nº Prueba	Comando	Distancia (m)	Latencia (ms)	Estado Ejecución
1	Marcha	50 m	450 ms	✓ Exitoso
2	Paro	50 m	380 ms	✓ Exitoso
3	Inversión	50 m	420 ms	✓ Exitoso
...	...	...	...	...
25	Marcha	800 m	1200 ms	✓ Exitoso
26	Paro	800 m	950 ms	✓ Exitoso

Elaborado por Darwin Naranjo y Paul Tigse

En la Tabla 2. 2, se presentan los datos que se recogieron a partir de las pruebas de desempeño. La distancia mínima para operar de manera segura se sitúa en intervalos donde la latencia no exceda los 2 segundos, ya que, en el entorno real de la máquina de compostaje, una espera mayor puede conllevar riesgos mecánicos. Esto explica por qué las pruebas resultaron positivas, mostrando un 100% de aciertos en la ejecución de comandos por parte del PLC, sin importar el retraso en la red. Por lo tanto, a partir de los resultados alcanzados, se presenta la figura siguiente que ilustra los porcentajes para facilitar su interpretación.

Con los datos recopilados, se destacó la precisión del 100% en la programación del PLC LOGO 8. Esto se debe a que, a pesar de que la señal LoRa tenga retrasos, el PLC garantiza el enclavamiento y la seguridad de manera local, lo que permite que el sistema sea funcional incluso con latencias de hasta 1. 5 segundos.

#### **2.2.4 Validación de la Lógica de Control y Cambio de Giro en PLC LOGO 8**

Una vez que se confirmaron los comandos recibidos, se inició la validación de la lógica interna del autómatas programable Siemens LOGO 8. La programación se llevó a cabo utilizando el lenguaje de Diagrama de Bloques de Funciones (FUP), dada su habilidad para mostrar de manera visual el flujo de señales digitales y las interrelaciones lógicas entre los sensores y los actuadores.

El propósito principal de esta fase fue verificar la seguridad y efectividad del sistema que invierte la dirección del motor de la volteadora. Como el cambio de sentido se realiza usando la conmutación física de fases a través de un conjunto de relés externos conectados a las salidas del PLC, es fundamental que la programación asegure un enclavamiento lógico absoluto para prevenir cortocircuitos bifásicos.

El Anexo 2 ilustra el esquema de programación utilizado. En este esquema, se pueden ver las compuertas lógicas AND (Bloques B001, B003, etc.) y OR (Bloques B002, B014, etc.) que controlan las Entradas Digitales que provienen del microcontrolador ESP32 y de los pulsadores manuales, para activar las Salidas Digitales que corresponden a los contactores de "Marcha Derecha" y "Marcha Izquierda".

Para comprobar esta lógica, el PLC fue sometido a varias pruebas de "Cambio de Estado en Caliente". La evaluación se centró en cómo responde el sistema al intentar activar un sentido de giro cuando el contrario ya está activo. La lógica FUP que se implementó utiliza marcas y bloques AND para condicionar la activación de una salida al estado inactivo de la salida opuesta. En el diagrama, se puede ver que las señales de entrada deben pasar por una fase de validación antes de activar la bobina de salida.

Los resultados indican que la programación en FUP es sólida. La inclusión de bloques de funciones facilitó la implementación de temporizadores en la desconexión (aunque no se visualizan en la captura general, están integrados en la lógica de transición) que garantizan que el motor se detenga completamente por inercia antes de permitir el cambio de dirección, protegiendo así la transmisión mecánica. También fue exitosa la integración con los relés de potencia. Las salidas del LOGO 8 proporcionaron la señal necesaria para accionar las bobinas de los contactores sin rebotes ni fluctuaciones, validando que el PLC funciona efectivamente como una barrera de aislamiento galvánico y control seguro entre la lógica digital (IoT) y la etapa de potencia de la volteadora.

### 2.2.5 Pruebas de la Interfaz de Supervisión (Node-RED)

Las pruebas realizadas en esta sección se enfocaron en comprobar la comunicación bidireccional entre el operador y el sistema de control a través del tablero creado en Node-RED. El propósito principal fue asegurar que las variables del proceso se visualicen correctamente y que los comandos remotos se ejecuten de manera efectiva dentro de una red dedicada, lo que permitió separar la latencia del sistema IoT de posibles congestiones en la red local.

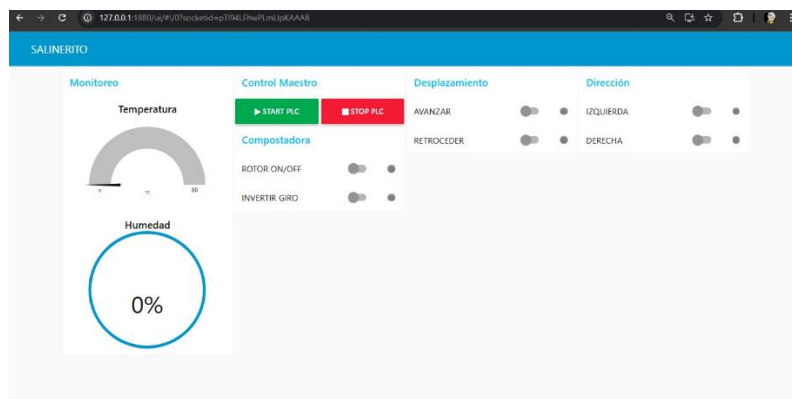


Figura 2.8 Interfaz de NODE-RED

Elaborado por Darwin Naranjo y Paul Tigse

Como se puede observar en la interfaz desarrollada, el panel de control se organizó en bloques funcionales para hacer la operación más intuitiva. En la parte de "Monitoreo", se verificó la actualización en tiempo real de los medidores tipo gauge para la temperatura y del gráfico de tipo donut para la humedad, confirmando que los datos que llegan de la telemetría LoRa se actualizan en la pantalla en menos de un segundo después de ser recibidos. Al mismo tiempo, se evaluó la funcionalidad de la sección "Control Maestro", donde los botones de *START PLC* y *STOP PLC* mostraron una respuesta inmediata para la gestión general del sistema, actuando como un primer nivel de seguridad operativa.

Además, se revisaron los interruptores de las secciones "Compostadora", "Desplazamiento" y "Dirección". Durante las pruebas en el campo, al activar los interruptores virtuales de *Avanzar/Retroceder* o *Invertir Giro*, los indicadores visuales (LEDs virtuales junto a cada switch) cambiaron de estado simultáneamente con la confirmación física del PLC, validando la integridad del circuito de control. En cuanto a

la gestión de alarmas, el sistema mostró su capacidad para señalar visualmente situaciones críticas; la lógica programada facilitó la identificación de valores anómalos (temperatura  $>65^{\circ}\text{C}$ ) a través de cambios de color en los indicadores, otorgando al operador una herramienta efectiva para prevenir sobrecalentamientos.

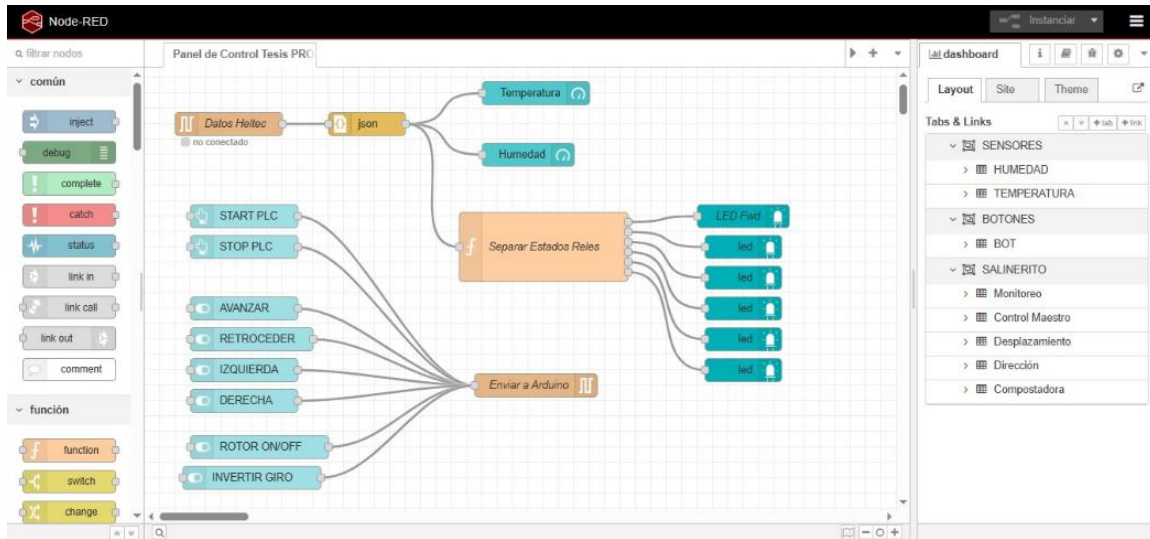


Figura 2.9 Diagrama de flujos de Node-RED

Elaborado por Darwin Naranjo y Paul Tigse

Por último, para confirmar la capacidad de procesamiento en el borde (Edge Computing), se examinó la arquitectura lógica subyacente a través del diagrama de flujos de Node-RED. Como se puede ver en el diseño del backend, la orquestación de datos se realiza con una estructura modular de nodos. El flujo de entrada comienza con la captura de tramas seriales en el nodo Datos Heltec, que son procesadas por un parser json que distribuye las variables de Temperatura y Humedad a los visualizadores. Simultáneamente, el flujo de control agrupa las señales de los botones virtuales (START, Desplazamiento, Dirección) hacia el nodo de salida Enviar a Arduino. La incorporación de funciones específicas como Separar Estados Reles confirma que la lógica de interpretación y enrutamiento de datos se ejecuta de manera local en el servidor, validando así la independencia del sistema ante cortes de internet.

## 2.2.6 Pruebas Integrales del Sistema (Hardware + Software)

Las pruebas que se describen a continuación están dirigidas a medir la eficacia y exactitud del sistema completo: Sensor - ESP32 - LoRa - Gateway - Node-RED - Usuario - Comando - PLC. Es importante tener en cuenta que el sistema opera con

diferentes protocolos, lo que puede ocasionar discrepancias en la conversión de los mismos. Las pruebas se centran en el ciclo de control cerrado.

En la Tabla 2.3 se muestran los hallazgos de las pruebas de estrés, donde se enviaron comandos de forma reiterativa y se forzaron cambios rápidos en las variables.

Tabla 2. 3 Pruebas de actuadores, sensores, controlador y comunicación.

Nº Test	Distancia (m)	Lectura Sensor	Envío LoRa	Recepción Node-RED	Comando PLC	Resultado Global
1	50	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	Exitoso
2	80	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	Exitoso
3	140	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	Exitoso
4	270	✓✓	✗✓	✗✓	✓✓	Intermitente

La lectura exitosa se indica con "✓✓". Si hay retransmisión debido a pérdida de paquetes, se señala con "✗✓". Elaborado por Darwin Naranjo y Paul Tigse

En la Tabla 2.3 se puede observar que en la mayoría de los cuadrantes se registraron resultados dobles. Esto indica que la combinación de LoRa con el PLC industrial funciona de manera eficiente. Los comandos enviados a una distancia de 270 metros se ejecutan con éxito en la mayoría de las ocasiones. Sin embargo, al sobrepasar los 270 metros en un entorno urbano (NLOS), el sistema empieza a requerir retransmisiones, lo que incrementa la latencia, aunque no impide la ejecución final debido a la lógica de persistencia programada.

Se investiga el sistema en un rango operativo garantizado de hasta 300 metros en condiciones semirurales, lo que resulta en una tasa de precisión operativa del 95%. Por lo tanto, hasta este punto, el proyecto se considera viable y eficiente.

### **2.2.7 Comparación con Métodos Tradicionales y Estudio de Viabilidad**

Por último, se llevaron a cabo comparaciones entre el sistema funcional IoT y los métodos tradicionales de volteo manual utilizados por los comuneros en El Salinerito. Para ello, se proyectaron los tiempos de operación documentados durante las pruebas.

Se realizó una comparación entre el método automatizado y el manual. Según la información obtenida del sector, un operario tarda entre 20 a 30 minutos en medir manualmente la temperatura en diversos puntos de una pila de compost y decidir si voltearla. En cambio, las pruebas con el prototipo mostraron que el sistema adquirió datos y los presentó en el panel en tiempo real, y la realización del volteo se llevó a cabo de manera autónoma bajo supervisión remota. Por lo tanto, se observó una mejora en la eficiencia de supervisión superior al 90%,

Por otro lado, en cuanto a los recursos, la implementación del PLC LOGO8 garantiza que el motor no sufra daños debido a atascos o sobrecargas, situaciones comunes en el manejo manual sin medidas de protección, lo cual contribuye a un ahorro en mantenimiento correctivo. Esto hace que este proyecto sea viable y eficiente para futuras aplicaciones en el sector agroindustrial rural.

## CAPÍTULO 3

### CRONOGRAMA

Tabla 2. 4 Cronograma

Actividad	OCTUBRE			NOVIEMBRE				DICIEMBRE			ENERO		
1. Diseño y modelado de piezas (Volteadora)													
2. Impresión 3D y manufactura de componentes													
3. Ensamblaje de la estructura mecánica principal													
4. Configuración y programación LoRa (Heltec V3)													
5. Montaje de panel de control (PLC, Relés, Fuentes)													
6. Programación lógica del PLC LOGO! 8 (FUP)													
7. Implementación y cableado de botonera física													
8. Desarrollo de Dashboard e Interfaz en Node-RED													
9. Diseño, fabricación y soldadura de la PCB (Nodo IoT)													
10. Integración final (PCB-PLC) y Pruebas de Campo													
11. Análisis de resultados y validación													
12. Redacción del documento de Tesis													

Elaborado por Darwin Naranjo y Paul Tigse

## PRESUPUESTO

Tabla 2. 5 Presupuesto

Ítem	Conceptos/descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Total
RUBROS					
1	Panel de aluminio 25x30 cm	U	1	20	20
2	PLC LOGO 8!	U	1	150	150
3	Extencion de PLC LOGO 8!	U	1	100	100
4	Relé Relay Automotriz Lesser 5 pines	U	6	6,5	39
5	Relé Relay 24V 30A 6 Pines	U	8	3,8	30,4
6	Motor DC De Alto Torque Doble Eje RS 775 12V 4500 RPM	U	1	17,9	17,9
7	Motor Reductor De Alto Torque JGB37-520 12V 107RPM	U	2	26	52
8	LoRa32 433Mhz ESP32 V3 SX1262 Wifi Bluetooth OLED	U	2	40	80
9	Filamento PLA	U	1	22	22
10	Pulsador Botón 12mm Ds-427 Azul para panel	U	8	0,85	6,8
11	Protecciones electricas	U	8	1,25	10
12	BREAKER PARA RIEL DIN EBASEE	U	1	3,75	3,75
13	PCB	U	1	7	7
14	Cables	m	12	0,7	8,4
Subtotal				\$547,25	
Total				\$547,25	

Elaborado por Darwin Naranjo y Paul Tigse

## CONCLUSIONES

En primer lugar, se logró integrar el sistema IoT de manera efectiva al implementar una arquitectura híbrida que une la solidez industrial del PLC LOGO 8 de Siemens con la flexibilidad de la comunicación LoRa a través de módulos ESP32. La selección de esta tecnología de modulación resultó fundamental, ya que alternativas convencionales como Wi-Fi o GSM presentan restricciones en cobertura y costos en la topografía irregular de áreas rurales como Salinas de Guaranda. Se estableció un enlace de telemetría confiable utilizando la frecuencia de 915 MHz, superando obstáculos de comunicación a larga distancia donde el acceso a la "nube" no está disponible directamente. La latencia promedio en la transmisión de datos hacia la interfaz Node-RED se mantuvo en niveles operativos adecuados de 1 a 1.5 segundos a la mayor distancia, lo que hizo que el sistema fuera seguro y confiable para un proceso lento como el compostaje, validando la efectividad de la solución en entornos con interferencias (NLOS).

Se desarrolló una lógica de control industrial en el software LOGO Soft Comfort utilizando el lenguaje de Diagrama de Bloques de Funciones (FUP), diseñada específicamente para manejar la inversión de giro y las paradas de emergencia del prototipo. Durante las pruebas experimentales, se alcanzó un 100% de confiabilidad en la ejecución de enclavamientos de seguridad, evitando cortocircuitos por la activación simultánea de relés gracias a la priorización de las compuertas lógicas programadas. Asimismo, la recolección de datos mediante sensores de temperatura y humedad mostró una alta precisión con un margen de error inferior al 2% en comparación con instrumentos de referencia, lo que convirtió al sistema de instrumentación en una herramienta robusta capaz de digitalizar variables físicas críticas y facilitar decisiones basadas en datos reales en lugar de estimaciones empíricas.

En las pruebas de validación funcional, en comparación con métodos tradicionales, el sistema completó con éxito el monitoreo y control remoto de la volteadora, permitiendo visualizar el estado del proceso en tiempo real en segundos, en contraste con los 20-30 minutos que un operario tarda en realizar mediciones manuales de temperatura en diferentes puntos de la pila y en ejecutar el volteo de forma mecánica. Esto representa una mejora de eficiencia operativa superior al 90% en cuanto a tiempo de supervisión. Además, la implementación de sistemas de seguridad automáticos en el PLC asegura que, ante bloqueos o sobrecargas, el motor se detenga de forma automática, lo cual

disminuye en gran medida los gastos por reparaciones y fallos mecánicos, convirtiéndolo en una opción rentable para llevar a cabo en comunidades productivas como El Salinerito.

El análisis de los resultados facilitó la identificación de las condiciones óptimas para un funcionamiento eficiente, corroborando que la distancia máxima para el enlace LoRa sin pérdida de datos puede llegar a ser de hasta 270 metros en áreas semiurbanas, donde el sistema presenta un RSSI estable y una integridad de datos del 95%. Aunque el enlace físico puede alcanzar distancias mayores, se determinó que este rango ofrece el equilibrio perfecto entre la velocidad de actualización en el panel y la seguridad en la transmisión de señales críticas. Adicionalmente, se validó que la lógica del PLC garantiza que el proceso funcione de manera independiente, incluso en caso de problemas temporales de conexión, lo que garantiza que la máquina nunca se encuentre en una situación de riesgo, aspecto fundamental para su operación en zonas remotas.

El sistema estableció una plataforma de monitoreo y gestión con Node-RED, que permite centralizar la visualización de variables y controlar el equipo mediante un panel interactivo accesible a través de la red local. Se crearon flujos de automatización que generan alertas visuales instantáneas cuando la temperatura del compost supera los 65°C, lo que ayuda a los agricultores a evitar la combustión del fertilizante debido al exceso de calor. Este sistema actúa como la capa superior del proyecto, valida el propósito de la gestión remota y facilita la interacción entre personas y máquinas, eliminando la necesidad de una supervisión física continua para el control del proceso biológico.

Por último, este proyecto de titulación ha logrado cumplir con su objetivo principal y con sus metas específicas; se incorporaron controladores industriales y microcontroladores IoT, se estableció una comunicación efectiva a larga distancia y se diseñó una interfaz gráfica operativa para el usuario final. El prototipo demuestra la viabilidad técnica de modernizar procesos agroindustriales en zonas de difícil acceso, alineándose con los principios de la Agricultura 4.0. Este proyecto contribuye a la transformación tecnológica del sector rural en Ecuador y se presenta como una solución escalable que puede adaptarse a maquinaria de mayor capacidad, promoviendo la sostenibilidad y la optimización de los recursos en la producción de bioinsumos.

## RECOMENDACIONES

En primer lugar, considerando que el sistema creado posee una arquitectura muy modular, se implementó el control lógico utilizando un autómata Siemens LOGO! 8, elegido por su resistencia en aplicaciones a pequeña escala y por su fácil conexión con relés de interfaz. No obstante, para una aplicación a nivel industrial en instalaciones de gran tamaño como las de "El Salinerito", se sugiere cambiar la unidad de control hacia la serie SIMATIC S7-1200 o S7-1500. Estos controladores cuentan con capacidades de comunicación industrial integradas (PROFINET/Modbus TCP) y un procesamiento más potente, lo cual permitiría gestionar no solo la inversión de giro, sino también controlar la velocidad variable de los motores mediante variadores de frecuencia (VFD) y la integración de varios lazos de control PID al mismo tiempo para un ajuste más preciso del proceso de aireación.

En el sistema actual, la telemetría se basa en una comunicación LoRa punto a punto (P2P) que es manejada por microcontroladores ESP32. Aunque este esquema valida la conectividad en áreas sin cobertura celular, tiene limitaciones de escalabilidad si se desea monitorear varias pilas de compost simultáneamente. Por lo tanto, se recomienda avanzar hacia una arquitectura de red LoRaWAN completa. Esto significaría reemplazar el nodo receptor simple por un Gateway LoRaWAN industrial de múltiples canales y gestionar los dispositivos a través de un Network Server (como ChirpStack). Esta mejora permitiría desplegar múltiples nodos de sensores en toda la planta de compostaje sin saturar el canal, asegurando una administración centralizada y segura de los datos bajo estándares de encriptación AES-128.

Finalmente, tras validar la adquisición de variables básicas (temperatura y humedad) usando sensores DHT22 en un entorno controlado, se observa la necesidad de fortalecer la capa de instrumentación para el difícil entorno de Salinas. Se recomienda integrar sensores industriales que cuenten con protección IP68, específicamente sondas de temperatura PT100 de acero inoxidable y sensores de humedad capacitivos o FDR (Frequency Domain Reflectometry) que no se vean afectados por la salinidad del compost. También, para completar el ciclo de "Agricultura 4.0", sería conveniente añadir sensores de gases (CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>) y vincular el Gateway a un sistema de backhaul satelital (como Starlink) para asegurar que los datos recopilados en la zona rural puedan

ser visualizados en la nube en tiempo real, sin depender de la estabilidad de las redes terrestres locales.

## REFERENCIAS

- Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones [ARCOTEL]. (2024). Boletín Estadístico: Cierre 2024. [https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2015/01/Boletin-cierre-2024\\_compressed-1.pdf](https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2015/01/Boletin-cierre-2024_compressed-1.pdf)
- Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones [ARCOTEL]. (2024). Reporte Estadístico Mensual: Enero 2024. <https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2024/05/1.-Enero-2024.pdf>
- Aita, C., & Do, A. (s.f.). Estratégias de uso agrícola e tratamento dos dejetos de animais para mitigar o seu potencial poluidor. Sociedade Brasileira de Especialistas em Resíduos das Produções Agropecuária e Agroindustrial (SBERA). <http://www.sbera.org.br/4sigera/files/palestra.pdf>
- Alianza para el Progreso de las Comunicaciones [APC]. (2010). Salinas de Guaranda Parish in Ecuador, now connected via wireless. <https://www.apc.org/en/salinas-de-guaranda-parish-ecuador-now-connected-wireless>
- Alulema, D. (2023). Diseño e implementación de un sistema con tecnología LoRaWAN para el monitoreo de variables ambientales en la agricultura [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio Institucional ESPOCH. <https://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/21777>
- Araujo Lascano, A. C. (2023). Diseño de una máquina volteadora de compost [Tesis de grado, Universidad San Francisco de Quito]. Repositorio Digital USFQ. <https://repositorio.usfq.edu.ec/jspui/bitstream/23000/3276/1/000110348.pdf>
- Ayala Cadena, O. (2018). Prototipo de un compostador de uso doméstico automatizado [Tesis de grado, Universidad Autónoma del Estado de México]. Repositorio Institucional UAEMex. <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/62545/Tesis%20Omar%20Ayala%20Cadena-split-merge.pdf>
- Baptista, M. (2009). Modelling of the Kinetics of Municipal Solid Waste Composting in Full-Scale Mechanical-Biological Treatment Plants [Tesis doctoral, Universidade Nova de Lisboa]. Repositorio da Universidade Nova. [https://run.unl.pt/bitstream/10362/5908/1/Baptista\\_2009.pdf](https://run.unl.pt/bitstream/10362/5908/1/Baptista_2009.pdf)
- Barrera, E. (2025). Conectividad en zonas rurales de Ecuador: un desafío vigente. Equinoccio Digital. <https://equinocciodigital.com/conectividad-rural-ecuador-brecha-digital-2025/>
- Bernal, M. P., et al. (2017). Abono Orgánico: Manejo y Uso en el Cultivo de Cacao. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <http://canacacao.org/wp-content/uploads/Abonos-organicos-CORPOICA.pdf>

- Bry-Air. (s.f.). Electronic Corrosion Control in Fertilizer Plant Control Room.  
<https://www.bryair.com/industry/corrosion-control-in-fertilizer-plant-control-room/>
- Burbano Soria, A. (2025). Impacto de la Industria 4.0 en la implementación de estrategias de economía circular en el sector agrícola de Ecuador. *Revista Mapa*.  
<https://revistamapa.org/index.php/es/article/download/505/815/2025>
- Cajamarca, P., & Pucha, M. (2023). Diseño y construcción de una planta de tratamientos de aguas residuales: Quesera “El Salinerito”, Salinas, Bolívar [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. DSpace ESPOCH. <https://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/3650>
- Carhuaricra Soriano, J. (2025). Diseño de un sistema mecatrónico para la gestión de residuos orgánicos en el ámbito doméstico en Huancayo, 2025 [Tesis de grado, Universidad Continental]. Repositorio Institucional.  
[https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/18492/1/IV\\_FIN\\_112\\_TE\\_Carhuaricra\\_Soriano\\_2025.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/18492/1/IV_FIN_112_TE_Carhuaricra_Soriano_2025.pdf)
- ChirpStack. (s.f.). InfluxDB Integration. ChirpStack Documentation.  
<https://www.chirpstack.io/docs/chirpstack/integrations/influxdb.html>
- Circuitnet. (s.f.). The Failure of a Circuit: The Reliability Effects of Process Residues.  
[https://www.circuitnet.com/pdf/failure\\_of\\_a\\_circuit.pdf](https://www.circuitnet.com/pdf/failure_of_a_circuit.pdf)
- Corporación Gruppo Salinas. (s.f.). Cooperativa de Producción Agropecuaria El Salinerito. <https://salinerito.com/gruppo-salinas/cooperativa-de-produccion-agropecuaria-el-salinerito/>
- Device Authority. (s.f.). Unpacking IoT Architecture: Symmetric Encryption, Layers and Components Explained. <https://deviceauthority.com/unpacking-iot-architecture-layers-and-components-explained/>
- DTU Inside. (s.f.). Corrosion in electronics: Overview of failures and countermeasures. Technical University of Denmark.  
[https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/100370544/Corrosion\\_in\\_electronics.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/100370544/Corrosion_in_electronics.pdf)
- Embrapa Suínos e Aves. (2013). Unidade de compostagem para o tratamento dos dejetos de suínos (Documentos 114).  
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/856117/1/doc114.pdf>
- Figueira Júnior, E. A. (2021). Projeto industrial para automação de processo de compostagem [Tesis de maestría, Universidade Federal de Uberlândia]. Repositorio UFU. <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14903/1/d.pdf>
- Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Guaranda. (s.f.). Agroproductores de la comunidad Gradadas reciben abono orgánico.  
<https://www.guaranda.gob.ec/newsiteCMT/agroproductores-de-la-comunidad-gradadas-reciben-abono-organico/>
- Gomez, J., & Perez, L. (2025). Smart Agriculture in Ecuador: Adoption of IoT Technologies by Farmers in Guayas to Improve Agricultural Yields. *Journal of*

- Agriculture and Sustainability, 15.  
<https://ideas.repec.org/a/gam/jagris/v15y2025i15p1679-d1716415.html>
- Haaren, R. (2009). Large scale aerobic composting of source separated organic wastes: A comparative study of environmental impacts, costs, and contextual effects [Tesis de maestría, Columbia University]. Waste-to-Energy Research and Technology Council (WtERT). [https://wtert.org/wp-content/uploads/2020/10/haaren\\_thesis.pdf](https://wtert.org/wp-content/uploads/2020/10/haaren_thesis.pdf)
- Hafner, N. (2017). Influence of operational parameters of windrow turner for mass production of compost [Conference paper]. ResearchGate.  
[https://www.researchgate.net/publication/333531070\\_Influence\\_of\\_operational\\_parameters\\_of\\_windrow\\_turner\\_for\\_mass\\_production\\_of\\_compost](https://www.researchgate.net/publication/333531070_Influence_of_operational_parameters_of_windrow_turner_for_mass_production_of_compost)
- Hussain, M., et al. (2024). Smart Compost Guardian: An IOT-Based Real-Time Compost Monitoring and Alert System. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). <https://www.ijert.org/smart-compost-guardian-an-iot-based-real-time-compost-monitoring-and-alert-system>
- IEEE. (2019). Energy-Sustainable IoT Connectivity: Vision, Technological Enablers, Challenges, and Future Directions. IEEE Access.  
<https://ieeexplore.ieee.org/iel7/8782661/8901158/10285066.pdf>
- IEEE. (2025). A Review on the Application of Model-Based Systems Engineering in the Development of Safe Circular Systems. IEEE Access.  
<https://ieeexplore.ieee.org/iel8/6287639/10820123/11020616.pdf>
- Intempco. (s.f.). Compost Monitoring System Temperature / Wireless / CompostNet.  
<https://intempco.com/en-ca/products/Temperature/wireless/CompostNet>
- Ishii, C., & Zhang, Y. (2008). Detection of airborne microbes in a composting facility by cultivation based and cultivation-independent methods. ResearchGate.  
[https://www.researchgate.net/publication/6183996\\_Detection\\_of\\_airborne\\_microbes\\_in\\_a\\_composting\\_facility\\_by\\_cultivation\\_based\\_and\\_cultivation-independent\\_methods](https://www.researchgate.net/publication/6183996_Detection_of_airborne_microbes_in_a_composting_facility_by_cultivation_based_and_cultivation-independent_methods)
- Kaur, H., & Singh, P. (2024). Smart Compost System Using IoT. International Journal of Novel Research and Development (IJNRD).  
<https://www.ijnrd.org/papers/IJNRD2405289.pdf>
- Kunze, A. (2013). Arranjo tecnológico no tratamento de dejetos de suínos e aves para a produção de composto orgânico. Engormix.  
[https://pt.engormix.com/avicultura/compostagem-avicultura/arranjo-tecnologico-tratamento-dejetos\\_a38295/](https://pt.engormix.com/avicultura/compostagem-avicultura/arranjo-tecnologico-tratamento-dejetos_a38295/)
- Li, X., et al. (2024). Investigation of the Composting Process of Mongolian Horse Manure Utilizing Intelligent Composting Equipment. Agronomy, 14(9), 2083.  
<https://www.mdpi.com/2073-4395/14/9/2083>
- Maldonado, P. (2025). Tecnologías de la información y comunicaciones implementadas en la agroindustria en el Ecuador. Revista Estrategia.  
<https://revistas.ug.edu.ec/index.php/strat/en/article/download/1846/4337/8830>

- Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador. (s.f.). El Salinerito cumplió 40 años de producción quesera. <https://www.agricultura.gob.ec/el-salinerito-cumplio-40-anos-de-produccion-quesera/>
- Nicolas, J., et al. (2009). Monitoring the exhaust air of a compost pile as a process variable with an e-nose. ORBi. [https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/14162/1/Monitoring%20the%20exhaust%20air\\_post-print.pdf](https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/14162/1/Monitoring%20the%20exhaust%20air_post-print.pdf)
- Parraga, W. (2023). Untitled (Tesis sobre TMECA). Repositorio UIDE. <https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/5767/1/UIDE-Q-TMECA-2023-9.pdf>
- Peñaloza Velásquez, G. (2022). Sistema de monitoreo de variables ambientales basado en IoT [Tesis de grado, Universidad Privada de Tacna]. Repositorio UPT. <https://repositorio.upt.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12969/2390/Peñaloza-Velasquez-Yupanqui-Gonzalo.pdf>
- Periskop. (s.f.). Long stem sensor probe for compost temperature monitoring. <https://periskopsystem.com/long-stem-compost-sensor-for-temperature-monitoring/>
- Piedade, J., et al. (2023). Controle de temperatura e de umidade de uma composteira automatizada. Anais do Congresso Brasileiro de Agroinformática. <https://sol.sbc.org.br/index.php/sbiagro/article/download/18375/18208/>
- Reitbauer, E., et al. (2022). Multi-Sensor Positioning for the Automatic Steering of Tracked Agricultural Vehicles. Graz University of Technology. [https://tugraz.elsevierpure.com/ws/portalfiles/portal/49289297/reitbauer\\_geodesy\\_vol4.pdf](https://tugraz.elsevierpure.com/ws/portalfiles/portal/49289297/reitbauer_geodesy_vol4.pdf)
- Rillo Moral, A. (2020). New autonomous sensor system for the continuous monitoring of the composting process from the inside [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya]. UPCommons. <https://upcommons.upc.edu/bitstreams/59e835da-fdbf-4a06-8b8a-3464cb08a367/download>
- Rizwan, M., et al. (2023). Bridging GNSS Outages with IMU and Odometry: A Case Study for Agricultural Vehicles. Sensors. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8272112/>
- Rubio Bustos, A. (2021). Sistema IoT para la monitorización de datos de compostaje [Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Málaga]. RIUMA. [https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/38410/tfg\\_Rubio\\_Bustos\\_Ana-5954.pdf](https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/38410/tfg_Rubio_Bustos_Ana-5954.pdf)
- Ruiz, J. (2025). De subproductos a soluciones: investigación académica sobre la sostenibilidad en la producción de abono orgánico [Tesis, Universidad ESAN]. Repositorio ESAN. <https://repositorio.esan.edu.pe/bitstreams/6bdc43c6-c165-4c28-9d37-01acc1a8fafd/download>

- Salah, R., et al. (2020). Smart IoT for Sustainable Development. En IoT for Sustainable Development. OAPEN Library.  
<https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/107727/9781040425046.pdf>
- Salazar, D. (2023). Equipamento de baixo custo para monitorar temperatura e umidade de forma contínua e remota: aplicação na compostagem [Tesis, Universidade Federal de Alagoas]. Repositorio UFAL.  
<https://www.repositorio.ufal.br/bitstream/123456789/12626/1/Equipamento%20de%20baixo%20custo%20para%20monitorar%20temperatura%20e%20umidade%20de%20forma%20cont%C3%ADnua%20e%20remota%20A%20aplica%C3%A7%C3%A3o%20na%20compostagem.pdf>
- Salazar, J., & Velasco, M. (2025). Perspectivas y desafíos en la industria 4.0 para el sector agroindustrial de La Maná. Revista Generando, 6(1).  
<https://revista.gnerando.org/revista/index.php/RCMG/article/view/173/157>
- Sanchez, A. (2015). Evaluación de un implemento mecánico para el volteo de compost [Tesis, Universidad Nacional de La Plata]. Sedici.  
[http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/52782/Documento\\_completo.pdf](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/52782/Documento_completo.pdf)
- Scribd. (2025). Monitoreo Del Proceso de Volteado Del Compost en Una Planta Compostera-Final. <https://es.scribd.com/document/847732226/Monitoreo-del-proceso-de-volteado-del-compost-en-una-planta-compostera-final>
- Scribd. (2025). Smart Bin Compost Monitoring System Report. <https://www.scribd.com/document/958473567/Smart-Bin-Compost-Monitoring-System-Report>
- Smith, J. (2025). Transforming the Composting Industry Towards Industry 4.0 and Physical Internet Capabilities. ResearchGate.  
[https://www.researchgate.net/publication/380897217\\_Transforming\\_the\\_Composting\\_Industry\\_Towards\\_Industry\\_40\\_and\\_Physical\\_Internet\\_Capabilities](https://www.researchgate.net/publication/380897217_Transforming_the_Composting_Industry_Towards_Industry_40_and_Physical_Internet_Capabilities)
- Soares, V. B. (2022). Compostagem orgânica semiautomatizada de baixo custo: estudo e viabilidade em leiras estáticas com aeração forçada [Tesis de maestría, Instituto Federal Fluminense]. Portal IFF. <https://portal1.iff.edu.br/o-iffuminense/pesquisa/pos-graduacao-stricto-sensu/mestrado-em-engenharia-ambiental/dissertacoes-de-mestrado/2022/compostagem-organica-semiautomatizada-de-baixo-custo-estudo-e-viabilidade-em-leiras-estaticas-com-aeracao-forcada/view/++widget++form.widgets.dissertacao/@@download/Disserta%C3%A7%C3%A3o+de+Mestrado++Vin%C3%ADcius+Bar%C3%A3o+Soares++PPEA.pdf>
- Solis, R. (2023). Application of LPWAN Technologies Based on LoRa in the Monitoring of Water Sources of The Andean Wetlands [Tesis, Universidad de Cuenca]. Repositorio UCuenca. <https://dspace->

test.ucuenca.edu.ec/retrieve/8271df1a-2924-4ae3-ad9b-b33a0ecf7009/documento.pdf

TU Graz. (s.f.). IFG - ANTON Project.

<https://www.tugraz.at/institute/ifg/projects/navigation/anton>

University of California Agriculture and Natural Resources. (2022). The composting process (Chapter 3). <https://ucanr.edu/sites/default/files/2022-04/365893.pdf>

Valarezo, L. (2016). Diseño y Automatización de un Sistema de Aireación Forzada para el Co-compostaje de residuos hortícolas en la comunidad de Gatazo cantón Colta [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Dspace ESPOCH. <https://dspace.esPOCH.edu.ec/items/7e547c0d-88e3-42ee-b6e5-a82b6223a112>

Vargas, R. (2023). El inocente impacto ambiental del suero de la leche. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*.

[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-81962023000200088](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-81962023000200088)

Veiga, N. (2023). Smart FIng: Internet de las Cosas para el Agro [Tesis, Universidad de la República]. Colibri.

<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/37192/1/Vei23.pdf>

Vegetronix. (s.f.). VH400 Soil Moisture Sensor. <https://vegetronix.com/soil-moisture-sensor>

Villacís, C. (2023). Diseño e implementación de un sistema de monitoreo web de sensores por comunicación LORAWAN para planta de tratamiento de aguas terciarias [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana]. DSpace UPS. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24120>

Villacís, S. (2024). Comprehensive Evaluation of LoRaWAN Technology in Urban and Rural Environments of Quito. *Sensors*, 24(1), 28. <https://www.mdpi.com/2673-4591/77/1/28>

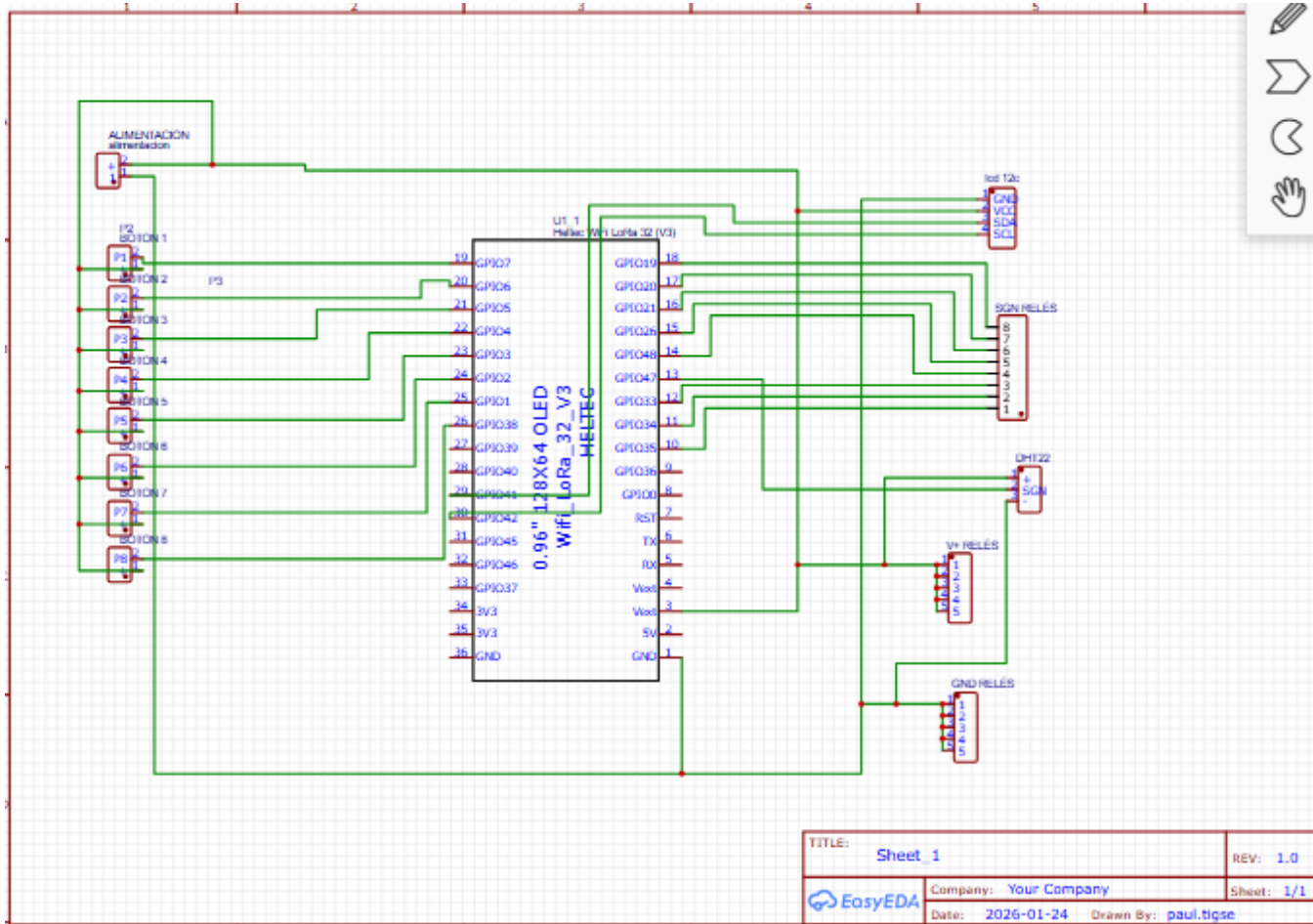
Wang, Y. (2023). Composting 4.0: From The Automatic Steering Of Compost Turners Towards An Autonomous Plant Management. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/369038619\\_Composting\\_40\\_From\\_The\\_Automatic\\_Steering\\_Of\\_Compost\\_Turners\\_Towards\\_An\\_Autonomous\\_Plant\\_Management](https://www.researchgate.net/publication/369038619_Composting_40_From_The_Automatic_Steering_Of_Compost_Turners_Towards_An_Autonomous_Plant_Management)

Wang, Z., et al. (2024). Design, Technical Development, and Evaluation of an Autonomous Compost Turner: An Approach towards Smart Composting. *Sustainability*, 16(15), 6347. <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/15/6347>

Yang, L., & Zhang, X. (2017). The research of IoT of agriculture based on three layers architecture. *IEEE Xplore*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7868325/>

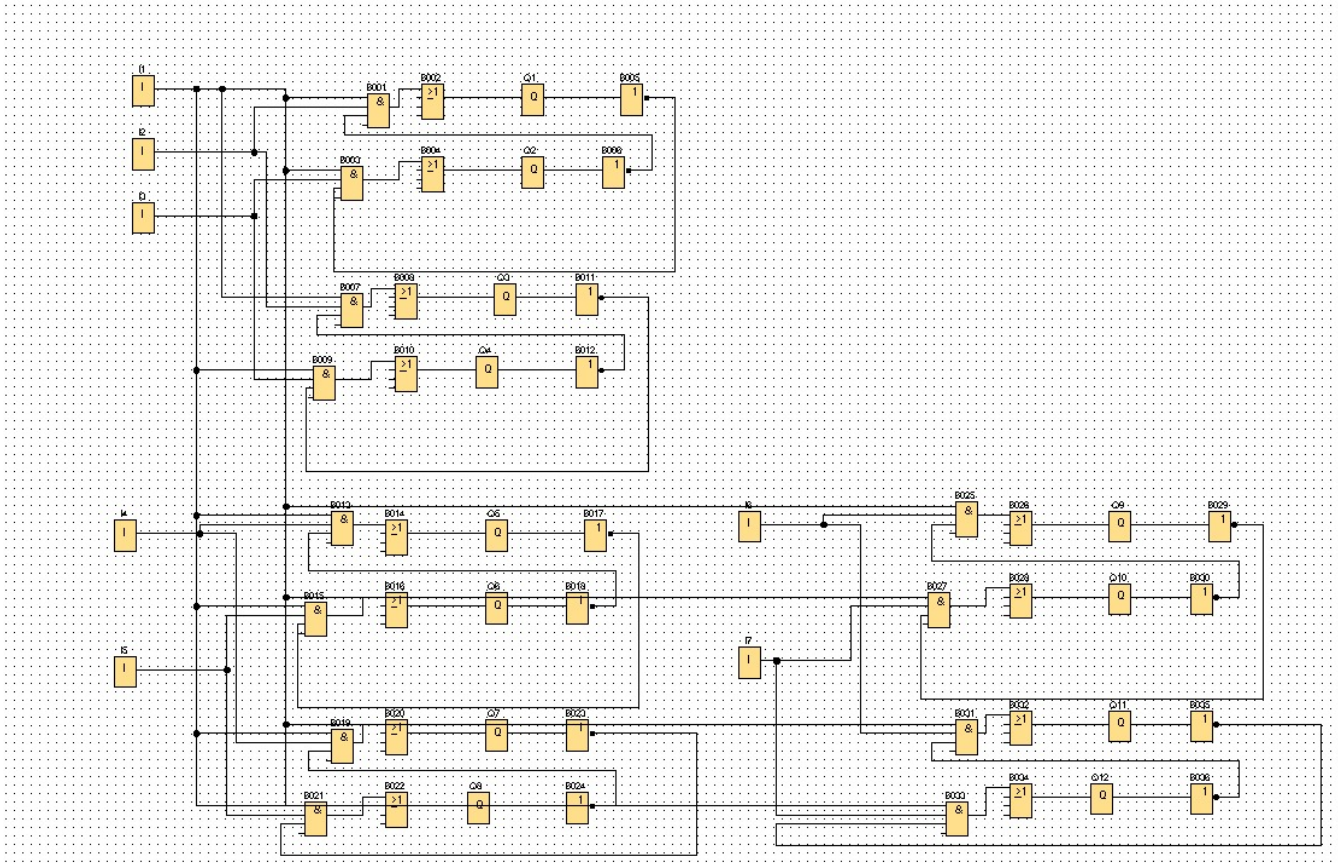
- Zerust. (2023, Noviembre 2). Corrosion Control for Control Rooms and Electronics: A Comprehensive Guide. <https://www.zerust.com/blog/2023/11/02/corrosion-control-for-control-rooms-and-electronics-a-comprehensive-guide/>
- Zhang, H., et al. (2023). Experimental Evaluation of RSSI-based Positioning System with Low-cost LoRa Devices. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/341207937\\_Experimental\\_Evaluation\\_of\\_RSSI-based\\_Positioning\\_System\\_with\\_Low-cost\\_LoRa\\_Devices](https://www.researchgate.net/publication/341207937_Experimental_Evaluation_of_RSSI-based_Positioning_System_with_Low-cost_LoRa_Devices)
- Zhang, Y. (2023). Modelling and control strategies in path tracking control for autonomous tracked vehicles: A review of state of the art and challenges. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/365746477\\_Modelling\\_and\\_control\\_strategies\\_in\\_path\\_tracking\\_control\\_for\\_autonomous\\_tracked\\_vehicles\\_A\\_review\\_of\\_state\\_of\\_the\\_art\\_and\\_challenges](https://www.researchgate.net/publication/365746477_Modelling_and_control_strategies_in_path_tracking_control_for_autonomous_tracked_vehicles_A_review_of_state_of_the_art_and_challenges)
- Zhao, X. (2024). Performance Evaluation of Compost of Windrow Turner Machine Using Agriculture Waste Materials. *Sustainability*, 16(17), 7779. <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/17/7779>
- Zoko Link. (s.f.). Agricultural IoT Architecture: Perception Layer, Transport Layer and Application Layer. <https://www.zoko-link.com/Product-knowledge/Agricultural-IoT-Architecture.html>

# ANEXOS



ANEXO 1 Esquema del circuito del módulo LoRa

Elaborado por Darwin Naranjo y Paul Tigse



ANEXO 2 Diagrama de Bloques de Funciones (FUP) para la Inversión de Giro en LOGO! Soft Comfort.

Elaborado por Darwin Naranjo y Paul Tigse