

DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO BASADO EN IoT PARA LA UNIDAD DE LOMBRICULTURA DEL CENTRO AGROPECUARIO - SENA REGIONAL CAUCA



**Nancy Amparo Guaca Girón
María Alejandra López Hurtado**

Trabajo de grado de Maestría en Telecomunicaciones

Director:
Ing. Guefry Agredo Méndez
Doctor en Ciencias de la Electrónica

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones GNTT
Maestría En Telecomunicaciones
Popayán, Cauca
2020**

NANCY AMPARO GUACA GIRÓN
MARÍA ALEJANDRA LÓPEZ HURTADO

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO BASADO
EN IoT PARA LA UNIDAD DE LOMBRICULTURA DEL
CENTRO AGROPECUARIO- SENA REGIONAL CAUCA**

Trabajo de grado presentado a la Facultad de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones de la
Universidad del Cauca para la obtención del
Título de

Magíster en:
Telecomunicaciones

Director:
Ing. Guefry Agredo Méndez
Doctor en Ciencias de la Electrónica

Popayán
2020

Aceptación

Mag. Catalina Muñoz Collazos

Universidad del Cauca

Mag. Edison Andrés Arteaga Lopez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia
UNAD

Dedicatoria

A Dios, que con su infinito amor me ha tomado de la mano, guiando los pasos que me han permitido cumplir esta meta. A mi papá que de seguro sigue siendo el más orgulloso de mi, como me lo dijo tantas veces. A mi mamita, lo que más quiero, a quien le debo todo lo que soy y lo que sé, esta es una pequeña forma de mostrarle lo bien que hizo su tarea.

A mis hermanos David, Camilo, a mis sobrinas Isabel y Sofi, este logro también es de ustedes.

A David, quien ha sido mi compañero, mi apoyo, este es un logro más del viaje que hemos emprendido juntos. A mis hijos, David y Jose Julián por quienes busco ser mejor persona, mejor profesional, mejor mamá, forjando un camino de inspiración y motivación para ellos.

Alejandra

A Dios por ser mi compañía y apoyo en todos los pasos de mi vida, a mis padres por su incondicional soporte, a mi hija Ana Sofía por su paciencia, amor y apoyo en mi camino, en especial a mi familia por sus palabras de aliento y dedicación. A mi hermano Nelson que como un ángel siempre estuvo pendiente de mi proceso académico, eres tú mi inspiración y tengo la certeza que desde el cielo te alegras por este logro.

Nancy

Agradecimientos

A la Universidad del Cauca, por esta oportunidad de crecimiento personal y profesional, al Ingeniero Guefry Leider Agredo Méndez, por el acompañamiento y paciencia en esta etapa de formación, infinitas gracias. A mi compañera de trabajo de grado Alejandra López por su apoyo y por sus palabras de aliento en cada etapa del proyecto.

A los instructores y aprendices del Centro Teleinformática y Producción Industrial y al Centro Agropecuario del SENA Regional Cauca, por su apoyo, colaboración y buena disposición en el proceso investigativo. En especial a la instructora Socorro Anaya por su constante colaboración en la realización del proyecto.

A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia -UNAD por la destinación de tiempo para el desarrollo de la formación postgradual y por todo el apoyo administrativo brindado.

Resumen Estructurado

Antecedentes: la lombricultura es una práctica muy valorada en el contexto agropecuario debido a la posibilidad de reciclar materia orgánica y producir abonos naturales que son aplicados a los cultivos para lograr lo que se conoce como sistemas de producción limpia. En el centro Agropecuario de la Regional Cauca del Servicio Nacional de Aprendizaje se ubica una unidad de lombricultura que desarrolla un proceso convencional de fabricación de humus y requiere el desarrollo de un sistema que permita monitorear las variables físicas y ambientales del lombricario que determinan la supervivencia y el éxito de la cría de lombrices con miras a garantizar un ambiente controlado y de esta manera maximizar la producción que allí se realiza.

Objetivos:

- Identificar y caracterizar los componentes de un sistema de monitoreo basado en IoT.
- Diseñar una red de sensores para el sistema de monitoreo de la unidad de lombricultura del SENA Regional Cauca.
- Evaluar el comportamiento de la solución IoT diseñada, mediante un prototipo.¹

Métodos: se analiza el problema para posteriormente identificar y caracterizar las variables críticas que deben ser monitoreadas, se realiza la visita a la unidad productiva con el fin de identificar el entorno físico y se entrevista al personal encargado para establecer rangos y parámetros óptimos de operación.

Se analizan las tecnologías disponibles para el despliegue de la solución, se seleccionan los sensores y se plantea el diseño.

¹ En el prototipo propuesto para el presente proyecto no se cuentan con elementos provistos por el SENA; se implementó con recursos propios tanto los sensores como demás mecanismos de monitoreo. En cuanto al almacenamiento de la información se usó servidores gratuitos para la implementación de las pruebas.

Se estableció un plan de pruebas, se realizó la configuración de los equipos y el sistema web, en el marco del desarrollo de un prototipo de prueba en el cual se obtuvieron los resultados para finalmente evaluar el comportamiento del sistema instalado.

Resultados:

- Se identificaron en la oferta del mercado sensores con buena precisión y de bajo costo para replicar el diseño resultante en contextos rurales.
- Los sensores a través de la tarjeta se conectan de manera permanente a un equipo local y al sistema web, transfiriendo datos con la periodicidad establecida.
- La conexión de la base de datos local con el sistema web a través de la red de Sigfox resultó exitosa permitiendo acceder a la información fácilmente desde cualquier ubicación.
- La tecnología Sigfox seleccionada ofrece un entorno gráfico amigable al usuario y un histórico de datos útil para el análisis del comportamiento de las variables, así como configuración de alertas útiles para la toma de decisiones en casos críticos de operación.
- La tarjeta Soul One requiere estar en el área de cobertura del proveedor Sigfox y comunicar los datos recopilados por los sensores de acuerdo con la programación realizada en el IDE Arduino. El acceso a la información a través del *backend* se realiza mediante contrato de suscripción con el proveedor que inicialmente corresponde a un año, una vez cumplido este plazo debe seguir pagando una tarifa anual.

Conclusiones:

- Al supervisar las variables críticas para la producción de la unidad de lombricultura: temperatura y humedad del sustrato e intensidad lumínica de la empresa, se garantizan las condiciones de supervivencia y masificación de población de las lombrices y por ende, la producción de abono orgánico.
- Entre las tecnologías LPWAN se escoge para la implementación de la solución la tecnología Sigfox, por su bajo consumo de energía, así como la facilidad en la instalación y mantenimiento en pro de masificar la solución a los productores de abono orgánico.

- La facilidad de instalación y bajo costo de los elementos de la red de sensores permite capacitar a los aprendices del SENA Regional Cauca en el uso de tecnologías para la producción limpia de la biofábrica así como masificar la solución a pequeños y grandes productores de abono orgánico

Palabras claves: agricultura inteligente, IoT, granja de lombricultura, Sigfox.

Structured abstract

Background: Vermiculture is a highly valued practice in the agricultural context due to the possibility of recycling organic matter and producing natural fertilizers that are applied to crops to achieve what is known as clean production systems. In the Agricultural Center of the Regional Cauca from the National Learning Service (SENA) there is a vermiculture farm unit that develops a conventional humus manufacturing process and requires the development of a system that allows monitoring the physical and environmental variables of the wormeries that determine survival and the success of the breeding of worms in order to guarantee a controlled environment and consequently maximize the production that takes place there.

Objetives:

- Identify and characterize the components of a monitoring system based on IoT.
- Design a network of sensors for the monitoring system of the vermiculture unit in the *SENA Regional Cauca*
- Evaluate the behavior of the designed IoT solution, through a prototype.²

Methodology: The problem is analyzed to later identify and characterize the critical variables that must be monitored, a visit to the production unit is made in order to identify the physical environment and the personnel in charge are interviewed to establish ranges and optimal operating parameters.

The available technologies for the deployment of the solution are analyzed, the sensors are selected, and the design is proposed.

² In the prototype proposed for this project, there are no elements provided by SENA; The sensors and other monitoring mechanisms were implemented with own resources. Regarding the storage of the information, free servers were used for the implementation of the tests.

A test plan was established, the equipment and the web system were configured, for the development of a test prototype in which the results were obtained to finally evaluate the behavior of the installed system.

Results:

- Sensors with good precision and low cost were identified in the market offer to replicate the resulting design in rural contexts.
- The sensors through the card are permanently connected to a local computer and to the web system and are transferring data with the established periodicity.
- The connection of the local database with the web system through the Sigfox network was successful, allowing easy access to information from any location.
- The Sigfox technology selected offers a user-friendly graphical environment and a useful data history for the analysis of the behavior of the variables, as well as configuration of useful alerts for decision making in critical operating cases.
- The *Soul One card* requires to be in the coverage area of the Sigfox provider and to communicate the data collected through the sensors according to the programming carried out in the Arduino IDE. Access to information through the *backend* is done through a subscription contract with the provider that initially corresponds to one year, once this period has expired, user must continue to pay an annual fee.

Conclusions:

- By monitoring the critical variables for the production of the vermiculture unit: such as, temperature and humidity of the substrate and light intensity of the establishment, the survival conditions and the massification of the worms' population are guaranteed and therefore, the production of organic fertilizer.

- Among the LPWAN technologies, Sigfox technology is chosen for the implementation of the solution, due to its low energy consumption, as well as the ease of installation and maintenance in order to spread the solution to organic fertilizer producers.
- The ease of installation and the low cost of the network sensor elements allow the instruction of the trainees from the SENA Regional Cauca in the use of technologies for the clean production of the biofactory, as well as to massify the solution to small and large producers of organic fertilizer.

Keywords: smart agro, IoT, vermiculture farm, Sigfox.

Contenido

Capítulo 1	1
Introducción	1
Capítulo 2	5
Generalidades	5
2.1 Introducción a la lombricultura.....	5
2.2 Internet de las cosas (IoT, <i>Internet of Things</i>).....	9
Capítulo 3	23
Diseño del Sistema de Monitoreo	23
3.1 Análisis de requerimientos.....	25
3.1.1 Caracterización de las variables.....	26
3.1.2 Situación actual.....	29
3.1.3 Descripción del entorno.....	31
3.1.4 Metas del negocio.....	37
3.2 Requerimientos.....	39
3.3 Diseño del sistema de monitoreo.....	40
3.3.1 Tecnología.....	40
3.3.2 Selección de sensores.....	44
3.3.3 Arquitectura del sistema.....	49
Capítulo 4	53
Implementación del Prototipo	53
4.1 Descripción del prototipo.....	53
4.2 Diseño del plan de pruebas.....	56

4.2.1	Pruebas de dispositivos	56
4.2.2	Pruebas de conexión local	57
4.2.3	Pruebas de acceso a la información en la plataforma web	57
4.2.4	Pruebas de integración	58
4.3	Configuración del sistema de monitoreo	58
4.3.1	Configuración de la tarjeta Soul One.....	58
4.3.2	Configuración del sistema web	60
4.4	Ejecución del plan de pruebas	61
4.4.1	Pruebas de acceso a la información en la plataforma web	69
4.4.2	Pruebas de integración	69
Capítulo 5	75
Conclusiones y Recomendaciones	75
5.1	Conclusiones.....	75
5.2	Recomendaciones.....	77
Bibliografía	79
Anexos	84

Lista de Figuras

Figura 2.1 Modelo de referencia IoT	14
Figura 2.2 Capacidades de seguridad genéricas de cada capa del Modelo IoT	16
Figura 2. 3. Comparación tecnologías LPWAN	17
Figura 3.1 Fases Metodología Top-Down	24
Figura 3.2 Ubicación del SENA Regional Cauca - Centro Agropecuario	32
Figura 3.3 Ubicación de la unidad de lombricultura.....	33
Figura 3.4 Ubicación Plano de la unidad de lombricultura (vista superior)	34
Figura 3.5 Fotografía del lombricario.....	34
Figura 3.6 Ubicación de las recámaras de drenaje de lixiviados.....	35
Figura 3.7 Estructura exterior del lombricario.....	36
Figura 3.8 Vista de las cubiertas de las camas	36
Figura 3.9 Cobertura global de la tecnología Sigfox.....	42
Figura 3.10 Cobertura para el sur occidente colombiano de la tecnología Sigfox.....	43
Figura 3.11 Cobertura para la ciudad de Popayán de Sigfox.....	44
Figura 3.12 Sensor Ds18b20.....	47
Figura 3.13 Módulo HD-38	48
Figura 3.14 Módulo sensor de intensidad lumínica	49
Figura 3.15 Método de recolección de lombricompost	50

Figura 3.16 Proceso de alimentación de las lombrices	51
Figura 3.17 Arquitectura sistema de monitoreo.....	51
Figura 4. 1 Cama doble a escala para el desarrollo del prototipo	54
Figura 4.2 Prototipo instalado.....	54
Figura 4.3 Ubicación de los sensores en el prototipo.....	55
Figura 4.4 Registro del dispositivo en el backend de Sigfox	59
Figura 4.5 Envío de datos de comprobación al <i>backend</i>	59
Figura 4.6 Creación de variables luminosidad, temperatura y humedad.....	60
Figura 4.7 Comparación de medidas de temperatura	62
Figura 4.8 Comparación de medidas de humedad.....	64
Figura 4.9 Visualización de datos en Monitor serie de Arduino.....	65
Figura 4.10. Datos de variables registrados en el backend.....	66
Figura 4. 11 Datos registrados en el <i>backend</i> para las variables	67
Figura 4.12 Comparación de medidas de temperatura y registro en el <i>backend</i>	68
Figura 4.13 Comparación de medidas de humedad y registro en el <i>backend</i>	68
Figura 4.14 Visualización de los datos en la plataforma Ubidots	69
Figura 4.15 Comportamiento de la variable luminosidad	70
Figura 4.16 Comportamiento de la variable temperatura	71
Figura 4.17 Comportamiento de la variable humedad.....	71
Figura 4.18 Configuración de eventos de alerta.....	72
Figura 4.19 Configuración de alerta para la variable temperatura.....	72
Figura 4.20 Configuración de alerta para la variable humedad	73
Figura 4.21 Configuración de alerta para la variable luminosidad.....	73

Figura 4.22 Alerta enviada a través de mensaje de texto	74
Figura A.1 Módulos que componen Soul One	84
Figura A.2 Sensor DS18B20	86
Figura A.3 Curva de rendimiento del sensor DS18B20.....	88
Figura A.4 Pines de conexión sensor DS18B20.....	88
Figura A.5 Sensor de humedad HD - 38	90
Figura A.6 Comportamiento del sensor LDR.....	91
Figura B.1 Alimentación de la tarjeta Soul One mediante micro USB	94
Figura B.2 Acceso al <i>backend</i> Sigfox.....	98
Figura B.3 Pantalla de acceso al sistema Sigfox.....	99
Figura B.4 Pantalla de acceso al sistema Sigfox.....	99
Figura B.5 Envío de datos de comprobación.....	100
Figura B.6 Decodificación del código Arduino en el <i>backend</i>	100
Figura B.7 Configuración de la carga útil para la decodificación	101
Figura B.8 Configuración del segmento de codificación.....	101
Figura B.9 Visualización de la información de los sensores.....	102
Figura B.10 Creación del callback.....	103
Figura B.11 Creación de cuenta en Ubidots.....	104
Figura B.12 Generación del Token API credentials.....	104
Figura B.13 Configuración de la URL en el callback	105
Figura B.14 Visualización del comportamiento de las variables.....	105

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Cambios en las propiedades del sustrato para las lombrices.....	6
Tabla 2.2 Especies más importantes para la lombricultura	7
Tabla 2. 3 Comparación de tecnologías.....	19
Tabla 2. 4 Costos de Sigfox, LoRaWAN y NB-IoT	21
Tabla 2. 5. Matriz criterios de selección	21
Tabla 3.1 Rangos aceptados para las variables críticas en lombricultura	29
Tabla 3.2 Rúbrica de evaluación para los sensores de temperatura.....	46
Tabla 3.3 Aplicación de la rúbrica de evaluación para los sensores de temperatura	46
Tabla A. 1. Resumen de módulos de la Tarjeta Soul One	85
Tabla A.2 Resumen de resolución de la Tarjeta Soul One.....	86
Tabla A.3. Características Sensor HD 38.....	89
Tabla A.4. Resistencia del sensor LDR.....	92

Lista de Anexos

Anexo A. Descripción técnica de los dispositivos.....	84
Anexo B. Descripción del proceso de instalación del prototipo	94
Anexo C. Cuestionarios.....	106

Listado de Acrónimos

AES	<i>Advanced Encryption Standard</i> - Estándar de Cifrado Avanzado
BI	<i>Business Intelligence</i> – Inteligencia del Negocio
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i> - Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i> – Chirp de Espectro Ensanchado
DL	<i>Down Link</i> – Enlace Descendente
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i> - Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i> - Acceso Múltiple por División de Frecuencia
GSM	<i>Global System for Mobile</i> - Sistema Global para las Comunicaciones Móviles
IoT	<i>Internet of Things</i> - Internet de las Cosas
ISM	<i>Industrial, Scientific, and Medical Band</i> - Banda de Frecuencia para el Área Industrial, Científica y Médica
LTE – M	<i>Long Term Evolution for Machines</i> – Evolución a Largo Plazo para Máquinas
LoRa	<i>Long Range</i> – Largo Alcance
LoRaWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i> - Red de área Extensa de Largo Alcance
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i> - Redes de Área Amplia de Baja Potencia

M2M	<i>Machine to Machine</i> – Máquina a Máquina
NB – IoT	<i>Narrowband Internet of Things</i> – Internet de las Cosas de Banda Estrecha
pH	Potencial de Hidrógeno
QoS	<i>Quality of Service</i> – Calidad de Servicio
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i> - Indicador de Intensidad de la Señal Recibida
TDoA	<i>Time Difference of Arrival</i> - Diferencia en los Tiempos de Llegada
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UL	<i>Up -Link</i> – Enlace Ascendente
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> - Modulación por Desplazamiento de Cuadratura

Capítulo 1.

Introducción

La lombricultura es un sistema de producción orientado a la transformación de materia orgánica por medio de la acción combinada de lombrices y microorganismos en productos aprovechables como el lombricompost, también denominado humus (sólido y líquido), abono natural que cuenta con unas propiedades físicas, químicas y biológicas que aportan significativos beneficios al suelo asociados a la aireación, retención de agua y absorción de nutrientes, entre otros.

Es una técnica ampliamente utilizada en diferentes regiones del mundo y a distintas escalas, pero que en los últimos años ha tomado gran relevancia y despliegue, ya que en el sector agropecuario se presenta una clara tendencia a consolidar sistemas de producción “limpios”, término que se relaciona con la eliminación del uso de fertilizantes y todo tipo de sustancias químicas artificiales, propendiendo por cultivos orgánicos y los beneficios asociados a este tipo de producción.

Este sistema depende de variables ambientales tales como la temperatura y humedad del suelo, así como la intensidad lumínica del entorno para poder ser eficiente y garantizar niveles de producción óptimos. La infraestructura empleada para este sistema de producción puede ser variada de acuerdo al contexto, a la disponibilidad de recursos y espacio del productor y a la cantidad de producción esperada. Pero independiente del tipo de cama, se requiere garantizar valores específicos de las variables mencionadas como hábitat ideal de las lombrices que maximicen la producción de lombricompost.

El Centro Agropecuario del SENA Regional Cauca, cuenta con un espacio denominado “La Granja” donde se ubican diferentes unidades que desarrollan los procesos de producción que apoyan la formación de los programas allí ofertados relacionados con los sectores agrícola, pecuario y administrativo, desde el componente práctico. Una de las unidades más nuevas, es la de lombricultura, diseñada para procesar la materia orgánica proveniente de todas las demás unidades productivas teniendo en cuenta que por un lado se presentaba una acumulación masiva de estos residuos sin tener ningún tipo de tratamiento, y además, se requiere maximizar la producción de abono orgánico tipo lombricompost, con el objetivo de aplicarlo en sus cultivos y formar a sus aprendices en esta técnica para que ellos sean capaces de replicar este proceso en el sector productivo donde se desempeñen posterior a su formación técnica y tecnológica.

En este trabajo de grado se revisaron las diferentes variables de interés para la unidad de lombricultura, los parámetros que caracterizan el concepto Internet de las Cosas (IoT - *Internet of Things*), y las tecnologías asociadas, con el fin de diseñar un sistema de monitoreo basado en este concepto que permita verificar de manera permanente las condiciones ambientales de la unidad mencionada. Este sistema permite acceso constante a la información, así como reportes históricos del comportamiento de las variables desde cualquier dispositivo vía web, favoreciendo su disponibilidad y facilitando el análisis de los datos y consecuentemente la toma de decisiones.

Este tipo de sistemas aportan precisión y eficiencia a la producción y se aplican no solo en lombricultura si no en múltiples sectores representando una oportunidad de despliegue e integración de la tecnología en contextos relativamente poco explorados como lo son el agrícola y el pecuario.

Este trabajo de grado se estructura de la siguiente forma:

El capítulo 1 corresponde a la introducción del documento, que presenta la síntesis del trabajo, resaltando los parámetros más relevantes de su desarrollo.

El capítulo 2, reúne los aspectos generales de la lombricultura, características y condiciones para su producción, así como la revisión del concepto IoT, su arquitectura, componentes y las tecnologías que permiten su implementación y despliegue.

El capítulo 3, describe la metodología seguida para la realización del trabajo, y especifica sus tres primeras fases: la caracterización del contexto y la identificación de variables a monitorear, la descripción de requerimientos y el diseño del sistema de monitoreo.

El capítulo 4, presenta la cuarta fase que comprende el desarrollo del prototipo, las configuraciones, los resultados de las pruebas y la evaluación final del sistema.

Finalmente, el capítulo 5 consigna las conclusiones y recomendaciones finales.

Capítulo 2

Generalidades

En este capítulo se explican los aspectos generales de la cría y producción de lombrices detritívoras, es decir formadoras de humus comúnmente conocido como lombricultura y generalidades del concepto IoT, su arquitectura, los dispositivos y las tecnologías asociadas, con el objetivo de establecer un marco conceptual previo al diseño del sistema objeto del presente proyecto.

2.1 Introducción a la lombricultura

La lombricultura es el proceso en el cual las lombrices de tierra intervienen en la degradación de los residuos orgánicos, estos pueden ser agrícolas, orgánicos domésticos, lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, estiércol de animales y residuos de comida. La lombricultura es la consecuencia de la interacción de las lombrices y los microorganismos. Los encargados de la degradación de los residuos son los microorganismos y las lombrices se encargan de la fragmentación, aireación y homogenización del sustrato, es decir, que lo acondicionan para la actividad microbiológica, ya que, modifican sus propiedades fisicoquímicas y biológicas como se resume en la Tabla 2.1 [1], esto lo hacen mientras se alimentan, se desplazan y cuando generan su excremento [3].

En algunos países, a esta misma actividad se le conoce como vermicultura, lombricultivo y al material resultante de la descomposición por este anélido se le conoce como humus, lombrihumus, vermicompost, bio-compost y también bioabono [3].

Propiedades	Cambios
Físicas	<ul style="list-style-type: none"> • Fragmentación • Porosidad • Aumenta el área para la descomposición microbiana • Aireación
Químicas	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilización de la materia orgánica • Ciclo de nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) • Mejora el pH del suelo
Biológicas	<ul style="list-style-type: none"> • Elimina bacterias de los excrementos, disminuyendo los patógenos. • Los microorganismos de las deyecciones de la lombriz modifican el proceso de descomposición.

Tabla 2.1 Cambios en las propiedades del sustrato para las lombrices.

El proceso tiene 2 fases con respecto a la actividad de la lombriz: en la primera o fase hidrolítica digieren el sustrato, en el cual modifican sus propiedades físicas y biológicas o su composición microbiológica, y en la segunda, o fase de maduración, las lombrices se desplazan hacia las capas de sustrato más fresco para digerirlo, mientras los microorganismos descomponen los residuos procesados por la lombriz en la fase 1 [2].

Como resultado del proceso se obtiene el lombricompost, que es un abono orgánico, con buena cantidad de nutrientes y materia orgánica necesaria en las diferentes etapas del crecimiento de las plantas, aumenta la porosidad de los suelos, aporta e incrementa la disponibilidad de nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, entre otros. [3]

En la Tabla 2.2 [4] se resumen las especies de lombrices más importantes para la lombricultura

Familia	Especie
Megascolecidae	<ul style="list-style-type: none"> • Eodrilus eugeniae • Perionyx excavatus • Pheretima hawayana • Pheretima asiática
Lumbricidae	<ul style="list-style-type: none"> • Eisenia foetida • Lumbricus rubellus • Lumbricus terrestris

Tabla 2.2 Especies más importantes para la lombricultura

Fuente: propia del estudio

Es importante decir que, de las 2.200 especies de lombrices clasificadas hasta el momento, en la lombricultura se emplean cuatro tipos de ellas [3]:

Eiseniafoetidafoetida (Roja californiana)

Eiseniafoetidaandrei (Roja californiana)

Eudriluseugeniae (Roja africana)

Perionyxexcavatus (Roja africana)

La Eisenia foetida es una lombriz más conocida y empleada para la lombricultura. Al nacer las lombrices son de color blanco, al quinto y sexto día se ponen rosadas y a los 120 días se tornan de color rojizo y pueden aparearse.

La lombriz roja californiana es hermafrodita, la cópula ocurre cada 7 o 10 días, luego cada individuo coloca un huevo de unos 2 centímetros del cual emergen de 2 a 21 lombrices, después del periodo de incubación que tarda entre 14 a 21 días, este tiempo depende de la alimentación y de los cuidados.

Entre las razones para la elección de la lombriz roja californiana se encuentran: tiene longevidad próxima a los 16 años, capacidad reproductiva es muy elevada puede duplicarse cada 45 a 60 días, se alimenta con mucha voracidad consumiendo tanto desechos agropecuarios (estiércol, residuos agrícolas, entre

otros) como desechos orgánicos de la industria. Produce gran cantidad de humus. [5]

Condiciones óptimas para el desarrollo de la lombriz roja californiana: se relacionan las condiciones ambientales que favorecen el desarrollo de las lombrices las cuales serán ampliadas en el capítulo siguiente [5].

Humedad: debe ser del 70% para facilitar la ingestión del alimento, ya que la lombriz toma el alimento chupándolo; la falta de humedad imposibilita dicha operación y el exceso origina empapamiento y oxigenación deficiente.

Temperatura: el rango óptimo oscila entre 12 – 25°C si es superior a 33°C muere la lombriz porque aumenta la actividad microbiana y química del sustrato, en este escenario se requiere riegos más frecuentes, por el contrario, si es baja se detiene la reproducción de la lombriz.

PH: óptimo debe ser de 7, aunque tolera un rango entre 5 y 9, una tierra muy ácida o por el contrario muy básica puede generar la muerte del animal.

Aireación: fundamental para la correcta respiración y desarrollo de las lombrices, si no es la adecuada la lombriz disminuye el consumo de alimento, además del apareamiento y reproducción debido a la compactación.

Alimento: materia orgánica parcial o totalmente descompuesta, así evita elevadas temperaturas generadas durante el proceso de fermentación, que puede afectar a las lombrices. Tipo de alimento: materia orgánica como residuos vegetales, frutas, tubérculos, estiércol, entre otros.

- **Sistemas de lombricultura**

Para la crianza de lombrices se deben tener en cuenta dos aspectos fundamentales: la preparación de camas de crianza y la preparación del sustrato.

Respecto a la infraestructura de los lombricarios, se establece que los sistemas de lombricultura se pueden realizar de diferentes formas:

Lombricultura en pilas: realiza igual que el compostaje, se apilan los lechos sobre el suelo o sobre plástico u hormigón. Cuando la materia orgánica se ha madurado (ya no se calienta), se agregan las lombrices. Se debe cuidar de la intemperie para que no se mueran las lombrices.

Vermicompostador comercial: está diseñado para mantener las condiciones óptimas para el proceso. En este sistema se intensifica la producción y aumenta la inversión en mano de obra, ya que se necesitan varios operadores y la infraestructura a utilizar requiere los mejores materiales para que perdure en el tiempo.

Lombricultura en camas: en un espacio delimitado sobre el suelo, se distribuye el sustrato con las lombrices, debe tener drenaje para evitar acumulación de agua y de gases. Son las más comunes y utilizadas.

Lombricultura en camas elevadas: se ubican sobre soportes. Tiene las mismas recomendaciones en cuanto a la estructura y el manejo que las otras camas.

Lombricultura en contenedores: el proceso se hace en unos contenedores entre 20 a 70 m^3 son unidades móviles, se cuenta con equipo para medir las condiciones atmosféricas dentro del contenedor. Este también se puede hacer en barriles de plástico.

2.2 Internet de las cosas (IoT, *Internet of Things*)

Internet de las cosas es definido por la UIT como “*una infraestructura de red global dinámica con capacidades de autoconfiguración basadas en protocolos de comunicación estándar e interoperables donde las cosas físicas y virtuales tienen identidades, atributos físicos y personalidades virtuales, y usan interfaces inteligentes de manera integrada en la red de información*” [6].

El término fue inicialmente introducido en el Instituto de Tecnología de Massachusetts en 1999, se basa en la conexión permanente de personas y objetos cotidianos con la nube [7], refiriéndose a la idea que todas las cosas se conecten a Internet y por lo tanto es un concepto que implica la comunicación Máquina a Máquina (M2M, *Machine to Machine*)

Existen múltiples definiciones en la literatura disponible, todas apuntan a la posibilidad de controlar y monitorear elementos o sistemas tan pequeños y simples como la iluminación o el acceso a una vivienda hasta robustas plataformas de producción o monitoreo biomédico que exigirían gran precisión y condiciones de operación en entornos complejos.

En el entorno IoT se requiere un sensor para detectar y registrar información, un procesador para gestionarla y conectividad para compartirla (enviarla o recibirla). Un factor importante es que los dispositivos se puedan interconectar con estándares abiertos [8].

En los estudios realizados por Cisco titulado “La Capacidad del IoT de Transformar el Futuro” [8], estima que para el año 2020 habrá 50 mil millones de dispositivos conectados. Por su parte BI intelligence, teniendo en cuenta el número estimado de dispositivos de IoT, considera para el año 2019, IoT añadirá un valor de 1.700 millones a la economía del mundo, ya que sus campos de aplicación abarcan transporte, salud, hogar, industria, entre otros. En la actualidad las ciudades enfrentan grandes desafíos en temas económicos, ambientales y urbanísticos, es ahí donde las ciudades inteligentes incluyen redes integradas, sensores inalámbricos y sistemas inteligentes de administración, para resolver desafíos del presente y el futuro, en contraste con el área de agricultura y ganadería, donde el desarrollo de IoT no ha sido favorable y no se tiene como prioridad [8].

Las Redes de Área Amplia de Baja Potencia (*LPWAN, Low Power Wide Area Network*) tecnología de conectividad que está orientada a dispositivos IoT con restricción de energía, en el informe de IoT Analytics LPWAN 2020-2025 publicado en enero de 2020 [9], indica que durante el año 2019 se instalaron 231 millones de dispositivos creciendo más del 110% en comparación con 2018. El crecimiento del

mercado es impulsado por el despliegue de tecnologías a gran escala en diferentes partes del mundo: algunos ejemplos están representados por Sigfox³ que en Japón modernizó 850.000 medidores de gas; LoRaWAN⁴ en Francia opera 400.000 medidores inteligentes de agua y se espera conectar más de 3 millones en la ciudad de Lyon en los próximos 10 años, mientras que tecnologías como NB-IoT⁵ y LTE-M⁶ en China permiten el rastreo de cerca de 1 millón de bicicletas eléctricas, en Suecia más de 2 millones de medidores de electricidad inteligentes están equipados con radios NB-IoT y LTE-M. Se establece que durante el año 2019 estas tecnologías han mostrado aumento de cobertura y crecimiento de usuarios, así específicamente Sigfox cuenta con más de 700 socios fabricantes de hardware, desarrolladores de software y proveedores de servicio [10].

Se estima que las conexiones de IoT crezcan a 22 billones en 2025, de igual manera se espera que LPWAN⁷ sea un motor clave de crecimiento debido a que esta tecnología permite que los dispositivos funcionen con baterías durante 10 años sin intervención humana. Entre las tecnologías LPWAN más populares se encuentran NB-IoT, LoRaWAN y Sigfox. Se espera que LPWAN en el año 2023 tenga un gasto anual para conectividad de 4,7 millones de dólares, en sectores que adopten esta tecnología tales como: agricultura, infraestructura, industria, transporte, salud, hogar, logística, ciudades inteligentes, entre otros [11]. De esta manera, el sector agrícola sería uno de los más beneficiados con la integración de sistemas IoT pues este tipo de soluciones contribuyen a mejorar tanto la productividad como los ingresos en el sector.

En IoT la tecnología LPWAN depende del área de aplicación específica y de los requerimientos, como la tasa de datos, el rango, consumo de energía, banda de frecuencia, bidireccionalidad, costos de la red, escalabilidad y seguridad. Los autores clasifican las tecnologías LPWAN en dos categorías: tecnologías LPWAN licenciadas como NB-IoT, o tecnologías LTE, GSM o 5G aplicadas a IoT, por su parte las tecnologías no licenciadas como tecnologías Sigfox, LoRa. [12]

³ Sigfox Tecnología LPWAN de protocolo propietario

⁴ LoRaWAN Especificación para Redes de Baja Potencia y Área Amplia

⁵ NB-IoT Redes Móviles de Banda Estrecha Diseñadas para IoT (NB-IoT, *Narrowband IoT*)

⁶ LTE-M estándar para comunicaciones inalámbricas de transmisión de datos de alta velocidad para teléfonos móviles y terminales de datos para máquina (LTE-M, *Long Term Evolution for Machines*)

⁷ LPWAN Redes de Área Amplia de Baja Potencia (LPWAN, *Low Power Wide Area Network*)

Características de un Sistema IoT:

Las soluciones IoT se caracterizan por ciertos aspectos que las diferencian de otros tipos de sistemas de comunicaciones, éstas son:

- **Heterogeneidad:** el rango de dispositivos que componen las soluciones IoT es muy amplio y diverso, por lo tanto, los elementos basados en diferentes plataformas hardware y redes deben interactuar entre sí.
- **Dinámica:** teniendo en cuenta las características y los entornos de aplicación de las soluciones IoT, tanto el número como el estado de los dispositivos, parámetros propios del contexto como la ubicación, la velocidad del movimiento, entre otros, pueden variar de forma dinámica y, por lo tanto, el sistema debe dar respuesta a estas condiciones cambiantes.
- **Escalabilidad:** el número de dispositivos IoT interconectados puede aumentar significativamente en el despliegue de cada solución y por tanto los datos que se generan también aumentarán, así que se requiere mecanismos que permitan la gestión de los datos generados, su interpretación y su manipulación de forma eficiente.
- **Conectividad:** en el contexto de IoT, todos los “objetos” o “cosas” pueden estar interconectados con la infraestructura mundial de la información y la comunicación, es decir deben contar con los componentes físicos y lógicos que permitan establecer un enlace o comunicación con otros dispositivos, distintos o iguales según sea el caso.
- **Consumo de Potencia:** la gestión de energía para los dispositivos que componen el sistema IoT resulta uno de los desafíos más importantes para su diseño y despliegue pues de manera general son equipos de tamaño pequeño que requieren una larga duración de la batería o ser autoalimentados teniendo en cuenta las condiciones de los entornos en los cuales serán instalados.

Elementos de un sistema IoT

De manera genérica un sistema IoT cuenta con los componentes que a continuación se describen:

- **Dispositivos IoT:** los elementos que se encuentran directamente en contacto con el mundo físico, captando los datos objetivo y constituyen los componentes desde donde se recopila la información, para posteriormente procesarla y enviarla a través de una red.

Dichos dispositivos están principalmente asociados a la detección de magnitudes, ya que en los sistemas IoT que se diseñan e instalan se monitorean variables físicas como la temperatura, humedad, luminosidad, presión, proximidad, y nivel, entre otras.

Los dispositivos IoT no son simples sensores considerando que el objetivo de los sistemas que los incluyen es conectar “cosas” para mantener de forma permanente información sobre las mismas y en muchos casos, tomar decisiones al respecto. Generalmente el elemento de detección está integrado a un componente hardware más complejo que incluye alimentación, sistemas de transmisión y recepción de los datos, controladores, entre otros; todo esto se conoce como nodo IoT.

- **Red de comunicación:** constituye la infraestructura, es decir, el medio a través del cual se transporta la información que se obtiene de cada una de las cosas u objetos que se encuentran interconectados. Típicamente se trata de una conexión inalámbrica teniendo en cuenta los contextos donde se incluyen los sistemas IoT; las conexiones mediante cable se realizan en caso de dispositivos muy específicos.
- **Nube:** constituye el conjunto de servidores remotos, alojados en centros de datos que consolidan y almacenan la información proveniente de los sensores. Estos datos, que, de acuerdo a la naturaleza del sistema, pueden ser cantidades masivas, se almacenan, procesan y visualizan en la nube según los requerimientos propios de la solución.

Modelo de referencia IoT

La muestra la estructura del modelo de referencia de IoT, en él se han definido cuatro capas y sus correspondientes capacidades de gestión y de seguridad [12].

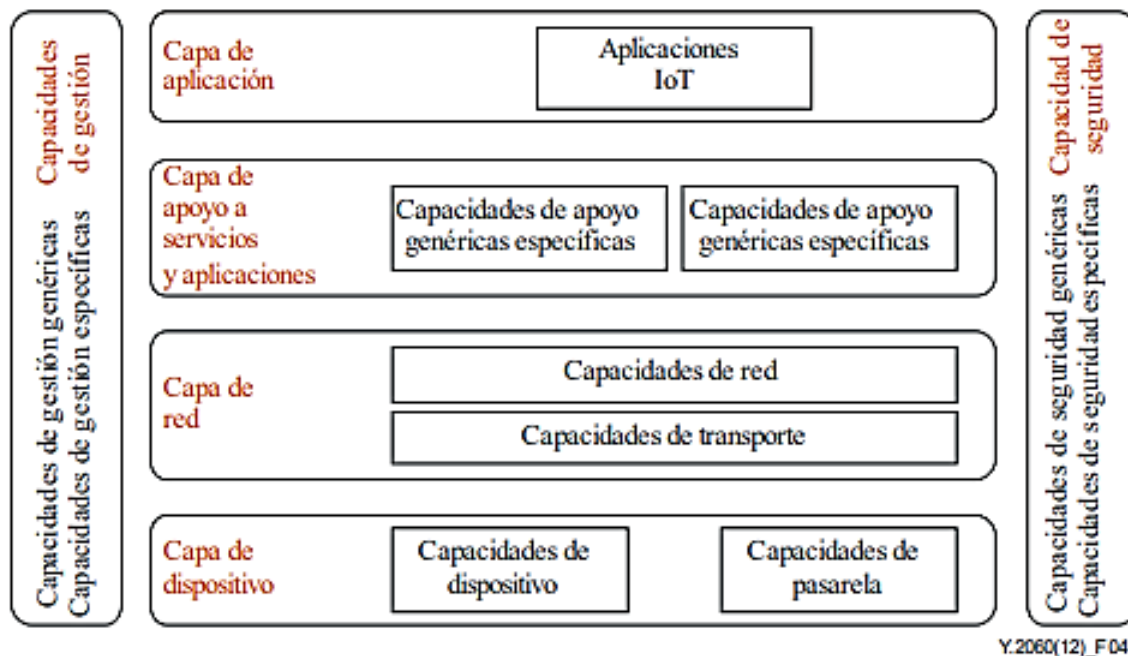


Figura 2.1 Modelo de referencia IoT

Fuente: tomado de Recomendación UIT-T Y.2060

Capa de Aplicación: se encuentra en la parte superior del modelo y contiene las aplicaciones que usan los datos generados en todo el sistema IoT.

Capa de soporte de servicios y aplicaciones: incluye dos capacidades, las genéricas o comunes que pueden ser utilizadas por distintas aplicaciones, tales como procesamiento o almacenamiento de datos; y las específicas que se adaptan a los requisitos de las aplicaciones con el fin de proporcionar diferentes funcionalidades particulares para cada aplicación, y que, como su nombre lo indica, representan soporte o apoyo a las aplicaciones.

Capa de red: Corresponde al tipo de infraestructura que soporta el sistema IoT, sea cableada o inalámbrica e incluye dos tipos de capacidades:

- De red: ofrecen funciones de control de la conectividad en red, tales como funciones de control de acceso y de recursos de transporte, gestión de la movilidad y autenticación, autorización y contabilidad (AAA).
- De transporte: centradas en suministrar conectividad para el transporte de información y datos específicos de servicios y aplicaciones IoT, así como el transporte de información de control y gestión relacionada con IoT.

Capa de dispositivo:

Esta capa incluye los dispositivos físicos que soportan la aplicación (nodos sensores), es allí donde se gestiona la identificación de los mismos, las capacidades de hardware y el recurso de energía.

Es clave en la operación del sistema IoT, está directamente relacionada con la infraestructura que conecta con Internet y de acuerdo al tipo de conexión pueden clasificarse de dos maneras:

Capacidad de dispositivo: en este tipo de función, la interacción se realiza de manera directa con la red de comunicaciones: los dispositivos pueden enviar y recibir a la red y desde ella los datos de manera directa, sin recurrir a una *Gateway*.

Capacidad de pasarela: el envío y recepción de información desde y hacia la red de comunicación, se realiza a través de una *Gateway* o pasarela.

Capacidades de gestión: al igual que en otras redes de comunicaciones y de manera transversal a todas las capas del modelo, se requiere de capacidades de gestión que se encarga de manejo de fallos, rendimiento y seguridad. Se clasifican en:

- Genéricas: como la gestión de dispositivos (activación y desactivación), diagnóstico, actualización del firmware y/o del software, gestión del estado

de trabajo del dispositivo; gestión de la topología de red local; gestión del tráfico y la congestión, como la detección de las condiciones de saturación de red y la aplicación de reserva de recursos para los flujos de datos esenciales para la vida o urgentes.

- Específicas: están estrechamente relacionadas con los requisitos específicos de la aplicación, por ejemplo, requisitos de control de la línea de transmisión por la red de suministro eléctrico inteligente.

Capacidades de seguridad: también se dividen en genéricas y específicas así: las capacidades de seguridad genéricas son independientes de la aplicación y son, entre otras las que se muestran en la Figura 2.2:

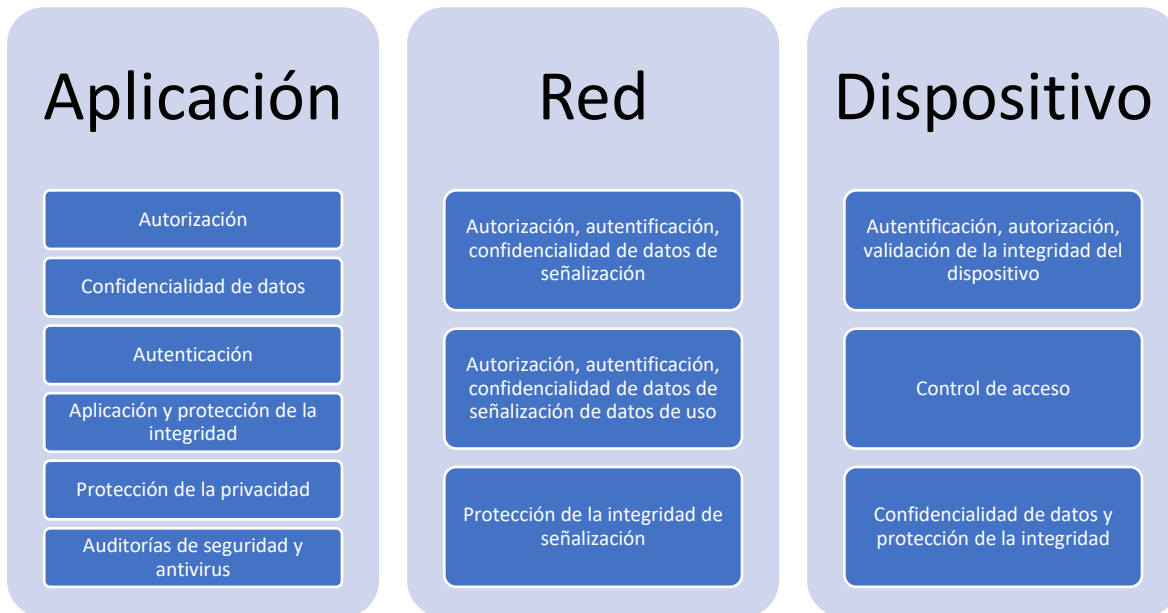


Figura 2.2 Capacidades de seguridad genéricas de cada capa del Modelo IoT

Fuente: propia del estudio

Las capacidades de seguridad específicas están estrechamente relacionadas con los requisitos propios de cada aplicación, por ejemplo, los requisitos de seguridad para el pago con el móvil.

Conectividad e Interconexión

Se dispone de diversas tecnologías inalámbricas con diferentes tipos de cobertura, para el proyecto se requiere revisar tecnologías como las redes de área amplia y de baja potencia conocidas como LPWAN diseñadas para comunicaciones de dispositivos de baja velocidad de bits. Los precursores de estas tecnologías son Sigfox, LoRa-WAN y NB-IoT.

Las redes LPWAN proporcionan excelente cobertura en áreas urbanas, rurales y remotas, ésta puede variar de 5 a 40 km, los dispositivos tienen vida útil de la batería de 10 años y por su parte las estaciones admiten muchos dispositivos.

La empresa de telecomunicaciones Bismark realiza un análisis comparativo de las tecnologías disponibles para redes LPWAN. En la Figura 2.3 se observa las diferentes aplicaciones y usos de las tecnologías Sigfox, LoRaWan y NB-IoT en cuanto a escalabilidad, latencia, cobertura, *payload*, batería, costos entre otros factores.



Figura 2. 3. Comparación tecnologías LPWAN

Fuente: tomado de Bismark Colombia SAS [13]

A continuación, se dará una reseña de las tecnologías de LPWAN como Sigfox, LoRaWAN y NB-IoT [14].

Sigfox opera y comercializa una solución propietaria de IoT en 31 países en asocio con varios operadores en cada país, para el año 2020 se cuenta con presencia en 72 países. Los mensajes enviados no tienen reconocimiento, cada dispositivo envía los mensajes tres veces a través de diferentes canales de frecuencia, por su parte las estaciones base reciben simultáneamente mensajes, el dispositivo IoT puede al transmitir escoger un canal al azar que reduce la complejidad y costo de este.

La Red de área Extensa de Largo Alcance – LoRaWAN, por su parte es una tecnología desarrollada por Semtech, trabaja en la banda ISM Sub-Ghz, provee comunicación bidireccional proporcionada por el Chirp de Espectro Ensanchado (CSS, *Chirp Spread Spectrum*). Cada mensaje transmitido por un dispositivo final es recibido por las estaciones base, se requiere múltiples estaciones base con lo cual se incrementa el costo de la solución. LoRaWAN puede localizar los dispositivos finales al recibir del mismo mensaje del dispositivo final.

NB-IoT es una tecnología de 3GPP, utiliza el acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA) en el enlace ascendente y ortogonal FDMA en el enlace descendente empleando modulación QPSK. NB-IoT puede existir con GSM y LTE en los siguientes modos de operación: independiente usando las frecuencias de GSM, operación de banda de guarda utilizando los recursos que no se usan en la banda de guarda en LTE y operación dentro de banda con recursos dentro de la banda de operación en LTE.

En la Tabla 2.3 [15] se revisan diversos de protocolos de LPWAN como Sigfox, LoRaWAN y NB-IoT

Tecnologías	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Estándar	Compañía Sigfox en colaboración	LoRa - Alliance	3GPP

	con ETSI en la estandarización		
Modulación	BPSK	CSS	QPSK
Frecuencia	Banda 915 Mhz en USA	Banda 915 Mhz en USA	Frecuencia licenciada de LTE
Ancho de banda	100 Hz	125 Khz a 250 Khz	200 Khz
Máxima tasa de datos	100 bps	50 Kbps	200 Kbps
Bidireccional	Limitado / Half-duplex	Si / Half-duplex	Si / Half-duplex
Máximos mensajes al día	140 (UL), 4 (DL),	Ilimitado	Ilimitado
Máxima longitud de <i>Payload</i>	12 bytes (UL), 8 bytes (DL),	243 bytes	1600 bytes
Rango de cobertura	10 km (urbano), 40 Km (rural)	5 km (urbano), 20 Km (rural)	1 km (urbano), 10 Km (rural)
Inmunidad a interferencia	Muy alto	Muy alto	Bajo
Autenticación y Encriptación	Si (AES 128b)	Si (AES 128b)	Si
Tasa de datos adaptativa	No	Si	No
Localización	Si (RSSI)	Si (TDOA)	No (bajo especificación)
Permite red privada	No	Si	No

Tabla 2. 3 Comparación de tecnologías

A continuación, se revisan diversos factores a considerar en la elección de la tecnología IoT adecuada para el desarrollo del proyecto.

QoS: en el presente diseño este factor no es crítico por lo que tecnologías como LoRaWAN o Sigfox que no tienen un buen desempeño como NB-IoT, pueden ser usadas.

Duración de batería y latencia: los dispositivos finales están en modo suspensión en la mayor parte del tiempo, de modo que reducen la cantidad de energía consumida. En el proyecto se requiere reducir el consumo de energía por lo que la tecnología NB-IoT es descartada, otro factor a tener en cuenta en el diseño propuesto donde la latencia no es un factor crítico por lo que Sigfox y LoRaWAN que proporciona baja latencia es una buena solución.

Escalabilidad y *Payload*⁸: la tecnología de NB-IoT proporciona una gran escalabilidad, en el presente diseño no implica una red tan grande por lo que es posible realizarla usando Sigfox o LoRaWAN. Para el caso del *payload* si bien NB-IoT ofrece hasta 1.600 bytes, LoRaWAN máximo 243 bytes, Sigfox una carga útil de 12 bytes; para el diseño propuesto no se necesita enviar gran cantidad de datos.

Cobertura: Sigfox alcanza hasta los 40 km, LoRaWAN tiene un alcance hasta 20 km, para el caso de NB-IoT sólo se despliega en regiones con cobertura LTE. en cuanto al rango de cobertura, se requiere de un enlace entre la ubicación de la cama de lombrices y el servidor de aplicaciones con lo cual tecnologías como Sigfox e incluso LoRaWAN cubren este aspecto.

Modelo de implementación: LoRaWAN se ha instalado en 42 países frente a 31 de Sigfox, se tiene en cuenta que los despliegues de estas tecnologías aún están en una fase inicial. Es importante tener en cuenta que LoRaWAN requiere un despliegue de red local es decir LAN utilizando la puerta de enlace LoRa, por su parte, la tecnología Sigfox ofrece un modelo que se puede ajustar a los requerimientos de diseño.

Costos: en la Tabla 2.4; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** [15], se consideran varios aspectos incluyendo el espectro (licencia), costos de instalación y costos del dispositivo final.

⁸ Payload en las redes son los datos más importantes (carga útil), en informática es la parte de datos transmitidos efectivos.

	Costos espectro	Costo instalación	Costo dispositivo final
Sigfox	Sin costo	>4000€/ estación base	<2€
LoRaWAN	Sin costo	>100€/gateway >1000€/ estación base	Entre 3 a 5€
NB-IoT	>500 M€ /MHz	>15000€/ estación base	>20€

Tabla 2. 4 Costos de Sigfox, LoRaWAN y NB-IoT

La tabla de costos está proyectada para Europa, pero es posible extrapolarla a Colombia, por lo que la solución más viable en cuanto a costos y los otros factores analizados es la ofrecida por Sigfox. En la tabla 2.5, se revisan diversos factores a considerar en la elección de la tecnología IoT adecuada para el desarrollo del proyecto

Protocolo	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Duración de batería y latencia	x	x	
Escalabilidad	Baja	Baja	Alta
Payload	12 bytes	243 bytes	1600 bytes
Cobertura	40 km	20 km	Cobertura LTE
Consideraciones de implementación	Dispositivos independientes	Puerta de enlace LoRa	Cobertura LTE
Costo de Espectro	Sin costo	Sin costo	Tecnología LTE
Costo dispositivo final	Menor a 2 euros	Entre 3 a 5 euros	Mayor a 20 euros

Tabla 2. 5. Matriz criterios de selección

En el campo de la agricultura inteligente se requiere batería de larga duración, otro factor a considerar es que los dispositivos envían información pocas

veces por hora, debido a los bajos cambios en el entorno, por lo que tanto Sigfox como LoRaWAN son ideales para este escenario, teniendo en cuenta el consumo de batería la tecnología NB-IoT no se considera como opción viable para el diseño propuesto. Otro aspecto por el cual se descarta NB-IoT radica en que en el sector del SENA no se tiene cobertura LTE. Por los aspectos mencionados en el desarrollo del proyecto de la biofábrica se opta por la tecnología Sigfox por su topología, consumo de energía y por cubrir varios aspectos del requerimiento de diseño, otro aspecto importante es que la tecnología Sigfox ya tiene plataforma montada en el departamento del Cauca y cuenta con cobertura en el área de interés.

Capítulo 3

Diseño del Sistema de Monitoreo

Existen múltiples metodologías para el diseño de redes, entre ellas la metodología en Cascada, presenta facilidad de aplicación, sigue un modelo lineal, secuencial, esta metodología se adapta en escenarios donde se encuentran claramente definidos los requerimientos y las herramientas a utilizar [17], el enfoque metodológico que ordena rigurosamente las etapas del proceso, de modo que al inicio de cada etapa debe esperar la finalización de la etapa anterior [18].

Generalmente todas sugieren los siguientes pasos: recopilación de datos y expectativas de los usuarios, análisis de requerimientos, diseño de red, documentación de la implementación física y lógica de red. Para el desarrollo del proyecto se analizaron diferentes metodologías como la metodología en Cascada, presenta facilidad de aplicación, sigue un modelo lineal, secuencial, esta metodología se adapta en escenarios donde se encuentran claramente definidos los requerimientos y las herramientas a utilizar [17], el enfoque metodológico que ordena rigurosamente las etapas del proceso, de modo que al inicio de cada etapa debe esperar la finalización de la etapa anterior [18]. También se revisaron metodologías de tipo RAD (Rapid Application Development), específicamente Scrum, como método ampliamente utilizado y vigente.

Analizando la usabilidad y madurez de cada una, la aplicación específica en redes y telecomunicaciones, y el hecho de desarrollar una red para un contexto desconocido para el equipo de trabajo, se elige la metodología Top Down de Cisco pues proporciona procesos y herramientas tendientes a cumplir con los requerimientos del usuario y se enfocan en los objetivos de la organización.

Se consideraron las significativas ventajas en cuanto a funcionalidad, disponibilidad, escalabilidad, accesibilidad y seguridad que aporta la metodología y como criterio ponderante se considera el enfoque que se da a atender puntualmente las necesidades del usuario, haciendo un análisis exhaustivo de las condiciones particulares del entorno para dar una solución acorde.

El diseño del sistema de monitoreo parte de la caracterización del contexto donde se identifica el problema y los requerimientos que se necesitan atender para plantear la solución correspondiente. Lo anterior se desarrolla siguiendo la metodología de diseño de redes de Cisco: Top - Down Network Design [16] la cual define cuatro fases, como se observa en la Figura 3.1, para el diseño de redes que permiten satisfacer objetivos empresariales y técnicos de cualquier organización, en este caso, la unidad de lombricultura del SENA Regional Cauca.

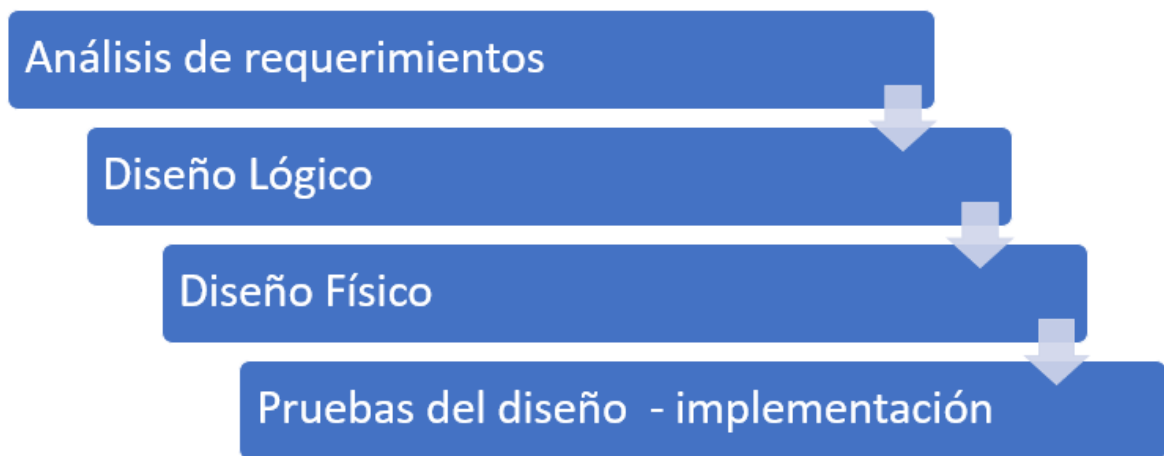


Figura 3.1 Fases Metodología Top-Down

El presente capítulo abarca las tres primeras fases de la metodología que comprenden el análisis de requerimientos, el diseño lógico de la red y el diseño físico. La fase de implementación y prueba se desarrolla en el capítulo siguiente.

La entrevista [20] en un proceso investigativo es un instrumento cualitativo que permite establecer una conversación a través de unas preguntas previamente diseñadas, cuando se trata de la entrevista estructuradas, o una entrevista abierta cuando no se implementan preguntas, simplemente se va desarrollando el tema de

conversación. Al decir del autor la entrevista en la investigación cualitativa tiene como objetivo obtener una serie de respuestas.

En el caso particular de la presente investigación, se realizó el tipo de entrevista no estructurada mediante la cual los temas fueron fluyendo en la medida que la información requerida permitía profundizar, analizar, explicar o aclarar determinados temas motivo de la investigación.

La metodología seleccionada tiene como objetivo fundamental atender las necesidades del usuario para abordar el diseño en función de la solución de estas. Así mismo plantea la división del sistema en módulos que puedan ser integrados, complementados o reemplazados.

El proceso de diseño inicia con la exploración del contexto, analizando en detalle cada uno de los parámetros de interés para la unidad productiva con el fin de entender las metas y restricciones de negocio, desde el punto de vista del usuario y desde allí plantear una solución de red que dé respuesta a los requerimientos identificados bajo criterios de eficiencia.

3.1 Análisis de requerimientos

Esta fase constituye el análisis de las metas del negocio [17] y las metas técnicas, analiza el estado actual de la red, si existe y define los elementos de importancia para la arquitectura

Como sugiere la metodología, se desarrolla mediante la observación y entrevista realizada a los usuarios y al personal técnico de la unidad de lombricultura, la cual se relaciona en el Anexo C, el instrumento permite conocer los objetivos técnicos del diseño, reconocer la tecnología existente y caracterizar los elementos relevantes para plantear el diseño en la siguiente fase. Con la ayuda de los instrumentos usados para recopilar información, se logra contextualizar la unidad de lombricultura, estimar las variables teniendo en cuenta las características

fisiológicas de las lombrices y finaliza con el punto de vista económico al abordar las metas del negocio.

3.1.1 Caracterización de las variables

Inicialmente se identifican las variables críticas en el sistema de producción de la unidad, ya que, según la fisiología de las lombrices de tierra, se establece que hay condiciones en el ambiente que deben cumplirse para su supervivencia, reproducción y, por ende, para la producción de lombricompost.

- **Temperatura:** El rango óptimo de temperaturas para el crecimiento de las lombrices y para la formación de cocones (par de capullos que resultan de cada apareamiento, uno para cada consorte debido que son individuos con aparato genital masculino y femenino), oscila entre 12 - 25 °C. Especies como la *Esenia Fétida* crece y se reproduce en condiciones óptimas a 25 °C.

Es posible que alcancen a tolerar temperaturas hasta 35 °C, pero sucede que en el sustrato cuando incrementa la temperatura, aumenta la actividad microbiana y química, por lo tanto, disminuye el oxígeno para las lombrices y empieza a presentarse mortalidad de estos individuos.

Además, cuando las lombrices detectan un aumento de temperatura, intentan emigrar buscando ambientes más frescos, y consecuentemente detienen su reproducción.

Las temperaturas demasiado bajas en las camas también resultan críticas para la lombricultura, a medida que la temperatura desciende, las lombrices disminuyen su actividad, es decir que, si se presentan temperaturas entre los 15 y los 20 °C, éstas entran en un período de latencia donde disminuye la velocidad a la que degradan los restos, así como su tasa reproductiva. Por debajo de los 5 °C los

adultos pueden morir, no así los cocones, éstos en la mayoría de los casos no eclosionan hasta que las condiciones ambientales sean adecuadas [18].

De lo anterior se concluye que el rango óptimo de temperatura que debe garantizarse para el lombricario cubre desde los 20 a los 25°C.

- **Humedad:** La humedad es uno de los factores abióticos más importantes para el desarrollo de las lombrices. El agua constituye uno de los componentes principales del cuerpo de las lombrices, se estima entre el 70 y el 75% de su peso vivo, lo cual representa una de las mayores dificultades que tienen estos organismos en su hábitat: la retención de agua para la supervivencia. [19]

Niveles óptimos de humedad, establecidos entre el 70% y el 80%, repercuten directamente en la reproducción y alimentación de las lombrices, si este parámetro se encuentra en un nivel del 70%, por ejemplo, se facilita la ingestión de alimento y el deslizamiento a través del material de base de la cama.

En cambio, si la humedad no es adecuada puede dar lugar a la muerte de la lombriz, por un lado, las lombrices toman el alimento a partir de la succión de la tierra, por tanto, la falta de humedad les imposibilita dicha operación y de otro lado, su respiración es cutánea, es decir, a través de la piel y para que puedan respirar, debe haber una correcta proporción de aire y de agua en el sustrato. Si el nivel de humedad es superior a 80%, físicamente se presenta un empapamiento de dicho sustrato, es decir que los poros por donde debería circular el aire están ocupados por agua causando malos olores en las camas, proliferación de insectos y lo más crítico; la muerte de las lombrices.

Si el estado de la cama presenta niveles inferiores al 55% de humedad (seco), la mortalidad de lombrices es altísima, por lo tanto, es un parámetro crítico para la producción de lombrices a gran escala.

- **PH:** Otro parámetro que debe ser monitoreado y controlado en el lombricario es la acidez o alcalinidad del sustrato, medida en el nivel de pH de este. Las lombrices poseen unas glándulas calcíferas alrededor del esófago que tienen como función estabilizar el pH del alimento ingerido, es decir, de la materia orgánica que se ha dispuesto en el sustrato.

La lombriz acepta sustratos con pH de 5 a 8.4, idealmente 7, es decir, un nivel neutro ya que si hay mucha acidez (pH bajo), su actividad degradadora disminuirá y se presentan además otros efectos asociados a la coloración de las lombrices, pues, éstas cambian a un tono más rosado o blanquecino, y la zona del clitelo (abultamiento que tienen aproximadamente a la altura del primer tercio de la longitud corporal) se hincha [19]. Si el sustrato es alcalino (niveles de pH alto), se presenta una baja capacidad de infiltración, es decir, una estructura pobre y una lenta permeabilidad, que se refleja en el encharcamiento del sustrato, hábitat poco favorable para las lombrices.

- **Intensidad lumínica:** las lombrices son fotofóbicas [19], su desplazamiento en la cama se realiza a través de los túneles que ellas mismas excavan a partir de la succión de la materia orgánica presente en el sustrato. Dicha sensibilidad se produce gracias a una especie de sensores o fotorreceptores que están ubicados en el epitelio que si bien, no les permite distinguir las imágenes, si puede percibir la presencia de luz y huir de ella.

Si el ambiente donde se ubica la cama y, por ende, el sustrato está iluminado, ellas no lo procesarán; de esta manera el lombricompost producido en condiciones de oscuridad tales como recintos, cámaras cerradas o cualquier otro entorno cubierto y oscuro será el resultado de una biodegradación más eficiente.

Las variables para monitorear teniendo en cuenta los factores que constituyen las condiciones aceptables para un hábitat destinado a la producción a gran escala de lombricompost se sintetizan en la Tabla 3.1.

Variable	Rango permitido	Valor óptimo
Temperatura	20 °C a 25 °C	25 °C
Intensidad lumínica	Nula	Nula
pH	5 a 8	7
Humedad	70% a 80%	75%

Tabla 3.1 Rangos aceptados para las variables críticas en lombricultura

Fuente: propia del estudio

3.1.2 Situación actual

La medición de los parámetros críticos del entorno donde se instala la unidad de lombricultura se realiza de forma manual y esporádica, cuando, a criterio del personal técnico a cargo de la granja, se ha alterado alguno de los factores determinantes para la producción de lombricompost.

Para la temperatura se utiliza un termómetro convencional de mercurio, teniendo en cuenta que es un factor perceptible asociado a la variación climática de la ciudad de Popayán, que, de acuerdo a los registros históricos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) presenta una temperatura máxima de 24,9°C y mínima de 13,4°C (valores promedio anual) [20].

La situación crítica presentada es generalmente una baja de temperatura dado que en la región no se presentan temperaturas superiores a los 27°C, ni por debajo de los 13°C. En estos casos, los técnicos cierran el acceso al lombricario y cubren las camas con plástico ya que de otros montajes de lombricultura se conoce que de esta manera se aumenta la temperatura del sustrato, situación que corroboran nuevamente, alrededor de 20 minutos después de haber realizado dicha acción, esto, también de manera manual, dejando registro escrito en la bitácora del lugar. Esta medición se realiza dos veces al día, una a la media mañana y otra a la media

tarde y más veces cuando se requiera, es decir, en días muy nublados o lluviosos cuando se perciben bajas temperaturas con el objetivo de tomar medidas si es el caso.

En general, se conoce que, en la región Pacífica, se encuentran temperaturas medias comprendidas entre 22 y 28°C; las temperaturas son relativamente más bajas que para otras regiones del país con estas mismas elevaciones, dado que es la región más lluviosa del país. El Pacífico Sur presenta temperatura media del aire casi constante a lo largo del año con valor promedio de 25°C, al igual que las temperaturas extremas medias que fluctúan entre 22°C y 28°C. [19]

Respecto a la humedad, la prueba para medir su porcentaje en el sustrato se conoce como prueba de puño, después de una inspección visual de las camas, removiendo superficialmente el sustrato, se realiza esta prueba la cual consiste en agarrar una cantidad del mismo en la mano, se aprieta el puño haciendo una especie de exprimido y se espera que, a criterio del personal a cargo, salgan unas cuantas gotas, indicando que la humedad es la adecuada para cada cama. De no ser así, se considera sustrato seco con bajos niveles de humedad, debe realizarse aspersión de agua con un sistema de riego manual con el cual cuentan en la unidad productiva. No se tienen registros de casos opuestos, o sea, de sustratos empapados, con humedad estimada en niveles superiores al 80%.

En las instalaciones objeto del estudio no se cuenta con un elemento o dispositivo que permita medir con precisión los niveles de humedad, por lo tanto, se recurre a este método manual.

La medida del pH se realiza con un medidor convencional, que consiste en una sonda conectada a un display, la cual se introduce de forma manual en dos ubicaciones de la cama y se lee la medida correspondiente. Para resultados desfavorables (suelo ácido, con niveles de pH inferiores a 7), los técnicos optan por aplicar cal sobre el sustrato y cuando la medida refleja alcalinidad, entonces optan por aplicar miel de purga y yeso al sustrato con el objetivo de neutralizarlo.

Cabe mencionar, que, una vez analizado el contexto, el pH del sustrato deja de considerarse como una variable crítica para el sistema de monitoreo por dos razones: por un lado, es una medida que se hace al sustrato cuando se va a suministrar la materia orgánica a la cama para establecer que efectivamente cuenta con un potencial de hidrogeno (pH) neutro. En caso de no ser así se toman las medidas previas necesarias como ya se mencionó ya sea encalando o haciendo mezclas bien conocidas por los productores para garantizar la neutralidad de la materia.

Además, como las lombrices tardan un tiempo estimado de 3 meses en degradar la totalidad de la materia suministrada, esta variable sólo requiere ser medida con esa periodicidad, a diferencia de las otras variables que, si pueden presentar cambios importantes durante un día, incluso, en el transcurso de unas cuantas horas y que son factores críticos, que inciden directamente sobre la supervivencia de la población del lombricario.

El lombricario está completamente cubierto, la razón es que se busca garantizar que la intensidad lumínica sea mínima, idealmente nula, lo cual es imposible durante el día. Respecto a este parámetro no se realiza ninguna medida, excepto las disposiciones que tienen los técnicos en cuanto a mantener el acceso siempre cerrado y verificar permanentemente que no haya orificios en las cubiertas laterales que permitan el ingreso de luz durante el día.

3.1.3 Descripción del entorno

El Centro Agropecuario del SENA Regional Cauca se encuentra ubicado en la Carrera 9 No. 71N-60, salida de Popayán hacia la ciudad de Cali; coordenadas: 2°28'58.6"N 76°33'33.5"W. En la Figura 3.2 se muestra en el mapa la ubicación de la Institución.



Figura 3.2 Ubicación del SENA Regional Cauca - Centro Agropecuario

La Figura 3.3 muestra la ubicación exacta de la unidad de lombricultura dentro de lo que se denomina la Sede Norte del SENA, instalaciones que son compartidas por el centro de teleinformática y producción industrial y el centro agropecuario.



Figura 3.3 Ubicación de la unidad de lombricultura.

En la entrevista con el personal técnico indica que la unidad de lombricultura se encuentra ubicada en la parte baja de la granja del Centro Agropecuario del SENA, junto a la biofábrica, consiste en un recinto cerrado con fibra de prolipropileno y plástico, con las medidas y disposición que se muestra en la Figura 3.4 y en la Figura 3.5.

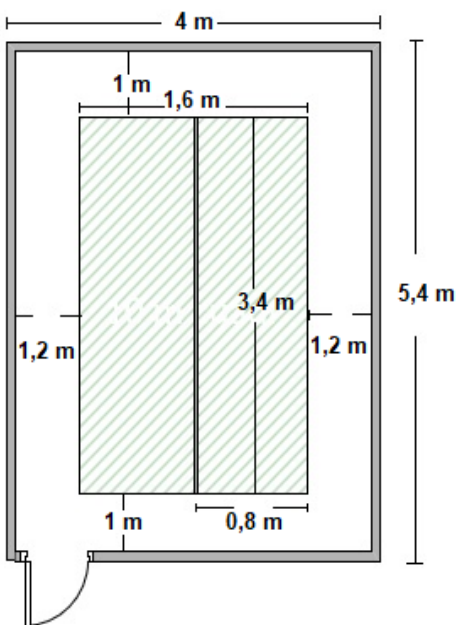


Figura 3.4 Ubicación Plano de la unidad de lombricultura (vista superior)

Fuente: propia del estudio



Figura 3.5 Fotografía del lombricario

Fuente: propia del estudio

Consta de una cama doble de tipo industrial, es decir, construida para producción de humus a gran escala, cada cama, es una estructura rectangular, montada con estacas de guadua de 50 cm. de altura, instaladas sobre una superficie plana, con pendiente de 10°, para garantizar el efectivo drenaje de los lixiviados, considerando que el humus líquido es un producto de gran demanda dada sus altísimas propiedades bioestimulantes para el suelo. Para esto, se cuenta con 2 recámaras de drenaje ubicadas cada una al borde de la cama correspondiente, como se muestra en la Figura 3.6.



Figura 3.6 Ubicación de las recámaras de drenaje de lixiviados

Fuente: propia del estudio

El piso está construido en esterilla, material que permite aislar el lombricario del suelo para evitar el ataque de posibles plagas, así mismo, todo el recinto está cubierto con malla para evitar la entrada de aves o cualquier otro depredador de lombrices.

Como muestra la Figura 3.7, el techo está formado por tejas de zinc para garantizar un ambiente de sombra permanente que facilite el trabajo degradador de la lombriz.



Figura 3.7 Estructura exterior del lombricario

Cada cama tiene una cubierta de polisombra negra, en forma de tapa, que garantiza el nivel nulo de luminosidad que debe tener la estructura para ser el hábitat ideal de las lombrices, la cual se abre única y exclusivamente para proveer el alimento a los animales, hacer el monitoreo manual de las variables temperatura y pH del sustrato y recolectar el lombricompost como muestra la Figura 3.8.



Figura 3.8 Vista de las cubiertas de las camas

Fuente: propia del estudio

Cabe mencionar que las instalaciones de esta unidad de lombricultura carecen de red eléctrica y la conexión más cercana se encuentra a unos 6 metros, donde se ubica la biofábrica.

3.1.4 Metas del negocio

En cuanto a las metas del negocio [17] la unidad de lombricultura ha sido diseñada para albergar una población inicial de 200.000 lombrices, que hoy se estima en unas 500.000 en promedio, de acuerdo al tiempo que lleva en operación este proyecto. Este valor es variable teniendo en cuenta las condiciones de supervivencia, y factores como la tasa de reproducción y alimentación de estos anélidos, descritos en el capítulo anterior y ampliados en el presente capítulo, además, porque otra de las líneas de comercialización de la unidad, aunque en una mínima escala, es lombrices vivas vendidas por kilogramo ya sea para poblar otros lombricarios o para ser usadas en gastronomía. Considerando estos dos aspectos se establece entonces la cifra anteriormente mencionada como la población de base de las camas.

En las camas en cuestión, el sustrato está compuesto por una primera capa de materia seca como hojas, paja y heno. Esto se recubre con material nitrogenado como residuos de postcosecha, estiércol y pasto verde. Seguidamente se ubica una capa de tierra húmeda y sobre esta tierra se sigue suministrando de manera periódica, la materia orgánica que resulta de todas las unidades productivas del centro agropecuario.

La materia orgánica que se produce de las diferentes unidades productivas del Centro Agropecuario está constituida por estiércol de los animales de la granja (ovino, caprino, conejaza y cuyinaza), residuos de cosecha y poscosecha, y material vegetal. Todo esto se transporta hasta un espacio contiguo al lombricario donde se hace un proceso de precompostaje, previo a suministrarse como alimento a las lombrices. A este material se le realiza el proceso de pesaje y las medidas correspondientes para conocer su relación Carbono-Nitrógeno y pH y de esta manera establecer la viabilidad de proveerlo a las camas para su biodegradación o

si, por el contrario, debe someterse a algún tratamiento adicional que neutralice los valores.

Para el desarrollo del presente proyecto se ha estimado que en promedio se generan 500 Kilogramos de materia orgánica apta para ser consumida por las lombrices, los cuales son suministrados mensualmente, distribuyendo esta cantidad en las dos camas que conforman la unidad

A partir de la degradación de estos residuos se obtienen alrededor de 400 a 450 kilogramos de lombricompost y 2 galones de lixiviados⁹, lo que representa un aprovechamiento del 80% al 90% de los residuos, cifra muy significativa teniendo en cuenta las propiedades del producto final, el cual aporta grandes beneficios al suelo como la aireación del mismo, el gran número de nutrientes que provee, la retención de agua, mejora de la textura, y aumento de la flora microbiana, y, de otro lado, que se resuelve una problemática creciente para el Centro Agropecuario al degradar, mediante un proceso biológico, la totalidad de materia orgánica proveniente de las distintas áreas de la granja, que actualmente se acumula generando gravísimos problemas asociados a la contaminación del ambiente y a la salubridad e higiene de las áreas y de las especies que allí conviven.

Cabe mencionar que desde la biofábrica se han realizado ejercicios experimentales relacionados con el compostaje convencional donde intervienen exclusivamente los microorganismos presentes en la misma materia orgánica, pero los resultados no son comparables ya que se alcanzan unos porcentajes de 30% de pérdida (representado en material de descarte) por deshidratación de los residuos, situación que no ocurre con el lombricompost.

De todo lo anterior se concluye que es necesario establecer el sistema de monitoreo, objeto del presente trabajo, con el fin de garantizar un ambiente controlado que permita revisar de manera permanente las condiciones del hábitat de las lombrices, para que de esta manera puedan lograrse los estimados de

⁹ Lixiviado: también conocido como humus líquido de lombriz es una concentración líquida de nutrientes que se obtiene durante el proceso de descomposición que llevan a cabo las lombrices sobre la materia orgánica. Se caracteriza por presentar una coloración café intensa y un aroma frutal.

producción de lombricompost y lixiviados y pueda desarrollarse el proyecto macro denominado “Lombricoca” el cual busca, de manera experimental, combinar la hoja de coca con otros elementos y analizar el lombricompost resultante con el objetivo de determinar las propiedades físico químicas que posibiliten un uso alternativo de este insumo. Todo esto está enmarcado dentro de las premisas del Centro Agropecuario que en todos sus procesos formativos propende por una producción 100% orgánica, asociada al concepto de producción limpia, libres de abonos químicos y con significativas ventajas para los consumidores de productos agrícolas, adicionalmente porque se busca que estos modelos productivos sean replicados por los aprendices que se encuentran en formación y posteriormente se van a desempeñar en el sector productivo.

3.2 Requerimientos

Teniendo en cuenta las necesidades del trabajo a desarrollar se identifican los siguientes requerimientos:

- El sistema debe ser capaz de detectar la información de temperatura, y humedad y del sustrato que contiene la cama doble de la unidad de lombricultura, así como la intensidad lumínica del entorno, suministrando la fecha y hora en la cual fueron adquiridos los datos.
- La red debe estar activa y operando adecuadamente el 99.5% del tiempo de funcionamiento.
- La plataforma web debe ser accesible en cualquier momento y encontrarse operando y enlazada permanentemente con el sistema local.
- Debe contar con un sistema de alimentación alternativo a la corriente eléctrica que provee la red convencional teniendo en cuenta que en el entorno donde se instala el sistema de monitoreo no hay conexiones eléctricas dispuestas para alimentar los distintos elementos que lo conforman.

Con todo lo establecido hasta este punto se logra cumplir el primer objetivo definido para el presente trabajo, relacionado con la identificación y caracterización de los componentes de un sistema de monitoreo basado en IoT.

Específicamente se han identificado los elementos constitutivos de una solución IoT, las características físicas y técnicas que estos deben tener para la funcionalidad que prestarán, se analizaron los parámetros de interés de las tecnologías LPWAN disponibles y finalmente se revisa la situación actual de la unidad de lombricultura de la Granja SENA Regional Cauca, para determinar los requerimientos puntuales de la solución teniendo en cuenta las condiciones de la infraestructura existente, las necesidades particulares asociadas a la producción y la proyección de la unidad productiva, todo esto, según lo sugerido por la metodología seleccionada.

3.3 Diseño del sistema de monitoreo

Esta segunda fase sugerida por la metodología comprende el diseño de la topología de red que soporta el sistema de monitoreo, y todos los parámetros asociados a la gestión de dicha red.

3.3.1 Tecnología

En el sistema a diseñar de la unidad de lombricultura, en el componente de la infraestructura inalámbrica para la conectividad de los sensores, se disponen de varias tecnologías con diferentes tipos de cobertura, como ya se mencionó en el capítulo anterior.

En el entorno del proyecto y en general, en cualquier sistema de monitoreo diseñado para áreas rurales, se requiere batería de larga duración en los sensores de temperatura, humedad entre otros; otro factor a considerar es que los dispositivos envían información pocas veces por hora, debido a los pocos cambios en el entorno, por lo que tanto Sigfox como LoRaWAN son ideales para este entorno, en contraste, por el consumo de batería, no se considera NB-IoT; además, otro aspecto a considerar para descartar NB-IoT radica en que en el sector del SENA no se tiene cobertura LTE.

Después de haber revisado las tecnologías LPWAN diseñadas para comunicaciones de dispositivos de baja velocidad de bits como los sensores, se determina Sigfox como la tecnología más apropiada para implementar el sistema de monitoreo. Los factores para tener en cuenta en esta decisión son: topología, cobertura en la región de interés, consumo de energía y por cubrir varios aspectos del requerimiento de diseño como son:

- La necesidad de transmitir datos con baja periodicidad (cada 10 minutos en condiciones críticas o por evento) teniendo en cuenta que las variables a sensor no presentan cambios importantes en períodos más cortos, lo que se acoge al límite admitido por la tecnología Sigfox.
- La inexistencia de alimentación por la red eléctrica que requiere optimización de los recursos energéticos del entorno. Este aspecto, relacionado con el factor anteriormente descrito se acoge a la característica de la tecnología que determina el mínimo consumo de potencia.
- La simplicidad del hardware ya que, a diferencia de otras tecnologías, no se requiere de dispositivos como *gateways* o nodos centrales que recojan la información, si no que una sola tarjeta conecta los sensores que están en operación, recoge la información de éstos y los transmite directamente a la nube evitando la instalación, además, de una conexión de red para cargar dichos datos.

Cabe mencionar que las comunicaciones celulares no son tenidas en cuenta en la solución por el requerimiento de energía de los dispositivos, así como los costos asociados en la instalación.

Sigfox es una compañía francesa fundada en 2009 que proporciona el servicio de red inalámbrica que se considera un tipo de red LPWAN que ha sido diseñada para la operación de dispositivos de bajo consumo energético y con pequeñas cantidades de datos tales como los sensores que se utilizan para el monitoreo de variables como temperatura, intensidad lumínica y humedad. Sigfox utiliza la tecnología radio UNB¹⁰, y emplea canales estrechos del espectro para

¹⁰ UNB, Ultra Narrow Band, tecnología de modulación utilizada por LPWAN diseñada para funcionar con bajas velocidades de transferencias de 10 a 1.000 bits por segundo

alcanzar grandes distancias (incluso varios kilómetros) con un requerimiento mínimo de energía lo cual permite el despliegue de redes escalables de alta capacidad como se muestra en el gráfico comparativo con otras tecnologías de radio. [21]

Esta red opera bajo el mismo principio de redes de telefonía celular, es decir, a partir de la ubicación de varias estaciones receptoras y transmisoras; y los dispositivos conectados a dicha red Sigfox no están asociados a una estación base específica, sino que, cualquier estación puede recibir la información y transmitirla hacia la nube.

La Figura 3.9 es tomada del sitio oficial de Sigfox, muestra la cobertura a nivel global, donde se establece en color oscuro las zonas geográficas que cubre la red actualmente y donde se encuentra en despliegue esta tecnología. Como se puede ver, toda América, excepto Bolivia, Venezuela, Paraguay y parte del Caribe no cuentan con el despliegue de esta tecnología de red.



Figura 3.9 Cobertura global de la tecnología Sigfox

Específicamente para Colombia, Sigfox inicia su despliegue desde el 2016 en alianza con Phaxsi Solutions y con WND como operador único, cubriendo gran parte del territorio nacional (Figura 3.10) y, de acuerdo con los mapas de cobertura

en el sitio oficial de Sigfox, se especifica qué regiones cuentan con 1, 2 o más de 3 estaciones base, puede establecerse que para la zona de interés se tiene una buena cobertura teniendo en cuenta que la ciudad de Popayán, específicamente en la zona norte donde se ubica el proyecto objetivo del presente trabajo tiene más de tres estaciones base de transmisión y recepción lo que se constituye en el mejor de los escenarios como lo muestra la Figura 3.11.

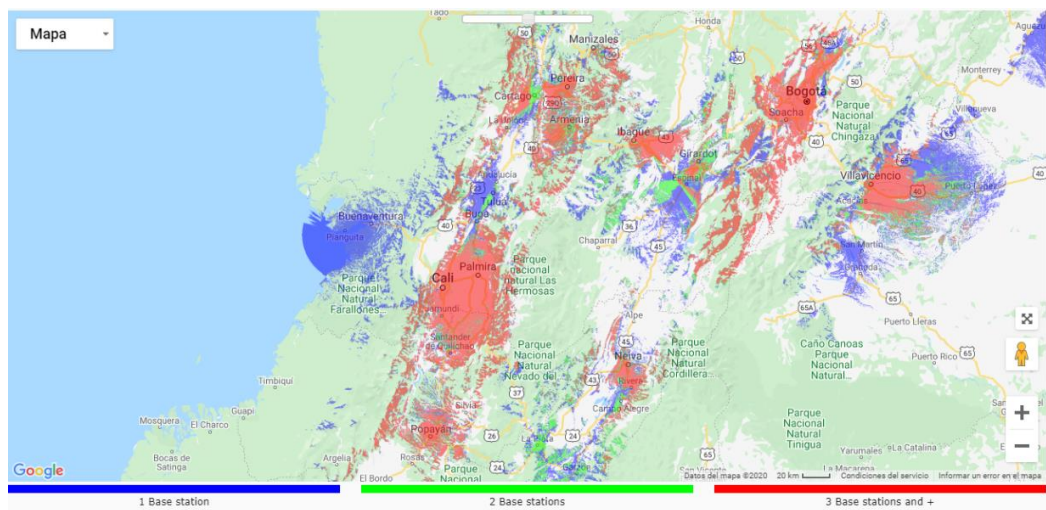


Figura 3.10 Cobertura para el sur occidente colombiano de la tecnología Sigfox

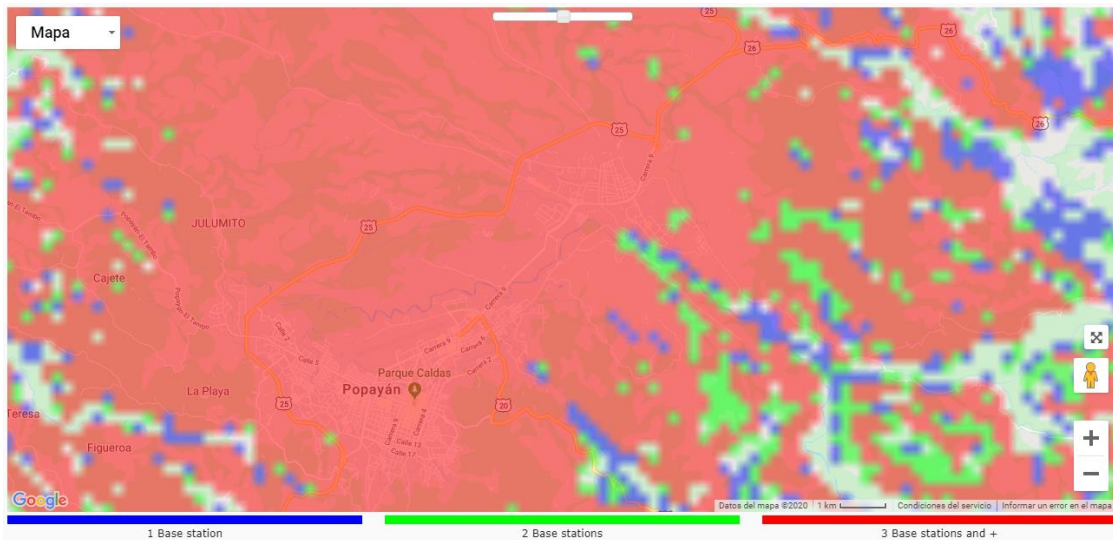


Figura 3.11 Cobertura para la ciudad de Popayán de Sigfox

El dispositivo seleccionado para soportar el sistema es la denominada Soul One, que es una tarjeta multipropósito, basada en la plataforma Arduino, que permite integrar muy fácilmente diferentes tipos de sensores, específicamente los que se requieren para las variables a monitorear en el presente proyecto. La descripción técnica, parámetros de funcionamiento y demás características del dispositivo se consignan en el Anexo A.

3.3.2 Selección de sensores

Las variables críticas en el sistema de producción de lombricompost son temperatura, y humedad del sustrato, así como la intensidad lumínica del entorno, para cada una de esas magnitudes se analizan los sensores disponibles en el mercado y compatibles con la tecnología, considerando parámetros como precisión, costo, consumo de potencia, rango de trabajo, tipo de efecto para la detección y el encapsulado del mismo.

- **Sensor de Temperatura:**

Existe en el mercado una amplia gama de sensores de temperatura, sin embargo, sólo se consideran como opciones para este proyecto los que son sumergibles, es decir, los que cuentan con una sonda capaz de medir temperatura del sustrato, estableciendo una rúbrica de evaluación de acuerdo con los criterios que se consideran de importancia para el diseño (Ver Tabla 3.2).

En dicha rúbrica se da una ponderación alta al encapsulado teniendo en cuenta que este resulta ser un factor crítico teniendo en cuenta las condiciones agrestes del medio donde va a estar instalado el sensor, aquí, la corrosión representa uno de los factores críticos para el sistema, debido a la alta humedad del sustrato.

De esta manera, los dos sensores a evaluar son: el PT100, de tipo RTD que varía su resistencia en función de la temperatura y el DS18B20, un sensor digital que utiliza el protocolo 1-Wire para comunicarse.

Aspecto	Rango/Valor	Calificación	Ponderación
Precisión	Menor a 0.1°	10	25%
	Entre 0.1° y 0.5°	7	
	Entre 0.6° y 0.7°	5	
	Mayor a 0.7°	1	
Resolución	Menor a 0.1	10	25%
	Entre 0.1 y 0.5	7	
	Mayor a 0.5	1	
Costo	Menor a \$5.000	10	15%
	Entre \$5.000 y \$10.000	7	
	Entre \$10.000 y \$15.000	5	

	Mayor a \$15.000	1	
Encapsulado	Metálico de inserción	Hasta 10 puntos	35%
	Plástico u otro material	Hasta 5 puntos	

Tabla 3.2 Rúbrica de evaluación para los sensores de temperatura

Fuente: propia del estudio

Sensor	Encapsulado	Costo	Precisión		Resolución		Calificación final
DS18B20	Tubo de acero inoxidable	\$7.000	Entre -10°C y 85°C	±0,5°C	Programable		7,3
			Entre -55°C a -10°C y de 85°C a 125°C	±2°C.	9 bits	0,5°C	
					10 bits	0,25°C	
					11 bits	0,125°C	
	12 bits	0,0625°C					
Calificación=8 8*25%=2	Calificación=7 7*15%=1,05	Calificación=7 7*25%=1,75		Calificación=10 10*25%=2,5			
Pt100	Alambre de platino encapsulado	\$35900	Entre -200°C y 200°C	± 0,5°C	de -200 a +200 °C	0,01 °C	5,65
					En otros rangos	0,1°C	
	Calificación=8 8*25%=2	Calificación=1 1*15%=0,15	Calificación=7 7*25%=1,75		Calificación=7 7*25%=1,75		

Tabla 3.3 Aplicación de la rúbrica de evaluación para los sensores de temperatura

Fuente: propia del estudio

De acuerdo con los datos arrojados al aplicar la rúbrica definida (en la Tabla 3.3), se establece que el sensor seleccionado para monitorear temperatura en el

sistema es el DS18B20 (Figura 3.12), principalmente por las particularidades físicas de la sonda, la cual es resistente a la humedad y su fabricación impide filtraciones, características que representan mayor inmunidad a la corrosión.

Cabe mencionar que para la aplicación de la rúbrica se determina que se debe operar a la resolución por defecto, que a su vez es la máxima del sensor (12 bits= 0,0625°C). Adicionalmente, al ser un sensor digital, la señal leída no se degrada con la distancia del cableado.



Figura 3.12 Sensor Ds18b20

Fuente: <https://naylampmechatronics.com/>

- **Sensor de Humedad:**

Para la medición de la humedad del sustrato se debe tener en cuenta que al igual que para la variable temperatura, los transductores deben ser capaces de introducirse en el interior de la tierra y por lo tanto deben ser resistentes a la corrosión, de ahí que deben considerarse los que cuentan con una sonda o terminales fabricados en materiales inoxidables.

Al respecto, se sugiere para el diseño el sensor tipo higómetro cuyas puntas estén tratadas para resistir mejor la oxidación y alargar su vida útil.

En la Figura 3.13 se muestra un Módulo HD-38 consistente en una sonda con dos terminales metálicas separadas adecuadamente y un módulo que realiza el

tratamiento de datos entregando una salida Analógica y una salida Digital. Este módulo cuenta con sensibilidad ajustable por medio de un potenciómetro.



Figura 3.13 Módulo HD-38

Fuente: <https://ferretronica.com/products/>

- **Sensor de intensidad lumínica**

Teniendo en cuenta que para el entorno donde se ubicará el sistema de monitoreo el nivel de intensidad lumínica que debe garantizarse es nulo, y con el objetivo de simplificar el hardware, se utiliza un módulo básico (Figura 3.14) conformado por una fotorresistencia, y resistencias variables que ajustan su precisión, el cual se comporta con alta sensibilidad a la exposición de intensidad lumínica ambiental, para así determinar, a través de una salida digital o de la salida analógica, valores asociados a la luminosidad del ambiente.

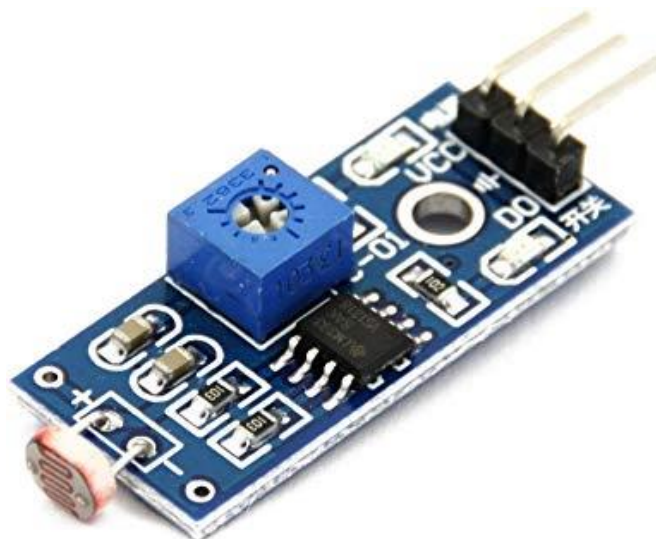


Figura 3.14 Módulo sensor de intensidad lumínica

Fuente: <https://www.amazon.es/M%C3%B3dulo-intensidad-Digital-fotorresistencia-Arduino/dp/B078J8VJS9>

3.3.3 Arquitectura del sistema

La disposición de los elementos que componen el sistema de monitoreo se realiza teniendo en cuenta el método de recolección de humus definido por el personal a cargo, que consiste en agrupar las lombrices e ir controlando el desplazamiento de las mismas dentro de la cama doble a partir del suministro de alimento, ya que naturalmente ellas se concentran a realizar su proceso biodigestor donde encuentren materia orgánica para procesar.

Éste consiste en segmentar la cama doble en cuatro regiones, como se indica en la Figura 3.15, y ubicar la materia orgánica sobre la cama siguiendo la numeración de dichas zonas, haciendo un recorrido en forma de “u”, esto para que, de la misma manera, como fueron alimentadas vayan dejando los desechos y se facilite el proceso de recolección y extracción de estos.

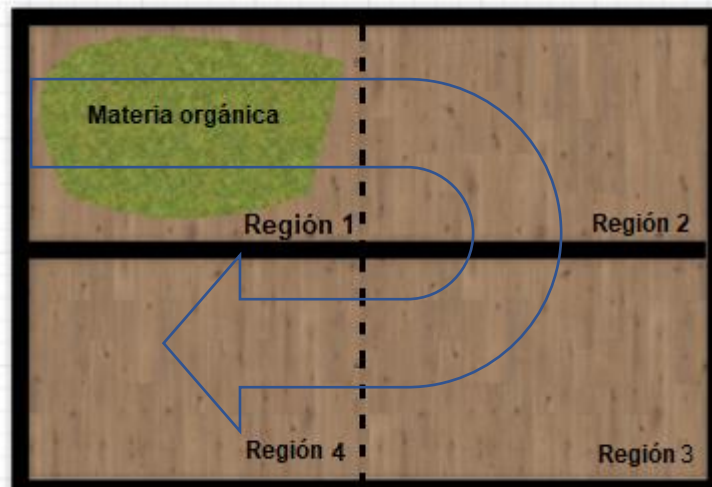


Figura 3.15 Método de recolección de lombricompost

Fuente: propia del estudio

Una vez las lombrices se desplazan de la región 1 a la región 2, quedan en este primer espacio los residuos de los procesos biológicos realizados por estos individuos, que es finalmente, junto con los lixiviados, el producto de interés de toda esta unidad lombricultora. Allí, las lombrices permanecen alrededor de 30 días, mientras degradan toda la materia; luego, los desechos orgánicos se disponen en la región 3, extrayendo el humus de la región 2, para culminar alimentándolas en la región 4, luego en la región 1 y así sucesivamente se continúa desarrollando de manera permanente este proceso (Figura 3.16).

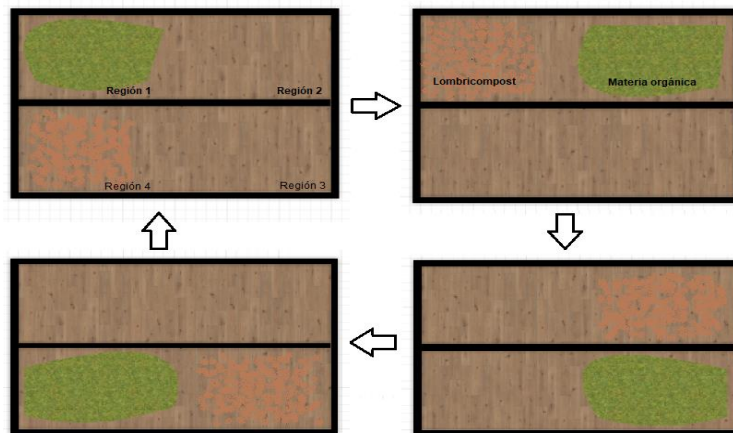


Figura 3.16 Proceso de alimentación de las lombrices

Fuente: propia del estudio

Para cada región de la cama se conserva la identificación establecida por los encargados de la unidad de lombricultura y se distribuirán los sensores teniendo en cuenta el procedimiento realizado y parametrizado por el personal técnico (Figura 3.17), instalando un arreglo con cuatro de ellos (dos de temperatura y dos de humedad del suelo), uno para cada cama, es decir que cada arreglo cubra dos regiones. Esto con el objetivo que el productor o encargado tome los datos de la región de interés, es decir, la que cuente con la concentración de lombrices en producción, y un solo sensor de intensidad lumínica teniendo en cuenta que éste puede monitorear todo el recinto.

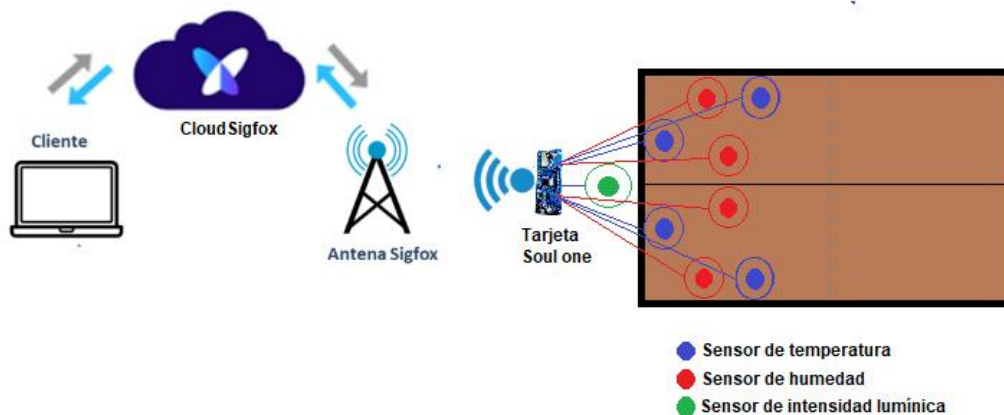


Figura 3.17 Arquitectura sistema de monitoreo

Fuente: propia del estudio

Los elementos reunidos hasta aquí comprenden el diseño de la red y del arreglo de sensores para el sistema de monitoreo de la unidad de lombricultura del SENA Regional Cauca, cumpliendo el segundo objetivo que se planteó para el presente trabajo de grado. La selección de los componentes resulta de la revisión detallada de opciones de dispositivos y tecnologías disponibles, analizando los parámetros técnicos que se acogen a las características asociados al modelo IoT

Capítulo 4

Implementación del Prototipo

Este capítulo describe el desarrollo del prototipo sobre el cual se probará el sistema diseñado, incluyendo el plan de pruebas, la configuración de equipos y del sistema web de obtención de datos; así como la descripción y análisis de los resultados de las pruebas realizadas, lo que comprende la cuarta fase de la metodología que se sigue.

4.1 Descripción del prototipo

Las actividades asociadas a la Investigación, el Desarrollo tecnológico y la Innovación (I+D+i) se considera las posibilidades de transferencia de conocimiento y tecnologías generadas, para ello usan los Niveles de Madurez Tecnológica (TRL, Technology Readiness Level) como un método de estimación de la madurez de Elementos Tecnológicos Críticos (CTE, Critical Technology Elements) de un programa durante el proceso de adquisición. Durante la Evaluación de la Madurez Tecnológica (TRA, Technology Readiness Assessment) examina entre otros los conceptos, los requerimientos y las capacidades tecnológicas [26].

Para las pruebas del sistema diseñado se construye un prototipo de la cama doble a escala, cuya estructura se acoge a la infraestructura original de la unidad de lombricultura. Consiste en una caseta de madera de 37 cm de alto x 30 de ancho y 37 de largo, forrada en plástico oscuro simulando el entorno cerrado en el cual viven las lombrices (Ver Figura 4.1).



Figura 4. 1 Cama doble a escala para el desarrollo del prototipo

Fuente: propia del estudio

Internamente se ha dispuesto el mismo sustrato de las camas de la unidad objeto de estudio y se han ubicado allí 3 sensores como se muestra en las Figuras 4.2 y 4.3.



Figura 4.2 Prototipo instalado

Fuente: propia del estudio



Figura 4.3 Ubicación de los sensores en el prototipo

Fuente: propia del estudio

Cabe mencionar que el arreglo de sensores instalado está compuesto por el sensor de temperatura Ds18b20, un sensor de humedad capacitivo y una fotoresistencia con módulo de adaptación para Arduino, teniendo en cuenta que por ser un prototipo y por las dimensiones de la maqueta, se omiten los demás sensores que componen el diseño, además porque se asume que, al ser sensores del mismo tipo, su comportamiento sería similar a los ya dispuestos.

No se ha empleado el sensor industrial sugerido en el capítulo anterior para monitorear la humedad del suelo, teniendo en cuenta la no disponibilidad de este en el mercado regional y su costo. Para el prototipo, fue reemplazado por el sensor capacitivo.

El prototipo presentado se estima en el nivel TRL 6: Modelo de sistema o subsistema o demostración de prototipo en un entorno relevante. Entre las actividades e I+D+i indicadas por Minciencias el presente prototipo está en desarrollo tecnológico ya que el prototipo hace una demostración en el entorno pertinente [27].

4.2 Diseño del plan de pruebas

Teniendo en cuenta el diseño realizado, se presenta el plan de pruebas que permitió verificar el cumplimiento de los requerimientos del trabajo de grado, con el fin de garantizar la correcta implementación y asegurar la calidad de los datos que serán suministrados al personal encargado de la unidad de lombricultura.

El diseño del sistema se validará mediante la evaluación de cada uno de sus componentes y funcionalidades, evaluando la integridad y consistencia de los datos, los tiempos de detección, la trazabilidad de la información y la disponibilidad de los datos en la plataforma web.

Ambiente de pruebas

Se establece un ambiente con condiciones similares a las de la unidad de lombricultura para probar los diferentes componentes del prototipo. En el prototipo se dispone el mismo sustrato donde habitualmente conviven las lombrices y se instalan los sensores durante un período de dos meses para la recolección de datos, simulando las diferentes condiciones posibles: variables en rangos normales, variables con valores por debajo o por encima de los permitidos.

4.2.1 Pruebas de dispositivos

Para los sensores se definen dos tipos de prueba:

Inicialmente se realiza el proceso de calibración de los sensores a partir de la medida de las variables con elementos convencionales como termómetros e higrómetros para corroborar los valores que arrojan los dispositivos y de esta manera garantizar la precisión y consistencia de los datos.

Adicionalmente se realiza la prueba de conexión y temporización para garantizar que se está realizando el monitoreo periódico de acuerdo con lo establecido en la programación de la tarjeta y así verificar que es posible obtener de los dispositivos datos consistentes para las variables de humedad, temperatura e iluminación, y que el registro de tiempo está acorde con el tiempo real.

4.2.2 Pruebas de conexión local

Las pruebas relacionadas con el sistema local consisten en la verificación de los datos registrados localmente por la tarjeta, la cual está conectada al equipo. En estas pruebas se verificó la conexión con el *backend*, con el objetivo de comprobar la conexión con la base de datos y el servidor del proveedor, y la posibilidad de visualizarla en la web.

Para lo anterior se revisó que la información se esté almacenando en el *backend* de Sigfox, corroborando los siguientes parámetros

1. Conexión con el servidor: se ingresó al *backend* y se observó el último registro de eventos, el cual mostró los datos captados para cada variable. Se verificó que exista un registro de acuerdo con el tiempo establecido en la programación, es decir, una actualización cada 10 minutos.
2. Validación de datos: los datos de las variables monitoreadas y almacenadas en el servidor fueron comparadas con la magnitud correspondiente, a partir de la comparación con los elementos de medida convencional y posteriormente se verificó que dichos valores coincidan con los datos registrados en la plataforma web.

4.2.3 Pruebas de acceso a la información en la plataforma web

Para la plataforma web seleccionada se verificó la disponibilidad de la información a través del usuario creado.

De esta manera es necesario probar el inicio de sesión usando el nombre de usuario y contraseña asignada.

La disponibilidad de los datos de las variables se verificó mediante el acceso en diferentes momentos, a través de internet, corroborando la facilidad de uso mediante la navegación por las diferentes utilidades de la plataforma.

4.2.4 Pruebas de integración

Corresponde a la comprobación del cumplimiento de los requerimientos definidos para el prototipo una vez éste se encuentre integrado y en operación bajo condiciones típicas de funcionamiento de la unidad de lombricultura, así como la posibilidad de acceder a la información a través de la web por parte del usuario desde cualquier ubicación.

Para verificar que el sistema es capaz de detectar la información de las variables humedad, temperatura e iluminación cuando el sistema está operando se comprobó lo siguiente:

- El sistema entregó información de las variables adquiridas por cada sensor con la periodicidad establecida en la programación de la tarjeta.
- La intensidad de señal recibida desde la tarjeta y reportada en el *backend*, está por encima del nivel mínimo de sensibilidad.
- La información está disponible a través de una plataforma externa al *backend*, la cual pueda ser accedida vía web mediante una interfaz sencilla y amigable al usuario.

4.3 Configuración del sistema de monitoreo

4.3.1 Configuración de la tarjeta Soul One

La adquisición de la tarjeta de desarrollo Soul One incluye la conectividad a la red Sigfox por un período de un año y es respectivamente habilitada en el *backend*, plataforma de administración de Sigfox, al cual se accede mediante credenciales asignadas por el proveedor (Ver Figura 4.4).

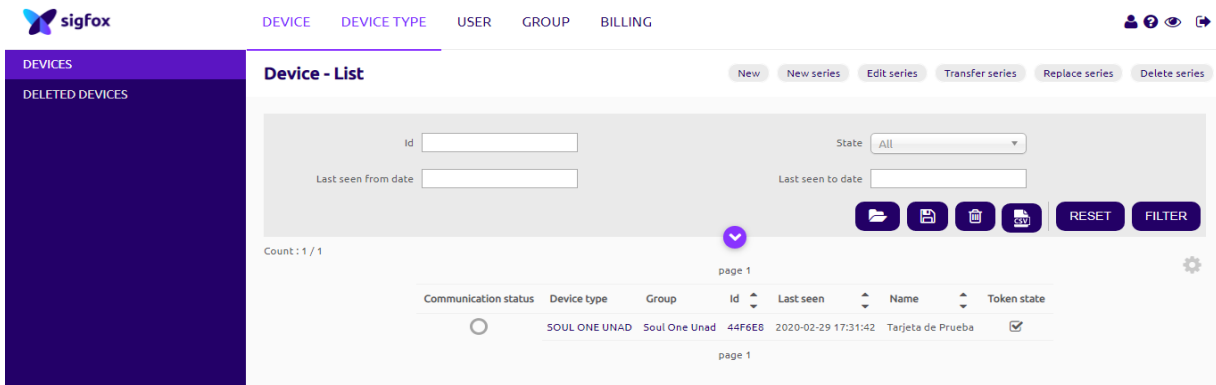


Figura 4.4 Registro del dispositivo en el *backend* de Sigfox

Fuente: propia del estudio

Cada dispositivo cuenta con un ID que se obtiene a partir del software suministrado por el fabricante SFM10R TEST LAB v13, como requisito para registrarse en el backend. La tarjeta viene provisionada de fábrica por un “Serial Bridge”, lo que permite comunicar directamente el modulo por el puerto UART, y de esta manera obtener los parámetros. La descripción paso a paso del proceso de registro y conexión inicial de la tarjeta se describen en el Anexo B.

Registrada la tarjeta se realiza la verificación de conexión de la misma, es decir se revisa que se están ejecutando los procesos de trasmisión y recepción de datos con el *backend* de sigfox, por medio de comandos AT, enviando datos de comprobación como se muestra en la Figura 4.5.

Device 44F6E8 - Messages Purge all messages

Timestamp	Signal Strength	SNR	Device ID	Message	Device ID	Signal Strength	SNR	Device ID	Message
2020-01-29 19:51:57	< 1	77	000000aa	13C6 -130.00 9.38 920.7309 3/3					
				67E5 -131.00 8.79 920.8669 3/3					
				6403 -130.00 13.75 920.7832 3/3					
2020-01-29 19:41:57	2.2	76	000000ad	6403 -130.00 13.71 920.8697 1/3					
				67E5 -130.00 9.12 920.8699 2/3					
				13C6 -128.00 9.27 920.7297 2/3					
2020-01-29 18:34:33	1.7	75	2345	13C6 -124.00 16.80 920.7429 3/3					
				13E3 -128.00 14.11 920.7434 2/3					
				67E5 -125.00 14.18 920.7817 3/3					

Figura 4.5 Envío de datos de comprobación al *backend*

Fuente: propia del estudio

4.3.2 Configuración del sistema web

Inicialmente se realiza el registro en la plataforma Ubidots¹¹, creando el correspondiente usuario con la cuenta de correo malejandralh@gmail.com bajo el plan STEM estándar, que otorga una licencia no comercial para el desarrollo del proyecto.

Se crea el dispositivo con las 3 variables que se han definido: humedad, temperatura y luminosidad como se muestra en la Figura 4.6. El envío de los datos desde cada uno de los sensores instalados en el prototipo se ha programado cada 10 minutos, para no exceder el límite máximo de mensajes enviados que admite la tecnología Sigfox.

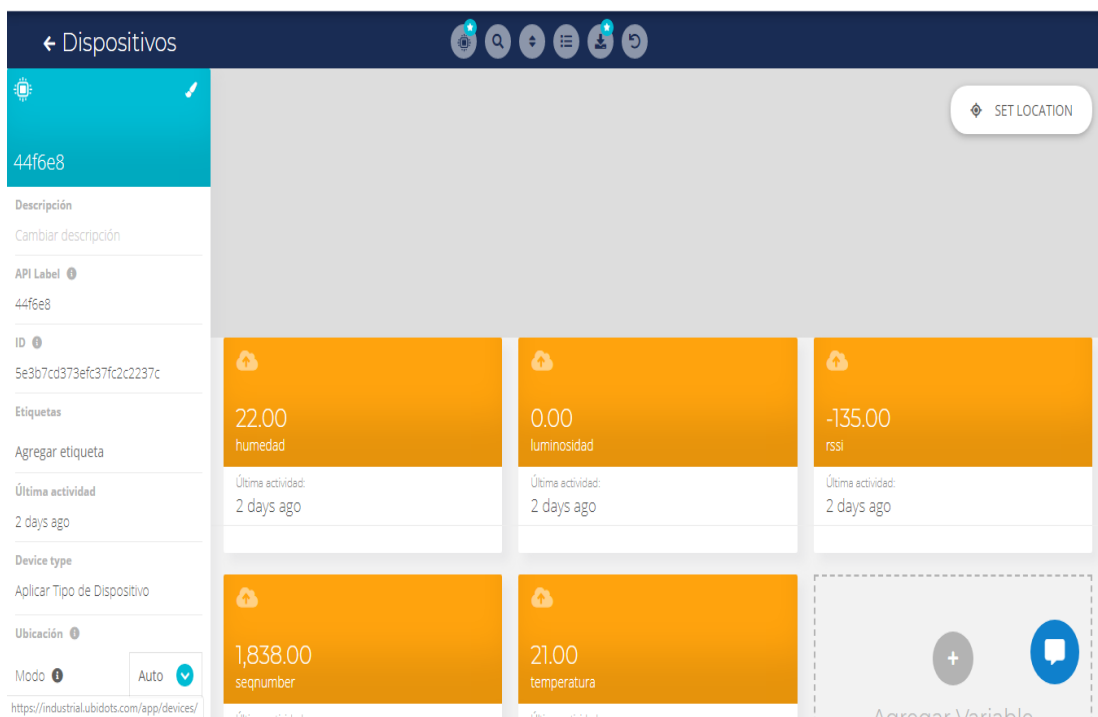


Figura 4.6 Creación de variables luminosidad, temperatura y humedad

Fuente: propia del estudio

¹¹ Ubidots es una plataforma para IoT que habilita la toma de decisiones a empresas de integración de sistemas a nivel global. Este producto permite enviar datos de sensores a la nube, configurar tableros y alertas, conectarse con otras plataformas, usar herramientas de analítica y arrojar mapas de datos en tiempo real. Es decir, hacer una gestión completa de los datos capturados para que las decisiones que toma la compañía sean informadas y precisas.

4.4 Ejecución del plan de pruebas

- **Calibración de sensores:**

Para la variable temperatura, en la programación de la Tarjeta Soul One se hace uso de las librerías *OneWire* y *DallasTempertaure*, en las cuales están implementadas las funciones necesarias para realizar las lecturas del sensor DS18B20, y entregar los datos en grados centígrados, como se requiere. En la Tabla 4.1 se reúnen datos de las medidas tomadas con termómetro convencional y con el sensor estableciendo el registro de fecha y hora y la variación para cada medida.

Fecha y Hora	Valor medido (termómetro) °C	Valor medido (sensor) °C	Variación
20/01/2020 8:05	20,1	20,3	-0,2
20/01/2020 10:33	22,5	22,4	0,1
20/01/2020 12:05	23,6	23,9	-0,3
21/01/2020 13:05	22,7	22,4	0,3
21/01/2020 16:33	22,5	22,8	-0,3
21/01/2020 18:30	21,3	21,8	-0,5
22/01/2020 6:55	20,9	21,3	-0,4
22/01/2020 9:40	22,6	22,6	0
22/01/2020 11:30	24,1	24,6	-0,5
23/01/2020 13:05	25,3	25,8	-0,5
23/01/2020 15:41	23,3	23	0,3
23/01/2020 17:15	22,8	23	-0,2

Tabla 4.1 Medidas de temperatura de la cama

Fuente: propia del estudio

Gráficamente se muestran los datos arrojados por ambos dispositivos (Figura 4.7) donde se establece que la precisión del sensor se considera aceptable teniendo

en cuenta que la diferencia máxima presentada fue de 0.5°C , valor despreciable para la variable en consideración y los objetivos del proyecto.

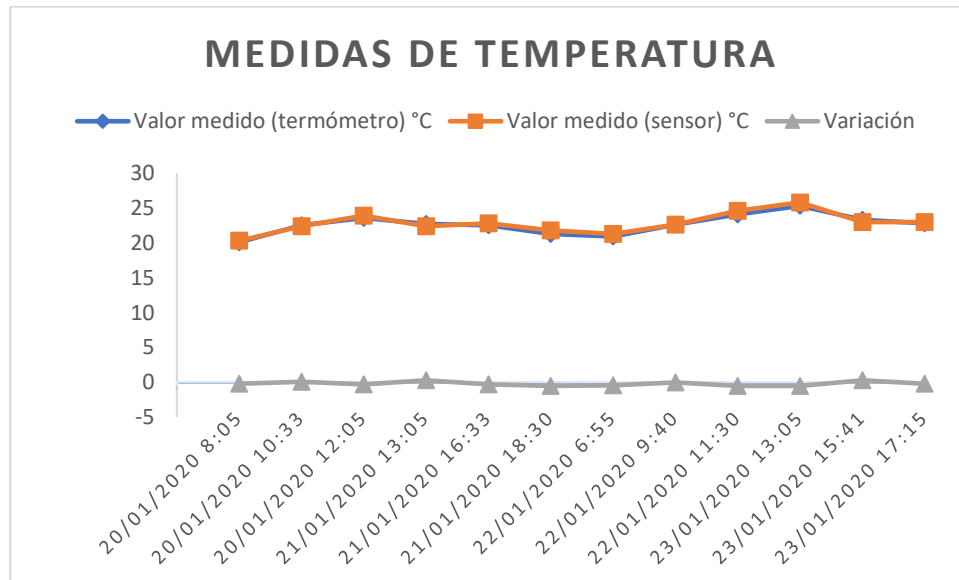


Figura 4.7 Comparación de medidas de temperatura

Sensor de humedad: la calibración del sensor de humedad se realiza a través de la programación en el IDE de Arduino. La tarjeta recibe una entrada analógica que va de 0 a 1023 y se requiere obtener la medida en porcentaje (0 a 100%).

El sensor permite medir la conductividad del suelo, si el suelo está muy húmedo mayor será la conductividad y si el suelo está muy seco la conductividad será menor, lo que corresponde a valores análogos de 0 (suelo muy húmedo) y 1023 (suelo seco).

Los valores obtenidos de las medidas con el higrómetro, dispositivo convencional de medida y el sensor de humedad se reúnen en la Tabla 4.2 estableciendo el registro de tiempo y la diferencia entre las medidas obtenidas.

Fecha y Hora	Valor medido (higrómetro) %	Valor medido (sensor) %	Diferencia
20/01/2020 8:10	73	70	3
20/01/2020 10:34	76	71	5
20/01/2020 12:08	70	70	0
21/01/2020 13:09	80	85	-5
21/01/2020 16:36	60	64	-4
21/01/2020 18:36	66	70	-4
22/01/2020 7:05	95	99	-4
22/01/2020 9:43	92	96	-4
22/01/2020 11:35	90	95	-5
23/01/2020 13:09	20	26	-6
23/01/2020 15:46	50	55	-5
23/01/2020 17:25	43	45	-2
24/01/2020 8:21	62	62	0
24/01/2020 10:01	58	59	-1
24/01/2020 12:40	55	60	-5

Tabla 4.2 Comparación de medidas de humedad

Fuente: propia del estudio

La Figura 4.8 evidencia que las medidas se acercan en todos los casos, aunque la diferencia es un poco más alta que en la temperatura, pero de todas maneras se considera aceptable para los rangos manejados en la unidad de lombricultura. Para esta variable se tomaron más datos, simulando las condiciones extremas posibles: sustrato muy seco, en condiciones normales o muy húmedo, encontrando un comportamiento similar en todas las medidas.

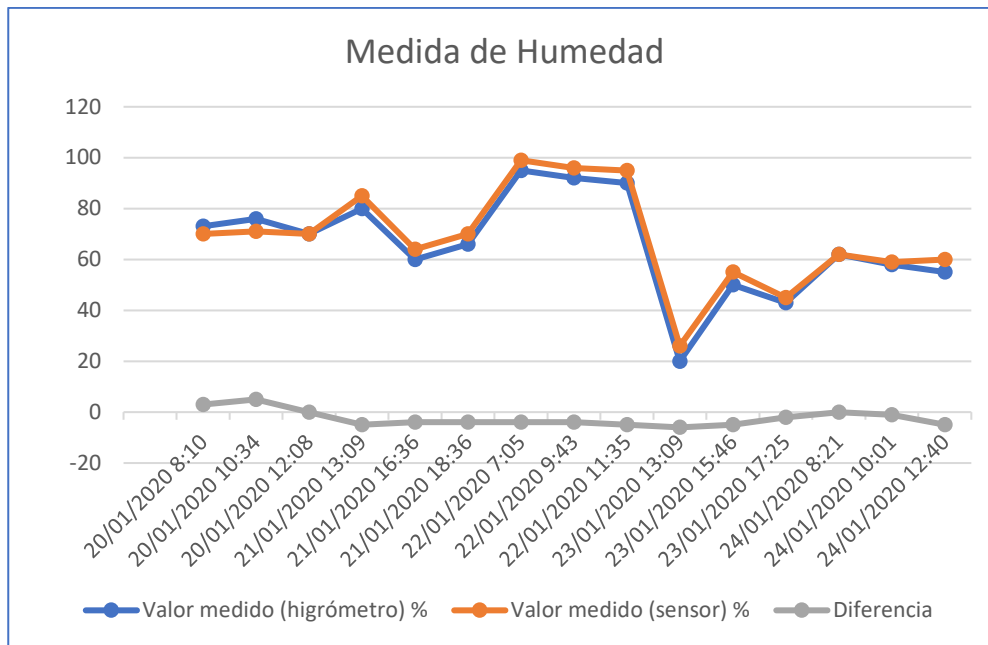


Figura 4.8 Comparación de medidas de humedad

Fuente: propia del estudio

La calibración del sensor de intensidad lumínica se realiza de manera similar al sensor de humedad pues es un componente cuya resistencia interna varía en función de la luz percibida. A más luz, menor resistencia eléctrica e inversamente. Como entrega valores entre 0 y 1023, en la programación de la tarjeta de prueba se realiza la conversión de la lectura análoga a porcentaje. Las medidas obtenidas se muestran en la Tabla 4.3 donde se consignan datos de la percepción de luminosidad en el entorno y los valores medidos por el sensor para cada caso.

Fecha	Valor percibido de intensidad lumínica en el entorno	Valor medido (sensor) %
20/01/2020	nula	0
20/01/2020	media - baja	32
20/01/2020	media	60
20/01/2020	media - alta	85
20/01/2020	completamente iluminado	100

Tabla 4.3 Valores percibidos y medidos de luminosidad del entorno

Fuente: propia del estudio

Las medidas de esta variable se comparan con la percepción del personal a cargo ya que no se cuenta con un luxómetro para medir con exactitud la luminosidad y para el proyecto se requiere garantizar de manera permanente intensidad lumínica nula del entorno por la condición de fotofobia de las lombrices.

- Pruebas de conexión local: La tarjeta se conecta directamente a un equipo de cómputo mediante cable USB, se carga el código creado en Arduino a la placa y a través del puerto serial virtual COM3 se establece la conexión, mostrando los datos de las 3 variables en el monitor serie del IDE de Arduino a una velocidad de transmisión de 9600 baudios (Ver Figura 4.9).

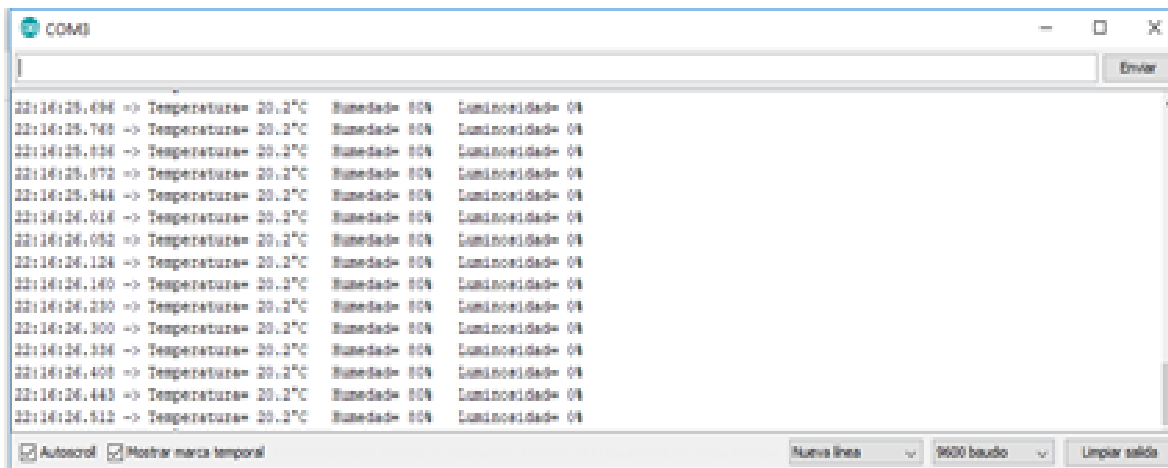


Figura 4.9 Visualización de datos en Monitor serie de Arduino

Fuente: propia del estudio

La verificación de conexión al servidor se realiza mediante el acceso al backend de Sigfox usando el usuario y contraseña asignado por el proveedor y verificar los mensajes recibidos desde la tarjeta.

En la Figura 4.10 se puede verificar que la tarjeta está enviando datos al *backend* con una periodicidad de 10 minutos como se ha programado por tanto se registran datos de las 18:13, 18:23 y 18:33. Se muestran datos de las 3 variables, las cuales se encuentran para este caso dentro de los rangos esperados.

Time	Delay (s)	Data / Decoding	Base station reception attributes					Callbacks	Location
			Base station	RSSI (dBm)	SNR (dB)	Freq (MHz)	Frames		
2020-03-02 18:33:57	3.5	001500500000 temperature: 21 humidity: 80 luminosidade: 0	6819	-134.00	6.00	920.7411	1/3		
			67E5	-130.00	11.06	920.7412	3/3		
			13C6	-128.00	9.13	920.7416	2/3		
2020-03-02 18:23:56	3.1	001500500000 temperature: 21 humidity: 80 luminosidade: 0	67E5	-131.00	8.50	920.7466	3/3		
			13C6	-129.00	10.02	920.7808	2/3		
			13C6	-128.00	11.63	920.7422	3/3		
2020-03-02 18:13:55	1.3	001500500000 temperature: 21 humidity: 80 luminosidade: 0	67E5	-132.00	7.57	920.8584	3/3		
			13C6	-128.00	11.63	920.7422	3/3		

Figura 4.10. Datos de variables registrados en el backend

Fuente: propia del estudio

Posteriormente se realiza la desconexión de la tarjeta y se verifica que en la actualización del sitio web, transcurridos 10 minutos no se presentan registros de datos como se esperaba.

Para las variables temperatura y humedad se hace un registro de datos tomados del *backend* (Figura 4.11) que son comparados nuevamente con las medidas arrojadas por los dispositivos convencionales, los cuales son consignados en la Tabla 4.4

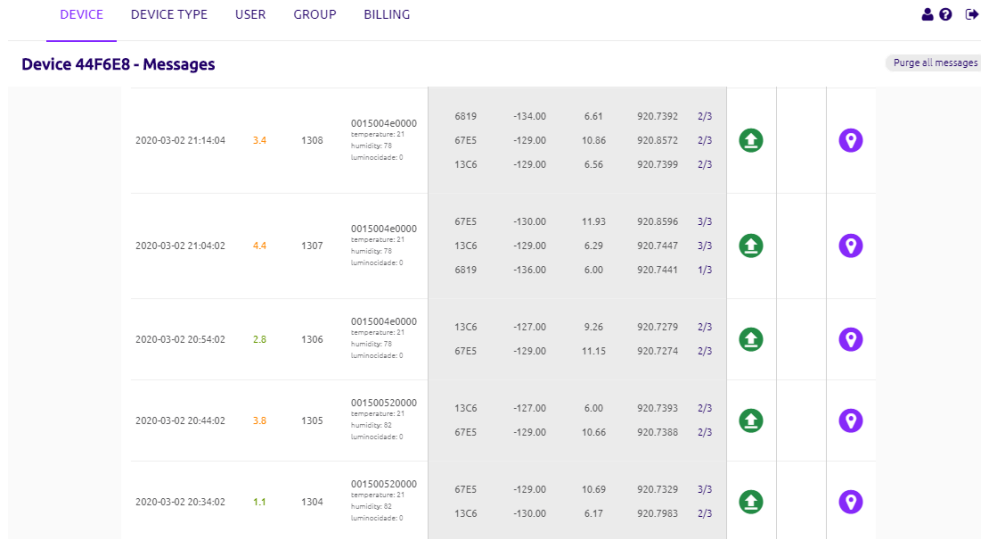


Figura 4. 11 Datos registrados en el *backend* para las variables

Fuente: propia del estudio

Fecha	Hora	Temperatura Termómetro (°C)	Temperatura registrada en el <i>backend</i> (°C)	Diferencia	Humedad Higrómetro (%)	Humedad registrada en el <i>backend</i> (%)	Diferencia
2/03/2020	8:34:00 p. m.	21	21	0	79	78	-1
2/03/2020	8:44:00 p. m.	21,2	21	0,2	80	78	-2
2/03/2020	8:54:00 p. m.	21	21	0	80	78	-2
2/03/2020	9:04:00 p. m.	20,6	21	-0,4	81	82	1
2/03/2020	9:14:00 p. m.	20,6	21	-0,4	82	82	0

Tabla 4.4 Comparación de medidas de temperatura y humedad

Fuente: propia del estudio

Para la variable luminosidad no se hace una tabla de comparación porque se corrobora que en todos los registros su valor fue cero, lo cual corresponde a las condiciones del entorno y el prototipo se encuentra aislado de toda fuente lumínica, ambiente ideal de las lombrices.

Las Figuras 4.12 y 4.13 muestran el comportamiento de las dos variables de acuerdo con las medidas convencionales y registros del backend, donde se evidencia que las diferencias de los datos son mínimas, que el sistema de monitoreo tiene un comportamiento estable y se concluye que los sensores y

tarjetas instalados suministran información de temperatura, humedad e iluminación certera y conforme a la fecha y hora real.

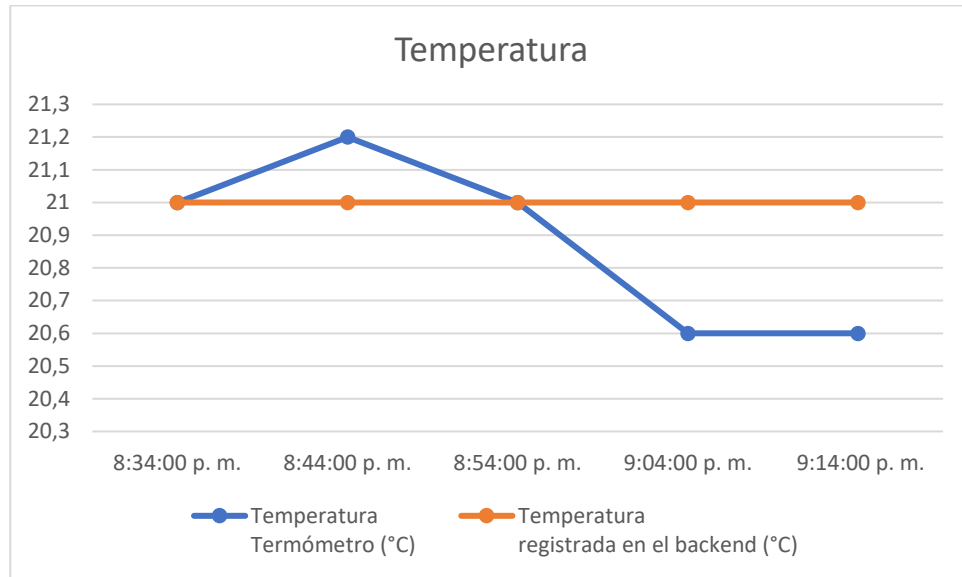


Figura 4.12 Comparación de medidas de temperatura y registro en el *backend*

Fuente: propia del estudio

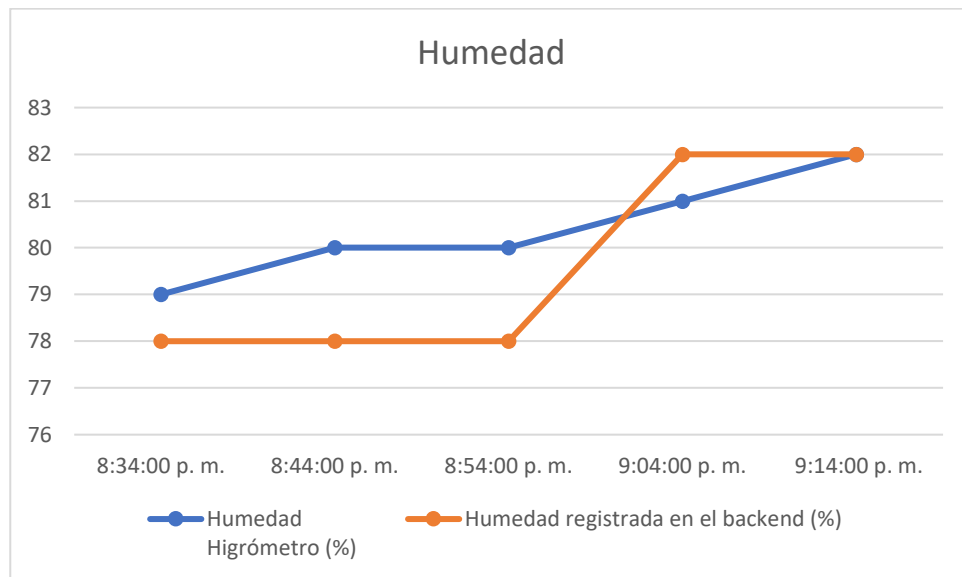


Figura 4.13 Comparación de medidas de humedad y registro en el *backend*

Fuente: propia del estudio

4.4.1 Pruebas de acceso a la información en la plataforma web

Las pruebas de la plataforma web consisten en verificar el acceso a la plataforma a través del usuario malejandralh@gmail.com y la contraseña correspondiente.

La disponibilidad de los datos para las tres variables se verifica navegando en las distintas opciones de la plataforma. Se evidencia los datos suministrados de acuerdo a los widgets seleccionados para cada variable permitiendo la fácil visualización e interpretación del último dato registrado, así como una gráfica que reúne el comportamiento de la variable en las últimas horas (Figura 4.14).

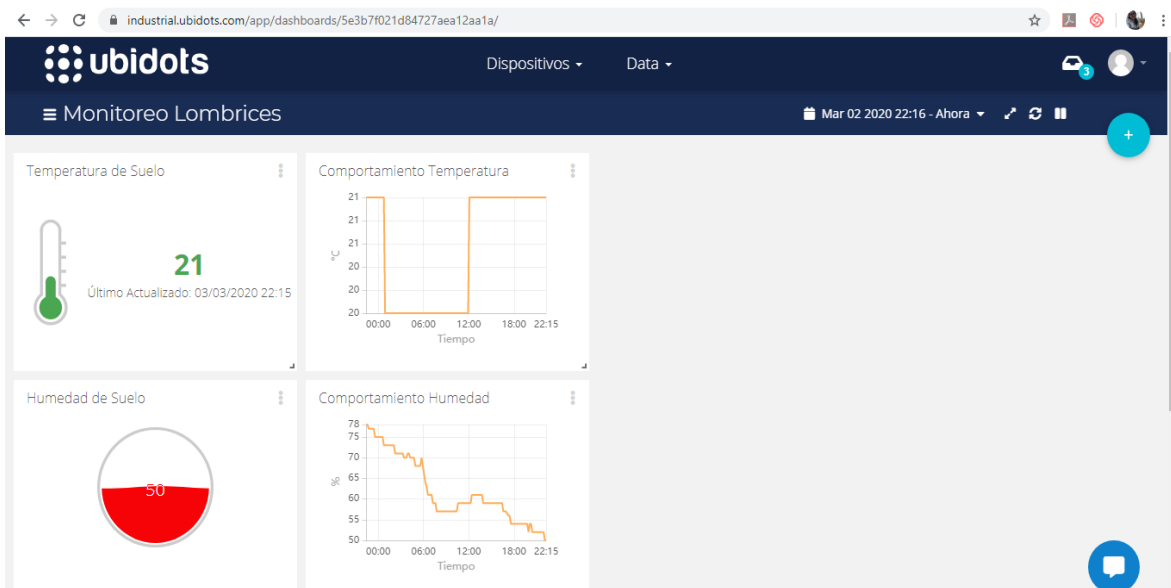


Figura 4.14 Visualización de los datos en la plataforma Ubidots

Fuente: propia del estudio

4.4.2 Pruebas de integración

Las pruebas de integración corresponden a la revisión del cumplimiento de los requerimientos a partir de la implementación de todos los componentes del

prototipo y las nuevas pruebas relacionadas con la posibilidad de acceder a los datos de las variables mediante la plataforma Ubidots.

Se verifica que la periodicidad del registro de información en el backend es de 10 minutos y esto corresponde con los datos del último registro visualizado en la plataforma web.

La ubicación del prototipo y por ende de la tarjeta corresponde al área de cobertura del proveedor Sigfox donde se cuenta con más de 3 estaciones base para la recepción lo que se traduce en una pérdida nula de datos, es decir, comunicación permanente Tarjeta de prueba – *backend* – plataforma web (Figuras 4.15, 4.16, 4.17). La posibilidad de consultar los históricos de cada variable en la plataforma web resulta una utilidad de gran relevancia para el personal de la unidad de lombricultura para analizar su comportamiento y trazabilidad.



Figura 4.15 Comportamiento de la variable luminosidad

Fuente: propia del estudio

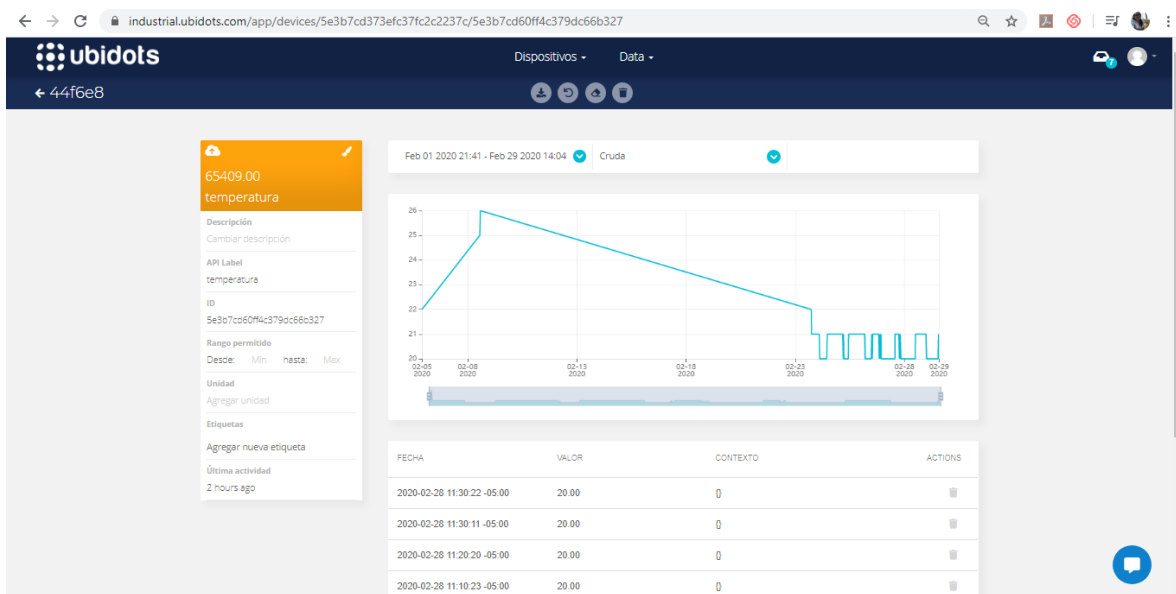


Figura 4.16 Comportamiento de la variable temperatura

Fuente: propia del estudio

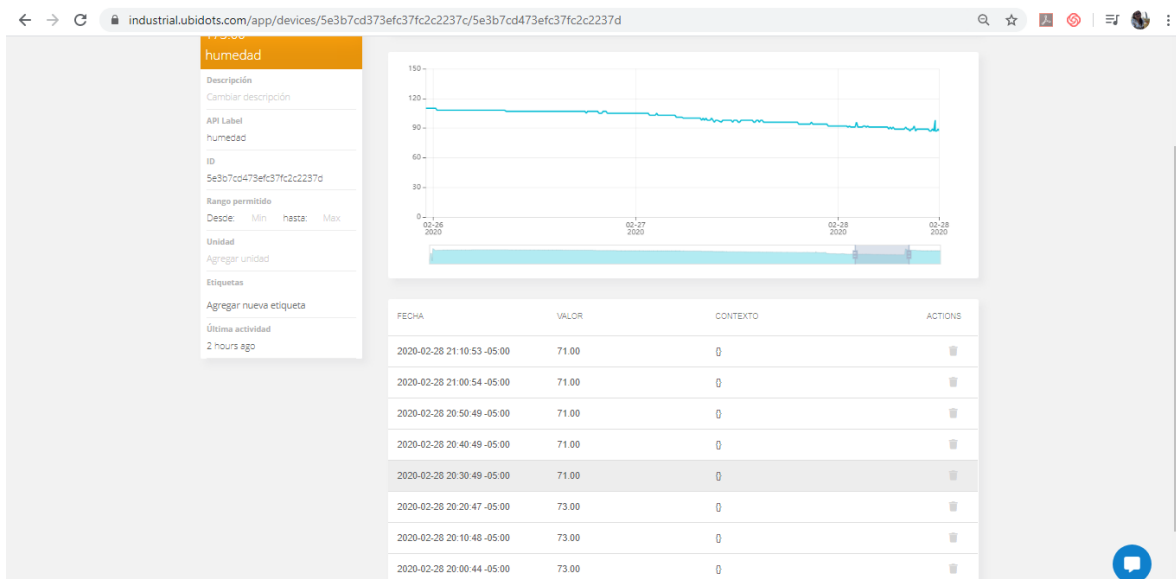


Figura 4.17 Comportamiento de la variable humedad

Fuente: propia del estudio

Adicionalmente a los requerimientos propuestos y a partir de la exploración de las utilidades de Ubidots se establece la posibilidad de crear alertas cuando las variables en estudio exceden los rangos permitidos, de esta manera, dentro de las

pruebas de integración del prototipo se configuran eventos para las variables de temperatura, humedad y luminosidad cuando han excedido los valores identificados en el capítulo (Figura 4.18).

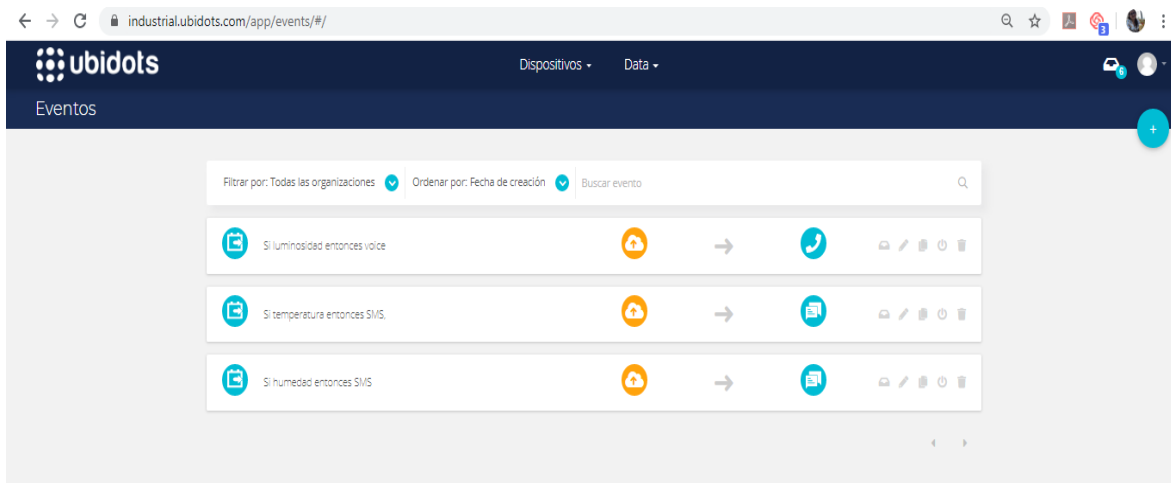


Figura 4.18 Configuración de eventos de alerta

Fuente: propia del estudio

Las alertas consisten en enviar un mensaje de texto al número móvil configurado informando si las variables temperatura (Figura 4.19) y humedad (Figura 4.20) han llegado a un valor crítico, así como la fecha y hora exacta del registro.

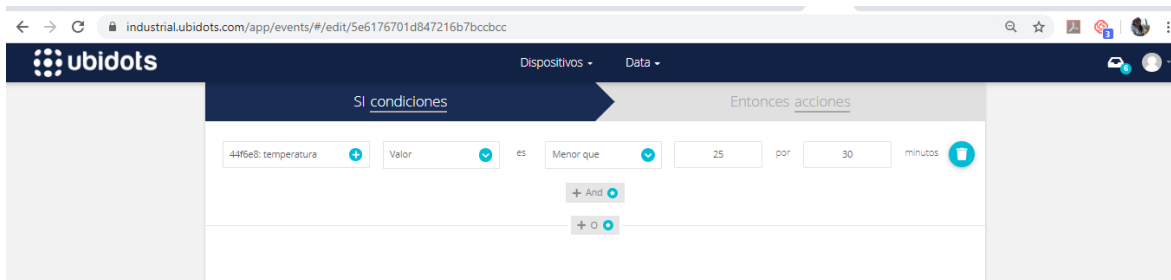


Figura 4.19 Configuración de alerta para la variable temperatura

Fuente: propia del estudio

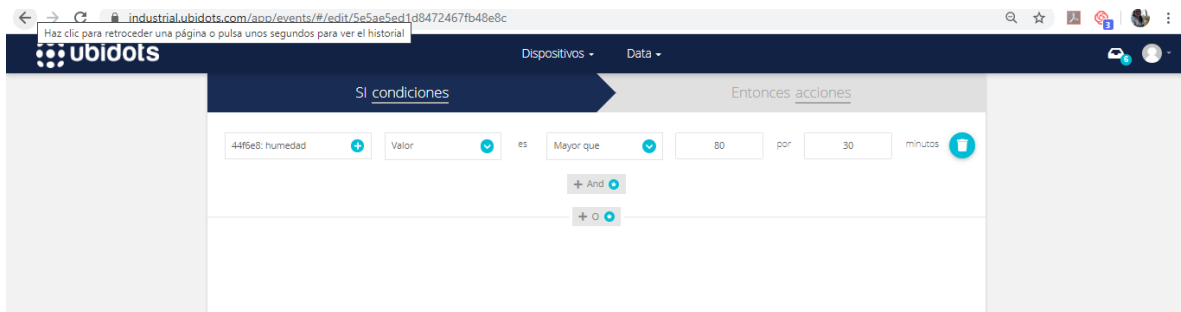


Figura 4.20 Configuración de alerta para la variable humedad

Fuente: propia del estudio

Y, con el objetivo de explorar las diferentes opciones se configura para la luminosidad un evento de llamada a un número móvil configurado en las mismas opciones (Figura 4.21).

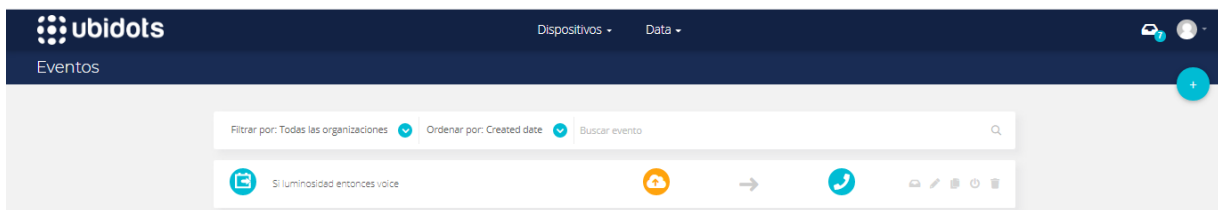


Figura 4.21 Configuración de alerta para la variable luminosidad

Fuente: propia del estudio

Como resultado de estos eventos y simulando las situaciones críticas configuradas para las alertas se reciben los mensajes y llamadas de acuerdo a los parámetros registrados en Ubidots (Ver Figura 4.22). Esta utilidad resulta de gran importancia para el personal de lombricultura pues permite conocer en tiempo real cuando las condiciones ambientales del lombricario se salen de los rangos óptimos y permite la posibilidad de tomar decisiones oportunas.

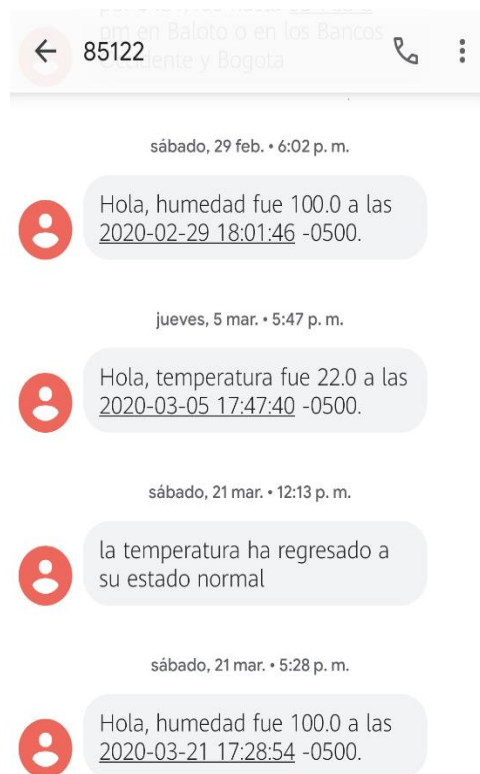


Figura 4.22 Alerta enviada a través de mensaje de texto

Fuente: propia del estudio

El proceso y los resultados anteriormente expuestos describen la evaluación del comportamiento de la solución IoT diseñada, mediante un prototipo diseñado e implementado a escala, simulando las condiciones reales de la unidad productiva con el objetivo de comparar las mediciones de instrumentación convencional y los sensores seleccionados para el diseño, para analizar el alcance y precisión de la solución dando cumplimiento al último objetivo propuesto para el trabajo de grado.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

Se relacionan a continuación las conclusiones y recomendaciones encontradas en el desarrollo del diseño del sistema de monitoreo basado en IoT para la unidad de lombricultura del centro agropecuario - SENA regional Cauca.

5.1 Conclusiones

- Se identifican como variables físicas críticas para la lombricultura la temperatura del suelo, que debe garantizarse entre 20 y 25°C, la humedad de este que puede oscilar entre 70 y 80% y la intensidad lumínica del entorno que debe ser nula. Estos parámetros propician las condiciones de hábitat ideal para el adecuado desarrollo de la lombriz roja californiana, especie eficiente en la producción de lombricompost con miras a incrementar el despliegue de sistemas agrícolas limpios, a partir del uso de abonos 100% orgánicos. Estas variables deben ser monitoreadas con sensores aptos para las condiciones medio ambientales del sistema de lombricultura que se caracteriza por ambientes húmedos, que incluyen diferentes tipos de sustancias como materia orgánica y lixiviados, lo cual representa un entorno agreste para los dispositivos
- El diseño del sistema de monitoreo basado en IoT incluye un arreglo de sensores seleccionados a partir de sus características físicas y operacionales, que se ubican en puntos específicos de las camas para cubrir toda el área de interés. Los sensores se conectan a una tarjeta multipropósito de la tecnología Sigfox transmite la información hacia su *backend* y de ahí a una plataforma web (Ubidots), el sistema desarrollo permite realizar la consulta permanente

de la información por parte del usuario de una manera muy amigable y de fácil seguimiento. El sistema posibilita la evaluación permanente de los parámetros críticos de la unidad productiva, brindando información en tiempo real de las condiciones físicas de las camas de lombrices y del entorno en general, logrando una verificación constante de las condiciones para la toma de decisiones y la maximización de la producción de lombricompost y humus líquido.

- El concepto de IoT exige que la tecnología sobre la cual se soporta el sistema cumpla con parámetros como el bajo consumo de potencia, tamaño mínimo de mensajes a transmitir, baterías de larga duración y largo alcance de la red. Sigfox es una tecnología que cumple con los lineamientos que se establecen para este tipo de sistemas y representa ventajas significativas relacionadas con la implementación y la simplificación del hardware, siempre y cuando se esté trabajando sobre las áreas de cobertura en las cuales opera. La selección de Sigfox se define a partir de la comparación de diferentes tecnologías LPWAN disponibles para la solución, donde se analizan parámetros operacionales y técnicos como ancho de banda, frecuencia de trabajo, modulación empleada, consumo de potencia, costos, cobertura, entre otros, que dan como resultado a Sigfox como la opción acorde a los requerimientos del proyecto y a las condiciones de un sistema IoT.
- Los sensores utilizados en el prototipo cuentan con una precisión y resolución aceptables de acuerdo con los análisis realizados en cuanto a la comparación de los datos arrojados por el prototipo y el instrumental convencional de la unidad de lombricultura. La selección de sensores se realizó a partir de rúbricas de evaluación donde se analizó como criterio ponderante la adaptabilidad al medio de operación que se compone de un sustrato con condiciones físico -químicas complejas como la humedad y el pH.
- Existen múltiples plataformas web que permiten subir los datos del sistema a "la nube"; Ubidots ofrece facilidad y simplicidad en el acceso a los datos permitiendo conocer los reportes de las variables en cualquier momento, desde cualquier ubicación y con una interfaz de usuario muy amigable.

- La agricultura de precisión es un campo interdisciplinar con gran auge y potencial teniendo en cuenta el amplio campo de acción con que cuenta; allí, los sistemas de monitoreo basados en IoT representan una importante línea de trabajo a nivel regional pues tradicionalmente la agricultura ha sido el principal renglón económico del sector y, por lo tanto, este sistema resulta replicable para las zonas rurales donde se ubican los productores.

5.2 Recomendaciones

- El presente diseño deja las bases en el piloto para la implementación en el entorno real con los equipos que pretende adquirir el SENA, con el proyecto de Sennova que fue avalado en febrero del 2020, el diseño presenta sienta las bases para la implementación con sensores industriales que están diseñados para las condiciones del sustrato y que garantizan una solución a lo largo del tiempo.
- Realizar la capacitación en la formación de los aprendices en la biofábrica del SENA del centro agropecuario a fin de que se apropien en el uso de nuevas tecnologías para el manejo de la biofábrica.
- Motivar al área de telecomunicaciones en el SENA con el fin de que se capaciten en la configuración de sensores y equipos relacionados con el IoT.
- Analizar el comportamiento del sistema de monitoreo para incluir la instalación de actuadores que permitan, además de hacer un monitoreo de variables, controlar los casos en los cuales las variables presenten valores no deseados y de esta manera automatizar el sistema de producción.

- Replicar el diseño en entornos reales asociados a productores agropecuarios de la región, promoviendo el concepto de agricultura limpia y reduciendo el uso de fertilizantes artificiales que resultan nocivos para la producción y su posterior consumo

Bibliografía

- [1] D. M. Guauque Sánchez, «Universidad Militar Nueva Granada,» [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/10654/16549>.
- [2] M. Gómez-Brandón, «Efecto de las lombrices de tierra en la estructura y función de las comunidades microbianas en el proceso de descomposición de la materia orgánica,» *Revista Ecosistemas*, pp. 155-162, 2011.
- [3] L. A. Lopez Erazo, «Diseño e implementación de una planta de producción de lombricompost a escala piloto y un invernadero en el corregimiento del ingenio municipio de Sandona,» 2012. [En línea]. Available: <http://biblioteca.udenar.edu.co:8085/atenea/biblioteca/86376.pdf>.
- [4] D. F. Cuéllar y L. Rotavisky Guerrero, «Diseño experimental: un enfoque a la reproducción de las lombrices.,» ICESI, 213. [En línea]. Available: https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/76623/1/dise%C3%B1o_experimental_enfoque.pdf.
- [5] O. Carretero, «Estudio de viabilidad para el manejo y tratamiento de los residuos sólidos orgánicos mediante la creación y puesta en funcionamiento de una empresa dedicada a la lombricultura, en el Municipio de Orito Putumayo,» 2011. [En línea]. Available: http://45.5.172.45/bitstream/10819/1468/1/Estudio_Orito_Putumayo_Carretero2011.pdf.
- [6] P. Llana González, Seguridad y responsabilidad en la internet de las cosas (IoT), Wolters Kluwer España, 2018.
- [7] D. F. Balcazar Hoyos y J. J. Lemos Elvira , «Repositorio Unicauca,» Abril 2019. [En línea]. Available: <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/bitstream/handle/123456789/1776/MODELO%20PARA%20LA%20CONSTRUCCI%c3%93N%20DE%20ECOSIS>

TEMAS%20SOCIALES%20DE%20OBJETOS%20INTELIGENTES%20IOT.
pdf?sequence=1&isAllowed=y.

- [8] T. Mendieta, J. Herrera y A. Jimenez Peña , «La Capacidad del IOT de Transformar el Futuro,» *Revista Avenir*, pp. 15-18, 2019.
- [9] E. Pasqua, «IoT Analytics,» 2020. [En línea]. Available: <https://iot-analytics.com/5-things-to-know-about-the-lpwan-market-in-2020/>.
- [10] IoT Analytics, «5 things to know about the LPWAN market in 2020,» Enero 2020. [En línea]. Available: <https://iot-analytics.com/5-things-to-know-about-the-lpwan-market-in-2020/>.
- [11] IoT Analytics, «LPWAN emerging as fastest growing IoT communication technology,» Septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://iot-analytics.com/lpwan-market-report-2018-2023-new-report/>.
- [12] N. Naik, «LPWAN Technologies for IoT Systems: Choice Between Ultra Narrow Band and Spread Spectrum,» *IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)* , pp. 1-8, 2018.
- [13] IEEE, «Rec. UIT-T Y.2060,» 2014. [En línea]. Available: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-Y.2060-201206-!!!PDF-S&type=items. [Último acceso: 13 8 2019].
- [14] Bismark Colombia SAS , «Redes LPWAN para IoT: Sigfox, LORA y NB-IOT,» [En línea]. Available: <https://bismark.net.co/sigfox-lora-nb-iot-redes-lpwan-para-iot/>.
- [15] A. Montes y L. Camacho , «Universidad Distrital,» 2019. [En línea]. Available: http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/16025/1/Telemetria_a_traves_de_redes_de_area_extensa_de_baja_potencia_%28LPWA%29_y_en_coexistencia_con_el_internet_de_las_cosas_%28IoT%29.pdf.
- [16] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel y F. Meyer, «Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT,» de 2018 *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, Atenas, 2018.

- [17] P. Flor Salazar, «Universidad Nacional Abierta y a Distancia,» 2018. [En línea]. Available: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/21237>.
- [18] R. Pressman, de *Ingeniería del Software: Un enfoque práctico*, México, McGraw Hill, 1995, pp. 26-30v.
- [19] P. Oppenheimer, *Top-Down Network Design*, 3 ed., Indianapolis: Cisco Press, 2010.
- [20] I. Vargas, «La entrevista en la investigación cualitativa: nuevas tendencias y retos,» *Revista Electrónica Calidad en la Educación Superior*, vol. 3, pp. 119-139, 2012.
- [21] M. D. S. ANAYA, Interviewee, *Instructora Biofábrica*. [Entrevista]. Agosto 2019.
- [22] C. E. BLANCO LÓPEZ y N. D. Linares Brizuela, «EVALUACIÓN DE TRES TIEMPOS DE COMPOSTAJE DE RESIDUOS VEGETALES,» 2015. [En línea]. Available: <http://ri.ues.edu.sv/7696/1/13101586.pdf>. [Último acceso: 01 11 2019].
- [23] D. F. Cuéllar Paz y L. Rotavisky Guerrero, «DISEÑO EXPERIMENTAL: UN ENFOQUE A LA REPRODUCCIÓN DE LAS LOMBRICES,» Universidad ICESI, Santiago de Cali, 2013.
- [24] IDEAM, «CARÁCTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS DE CIUDADES PRINCIPALES Y MUNICIPIOS TURISTICOS,» [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>.
- [25] SIGFOX, «Sigfox - The Global Communications Service Provider for the Internet of Things,» [En línea]. Available: <https://www.sigfox.com/en>. [Último acceso: 11 08 2019].
- [26] M. D. Sánchez, «Escuela Técnica Superior de Ingeniería - Universidad de Sevilla,» 2018. [En línea]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12456/fichero/PFC-2456-SANCHEZ.pdf>.

- [27] Minciencias, «Anexo 13 - Niveles de Madurez Tecnológica,» 2017. [En línea]. Available:
<https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/anexo-13-niveles-madurez-tecnologica-conv.pdf>.
- [28] GAIMC, «GAIMC,» 2018. [En línea]. Available:
https://www.gaimc.com/products/ds18B20-temperature-sensor/ds18b20_sensor_datasheet.html?gclid=Cj0KCQjw2or8BRCNARIsAC_ppyZTQAE3UjoCNZUyk5VIFkxTLOaPSSQtUWII-9uzn7gNryMJubFzjMoaAsWLEALw_wcB.
- [29] Geek Factory, «Geek Factory,» 22 Junio 2019. [En línea]. Available:
<https://www.geekfactory.mx/download/hoja-de-datos-o-datasheet-de-ds18b20-sensor-de-temperatura/>.
- [30] Maxim Integrated Products, «DS18B20,» 2019. [En línea]. Available:
<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>.

Anexos

Anexo A. Descripción técnica de los dispositivos

A continuación, se describen los componentes de los equipos empleados especificando los parámetros determinantes para ser seleccionados para el presente proyecto:

Tarjeta Soul One

El diseño de la solución consiste en una tarjeta multipropósito basada en Arduino denominada “Soul One” la cual integra la tecnología de comunicación Sigfox y permite la conexión de diferentes sensores enfocados a proyectos de IoT

Esta tarjeta permite implementar soluciones IoT a partir de su estructura y de sus características funcionales las cuales se describen a partir de la Figura A.1 y la Tabla A.1

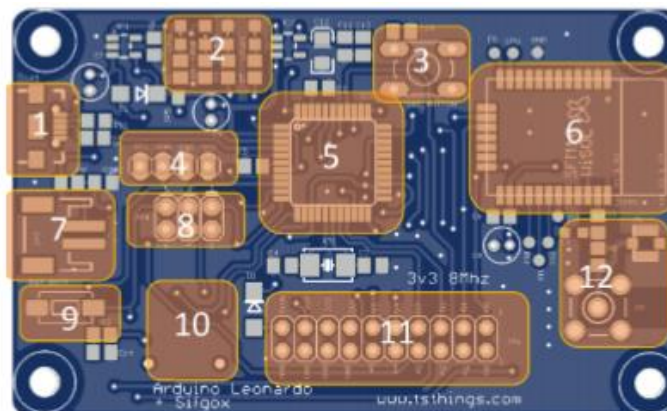


Figura A.1 Módulos que componen Soul One

Número	Módulos
1	Conector micro USB usados para carga y programación
2	Leds: carga – alimentación – UART Tx – UART Rx
3	Botón de usuario D7
4	Conector I2C
5	Microcontrolador Atmega32u4
6	Módulos WISOL SFM 11R2D
7	Conector batería litio Ion 3.7 Vdc
8	Conector ISCP
9	Botón Reset
10	Conectores para micro SD
11	Conector de usuario pinhead 2x10
12	Conectores de antena, RP-SMA, UFL, SMD

Tabla A. 1. Resumen de módulos de la Tarjeta Soul One

Esta tarjeta incluye un microcontrolador ATmega32U2 el cual es de bajo consumo de potencia basado en la arquitectura AVR RISC mejorada.

Alimentación: el módulo cuenta con entrada USB, el cual sirve para carga y programación de este, adicionalmente puede alimentarse por batería externa tipo Lipo de 3.7 Voltios DC.

Este tipo de baterías de Litio y polímero son recargables y están diseñadas para aplicaciones con requerimientos como las soluciones IoT donde es necesario un tamaño reducido, bajo peso y corrientes alrededor de 1 A.

En su interfaz externa contiene entradas analógicas, entradas y salidas digitales, puestos y conexiones para las comunicaciones, una ranura para micro SD con capacidad hasta 32 GB controlada por SPI, un puerto serial/UART y demás entradas y puertos controlados por el procesador ATMEGA.

Sensor de temperatura DS18B20

El dispositivo DS18B20 es un sensor de temperatura inteligente adaptativo que tiene la capacidad de convertir directamente la señal de temperatura en señales digitales en serie para poder ser procesadas, la calidad de su ensamblaje garantiza una mejor precisión en la medición y una vida útil más larga. [22]



Figura A.2 Sensor DS18B20

Este dispositivo cuenta con una interfaz One-Wire, es decir que solo necesita un pin de datos para comunicarse y cuenta con capacidad para realizar mediciones desde los -55°C hasta los 125°C y con una resolución programable desde 9 bits hasta 12 bits de acuerdo con la configuración de la Tabla A.2. Se alimenta desde la misma línea de datos eliminando la necesidad de una fuente de alimentación. [23]

Resolución	Temperatura
9-bit	$0,5^{\circ}\text{C}$
10-bit	$0,25^{\circ}\text{C}$
11-bit	$0,125^{\circ}\text{C}$
12-bit	$0,0625^{\circ}\text{C}$

Tabla A.2 Resumen de resolución de la Tarjeta Soul One

El sensor es de uso ideal para mediciones de temperatura en ambientes húmedos o líquidos ya que cuenta con una sonda impermeable, parámetro determinante para ser seleccionado para el diseño y para la instalación del prototipo.

Su programación se realiza haciendo uso de las librerías disponibles en el GITHUB de Arduino. Las siguiente son las líneas de código base que deben ser integradas a la programación de la tarjeta:

```
#include <OneWire.h> //Se importan las librerías

#include <DallasTemperature.h>

#define Pin 2 //Se declara el pin donde se conectará la DATA
OneWire ourWire(Pin); //Se establece el pin declarado como bus para la
comunicación OneWire
DallasTemperature sensors(&ourWire); //Se llama a la librería DallasTemperature

void setup() {
    delay(1000);
    Serial.begin(9600);
    sensors.begin(); //Se inician los sensores
}

void loop() {
    sensors.requestTemperatures(); //Prepara el sensor para la lectura
    Serial.print(sensors.getTempCByIndex(0)); //Se lee e imprime la temperatura
    en grados Centigrados
    Serial.println(" Grados Centigrados");
    delay(1000); //Se provoca una parada de 1 segundo
    antes de la próxima lectura
}
```

La Figura A.3 muestra la curva típica de rendimiento del sensor según la temperatura de operación. Para el rango de trabajo, el cual se ubica alrededor del valor de temperatura ambiente promedio para la ciudad de Popayán, rango comprendido entre 12°C y 30°C, se tiene un error medio de -0.2 °C, el cual se considera aceptable pues no se requiere una precisión por debajo de este para los reportes, alertas y/o toma de decisiones en el sistema.

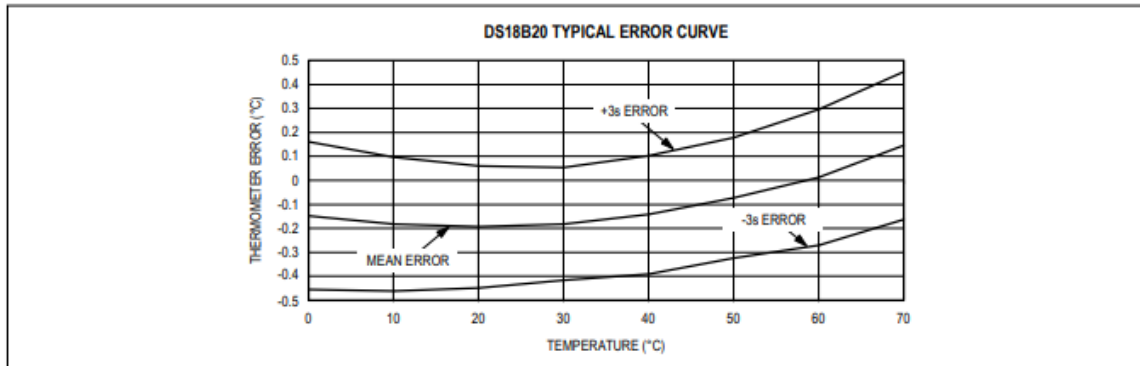


Figura A.3 Curva de rendimiento del sensor DS18B20

Configuración de Pines para encapsulado

La conexión del sensor se realiza de acuerdo al diagrama que se muestra en la Figura A.4, allí se describen los pines para la instalación y su funcionalidad

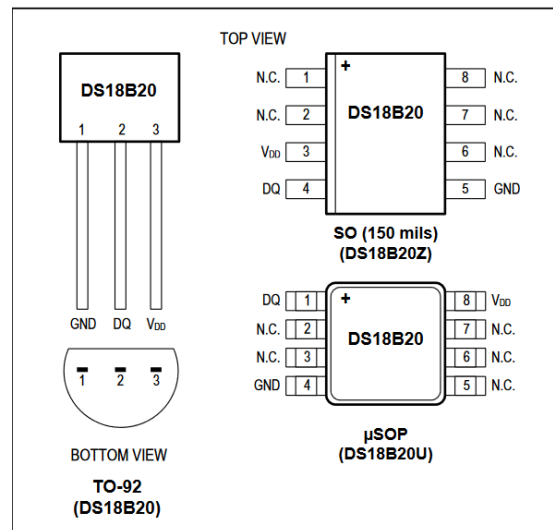


Figura A.4 Pines de conexión sensor DS18B20

Fuente: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf> [24]

V_{DD}: tensión de alimentación, se puede alimentar **desde 3V a 5,5V**.

GND: conexión a tierra.

DQ: es el pin de datos donde se recibirán todos los datos en el protocolo One-Wire. Como ya se mencionó solo es necesario utilizar un cable para conectar

varios sensores de temperatura DS18B20. Es decir que solo se utiliza un pin para conectar múltiples sensores.

Sensor de Humedad Modulo HD-38

Este sensor tiene la capacidad de medir la humedad del suelo, a partir de una tensión entre los terminales que genera una corriente, proporcional a la resistencia que se genera en el medio a sensar, parámetro asociado con proporcionalidad directa a la humedad. De esta manera, al aumentar la humedad, la resistencia del suelo disminuye y por ende la corriente crece y viceversa.

Este módulo sensor para el control de humedad en suelo o tierra con plantas, cuenta con unas puntas diseñadas para resistir la corrosión y oxidación, para lograr una mayor vida útil, parámetro determinante para el diseño del presente trabajo de grado y su posterior implementación.

Consiste en una sonda con dos terminales separados adecuadamente y un módulo YL-38 que contiene un circuito comparador LM393 SMD de soldado superficial, de gran estabilidad, un led de encendido y otro de activación de salida digital. Cuenta además con 2 pines para la alimentación y 2 pines de datos. VCC, GND, D0, A0.

Características generales	
Tamaño	36 * 15 * 7 mm
Voltaje	DC 3.3-12V
Corriente	<20mA; <30mA (salida)
Interfaz	+ - DO AO; DO valor digital; AO Valor analógico
Temperatura de funcionamiento:	- 25 ~ 85 Celsius

Tabla A.3. Características Sensor HD 38

Salidas:

A0: Salida analógica que entrega una tensión proporcional a la humedad. Puede ser medida directamente desde un puerto analógico en un Microcontrolador, Arduino, entre otros.

D0: Salida digital; este módulo permite ajustar cuándo el nivel lógico en esta salida pasa de bajo a alto mediante el potenciómetro

La Figura A.5 indica la presentación comercial del sensor:



Figura A.5 Sensor de humedad HD - 38

Fuente: <https://ferretronica.com/products/>

Sensor de intensidad lumínica fotorresistencia LDR para Arduino pi

El fotoresistor o LDR (light-dependent resistor) es un dispositivo cuya resistencia varía en función de la luz recibida, por ende, se utiliza en medidas estimativas del nivel de luz, característica que se acoge a uno de los requerimientos del presente trabajo de grado.

Formado por un semiconductor, típicamente sulfuro de cadmio CdS. Al incidir la luz sobre él algunos de los fotones son absorbidos, provocando que electrones pasen a la banda de conducción y, por tanto, disminuyendo la resistencia del componente. Por tanto, disminuye su resistencia a medida que aumenta la luz sobre él.

Características generales:

- Comparador de señal de salida, limpia, de forma de onda, capacidad de conducción, más de 15 mA.
- Con ajustable potenciómetro ajustable pruebas luz brillo
- Voltaje de funcionamiento de 3.3 V – 5 V
- Formulario de salida: Salida de interruptor digital (0 y 1)

El componente principal de este sensor es una resistencia que varía sensiblemente de acuerdo con la cantidad de luz percibida, esta relación no es lineal pues a mayor luz, menor resistencia eléctrica y a menor luz, mayor resistencia eléctrica. Esta relación se puede mostrar como una gráfica lineal en la Figura A.6.

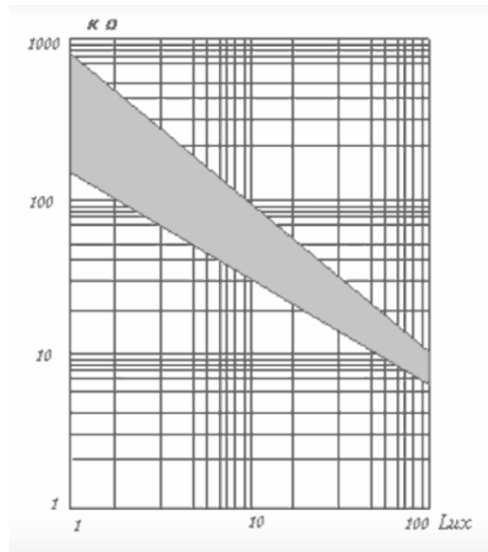


Figura A.6 Comportamiento del sensor LDR

Fuente: <https://www.luisllamas.es/medir-nivel-luz-con-arduino-y-fotoreistencia-ldr/>

Algunos de los valores para obtener esta gráfica se presentan en la Tabla A.4 que son variables de acuerdo con el modelo de fotorresistencia pues influyen en la calidad de las mediciones.

Modelo	Pico espectral (nm)	Resistencia luz brillante (K Ω)	Resistencia oscuridad (K Ω)	Gamma	Tiempo respuesta (ms)
GL5516	540	5-10	500	0.5	30
GL5528	540	10-20	1000	0.6	25/
GL5537-1	540	20-30	2000	0.6	25
GL5537-2	540	30-50	3000	0.7	25
GL5539	540	50-100	5000	0.8	25
GL5549	540	100-200	10000	0.9	25

Tabla A.4. Resistencia del sensor LDR

Fuente: <https://www.luisllamas.es/medir-nivel-luz-con-arduino-y-fotorresistencia-ldr/>

La variación de la resistencia es relativamente lenta, de 20 a 100 ms en función del modelo, característica que determina este sensor como de una gran estabilidad y teniendo en cuenta que en el presente proyecto las condiciones ambientales no exigen valores muy precisos, solamente se requiere garantizar luminosidad nula, se considera apto para el requerimiento.

Anexo B. Descripción del proceso de instalación del prototipo

En el presente anexo se reúnen los elementos específicos de la implementación del prototipo, previos al proceso de pruebas y validación.

Programación de la tarjeta

Siguiendo los requerimientos del proyecto, y teniendo en cuenta las características de los equipos seleccionados se desarrolla el código sobre el IDE de Arduino que permita la captura de datos desde los sensores para su posterior procesamiento y transmisión hacia el *backend* de Sigfox, por parte de la tarjeta Soul one.

Para la programación de la tarjeta Soul One, se debe conectar mediante el cable micro USB como se muestra en la Figura B.1

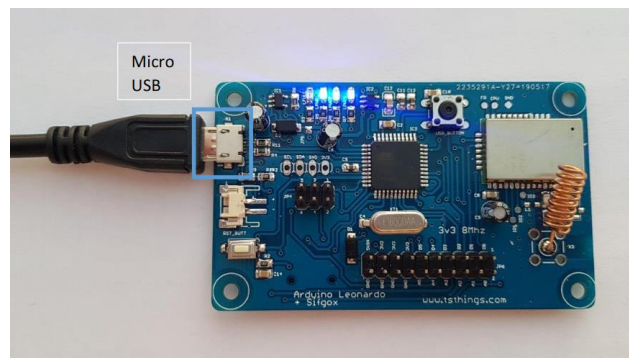


Figura B.1 Alimentación de la tarjeta Soul One mediante micro USB

Fuente: <https://github.com/TheSoulOfThings/SoulOne>

Código de programación

La programación de la placa Soul One se realiza bajo el IDE de Arduino eligiendo la placa Arduino Leonardo.

El código de programación de la placa en Arduino para la recepción y envío de información en la red Sigfox es el siguiente:

Inicialmente se definen las librerías requeridas para el Desarrollo del Código, específicamente las necesarias para realizar la lectura de la temperatura:

```
#include <OneWire.h> //libreria para la lectura de la temperatura
#include <DallasTemperature.h> //libreria para la lectura de la
temperatura
```

Se determinan los pines donde se conectará cada uno de los sensores seleccionados para el prototipo: sensor de temperatura, de intensidad lumínica y sensor de humedad:

```
const int sensorTemPin = 5; // Pin donde se conecta el sensor de
temperatura
const int sensorLDRPin = A4; // La patilla de Arduino a la que conectamos
la entrada (LDR)
const int sensorHumPin = A5; // Pin donde se conecta el sensor de humedad

const int actuadorRiegoPin = 4;
```

Posteriormente se definen las clases a partir de las librerías incluidas y se inicializan las variables a manejar.

```
// Instancia a las clases OneWire y DallasTemperature
OneWire oneWireObjeto(sensorTemPin);
DallasTemperature sensorDS18B20(&oneWireObjeto);

char Tem [5];
char Hum [5];
char Luz [5];
int temperatura = 0;
int porhum = 0;
int hum = 0;
float coeficiente_porcentaje=0;
int humedad = 0;
int luz=0;
```

```
delay(1000);  
Serial1.print("AT$SF="); // Se envia la trama  
Serial1.print(Tem); // Variables enviadas  
Serial1.print(Hum); // Variables enviadas  
Serial1.print(Luz); // Variables enviadas  
Serial1.print("\n");  
delay(3000);  
Serial.println("Done.. ");
```

La tarjeta Soul One ya se encuentra habilitada en el *backend* de la plataforma de Sigfox, por lo tanto el paso siguientes es acceder al portal <https://backend.sigfox.com/auth/login> para autenticarse y poder administrar el dispositivo (Figura B.2)

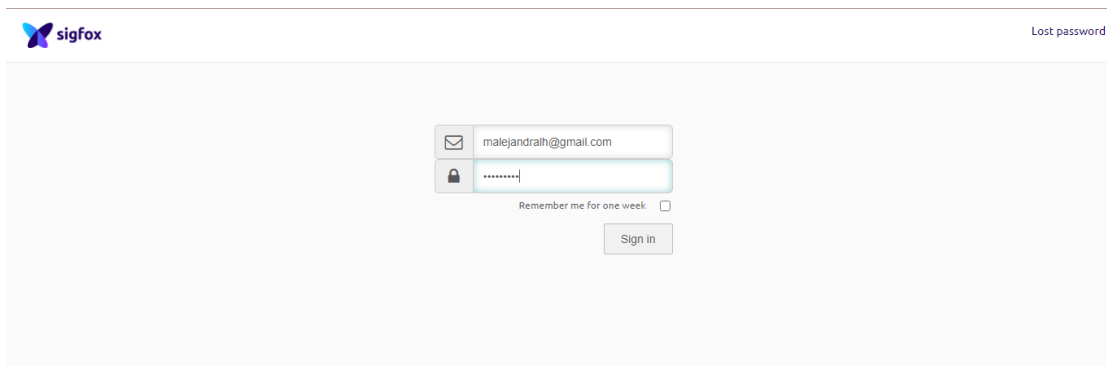


Figura B.2 Acceso al *backend* Sigfox

Fuente: propia del estudio

Una vez se accede es posible interactuar con todas las funcionalidades de la tarjeta Soul One como se indica en la Figura B.3.

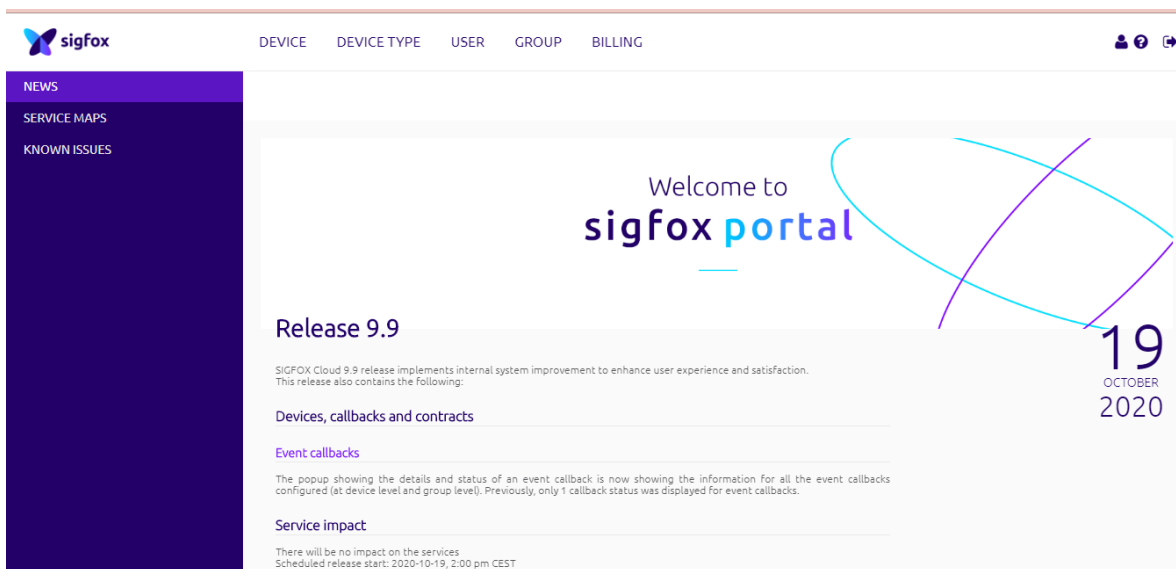


Figura B.3 Pantalla de acceso al sistema Sigfox

Fuente: propia del estudio

La Figura B.4 muestra las funcionalidades para la tarjeta registrada como son el estado de comunicación, tipo de dispositivo, Id asignado, última conexión y nombre asignado, entre otros.

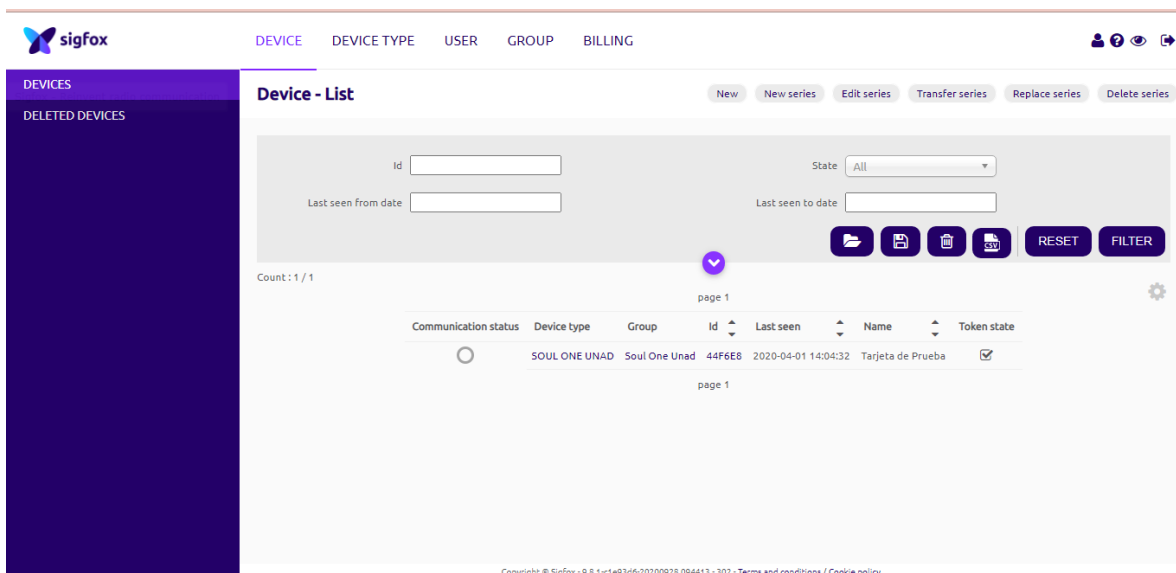


Figura B.4 Pantalla de acceso al sistema Sigfox

Fuente: propia del estudio

Se realizan pruebas de envío y recepción de mensajes de la tarjeta en el *backend* de Sigfox mediante comandos AT a través del software WISOL como lo indica el manual de implementación de la tarjeta y se verifica en la plataforma Sigfox (Figura B.5).

Message ID	Size	User	Status	Location
2019-07-12 12:13:40	1.7	123456	13C6 -118.00 21.22 920.7458 3/3	
2019-06-29 10:48:15	2.2	aa11	13E3 -123.00 17.46 920.8348 3/3	
			12C4 -116.00 26.74 920.8343 3/3	
			1D3A -92.00 25.42 920.8349 3/3	
2019-06-29 10:47:58	2.6	aa	6435 -131.00 8.96 920.7905 2/3	
			643B -125.00 16.99 920.8529 2/3	
			13C6 -128.00 10.82 920.7313 1/3	
2019-06-29 10:47:58	2.6	aa	6435 -131.00 8.80 920.7703 3/3	
			643B -124.00 17.20 920.7691 3/3	

Figura B.5 Envío de datos de comprobación

Fuente: propia del estudio

Con el código Arduino ya cargado en la tarjeta se decodifica la información en el *backend* de Sigfox, desde la opción Devicetype- información -editar (Figura B.6):

Device type soul one riego - Edition

Device type information

Name: soul one riego

Description: test

Keep-alive (in minutes): 0

Subscription automatic renewal:

Contracts: txt_sf13_b16d (13 tokens left - geoloc: yes, end date: 2021-06-12)

Alert email:

Downlink data

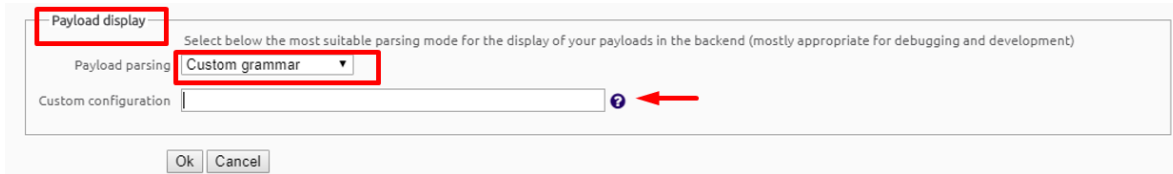
Downlink mode: NONE

Downlink data in hexa: [tapid]0000[rsst]

Figura B.6 Decodificación del código Arduino en el *backend*

Fuente: propia del estudio

En este espacio se busca el segmento Payload Display y se elige la opción Custom Grammar (Figura B.7).



Payload display

Select below the most suitable parsing mode for the display of your payloads in the backend (mostly appropriate for debugging and development)

Payload parsing Custom grammar

Custom configuration

Ok Cancel

Figura B.7 Configuración de la carga útil para la decodificación

Fuente: propia del estudio

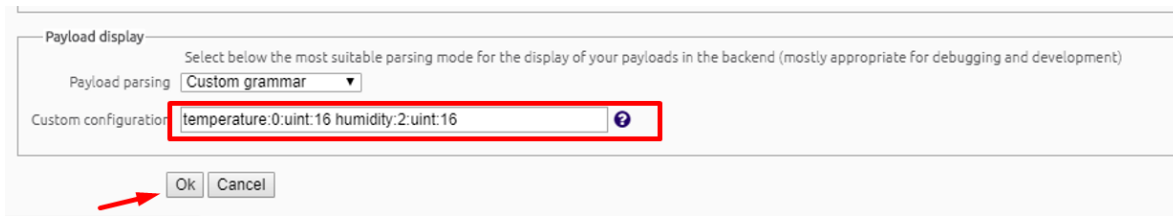
La decodificación se realiza de la siguiente manera:

1. La primera variable para interpretar es la temperatura, donde empieza en el byte 0 y tiene un tamaño de 16 bits.
2. La segunda variable es la Humedad, donde empieza en el byte número 2 y tiene un tamaño de 16 bits.

El segmento de decodificación es:

temperature:0:uint:16 humidity:2:uint:16

Esta línea debe ser configurada en el campo "Custom configuration" según la Figura B.8:



Payload display

Select below the most suitable parsing mode for the display of your payloads in the backend (mostly appropriate for debugging and development)

Payload parsing Custom grammar

Custom configuration temperature:0:uint:16 humidity:2:uint:16

Ok Cancel

ece833d91f4f7202f5/devices

Copyright © Sigfox - 8.8.0-f6a4ef4-20190812.114107 - 290 - Terms and conditions / Cookie policy.

Figura B.8 Configuración del segmento de codificación

Fuente: propia del estudio

Al dar clic en OK entrega la información decodificada que se visualiza en la plataforma del *backend* de Sigfox, como lo muestra la Figura B.9.

Device 44F6E8 - Messages Purge all messages

2020-03-02 21:14:04	3.4	1308	0015004e0000 temperature: 21 humidity: 79 luminosidade: 0	6919	-134.00	6.61	920.7392	2/3	📶	📍
				67E5	-129.00	10.86	920.8572	2/3		
				13C6	-129.00	6.56	920.7399	2/3		
2020-03-02 21:04:02	4.4	1307	0015004e0000 temperature: 21 humidity: 79 luminosidade: 0	67E5	-130.00	11.93	920.8596	3/3	📶	📍
				13C6	-129.00	6.29	920.7447	3/3		
				6919	-136.00	6.00	920.7441	1/3		
2020-03-02 20:54:02	2.8	1306	0015004e0000 temperature: 21 humidity: 79 luminosidade: 0	13C6	-127.00	9.26	920.7279	2/3	📶	📍
				67E5	-129.00	11.15	920.7274	2/3		
2020-03-02 20:44:02	3.8	1305	001500520000 temperature: 21 humidity: 85 luminosidade: 0	13C6	-127.00	6.00	920.7393	2/3	📶	📍
				67E5	-129.00	10.66	920.7388	2/3		
2020-03-02 20:34:02	1.1	1304	001500520000 temperature: 21 humidity: 85 luminosidade: 0	67E5	-129.00	10.69	920.7329	3/3	📶	📍
				13C6	-130.00	6.17	920.7983	2/3		

Copyright © Sigfox - 9.2.2-4efcc9-02020401-132448-295 - Terms and conditions / Cookie policy

Figura B.9 Visualización de la información de los sensores

Fuente: propia del estudio

El siguiente proceso corresponde a la creación de una cuenta en la plataforma ubidots for educations para visualizar los datos enviados por los dispositivos Sigfox.

Es necesario crear el callback dentro del *backend* de Sigfox en la opción Devicetype-callback y se crea un nuevo callback y luego se selecciona la opción custom callback que permite enviar los datos hacia la plataforma de ubidots (Figura B.10).

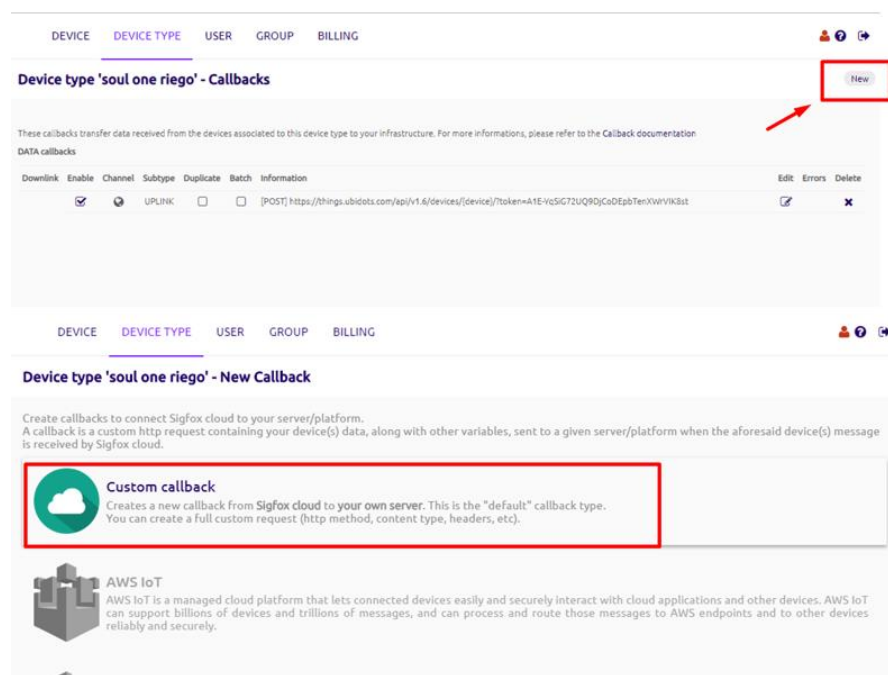


Figura B.10 Creación del callback

Fuente: propia del estudio

En el formulario de callback se deben diligenciar los siguientes parámetros:

Type: DATA - UPLINK

Channel: URL

Custom payload config: temperature:0:uint:16 humidity:2:uint:16

Use HTTP method: POST

URL pattern: https://things.ubidots.com/api/v1.6/devices/{device}/?token=xxx

Content Type: application/json

Body:

```
{
  "rssi": {rssi},
  "seqNumber": {seqNumber},
  "Temperatura" :{customData#temperature},
  "Humedad" : {customData#humidity}
}
```

Se crea una cuenta en la plataforma de ubidots for education (Figura B.11):

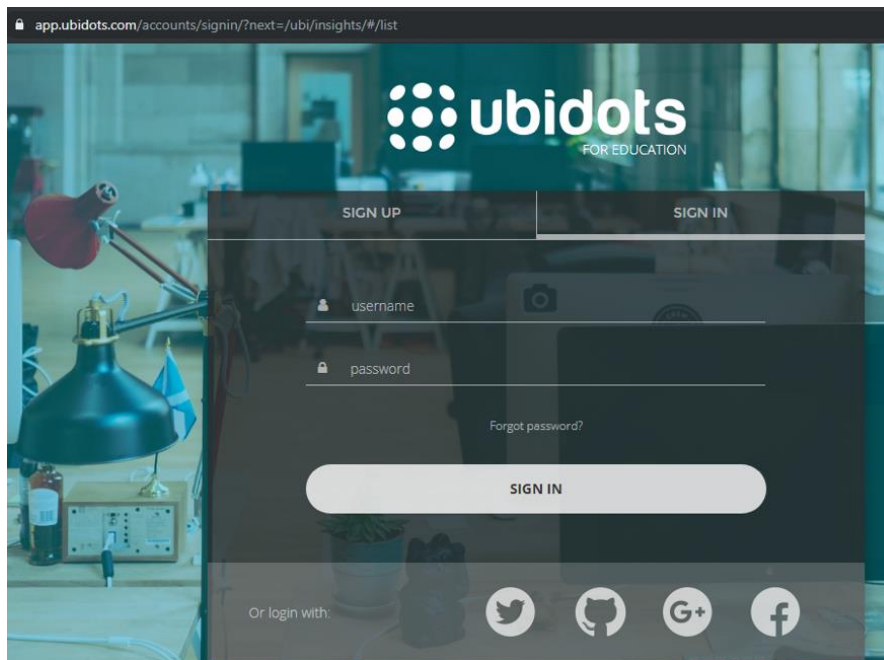


Figura B.11 Creación de cuenta en Ubidots

Fuente: propia del estudio

En la plataforma ubidots se genera el token de API credentials para registrarlo en el callback (Figura B.12):

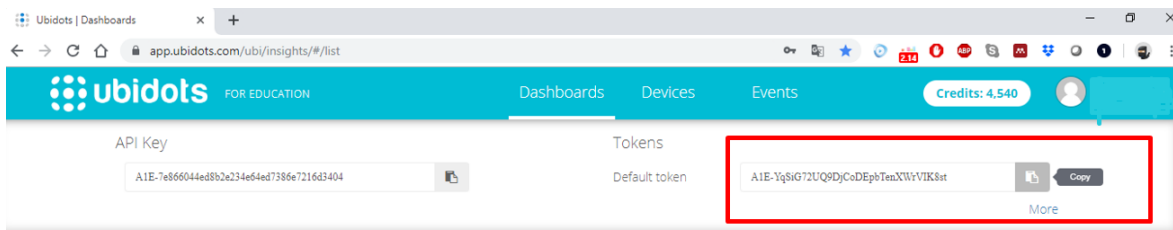


Figura B.12 Generación del Token API credentials

Fuente: propia del estudio

Se agrega la información de la URL y el token en el callback como lo muestra la Figura B.13:

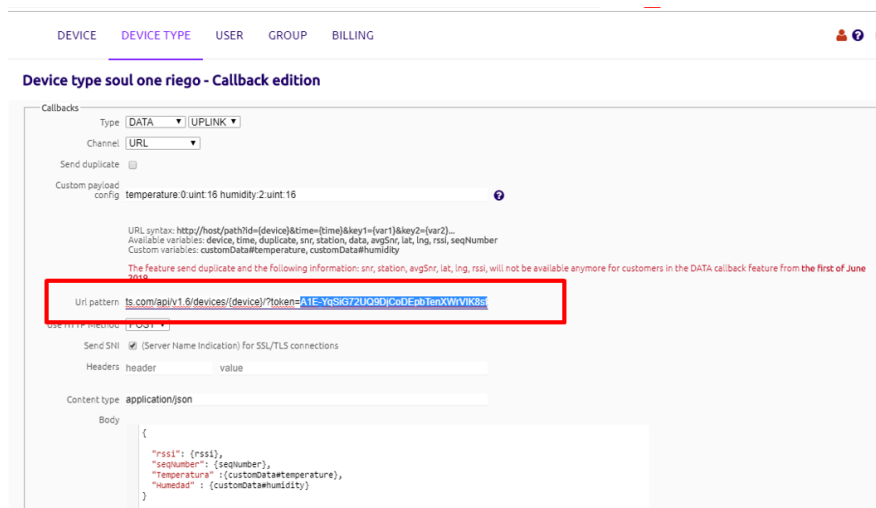


Figura B.13 Configuración de la URL en el callback

Fuente: propia del estudio

Al terminar de configurar el callback los mensajes generados por el dispositivo serán redireccionados a ubidots, donde se crean automáticamente los dispositivos y variables (Figura B.14):

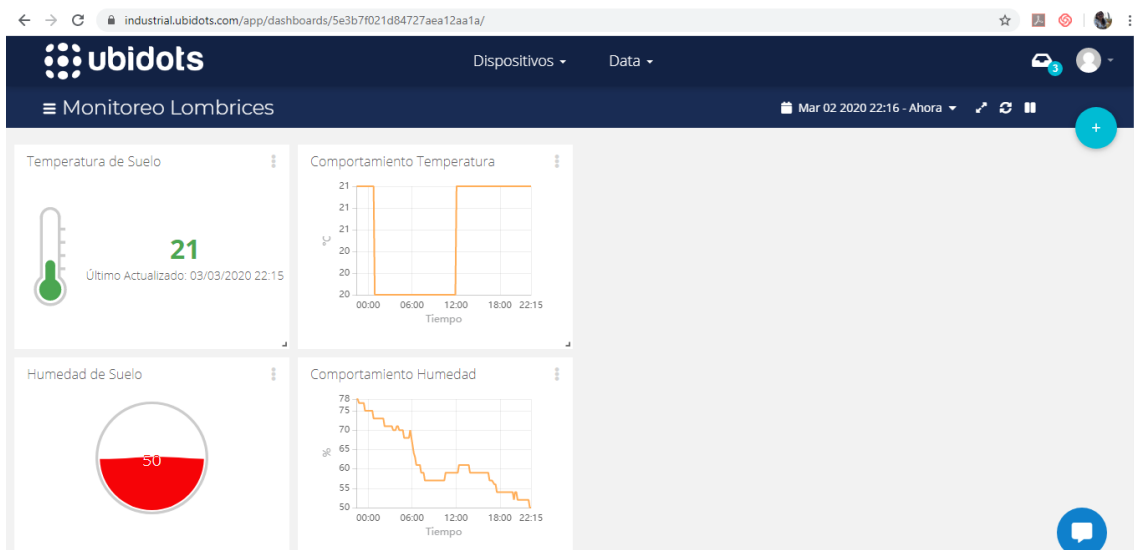


Figura B.14 Visualización del comportamiento de las variables

Fuente: propia del estudio

Anexo C. Cuestionarios

En el presente anexo se reúnen los cuestionarios empleado como un instrumento cualitativo que permite establecer una conversación a través de unas preguntas previamente diseñadas, cuando se trata de la entrevista estructuradas.

Los cuestionarios se aplican en las reuniones desarrolladas con el personal técnico, liderado por la instructora encargada de la unidad de lombricultura, Licenciada en Biología María del Socorro Anaya Flórez y los aprendices que ejecutan su etapa productiva bajo la modalidad de monitoria en dicha sección.

Cuestionario No. 1

1. Describa el proceso de producción de la Unidad de lombricultura, especificando el propósito de cada una de sus fases
2. ¿Qué variables considera usted críticas para la unidad y por qué?
3. ¿Hace cuánto está en operación la unidad de lombricultura?
4. ¿Qué población de lombrices se estima hoy en la cama?
5. ¿Qué tipo de materia orgánica se dispone para el sustrato de las lombrices?
6. ¿De dónde proviene la materia orgánica que se dispone para las camas?
7. ¿Cuáles son las expectativas que a nivel de producción se tienen definidas?
8. ¿Qué cantidad de humus y lixiviados se obtienen bajo las condiciones actuales?

Cuestionario No. 2

1. ¿Cómo se desarrolla el monitoreo actual de cada variable crítica?
2. ¿Cuál es el caso crítico para la variable temperatura? ¿Cómo proceden cuando se presenta?
3. ¿Cuál es el caso crítico para la variable humedad? ¿Como proceden cuando se presenta?

4. ¿Cuál es el caso crítico para la variable intensidad lumínica? ¿Qué hacer cuando se presenta?
5. ¿Cuál es el caso crítico para la variable pH? ¿Como proceden cuando se presenta?
6. ¿Cuáles son los eventos críticos que se han registrado en las bitácoras relacionados con las variables?
7. ¿Cómo se realiza el suministro de materia orgánica sobre las camas? ¿con que periodicidad se realiza?
8. ¿Cuánto tiempo tardan las lombrices en degradar la materia orgánica suministrada?
9. ¿Cuál es la proporción entre cantidad de materia orgánica suministrada y humus recolectado?
10. ¿Existen otras alternativas que se manejen en la unidad para degradar la materia? ¿puede describirlas?

Cuestionario 3

1. ¿Cuál es el diseño de las camas del proyecto Lombricoca?
2. ¿en el monitoreo manual, donde se toman los datos de cada una de las variables?
3. ¿Cuál es la ubicación sugerida para el arreglo de sensores en las camas actuales y en las camas del proyecto nuevo? ¿por qué?
4. ¿Cómo se registran actualmente los datos de las variables?
5. ¿Qué datos se consideran relevantes mostrar en el sistema para el productor?
6. ¿Cuál sería la periodicidad adecuada para la toma de datos?
7. ¿Considera necesaria la configuración de un sistema de alertas? ¿Cómo espera que se reporten los eventos?