



**Monitorización de temperatura y control de la cadena de frío mediante uso de la
tecnología SigFox**

Arias Paredes, Jenner Andres

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y
Telecomunicaciones

Ing. Castro Carrera, Alejandro Fabián.

8 de febrero del 2023

Certificado Antiplagio

Informe de originalidad

NOMBRE DEL CURSO

Titulacion Jener Arias

NOMBRE DEL ALUMNO

JENNER ANDRES ARIAS PAREDES



ALFONSO CASTRO CARRERA S.R.L.
ALEJANDRO FARJAN
CASTRO CARRERA

NOMBRE DEL ARCHIVO

Tesis_Arias_Jenner_capitulo1_4

CREACIÓN DEL INFORME

4 feb 2023

Resumen

Pasajes marcados	18	2 %
Pasajes citados/entrecorillados	5	0.5 %

4/2/23, 09:30

Segunda parte

Informe de originalidad

NOMBRE DEL CURSO

Titulacion Jener Arias

NOMBRE DEL ALUMNO

JENNER ANDRES ARIAS PAREDES



ALFONSO CASTRO CARRERA S.R.L.
ALEJANDRO FARJAN
CASTRO CARRERA

NOMBRE DEL ARCHIVO

Tesis Arias_ capitulo 5_6

CREACIÓN DEL INFORME

4 feb 2023



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, **"Monitorización de temperatura y control de la cadena de frío mediante uso de la tecnología SigFox "** fue realizado por el señor **Arias Paredes, Jenner Andres** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 8 de febrero del 2023

Firma:



ALEJANDRO FABIAN
CASTRO CARRERA

Ing. Castro Carrera, Alejandro Fabián

C. C. 1711046969



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Responsabilidad de autoría

Yo, **Arias Paredes, Jenner Andres**, con cédula de ciudadanía n° 1722659883, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Monitorización de temperatura y control de la cadena de frío mediante uso de la tecnología SigFox** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 8 de febrero del 2023

Firma (s)

Arias Paredes, Jenner Andres

C.C.: 1722659883



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Autorización de publicación

Yo **Arias Paredes, Jenner Andres**, con cédula de ciudadanía n° 1722659883, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Monitorización de temperatura y control de la cadena de frío mediante uso de la tecnología SigFox** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 8 de febrero del 2023

Firma:


.....
Arias Paredes, Jenner Andres

C.C.: 1722659883

Dedicatoria

Dedico el presente proyecto de investigación a Dios por guiarme en el transcurso de mi vida y por permitirme tener salud y seguir día a día.

A mis queridos y amados padres Washington y Elizabeth por aconsejarme, brindarme su amor y sabiduría en este proceso, por inculcarme el valor de trabajo duro, y de la perseverancia, gracias por ser mi ejemplo a seguir, por guiarme en el camino del bien y ayudarme a ser la persona que soy hoy en día.

A mi amado hermano Rafael por ser mi compañero de juegos, peleas, compañía y ser un soporte en los momentos más tristes y felices, gracias por ser un gran ejemplo para mí.

A mis abuelitos Dolores y Rafael, por aconsejarme durante sus vidas y por todo el amor que me brindaron cuando fui pequeño y adolescente.

A mis amigos Steven, Ronny, Josselyn, David, Alex, Kevin por todos los momentos felices que hemos vivido, por todas las experiencias, trabajos, tareas y proyectos que hemos realizados juntos.

Finalmente, dedico este proyecto de investigación a familiares, amigo/as que han estado presentes en mi vida y por dedicarme su cariño y tiempo.

Jenner Andres Arias Paredes

Agradecimiento

Agradezco a mi familia por apoyarme en todos los años que he pasado por la Universidad, por ser los pilares fundamentales de mi vida académica y personal, y por compartir conmigo su sabiduría y conocimientos que me permitieron seguir adelante y realizarme como persona.

Agradezco a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE por brindarme una oportunidad de seguir mis sueños de ser un gran Ingeniero. A mis queridos profesores que me han pasado sus grandes conocimientos académicos e ideales. A todos los amigos que he conocido en mi vida universitaria por estar siempre presentes.

Agradezco a mi querido amigo e Ingeniero Alejandro Castro quien primeramente es un excelente amigo y docente, por guiarme en este proceso para este trabajo de titulación y por brindarme sus conocimientos y ayuda para solventar inquietudes en todo el proceso para el desarrollo de este proyecto.

Jenner Andres Arias Paredes

Contenido

Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Resumen	24
Abstract	25
Capítulo I Aspectos Generales	26
Introducción.....	26
Antecedentes	27
Justificación e importancia.....	28
Alcance del Proyecto	29
Objetivos	30
<i>Objetivo General</i>	30
<i>Objetivos Específicos</i>	30
Capítulo II Marco conceptual	31
Cadena de Frío	31
Etapas de la Cadena de Frío.....	31
Elementos Fundamentales de la Cadena de Frío	32
<i>Recursos Humanos</i>	32
<i>Recursos Materiales</i>	32
<i>Recursos Financieros</i>	32
Equipos de la Cadena de Frío.....	33
<i>Cámaras frías o Cuarto Frío</i>	33

<i>Vehículo Frigorífico</i>	34
<i>Refrigerador</i>	34
Internet of Things (IOT)	35
<i>Características de IoT</i>	36
<i>Arquitecturas Referenciales en IoT</i>	37
<i>Requerimientos para IoT</i>	39
<i>Aplicaciones de IoT</i>	40
WSN (Wireless Sensor Network)	42
<i>Arquitectura de la WSN</i>	43
LPWAN (Low Power Wide Area Network)	43
<i>Características LPWAN</i>	45
Tecnología SigFox	46
<i>Modulación y Técnica de Acceso Múltiple</i>	46
<i>Ultra Narrow Band (UNB)</i>	47
<i>Mecanismo de Comunicación</i>	48
<i>Protocolo RFTDMA</i>	49
<i>Arquitectura de la Red Sigfox</i>	50
<i>Cobertura de la red SigFox</i>	51
Tecnología LoRa (Long Range)	54
<i>Características de LoRa</i>	54
<i>Rangos de Frecuencia de LoRa</i>	54
<i>LoRa WAN</i>	55

	10
<i>Arquitectura de LoRaWAN</i>	55
<i>Clases de Dispositivos LoRaWAN</i>	57
<i>Seguridad de LoRaWAN</i>	58
<i>Cobertura de la red LoRaWAN</i>	58
NB-IoT	59
<i>Características</i>	60
<i>Cobertura</i>	60
<i>NB-IoT Red de Acceso por Radio</i>	62
<i>Modos de Operación</i>	63
<i>Arquitectura NB-IoT</i>	64
Resumen de las tecnologías LPWAN	66
Cloud Computing (Computo en la Nube)	67
<i>Características Esenciales</i>	68
<i>Modelos de Servicio</i>	69
<i>Modelos de Despliegue</i>	69
Azure	70
<i>Servicios de Azure</i>	71
Power Bi.....	71
<i>Características</i>	72
MIT APP INVENTOR	73
Capítulo III Materiales y Métodos	75
Xkit de Thinxtra para Sigfox	75

	11
<i>Accesorios del Xkit Thinxtra</i>	75
Arduino	77
<i>Arduino Uno</i>	78
<i>Arduino Mega 2560</i>	79
Sensores	80
<i>Sensor de Temperatura y Humedad Ambiental DHT22</i>	80
Módulo GPS NEO-6M	82
<i>Características</i>	83
Caja de Protección.....	84
Grupos de recursos de Azure.....	85
Servicios de Azure Utilizados	85
<i>Azure IoT Hub</i>	85
<i>Azure SQL Server</i>	87
<i>Azure Stream Analytics</i>	87
<i>SQL Database</i>	87
Capítulo IV Diseño e Implementación de la red de Sensores	89
Arquitectura del Sistema.....	89
Diagrama de Bloques	90
Nodos Sensores	92
<i>Nodo 1</i>	92
<i>Nodo 2</i>	93
<i>Nodo 3</i>	95
Implementación de la Red de Nodos Sensores.....	96

	12
<i>Ubicación de implementación</i>	97
Despliegue e Instalación de la Red de sensores.....	98
<i>Colocación de los sensores del nodo 1</i>	99
<i>Colocación de los sensores del nodo 2</i>	101
<i>Colocación de los sensores del nodo 3</i>	103
Programación de los nodos sensores.....	105
<i>Programación Nodo 1</i>	107
<i>Programación Nodo 2</i>	111
<i>Programación Nodo 3</i>	115
Configuración de la Red Sigfox.....	115
Backend de Sigfox.....	118
<i>Configuración del Callback</i>	119
Servidor Azure.....	121
<i>Creación de Grupo de Recursos</i>	121
<i>Configuración del Recurso IOT HUB</i>	122
<i>Configuración de Base de Datos SQL</i>	124
<i>Configuración del Recurso Stream Analytics</i>	130
Visualización de datos.....	134
<i>Creación de Dashboard</i>	136
<i>Aplicación Móvil</i>	138
Capítulo V Análisis de Resultados.....	143
Datos Obtenidos.....	143

Calidad del Enlace	145
<i>Mensajes Enviados</i>	149
RSSI (Received Signal Strength Indicator)	153
Link Quality Indicator (LQI).....	156
Análisis de Temperatura y Humedad	159
<i>Análisis de Temperatura Nodo 1</i>	160
<i>Análisis de Humedad Nodo 1</i>	165
<i>Análisis de Temperatura Nodo 2</i>	169
<i>Análisis de Ruta Nodo 2</i>	172
<i>Análisis de Temperatura Nodo 3</i>	174
<i>Análisis de Humedad Nodo 3</i>	178
Conclusiones.....	184
Recomendaciones	185
Referencias.....	186
Apéndice	195

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Relevancia de las características para las aplicaciones</i>	44
Tabla 2 <i>Especificaciones Técnicas de la red SigFox</i>	50
Tabla 3 <i>Rango de frecuencias para cada Zona de la red SigFox</i>	53
Tabla 4 <i>Especificaciones técnicas de LoRa</i>	54
Tabla 5 <i>Principales países que han desplegado NB-IoT</i>	61
Tabla 6 <i>Resumen de las tecnologías LPWAN: SigFox, LoRaWAN y NB-IoT</i>	66
Tabla 7 <i>Especificaciones técnicas del módulo WSSFM10R4AT</i>	77
Tabla 8 <i>Especificaciones técnicas de Arduino Uno</i>	78
Tabla 9 <i>Especificaciones Técnicas Arduino Mega 2560</i>	80
Tabla 10 <i>Especificaciones técnicas del sensor DHT22</i>	81
Tabla 11 <i>Características módulo GPS NEO 6M</i>	83
Tabla 12 <i>Precios de IoT Hub de Nivel básico</i>	86
Tabla 13 <i>Precios de IoT Hub de Nivel Estándar</i>	86
Tabla 14 <i>Distribución de pines del nodo 1</i>	93
Tabla 15 <i>Distribución de pines Arduino Mega 2560 nodo 2</i>	94
Tabla 16 <i>Distribución de pines del nodo2</i>	96

Tabla 17 <i>Librerías usadas para Arduino</i>	106
Tabla 18 <i>Configuración del grupo de recursos</i>	122
Tabla 19 <i>Creación del recurso IoT Hub</i>	122
Tabla 20 <i>Configuración de la base de datos</i>	125
Tabla 21 <i>Configuración de SQL Server</i>	125
Tabla 22 <i>Descripción de las columnas necesarias para base de datos</i>	127
Tabla 23 <i>Información seleccionada para Stream Analytics</i>	131
Tabla 24 <i>Ingreso de datos para crear una entrada</i>	131
Tabla 25 <i>Ingreso de datos para crear una salida</i>	132
Tabla 26 <i>Datos adquiridos de la base de datos para el Nodo 1</i>	143
Tabla 27 <i>Datos adquiridos de la base de datos para el Nodo 2</i>	144
Tabla 28 <i>Datos adquiridos de la base de datos para el Nodo 3</i>	145
Tabla 29 <i>Parámetros necesarios para analizar la calidad de la señal</i>	146
Tabla 30 <i>Mensajes recibidos, perdidos y totales</i>	150
Tabla 31 <i>Comparación de rango y media de los niveles de RSSI</i>	155
Tabla 32 <i>Indicador de calidad del enlace en zona RC2 y RC4</i>	156
Tabla 33 <i>Número de mensajes por estación base</i>	157
Tabla 34 <i>Valores promedio de temperatura de la segunda y tercera semana del nodo 2</i>	162

Tabla 35 <i>Valores promedio de humedad de la segunda y tercera semana del nodo 1</i>	166
Tabla 36 <i>Valores promedio de temperatura de la segunda y tercera semana del nodo 2</i>	169
Tabla 37 <i>Valores promedio de temperatura de la segunda y tercera semana del nodo 3</i>	175
Tabla 38 <i>Valores promedio de humedad relativa de la segunda y tercera semana para el nodo 3</i>	179
Tabla 39 <i>Material y costo para implementación de nodos sensores</i>	182
Tabla 40 <i>Recursos de la nube de Azure y sus costos.</i>	183

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Etapas de la Cadena de Frío</i>	32
Figura 2 <i>Cuarto frío</i>	33
Figura 3 <i>Vehículo Termo</i>	34
Figura 4 <i>Refrigerador Industrial</i>	35
Figura 5 <i>Arquitectura en capas de IoT</i>	38
Figura 6 <i>Aplicaciones IoT</i>	41
Figura 7 <i>Arquitectura del MOTE</i>	43
Figura 8 <i>Características principales de aplicaciones LPWAN</i>	45
Figura 9 <i>Modulación DBPSK</i>	47
Figura 10 <i>Tecnología SigFox basada en UNB</i>	48
Figura 11 <i>Arquitectura de la red SigFox</i>	50
Figura 12 <i>Cobertura a nivel mundial de la red Sigfox</i>	52
Figura 13 <i>Zonas de despliegue de la red SigFox</i>	52
Figura 14 <i>Arquitectura LoRaWAN</i>	56
Figura 15 <i>Mapa de cobertura de la red LoRAWAN</i>	59
Figura 16 <i>Representación geográfica de los países que han desplegado NB-IoT</i>	62
Figura 17 <i>Modos de operación NB-IoT</i>	63

Figura 18 <i>Arquitectura NB-IoT</i>	65
Figura 19 <i>Localización de los datacenter de Azure</i>	70
Figura 20 <i>Power Bi en diferentes plataformas</i>	72
Figura 21 <i>Interfaz de trabajo APP INVENTOR</i>	73
Figura 22 <i>Programación de bloques APP INVENTOR</i>	74
Figura 23 <i>Xkit de Thinkxtra para SigFox</i>	76
Figura 24 <i>Módulo WSSFM10R4AT</i>	76
Figura 25 <i>Placa Arduino Uno</i>	78
Figura 26 <i>Arduino Mega 2560</i>	79
Figura 27 <i>Sensor de temperatura y humedad DHT22</i>	81
Figura 28 <i>Módulo GPS NEO 6M</i>	82
Figura 29 <i>Caja de Protección</i>	84
Figura 30 <i>Diagrama de Bloques</i>	91
Figura 31 <i>Diagrama esquemático nodo 1</i>	93
Figura 32 <i>Diagrama esquemático nodo 2</i>	95
Figura 33 <i>Diagrama esquemático nodo 3</i>	96
Figura 34 <i>Lugar de implementación nodo 1</i>	97
Figura 35 <i>Lugar de implementación nodo 2</i>	98

Figura 36 Lugar de implementación nodo 3.....	98
Figura 37 Colocación nodo 1.....	99
Figura 38 Alimentación del nodo 1	100
Figura 39 Colocación de Sensores nodo 1	100
Figura 40 Implementación del nodo 2	101
Figura 41 Alimentación y sensores del nodo 2	102
Figura 42 Integración del nodo sensor 2.....	102
Figura 43 Colocación del sensor de temperatura	103
Figura 44 Colocación del nodo sensor 3.....	103
Figura 45 Fuentes de Alimentación.....	104
Figura 46 Colocación de sensores en el frigorífico.....	105
Figura 47 Diagramas de flujo de los nodos sensores.....	107
Figura 48 Librerías utilizadas en el nodo 1	107
Figura 49 Declaración de pines.....	108
Figura 50 Inicio de la lectura de datos.....	108
Figura 51 Intervalo de envío de mensajes	109
Figura 52 Función void loop	109
Figura 53 Declaración de tipos de variables.....	109

Figura 54 <i>Asignación de variables para envío de datos</i>	110
Figura 55 <i>Establecimiento de los bytes para cada variable</i>	111
Figura 56 <i>Librerías nodo 2</i>	111
Figura 57 <i>Declaración de pines nodo 2</i>	112
Figura 58 <i>Inicialización del sensor y módulo</i>	113
Figura 59 <i>Intervalo de envío de mensajes</i>	113
Figura 60 <i>Lectura de datos del módulo GPS</i>	114
Figura 61 <i>Lectura de los datos de temperatura</i>	114
Figura 62 <i>Distribución de bytes para cada variable</i>	115
Figura 63 <i>Declaración de variables nodo 3</i>	115
Figura 64 <i>Página oficial de Sigfox para activación de módulos</i>	116
Figura 65 <i>Disponibilidad del País para la activación</i>	116
Figura 66 <i>Registro del ID y PAC de cada módulo</i>	117
Figura 67 <i>Información para creación de cuenta</i>	117
Figura 68 <i>Confirmación de registro del módulo</i>	118
Figura 69 <i>Página principal del Backend de Sigfox</i>	118
Figura 70 <i>Configuración de callback del nodo 1</i>	120
Figura 71 <i>Configuración del Callback nodo 2</i>	120

Figura 72 Configuración del Callback nodo 3	121
Figura 73 Verificación de los módulos conectados con Azure	123
Figura 74 Link de conexión con el backend de Sigfox.....	124
Figura 75 Diagrama de parámetros de la base de datos.....	126
Figura 76 Tablas creadas para la base de datos.....	129
Figura 77 Ingreso de información para crear el recurso	130
Figura 78 Publicación de página web.....	135
Figura 79 Página principal del dashboard.....	137
Figura 80 Página secundaria.....	137
Figura 81 Pantalla principal de la aplicación.....	138
Figura 82 Menú de selección.....	139
Figura 83 Pantallas de visualización nodo 1	140
Figura 84 Pantallas de visualización Nodo 2	141
Figura 85 Pantallas de visualización de Nodo 3.	142
Figura 86 Mensajes recibidos y perdidos del Nodo 1	151
Figura 87 Mensajes recibidos y perdidos para el Nodo 2.....	152
Figura 88 Mensajes recibidos y perdidos para el Nodo 3.....	153
Figura 89 RSSI del Nodo 1.....	153

Figura 90 RSSI del Nodo 2.....	154
Figura 91 RSSI del Nodo 3.....	155
Figura 92 Calidad del enlace del Nodo sensor 1	157
Figura 93 Calidad del enlace del Nodo sensor 2	158
Figura 94 Calidad del enlace del Nodo sensor 3	159
Figura 95 Niveles de Temperatura por hora para nodo 1.....	161
Figura 96 Niveles de temperatura mes de julio nodo 1	163
Figura 97 Niveles de temperatura mes de agosto nodo 1.....	163
Figura 98 Niveles de temperatura mes de septiembre nodo 1.....	164
Figura 99 Niveles de temperatura de la segunda y tercera semana de cada mes.....	164
Figura 100 Niveles de humedad mes de julio nodo 1.....	167
Figura 101 Niveles de humedad mes de agosto nodo 1	167
Figura 102 Niveles de humedad mes de septiembre nodo 1	168
Figura 103 Niveles de humedad de la segunda y tercera semana de cada mes	168
Figura 104 Niveles de temperatura mes de julio nodo 2	170
Figura 105 Niveles de temperatura mes de agosto nodo 2.....	171
Figura 106 Niveles de temperatura mes de septiembre nodo 2.....	171
Figura 107 Coordenadas de la ruta del transporte	173

Figura 108 <i>Ruta diaria del transporte de productos</i>	174
Figura 109 <i>Niveles de temperatura mes de julio nodo 3</i>	176
Figura 110 <i>Niveles de temperatura mes de agosto nodo 3</i>	177
Figura 111 <i>Niveles de temperatura mes de septiembre nodo 3</i>	177
Figura 112 <i>Niveles de temperatura de la segunda y tercera semana de cada mes</i>	178
Figura 113 <i>Niveles de humedad mes de julio nodo 3</i>	180
Figura 114 <i>Niveles de humedad mes de agosto nodo 3</i>	181
Figura 115 <i>Niveles de humedad mes de septiembre nodo 3</i>	181
Figura 116 <i>Niveles de humedad de la segunda y tercera semana de cada mes</i>	182

Resumen

Con el pasar del tiempo las tecnologías se han desarrollado hasta llegar a tener diferentes tipos de aplicaciones, una de las principales se denomina Internet de las Cosas (IoT, del inglés *Internet of Things*), la cual consiste en una red de interconexión digital entre dispositivos. Este tipo de tecnología permite el uso de redes de sensores inalámbricos (WSN, del inglés *Wireless Sensor Network*), redes de baja potencia de área extendida (LPWAN, del inglés *Low Power Wide Area Network*) que permiten la transmisión de información de forma inalámbrica a varios kilómetros de alcance.

El uso de las WSN en cadenas de frío es de suma importancia ya que permite la monitorización de los parámetros físicos como: la temperatura, movimiento en los lugares en las que se implementan. Además, ayuda a la automatización, es decir, ya no se necesita de personas que estén en los lugares fríos para controlar la temperatura, sino que pueden desde cualquier lugar controlarla.

En este proyecto se tuvo como finalidad el desarrollo de una red de sensores constituida por tres nodos sensores que permitieron la monitorización de temperatura en una Cadena de Frío de frigoríficos, mediante el uso de la tecnología de comunicaciones para IoT SigFox. Como primer punto, se realizó el acoplamiento de la red de sensores con el módulo de desarrollo, lo que permitirá generar un análisis de las variables físicas (temperatura, humedad y geoposicionamiento). La red de sensores se colocó en frigoríficos permitiendo obtener los datos de las variables mediante la red SigFox.

La visualización de los datos se lo realizó a través de una aplicación móvil y un portal web, los cuales en una base de datos que almacena toda la información tomada de las mediciones de las variables de cada uno de los nodos sensores obtenidos desde el almacenamiento, transporte y distribución de los frigoríficos.

Palabras clave: IoT, LoRa, NB-IoT, Sigfox.

Abstract

Over time, technologies have developed into different types of applications, one of the main ones is called the Internet of Things (IoT), which consists of a digital interconnection network between devices. This type of technology allows the use of wireless sensor networks WSN (Wireless Sensor Network), low power wide area networks LPWAN (Low Power Wide Area Network) that allow the transmission of information wirelessly over several kilometers of range.

The use of WSNs in cold chains is of utmost importance as it allows the monitoring of physical parameters such as temperature and movement in the places where they are implemented. In addition, it helps automation, i.e., it is no longer necessary for people to be in the cold places to control the temperature, but they can control it from anywhere.

The purpose of this project was the development of a sensor network consisting of three sensor nodes that allowed temperature monitoring in a cold chain of refrigerators, using SigFox IoT communications technology for IoT. As a first point, the coupling of the sensor network with the development module was performed, which will allow generating an analysis of the physical variables (temperature, humidity and geopositioning). The sensor network was placed in refrigerators, allowing to obtain the data of the variables through the SigFox network.

The visualization of the data was done through a mobile application and a web portal, which have a database that stores all the information taken from the measurements of the variables of each of the sensor nodes obtained from the storage, transport and distribution of the refrigerators.

Keywords: IoT, LoRa, NB-IoT, Sigfox.

Capítulo I

Aspectos Generales

Introducción

En la actualidad con el avance y surgimiento de nuevas tecnologías, el Internet de las cosas (IoT, *del inglés Internet of Things*) ha tomado un rol muy importante, volviéndose una parte fundamental para distintos sectores como cadena de frío, ganadería, agricultura, edificios inteligentes, salud, energía, electrónica, etc. IoT permite la conexión de diferentes tipos de objetos como actuadores y sensores a Internet mediante tecnologías de baja potencia, bajo consumo energético y comunicación inalámbrica, automatizando y reduciendo el tiempo en los procesos de recolección de datos.

Las redes utilizadas para diferentes aplicaciones de IoT, se han denominado (LPWAN, *del inglés Low Power Wide Area Network*) esto se debe a que son redes que presentan ciertas características como gran área de cobertura, la transmisión de paquetes de datos más pequeños de forma inalámbrica, su bajo consumo energético y fácil integración con las redes de sensores. Las principales redes LPWAN que existen actualmente y están desplegadas por casi todo el mundo son *SigFox*, *LoRaWAN* y *NB-IoT*.

La cadena de frío con conexión a Internet es un concepto basado en las tecnologías de la información esto se debe a que se necesita de la recolección de datos e información necesaria de variables ambientales principalmente de temperatura y de humedad, con el objetivo de tomar decisiones e implementar acciones necesarias en lugares congelados o refrigerados que podrían afectar a la salud de los operadores. Debido a esto, es posible reducir los riesgos laborales en las cadenas de frío, reducción de costos y mejor rendimiento de los procesos.

Antecedentes

Con el avance de la tecnología a nivel mundial han surgido empresas dedicadas al almacenaje, transporte y distribución de productos mediante sistemas de refrigeración o congelación en el sector alimenticio, florícola y farmacéutico, en los cuales, se realizan procesos de monitorización de variables físicas como temperatura y humedad sin el uso del IOT lo que retrasa la adquisición de datos de forma automática para prevenir alguna falla que surja y dañe los productos que se almacenen en los contenedores.

De acuerdo con (Rodríguez & Martínez, 2020), quienes diseñaron un sistema de medición de condiciones ambientales en espacios de almacenamiento que requieren de un monitoreo constante como cuartos fríos, cavas, entre otros, su funcionamiento se basó en la adquisición de datos mediante sensores de temperatura y humedad que mediante la red SigFox desplegada permite la recepción, adecuación, tratamiento de los datos, los cuales posteriormente se almacenan en una base de datos y el resultado de las mediciones se la verifica en una página web.

Según (Castillo, 2018), quien diseñó un sistema de Monitoreo de parámetros medioambientales mediante sensores y la red Sigfox, en el cual se programó dispositivos señores (Arduino, Waspote y raspberry) para enviar los datos de las mediciones de variables medioambientales de temperatura, intensidad lumínica, ruido acústico, etc. A su vez configuraron el Backend de SigFox y posteriormente la adecuación y desarrollo de un servidor web que acepta las peticiones del Backend.

De acuerdo con (Martínez, 2020), quien diseñó un sistema de Monitorización de las variables ambientales durante el transporte de productos perecederos para estimar en tiempo real las pérdidas de calidad, en donde, la temperatura es uno de los principales factores que afectan a la calidad de los productos, por esta razón se puede utilizar en todas las etapas de la

cadena de frío gracias a su arquitectura de comunicación inalámbrica registrando las variables en múltiples puntos de la carga. El sistema desarrollado como una herramienta basada en sensores, ha sido probado durante varios viajes de transporte terrestre por Europa y validado en cámaras climáticas del Instituto de Biotecnología Vegetal de la Universidad Politécnica de Cartagena.

Justificación e importancia

La red de sensores inalámbricos (WSN, *del inglés Wireless Sensor Network*) puede describirse como una red de nodos que hace un esfuerzo colaborativo para detectar ciertos datos específicos en su periferia y, por lo tanto, controla el entorno alrededor. Una red de sensores típica está formada por un gran número de nodos sensores de bajo coste y baja potencia que se pueden desplegar en entornos difíciles (Akyildiz et al., 2002).

La red de baja potencia de área extendida LPWAN son tecnologías de comunicación inalámbrica que permite la transmisión de datos entre varios dispositivos y una estación base que se encuentran alejados por varios metros o kilómetros con un consumo de potencia baja (Raza et al., 2017). Estas tecnologías son usadas por la mayor cantidad de dispositivos de IoT, las cuales permiten instalar varios nodos distribuidos por grandes áreas, los cuales son alimentados mediante baterías que tienen un largo periodo de duración sin necesidad de usar cables de grandes distancias (Campos, 2020).

La cadena de frío en la industria alimenticia constituye un proceso fundamental para asegurar que los alimentos lleguen de forma segura al consumidor, cuidando el proceso, desde su origen hasta su consumo (Hanna Instruments, 2014).

Si la cadena de frío llegase a fallar, se tendrían grandes problemas, uno de las cuales es cuando descongelamos un alimento congelado (temperatura > -18 °C), aunque sea de manera parcial durante poco tiempo (unos minutos), la actividad microbiana se reanuda en

menor o mayor medida. Si volvemos a reducir la temperatura y congelar de nuevo, esa actividad se volverá a parar, pero tendremos ahora una población de microorganismos mayor que antes y el alimento habrá sufrido un cierto deterioro. Esta rotura de la cadena de frío tiene las siguientes consecuencias como son: riesgo de intoxicaciones, reducción del tiempo de conservación, pérdida de calidad por el apareamiento de bacterias, pérdida nutricional, malos olores (INTARCON, 2021).

Aunque los refrigeradores y frigoríficos comerciales están equipados con termómetros, muchos no tienen una manera de alertar a los usuarios si la temperatura se aleja de la zona segura o si se corta el suministro de corriente. Un sistema de monitoreo remoto puede ayudar a las empresas de la industria alimenticia a controlar con seguridad el estado de la temperatura.

Al ser una plataforma escalable pueden surgir muchos temas relacionados para proyectos futuros y de esta manera ampliar aún más la visión que se tiene con nuestro proyecto de investigación.

Alcance del Proyecto

Esta investigación busca la implementación de una WSN que tiene como objetivo la monitorización en tiempo real de la temperatura en frigoríficos, por tal motivo se emplearán tres nodos sensores, los cuales comprenden dos sensores de temperatura cada uno. Estos nodos sensores luego de un análisis se colocan en lugares apropiados para obtener las mediciones de las variables físicas.

El sensor de temperatura se encarga de sensar y obtener los datos de temperatura al interior de cada una de las etapas de la cadena de frío.

La red de Sigfox que se encuentra desplegada en Ecuador tiene una excelente área de cobertura en los sectores de Quito y Valle de los Chillos específicamente en "IASA", esta red pertenece a una LPWAN y se puede realizar despliegue de nodos sensores para la monitorización de la temperatura, las mediciones que son realizadas van a ser transmitidas

mediante el módulo de desarrollo (Xkit de Thinxtra para SigFox) hacia el Backend de la red Sigfox.

Toda la información y datos recolectados son almacenados en una base de datos de Azure, para que cualquier persona interesada pueda tener acceso. Posteriormente se realizan un análisis profundo de las mediciones obtenidas de la temperatura, donde el sensor de temperatura se encarga de verificar que el ambiente y la temperatura en los frigoríficos es la adecuada. Para la evaluación del desempeño de la red de sensores se analizan los datos proporcionados por la red de Sigfox los cuales son RSSI y LQI. Para la visualización de los datos obtenidos se la realizan a través de una página web y aplicación móvil en las cuales se muestra la temperatura y humedad en las tres etapas de la cadena de frío.

Objetivos

Objetivo General

Monitorizar la temperatura y controlar la cadena de frío mediante el uso de tecnología SigFox

Objetivos Específicos

- Diseñar la red de sensores que permita la monitorización de temperatura y control de la cadena de frío.
- Acoplar el sistema mediante el uso de la red SigFox en frigoríficos.
- Analizar el desempeño de la red de sensores mediante los datos obtenidos.
- Desarrollar una aplicación web y una aplicación Android para la visualización de los datos de temperatura.

Capítulo II

Marco conceptual

Cadena de Frío

La cadena de frío hace referencia a una gestión de la temperatura de los productos perecederos para mantener la calidad y la seguridad desde el punto de origen hasta el cliente o consumidor final, que pasa por la etapa de la cadena de distribución (Global Cold Chain Alliance, 2020).

La cadena de frío es de suma importancia porque garantiza que los productos perecederos conserven una gran calidad y sean seguros al momento de consumirlos. Al no mantener los productos a las temperaturas adecuadas ocasiona una degradación en la textura, decoloración, crecimiento microbiano, etc (Global Cold Chain Alliance, 2020).

Etapas de la Cadena de Frío

Según la empresa Colombiana Hanna Instruments (2014) plantea que en la cadena de frío intervienen tres etapas fundamentales, las cuales son:

- Almacenamiento en cámaras o almacenes frigoríficos en los centros de producción.
- Transporte de productos en vehículos adaptados con registro de temperatura.
- Plataforma de distribución y centros de venta (Hanna Instruments, 2014).

Figura 1

Etapas de la Cadena de Frío



Nota. Tomado de *Cadena de Frío*, de Baquero, Laura, 2020, GoConqr (<https://www.goconqr.com/mindmap/13408935/cadena-de-frio>).

Como se observa en la Figura 1 existen varias etapas en la cadena de frío, esto es fundamental para la conservación del producto, ya que si alguna de estas etapas llegase a fallar surgirán problemas que afectan a la empresa, transporte, consumidor y al producto en sí.

Elementos Fundamentales de la Cadena de Frío

Según el Programa Ampliado de Inmunizaciones (PAI) de la Organización Panamericana de la Salud indican que existen tres elementos fundamentales los cuales son:

Recursos Humanos

Son todas las personas que de forma directa o indirecta deben manipular, transportar, distribuir y vigilar los equipos frigoríficos donde se conservan los productos.

Recursos Materiales

Son todos los equipos frigoríficos necesarios en los diferentes procesos de almacenamiento, transporte y conservación.

Recursos Financieros

Son necesarios para asegurar la operatividad de los recursos humanos y recursos materiales (Organización Panamericana de Salud, 2016).

Equipos de la Cadena de Frío

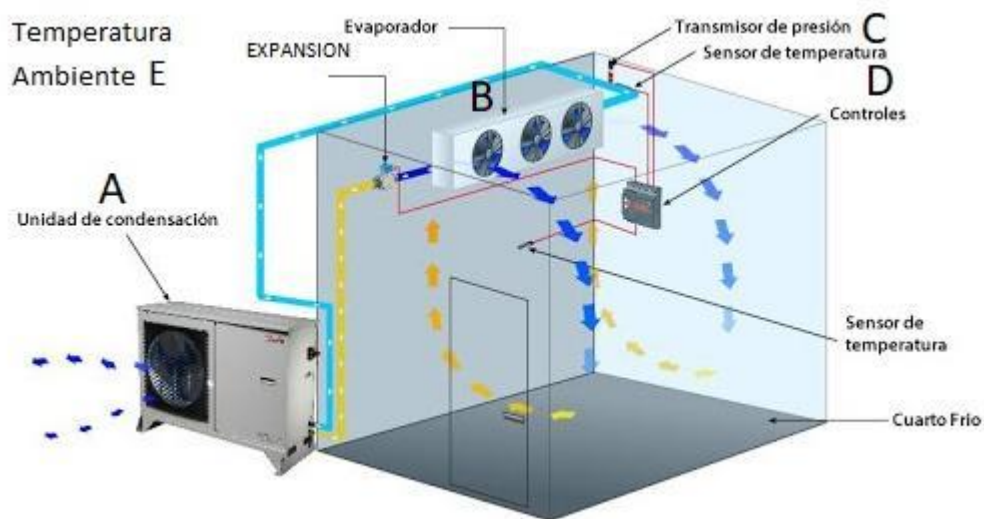
Existen diferentes equipos para la conservación de alimentos o productos médicos (vacunas), los cuales deben estar siempre monitorizados para evitar que sufran daño, por tal motivo a continuación se describen los diferentes equipos:

Cámaras frías o Cuarto Frío

Es un equipo de refrigeración que se utiliza para la conservación y almacenamiento de productos en grandes cantidades.

Figura 2

Cuarto frío



Nota. Estructura de un cuarto frío básico para conservación de productos. Tomado de *Cuarto Frío*, por CONFOREMPRESARIAL, 2020. (<https://www.confopresarial.com/simulador-de-cuarto-frio/>).

Existen dos tipos de cámaras según la temperatura a la que se conserva el producto, los cuales son:

Cámara Fría de Congelamiento: Equipo que permite mantener temperaturas de congelación entre -25°C y -15°C .

Cámara Fría de Refrigeración: Equipo que permite mantener temperaturas de conservación ente 2°C y 8°C.

Vehículo Frigorífico

Es un vehículo de transporte que cuenta con una unidad de refrigeración, a su vez permite que la temperatura del exterior de 30°C se reduzca en el interior de la zona de carga y mantenerla dentro de intervalos de 12°C y 0°C o entre 0°C y -20°C dependiendo del vehículo utilizado.

Figura 3

Vehículo Termo



Nota. Los vehículos termo son utilizados en la industria alimenticia y farmacéutica para conservar los alimentos y vacunas en estado óptimo. Tomado de “Vehículos Industriales” (p.4), F.López, 2019, CESVIMAP.

Refrigerador

Es un equipo que permite regular la temperatura mediante una sustancia refrigerante estable encargada de los intercambios de calor.

Figura 4

Refrigerador Industrial



Nota. Tomada de obtenida de *Refrigerador Industrial*, por GASTRO Corp., sf, (<http://gastro-corp.com/producto/refrigerador-industrial-gvr2ps-1400v/>).

Internet of Things (IOT)

El internet de las cosas (*Internet of Things, IoT*) es una red de objetos físicos conectados a Internet, los cuales logran una interacción mediante sistemas embebidos, redes de comunicaciones y aplicaciones en la nube. Permite la comunicación entre los objetos, acceder a información que se encuentre en internet, capturar, almacenar y recuperar datos, interactuar con usuarios, sistemas y aplicaciones que generan un entorno más inteligente, autónomo y conectado (Quiñonez, 2019). Sin embargo, al existir diferentes definiciones, una de las más aceptadas por investigadores, profesores e innovadores es atribuido a Kevin Ashton quien en 1999 afirma que el Internet de las Cosas es, “*Una red abierta e integral de objetos inteligentes que tienen la capacidad de autoorganizarse, compartir información, datos y recursos, reaccionando y actuando ante situaciones y cambios en el entorno*” (Madakam, 2015).

En la actualidad el IoT es de uso cotidiano debido a su gran acogida a nivel mundial, esto se debe a que cualquier cosa que se desee medir o sensor se lo puede realizar; una de las principales ventajas del IoT es el uso de la nube ya que todos los datos recolectados son enviados ahí para poder analizarlos, estructurarlos y enviarlos a interfaces gráficas que son amigables y entendibles para los usuarios.

Características de IoT

Existen características fundamentales que identifican a IoT y la hacen una infraestructura global que proporciona servicios avanzados a usuarios (Yacchirema, 2019).

Objetos / Things. Los dispositivos que son denominados objetos o cosas son componentes de IoT. No solo las computadoras son principales elementos del IoT, sino que también los objetos que se usan en la vida diaria. Para que dichos objetos cotidianos sean pieza fundamental del IoT deben tener algunos atributos como: ser identificables, localizables, detectables, direccionales y/o controlables; adicionalmente deben tener capacidades de almacenamiento, detección, procesamiento para que lleguen a ser objetos inteligentes (*Smart Object -SO*), los cuales si cumplen con estos atributos y capacidades posteriormente se denominaran dispositivos IoT. Su principal función es realizar entornos inteligentes (*Smart Enviroments-SE*), los cuales al trabajar en conjunto y continuamente ayudan a mejorar la vida de los habitantes (Yacchirema, 2019).

De acuerdo con (International Telecommunication Union, 2012), los dispositivos IoT deben cumplir con requisitos mínimos que consisten en capacidades de comunicación, detección y /o accionamiento.

Conectividad. Una de las características más aceptadas es la existencia de una infraestructura de red o conectividad de red, que permita una integración perfecta, un esquema único y la habilitación de comunicación de dispositivos IoT. La infraestructura debe ser cualquier infraestructura de red que supere la idea de Intranet de dispositivos separados. En el

Internet de las Cosas (*IoT*) han ido incrementando de forma exponencial diversas opciones de conectividad y desafíos, lo que en el futuro se necesitará de nuevas soluciones para que exista la conectividad en dispositivos IoT emergentes (Yacchirema, 2019).

Datos. Los datos que se obtienen de cada uno de los dispositivos interconectados entre ellos generan un gran valor en IoT. El primer paso para generar inteligencia son los datos que deben ser analizados y vincularlos con otros tipos de datos para generar una significancia que de valor.

Autonomía. Es una característica principal en los dispositivos IoT. Esta característica es fundamental debido a que los dispositivos IoT deben tener la capacidad de realizar sus actividades, acciones y/o tareas sin la intervención humana o la ayuda de otros dispositivos.

Servicios. Los servicios ya sean simples o complejos deben estar disponibles para tener interacción con dispositivos IoT, consultar su estado y cualquier información asociada a ellos, sin olvidar la protección de privacidad entre los dispositivos IoT y sus correspondientes objetos virtuales (International Telecommunication Union, 2012).

Heterogeneidad. La heterogeneidad de los dispositivos IoT expone problemas de interoperabilidad para el desarrollo y adopción de esta nueva tecnología. IoT requerirá avances en varios campos y esto se basa en la interoperabilidad de los dispositivos. Por tal razón se requerirá de soluciones adecuadas que permitan obtener una perfecta integración de los dispositivos IoT mediante la coexistencia de los protocolos de comunicación, tecnologías subyacentes y acceso a los recursos que presentan dentro de la interconexión (Yacchirema, 2019).

Arquitecturas Referenciales en IoT

Existen varios desafíos que obstaculizan la idea conceptual de IoT y el despliegue en el mundo real, esto se debe a la gran cantidad de dispositivos y entornos necesarios para que funcionen. Para que se llegue a realizar una implementación exitosa se debe tener una arquitectura de referencia como punto de partida (Wu et al., 2010). Dado que IoT es un mundo

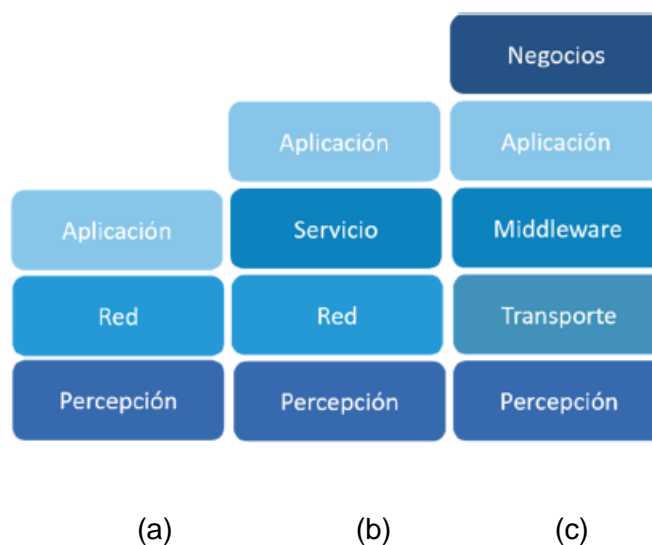
inmenso, se debe considerar los dispositivos IoT y en que escenarios van a ser utilizados porque si se pretende utilizar en proyectos complejos, se debe tener la posibilidad de contar con una arquitectura modular y escalable que permitan la incorporación de varias funcionalidades y hacer frente a un complejo escenario que presente IoT.

Actualmente han surgido diferentes tipos de arquitecturas de multicapas como se observa en Figura 5., las cuales son:

- De tres capas Figura 5. (a) que es la más aceptada e incluye la capa de percepción, red y aplicación (Wu et al., 2010).
- De cuatro capas Figura 5. (b) es orientada a servicios.
- De cinco capas Figura 5. (c) basada en Middleware.

Figura 5

Arquitectura en capas de IoT



Nota. Adaptado de *Arquitectura de Interoperabilidad de Dispositivos Físicos Para El Internet de las Cosas (IOT)*, por Yacchirema D, 2019.

Arquitectura de Tres Capas. A continuación, se describe la función de cada capa de la arquitectura de tres capas:

- **Capa de Percepción:** Esta capa representa los dispositivos físicos de IoT que son sensores y actuadores. La principal función de esta capa es la identificación de dispositivos, recopilación de datos a través de los sensores y la transformación de los datos en señales digitales.
- **Capa de Red:** Esta capa permite la conexión a otros dispositivos físicos, red y servidores. Además, ayuda a la transmisión y procesamiento de los datos recopilados por los sensores.
- **Capa de Aplicación:** Esta capa es usada para las aplicaciones y servicios del usuario, las cuales hacen uso efectivo de la información procesada proveniente de los sensores. Además, permite la compartición de datos con distintas aplicaciones, sistemas y plataformas.

Arquitectura de Cuatro Capas. Esta arquitectura se basa en la anterior, pero se adhiere una capa más la cual es de servicio.

A continuación, se describe la función principal de la capa de servicio.

- **Capa de Servicio:** La capa de servicio es también denominada capa middleware que cumple la función de almacenar los datos que provienen de la capa de transporte, obtención de información valiosa del procesamiento y análisis de estos datos que permiten toma de decisiones automáticas basadas en los resultados generados.

Arquitectura de Cinco Capas. Esta arquitectura de cinco capas incluye una capa adicional a la arquitectura de cuatro capas, la cual es la capa de negocios.

Capa de Negocios: la función principal de esta capa es administrar todo el sistema IoT, apoya al proceso de toma de decisiones incluidas aplicaciones y la privacidad.

Requerimientos para IoT

Para la implementación exitosa del IoT se tienen requisitos previos los cuales son:

- Demanda dinámica de recursos.

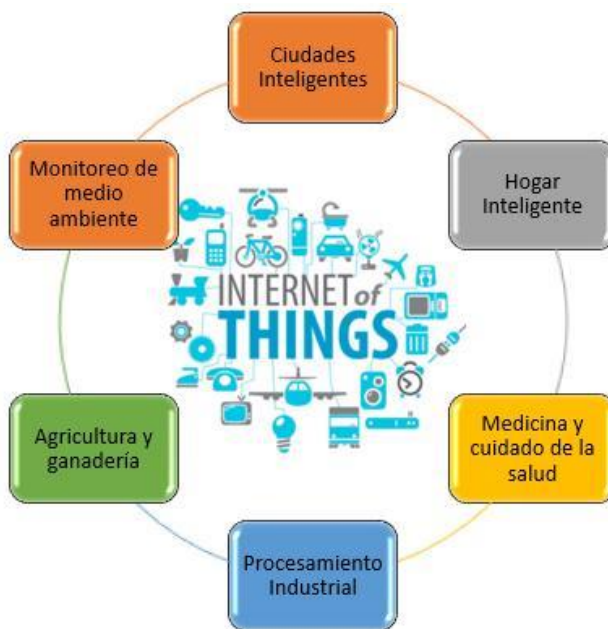
- Necesidades en tiempo real.
- Crecimiento exponencial de la demanda.
- Disponibilidad de aplicaciones.
- Protección de datos y privacidad del usuario.
- Consumo eficiente de energía de las aplicaciones.
- Ejecución de las aplicaciones cerca de los usuarios finales.
- Acceso a un sistema de nube abierto e interoperable.

Aplicaciones de IoT

IoT tiene un gran impacto de manera social, medioambiental y económico hacia su adaptación. La movilidad, las redes inteligentes, los hogares/edificios inteligentes, la seguridad pública y la vigilancia del medio ambiente, la medicina y la sanidad, el procesamiento industrial, la agricultura y Ganadería son algunos de los conceptos basados en el IoT. El uso de estas aplicaciones y beneficios vívidos tienen un papel importante y ahora hay una enorme dependencia de su existencia. Durante los últimos años, su existencia y usabilidad han alcanzado una escala visionaria y se han convertido en algo primordial para el ser humano y sector industrial. Puede que no sea incorrecto afirmar que el futuro de Internet se basa puramente en el concepto y la visión de la IO, que nos impulsa nos impulsa hacia el futuro en la práctica. En la Figura 6, se observa algunas de las aplicaciones más importantes de IoT (Khanna & Kaur, 2020).

Figura 6

Aplicaciones IoT



Nota. El diagrama cíclico representa las principales aplicaciones que tiene el Internet of Thing (IoT).

- **Ciudades Inteligentes:** Las ciudades han tenido un avance tecnológico significativo mediante el uso de la tecnología IoT, gracias a las nuevas redes que han surgido como Sigfox, LoRaWAN, NB-IoT han permitido a las ciudades evolucionar en el ámbito tecnológico con sensado y monitorización en distintas áreas como por ejemplo: monitorización de la calidad de aire hasta las bocas de incendio conectadas, contenedores de basura, medidores de agua y luz inteligentes, dichas actividades reducen costos y ayuda al municipio a ser más eficiente y rentable (Sigfox, 2022a).
- **Agricultura:** Anteriormente se realizaban comprobaciones manualmente de temperatura, humedad, clima, entre otros, sin embargo, con IoT surgieron soluciones de monitorización de condiciones meteorológicas que envían los

datos a una base de datos que posteriormente muestra en una interfaz, permitiendo tomar decisiones precisas sobre el campo y cultivo. El acceso para obtener la información necesaria se la realiza de forma remota y en tiempo real sobre los cambios de temperatura, condiciones de viento, presión atmosférica ya que son estos los factores que afectan al cultivo o campo (Sigfox, 2022b).

- **Medicina y cuidado de la salud:** A menudo se denomina Internet de las Cosas Médicas (IoMT, del inglés *Internet of Medical Things*) y es el modo de aplicación sistemática que conecta los servicios sanitarios con el sistema informático a través de diversas redes informáticas en línea. El avance de la IoT ha permitido sensor presión arterial, ritmo cardíaco, azúcar en la sangre, todos los datos e información recogida de estos sensores son enviados a programas o interfaces que permiten la visualización por parte de los médicos para una toma de decisión inmediata y acudir en caso de ser necesario (Khanna & Kaur, 2020).

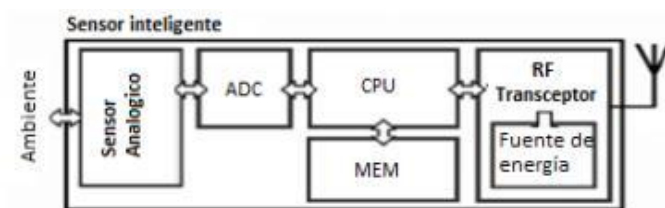
WSN (Wireless Sensor Network)

Las WSN están compuestas por pequeños sensores de bajo consumo de energía, pueden estar distribuidos en diferentes áreas con el fin de recolectar información del entorno, esta información es enviada por radiofrecuencia a otros nodos y posteriormente a un nodo central que permite el análisis y visualización de la información antes recopilada (Díaz I. , 2019).

La WSN está compuesta por MOTES, este término hace referencia al pequeño tamaño de sus componentes, los principales son: sensores, emisor, transmisor, RF y procesador como se muestra en la Figura 7.

Figura 7

Arquitectura del MOTE



Nota. La Figura representa los componentes de MOTE. Tomado de *Red de Sensores Intercomunicados Bidireccionalmente Usando Tecnología Sigfox*, por Díaz I, 2019.

Arquitectura de la WSN

La WSN está constituida por los siguientes elementos, las cuales se describen a continuación:

- **Sensores:** Su principal función es recolectar señales de variables físicas que se utilizarán, pueden ser de dos clases analógico o digital.
- **Microcontrolador:** Este elemento contiene el procesador, puertos y memoria que son la parte central de todo el sistema.
- **Transceptor de radio:** Este elemento permite la comunicación inalámbrica, puede contener protocolos como: SigFox, Zigbee, LoRa y GSM /GPRS.
- **Gateway:** Su principal función es la recepción de información enviada por los distintos nodos de la red y posteriormente transmitirla hacia un sistema computacional.
- **Estación Base:** Su principal función es recibir la información desde el Gateway y enviarla a un computador, almacenar en la nube o enviar a servidores externos para el análisis y visualización.

LPWAN (Low Power Wide Area Network)

LPWAN es una clase de estándares de comunicación inalámbrica de IoT y soluciones con características como bajas velocidades de transmisión de datos, grandes áreas de

cobertura y una larga duración de la batería (Raza et al., 2017). Las tecnologías LPWAN en los últimos años se han ido desplegando y creciendo exponencialmente lo cual han permitido integrar una diversa gama de aplicaciones IoT, especialmente en entornos restringidos. Los principales puntos clave de este tipo de tecnología son el costo de los dispositivos que pueden variar desde 3 a 7 dólares, el tamaño de sus paquetes puede oscilar de 10 a 1000 Bytes, una duración en la batería de hasta 10 años, lo que representa un gran ahorro de energía y costo, soporte a más de 100 mil dispositivos y una cobertura desde 2km hasta 1000km (Chaudhari et al., 2020).

Las redes LPWAN al estar desplegadas por casi todo el mundo abarcan varias aplicaciones las cuales presentan características como: cobertura, capacidad, costo, baja potencia y características mejoradas. En la Tabla 1., se presentan algunas aplicaciones específicas las cuales indican el nivel que se necesita para tomar decisiones acerca de arquitectura y diseño de la aplicación, las escalas relativas para aplicabilidad vienen dadas por: alto (A), medio (M) y bajo (B) (Chaudhari et al., 2020).

Tabla 1

Relevancia de las características para las aplicaciones.

Aplicaciones	Cobertura	Capacidad	Costo	Baja Potencia	Características Mejoradas
Ciudades Inteligentes	A	A	A	M	A
Entorno Inteligente	M	A	A	A	M
Smart Water	A	M	M	M	B
Redes inteligentes y energía	A	A	M	M	M
Seguridad y Emergencias	A	B	M	A	A
Automatización Industrial y Manufacturación Inteligente	B	A	A	B	B

Aplicaciones	Cobertura	Capacidad	Costo	Baja Potencia	Características Mejoradas
Automóviles y logística	A	A	M	B	A
Agricultura inteligente y ganadería	A	A	M	A	B
Hogares y construcciones inteligentes	A	M	B	B	B

Nota. La tabla muestra las escalas relativas para aplicabilidad de aplicaciones específicas en donde se las catalogan con A, alto; M, medio; B, bajo. Adaptado de “LPWAN Technologies: Emerging Application Characteristics, Requirements, and Design Considerations” (p.4), por B.Chaudhari, M. Zennaro & S.Borkar, 2020, 12(3).

Características LPWAN

Las principales características se muestran resumidas a continuación.

Figura 8

Características principales de aplicaciones LPWAN



Nota. En la figura se describen las principales características que presentan las aplicaciones LPWAN. Adaptado de “LPWAN Technologies: Emerging Application Characteristics, Requirements, and Design Considerations” (p.4), por Chaudhari et al., 2020, 12(3).

Tecnología SigFox

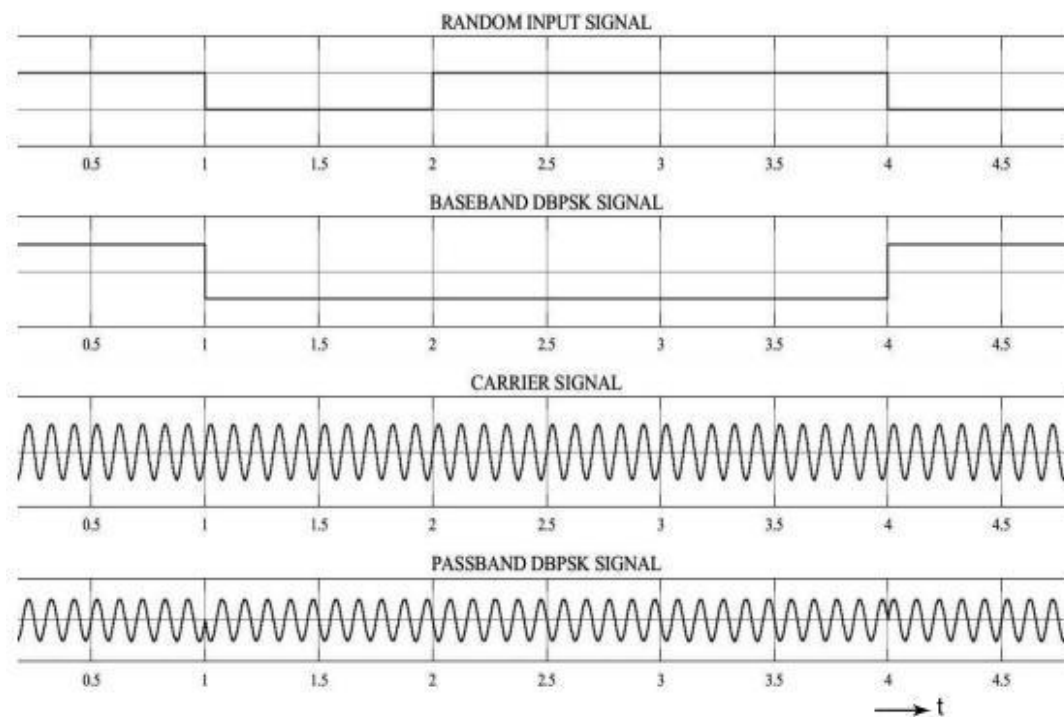
SigFox fue desarrollada en el año 2010 por la empresa del mismo nombre en la ciudad de Toulouse, Francia. La tecnología Sigfox es parte de la familia de tecnologías LPWAN, principalmente para el desarrollo de redes IoT; cuando se envía un volumen de datos puede variar desde pocos bytes hasta cientos de kilobytes, su rango de operación puede alcanzar decenas de kilómetros y el consumo de corriente es muy bajo que puede ir desde el orden de los mA o decenas de mA por transmisión (Lavric et al., 2019).

Modulación y Técnica de Acceso Múltiple

Sigfox usa DBPSK para uplink y GFSK para downlink. En la modulación DBPSK, la señal modulada cambia su desplazamiento de fase, cuando hay un bit "1" de datos, proporcionando así una alta eficiencia espectral, además, dado que el canal de comunicación es muy ruidoso, el desplazamiento de fase de la señal transmitida cambia a velocidad muy baja, como se observa en la Figura 9 (Hemjal, 2019).

Según Ribeiro et al., (2018), SigFox usa la modulación (D-BPSK, del inglés *Differential Binary Phase Shift Keying*) por tres principales razones:

- Fácil despliegue
- Baja tasa de bits permite usar componentes de bajo costo.
- El receptor de la estación base tiene una gran sensibilidad, lo que permite demodular señales incluso con baja relación señal a ruido (SNR)

Figura 9*Modulación DBPSK*

Nota. En la figura se observa el proceso de la modulación DBPSK en función del tiempo.

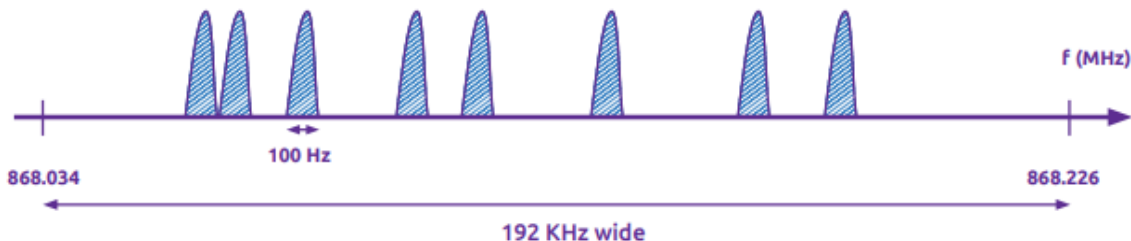
Adaptado de *Sigfox Based Internet of Things: Technology, measurements and development*, por A.Hemjal, 2019.

Ultra Narrow Band (UNB)

Sigfox utiliza 192kHz de ancho de banda que se encuentra disponible para el intercambio de mensajes por aire. Al usar banda ultra estrecha (UNB, del inglés *Ultra Narrow Band*) permite tener un ancho de canal de 100Hz, con un nivel bajo de ruido y baja potencia (SigFox, 2017).

Figura 10

Tecnología SigFox basada en UNB



Nota. La figura muestra el uso de UNB con 192kHz de banda pública, ancho de canal de 100Hz entre las frecuencias de 868.034 MHz-868.226MHz. Tomado de *Sigfox Technical Overview*, por Sigfox, 2017, (<https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>).

En la Figura 10, se observa las especificaciones de bandas de frecuencia que usa SigFox, las cuales depende de la ubicación, como se describe a continuación:

- **Europa:** La banda que se usa está entre 868 y 868.2MHz
- **El resto del mundo:** La banda que se usa está entre 902 y 928MHz dependiendo de las regulaciones de cada país.

Mecanismo de Comunicación

La tecnología de comunicación de SigFox ha sido creada para conectar grandes extensiones de tierra, en el orden de decenas de kilómetros en el campo y varios kilómetros en la zona urbana (Mekki et al, 2019). La velocidad de transferencia de datos es baja, la cual, soporta 4, 8 o 12 Bytes, llegando a soportar de 100bps a 600bps dependiendo de la zona (Vejlgaard et al., 2017).

La tecnología SigFox actualmente posee una comunicación bi direccional en cada nodo de comunicación. Cada nodo puede enviar (UPLINK) 140 mensajes por día con una carga máxima de 12 bytes la cual es limitada por políticas de la red y puede recibir desde una

aplicación por Gateway 4 mensajes por día con una carga máxima de 8 bytes (Lavric et al, 2019).

Un dispositivo final de Sigfox solo puede transmitir 36 segundos por hora, un aproximado de 6 segundos como tiempo en el aire por transmisión, es decir, que solo se realiza 6 mensajes por hora teniendo la carga máxima de 12 bytes con 2.08s por paquete. Esta ventana de tiempo se activa 20 segundos después de que el nodo envió el mensaje (uplink). La ventana de recepción posee un intervalo que oscila entre 201.1 y 44.5s, en el cual, el nodo procede a esperar el mensaje (downlink) de la estación base.

Protocolo RFTDMA

El estándar RFTDMA (del inglés *Random Frequency and Time Division Multiple Access*), el cual, se basa en el protocolo Aloha sin la detección preliminar de ocupación del canal, es decir, los nodos acceden al medio inalámbrico de forma aleatoria tanto al dominio del tiempo como el de la frecuencia y sin ningún método de contención (Ribeiro et al., 2018).

Según Ribeiro et al., (2018) un punto muy importante para el uso de RFTDMA es la gran resistencia frente al ruido y a las interferencias, esto se debe a que ofrece:

- Diversidad de frecuencias al repetir la transmisión del uplink en tres diferentes frecuencias aleatorias.
- Diversidad de tiempo al repetir cada mensaje de uplink de diferentes frecuencias en distintos momentos.
- Diversidad espacial cuando los tres mensajes de uplink pueden ser recibidos por más de una estación base.

Tabla 2

Especificaciones Técnicas de la red SigFox

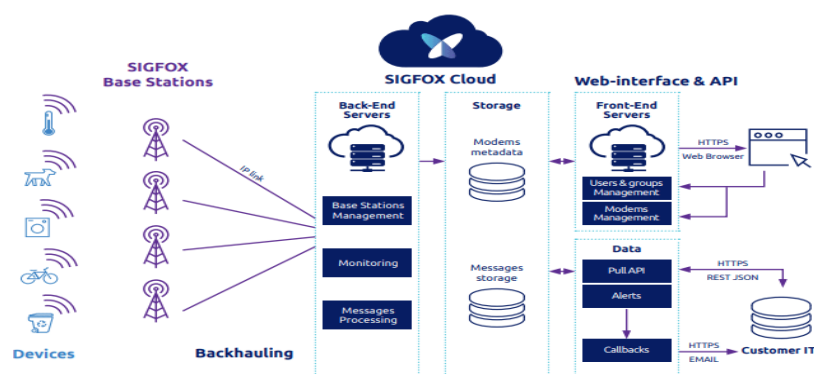
Bandas de Frecuencia (MHz)	Europa: 868 Otros: 902-928	Potencia de Transmisión	Europa: 14dBm USA : 25 dBm
Ancho de Banda	192KHz	Tasa de Datos	100bps or 600bps
Modulación	Uplink: DBPSK Downlink: GFSK	Carga máxima	Uplink: 12 bytes Downlink: 8 bytes
Consumo de energía	Activo: 10-50mA	Número de mensajes	Por hora: 6 Por día: 140
Seguridad	AES	Roaming requerido	No

Nota. En la tabla se presenta un resumen de las principales características de la red SigFox. Adaptado de *Sigfox Based Internet of Things: Technology, Measurements and Development*, por A.Hemjal, 2019.

Arquitectura de la Red Sigfox

La red SigFox posee una arquitectura tipo estrella y está conformada por: dispositivos, estaciones base, SigFox Cloud y aplicaciones para usuarios, como se observa en la Figura 11.

Figura 11

Arquitectura de la red SigFox

Nota. En la figura se presentan los principales componentes que pertenecen a la arquitectura de la red Sigfox. Adaptado de *Sigfox Technical Overview*, por Sigfox, 2017, (<https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>).

SigFox (2017), describe las funciones de los principales componentes de la arquitectura manejada por esta red LPWAN:

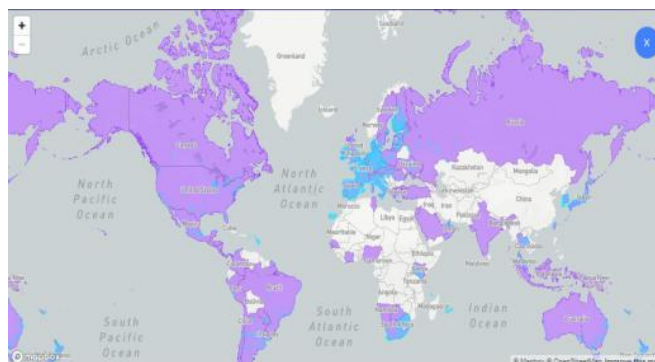
- Dispositivos: Pueden ser sensores o actuadores que envían datos a las estaciones base.
- Estaciones Base: Están conectadas a través de internet permitiendo establecer comunicación con el servidor o backend de SigFox, recibiendo los datos o mensajes de los dispositivos. Su principal función es la modulación y demodulación de los mensajes antes de poder transmitirlos al backend.
- SigFox Cloud: Es la parte central de toda la red SigFox ya que contiene el Backend y el almacenamiento temporal de toda la información que llega de los dispositivos y estaciones base; el backend envía mensajes mediante Callbacks hacia el almacenamiento, que puede ser base de datos, la cual, permitirá la visualización en aplicaciones móviles o web.
- Aplicaciones de Usuario: Son aplicaciones que permiten la visualización y una amigable interacción entre los datos obtenidos en los dispositivos y los usuarios finales para poder tomar decisiones importantes o análisis con dichos datos (p.13).

Cobertura de la red SigFox

Al ser una de las principales redes de IoT desplegadas a nivel mundial, varios países han decidido instalar estaciones base que permita el funcionamiento de esta red.

Figura 12

Cobertura a nivel mundial de la red Sigfox

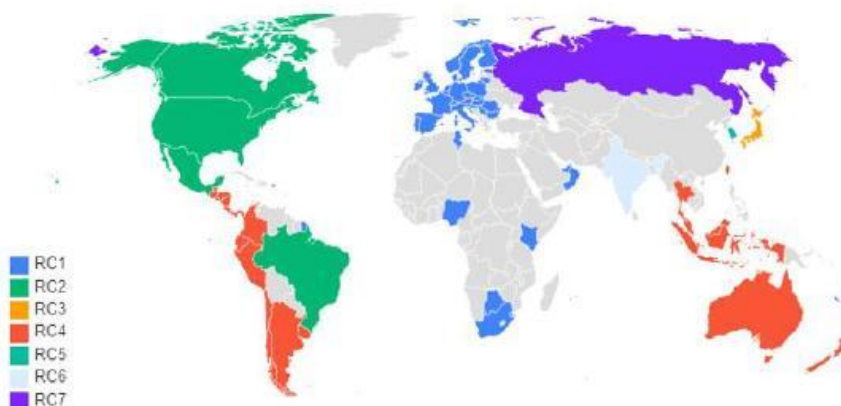


Nota. La Figura muestra en color celeste los principales países que han desplegado esta red en su territorio, y el color morado significa que no se tiene cobertura en esa zona. Adaptado de *Sigfox Technical Overview*, por Sigfox, 2017, (<https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>).

En la Figura 13. Se detalla por colores las regiones donde se ha desplegado la red de SigFox y los rangos de frecuencia para su funcionamiento.

Figura 13

Zonas de despliegue de la red SigFox



Nota. La versión actualizada de SigFox presenta a nuevas zonas que han desplegado su red, las cuales son: Rusia, Alaska y dos países de África. Adaptado de *Regions*, por Sigfox Support, 2022, (<https://support.sigfox.com/docs/radio-configuration>).

Según SigFox Support (2022) existen 3 zonas en las que se divide el mundo y 7 regiones en las que funciona la red de SigFox, por tal motivo, en la Tabla 3 se describen los rangos de frecuencia que utiliza cada zona.

Tabla 3

Rango de frecuencias para cada Zona de la red SigFox

	Zona 1	Zona 2	Zona 3
	EMEA1	AMERICAS/ APAC 1	APAC 2 (Japón, Corea del Sur)
Rango de frecuencias (MHz)	862-876		902-928
Regiones	RC1, RC6, RC7	RC2, RC4	RC3, RC5

Nota. La Tabla muestra los diferentes rangos de frecuencia de la red Sigfox que son usados en las diferentes zonas a nivel mundial. Adaptado de *Regions*, por Sigfox Support, 2022, (<https://support.sigfox.com/docs/radio-configuration>).

Cada región posee varios países que la conforman, a continuación se describen cuales son:

- RC1: Países de Europa, Oman, Irán, Sudáfrica, Tunisia, etc
- RC2: Estados Unidos, México y Brasil
- RC3: Japón
- RC4: Latinoamérica (Ecuador, Colombia, Panamá, Honduras, Belice, Salvador, Perú, Chile, Argentina) y los países del continente Asiático de la costa del Pacífico.
- RC5: Corea del Sur
- RC6: India
- RC7: Parte de Alaska y Rusia.

Tecnología LoRa (*Long Range*)

La tecnología Lora fue desarrollada y patentada por la empresa Semtech en el año 2014, sus siglas provienen de su principal característica que es largo alcance (LoRa, *del inglés Long Range*). LoRa es una modulación inalámbrica o capa física utilizada para la creación de enlaces de comunicación de largo rango (Lora Alliance, 2015). Se basa en la técnica de espectro ensanchado (CSS, *del inglés -Chirp Spread Spectrum*) teniendo como modulación el desplazamiento de frecuencia (FSK, *del inglés Frequency Shift Keying*) (M L & M, 2020).

Características de LoRa

De acuerdo con Chiriboga (2020) y Lora Alliance (2015) las principales características que presenta esta tecnología son:

- Transmisión de datos de larga distancia.
- Solo un Gateway o estación base puede cubrir ciudades enteras o cientos de kilómetros cuadrados.
- Bajo consumo de potencia (energía).
- Bajo costo para despliegue de su red.
- Gran seguridad para transmisión de datos.

Rangos de Frecuencia de LoRa

La tecnología opera en las bandas de frecuencias 433 para Asia, 868 para Europa o 915 MHz para America (Lora Alliance, 2015).

Tabla 4

Especificaciones técnicas de LoRa

	Europa	América del Norte
Bandas de frecuencia	867-869 MHz	902-928MHz
Canales	10	64+8+8

Ancho de banda de Canal Ascendente	125 - 250kHz	125 - 500kHz
Ancho de banda de canal descendente	125kHz	500kHz
Velocidad de datos	250 bps - 50 kbps	980 bps - 21.9kbps

Nota. La table presentar las principales especificaciones de funcionamiento de la red LoRa en Europa y América del Norte. Adaptado de *Desarrollar con LoRa para aplicaciones IoT de baja tasa y largo alcance*, por Pickering P, 2017, Digi-Key:

[https://www.digikey.com/es/articles/develop-lora-for-low-rate-long-range-iot-applications#:~:text=LoRa%20permite%20seis%20factores%20de,250%20kHz%2C%20500%20kHz\).](https://www.digikey.com/es/articles/develop-lora-for-low-rate-long-range-iot-applications#:~:text=LoRa%20permite%20seis%20factores%20de,250%20kHz%2C%20500%20kHz).)

0kHz).

LoRa WAN

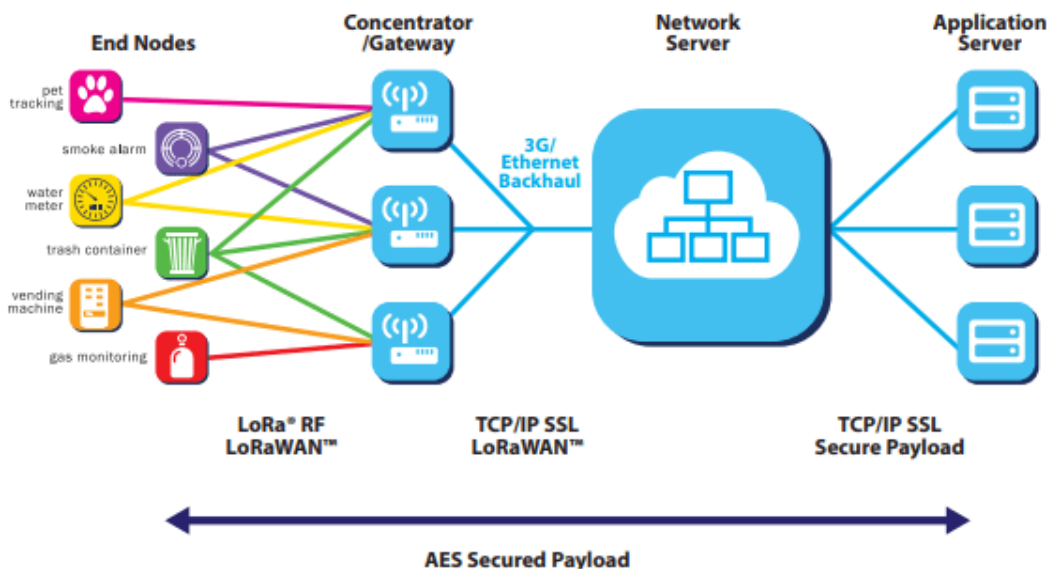
LoRaWAN es un protocolo de red enfocado al control de acceso al medio (MAC, *del inglés Media Access Control*); el protocolo y su arquitectura fueron creados por Lora Alliance, por tal motivo, tienen una gran influencia en la vida útil de la batería de un nodo, la capacidad de la red, calidad de servicio (QoS, *del inglés Quality of Service*), seguridad y varias aplicaciones (Lora Alliance, 2015).

Arquitectura de LoRaWAN

La arquitectura está basada en una configuración tipo estrella y presenta varias etapas como se muestra en la Figura 14.

Figura 14

Arquitectura LoRaWAN



Nota. La figura presenta la arquitectura que maneja LoRaWAN. Tomado de *A technical overview of LoRa and LoRaWAN*, por Lora Alliance, 2015, (<https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf>).

Las etapas que constituyen la arquitectura LoRaWAN son Nodos finales, Concentrador – Gateway, Servidor de red y servidor de aplicaciones (Pickering, 2017).

- Nodos Finales: Se ubican varios sensores los cuales recopilan su información y transmiten estableciendo comunicación con el servidor mediante el Gateway.
- Gateway: Se asemeja a un bridge transparente, ya que, retransmite los datos de forma bidireccional entre servidores y nodos finales.
- Servidor de red: Posee toda la inteligencia. Conecta varios gateways a través de TCP/IP, toma la decisión de que Gateway debe responder a un mensaje del nodo final.
- Servidor de aplicaciones: Recolecta y analiza los datos de varios nodos finales y escoge las acciones para el nodo final.

Clases de Dispositivos LoRaWAN

Los dispositivos finales se usan para varias aplicaciones y poseen diferentes requisitos (Lora Alliance, 2015). Los nodos finales en la red LoRa se dividen en tres clases básicas, las cuales se basan en el tiempo de vida de su batería y la latencia de comunicación de downlink (Devalal & Karthikeyan, 2018).

Las tres clases de dispositivos finales son:

- **Dispositivos Finales Bidireccionales (Clase A):** Estos dispositivos finales son los que menos energía consumen. El método de comunicación es de tipo Aloha (Devalal & Karthikeyan, 2018). Estos dispositivos finales poseen una ranura (slot) de transmisión y dos ranuras (slots) de recepción (Lora Alliance, 2015). Los datos pueden ser recibidos en cualquiera de las dos ranuras (slots) de recepción y no puede recibir otro mensaje de downlink hasta que se reciba el mensaje de cualquiera de las dos ranuras de recepción del downlink anterior o que las ranuras de recepción expiren (Devalal & Karthikeyan, 2018).
- **Dispositivos Finales Bidireccionales con ranuras de recepción programadas (Clase B):** En estos dispositivos finales se añaden a la Clase A ranuras de recepción programadas, por tal motivo, hay más ranuras de recepción que los Clase A, los cuales se abren en tiempos programados (Devalal & Karthikeyan, 2018). Los dispositivos finales Clase B permiten la interacción de uplink y downlink al mismo tiempo y su sincronización con el servidor a través de mensajes broadcast que se los denominan beacon (Balseca, 2021).
- **Dispositivos Finales Bidireccionales con ranuras de recepción máxima (Clase C):** Los dispositivos finales tienen continuamente abiertas las ranuras de recepción, solo generando su cierre cuando están transmitiendo un mensaje, esto involucra un mayor consumo de energía en comparación con los dispositivos finales anteriores (Lora Alliance, 2015).

Seguridad de LoRaWAN

LoRaWAN utiliza dos capas de seguridad, una para la red y la otra para la capa de aplicación (Lora Alliance, 2015).

- Seguridad de red: Garantiza la autenticidad del nodo en la red.
- Seguridad en la capa de aplicación: Garantiza que el operador de la red no tenga acceso a los datos de la aplicación de usuarios finales.

La cifrado AES es usado con el intercambio de claves mediante el uso de un identificador IEEE EUI64 (Lora Alliance, 2015).

Cobertura de la red LoRaWAN

La red de LoRaWAN en los últimos años ha desplegado su cobertura a más de 100 países y también con más de 166 operadores de red a nivel mundial.

Los principales países que han desplegado esta red son:

- América del Norte: Estados Unidos, Canadá, Alaska.
- América Latina: México, Panamá, Colombia, Ecuador, Venezuela, Perú, Chile, Argentina, Bolivia, Paraguay, Uruguay, Brasil.
- Europa: España, Portugal, Francia, Alemania, Países Bajos, Italia, entre otros.
- África: Egipto, Nigeria, Camerún, África Oriental Británica, entre otros.
- Asia: Rusia, China, India, Mongolia, Corea del Sur, entre otros
- Oceanía: Australia

Figura 15

Mapa de cobertura de la red LoRAWAN



Nota. La Figura muestra el mapa de los países en el cual LoRaWAN ha sido desplegada, generando una cobertura extensa a nivel mundial. Tomado de *A technical overview of LoRa and LoRaWAN*, por Lora Alliance, 2015, (<https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf>).

NB-IoT

De acuerdo con el Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3GPP, *del inglés Third-Generation Partnership Project*), introdujo al estándar IoT de banda estrecha (NB-IoT, *del inglés Narrowband Internet of Things*) como tecnología de comunicación, por tal motivo, NB-IoT se categoriza como una de las tecnologías celulares de baja potencia (LPWAN) basada en LTE (*del inglés Long Term Evolution*) con un alcance de cobertura largo y bajo costo de implementación (Burton et al., 2019).

Características

De acuerdo con Feltrin et al. (2019) las principales características de NB-IoT son las siguientes:

- Utilización de dispositivos de baja complejidad para el uso de aplicaciones IoT.
- Mejora en la cobertura interior de 20 dB en comparación de GPRS.
- Soporte de velocidad de datos de al menos 160 bps en la capa de aplicación.
- Soporte de un número masivo de dispositivos de bajo rendimiento, al menos 52547 dispositivos dentro de un mismo sector de cobertura.
- Mejora en la eficiencia de energía.
- Duración de la batería de hasta 10 años con una capacidad de 5Wh (P.78)

Cobertura

NB-IoT tiene como objetivo mejorar la cobertura de 20 dB con relación a GSM/GPRS, esto se consigue en base al uso de las señales de banda estrecha (*Narrowband*) y la diversidad de tiempo (Feltrin et al., 2019).

La señal de banda estrecha permite al receptor filtrar más ruido, lo que mejora la relación señal interferencia más ruido (SINR, del inglés *Signal-to-Interference-plus-noise ratio*). El espaciado estándar de las subportadoras se estableció de 15 kHz, pero solo para Uplink, sin embargo, si se necesita mayor robustez se puede reducir a 3.75 kHz (Feltrin et al., 2019).

NB-IoT posee tres clases de configuración de su cobertura, las cuales son: Normal, robusta y extremas. Cada clase se diferencia mediante la intensidad de la señal, estas tres clases de cobertura se basan con respecto a GSM/GPRS y poseen 0 dB, 10dB, 20dB para normal, robusto y extremas respectivamente. Estos umbrales dependen del lugar en donde se desplegó la celda y de los entornos de propagación (exteriores, interiores, subsuelos, etc) y de la distribución espacial de los dispositivos (Feltrin et al., 2019).

La cobertura que presenta NB-IoT es similar a la red SigFox y LoRa, en la Figura 16, se puede observar los países que han desplegado la red NB-IoT y algunas operadoras que han permitido dicho despliegue.

En la Tabla 5, se enlistan los principales países con las operadoras que han desplegado esta red.

Tabla 5

Principales países que han desplegado NB-IoT

País	Operadora
Estados Unidos	T-Mobile
Brasil	Vivo
España	Telefónica - Vodafone
Francia	SFR
Rusia	Megafon
China	China Unicom – China Telecom – China Mobile
Australia	Telstra

Nota. En la tabla se observa los grandes países con sus respectivas operadoras que han desplegado la red NB-IoT. Adaptado de “Narrowband Internet of Things (NB-IoT):From Physical (PHY) and Media Access Control (MAC) Layers Perspectives” (p.15), por Mwakwata et al., 2019, *MDPI-Sensors*, 19(2613).

Figura 16

Representación geográfica de los países que han desplegado NB-LoT



Nota. EL color verde simboliza los países que han desplegado la red NB-LoT y las líneas rojas indican las operadoras que brindan su servicio. Adaptado de “Narrowband Internet of Things (NB-LoT): From Physical (PHY) and Media Access Control (MAC) Layers Perspectives” (p.20), por Mwakwata et al., 2019, *MDPI-Sensors*, 19(2613).

NB-LoT Red de Acceso por Radio

NB-LoT provee acceso a los servicios de la red con el uso de capa física optimizada para el bajo consumo de energía y bajo costo. El ancho de banda de la portadora es de 180 kHz, el máximo esquema de modulación es QPSK, la cual es soportada solo para FDD y operación half dúplex. El downlink de NB-LoT está basada en OFDMA y el esquema de

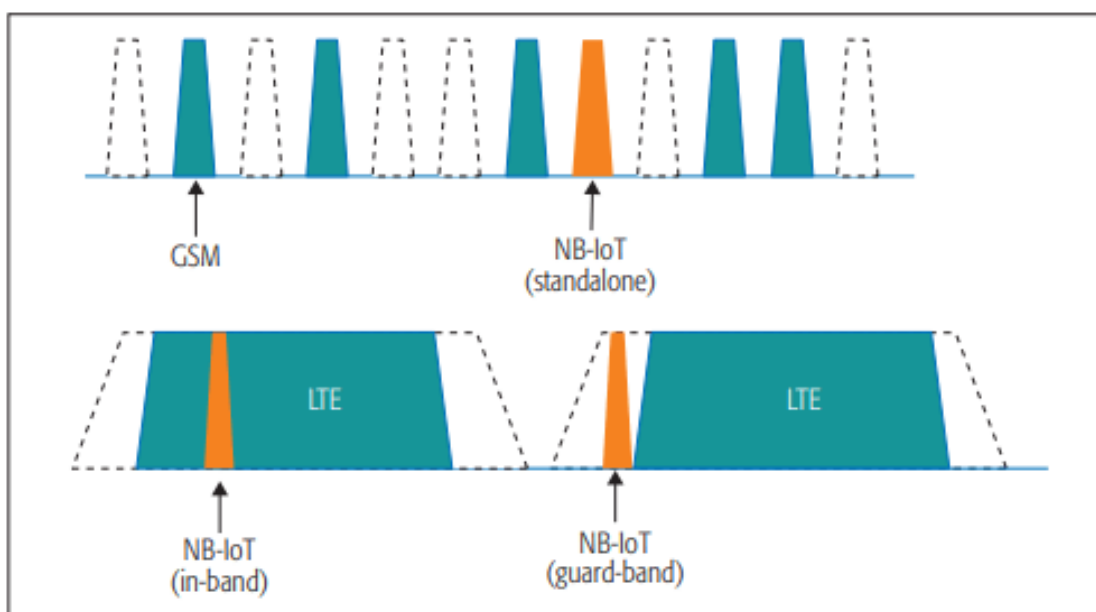
transmisión utiliza solo un bloque de recursos físicos (PRB, *del inglés Physical Resource Block*). El uplink está basado en una sola portadora FDMA y para su transmisión hay dos modos de operación posibles, transmisión de un tono y transmisión multitono. En el de un tono es permitido el espaciado de las subportadoras de 3.75kHz o 15kHz y en multitono solo se permite un espaciado de portadoras de 15kHz (Díaz & Merino, 2017).

Modos de Operación

NB-IoT puede ser desplegado en tres diferentes modos de operación como se muestra en la Figura 17.

Figura 17

Modos de operación NB-IoT



Nota. La Figura representa los tres modos de operación que presenta NB-IoT denominadas standalone, in band y guard band. Adaptado de “NB-IoT Technology Overview and Experience from Cloud-RAN Implementation.” (p.26), por Beyene et al., 2017, *IEEE Wireless Communications*, 24(3).

- **Operación Autónomo (Standalone):** En el funcionamiento autónomo, NB-IoT normalmente se despliega dentro de una o varias portadoras GSM existentes o

rearmadas. En este tipo de operación toda la potencia de transmisión disponible de la estación base puede ser usado para NB-IoT (Beyene et al., 2017).

- **Operación en Banda (*In Band*):** Un despliegue en banda adentro de una portadora normal de LTE, utiliza los mismos PRB que LTE. Existen varias restricciones en este modo de operación (por ejemplo, para el canal de control de downlink y las señales de referencia). La potencia de transmisión es compartida ente el funcionamiento LTE heredado y NB-IoT (Beyene et al., 2017).
- **Operación de banda de guarda (*Guard Band*):** Se utilizan los bloques de recursos no utilizados dentro de la banda de guarda de la portadora LTE y la celda NB-IoT. Comparten la máxima potencia de transmisión de la estación base (Beyene et al., 2017).

Arquitectura NB-IoT

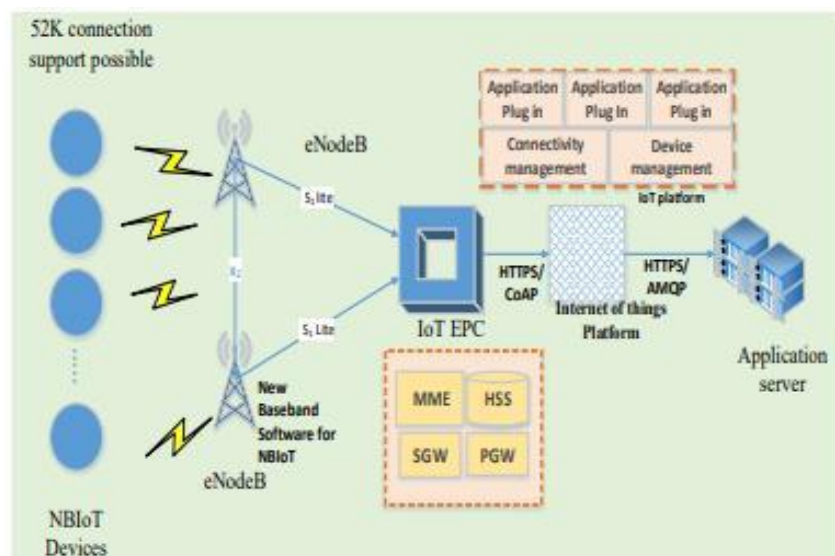
La arquitectura de la red NB-IoT ha realizado la simplificación del núcleo de paquetes evolucionado (EPC, *del inglés Evolved Packet Core*) para soportar transmisiones pequeñas de datos (Popli et al., 2018).

Los principales componentes de la red NB-IoT son:

- Dispositivos NB-IoT
- eNodeB
- IoT EPC
- Plataforma IoT
- Servidor de Aplicación (p.10)

Figura 18

Arquitectura NB-IoT



Nota. Representación general de la arquitectura de la red NB – IoT. Adaptado de “A Survey on Energy Efficient Narrowband Internet of things (NB-IoT): Architecture, Application and Challenges” (p.23), por Popli et al., 2018, *IEEE Access*, 1(1).

Como se observa en la Figura 18, se establece la arquitectura principal de la red NB-IoT y cuales son los componentes necesarios para el establecimiento de la comunicación entre los dispositivos NB-IoT y las aplicaciones del usuario final.

- **Dispositivos NB-IoT:** También son conocidos como el equipo de usuario, en esta etapa se encuentran los sensores o actuadores que recogen los datos de las variables físicas requeridas; esta etapa se conecta con eNodeB.
- **eNodeB:** Una vez conectado con los dispositivos NB-IoT, se encarga de transferir el estrato de no acceso (NAS, *del inglés Non Access Stratum*) a EPC usando s1- lite (una versión mejorada de S2-control Plane y soporte eficiente para el manejo de datos), NAS es un protocolo que permite transferir la señal no radioeléctrica entre el equipo de usuario y la gestión de movilidad.

- **IoT EPC:** Su principal función es recibir los datos enviados y buscar el estrato desde eNodeB y procesarlos para enviarlos hacia la plataforma IoT. Está compuesto de las entidades como Servidor GW, Red de datos GW, manejo de movilidad de la entidad plana y el servidor del suscriptor del hogar.
- **Plataforma IoT:** Cumple la función de recibir los datos desde EPC y los procesa para permitir que los datos en los servidores de aplicaciones sean compatibles.
- **Servidor de Aplicación:** En esta etapa los datos son procesados para que puedan ser interpretados por los usuarios finales en aplicaciones móviles o web.

Resumen de las tecnologías LPWAN

Dentro de estas tecnologías se encuentran SigFox, LoRa y NB-IoT, las cuales se resumen en la Tabla 6 con las características técnicas de cada uno.

Tabla 6

Resumen de las tecnologías LPWAN: SigFox, LoRaWAN y NB-IoT

	SigFox	LoraWAN	NB-IoT
Modulación	BPSK	CSS	QPSK
Frecuencia	Bandas no licenciadas ISM (868 MHz en Europa, 915 MHz en Norte América y 433 MHz en Asia)	Bandas no licenciadas ISM (868 MHz en Europa, 915 MHz en Norte América y 433 MHz en Asia)	Bandas de frecuencia licenciadas LTE
Ancho de Banda	100 Hz	250kHz y 125 kHz	200 kHz
Máxima velocidad de datos	100 bps	50 kbps	200kbps
Bidireccional	Limitada/ Half duplex	Sí /Half duplex	Sí / Half duplex
Máximo número de mensajes/día	140 Uplink, 4 Downlink	Ilimitado	Ilimitado

	SigFox	LoraWAN	NB-IoT
Rango de Cobertura	10 km (urbano), 40 km (rural)	5 km (urbano), 20 km (rural)	1 km (urbano), 10 km (rural)
Inmunidad a la interferencia	Muy alta	Muy alta	Baja
Autenticación y Encriptación	No soportada	Sí (AES 128b)	Sí (LTE encryption)
Velocidad de datos adaptativa	No	Sí	No
Conexión a estación base	Dispositivos finales no se unen a una sola estación base	Dispositivos finales no se unen a una sola estación base	Dispositivos finales no se unen a una sola estación base
Localización	Sí (RSSI)	Sí (TDOA)	No (bajo especificación)
Estandarización	Compañía de SigFox está colaborando con ETSI en la estandarización de la red basada en SigFox	LoRa-Alliance	3GPP

Nota. La Tabla presenta las principales características técnicas de cada una de las tecnologías LPWAN para realizar la diferenciación. Adaptado de “A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment.” (p.1-7), por Mekki et al., 2019, *ICT Express*, 5.

Cloud Computing (Computo en la Nube)

El computo en la nube (CN, *del inglés Cloud Computing*) es un modelo que permite el acceso bajo demanda y configuración mediante la red a un grupo de recursos compartidos como redes, servidores, almacenamiento, aplicaciones y servicios, que son asignados mediante un proveedor (NIST, 2011).

Según el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST, *del inglés National Institute of Standards and Technology*) el cloud computing está compuesto por cinco características esenciales, tres de modelos de servicio y cuatro modelos de despliegue, los cuales, son descritos a continuación:

Características Esenciales

1. **Autoservicio bajo demanda:** El usuario puede usar las capacidades informáticas o de cómputo de forma automática, como el tiempo de servidor y el almacenamiento en red sin interacción humana o del proveedor de servicios (NIST, 2011).
2. **Amplio acceso a la red:** Las capacidades o recursos están localizados en la red y se accede a ellas a través de mecanismos estándar que son usados por gran variedad de dispositivos de los usuarios como ejemplo: celulares, tabletas, ordenadores y estaciones de trabajo (NIST, 2011).
3. **Uso compartido de recursos:** Los recursos de cómputo del proveedor de servicios son compartidos por múltiples usuarios, a los cuales, se les asigna de forma dinámica de acuerdo con sus necesidades. Los usuarios desconocen la ubicación y el destino de los recursos a los que acceden (NIST, 2011).
4. **Elasticidad rápida:** Las capacidades o recursos pueden asignarse o liberarse de forma rápida, en algunos casos automáticamente. Para el usuario los recursos suelen parecer de forma ilimitada y siempre disponibles (NIST, 2011).
5. **Servicio Medido:** Los sistemas en la nube controlan y optimizan automáticamente el uso de los recursos. El proveedor de servicios realiza la medición del servicio entregado a cada usuario, por lo tanto, ya sea el usuario o proveedor tienen acceso al consumo real de los recursos (NIST, 2011).

Modelos de Servicio

1. **Software como un Servicio (SaaS):** La capacidad que se ofrece al usuario es la de utilizar las aplicaciones del proveedor que se encuentran en una infraestructura de la nube. El usuario puede acceder a las aplicaciones mediante navegador web, correo electrónico o una interfaz de programa. El usuario no tiene permitido controlar ni gestionar la infraestructura de la nube, incluyendo los servidores, sistemas operativos, almacenamiento.
2. **Plataforma como un Servicio (PaaS):** El proveedor de servicio permite al usuario el despliegue de aplicaciones propias en la infraestructura de la nube, el cual, provee las plataformas y herramientas de programación. El usuario puede controlar la aplicación, pero no toda la infraestructura de la nube.
3. **Infraestructura como un Servicio (IaaS):** El proveedor de servicio provee al usuario la capacidad de suministrar procesamiento, almacenamiento, redes y varios recursos fundamentales que el usuario puede desplegar y ejecutar software arbitrario, que puede ser sistemas operativos y aplicaciones. El usuario no puede controlar ni manipular la infraestructura subyacente de la nube.

Modelos de Despliegue

1. **Nube Privada:** La infraestructura de la nube es de uso exclusivo para una sola organización y se niega el acceso a público en general.
2. **Nube Comunitaria:** La infraestructura de la nube es de uso exclusivo para una comunidad específica de usuarios de organizaciones que poseen intereses en común.
3. **Nube Pública:** La infraestructura de la nube es de uso para el público en general. Pueden ser usada por comercios, escuelas, academias, organizaciones gubernamentales.

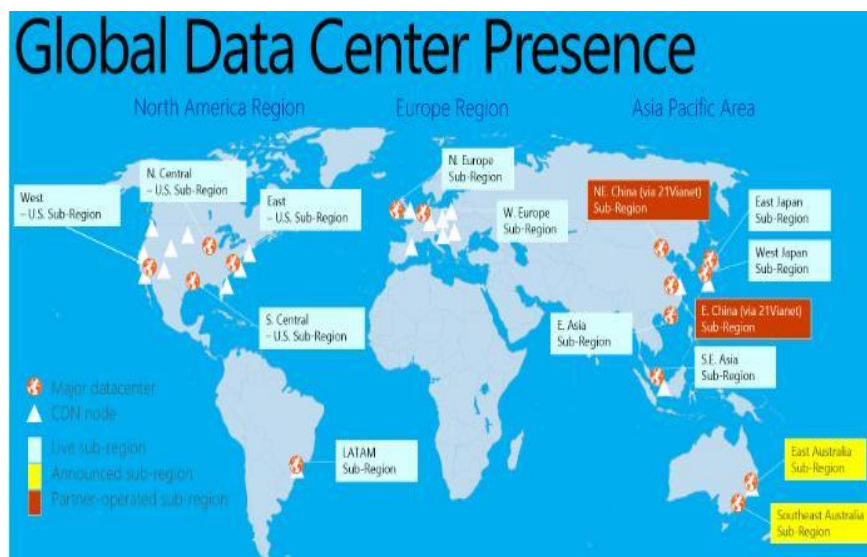
4. **Nube Híbrida:** La infraestructura de la nube es una composición de dos o más infraestructuras de nube (privadas, comunitarias o públicas)

Azure

Azure es una plataforma de cloud computing pública de Microsoft que puede acceder a cualquiera de los tres modelos de servicio como Software as a Service (SaaS), Platform as a Service (PaaS) e Infrastructure as a Service (IaaS), proporcionando todo lo necesario para que los usuarios puedan ejecutar virtualmente todas o parte de sus operaciones informáticas, incluidos servidores, almacenamiento, base de datos, redes y análisis (Microsoft , 2022). Azure posee datacenters alrededor del mundo, contando 140 países, más de 10 idiomas y 60 regiones como se observa en la Figura 19.

Figura 19

Localización de los datacenter de Azure.



Nota. La figura muestra las principales regiones donde se encuentran distribuidos los datacenters a nivel global de Azure. *Microsoft Azure*, por European Knowledge Center for Information Technology, 2022, (<https://www.ticportal.es/temas/cloud-computing/microsoft-cloud/microsoft-azure>)

Servicios de Azure

Azure en la actualidad cuenta con una gran variedad de servicios que se han ido incluyendo desde su creación en el año 2010. Estos servicios poseen costos dependiendo a los recursos utilizados, por tal motivo el usuario debe configurar y controlar antes de usar cada servicio para evitar costes innecesarios (Microsoft , 2022).

Los principales servicios que maneja Azure son los siguientes:

- **Administración:** Automation, Azure Advisor, Azure Blueprint, Azure Managed Applications, Azure Monitor, etc.
- **Almacenamiento:** Azure Data Share, Archive Storage, Archivos de Azure, Azure Data Box, etc.
- **Análisis:** Azure Anlysis Services, Azure Stream Analytics, Event Hubs, etc.
- **Bases de Datos:** Azure Cosmos DB, SQL Azure, Azure Data Base for MySQL, etc.
- **Híbrido y Multinube:** Azure Active Directory, Azure DevOps, etc.
- **Inteligencia Artificial y machine Learning:** Anomaly Detector, Azure Bot Service, Azure Machine Learning, etc.
- **IoT:** Azure IoT Hub, Azure IoT Central, Azure Maps, etc.

Power Bi

Power Bi es una colección de software, aplicaciones y conectores que permiten la integración de los datos para generar información entendible, analizable y de agrado visual. Los datos que se manejan son híbridos, es decir, pueden ser ya sea una hoja de Excel o datos basados en la nube. Power Bi es una herramienta poderosa gracias a la facilidad con el que puede conectarse a los orígenes de datos y analizarlos obteniendo la parte más importante y así poder compartir con cualquier aplicación o usuarios que la requiera (Microsoft, 2022).

Figura 20

Power Bi en diferentes plataformas.



 Power BI

Nota. La figura muestra la fácil integración de Power Bi en distintas plataformas para su uso y análisis. Adaptado de (Microsoft, 2022)

Características

Las principales características que presenta Power Bi son las siguientes:

- **Arranque Rápido:** Power Bi permite realizar publicaciones y tener acceso a paneles e informes de forma rápida con pocos pasos.
- **Fácil Uso:** Power Bi integra una interfaz amigable al usuario por lo que no se necesita experiencia para poder editar, construir, publicar y compartir informes, dashboards, entre otros tipos de información.
- **Centralización de Información:** Permite la unificación de datos provenientes de diferentes orígenes en un solo informe sin tener que usar otras aplicaciones, como: My SQL, SQL Server, SQL Azure, Office 365, Google, entre otros.
- **Información en tiempo real:** Permite la descarga de datos para los informes realizados y acceder a información actualizada.

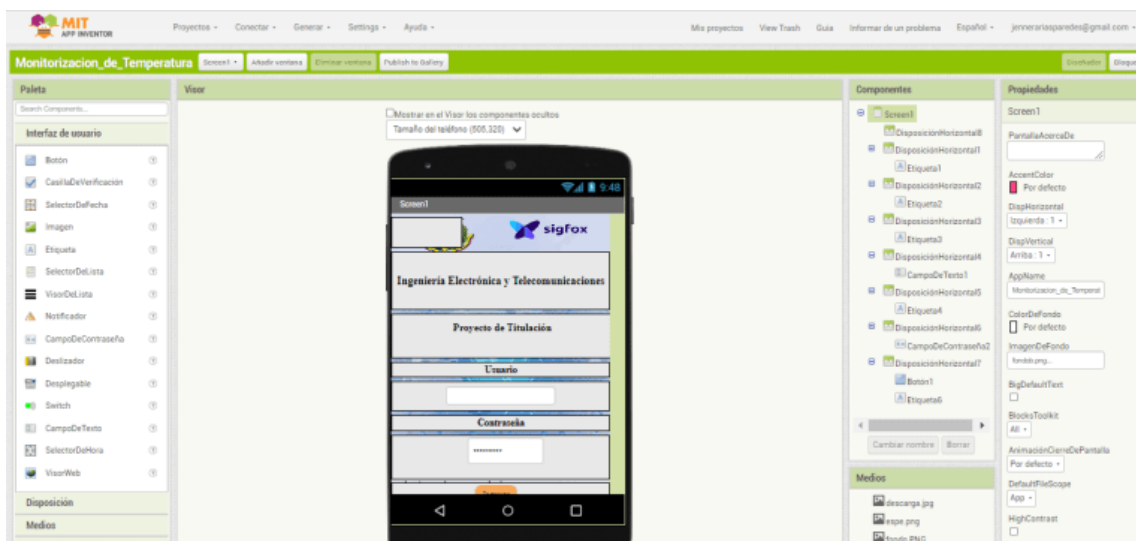
- Geolocalización: Permite la selección de diferentes tipos de mapas para la visualización de datos en 3D, de nivel local, regional y global.
- Seguridad: Power Bi crea roles de acceso para cada miembro de la empresa u organización, es decir, los miembros no tienen acceso a la información de otros roles sin pedir acceso al administrador.

MIT APP INVENTOR

App es una herramienta desarrollada por MIT (del inglés *Massachusetts Institute of Technology*) con el propósito de ayudar a sus usuarios a crear aplicaciones para dispositivos móviles android desde su navegador web (Posada, 2019). Su programación es basada en bloques desarrollados por Google.

Figura 21

Interfaz de trabajo APP INVENTOR



Nota. La interfaz de trabajo de App Inventor consta de diferentes sectores, paleta, visor, componentes y propiedades. Adaptado de *Interfaz*, por MIT, 2023, (<https://appinventor.mit.edu/>)

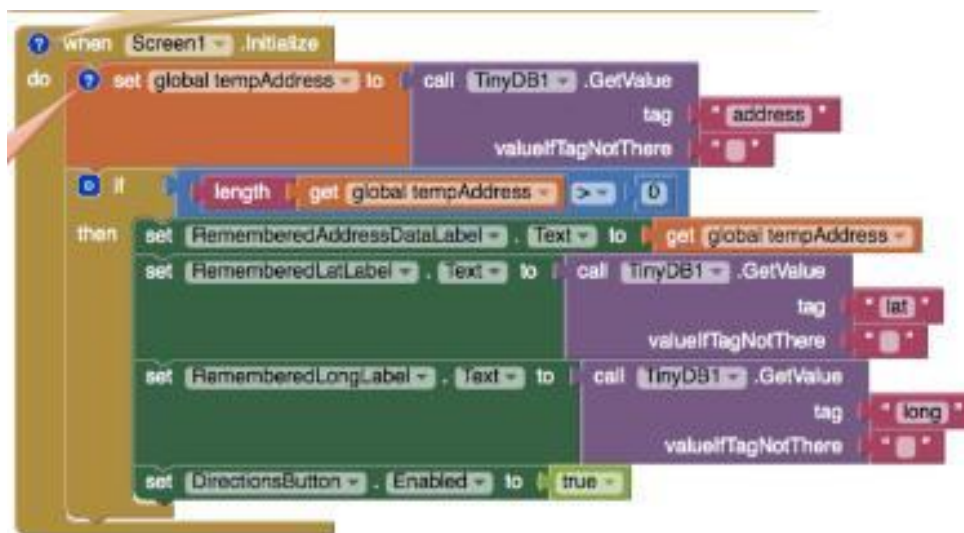
En la Figura 21 se observa en el lado izquierdo un menú diverso para selección de los componentes necesarios para crear la aplicación, en la parte central un visor que simula la

pantalla de un celular que permite colocar los componentes en forma de bloques, en el lado derecho se tiene las propiedades que tienen los componentes seleccionados, en este lugar se puede seleccionar tamaño de letra, de imagen, texto de recuadro, etc.

En la Figura 22, se observa el tipo de programación, la cual se basa en bloques, este tipo de programación es muy intuitiva y fácil de manejar, ya que, si se desea realizar diferentes condiciones solo se tiene que seleccionar en el menú la condición requerida y llevarla a la pantalla en donde se conecta con diferentes acciones que puedan ser requeridas.

Figura 22

Programación de bloques APP INVENTOR



Nota. Programación por bloques y componentes, Adaptado de *Diagramas*, por MIT, 2023, (<https://appinventor.mit.edu/>)

Capítulo III

Materiales y Métodos

Xkit de Thinxtra para Sigfox

El Xkit de Thinxtra es una de las mejores opciones para poder empezar en el área de IoT con la tecnología SigFox, este Xkit contiene un conjunto de funciones y accesorios que son de gran utilidad para que cualquier persona desarrolle proyectos de IoT independientemente de la experiencia que tenga. Este módulo es utilizado generalmente en universidades, hogares, empresas de reciente creación, entre otras. A continuación, se describen las principales características que posee este módulo (Digi-Key, 2018).

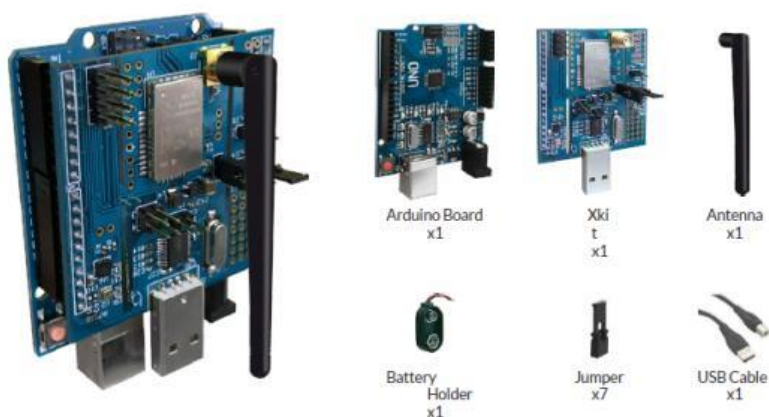
Accesorios del Xkit Thinxtra

Los principales accesorios que contiene el Xkit de SigFox son:

- Acelerómetro de 3 ejes
- Sensor digital de temperatura, presión, humedad.
- Reed switch
- Sensor de luz.
- Arduino Uno R3
- Antena
- Botón para envío de mensajes.
- Cable de conexión USB.
- Jumpers
- Placa compatible con Arduino, Raspberry Pi

Figura 23

Xkit de Thinkxtra para SigFox



Nota. La figura representa los principales accesorios que vienen incluidos en el Xkit y necesarios para su funcionamiento. Tomado de *Thinxtra Sigfox Developer Xkit*, por Sigfox, 2021, (<https://thinxtra.com/iot-connectivity/xkit/>).

El módulo que utiliza el Xkit de Thinkxtra para Sigfox es el (WSSFM10R4AT) el cual solo funciona para la región número 4, la cual abarca los países Australia, Nueva Zelanda, Hong Kong y América del sur, las principales especificaciones se resumen en la Tabla 7 a continuación:

Figura 24

Módulo WSSFM10R4AT



Nota. La figura muestra la forma física del módulo que está incrustado en el Xkit de Thinkxtra para SigFox. Tomado de *Módulo WISOL Sigfox WSSFM10R4AT*, por Glynstore, 2022, (<https://www.glynstore.com/WSSFM10R4AT/>).

Tabla 7

Especificaciones técnicas del módulo WSSFM10R4AT

Parámetro	Valor
Tamaño	13.0x20.0x2.3 mm
Chipset	AX-SFUS-1-01/ON Semiconductor
Frecuencia Tx	920.8 MHz
Frecuencia Rx	922.3 MHz
Velocidad de datos	600bps
Potencia de salida Tx	+ 24dBm (máx)
Sensibilidad de Rx	-129 dBm (mín)
Voltaje de entrada	2.7 - 3.6 V

Nota. La tabla representa las características necesarias para el funcionamiento correcto del módulo de SigFox. Tomado de *Módulo WISOL Sigfox WSSFM10R4AT*, por Glynstore,2022, (<https://www.glynstore.com/WSSFM10R4AT/>).

Arduino

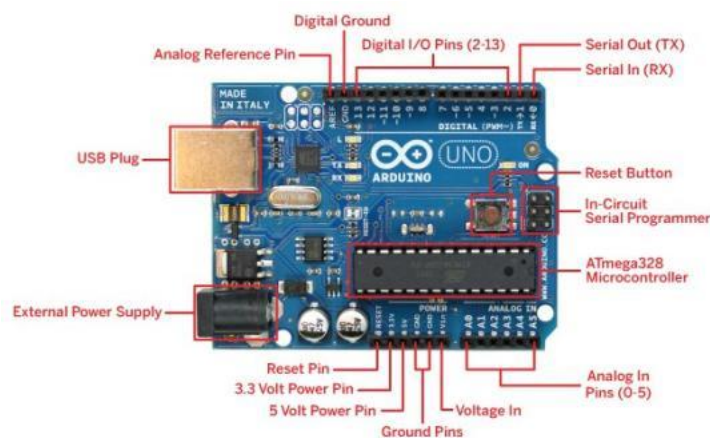
Arduino es una plataforma electrónica de código abierto que está basada en hardware y software fácil de usar y programar. Las placas o boards están compuestas de entradas analógicas y digitales en las se pueden conectar de manera sencilla sensores de luz, humedad, temperatura, presión, etc para tener una lectura de lo que se desee sensar y convertirlo en una salida para activar motores, leds, LCD, etc. Arduino está basado en lenguaje de programación Wiring y el Software Arduino IDE (*del inglés Integrated Development Environment*) basado en C++. Arduino al ser de fácil comprensión y uso ha sido una parte principal de miles de proyectos desde los más simples hasta los más complejos usados en todo el mundo (Arduino, 2018).

Arduino Uno

Arduino Uno es un microcontrolador en placa basada en el ATmega 328P. Posee 14 pines digitales de entrada/ salida de los cuales 6 pueden ser utilizados como salidas de PWM, 6 entradas analógicas, un resonador cerámico de 16MHz, un conector USB, un conector de alimentación, un header ICSP y un botón de reinicio como se observa en la Figura 23, las especificaciones se presentan a continuación en la Tabla 8.

Figura 25

Placa Arduino Uno



Nota. La Figura muestra la placa Arduino en la que se muestra los pines de entrada/salida, botón de reinicio, microcontrolador ATmega328, entrada de alimentación, leds de Tx y Rx.

Adaptado de *Placa Arduino Uno R3*, por Proyectos Arduino, 2022,

Arduino(<https://proyectosconarduino.com/placas/arduino-uno-r3/>)

Tabla 8

Especificaciones técnicas de Arduino Uno

Parámetro	Valor
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12 V

Parámetro	Valor
Voltaje de entrada (límites)	6-20V
Memoria Flash	32KB
SRAM	2KB (ATmega328)
EEPROM	1KB (ATmega328)
Velocidad de reloj	16 MHz

Nota. La tabla representa los parámetros fundamentales para el funcionamiento de la placa Arduino Uno R3. Adaptado de *Arduino Uno R3*, por Arduino, 2022, (<https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>).

Arduino Mega 2560

El Arduino Mega 2560 es un microcontrolador basado en la tarjeta ATmega2560. Posee 54 entradas/ salidas digitales, 16 entradas análogas, 4 puertos seriales físicos UART, un oscilador de cristal de 16MHz. Permite la integración con la mayoría de shields diseñados para Arduino Uno, Due. El Arduino Mega 2560 es una versión extendida del Arduino Uno, por lo que cualquier programa realizado en Arduino Uno se podrá compilar y subir al Arduino Mega (Arduino, 2022). Las especificaciones técnicas se las visualiza en la Tabla 9.

Figura 26

Arduino Mega 2560



Nota. La figura representa la placa de desarrollo Arduino Mega2560, constituida por varias entradas tanto analógicas como digitales ubicadas en lo periféricos, conectores para

alimentación y en el centro se encuentra ubicado el procesador Atmega2560. Adaptado de *Arduino Mega 2560*, por Arduino, 2022, (<https://store-usa.arduino.cc/collections/boards/products/arduino-mega-2560-rev3>)

Tabla 9

Especificaciones Técnicas Arduino Mega 2560

Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje de Operación	5V
Voltaje de entrada (Recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (Límite)	6-20V
Pines entrada/salida digital	54
Entradas Analógicas	16
Memoria Flash	256KB
SRAM	8KB
EEPROM	4KB
Velocidad de Reloj	16MHz

Nota. La tabla representa los parámetros fundamentales para el funcionamiento de la placa Arduino Mega 2560. Adaptado de *Arduino Mega 2560*, por Arduino, 2022, (<https://store-usa.arduino.cc/collections/boards/products/arduino-mega-2560-rev3>)

Sensores

Sensor de Temperatura y Humedad Ambiental DHT22

El DHT22 es un sensor de temperatura y humedad básico y de bajo costo. Está constituido por un sensor de humedad capacitivo y un termistor para medir el aire circundante, además cuenta con un circuito integrado básico en su interior que permite la conversión de señal analógica a digital y posteriormente envía la señal digital con los datos de temperatura y humedad. Consta de cuatro pines los cuales se observan en la Figura 27.

Figura 27

Sensor de temperatura y humedad DHT22



Nota. La figura presenta el sensor DHT22 con sus cuatro pines correspondientes. Adaptado de *Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302)*, por Aosong Electronics Co.,Ltd, 2022, datasheetpdf (<https://datasheetpdf.com/pdf-file/792209/ABCPROYECTOS/DHT22/1>).

- 1 pin: Entrada de fuente de alimentación.
- 2 pin: Señal digital
- 3 pin: Null
- 4: Conexión a GND o tierra

Las especificaciones técnicas se las presenta en la Tabla 10.

Tabla 10

Especificaciones técnicas del sensor DHT22

Modelo	DHT22
Fuente de Alimentación	3.3 – 6 V DC
Señal de salida	Señal digital vía un solo bus
Rango de operación	Humedad 0-100% Temperatura -40 a 80°C
Precisión	Humedad +-2% Temperatura +-0.5°C
Resolución o sensibilidad	Humedad 0.1% Temperatura 0.1 °C

Modelo	DHT22
Periodo de Sensado	Promedio: 2s

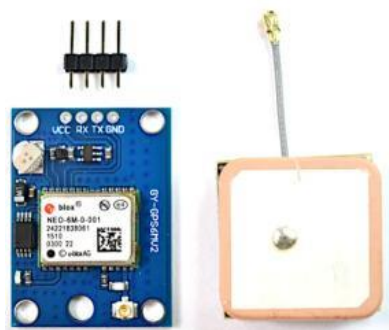
Nota. Adaptado de *Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22* (DHT22 also named as AM2302), por Aosong Electronics Co.,Ltd, 2022, datasheetpdf (<https://datasheetpdf.com/pdf-file/792209/ABCPROYECTOS/DHT22/1>).

Módulo GPS NEO-6M

El módulo NEO 6M constituye una de las mejores alternativas para geoposicionamiento, el cual es de tamaño reducido y de bajo costo. Debido al tamaño del módulo permite un fácil acople y traslado en diversos proyectos en los que se utilice. La comunicación se lo realiza mediante puerto serial UART, diseñado para plataformas como Arduino, Raspberry Pi, etc. Los parámetros que maneja este módulo son: Latitud, Longitud, Velocidad y Altitud.

Figura 28

Módulo GPS NEO 6M



Nota. La figura indica el módulo con sus cuatro pines de transmisión, recepción de datos y su respectiva antena. Adaptado de *NEO-6 u-blox 6 GPS Modules*, por U-blox, 2011, u-blox.com (https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf?utm_source=en%2Fimages%2Fdownloads%2FProduct_Docs%2FNEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf).

Características

Las principales características se presentan a continuación en la Tabla 11.

Tabla 11

Características módulo GPS NEO 6M

Tipo de Receptor	50 canales GPS frecuencia L1, modo C/A	
Sensibilidad	Tracking and Navigation	-161 dBm
	Readquisición	-160 dBm
	Arranque en caliente	-156 dBm
Tiempo de lectura	Arranque Frío	27 s
	Arranque reciente	33 s
	Arranque en caliente	1 s
	Readquisición	<1 s
Estándares	WAAS-EGNOS-MSAS	
Precisión	Posición	3 m
	Velocidad	0.1m/s
Límites de Operación	Aceleración	≤ 4 g
	Altitud	50000 m
	Velocidad	500 m/s
Consumo de Energía	Tracking	< 30mA
	Adquisición	40mA
	Sleep/ Stanby	TBD
Entorno de Uso	Temperatura de operación	-40 °C a 85 °C
	Humedad de operación	0 a 100 %
Especificaciones de antena	Frecuencia Central	1575 ± 3MHz
	Ancho de Banda	10MHz
	Impedancia	50 Ω

	Radio Axial	3 dB max
	Polarización	RHCP
Fuente de Alimentación	Voltaje	5V \pm 5%
	Corriente	55mA (típicamente)

Nota. Adaptado de *NEO-6 u-blox 6 GPS Modules*, por U-blox, 2011, u-blox.com

([https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-](https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf?utm_source=en%2Fimages%2Fdownloads%2FProduct_Docs%2FNEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf)

[6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-](https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf?utm_source=en%2Fimages%2Fdownloads%2FProduct_Docs%2FNEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf)

[09005%29.pdf?utm_source=en%2Fimages%2Fdownloads%2FProduct_Docs%2FNEO-](https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf?utm_source=en%2Fimages%2Fdownloads%2FProduct_Docs%2FNEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf)

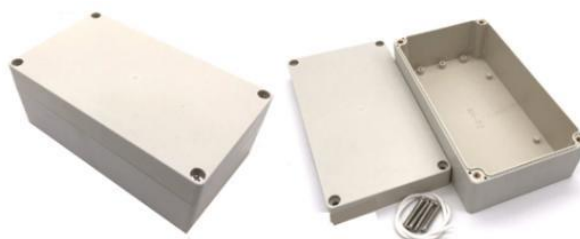
[6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf](https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf)).

Caja de Protección

Esta caja está diseñada de un material resistente a temperaturas bajas y ambiente, por lo cual, permite la protección de los componentes como placas de Arduino, RaspberryPi, baterías, antenas, sensores, etc (Véase Figura 29). Su principal función es la protección de circuitería colocada en su interior, permitiendo un correcto funcionamiento, ya sea, en espacios interiores o exteriores, además de la protección contra factores ambientales tales como agua, sol, humedad, temperatura, etc.

Figura 29

Caja de Protección



Nota. En la figura se observa la caja de protección utilizada para este proyecto, la cual contiene sello hermético contra agua y 4 tornillos para sellado de la caja contra factores externos.

Adaptado de *Caja Hermética*, por Vange enclosure Store, 2022,
(<https://es.aliexpress.com/item/32765191463.html?gatewayAdapt=glo2esp>).

Grupos de recursos de Azure

Un grupo de recursos es una agrupación de recursos relacionados con alguna solución que brinde Azure, por ejemplo se puede crear un grupo de recursos utilizando servicios como SQL, IoT Hub, SQL Server, SQL Database, entre otros, facilitando el trabajo al usuario o empresa que necesite varios recursos en un mismo grupo (Microsoft, 2022).

Servicios de Azure Utilizados

Los servicios de Azure tienen como objetivo realizar acciones para IoT, almacenamiento, Inteligencia artificial, Servidores de Database, Base de datos, entre otros. En el proyecto se utilizaron los siguientes Servicios:

- IoT Hub
- SQL Server
- Stream Analytics
- SQL Database

Azure IoT Hub

Es un servicio administrado y centralizado en la nube, que sirve como una central de mensajes que permite la comunicación entre los dispositivos IoT conectados y servicios de Azure. Una de sus ventajas es que permite el seguimiento de la creación de dispositivos en Azure, la conexión de dispositivos y los errores que existan en estos (Microsoft IoT Hub, 2022). Los precios que maneja este servicio se dividen en dos niveles el básico y el estándar, los cuales se describen en la Tabla 12 y 13 a continuación:

Tabla 12*Precios de IoT Hub de Nivel básico*

Tipo de edición	Precio por unidad de IoT Hub (al mes)	Número total de mensajes al día por unidad de IoT Hub	Tamaño del medidor de mensajes
B1	\$10	400,000	4 KB
B2	\$50	6,000,000	4 KB
B3	\$500	300,000,000	4 KB

Nota. La tabla detalla los precios, número permitidos de mensajes y tamaños de mensajes dependiendo del tipo. Adaptado de *IoT Hub*, por Microsoft, 2022, (<https://docs.microsoft.com/es-es/azure/iot-hub/iot-hub-devguide-quotas-throttling>)

Tabla 13*Precios de IoT Hub de Nivel Estándar*

Tipo de edición	Precio por unidad de IoT Hub (al mes)	Número total de mensajes al día por unidad de IoT Hub	Tamaño del medidor de mensajes
Gratis	Gratis	8,000	0.5 KB
S1	\$25	400,000	4 KB
S2	\$250	6,000,000	4 KB
Tipo de edición	Precio por unidad de IoT Hub (al mes)	Número total de mensajes al día por unidad de IoT Hub	Tamaño del medidor de mensajes
S3	\$2,500	300,000,000	4 KB

Nota. La tabla detalla los precios, número permitidos de mensajes y tamaños de mensajes dependiendo del tipo y nivel. Adaptado de *IoT Hub*, por Microsoft, 2022, (<https://docs.microsoft.com/es-es/azure/iot-hub/iot-hub-devguide-quotas-throttling>)

Azure SQL Server

SQL Server es un servicio de Azure que se ejecuta en una máquina virtual, permitiendo realizar un tipo de programación para ejecutar o parar las actividades realizadas por este servicio, una función fundamental que presenta es el ser un servidor para base de datos, por tal motivo, se puede crear o eliminar base de datos de una forma sencilla (Microsoft SQL Server, 2022).

Azure Stream Analytics

Stream Analytics es un motor de procesamiento encargado de eventos complejos y del análisis en tiempo real de un gran volumen de datos de streaming de distintos orígenes de manera efectiva y rápida. Mediante la extracción de información de varios orígenes de entrada como sensores, dispositivos IoT, permiten la creación de acciones e inicio de flujos de trabajo (Microsoft Stream Analytics, 2022).

Azure Stream Analytics se puede usar para distintas actividades como:

- Análisis de registros web
- Análisis de flujos en tiempo real desde dispositivos IoT.
- Supervisión remota y mantenimiento predictivo de recursos.
- Análisis en tiempo real de datos de diferentes entradas para detección de posibles errores.

SQL Database

SQL Database es un motor de base de datos que tiene una plataforma como servicio, el cual permite administrar gran variedad de funciones de las bases de datos como por ejemplo las actualizaciones, verificación de parches de seguridad y copias de seguridad (Microsoft SQL Database, 2022).

Una ventaja es la creación de la capa de almacenamiento de datos que permite tener disponible cuando se requiera de forma inmediata para distintas aplicaciones o soluciones de Azure.

Los sensores DHT22 y el módulo GPS NEO 6M al ser utilizados para placas de desarrollo de proyectos IoT, presentan una alta precisión en sus medidas esto se debe a que las empresas que los fabrican lo hacen de forma industrial, es decir, son calibrados con una precisión del 99.8%, por lo que el fabricante garantiza las medidas de los sensores.

Capítulo IV

Diseño e Implementación de la red de Sensores

Arquitectura del Sistema

Antes de empezar con la realización de la red de sensores se debe considerar varios aspectos que a futuro pueden acortar tiempo, abaratar costos y evitar limitaciones de la red. A continuación, se detallan varios puntos que ayudaran en la elaboración de la red de nodo sensores.

En el diseño de la red de nodo sensores se consideran diferentes variables con las que se puede cumplir el objetivo de este sistema. Las variables que mayor importancia tienen para el estudio de la cadena de frío en las tres etapas son: temperatura ambiental, humedad relativa, latitud y longitud para geoposicionamiento. La red de sensores está constituida por tres nodos. El primer nodo en el Instituto Agropecuario Superior Andino IASA en el sector de Sangolquí, el segundo en el vehículo termo de transporte de productos perecederos y el tercero en un frigorífico donde se almacenan los productos para la venta.

Además, se consideran otras características que permiten el funcionamiento y efectividad de la red de nodo sensores como son:

- Los sectores donde se implementaron los 3 nodos sensores, estos deben disponer con cobertura que permita el envío de los mensajes hacia el backend de Sigfox sin que exista un número considerable de pérdidas en los mensajes.
- Los nodos sensores poseen protección contra agua, calor, humedad, ya que fueron diseñados pensando en climas o eventualidades adversas, dos de los nodos sensores fueron implementados en lugares interiores y uno instalado en un vehículo termo de transporte de productos perecederos, el cual, la mayoría del tiempo está expuesta a los cambios climáticos de la ciudad de Quito.

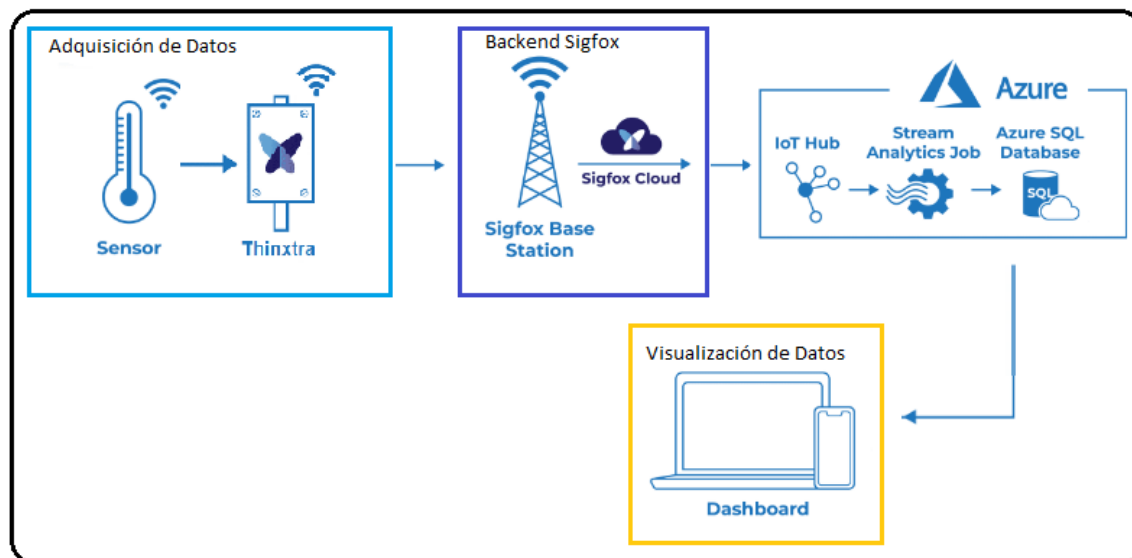
- El número de mensajes de datos que se puede enviar al backend de Sigfox es de 140 mensajes/día, permitiendo obtener la información de los nodos sensores cada 10 minutos aproximadamente.
- El horario de toma de datos se establece desde las 7 de la mañana hasta las 7 de la noche, ya que es un periodo aceptable debido al funcionamiento del Instituto Agropecuario Superior Andino IASA, el frigorífico que contiene al nodo 3 y la unidad de transporte de productos perecederos.
- Alimentación de energía de los nodos sensores, gracias a que dos de los nodos sensores se implementaron en lugares que poseen alimentación eléctrica fija se colocaron fuentes de energía continua y por otro lugar el nodo sensor implementado en la unidad de transporte, al requerir de alimentación fija usa una batería sellada.
- Dashboard, contiene una interfaz amigable con el usuario y fácil de usar, permitiendo visualizar los datos de cada nodo sensor en tiempo real.
- La aplicación móvil, posee una interfaz intuitiva para su uso y fácil manejo, además de la compatibilidad con dispositivos Android.

Diagrama de Bloques

La red de nodos sensores consta de cuatro etapas las cuales son: sensado y adquisición de datos, Backend Sigfox, Azure y visualización de datos, como se puede observar en la Figura 30. Cada una de estas etapas serán descritas a continuación:

Figura 30

Diagrama de Bloques



Nota. En la figura se puede observar las cuatro etapas para la que está constituida la arquitectura de la red de nodos sensores.

- **Sensado y adquisición de datos:** Este bloque está constituido por sensores de temperatura, humedad y un GPS para el geoposicionamiento, para la interpretación de los datos que generan los sensores se tiene placas de desarrollo de Arduino modelo Uno y Mega mediante la conexión de un módulo Dev Kit Thinxtra de Sigfox a cada Arduino, dichos módulos permiten generar agrupaciones de datos en mensajes y posteriormente enviarlos a la red de Sigfox.
- **Backend de Sigfox:** En esta etapa la información que se generó en el bloque anterior pasa a las estaciones base que Sigfox tiene desplegado y posteriormente viaja al Backend en donde se configura a través de callbacks el redireccionamiento de la información hacia Azure.

- **Azure:** En esta etapa se reciben la información del bloque anterior, permitiendo la creación de un conjunto de servicios integrados que analizan la información en tiempo real para después almacenarla en una base de datos.
- **Visualización:** En esta etapa la información almacenada en la base de datos del bloque anterior es integrada con la aplicación de Power BI, la cual permite crear dashboards para una aplicación web y también es compatible para sistemas operativos Android en las cuales se puede ver la información.

Como se mencionó anteriormente, la primera etapa está constituida por sensores, placas de desarrollo y módulos que permiten la conexión con la red de Sigfox. Para este proyecto se implementaron 3 nodos sensores, los cuales se describen a continuación.

Nodos Sensores

Su funcionamiento se basa en Arduino, en el cual se integran módulos de Dev Kit Thinxtra de Sigfox que permite enviar los datos adquiridos de los sensores hacia el backend de SigFox. Para facilitar la programación de la adquisición de datos desde los sensores, se ha establecido un código base que puede ser modificado dependiendo de los requerimientos que se desee. La principal librería que se establece es la de Wisol RC4, la cual integra los tiempos de envío de los datos hacia el backend, la integración del módulo Dev Kit Thinxtra con el Arduino, entre otras.

Nodo 1

El nodo 1 basa su funcionamiento en la adquisición de variables de temperatura y humedad ambiental de un cuarto frío. Los componentes que se integran en este nodo son los siguientes:

- Arduino Uno
- Módulo Dev Kit Thinxtra de Sigfox

- 2 sensores de temperatura y humedad ambiental DHT22

Este nodo presenta al Arduino Uno como parte central, debido a que permite la integración de los sensores y el módulo de Sigfox, la distribución de pines se presenta en la Tabla 14 y su diagrama de conexión en el Figura 31 y en Anexo 1.

Tabla 14

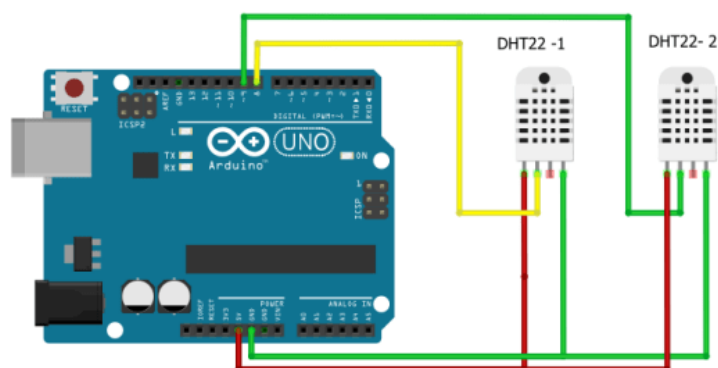
Distribución de pines del nodo 1

Sensor	Pines de Arduino Uno
Primer sensor DHT 22	D8-Digital
Segundo sensor DHT 22	D9-Digital

El diagrama de conexión del nodo 1 se lo realizó en el software fritzing que es uno de los mejores simuladores para Arduino en el mercado, en el diagrama se puede observar las conexiones realizadas. Los sensores usados en este nodo ya están calibrados de fábrica. El envío del paquete de datos hacia el backend de Sigfox es cada 10 minutos.

Figura 31

Diagrama esquemático nodo 1



Nodo 2

El nodo 2 basa su funcionamiento en la adquisición de las variables de temperatura y de geoposicionamiento de un vehículo de transporte de productos perecederos. La integración de

un sensor de temperatura sirve para verificar que su temperatura no suba y los productos entren en un estado de descomposición. El GPS que se utilizó sirve para monitorizar la ruta que ha seguido el vehículo de transporte en el día, evitando que siga otra ruta y que los productos puedan ser sustraídos de dicha unidad. Los componentes que se integran en este nodo son los siguientes:

- Arduino Mega 2560
- Sensor de Temperatura DHT22
- Módulo Dev Kit Thinxtra de Sigfox
- Módulo GPS NEO 6M

La parte central de este módulo se basa en el Arduino Mega que es una versión extendida del Arduino Uno, este Arduino es usado ya que el módulo GPS necesita de una entrada serial UART físico y en el Arduino Uno solo se cuenta con un puerto serial y es usado para la comunicación con la PC, generando conflicto entre los puertos, por tal motivo el Arduino Mega 2560 que dispone de 4 puertos seriales físicos se usan dos, uno para la PC y el otro para el módulo GPS, lo que evita el uso de la librería Software serial o serial virtual. El envío de paquete de datos se lo realiza cada 8 minutos.

La distribución de los pines se presenta a continuación en la Tabla 15:

Tabla 15

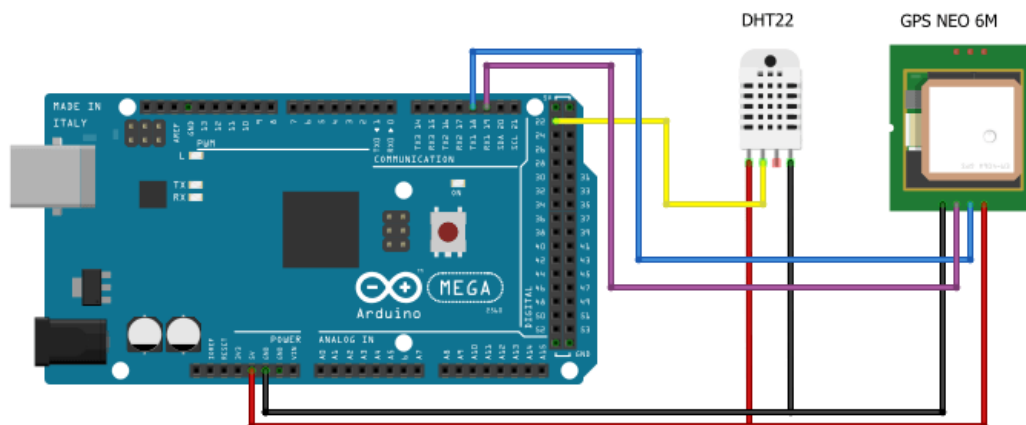
Distribución de pines Arduino Mega 2560 nodo 2

Sensor	Pines de Arduino Mega 2560
Sensor DHT 22	D22-Digital
Módulo GPS NEO 6M	D19-Rx1-Digital
	D18-Tx1-Digital

El diagrama de conexión del nodo dos se lo realizó en el software fritzing; en la Figura 32 y en Anexo 1, se observa el diagrama con las conexiones realizadas con el módulo GPS y el sensor de temperatura

Figura 32

Diagrama esquemático nodo 2



Nota. El módulo GPS requiere de cuatro pines, dos de alimentación y dos de transmisión y recepción respectivamente.

Nodo 3

El nodo 3 presenta un funcionamiento similar al del nodo 1, por lo tanto, se basa en la adquisición de variables de temperatura y humedad ambiental de un frigorífico. Los componentes que se integran en este nodo son los siguientes:

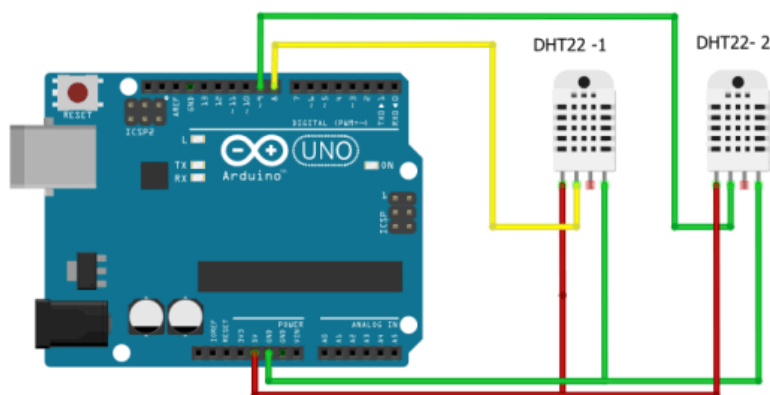
- Arduino Uno
- Módulo Dev Kit Thinxtra de Sigfox
- 2 sensores de temperatura y humedad ambiental DHT22

Este nodo presenta al Arduino Uno como parte central, debido a que permite la integración de los sensores y el módulo de Sigfox, la distribución de pines se presenta en la Tabla 16 y su diagrama de conexión en el Figura 33 y en Anexo 1.

Tabla 16*Distribución de pines del nodo2*

Sensor	Pines de Arduino Uno
Primer sensor DHT 22	D8-Digital
Segundo sensor DHT 22	D9-Digital

El diagrama de conexión del nodo uno se lo realizó en el software fritzing, en el diagrama se puede observar las conexiones realizadas. El envío del paquete de datos hacia el backend de Sigfox es cada 10 minutos.

Figura 33*Diagrama esquemático nodo 3*

Implementación de la Red de Nodos Sensores

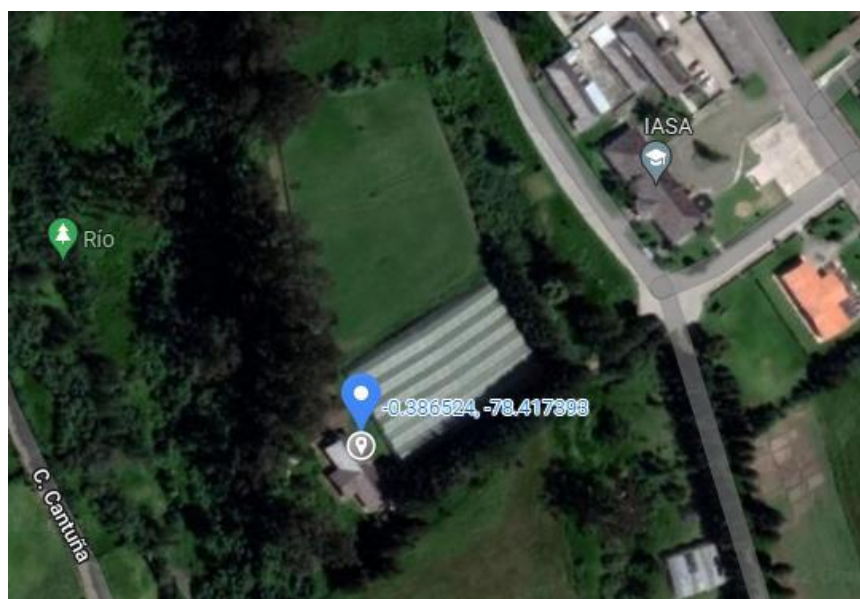
Los nodos sensores fueron implementados en diferentes sectores. El primer nodo sensor fue implementado en Instituto Agropecuario Superior Andino IASA que es parte de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE ubicado en el cantón Rumiñahui provincia de Pichincha. El segundo nodo sensor fue implementado en un vehículo de transporte de productos perecederos en la ciudad de Quito provincia de Pichincha. El tercer nodo sensor fue implementado en un frigorífico que servirá para verificar el congelamiento de los productos y se encuentra ubicada en la ciudad de Quito provincia de Pichincha.

Ubicación de implementación

El nodo sensor 1 fue implementado y se encuentra instalado en un cuarto frío utilizado para el almacenamiento y conservación de flores pertenecientes a la florícola del IASA en las coordenadas $-0.386536, -78.417403$ como se muestra en la Figura 34.

Figura 34

Lugar de implementación nodo 1



Nota. En la Figura se puede observar el lugar en donde se implementó el nodo sensor 1 con las coordenadas exactas en el Instituto IASA perteneciente a la ESPE.

El nodo sensor 2 fue implementado y se encuentra instalado en un vehículo de transporte de productos perecederos, específicamente en un camión utilizado para el traslado de productos como vegetales, frutas, cárnicos entre otras. Las coordenadas específicas en las que se realizó la instalación del módulo son $-0.337498, -78.542556$, como se muestra en la Figura 35.

Figura 35

Lugar de implementación nodo 2

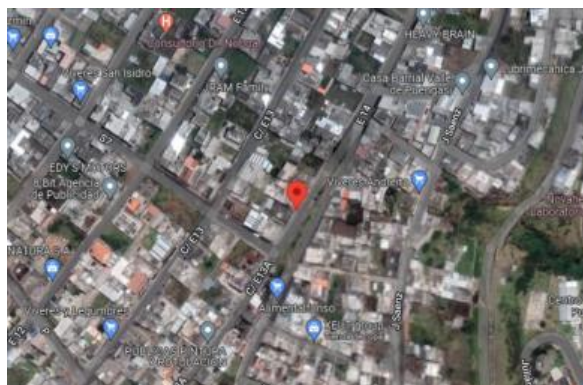


Nota. En la Figura se puede observar el lugar en donde se implementó el nodo sensor 2 con las coordenadas exactas.

El nodo sensor 3 fue implementado e instalado en un frigorífico, la ubicación exacta viene dada por las coordenadas $-0.249798, -78.49853$ y se observa en la Figura 36.

Figura 36

Lugar de implementación nodo 3



Nota. En la Figura se puede observar el lugar en donde se implementó el nodo sensor 3 con las coordenadas exactas.

Despliegue e Instalación de la Red de sensores

En la implementación de los nodos sensores se utilizó cajas herméticas. Estas cajas fueron instaladas con cinta doble faz de grado industrial para ambientes externos e internos por

lo tanto tienen una adherencia muy fuerte a las superficies en donde fueron colocadas, evitando que por accidentes se puedan desprender.

Colocación de los sensores del nodo 1

El nodo sensor fue colocado en la parte exterior de las instalaciones, las mismas que contiene el cuarto frío, sin embargo, este nodo no está expuesto a la intemperie ya que se encuentra cubierta por techo, en este lugar existe cobertura de la red Sigfox, por lo que el envío de mensajes hacia el backend de SigFox se lo realiza de forma continua, esta instalación se la observa en la Figura 37.

Figura 37

Colocación nodo 1

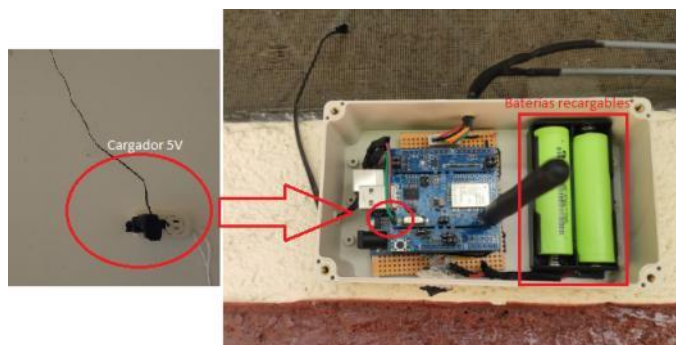


Nota. La figura representa el lugar exacto de implementación del nodo sensor, el cual está instalado bajo cubierta y con alimentación de fuente continua.

El nodo sensor consta de dos sistemas de alimentación de energía, la primera proviene de una fuente de 5V conectado a la red eléctrica de las instalaciones, y la segunda proviene de baterías recargables 18650 de 2000mA a 7.4 V. Esta segunda fuente de energía se utiliza como respaldo, es decir cuando la fuente primaria deje de funcionar, entra en funcionamiento la segunda, estos tipos de alimentación se pueden observar en la Figura 38, a continuación.

Figura 38

Alimentación del nodo 1



Nota. En esta figura se puede observar los dos tipos de alimentación que proveen energía al módulo, en la parte izquierda se observa la fuente de 5V conectado a la alimentación eléctrica y en la parte derecha se observa las baterías recargables en caso de respaldo.

Los sensores fueron colocados en el interior del cuarto frío, como se observa en la Figura 39, estos sensores fueron colocados en las paredes del cuarto frío y sujetados por cinta doble faz de grado industrial, lo que evita la caída de sensores.

Figura 39

Colocación de Sensores nodo 1



Nota. En la figura se observa en el lado izquierdo la entrada del cuarto frío, en el centro la colocación de los sensores y en el lado derecho cuales fueron los sensores que se instalaron.

Colocación de los sensores del nodo 2

El nodo sensor se instaló en la parte superior del camión, específicamente encima del contenedor de ventiladores, esto se observa en la Figura 40. Para fijar correctamente a esta parte se usó cinta doble faz de grado industrial para uso exteriores y amarras para una sujeción mayor, esto se lo realizó con la finalidad de evitar que se desprenda.

Figura 40

Implementación del nodo 2



Nota. En esta figura se observa el lugar de colocación del nodo sensor 2, en el lado izquierdo se observa el módulo bien sujetado y en el lado derecho se muestra una vista de costado de cómo se instaló y sujetó.

La alimentación del nodo 2 se la realizó con una batería de la marca First Power de 6V a 7.4A, esta batería se la colocó ya que se necesita del mayor tiempo posible de energía hacia el módulo, por lo cual, su duración es de 9 días aproximados antes de ser recargada otra vez, este tipo de batería se la colocó debajo del módulo para evitar ocupar espacio innecesario a los lados de este, esto se observa en la Figura 41. Además, se observa la antena del GPS fijada en el módulo y el sensor de temperatura dht22.

Figura 41

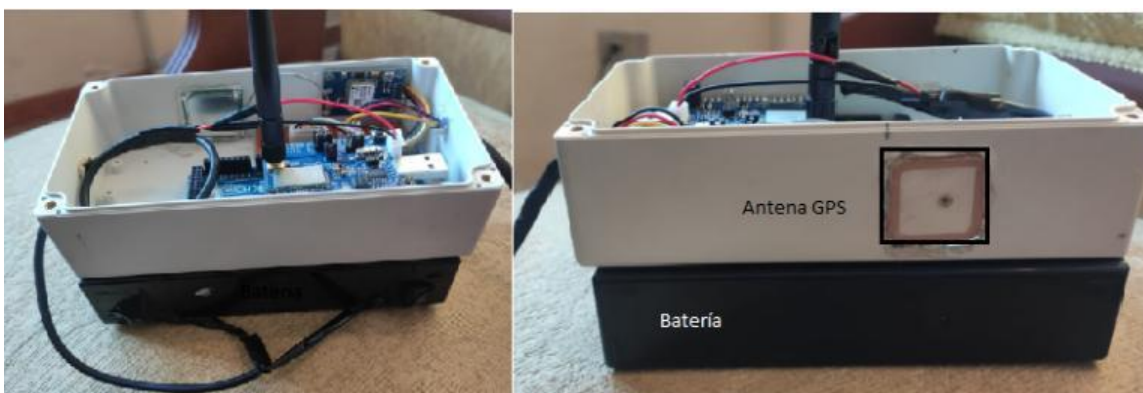
Alimentación y sensores del nodo 2



En el interior de este nodo sensor se coloca el Arduino Mega 2560 con su respectivo módulo de Sigfox, a su vez el módulo GPS incrustado y la batería antes descrita, todo este conjunto se lo observa en la Figura 42.

Figura 42

Integración del nodo sensor 2



La colocación del sensor de temperatura se lo realizó en el interior de la unidad de transporte a través de un espacio por donde ingresa los cables para el sistema de refrigeración, esto se lo puede observar en la Figura 43.

Figura 43

Colocación del sensor de temperatura



Nota. En esta figura en el lado izquierdo se observa el sistema de refrigeración colocado en la unidad de transporte con el sensor y en lado derecho se observa con más detalle el sensor usado para la toma de datos de temperatura.

Colocación de los sensores del nodo 3

Este nodo sensor fue colocado en la parte superior de un frigorífico. Este dispositivo se colocó en un lugar con cobertura de la red Sigfox, por lo que el envío de mensajes hacia el backend de SigFox se lo realiza de forma continua, esta instalación se la observa en la Figura 44.

Figura 44

Colocación del nodo sensor 3.

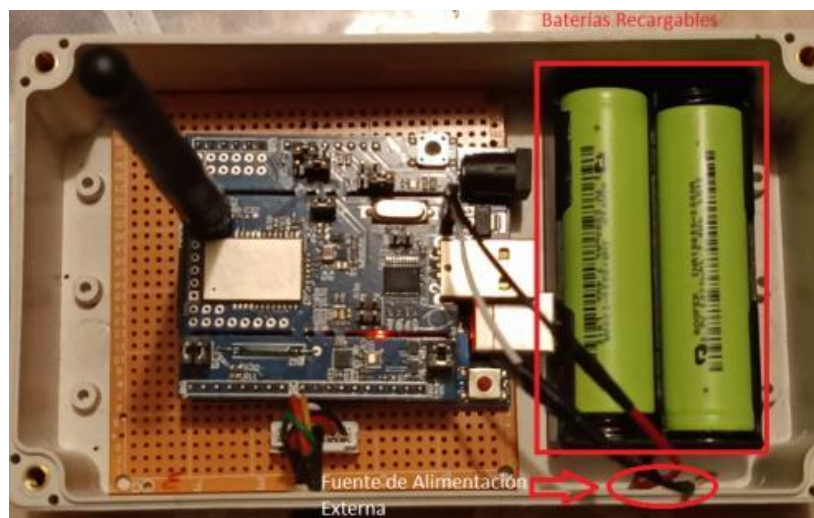


Nota. En esta figura se observa el lugar de colocación del nodo sensor, que fue en la parte superior del frigorífico.

El nodo sensor cuenta con dos sistemas de alimentación de energía, la primera proviene de una fuente de 5V conectado a la red eléctrica de las instalaciones, y la segunda proviene de baterías recargables 18650 de 2000mA a 7.4 V. Esta segunda fuente de energía se utiliza como respaldo, es decir cuando la fuente primaria deje de funcionar, entra en funcionamiento la segunda, estos tipos de alimentación se pueden observar en la Figura 45, a continuación.

Figura 45

Fuentes de Alimentación



Nota. La figura muestra como está colocado el módulo con sus respectivas fuentes de alimentación, adentro de la caja hermética

Los sensores fueron colocados en el interior del frigorífico, como se observa en la Figura 46, estos sensores fueron colocados en la cara posterior y cara derecha del mismo y sujetadas por cinta doble faz de grado industrial, lo que evita el desprendimiento.

Figura 46

Colocación de sensores en el frigorífico



Nota. En la parte izquierda se observa el primer nodo sensor DHT22, en la parte central se observa la ubicación de los sensores en un frigorífico y en la parte derecha el segundo sensor DHT22

Programación de los nodos sensores

La parte principal de los nodos sensores es la placa de desarrollo Arduino, ya que es el cerebro que permite la programación y el orden en el que se va a ir ejecutando las diferentes acciones requeridas. El software que utiliza Arduino es de gran ayuda debido a las librerías que existen para integración con los sensores o con diferentes módulos como Dev Kit Thinxtra de Sigfox, módulo GPS, entre otros. Al utilizar las diferentes librerías la programación resulta mucho más sencilla, las principales librerías utilizadas en este proyecto son WISOL, Tensors, DHT, entre otras. Estas librerías pueden ser descargadas como archivo .zip, para luego ser incluidas en las librerías del IDE de Arduino, estas se las encuentra en

<https://github.com/Thinxtra/Xkit-Sample>.

A continuación, se describe las librerías utilizadas en la programación de los nodos sensores en la Tabla 17.

Tabla 17*Librerías usadas para Arduino*

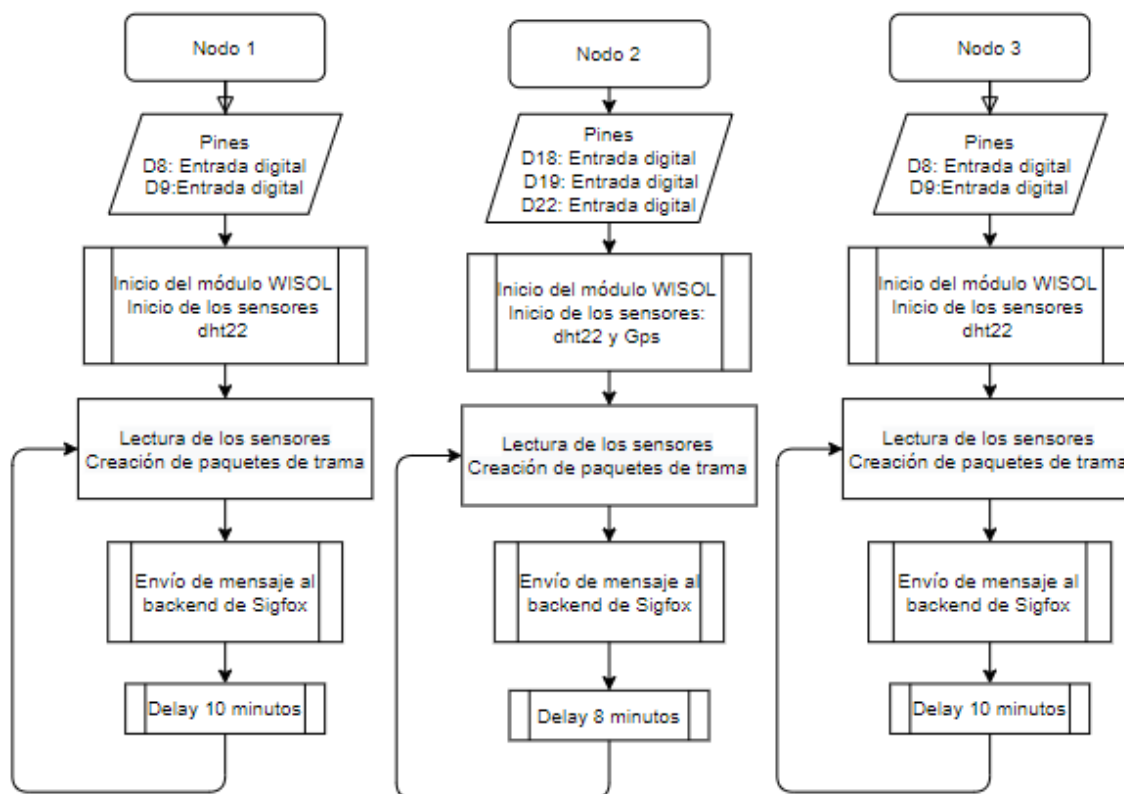
Librería	Función
Isigfox	Mediante el comando WISOL permite controlar el módulo de WSSFM10R4AT de Sigfox.
Tsensors.h	Permite la inicialización y obtención de mediciones de los sensores integrados en el módulo de Sigfox.
Wire	Permite la establecer la comunicación con dispositivos mediante I2C/TWI.
math	Permite la realización de cálculos matemáticos.
SimpleTimer	Permite la definición de temporizadores en ms para cumplir con acciones cronometradas.
avr/wdt	Permite el manejo del watchdog AVR.
DHT	Permite la lectura de temperatura y humedad ambiental del sensor dht22.
TinyGPS	Permite la lectura de los datos adquiridos del GPS NEO 6M.

Nota. Las librerías permiten el correcto funcionamiento del código programado y de los nodos sensores.

La Figura 47 permite la visualización de los diagramas de flujo del programa que corre en los nodos sensores. Estos diagramas se los realizó con la finalidad de dar a conocer con anticipación cual es la secuencia y proceso que va a ejecutar el código de cada nodo sensor.

Figura 47

Diagramas de flujo de los nodos sensores



Nota. Estos diagramas de flujo indican cuales son los pines utilizados, secuencias a seguir y los procesos que permitan

Programación Nodo 1

La programación de nodo 1 empieza con el llamado de las librerías necesarias para el funcionamiento del nodo sensor.

Figura 48

Librerías utilizadas en el nodo 1

```

#include <WISOL.h>
#include <Tsensors.h>
#include <Wire.h>
#include <math.h>
#include <SimpleTimer.h>
#include <avr/wdt.h>
#include "DHT.h"
  
```

Una vez incluidas todas las librerías necesarias se declaran los pines que se van a utilizar, en este caso se declaran las entradas digitales D8 y D9 para los sensores de temperatura y humedad. Al tener dos tipos iguales de sensores se definen cual es el sensor 1 y 2 mediante el comando DHTTYPE1 y DHTYPE2 respectivamente, si estos comandos aplicados no se diferencian existe conflicto en la lectura de los datos en las entradas digitales. Una vez definidos los pines y los tipos se declara el comando DHT dht1 y DHT dht2 para saber cuáles son sus respectivas entradas y tipo de sensor.

Figura 49

Declaración de pines

```
#define DHTPIN1 8
#define DHTTYPE1 DHT22
DHT dht1(DHTPIN1, DHTTYPE1);

#define DHTPIN2 9
#define DHTTYPE2 DHT22
DHT dht2(DHTPIN2, DHTTYPE2);
```

El inicio de la toma de datos comienza con la función *void setup ()*, en la cual se declaran el inicio de la comunicación entre Arduino y módulo de SigFox, el serial a 9600 baudios, y la lectura de datos por parte de los sensores, esto se observa en la Figura 50.

Figura 50

Inicio de la lectura de datos

```
Wire.begin();
Serial.begin(9600);
dht1.begin();
dht2.begin();
```

En la misma función *void setup ()* también se establece el intervalo de tiempo con el que se enviará los mensajes desde el nodo sensor hasta el backend de Sigfox, en este proyecto el intervalo que se configuró es de 10 minutos entre cada mensaje, debido a que Arduino maneja los tiempos en milisegundos, se programó con 400000 ms equivalentes a los 10 minutos.

Figura 51*Intervalo de envío de mensajes*

```
unsigned long sendInterval = 400000;
```

Una vez configurados los tiempos de envío, inicio de sensores y de la placa, se crea una función *void loop ()*, la cual, ejecuta por tiempo indefinido las funciones de temporizadores, reinicio e inicio del contador de watchdog.

Figura 52*Función void loop*

```
void loop() {
    timer.run();
    wdt_reset();
    watchdogCounter = 0;
```

La función *timer.run ()* inicializa los temporizadores que utiliza el código y ejecuta la función *Send_Sensor ()*, la cual es encargada del envío de los mensajes desde el módulo de SigFox hacia el backend. La función *wdt_reset ()* se encarga de la protección del módulo de Sigfox si existe fallas o altercados en la ejecución del código.

Para poder enviar los mensajes desde el nodo sensor hacia el backend de SigFox se crea la función *Send_Sensors ()*, la cual es la encargada de realizar la acción, en esta función se definen el tipo de variables de tipo entero o flotante, asignación de valores a las variables y por último la división de los datos en los 12 bytes que Sigfox proporciona para el envío del mensaje.

Figura 53*Declaración de tipos de variables*

```
UINT16_t hum1, nod01;
FLOATUNION_t temp1, temp2;
```

La variable `UINT16_t` es una variable de tipo entero que tiene 8 bits de capacidad o 2 bytes de uso, la variable `FLOATUNION_t` es de tipo flotante que tiene una capacidad de 32 bits o 4 bytes. La variable de tipo entero se utilizó para la humedad (`hum1`) ya que al momento de adquirir los datos flotantes que van desde 00.00 hasta los 99.99 se pueden convertir en enteros al multiplicar por 100 quedando 0000 o 9999, evitando usar bytes que posiblemente puedan ser usados para enviar datos de otro sensor. Las variables de tipo flotante (`temp1` y `temp2`) referentes a la temperatura requieren de 4 bytes cada una porque al colocar los sensores en cuartos frío las temperaturas son bajo cero, tomándose en cuenta el signo negativo y los decimales, por tal motivo no se necesita de ningún artificio o cálculo matemático para reducir el tamaño en bits o bytes, sino que al usar variables de tipo flotante se puede enviar la información exacta tomada por el sensor ya sea desde los -40.00°C hasta los 75.00°C con signo y decimal.

Figura 54

Asignación de variables para envío de datos

```
temp1.number = (float) (dht1.readTemperature());
hum1.number = (uint16_t) (dht1.readHumidity()*100);
temp2.number = (float) (dht2.readTemperature());
nod01.number = (uint16_t) (1);
```

Ahora, con los valores de humedad y temperatura ya asignados en bits o bytes, se asigna las variables a la trama de envío, que está compuesta por un payload de 12bytes. Para el envío de los datos de humedad se utilizan 2 bytes, para los de temperatura se utiliza 4 bytes para cada sensor y 2 bytes para el envío de número de nodo, obteniendo los 12 bytes requeridos.

Figura 55

Establecimiento de los bytes para cada variable

```

const uint8_t payloadSize = 12;
uint8_t buf_str[payloadSize];

buf_str[0] = templ.bytes[0];
buf_str[1] = templ.bytes[1];
buf_str[2] = templ.bytes[2];
buf_str[3] = templ.bytes[3];
buf_str[4] = huml.bytes[0];
buf_str[5] = huml.bytes[1];
buf_str[6] = temp2.bytes[0];
buf_str[7] = temp2.bytes[1];
buf_str[8] = temp2.bytes[2];
buf_str[9] = temp2.bytes[3];
buf_str[10] = nodol.bytes[0];
buf_str[11] = nodol.bytes[1];

```

Programación Nodo 2

El inicio de la programación del nodo 2, empieza con la inclusión de las librerías necesarias para el funcionamiento. Este nodo posee una programación similar al nodo 1 y nodo 3, con la única diferencia en el uso de un módulo GPS. A las librerías usadas en comparación con el nodo 1 solo se añade TinyGPSlibn2, la cual permite la interacción entre el módulo GPS y el Arduino.

Figura 56

Librerías nodo 2

```

#include <WISOL.h>
#include <Tsensors.h>
#include <Wire.h>
#include <math.h>
#include <SimpleTimer.h>
#include <avr/wdt.h>
#include "DHT.h"
#include <TinyGPS.h>

```

Luego de incluir las librerías, se empieza con la definición de los pines para el sensor de temperatura y para el módulo GPS, para utilizar el sensor de temperatura se utiliza el comando DHTPIN1 22, el número 22 indica el pin de Arduino usado como entrada digital para dicho sensor, una vez definido los pines se utiliza el comando DHTTYPE1 para distinguir entre los sensores DHT11 o DHT22, para este proyecto se escoge el DHT22 debido a las especificaciones técnica descritas en la (Tabla 10).

Para el módulo GPS se definen las variables que se van a utilizar para la toma de datos, dado que la longitud y latitud poseen cifras decimales. Las variables se las define como flotante lat y long, para preparar al módulo GPS se llama a la librería TinyGPS y se le asigna la opción de GPS para utilizar los seriales del Arduino Mega 2560.

Figura 57

Declaración de pines nodo 2

```
#define DHTPIN1 22
#define DHTTYPE1 DHT22
DHT dht1(DHTPIN1, DHTTYPE1);
float lat,lon;
TinyGPS gps;
```

Para inicializar la lectura del sensor DHT22 y el módulo GPS se tienen los comandos dht1.begin y Serial1.begin(9600) respectivamente, el Serial1 se utiliza para definir los pines 18 y 19 del Arduino Mega que se encargan de la Tx y Rx del primer serial; el módulo GPS necesita de un puerto serial físico, por tal motivo se utilizó el Arduino Mega que tiene 4 puertos seriales físicos, si no se cuenta con un puerto serial físico, en la programación al incluir la librería software serial genera un conflicto con la otras librerías.

Figura 58

Inicialización del sensor y módulo

```
Serial.begin(9600); // connect serial
Serial.println("The GPS Received Signal:");
dht1.begin();
Serial1.begin(9600); // connect gps sensor
```

El intervalo de tiempo que se estableció para el envío de mensajes es de 8 minutos lo que en programación corresponde a 500000 ms.

Figura 59

Intervalo de envío de mensajes

```
unsigned long sendInterval = 500000;
```

Para empezar la lectura de latitud y longitud mediante el módulo GPS , se crea la función *void loop ()* usada para la toma de datos de forma indefinida, adentro de esta función se utiliza condicionales, mientras el Serial1 detecte los datos empieza con la lectura de los datos de longitud y latitud y los asigna en las variable flotante Lat y Longi con tamaño de 32 bits o 4 bytes cada uno, y al final se coloca un delay de 20s entre cada toma de datos del GPS, caso contrario si el Serial1 no detecta datos no se asigna ningún valor a las variables. Si el código de lectura usando el Serial 1 se coloca en otra función se genera un error y la lectura de los datos no empieza.

Figura 60

Lectura de datos del módulo GPS

```

FLOATUNION_t  Lat, Longi;
void loop() {

    timer.run();
    wdt_reset();
    watchdogCounter = 0;
    while(Serial1.available()){ // check for gps data
        if(gps.encode(Serial1.read()))// encode gps data
        {
            gps.f_get_position(&lat,&lon); // get latitude and longitude
            Lat.number= (float) (lat);
            Longi.number= (float) (lon);
            delay(20000);
        }
    }
}

```

Para el envío de datos hacia el backend de Sigfox se utiliza la función `Send_Sensors()`.

En esta función se establece una variable de tipo flotante para la temperatura del sensor DHT22 y para la lectura se utiliza el comando `dht1.readTemperature()`, el cual permite obtener los datos de temperatura.

Figura 61

Lectura de los datos de temperatura

```

FLOATUNION_t  , templn2;
templn2.number = (float) (dht1.readTemperature());

```

En la misma función se establece la distribución de los 12 bytes para el envío de los datos hacia el backend de Sigfox, por lo tanto, al usar variables flotantes la latitud, longitud y temperatura se le asigna 4 bytes a cada una, ocupando los 12 bytes establecidos por SigFox.

Figura 62

Distribución de bytes para cada variable

```
const uint8_t payloadSize = 12; ,
uint8_t buf_str[payloadSize];

buf_str[0] = Lat.bytes[0];
buf_str[1] = Lat.bytes[1];
buf_str[2] = Lat.bytes[2];
buf_str[3] = Lat.bytes[3];
buf_str[4] = Longi.bytes[0];
buf_str[5] = Longi.bytes[1];
buf_str[6] = Longi.bytes[2];
buf_str[7] = Longi.bytes[3];
buf_str[8] = templn2.bytes[0];
buf_str[9] = templn2.bytes[1];
buf_str[10] =templn2.bytes[2];
buf_str[11] =templn2.bytes[3];
```

Programación Nodo 3

La programación del nodo 3 es la misma que la del nodo 1, la única diferencia es el nombre de las variables asignadas.

Figura 63

Declaración de variables nodo 3

```
templn3.number = (float) (dht1.readTemperature());
humln3.number = (uint16_t) (dht1.readHumidity()*100);
temp2n3.number = (float) (dht2.readTemperature());
nodo3.number = (uint16_t) (3);
```

Configuración de la Red Sigfox

De acuerdo con el diagrama de bloques mostrado en la Figura 30, los mensajes que se enviaron desde los nodos sensores llegan a las estaciones base desplegadas en la provincia de Pichincha, las cuales envían dichos mensajes hacia el backend o nube de Sigfox, que posteriormente, con la configuración de callbacks se redirecciona dicha información hacia el servidor de Azure.

El primer paso para poder utilizar el backend de Sigfox es la activación de los módulos de Dev Kit Thinxtra de Sigfox, los cuales cada uno trae su SigfoxID y el PAC. Para activar los módulos se tienen los siguientes pasos:

Entrar en la página web <https://buy.sigfox.com/> y seleccionar la opción de Activate my Devkit.

Figura 64

Página oficial de Sigfox para activación de módulos

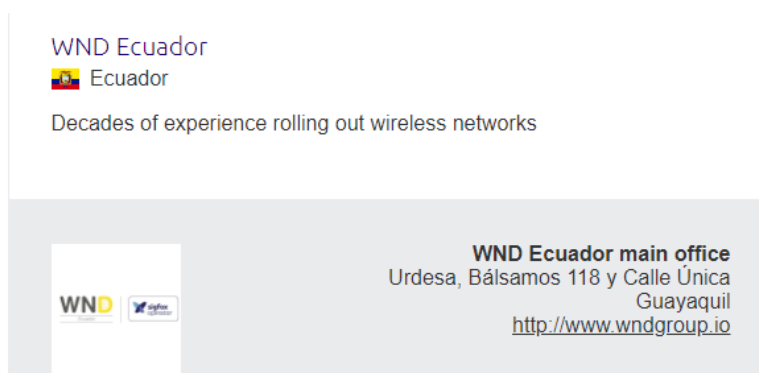


Una vez seleccionada la Activación del Devkit se procede con los siguientes pasos, los cuales son:

1. Country: En esta etapa se selecciona el país en el que se quiere usarlos módulo, por tal motivo se verifica si el país está disponible o no, en este proyecto se selecciona el país Ecuador.

Figura 65

Disponibilidad del País para la activación.



2. Devkit: En esta etapa se ingresa el SigfoxID y el PAC, únicos de cada equipo proporcionado por la empresa de Sigfox, para el nodo 1 se ingresa el ID:002BF277 y su PAC: 19BA9A931DCDC015.

Figura 66

Registro del ID y PAC de cada módulo

The screenshot shows the 'Devkit' step of the registration process. At the top, the 'sigfox buy' logo is on the left, and navigation links for 'Country', 'Devkit', 'Account', and 'Confirmation' are on the right. The main heading is 'Provide your DevKit's details for identification'. Below this, there are two required input fields: 'Device ID' (containing '002BF277') and 'PAC' (containing '19BA9A931DCAC015'). A large 'X' logo is positioned to the right of the fields, with the text 'DevKit available for activation.' below it.

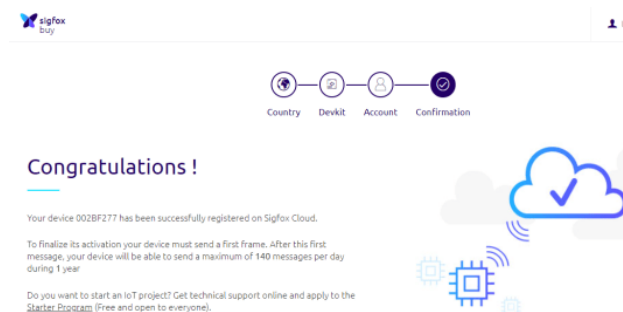
3. Account: En esta etapa se proporciona los datos para creación de la cuenta de activación, se especifica el nombre y apellido de la persona y su correo electrónico.

Figura 67

Información para creación de cuenta

The screenshot shows the 'Account' step of the registration process. At the top, the 'sigfox buy' logo is on the left, and navigation links for 'Country', 'Devkit', 'Account', and 'Confirmation' are on the right. The main heading is 'Provide your account details to proceed with activation'. Below this, there is a link: 'Already have a partner account or a Sigfox backend account? [Log in](#)'. The section 'Your information' contains three input fields: 'First Name' (containing 'Jenner'), 'Last Name' (containing 'Arias'), and 'Email' (containing 'jennerariasparedes@gmail.com').

4. Confirmation: En esta etapa muestra el registro exitoso del módulo y se presenta algunas características del backend de Sigfox.

Figura 68**Confirmación de registro del módulo**

Estas etapas se las realiza con los tres módulos utilizados para los nodos sensores.

Backend de Sigfox

Una vez activados los módulos, se ingresa a la página del Backend de Sigfox (<https://backend.sigfox.com/auth/login>), en donde se encuentran varias opciones como Dispositivo, tipo de dispositivo y grupo, en las versiones anteriores se contaba con más opciones, sin embargo, la empresa de Sigfox al actualizar eliminó los campos que permitía ver las estaciones base, datos como latitud, longitud y SNR. Para verificar que los módulos estén activados se selecciona la opción de Dispositivo (*del inglés DEVICE*).

Figura 69**Página principal del Backend de Sigfox**

Device type	Group	Id	Last seen	Name	Token state	Automatic token renewal	Communication status
Thintra_DevKit_2	UFA - ESPE	2BEDDF	2022-07-14 20:55:27	Thintra_DevKit_2-device	✓	✓	○
Thintra_DevKit_1	UFA - ESPE	2BF277	2022-07-14 20:58:30	Thintra_DevKit_1-device	✓	✓	○
Thintra_DevKit_3	UFA - ESPE	3F4052	2022-07-14 20:56:22	Thintra_DevKit_3-device	✓	✓	○

Nota. Esta imagen representa los 3 módulos de Sigfox conectados al backend con su respectivos ID.

Configuración del Callback

Esta configuración se la realiza para poder redireccionar los datos recibidos desde los nodos sensores hacia el servidor de Azure. Para poder acceder a esta configuración se selecciona DEVICE TYPE, luego el dispositivo y CALLBACKS, en donde se encuentra diferentes campos a completar. En este proyecto se describe a continuación cuales son los datos configurados en estos campos:

- **Type:** En este campo se selecciona la opción de data y uplink para que se reciba los datos desde los nodos sensores.
- **Custom payload config:** En este campo se especifica cuáles son los tipos de datos, su longitud y variables con las que se va a recibir los datos desde los nodos. Por ejemplo para el nodo1 se ingresa ***temp1::float:32:little-endian hum1::uint:16:little-endian temp2::float:32:little-endian nodo1::uint:16:little-endian***, primero se escribe la variable, luego el tipo de dato float para flotantes o uint para datos enteros y posteriormente el tamaño en bits de cada variable, 16 bits utilizados para enteros y 32 bits utilizados para flotantes.
- **Connection String:** En este campo se coloca un código que emite Azure para poder establecer la conexión entre el backend y el servidor de Azure, este código es de uso exclusivo.
- **JSON body:** En este campo se programa las variables que servirán para almacenar los datos que reciben desde los nodos sensores y para el envío hacia Azure. La programación en este tipo de datos empieza y finaliza con unas llaves {}, en su interior se debe escribir el nombre de la variable adentro de comillas dobles "", seguido de : , luego se escribe {customData#variable configurada en custom payload config}.

Figura 70

Configuración de callback del nodo 1

Device type Thinxtra_DevKit_1 - Callback edition

Type ⓘ

Custom payload config temp1::float:32:little-endian hum1::uint:16:little-endian temp2::float:32:little-endian no ⓘ

Connection string HostName=thesis-iot.azure-devices.net;SharedAccessKeyName=iothubowner;Share ⓘ

JSON body

```
{
  "temp1" : {customData#temp1},
  "hum1" : {customData#hum1},
  "temp2" : {customData#temp2},
  "nodo1" : {customData#nodo1},
  "timedev1" : {time}
}
```

Figura 71

Configuración del Callback nodo 2

Device type Thinxtra_DevKit_2 - Callback edition

You can find complete documentation about Azure IoT Hub following this [link](#). It explains where to find the Click on ⓘ buttons to display help relative to a particular field.

Callbacks

Type ⓘ

Custom payload config Latitud::float:32:little-endian Longitud::float:32:little-endian temp1n2::float:32:little-endian no ⓘ

Connection string HostName=thesis-iot.azure-devices.net;SharedAccessKeyName=iothubowner;Share ⓘ

JSON body

```
{
  "Latitud" : {customData#Latitud},
  "Longitud" : {customData#Longitud},
  "tempen2" : {customData#temp1n2},
  "timedev2" : {time}
}
```


Figura 72

Configuración del Callback nodo 3

Device type Thinxtra_DevKit_3 - Callback edition

You can find complete documentation about Azure IoT Hub following this [link](#). It explains where to find the Click on [?](#) buttons to display help relative to a particular field.

Callbacks

Type: DATA UPLINK [?](#)

Custom payload config: `temp1n3::float:32:little-endian hum1n3::uint:16:little-endian temp2n3::float:32:little-en` [?](#)

Connection string: `HostName=thesis-iot.azure-devices.net;SharedAccessKeyName=iiothubowner;Share` [?](#)

JSON body

```
{
  "temp1n3" : {customData#temp1n3},
  "hum1n3" : {customData#hum1n3},
  "temp2n3" : {customData#temp2n3},
  "nodo3" : {customData#nodo3},
  "timedev3" : {time}
}
```

Servidor Azure

Luego de la configuración de los callbacks en el backend, se procede a configurar los servicios brindados por el servidor de Azure.

Primero se necesita crear una cuenta en el portal de Azure, para lo cual, se utilizó el correo institucional brindado por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, al utilizar este correo se adquiere beneficios de estudiantes como tener algunos servicios gratis y un saldo inicial de 100 dólares para utilizarlos en diferentes servicios como base de datos, stream analytics, entre otros.

Creación de Grupo de Recursos

La creación de un grupo de recursos es necesaria para abarcar en un solo grupo los diferentes recursos o servicios que se usan en el desarrollo del proyecto. Para esta creación se deben seguir los siguientes pasos:

1. Se selecciona la opción inicio.
2. Se selecciona Grupo de Recursos.

3. Se selecciona crear.

Una vez se cumplan los pasos anteriores se completan los campos vacíos con la información necesaria, los principales campos se representan en la Tabla 18 a continuación:

Tabla 18

Configuración del grupo de recursos

Detalles del Proyecto	Selección
Suscripción	Azure for Students
Grupo de recursos	Thesis-sigfox
Región	Oeste de Estados Unidos

Configuración del Recurso IOT HUB

La principal función de este recurso es contener todos los datos que se envían desde el backend de SigFox hacia el servidor de Azure. Los pasos para la creación se describen a continuación:

1. Se selecciona la opción de inicio
2. Se selecciona la opción de más servicios
3. Se selecciona Internet de las Cosas
4. Se selecciona Centro de IoT

Luego de finalizar los pasos para la creación se despliega una ventana en la cual se debe proporcionar la información necesaria, dicha información se describe en la Tabla 19 a continuación:

Tabla 19

Creación del recurso IoT Hub

Detalles del Proyecto	Selección
Grupo de recursos	Thesis-sigfox

Detalles del Proyecto	Selección
Nombre IoT Hub	Tesis-iot
Región	Oeste de Estados Unidos
Conectividad	Acceso público
Nivel de precios y escala	S1: estándar

En este recurso se puede observar el ID de los módulos conectados con el servidor de Azure, esto se puede observar seleccionando el centro de IoT y luego Dispositivos.

Figura 73

Verificación de los módulos conectados con Azure

The screenshot displays the Azure IoT Hub interface for the 'thesis-iot' instance. The left sidebar contains navigation options like 'Información general', 'Registro de actividad', and 'Dispositivos'. The main content area shows a search bar and a table of devices. The table has two columns: 'Id. de dispositivo' and 'Estado'. Three devices are listed, all with 'Enabled' status.

Id. de dispositivo	Estado
2BEDDF	Enabled
2BF277	Enabled
3F4052	Enabled

Nota. Esta figura muestra los dispositivos conectados a Azure, este proyecto contiene 3 módulos conectados. Adaptado de *IoT Hub*, por Microsoft, 2022, (<https://docs.microsoft.com/es-es/azure/iot-hub/iot-hub-devguide-quotas-throttling>)

En la configuración de los callbacks se tiene un enlace que permite la conexión con Azure, en este recurso se obtiene este link, primero se debe entrar al recurso Centro IoT o IoT Hub, luego dirigirse a la opción Directivas de acceso compartido y por último seleccionar iothubowner como se observa en la siguiente Figura 74.

Figura 74

Link de conexión con el backend de Sigfox



Configuración de Base de Datos SQL

Para almacenar los datos recibidos desde el backend de SigFox, se necesita de diferentes tablas que almacenen dichos datos, para empezar con la configuración se debe seguir los siguientes pasos:

1. Se selecciona la opción inicio.
2. Se selecciona la opción más servicios.
3. Se selecciona base de datos.
4. Se selecciona SQL Database.

Una vez realizados los pasos anteriores se ingresan los datos necesarios para su creación, los cuales se describen en la Tabla 20.

Tabla 20*Configuración de la base de datos*

Detalles del proyecto	Selección
Grupo de recursos	Thesis-sigfox
Nombre de la base de datos	Basedatos-tesis
Servidor	Tesis-servidor-sigfox

Nota. La tabla indica los parámetros básicos para configurar la base de datos.

Luego de la configuración de la base de datos se genera automáticamente la configuración de SQL Server, el cual sirve como un almacenador de base de datos y permite la interacción con usuarios externos. Por tales motivos, se necesita establecer una configuración de administrador y contraseña para que solo el usuario principal pueda entrar en la configuración de la base de datos. La Tabla 21, presenta las configuraciones necesarias para establecer lo antes mencionado:

Tabla 21*Configuración de SQL Server*

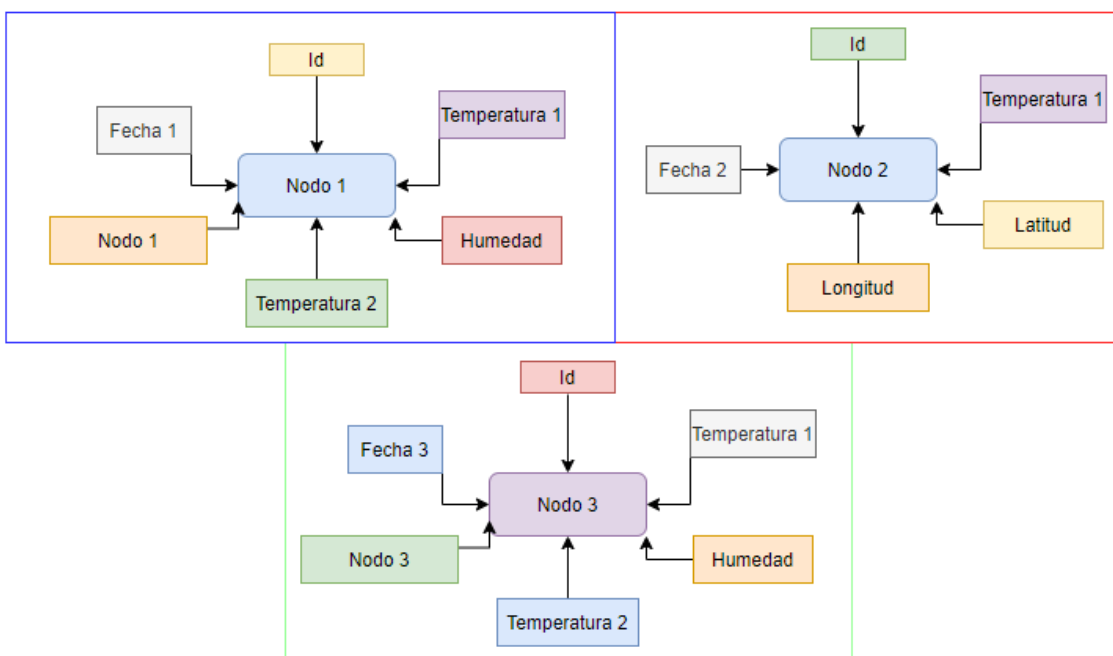
Propiedades del Proyecto	Selección
Nombre de Servidor	thesis-servidor-sigfox
Nombre de usuario	admin_db
Contraseña	Tesis1234

Nota. La tabla muestra los parámetros necesarios para configurar el servidor que contiene la base de datos.

Parámetros de la base de datos. Para que la base de datos pueda almacenar la información requerida se debe crear tablas con diferentes parámetros dependiendo de la información de cada nodo sensor, en la Figura 75 se presentan tres diagramas con los parámetros necesarios para cada nodo sensor.

Figura 75

Diagrama de parámetros de la base de datos



Nota. La figura muestra los tres diferentes diagramas con parámetros necesarios para crear las tablas de la base de datos para almacenar los diferentes datos.

En la Tabla 22 se representa los tipos de datos, su descripción y nombre de cada columna que almacenará la información del backend.

Tabla 22*Descripción de las columnas necesarias para base de datos*

Nombre de Tabla	Nombre de la Columna	Tipo de dato	Descripción
tabla 1	id	Entero	Número de mensaje recibido
	Temperatura_n1	Flotante	Temperatura del sensor 1
	Humedad_n1	Flotante	Humedad del sensor 1
	Temperatura2_n1	Flotante	Temperatura del sensor 2
	Nodo1	Flotante	Identificador del nodo
	fecha1	datetime	Fecha y hora de la recepción del dato
tabla2	id	Entero	Número de mensaje recibido
	Latitud	Flotante	Valor de la latitud del GPS
	Longitud	Flotante	Valor de la longitud del GPS
	Temperatura_n2	Flotante	Temperatura del sensor
	fecha2	datetime	Fecha y hora de la recepción del dato
tabla3	id	Entero	Número de mensaje recibido

Temperatura1_n3	Flotante	Temperatura del sensor 1
Humedad1_n3	Flotante	Humedad del sensor 1
Temperatura2_n3	Flotante	Temperatura del sensor 2
Nodo3	Flotante	Identificador del nodo
Fecha3	datetime	Fecha y hora de la recepción del dato

Nota. La tabla representa los tipos de datos, nombres de las columnas y su descripción precisa de lo que se almacenará en cada una.

Creación de las tablas para la base de datos. Para la creación de las 3 tablas para la base de datos, se usa la programación en SQL que permite: incrementar el id siempre que reciba un nuevo dato, generar filas para cada nuevo dato y asignar los nombres de las columnas.

```
CREATE TABLE [dbo].[tabla1] (
[id] [bigint] IDENTITY(1,1) NOT NULL,
[Temperatura_n1] [float] NULL,
[Humedad_n1] [float] NULL,
[Temperatura2_n1] [float] NULL,
[Nodo1] [float] NULL,
[fecha1] [datetime] NULL,
CONSTRAINT [PK_tabla1] PRIMARY KEY CLUSTERED
([id] ASC)
WITH (PAD_INDEX = OFF, STATISTICS_NORECOMPUTE = OFF, IGNORE_DUP_KEY =
OFF, ALLOW_ROW_LOCKS = ON, ALLOW_PAGE_LOCKS = ON) ON [PRIMARY]
) ON [PRIMARY]

CREATE TABLE [dbo].[tabla2] (
```



```

[id] [bigint] IDENTITY(1,1) NOT NULL,
[Latitud] [float] NULL,
[Longitud] [float] NULL,
[Temperatura_n2] [float] NULL,
[fecha2] [datetime] NULL,
CONSTRAINT [PK_tabla2] PRIMARY KEY CLUSTERED
([id] ASC)
WITH (PAD_INDEX = OFF, STATISTICS_NORECOMPUTE = OFF, IGNORE_DUP_KEY =
OFF, ALLOW_ROW_LOCKS = ON, ALLOW_PAGE_LOCKS = ON) ON [PRIMARY]
) ON [PRIMARY]
CREATE TABLE [dbo].[tabla3] (
[id] [bigint] IDENTITY(1,1) NOT NULL,
[Temperatura1_n3] [float] NULL,
[Humedad1_n3] [float] NULL,
[Temperatura2_n3] [float] NULL,
[Nodo3] [float] NULL,
[fecha3] [datetime] NULL,
CONSTRAINT [PK_tabla1] PRIMARY KEY CLUSTERED
([id] ASC)
WITH (PAD_INDEX = OFF, STATISTICS_NORECOMPUTE = OFF, IGNORE_DUP_KEY =
OFF, ALLOW_ROW_LOCKS = ON, ALLOW_PAGE_LOCKS = ON) ON [PRIMARY]
) ON [PRIMARY]

```

Una vez terminada la programación de las tablas se muestra el resultado ingresando en la base de datos creada anteriormente.

Figura 76

Tablas creadas para la base de datos

<ul style="list-style-type: none"> 🔗 id (PK, bigint, not null) ☰ Temperatura_n1 (float, null) ☰ Humedad_n1 (float, null) ☰ Temperatura2_n1 (float, null) ☰ Nodo1 (float, null) ☰ fecha1 (datetime, null) 	<ul style="list-style-type: none"> ☑️ dbo.tabla2 🔗 id (PK, bigint, not null) ☰ Latitud (float, null) ☰ Longitud (float, null) ☰ Temperatura_n2 (float, null) ☰ fecha2 (datetime, null) 	<ul style="list-style-type: none"> ☑️ dbo.tabla3 🔗 id (PK, bigint, not null) ☰ Temperatura1_n3 (float, null) ☰ Humedad1_n3 (float, null) ☰ Temperatura2_n3 (float, null) ☰ Nodo3 (float, null) ☰ fecha3 (datetime, null)
--	---	--

Nota. La figura representa las tablas creadas junto con sus columnas y tipo de datos.

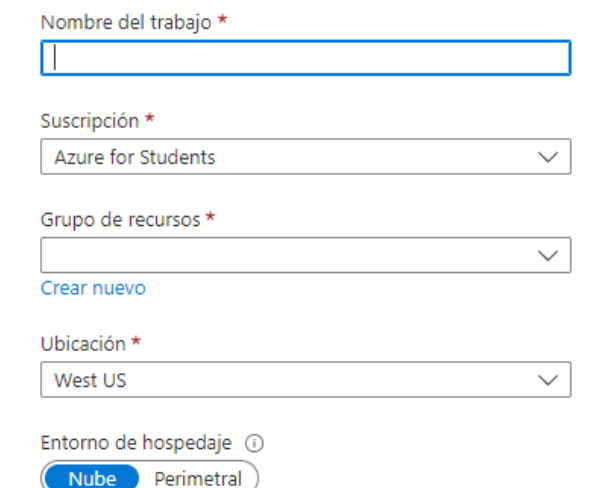
Configuración del Recurso Stream Analytics

Este recurso es usado para el análisis de los mensajes proporcionados por IoT Hub o por varios recursos que procesen información en tiempo real. Para la creación de este recurso se debe seguir los siguientes pasos:

1. Seleccionamos la opción crear nuevo recurso
2. Buscamos la opción Trabajo de Stream Analytics
3. Ingreso de la información necesaria para la creación
4. Seleccionamos la opción de crear.

Figura 77

Ingreso de información para crear el recurso



The screenshot shows a form for creating a Stream Analytics resource. It includes the following fields and options:

- Nombre del trabajo ***: A text input field.
- Suscripción ***: A dropdown menu with "Azure for Students" selected.
- Grupo de recursos ***: A dropdown menu with "Crear nuevo" selected.
- Ubicación ***: A dropdown menu with "West US" selected.
- Entorno de hospedaje ⓘ**: Two radio buttons, "Nube" (selected) and "Perimetral".

Nota. Esta figura representa los campos necesarios para la creación del recurso Stream Analytics.

Para completar los campos vacíos se procede a llenarlos con la información mostrada en la Tabla 23.

Tabla 23*Información seleccionada para Stream Analytics*

Propiedades del Proyecto	Selección
Nombre de trabajo	Stream Analytics
Suscripción	Azure for Students
Grupo de recursos	Thesis-sigfox
Ubicación	Oeste de Estados Unidos
Entorno de Hospedaje	Nube

Una vez creado el recurso se procede a configurar las entradas y salidas que son necesarias para poder obtener los datos y poder almacenarlos.

Configuración de entradas y salidas. Para poder obtener los datos se debe crear una entrada, para lo cual, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Se selecciona la opción topología de trabajo.
2. Se selecciona la opción entrada.
3. Se selecciona la opción agregar entrada de flujo
4. Se selecciona Centro IoT.
5. Se ingresan los datos requeridos como se observa en la Tabla 24.
6. Se selecciona la opción crear nueva cuenta.

Tabla 24*Ingreso de datos para crear una entrada*

Propiedad del Proyecto	Selección
Nombre de entrada	iot_input
Centro de lot	thesis_iot
Grupo de consumidores	\$Default
Punto de conexión	Mensajes
Formato de serialización de eventos	JSON
Codificación	UFT-8

Propiedad del Proyecto	Selección
Tipo de compresión	Ninguno

Luego de crear la entrada de datos para Stream Analytics se procede a configurar las salidas, en este caso las salidas representan las tablas de la base de datos creadas anteriormente, para su creación se deben seguir los siguientes pasos:

1. Se selecciona la topología de consulta.
2. Se selecciona opción de salidas.
3. Se selecciona la opción agregar salidas.
4. Se selecciona SQL Database.
5. Se completa los campos vacíos con la información proporcionada en la Tabla 25.
6. Se selecciona la opción crear nueva salida.

Tabla 25

Ingreso de datos para crear una salida

Propiedad del Proyecto	Salida tabla 1	Salida tabla 2	Salida tabla 3
Nombre de salida	to-tab1	to-tab2	to-tab3
Nombre de servidor	thesis-servidor-sigfox	thesis-servidor-sigfox	thesis-servidor-sigfox
Base de datos	basedatos-tesis	basedatos-tesis	basedatos-tesis
Nombre de usuario	admin_db	admin_db	admin_db

Para obtener los datos desde la entrada y enviarlos a las salidas antes creadas, se debe realizar la programación de consultas.

Creación de Consulta. Para poder tener un manejo de información de cómo se deben agrupar los datos que ingresan y a donde redirigirlos, se realiza la programación en lenguaje SQL , en donde se utiliza diferentes comandos como FROM que es utilizado para saber el

origen de los datos, SELECT que es usado para agrupar una nueva tabla semejante a la creada en la base de datos, WITH que es usada para identificar cuáles son las variables que reciben los datos desde el origen, INTO que es usado para establecer cuáles son las salidas.

```
WITH dev as (  
SELECT  
GetMetadataPropertyValue([iot-input], 'IoTHub.ConnectionDeviceId') as devID,  
  
(CAST (temp1 as float)) as Temperatura_n1,  
(CAST (hum1 as float)/100) as Humedad_n1,  
(CAST (temp2 as float)) as Temperatura2_n1,  
(CAST (nodo1 as float)) as Nodo1,  
(CAST (Latitud as float)) as Latitud,  
(CAST (Longitud as float)) as Longitud,  
(CAST (tempen2 as float)) as Temperatura_n2,  
(CAST (temp1n3 as float)) as Temperatura1_n3,  
(CAST (hum1n3 as float)/100) as Humedad1_n3,  
(CAST (temp2n3 as float)) as Temperatura2_n3,  
(CAST (nodo3 as float)) as Nodo3  
  
FROM  
    [iot-input]  
)  
SELECT  
Temperatura_n1,  
Humedad_n1,  
Temperatura2_n1,  
Nodo1,  
System.Timestamp() as fecha1  
INTO  
[tabla1]
```

```
FROM dev
WHERE devID='2BF277';

SELECT
Latitud,
Longitud,
Temperatura_n2,
System.Timestamp() as fecha2
INTO
[tabla2]
FROM dev
WHERE devID='2BEDDF'

SELECT
Temperatura1_n3,
Humedad1_n3,
Temperatura2_n3,
Nodo3,
System.Timestamp() as fecha3
INTO
[tabla3]
FROM dev
WHERE devID='3F4052'
```

En el código anterior también se coloca el devID de cada módulo de Sigfox para poder tener conocimiento de la tabla a la que se debe dirigir los datos que llegan de cada módulo.

Visualización de datos

Para poder visualizar los datos almacenados en la base de datos se realizó una aplicación web mediante el uso de Power BI y una aplicación móvil para dispositivos Android realizados con App Inventor de MIT.

Para publicar el diseño de la página web y ser visible para todo el mundo, se debe seguir los siguientes pasos.

1. Se selecciona la opción Archivo
2. Se selecciona Insertar Informe
3. Se selecciona publicar en la web(público)

Al completar estos pasos se despliega una ventana que indica el código generado para colocar en el buscador y desplegar la página web, además se genera un código HTML que se puede usar en diferentes aplicaciones que requieran de los datos.

Figura 78

Publicación de página web

Código para insertar
Vínculo que puede enviar por correo electrónico

<https://app.powerbi.com/view?>

Copia

Código HTML que puede pegar en un sitio web

`<iframe title="Tesis con import`

Copia

Tamaño: 600 x 373,5 px

Imagen de marcador de posición

Cargar
Eliminar

Microsoft Power BI 1 de 6

Nota. Códigos generados para la publicación de páginas web tanto para browser y para diferentes aplicaciones.

Creación de Dashboard

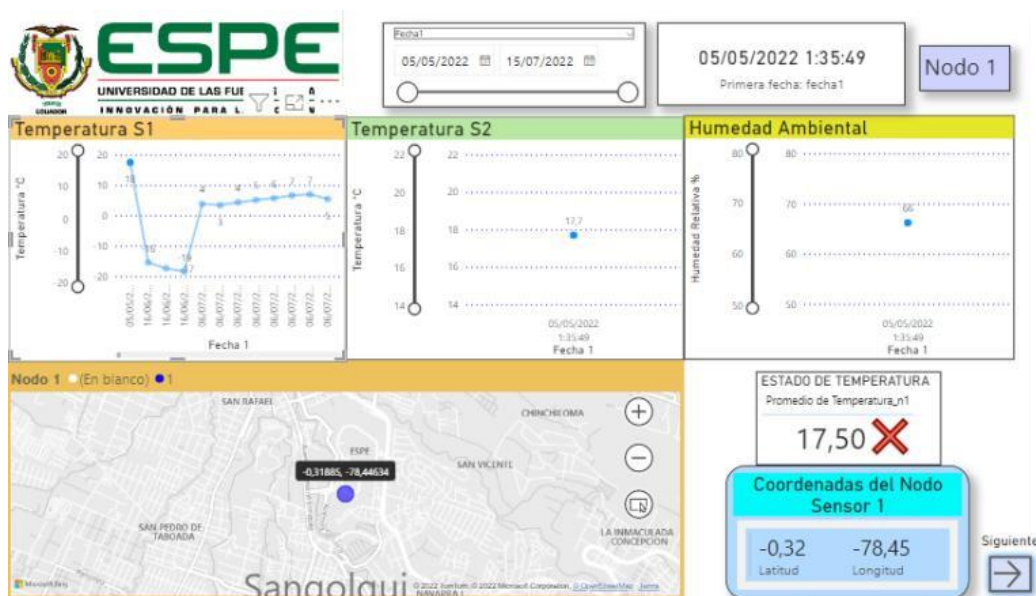
Para poder publicar la página web primero se debe configurar el dashboard que permite la visualización de los datos mediante cuadros gráficos. El primer paso para la creación es la conexión de la base de datos de Azure con Power BI, para esto se selecciona SQL Server, se coloca el nombre y posteriormente se selecciona la opción de importar, estableciendo la conexión entre la base de datos y Power BI.

En la Figura 79 se muestra la página principal para los datos y la Figura 80 muestra la página que se utiliza para la toma de datos en tiempo real. El dashboard está formado por 6 páginas, de las cuales las dos primeras representan al nodo 1, las dos siguientes al nodo 2 y por último las otra dos al nodo 3.

Estos dashboards contienen indicadores de humedad, temperatura y posición de la implementación de cada nodo sensor, además dispone de un indicador de nivel de temperatura mostrando una X en rojo cuando la temperatura excede el rango moderado y un indicador en la parte superior del nodo al que pertenece.

Figura 79

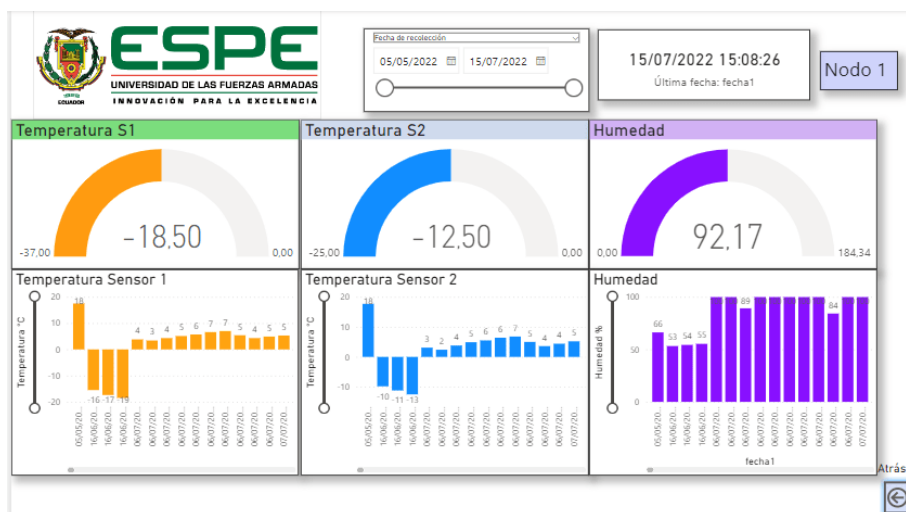
Página principal del dashboard



Nota. Esta figura representa la página principal del nodo 1, indicando los diferentes datos como temperatura sensor 1 y 2, humedad, indicador de nivel de temperatura, posicionamiento, etc.

Figura 80

Página secundaria



Nota. En esta figura se muestra temperatura del sensor 1 y 2, humedad en tiempo real.

Aplicación Móvil

La aplicación móvil fue desarrollada en el software de MIT APP INVENTOR, el cual es usado para el desarrollo de aplicaciones Android a nivel mundial, su interfaz gráfica permite realizar las aplicaciones de forma intuitiva, ya que permite visualizar la pantalla de un celular modelo e ir colocando las diferentes características que requiera la aplicación como pueden ser botones, recuadros de texto, imágenes, entre otros.

La aplicación realizada cuenta con una pantalla inicial, la cual permite visualizar los campos para el usuario y contraseña, estos fueron diseñados para evitar que cualquier persona pueda manipular los datos obtenidos del proyecto implementado. El usuario y contraseña tiene un sistema de validación que permite el ingreso a las diferentes opciones de selección de nodo; si estos campos son llenados incorrectamente despliega un mensaje indicando que el “usuario o contraseña están incorrectos”, caso contrario permite el ingreso a la siguiente pantalla, lo cual se puede evidenciar en la Figura 81.

Figura 81

Pantalla principal de la aplicación.



Nota. Verificación de usuario y contraseña para ingreso a la selección de nodos.

Al colocar el usuario y contraseña correctos, ingresa a un menú de selección de nodos como se presenta en la Figura 82, en este menú se encuentran cuatro botones, tres de ellos

destinados para cada nodo respectivamente y uno destinado para la opción de salir, el cual permite regresar a la pantalla inicial.

Figura 82

Menú de selección.



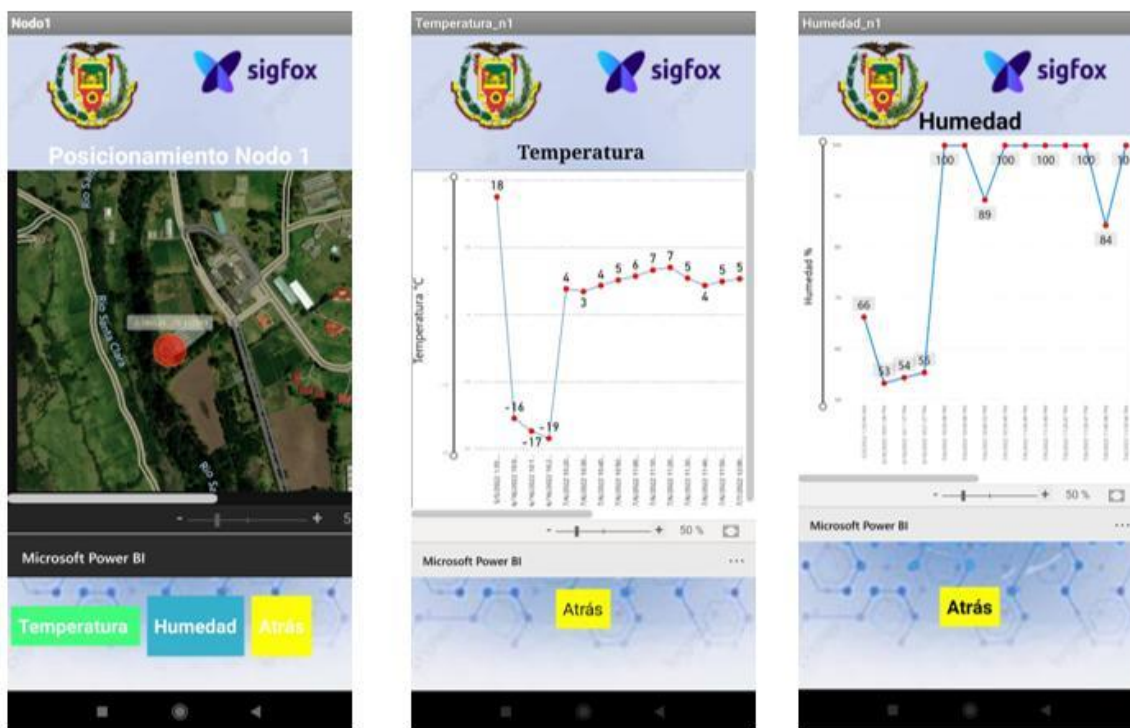
Nota. La pantalla indica el menú que permite seleccionar el nodo a visualizar los datos.

Cuando se selecciona el botón de la opción Nodo 1 se despliega una pantalla que contiene un mapa satelital que indica con coordenadas el lugar exacto de la implementación del nodo, en la parte inferior se encuentran tres botones uno para visualizar la temperatura, otro para visualizar los datos de la humedad relativa y el otro para regresar a la pantalla anterior. Cuando se presiona en el botón de temperatura aparece una gráfica dinámica indicando los datos del sensor de temperatura permitiendo acercar, alejar, recorrer de izquierda a derecha y visualizar los datos en una determinada fecha. Al presionar el botón de la humedad igual que en el botón anterior, aparece una gráfica dinámica que permite realizar las mismas acciones,

pero con la diferencia de que esta indicará la humedad relativa porcentual, como se indica en la Figura 83.

Figura 83

Pantallas de visualización nodo 1



Nota. La pantalla del lado izquierdo indica el lugar de implementación del nodo, la pantalla que se ubica en la parte central indica los datos de temperatura adquiridos por el sensor, y la pantalla de la derecha indica los datos de humedad relativa porcentual adquiridos por el sensor.

Cuando se presiona el botón del Nodo 2, se despliega una pantalla que indica los datos de temperatura del sensor en una gráfica dinámica, en la parte inferior se encuentran dos botones uno en el lado izquierdo (Ruta) y el otro en el lado derecho (Atrás) que permite regresar a la pantalla de menú. Si se presiona el botón de Ruta aparece un mapa con varias coordenadas, indicando la posición que tenía el vehículo de transporte en determinada fecha y hora, indicando cual es la ruta seguida.

Figura 84
Pantallas de visualización Nodo 2



Nota. En la parte izquierda se observa la gráfica dinámica con los datos de temperatura en distintas fechas adquiridas por el sensor, en la parte derecha se observa la ruta que ha seguido el transporte.

Cuando se presiona el botón del Nodo 3, aparecen pantallas similares a las del nodo 1, pero con los datos de los sensores del nodo 3 y su propia ubicación, esto se puede observar en la Figura 85.

Figura 85

Pantallas de visualización de Nodo 3.



Nota. Para acceder a la pantalla del centro y del lado derecho se debe presionar en temperatura o Humeda respectivamente, y si se requiere regresar a la pantalla anterior se presiona el botón atrás.

Capítulo V

Análisis de Resultados

Datos Obtenidos

La toma de datos se inició desde el día 6 de julio del 2022 hasta el día 22 de septiembre de 2022, por tal motivo se obtuvieron datos durante 79 días seguidos sin interrupción. A continuación, las Tablas 26, 27 y 28 presentan muestras de cada nodo sensor extraídas desde la base de datos, esto para indicar datos de temperatura, humedad, latitud y longitud necesarios para el análisis que se realizará posteriormente en este capítulo.

Tabla 26

Datos adquiridos de la base de datos para el Nodo 1

id	Temperatura_n1	Humedad_n1	Temperatura2_n1	Nodo1	fecha1
1	4,1	99,9	4	1	6/7/2022 21:40
2	3,4	99,9	2,4	1	6/7/2022 21:50
3	5,1	99,9	4,9	1	6/7/2022 22:00
4	3,4	99,9	2,4	1	6/7/2022 22:10
5	3,8	99,9	3,1	1	6/7/2022 22:20
6	3,4	99,9	2,4	1	6/7/2022 22:30
8	5,1	99,9	4,9	1	6/7/2022 22:50
9	5,7	99,9	5,5	1	6/7/2022 23:00
10	6,6	99,9	6,4	1	6/7/2022 23:10
11	7	99,9	6,8	1	6/7/2022 23:20
12	5,4	99,9	5	1	6/7/2022 23:30
13	4,9	99,9	4,4	1	6/7/2022 23:50
14	5,3	99,9	5,3	1	7/7/2022 0:00

id	Temperatura_n1	Humedad_n1	Temperatura2_n1	Nodo1	fecha1
15	5,3	99,9	5,2	1	7/7/2022 0:10
16	5	99,9	4,9	1	7/7/2022 0:20

Nota. La tabla representa una pequeña muestra de los datos extraídos de la base de datos que se utilizará para realizar el análisis de resultados.

Tabla 27

Datos adquiridos de la base de datos para el Nodo 2

id	Latitud	Longitud	Temperatura_n2	fecha2
1	-0,319363	-78,445840	19,2	2/6/2022 18:24
2	-0,249842	-78,498474	15,1	27/6/2022 19:40
3	-0,249766	-78,498560	15,1	27/6/2022 19:45
4	-0,249998	-78,498474	15,1	27/6/2022 19:49
5	-0,249776	-78,498430	15,3	27/6/2022 20:10
6	-0,24982	-78,498380	15,3	27/6/2022 20:15
7	-0,249768	-78,498460	15,4	27/6/2022 20:19
8	-0,249751	-78,498450	15,5	27/6/2022 20:31
9	-0,249765	-78,498630	14,2	27/6/2022 20:39
10	-0,24978	-78,498590	14,7	27/6/2022 21:16
11	-0,249768	-78,498360	14,2	27/6/2022 21:24
12	-0,249771	-78,498410	14,1	27/6/2022 21:33

Nota. La tabla presenta datos de latitud, longitud y temperatura que son de utilidad para obtener la ubicación de la unidad de transporte de productos perecederos y establecer la ruta que sigue.

Tabla 28*Datos adquiridos de la base de datos para el Nodo 3*

id	Temperatura1_n3	Humedad1_n3	Temperatura2_n3	Nodo3	fecha3
1	-10,7	0,6	-14,9	3	27/6/2022 19:47
2	-7,5	88,1	-2,8	3	27/6/2022 20:15
3	-14,9	60,2	-15,3	3	27/6/2022 20:31
4	-17,0	59,8	-16,5	3	27/6/2022 20:38
5	-18,6	60,8	-18,4	3	27/6/2022 20:50
6	-19,8	58,7	-19,0	3	27/6/2022 21:10
7	-20,0	55,7	-19,	3	27/6/2022 21:20
8	-20,3	54,6	-19,50	3	27/6/2022 21:30
9	-20,5	53,4	-19,7	3	27/6/2022 21:40
10	-18,1	65,9	-15,0	3	27/6/2022 21:50
11	-18,7	53,1	-18,0	3	27/6/2022 22:10
12	-21,5	47,9	-20,7	3	27/6/2022 22:20

Calidad del Enlace

El análisis de la calidad del enlace es de gran importancia para verificar el estado, calidad de transmisión, pérdida de datos y verificación de llegada de mensajes; todas estas variables mencionadas se las puede obtener específicamente del Backend de Sigfox, sin embargo, anteriormente se podía obtener otros parámetros como SNR, delay, latitud y longitud de los dispositivos de Sigfox implementados, pero en el año 2020 se realizó una actualización que no permite obtener estos últimos parámetros mencionados. Por tal motivo en la Tabla 29 se presentan los datos de RSSI y mensajes recibidos por día de los tres nodos sensores extraídos del Backend.

Tabla 29*Parámetros necesarios para analizar la calidad de la señal*

Nodo 1		Nodo 2		Nodo 3		Fecha
RSSI [dBm]	Mensajes Recibidos	RSSI [dBm]	Mensajes Recibidos	RSSI [dBm]	Mensajes Recibidos	
-108	142	-127	126	-113	138	6-jul
-107	142	-118	141	-110	139	7-jul
-107	144	-115	125	-110	142	8-jul
-110	143	-126	124	-109	139	9-jul
-107	144	-112	114	-113	143	10-jul
-108	142	-123	139	-111	141	11-jul
-107	141	-111	119	-110	140	12-jul
-108	140	-122	128	-112	137	13-jul
-108	144	-123	104	-111	137	14-jul
-110	141	-125	123	-111	143	15-jul
-107	143	-113	120	-111	141	16-jul
-109	141	-119	102	-109	142	17-jul
-107	144	-112	120	-113	139	18-jul
-107	140	-118	142	-112	138	19-jul
-110	142	-118	104	-112	141	20-jul
-107	144	-110	111	-109	143	21-jul
-107	140	-125	103	-110	137	22-jul
-110	144	-113	139	-111	138	23-jul
-110	142	0	0	-113	141	24-jul
-109	143	0	0	-113	143	25-jul

RSSI [dBm]	Mensajes Recibidos	RSSI [dBm]	Mensajes Recibidos	RSSI [dBm]	Mensajes Recibidos	Fecha
-109	141	0	0	-109	143	26-jul
-110	143	0	0	-113	139	27-jul
-108	140	0	0	-111	139	28-jul
-109	143	0	0	-113	141	29-jul
-108	142	-115	135	-111	141	30-jul
-109	140	-111	112	-112	141	31-jul
-107	141	-123	123	-111	140	1-ago
-108	140	-114	127	-113	138	2-ago
-109	140	-111	114	-113	144	3-ago
-110	144	-114	108	-111	142	4-ago
-109	142	-115	132	-113	139	5-ago
-109	140	-121	139	-112	142	6-ago
-108	141	-117	103	-110	142	7-ago
-108	142	-113	126	-110	141	8-ago
-110	144	-115	123	-110	137	9-ago
-107	144	0	0	-111	142	10-ago
-109	141	0	0	-111	141	11-ago
-107	144	0	0	-113	144	12-ago
-109	140	0	0	-112	141	13-ago
-109	144	0	0	-110	144	14-ago
-107	144	0	0	-110	138	15-ago
-108	141	-112	129	-112	144	16-ago
-107	143	-122	142	-111	143	17-ago

RSSI [dBm]	Mensajes Recibidos	RSSI [dBm]	Mensajes Recibidos	RSSI [dBm]	Mensajes Recibidos	Fecha
-107	141	-110	143	-110	142	18-ago
-108	142	-126	114	-112	140	19-ago
-107	141	-120	118	-112	144	20-ago
-109	144	-124	135	-113	141	21-ago
-108	143	-117	132	-112	138	22-ago
-107	140	-117	122	-113	142	23-ago
-110	140	-117	116	-112	142	24-ago
-109	142	-110	102	-113	141	25-ago
-108	140	-116	113	-112	143	26-ago
-107	142	-113	124	-112	138	27-ago
-110	140	-114	120	-113	142	28-ago
-109	142	-117	116	-113	141	29-ago
-110	141	0	0	-111	137	30-ago
-110	144	0	0	-111	143	31-ago
-108	141	0	0	-112	137	1-sep
-107	140	0	0	-109	141	2-sep
-109	141	0	0	-110	141	3-sep
-109	144	-118	110	-111	138	4-sep
-107	140	-125	114	-109	142	5-sep
-107	142	-120	132	-113	143	6-sep
-108	142	-118	122	-111	143	7-sep
-110	144	-127	128	-110	141	8-sep
-109	144	-118	101	-112	139	9-sep

RSSI [dBm]	Mensajes Recibidos	RSSI [dBm]	Mensajes Recibidos	RSSI [dBm]	Mensajes Recibidos	Fecha
-107	144	-116	105	-113	142	10-sep
-110	144	-126	127	-112	144	11-sep
-107	144	-120	136	-112	138	12-sep
-108	143	0	0	-110	137	13-sep
-107	143	0	0	-111	137	14-sep
-110	140	0	0	-110	139	15-sep
-108	141	-119	127	-109	140	16-sep
-110	144	-126	144	-113	144	17-sep
-109	142	-124	130	-109	138	18-sep
-110	142	-121	114	-112	143	19-sep
-109	143	-110	144	-110	144	20-sep
-107	140	-115	138	-111	142	21-sep
-108	140	-124	112	-110	144	22-sep

Nota. La tabla presenta los parámetros de RSSI y Mensajes Recibidos de cada uno de los nodos durante los 79 días que se recolectaron los datos, los datos que presentan valores de cero se deben a que la unidad de transporte salió del área de cobertura de la red de Sigfox y no se recibieron mensajes.

Mensajes Enviados

Como se indica en la Tabla 30 se tiene el número de mensajes recibidos de cada nodo sensor, de la cual se puede extraer los rangos y medias de mensajes recibidos; a su vez se puede calcular el número de mensajes perdidos y bytes enviados hacia la red de Sigfox.

Tabla 30*Mensajes recibidos, perdidos y totales.*

Nodo Sensor 1			
	Mensajes	Bytes	Porcentaje
Recibidos	11220	134640	98.63%
Perdidos	156	1872	1.37%
Media diaria	142	1704	-
Total	11376	136512	100%
Nodo Sensor 2			
	Mensajes	Bytes	Porcentaje
Recibidos	7236	86832	63.61%
Perdidos	4140	49680	36.39%
Media diaria	123	1476	-
Total	11376	136512	100%
Nodo Sensor 3			
	Mensajes	Bytes	Porcentaje
Recibidos	11119	133428	97.64%
Perdidos	257	3084	2.25%
Media diaria	141	1692	-
Total	11376	136512	100%

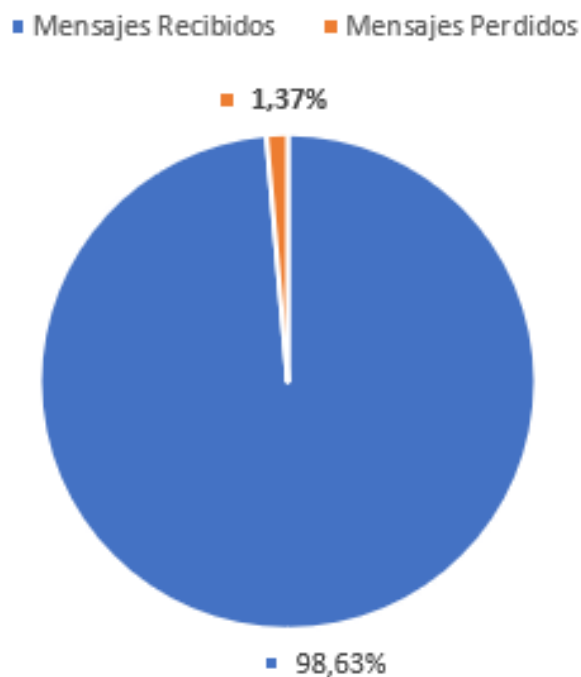
Nota. Los mensajes recibidos para realizar los cálculos se obtuvieron del Backend de Sigfox.

El análisis de los mensajes recibidos y perdidos se realizará de cada nodo sensor por separado.

Para el nodo 1 se recibió 11220 mensajes de 11376, llegando a tener una pérdida de 156 mensajes durante los 79 días de la toma de datos, en términos porcentuales los mensajes perdidos representan el 1.37 % del valor total como se observa en la Figura 86, este valor está por debajo del 5% del rango de tolerancia para que influya de forma significativa en los mensajes recibidos, además se puede considerar que la pérdida de información es muy baja.

Figura 86

Mensajes recibidos y perdidos del Nodo 1

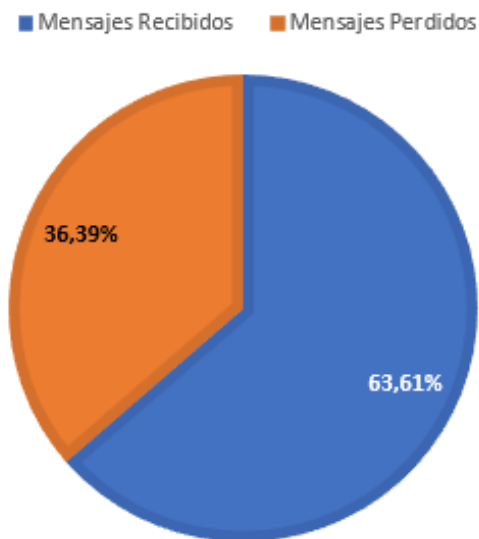


Para el Nodo 2 se recibió 7236 mensajes de 11376, llegando a tener una pérdida de 4140 mensajes, en términos de porcentaje los mensajes perdidos representan el 36.39% del valor total de los mensajes como se observa en la Figura 87, este valor ya es considerado muy alto para desestimar un efecto negativo en la recepción de los mensajes, estas cifras tienen un alto valor en pérdida debido a que el nodo sensor 2 se instaló en el vehículo de transporte de productos precederos y al trasladarse de un sitio a otro se pierde cobertura de la red. Además,

esta unidad de transporte sale del área de cobertura evitando cualquier tipo de envío de mensajes hacia la red por los días que se encuentra fuera de dicha área por lo que se tiene pérdida de datos.

Figura 87

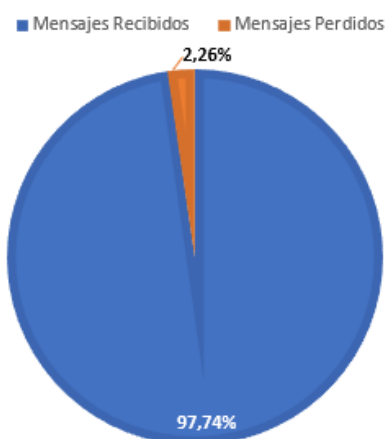
Mensajes recibidos y perdidos para el Nodo 2



Para el nodo 3 se recibió 11119 mensajes de 11376, llegando a tener una pérdida de 257 mensajes, en términos de porcentajes los mensajes perdidos representan el 2.25 % del valor total como se observa en la Figura 88. Este valor está por debajo del 5% del rango de tolerancia para que influya de forma significativa en los mensajes recibidos, estos valores indican que mientras el nodo sensor este fijo en un lugar y tenga una buena cobertura, no hay pérdidas de mensajes considerables para desestimar el uso de la red de Sigfox.

Figura 88

Mensajes recibidos y perdidos para el Nodo 3



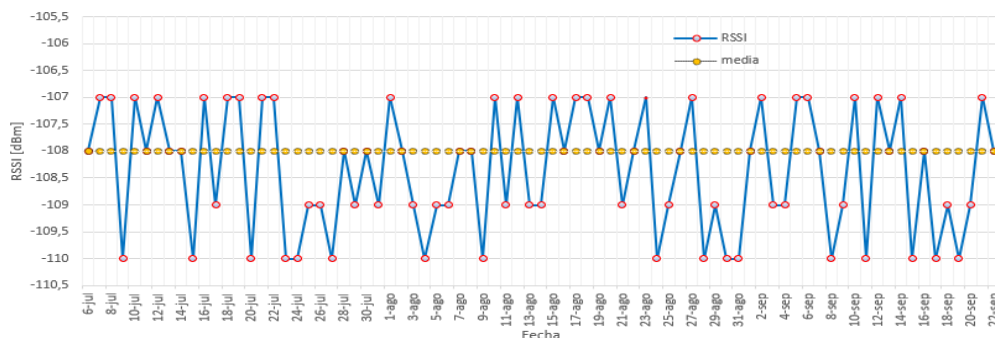
RSSI (Received Signal Strength Indicator)

El RSSI es un valor que indica la potencia con la que se recibe una señal y se expresa en dBm; para realizar el análisis de la fuerza de la señal recibida se describirá cada nodo por separado.

Para el Nodo 1 se tiene valores de RSSI que varían entre los -110 dBm y -107 dBm, siendo el primero el valor más bajo y el segundo el valor más alto alcanzado, su media aproximada es de -108 dBm como se observa en la Figura 89.

Figura 89

RSSI del Nodo 1

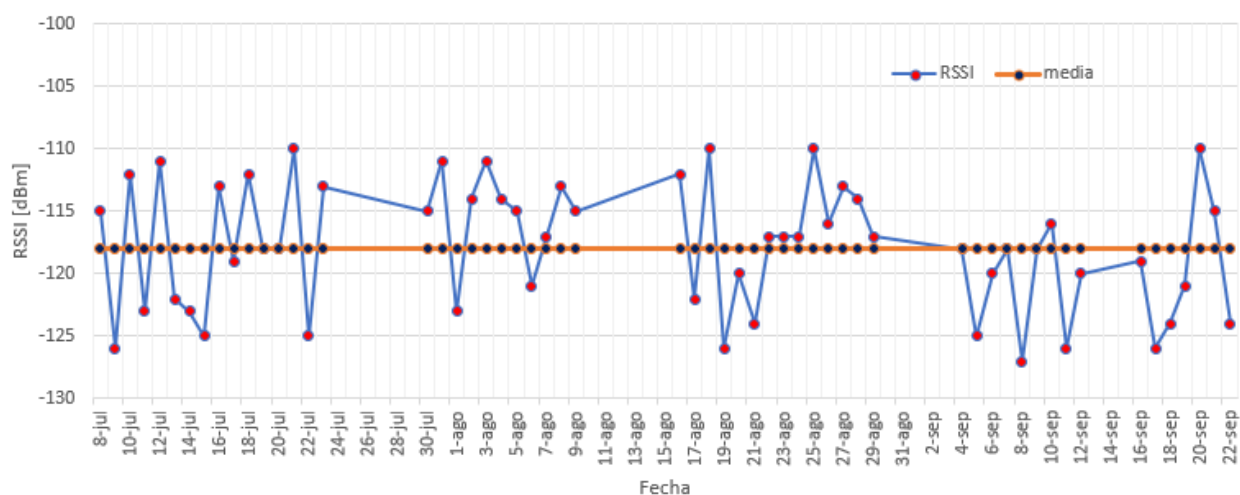


Nota. Los valores que se presentan en la gráfica fueron obtenidos de un promedio diario durante los 79 días consecutivos del backend de Sigfox.

Para el Nodo 2 se tiene valores de RSSI que varían entre los -110 dBm y -127 dBm y su media aproximada es de -118 dBm, en la Figura 90 se observan varios espacios en la gráfica, esto se debe a que no se obtuvieron datos en esas fechas porque el vehículo de transporte de productos perecederos salió de la provincia de Pichincha y por lo tanto de la zona de cobertura de Sigfox desplegada en el Ecuador.

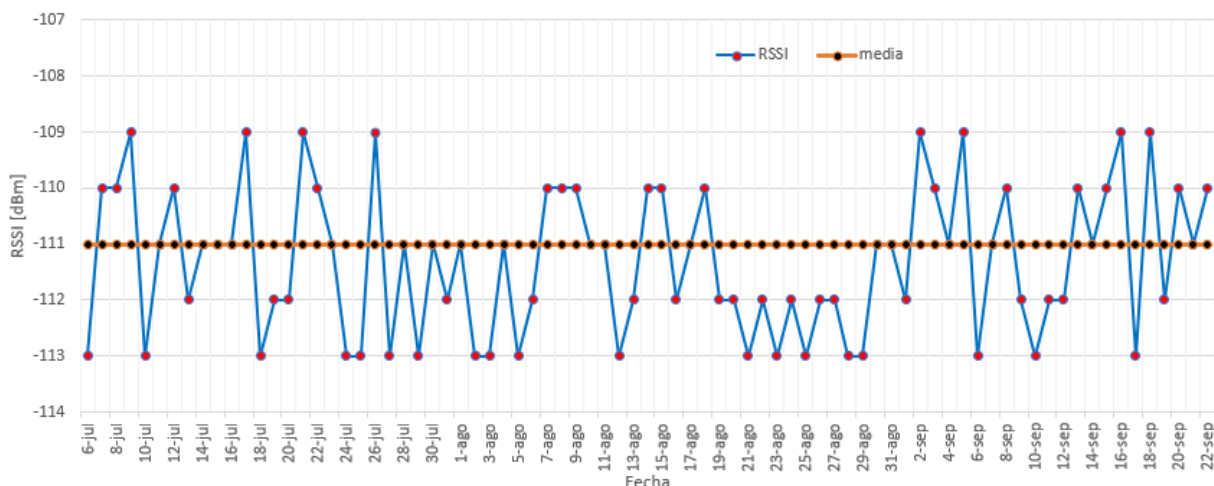
Figura 90

RSSI del Nodo 2



Nota. Los datos obtenidos representan un promedio diario.

Para el Nodo 3 se tiene valores de RSSI que varían entre los -109 dBm y -113 dBm, siendo su media aproximada de -111 dBm como se observa en la Figura 91.

Figura 91*RSSI del Nodo 3*

Nota. Los datos obtenidos representan un promedio diario.

Tabla 31

Comparación de rango y media de los niveles de RSSI.

	Nodo Sensor 1	Nodo Sensor 2	Nodo Sensor 3
Rango	-110 dBm a -107 dBm	-110 dBm a -127 dBm	-113 dBm a -109 dBm
Media	-108dBm	-118 dBm	-111 dBm

Nota. La tabla presenta los resultados obtenidos del análisis de los niveles de RSSI otorgados por el Backend de Sigfox.

Una vez obtenidos los valores de los rangos y la medias de RSSI presentados en la Tabla 31, se puede realizar una comparación entre los tres nodos, el primer nodo tiene una media de -108 dBm, el segundo nodo de -118 dBm y el tercer nodo de -111dBm. Debido a que la red SigFox tiene cobertura únicamente en la ciudad de Quito y al estar instalado el segundo nodo en un vehículo de transporte que viaja a la ciudad de Latacunga, se presentan eventos de pérdida de señal. El nodo 1 en comparación con el nodo 3 posee mayor nivel de señal debido a su instalación; el nodo sensor 1 fue colocado en los exteriores del cuarto frío del IASA por lo que posee mejor nivel de señal, mientras que el nodo sensor 3 fue colocado en un ambiente

indoor donde existen elementos a su alrededor como paredes, puertas y ventanas que degradan la potencia de la señal de la red.

Link Quality Indicator (LQI)

El indicador de la calidad del enlace LQI (del inglés *Link Quality Indicator*) es una indicación de calidad de paquete de datos recibidos, este indicador es otorgado por Sigfox y se calcula en base a los indicadores de la señal y está disponible para cada uno de los mensajes recibidos a través del Backend de Sigfox.

Tabla 32

Indicador de calidad del enlace en zona RC2 y RC4.

Indicador de Calidad del enlace	Número de Estaciones Base	RSSI
EXCELENTE	3	-114 dBm < RSSI
BUENO	1 o 2	-114 dBm < RSSI
BUENO	3	-127 dBm < RSSI ≤ -114 dBm
PROMEDIO	1 o 2	-127 dBm < RSSI ≤ -114 dBm
LIMITE	Cualquiera	RSSI ≤ -127 dBm

Nota. Adaptado de Link Indicator Quality, por Sigfox, 2022,

(<https://support.sigfox.com/docs/link-quality:-general-knowledge>)

La tabla 32 muestra el indicador de la calidad del enlace mediante el RSSI, a su vez se indica cuantas estaciones base estuvieron involucradas al momento de realizar el envío de los mensajes hacia el backend, mientras los niveles de enlace sean mayores a los -114 dBm se considera un Indicador Excelente, por el contrario si el valor es menor o igual a los -127 dBm se considera un indicador al Límite, esto quiere decir que su nivel de calidad está al mínimo y podría perderse mensajes e información, que a futuro podría ser valiosa.

Para cada uno de los nodos sensores se analizará si se tiene un buen indicador de calidad del enlace para determinar si es óptimo o no utilizar la red de Sigfox. Actualmente en el backend Sigfox se tiene acceso a los niveles de RSSI y a los mensajes recibidos por la red.

Tabla 33

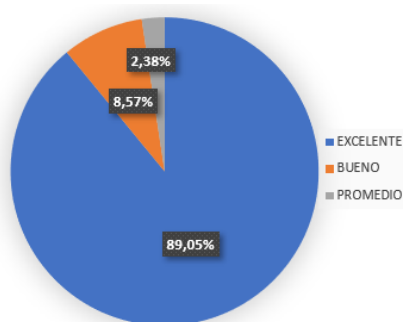
Número de mensajes por estación base

Nodo	1 estación Base	2 estaciones Base	3 estaciones Base	Total
Nodo 1	266	998	9956	11220
Nodo 2	3200	3782	254	7236
Nodo 3	656	7002	3461	11119

Según la Tabla 33, en el nodo 1 los 9956 mensajes que representan el 89.05% pasaron por 3 estaciones base indicando que la calidad del enlace es EXCELENTE, 998 mensajes pasaron por dos estaciones base que representa el 8.57% que indica una calidad del enlace BUENO y 266 mensajes por una sola estación base que representa el 2.38% que indica una calidad del enlace PROMEDIO, debido a que la mayoría de mensajes fueron recibidos por tres estaciones base, se indica que el LQI del Nodo 1 es EXCELENTE como se observa en la Figura 92, es decir su uso es óptimo para el envío de los mensajes sin ningún problema de pérdida significativa.

Figura 92

Calidad del enlace del Nodo sensor 1

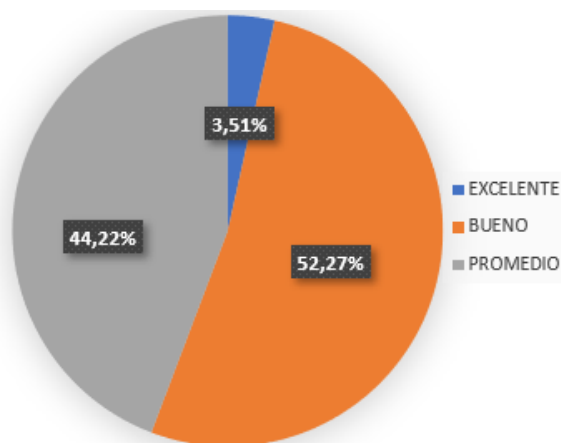


El nodo sensor 2 instalado en un vehículo de transporte mantiene niveles de RSSI desde los -110dBm hasta los -127dBm, por lo que el envío de mensajes llega a tener distintos indicadores los cuales van desde el LÍMITE hasta Excelente utilizando 1, 2 o 3 estaciones base.

El nodo 2 tiene 254 mensajes que pasan por tres estaciones base que representan el 3.51% que indica una calidad de enlace EXCELENTE, 3782 mensajes que representan el 52.27% que pasan por dos estaciones base que indican una calidad de enlace BUENO y 3200 mensajes que pasan por una estación base que representa el 44.22% lo que indica que la calidad del enlace es PROMEDIO como se indica en la Figura 93. Con estos datos se puede decir que la calidad del enlace es BUENO. Para el análisis no se consideró los mensajes perdidos y los mensajes que no se recibieron ya que el vehículo de transporte salió de la zona de cobertura de Sigfox y no se obtuvieron datos en esas fechas.

Figura 93

Calidad del enlace del Nodo sensor 2

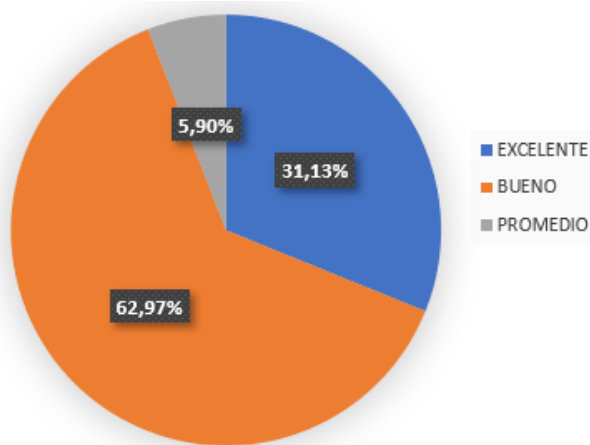


En la Tabla 33 se observa los mensajes que han sido enviados y recibidos por las estaciones base, 3461 mensajes que representan el 31.13% que pasan por tres estaciones base lo que indica una calidad del enlace EXCELENTE, 7002 mensajes que representan el

62.97% que pasan por dos estaciones base e indica una calidad del enlace BUENO y 656 mensajes que representan el 5.90% que indica una calidad del enlace PROMEDIO; una vez obtenidos los datos se puede decir que la calidad del enlace es BUENO, ya que la mayoría de los mensajes se concentran en dos estaciones base, esto se muestra en la Figura 94.

Figura 94

Calidad del enlace del Nodo sensor 3



Tanto el nodo 1 como el nodo 3 poseen un indicador EXCELENTE y BUENO respectivamente, gracias a su instalación y ubicación fija, además de tener buen nivel de cobertura de la red SigFox, mientras que el nodo 2 al estar instalado en un vehículo de transporte y debido a al recorrido que realiza dentro de la ciudad, los niveles de cobertura varían.

Análisis de Temperatura y Humedad

La temperatura y la humedad juegan un rol fundamental en la monitorización de la cadena de frío, en este proyecto se utilizaron diferentes equipos en la cadena de frío. Para el nodo 1 se utilizó un cuarto frío que almacena flores, este periodo de tiempo no es muy prolongado, el nodo 2 es un vehículo termo que almacena distintos alimentos perecederos que

son transportados desde un lugar a otro en un solo día y el nodo 3 es un frigorífico que permite mantener congelados los productos en su interior.

La temperatura es esencial para los distintos nodos, pues se tienen diferentes productos que deben ser almacenados. Por ejemplo, en el nodo 1 al ser usado para almacenar flores, la temperatura del cuarto frío debe oscilar entre los 3.5°C y 5.5 °C, el principal motivo es que si la temperatura es muy baja rodeando los 0° a -45° las flores entran en un proceso de congelamiento generando escarcha de hielo y dañando la flor, por el contrario, si la temperatura sube de los 8°C en adelante, la flor entra en una etapa de descomposición, marchitando la flor por falta de agua y exceso de aire seco. Para el caso del nodo 2 al ser un vehículo de transporte de productos perecederos se debe mantener una temperatura de refrigeración y congelamiento, teniendo en consideración que productos se van a transportar, para este caso los productos llevados varían entre frutas, cereales y en algunas ocasiones cárnicos. Para este último caso debe mantenerse bajo los 0°C para evitar la generación de microorganismos y bacterias, y cuando se transporta frutas, cereales, u otros productos alimenticios solo se necesita de temperaturas entre los 0°C y los 8°C para evitar entrar en una etapa de descomposición. Para el caso del nodo 3, se usa un frigorífico para mantener productos cárnicos congelados, por tal motivo las temperaturas oscilan entre los 0°C y los -22°C, promediándose a unos -17°C para evitar la generación de escarcha de hielo y microorganismos.

Análisis de Temperatura Nodo 1

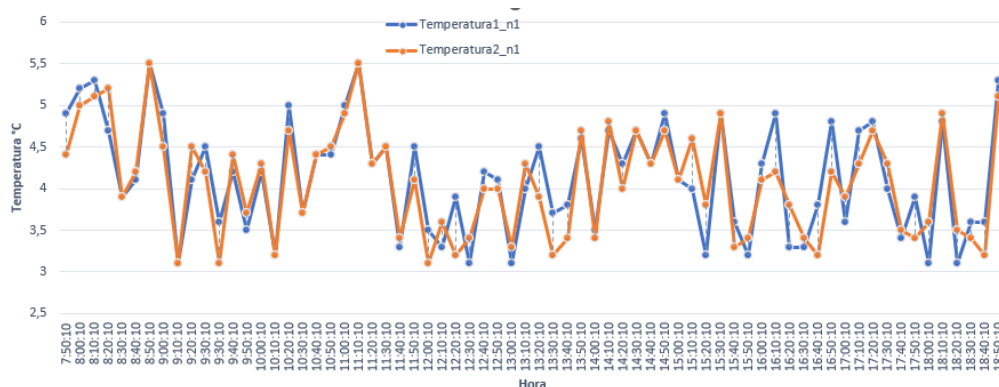
Los datos de temperatura que se obtuvieron para este nodo vienen de dos sensores DHT22, los cuales permiten la medición de temperatura hasta los -40°C, tomando en consideración que este nodo fue instalado en un sector estratégico para medición de temperatura y humedad de un cuarto frío que almacena flores, la temperatura oscila entre los 3°C y los 5.5°C.

La diferencia que existe entre los dos sensores en algunos casos es de 0.5°C de temperatura, lo cual no influye en las medidas de temperatura a nivel general. Dado que el objetivo principal es la monitorización de temperatura, se analizará si existen degradaciones o aumentos de temperatura de una forma brusca en el transcurso de la toma de datos, para evidenciar si existen patrones que puedan mostrar información relevante de pérdida de la cadena de frío y sus motivos.

Las variaciones de temperatura que se presentan entre los dos sensores se debe a la colocación de los mismos, es decir, un sensor al estar ubicado cerca de la puerta presenta un cambio mucho más rápido de temperatura en comparación con el sensor que está ubicado en el fondo del mismo, ciertos valores de temperatura de cada sensor varían en 2 o 3 grados centígrados debido a la apertura de las puertas, además dichas variaciones se disminuyen una vez el lugar en el que se los coloca empieza su correcto funcionamiento.

Figura 95

Niveles de Temperatura por hora para nodo 1



Nota. La imagen representa niveles de temperatura de cada hora en un solo día, en el horario de 7 am a 7 pm.

En la Figura 95 se observa los niveles de temperatura de los dos sensores durante el rango de horas que se estableció anteriormente, la línea de color naranja indica los datos del primer sensor y la de color azul los datos del segundo sensor, estos valores varían entre 0.5°C

a 0.8°C en algunas mediciones. La tendencia que siguen los datos en un solo día presenta una alta similitud, lo que a primer análisis nos muestra un comportamiento normal de la temperatura en el cuarto frío, sin embargo, para el análisis global a continuación se analizará de forma semanal con valores promedio diarios de temperatura para encontrar patrones o anomalías en los datos obtenidos, para este análisis se escogieron la segunda y tercera semana del mes de julio, agosto y septiembre, que fueron los meses en los cuales se realizó la toma de datos.

Tabla 34

Valores promedio de temperatura de la segunda y tercera semana del nodo 2

JULIO		AGOSTO		SEPTIEMBRE	
Temperatura °C	Fecha 1	Temperatura °C	Fecha 2	Temperatura °C	Fecha 3
3,6	4/7/2022	3,7	8/8/2022	3,9	12/9/2022
4,7	5/7/2022	4,5	9/8/2022	3,7	13/9/2022
4,5	6/7/2022	3,7	10/8/2022	4,6	14/9/2022
3,8	7/7/2022	3,9	11/8/2022	3,9	15/9/2022
3,7	8/7/2022	4,7	12/8/2022	3,6	16/9/2022
8,8	9/7/2022	8,6	13/8/2022	8,8	17/9/2022
8,6	10/7/2022	9,5	14/8/2022	8,7	18/9/2022
3,9	11/7/2022	3,8	15/8/2022	3,6	19/9/2022
4,5	12/7/2022	4,5	16/8/2022	3,8	20/9/2022
3,7	13/7/2022	3,9	17/8/2022	3,9	21/9/2022
3,5	14/7/2022	4,6	18/8/2022	3,8	22/9/2022
3,6	15/7/2022	4,7	19/8/2022	3,7	23/9/2022
8,9	16/7/2022	9,6	20/8/2022	8,6	24/9/2022
8,6	17/7/2022	8,9	21/8/2022	8,7	25/9/2022
3,9	18/7/2022	3,6	22/8/2022	3,5	26/9/2022
4,5	19/7/2022	4,5	23/8/2022	3,7	27/9/2022

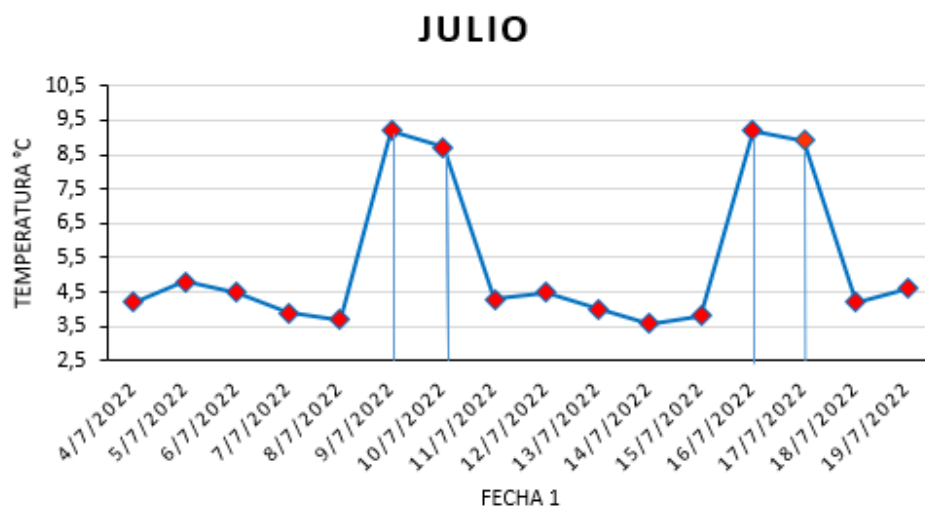
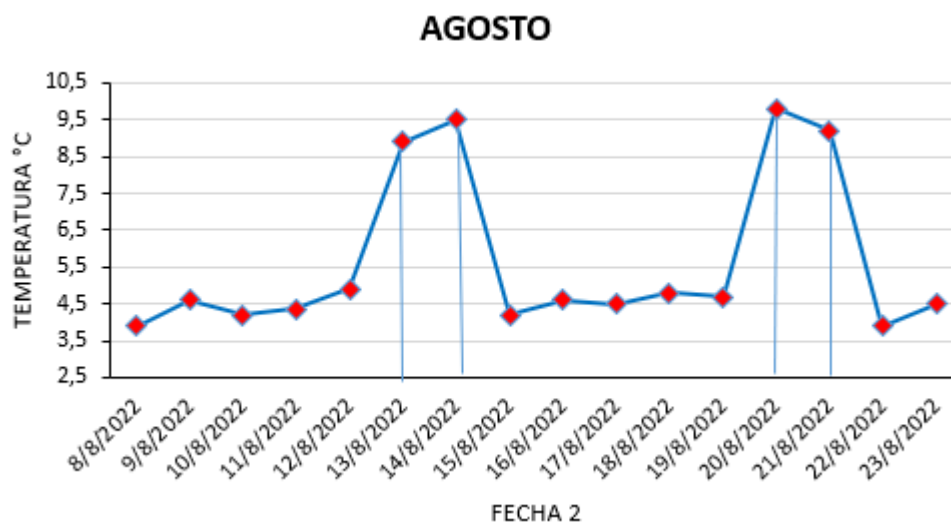
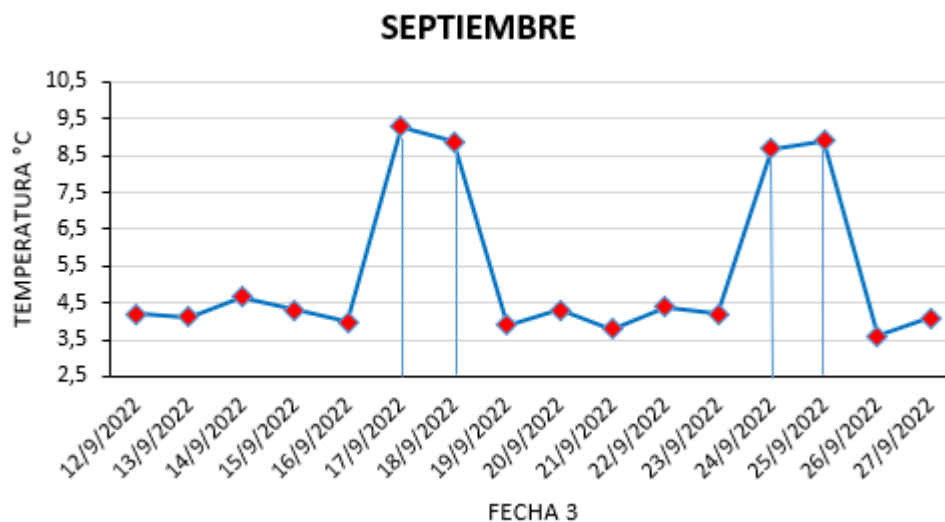
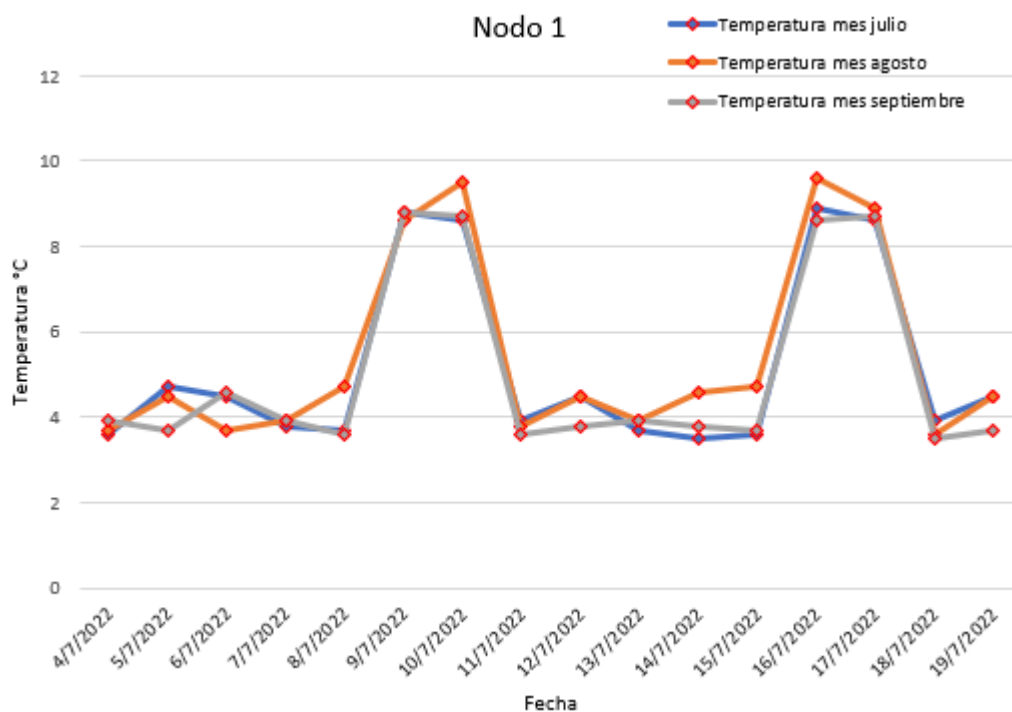
Figura 96*Niveles de temperatura mes de julio nodo 1***Figura 97***Niveles de temperatura mes de agosto nodo 1*

Figura 98

Niveles de temperatura mes de septiembre nodo 1

**Figura 99**

Niveles de temperatura de la segunda y tercera semana de cada mes



De acuerdo con las cuatro anteriores gráficas, los niveles de temperatura para el nodo 1, varían en un rango de 3°C a 5.5°C todos los días de lunes a viernes sin variaciones

abruptas, indicando que no existen ningún tipo de abertura o fuga de temperatura en el cuarto frío, sin embargo, se notó un patrón, el cual presenta un incremento repentino de temperatura, llegando a oscilar en un rango de 8°C a 9.5°C los sábados y domingos. Este patrón se repite durante las 12 semanas de la toma de datos y se debe a la apertura de la puerta y apagado de los ventiladores en el interior del cuarto frío, tal como fue informado por el personal que opera el cuarto frío y realiza limpieza y descontaminación de este. Además, en los mencionados días no se guardan flores para la venta. Los rangos de temperatura antes mencionados nos indican que las flores están en un nivel apropiado de temperatura y humedad para mantenerse frescas y con una apariencia agradable.

Análisis de Humedad Nodo 1

La humedad juega un papel importante a la hora de mantener a los productos frescos e hidratados, para el caso de las flores (rosas), luego de haber sido podadas y evitar la deformación del tallo y resequedad de sus pétalos, se deben colocar en agua y a una humedad relativa del 85% al 99%, ya que si se colocan a niveles inferiores a 75% pueden producir daños ocasionados por la deshidratación e incremento de bacterias o plagas.

Para este análisis se utilizarán tres gráficas, cada una representa a la segunda y tercera semana de cada mes que se tomó datos, las cuales permitirán realizar diversas comparaciones para verificar si existen fugas, pérdida de humedad o desperfectos en el cuarto frío, para cada una de las gráficas se utilizaron valores promedios diarios de humedad relativa, estos datos se observan en la Tabla 35.

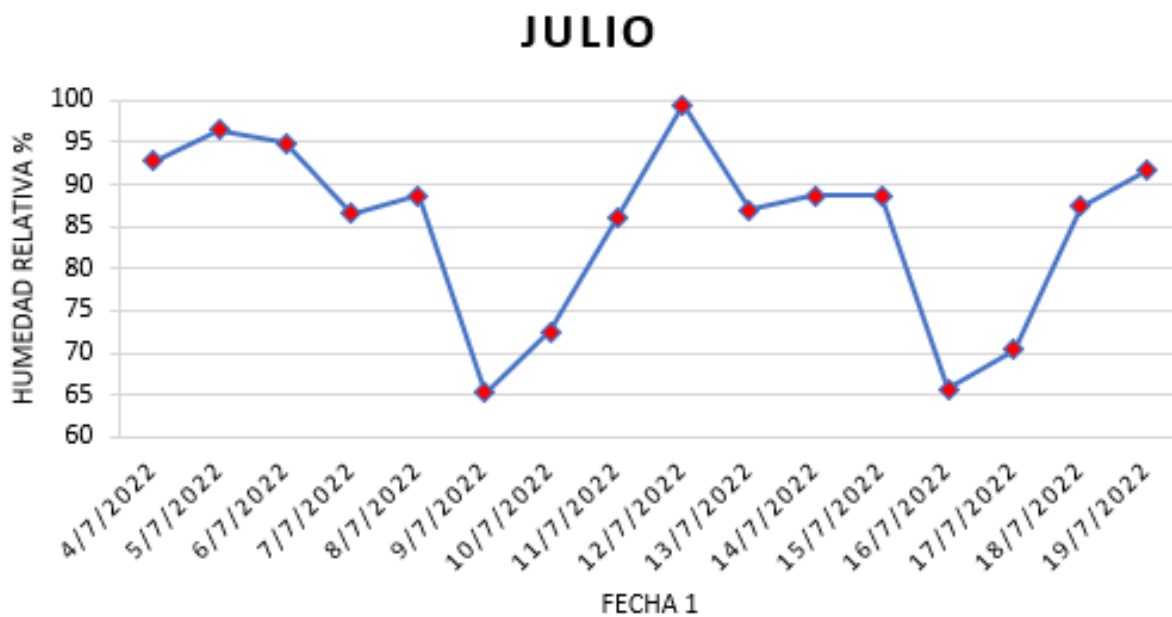
Tabla 35

Valores promedio de humedad de la segunda y tercera semana del nodo 1

JULIO		AGOSTO		SEPTIEMBRE	
Humedad%	Fecha 1	Humedad%	Fecha 2	Humedad%	Fecha 3
92,7	4/7/2022	90,3	8/8/2022	88,6	12/9/2022
96,4	5/7/2022	85,2	9/8/2022	87,8	13/9/2022
94,9	6/7/2022	88,4	10/8/2022	90,1	14/9/2022
86,6	7/7/2022	88,1	11/8/2022	86,7	15/9/2022
88,6	8/7/2022	97,9	12/8/2022	90,4	16/9/2022
65,2	9/7/2022	68,4	13/8/2022	66,5	17/9/2022
72,5	10/7/2022	69,4	14/8/2022	68,4	18/9/2022
85,8	11/7/2022	92,8	15/8/2022	88,5	19/9/2022
99,4	12/7/2022	96,7	16/8/2022	87,1	20/9/2022
86,9	13/7/2022	89	17/8/2022	98,6	21/9/2022
88,7	14/7/2022	93,9	18/8/2022	96,7	22/9/2022
88,6	15/7/2022	98,1	19/8/2022	97,8	23/9/2022
65,7	16/7/2022	63,9	20/8/2022	67,6	24/9/2022
70,4	17/7/2022	71,5	21/8/2022	72,9	25/9/2022
87,3	18/7/2022	88,4	22/8/2022	91,4	26/9/2022
91,6	19/7/2022	87,2	23/8/2022	87,9	27/9/2022

Figura 100

Niveles de humedad mes de julio nodo 1

**Figura 101**

Niveles de humedad mes de agosto nodo 1

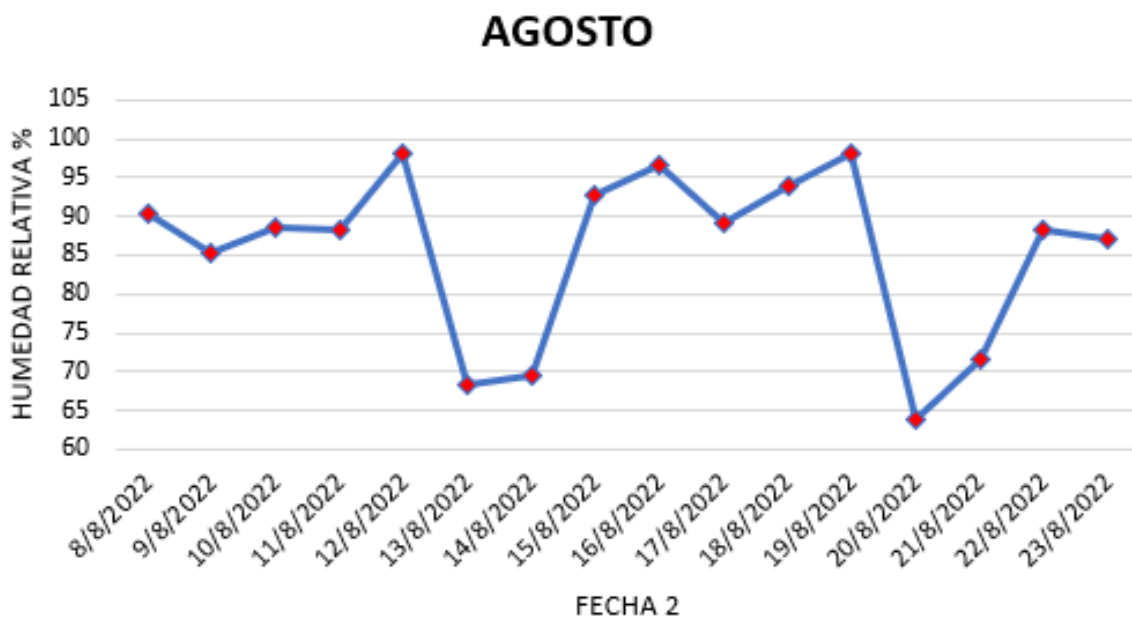
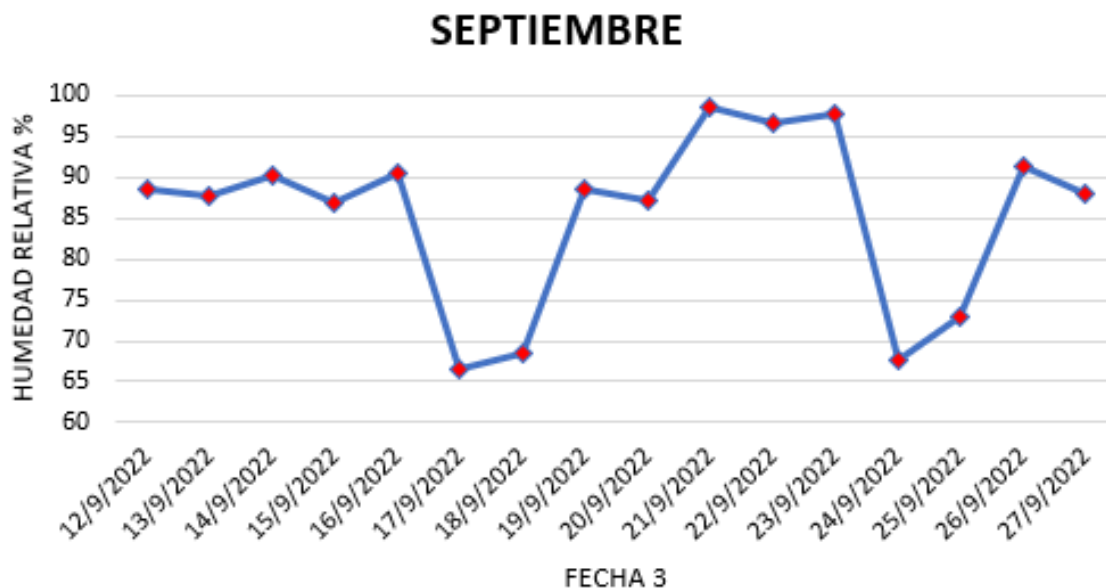
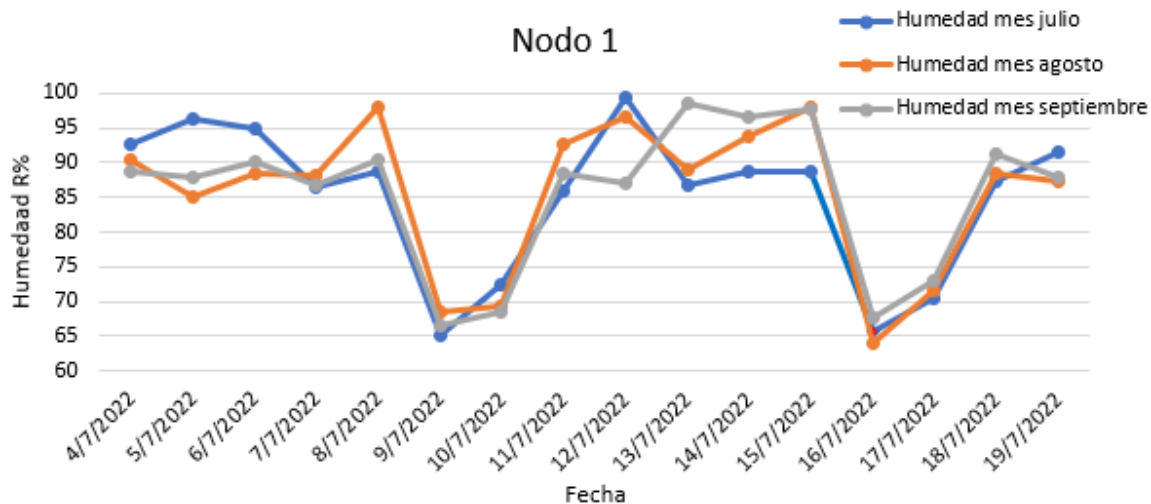


Figura 102

Niveles de humedad mes de septiembre nodo 1

**Figura 103**

Niveles de humedad de la segunda y tercera semana de cada mes



De acuerdo con las cuatro gráficas anteriores los niveles de humedad sobrepasan el 85% de humedad relativa, lo que nos permite verificar que en el cuarto frío se tiene un sellado hermético y no contiene fugas de humedad, permitiendo tener un monitoreo de humedad

normal todos los días de la semana, sin embargo, en los días sábados y domingos presentan una disminución en la humedad relativa llegando a tener niveles de 60% a 75 %, lo cual se debe a que el personal que opera el cuarto frío realiza limpieza y descontaminación.

Análisis de Temperatura Nodo 2

Los datos obtenidos de temperatura se los obtuvo de un sensor de temperatura DHT22, este nodo es el que presenta mayor variación en niveles de temperatura porque se tienen diferentes productos que son transportados, cuando son cárnicos los rangos de temperatura van desde los -6 °C a 0°C, cuando se transporta frutas, verduras y hortalizas van desde los 0°C a 19 °C.

Los rangos de temperatura fluctúan en un horario específico el cual va de 7:00 am a 7:00 pm. Los valores posteriores a este intervalo de tiempo exceptuando algunos días, se eleva a temperatura ambiente porque permanece estacionado. Para este análisis se tiene tres gráficas con valores promedios diarios enfocados en la segunda y tercera semana de cada mes en los que se recolectaron datos, como se observa en la Tabla 36.

Tabla 36

Valores promedio de temperatura de la segunda y tercera semana del nodo 2

JULIO		AGOSTO		SEPTIEMBRE	
Temperatura °C	Fecha 1	Temperatura °C	Fecha 2	Temperatura °C	Fecha 2
0,1	4/7/2022	0,7	8/8/2022	0,6	12/9/2022
0,5	5/7/2022	0,8	9/8/2022	0,4	13/9/2022
9,2	6/7/2022	16,4	10/8/2022	7,5	14/9/2022
10,2	7/7/2022	5,4	11/8/2022	16,5	15/9/2022
8,7	8/7/2022	10,7	12/8/2022	8,2	16/9/2022

Temperatura °C	Fecha 1	Temperatura °C	Fecha 2	Temperatura °C	Fecha 2
14,6	9/7/2022	9,5	13/8/2022	13,1	17/9/2022
5,2	10/7/2022	17,0	14/8/2022	8,8	18/9/2022
0,9	11/7/2022	0,8	15/8/2022	0,7	19/9/2022
0,6	12/7/2022	0,5	16/8/2022	0,4	20/9/2022
12,6	13/7/2022	14,7	17/8/2022	5,3	21/9/2022
11,0	14/7/2022	7,6	18/8/2022	6,4	22/9/2022
18,8	15/7/2022	1,4	19/8/2022	3,3	23/9/2022
17,5	16/7/2022	10,1	20/8/2022	7,6	24/9/2022
7,9	17/7/2022	8,9	21/8/2022	12,1	25/9/2022
0,9	18/7/2022	0,5	22/8/2022	0,8	26/9/2022
0,8	19/7/2022	0,7	23/8/2022	0,3	27/9/2022

Figura 104

Niveles de temperatura mes de julio nodo 2

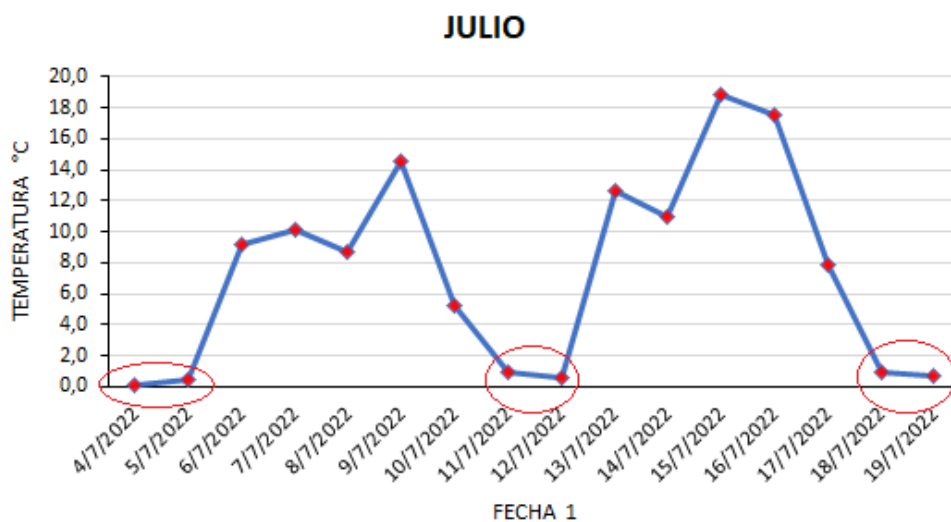


Figura 105

Niveles de temperatura mes de agosto nodo 2

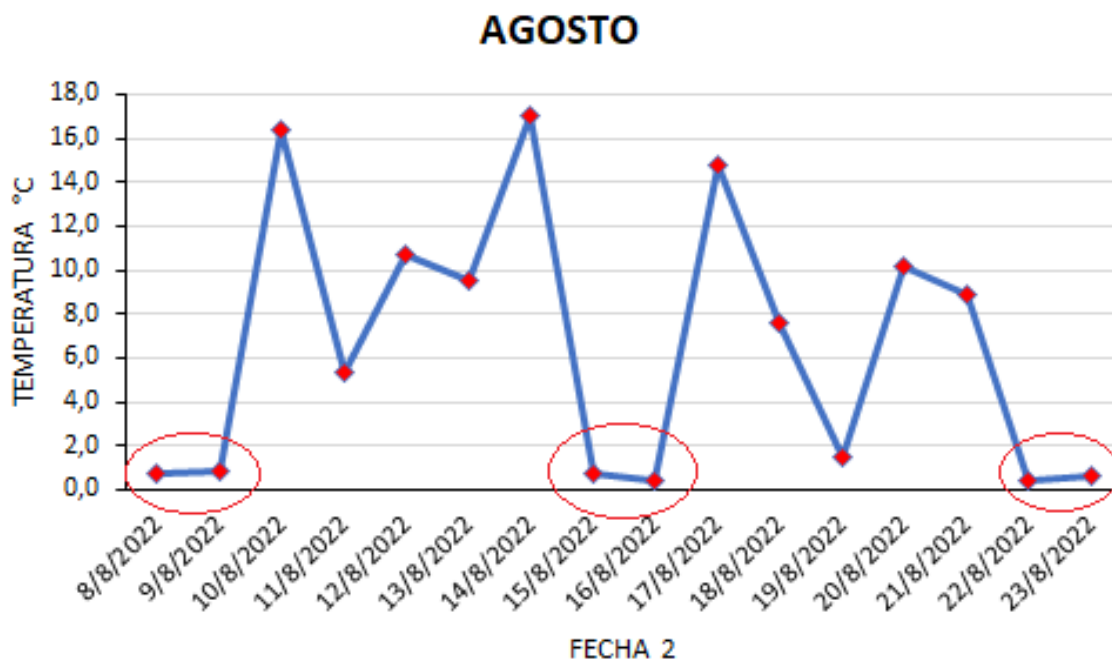
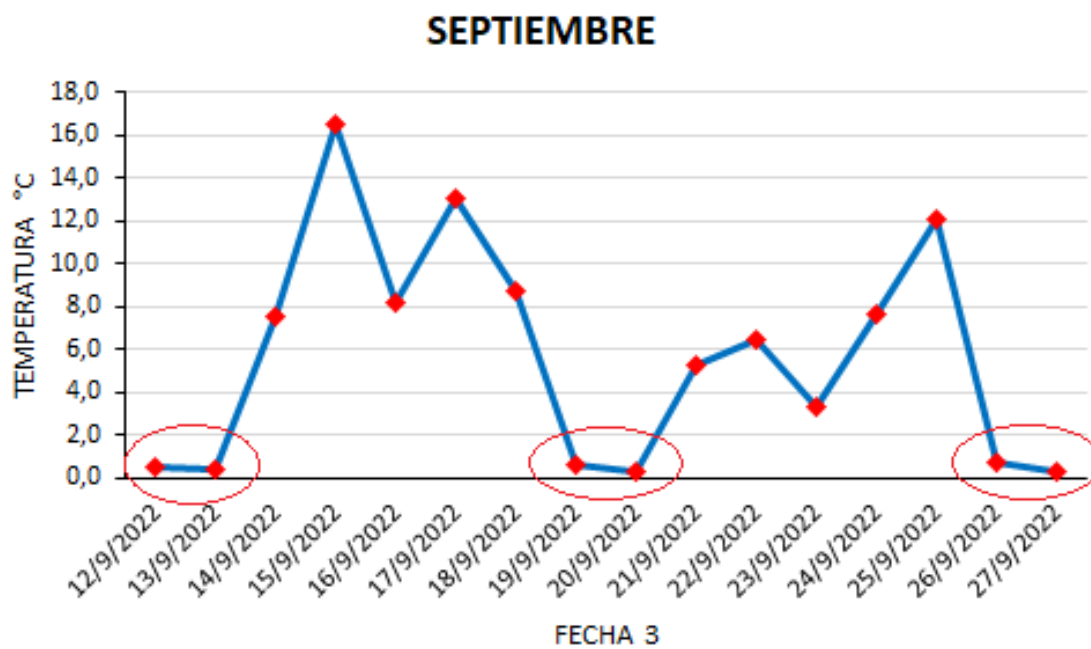


Figura 106

Niveles de temperatura mes de septiembre nodo 2



De acuerdo con las tres gráficas anteriores, se tienen varios rangos de temperatura en los intervalos tomados para realizar el análisis, en las tres gráficas los dos primeros días de cada semana, los cuales están encerrados en óvalos rojos tienen un promedio de 0°C y 1 °C que corresponden a los lunes y martes. De acuerdo con estos niveles de temperatura se puede saber que esos días se transportaba productos cárnicos. Los otros días presentan rangos variados de temperatura, lo cual implica que se está transportando otro tipo de productos.

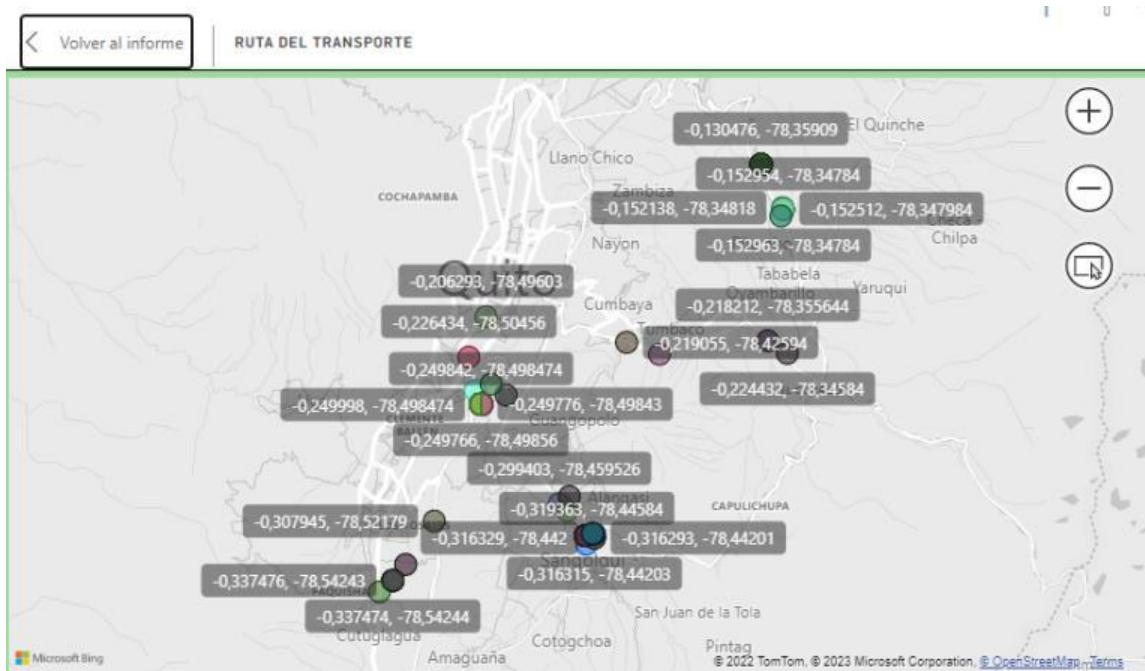
Análisis de Ruta Nodo 2

El vehículo de transporte de productos perecederos establece una ruta para llegar desde el punto inicial (estacionamiento) hasta el punto final (centro de acopio), y gracias al GPS NEO 6M se obtienen los datos de latitud y longitud.

Para este análisis se extrajeron valores de latitud y longitud de la base de datos, los cuales al colocarlas en el Google Earth se estableció un patrón que se repetía diariamente, este patrón permitió establecer la ruta que el vehículo seguía en el transporte de productos perecederos. En la ruta hacia la ciudad de Latacunga se pudo observar la pérdida de datos cuando el vehículo salía de la provincia de Pichincha en vista de la falta de cobertura de la red SigFox, motivo por el cual esto no se estableció como un patrón.

Figura 107

Coordenadas de la ruta del transporte



Nota. El mapa presenta las coordenadas de latitud y longitud, de la ruta que el transporte seguía. La imagen es tomada del dashboard creado para seguimiento del transporte de productos perecederos.

Como se observa en la Figura 107, existen varios puntos con sus respectivas coordenadas, que a simple vista muestran ubicaciones al azar, pero al analizar más detenidamente los datos de las coordenadas, se descubrió cierta similitud, por tal motivo al ingresarlos en Google Earth, coincidían con ubicaciones de las avenidas y carreteras que el vehículo de transporte recorría para ir desde el punto inicial hacia punto final y viceversa.

En la Figura 108, se evidencia la trayectoria que el transporte de productos perecederos recorre diariamente.

Figura 108

Ruta diaria del transporte de productos



Las principales avenidas y carreteras que involucran el desplazamiento del vehículo de transporte diariamente son: Calle Leónidas Double, Avenida Simón Bolívar, Intercambiador Ruta Viva, Carretera 28C, Troncal E35, Tababela y Conector Alpachaca, estas 7 calles, carreteras y avenidas antes mencionadas son las utilizadas a diario por el vehículo. Además, al observar con detenimiento la ruta que se generó se tiene un recorrido desde el sur hasta el noreste de la ciudad de Quito (Aeropuerto Internacional), comprobándose la cobertura de la red Sigfox.

Análisis de Temperatura Nodo 3

Para el análisis de temperatura en este nodo se debe tomar en consideración los distintos factores en los que se colocó el nodo sensor. Este dispositivo se colocó en un frigorífico, este lugar fue escogido para obtener valores de temperatura bajo cero y así poder comprobar el funcionamiento de la red y de los sensores a este tipo de temperatura. Por tal motivo al colocarse en un frigorífico los sensores estuvieron expuestos todo el tiempo a

temperaturas de hasta -22°C , esta prueba se la realizó debido a que, en las industrias alimenticia y farmacéutica, los productos cárnicos y vacunas necesitan de bajas temperaturas para evitar el surgimiento de bacterias o microorganismos que los descompongan o dañen en el transcurso del tiempo.

Por tal motivo, para este análisis se escogieron valores promedios diarios de temperatura de la segunda y tercera semana de cada mes en los que se tomaron datos como se muestra en la Tabla 37, esto permitirá verificar si el frigorífico tiene algún desperfecto por el cual pueda variar la temperatura poniendo en riesgo de descomposición o daño a los productos en su interior.

Tabla 37

Valores promedio de temperatura de la segunda y tercera semana del nodo 3

JULIO		AGOSTO		SEPTIEMBRE	
Temperatura °C	Fecha 1	Temperatura °C	Fecha 2	Temperatura °C	Fecha 3
-16,1	4/7/2022	-21,8	8/8/2022	-19,4	12/9/2022
-17,0	5/7/2022	-20,3	9/8/2022	-18,6	13/9/2022
-18,3	6/7/2022	-21,4	10/8/2022	-17,7	14/9/2022
-21,7	7/7/2022	-20,8	11/8/2022	-18,7	15/9/2022
-20,3	8/7/2022	-18,2	12/8/2022	-20,5	16/9/2022
-20,0	9/7/2022	-15,5	13/8/2022	-21,4	17/9/2022
-19,5	10/7/2022	-15,8	14/8/2022	-16,2	18/9/2022
-20,8	11/7/2022	-17,7	15/8/2022	-19,0	19/9/2022
-17,3	12/7/2022	-20,9	16/8/2022	-21,0	20/9/2022
-20,3	13/7/2022	-15,0	17/8/2022	-20,0	21/9/2022

Temperatura °C	Fecha 1	Temperatura °C	Fecha 2	Temperatura °C	Fecha 3
-17,1	14/7/2022	-17,7	18/8/2022	-21,3	22/9/2022
-18,4	15/7/2022	-19,8	19/8/2022	-19,6	23/9/2022
-19,7	16/7/2022	-18,2	20/8/2022	-15,1	24/9/2022
-19,7	17/7/2022	-15,3	21/8/2022	-20,0	25/9/2022
-18,4	18/7/2022	-19,8	22/8/2022	-19,9	26/9/2022
-16,3	19/7/2022	-15,7	23/8/2022	-20,1	27/9/2022

Figura 109

Niveles de temperatura mes de julio nodo 3

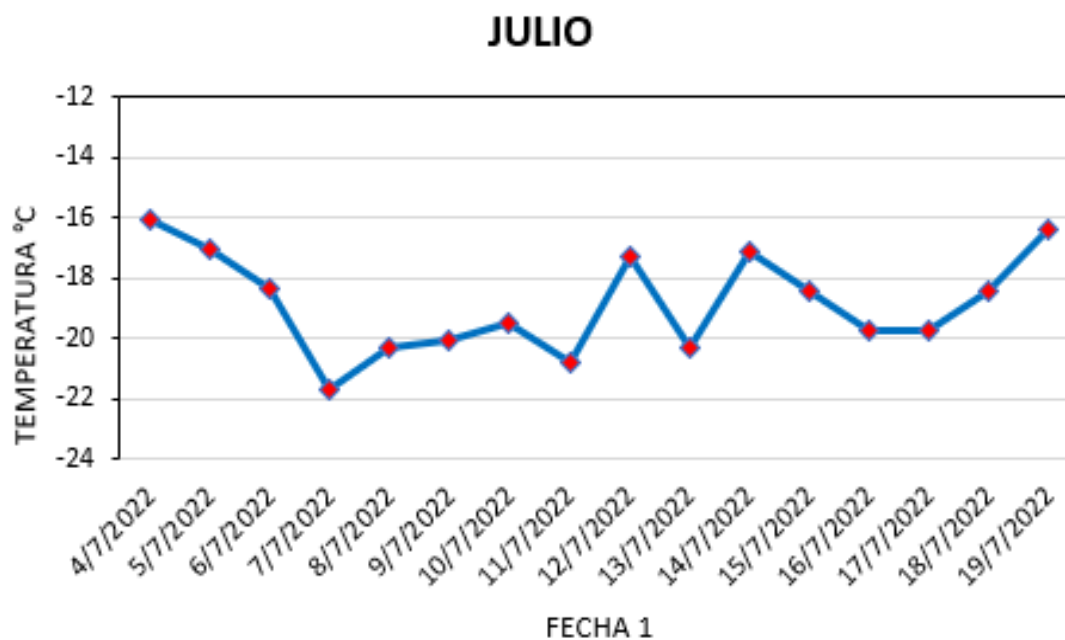


Figura 110

Niveles de temperatura mes de agosto nodo 3

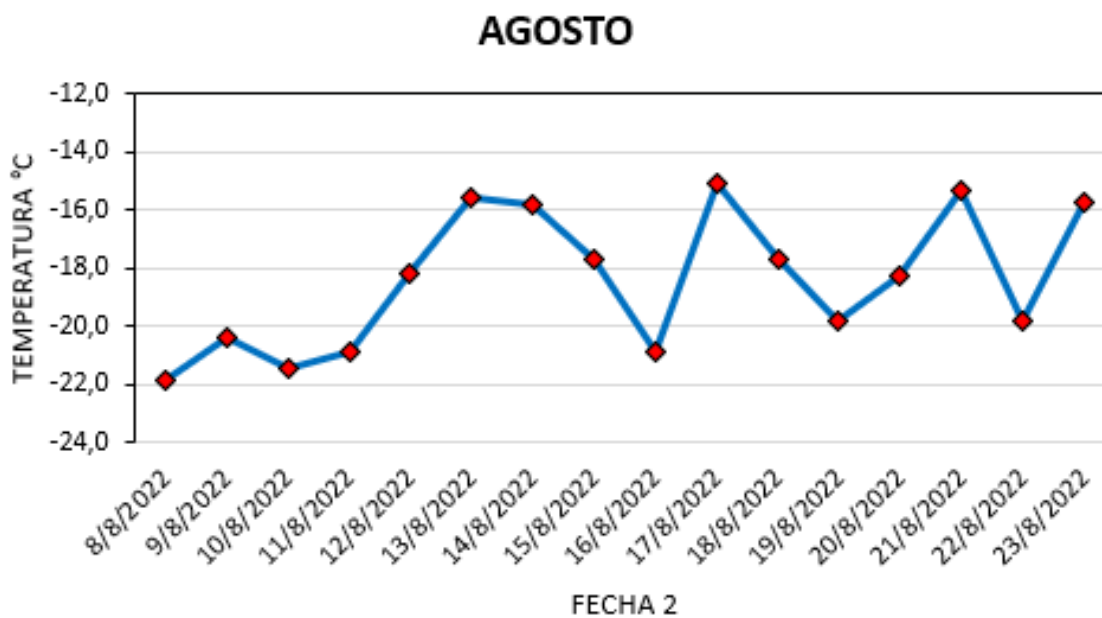


Figura 111

Niveles de temperatura mes de septiembre nodo 3

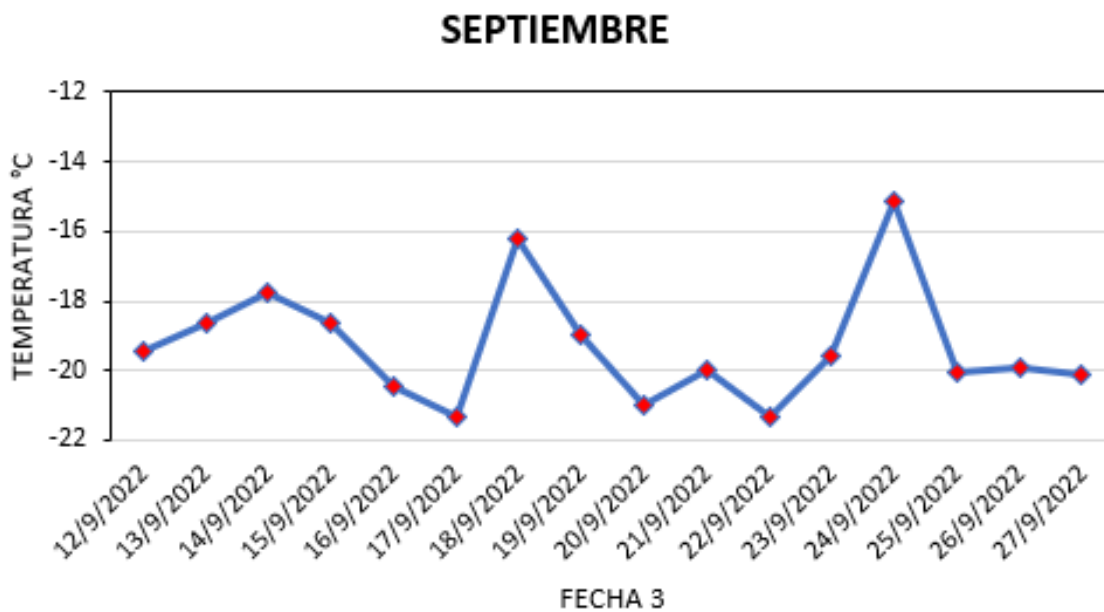
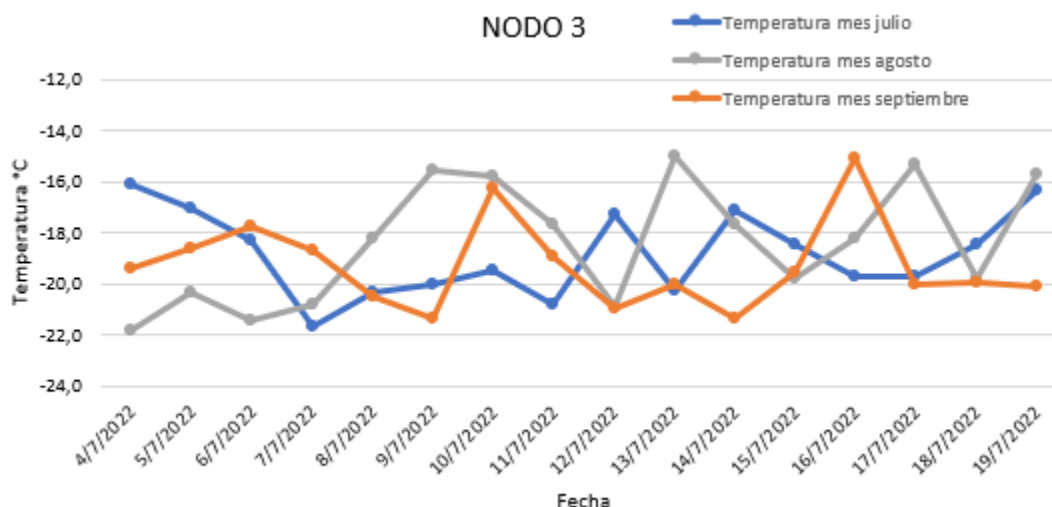


Figura 112

Niveles de temperatura de la segunda y tercera semana de cada mes



En las cuatro anteriores gráficas se verifica una media de temperatura de -18°C que es lo recomendable para que los productos en su interior permanezcan congelados y sin riesgo a descomponerse. Las variaciones de temperatura de -22°C a -15°C se debe a un componente fundamental denominado termostato, su función principal es la de controlar el proceso de refrigeración, por lo que permite activar o desactivar el condensador que es el encargado de enfriar o calentar el interior del frigorífico.

Análisis de Humedad Nodo 3

La humedad en un frigorífico no es muy alta como en la de un cuarto frío con ventilación, los rangos de humedad varían entre 30% y 80%, esto se debe a que los productos que van a ser guardados o contenidos en el interior del frigorífico poseen distintos tipos de envolturas como pueden ser de plásticos y vidrio, lo que permite que el producto no se maltrate y permanezca fresco por más tiempo.

Los alimentos ricos en agua no deben ser expuestos a altos niveles de humedad, porque acumulan con el tiempo exceso de esta y al final termina dañando el producto, los altos

niveles de humedad en un frigorífico genera escarcha de hielo lo que es un factor negativo para el congelamiento de los productos, al tener este tipo de escarchamiento, indica un mal funcionamiento del frigorífico y más consumo de energía.

Dado que en el frigorífico se guardan productos cárnicos que son constituidos en su mayoría por agua debe estar programado para que su humedad no sea muy alta y permanezca en los rangos establecidos anteriormente, para lo cual, se tomará valores promedios diarios de humedad de la segunda y tercera semana de toma de datos para verificar si el funcionamiento del frigorífico es el adecuado y óptimo para guardar productos. En la Tabla 38 se observa los valores de humedad relativa para la segunda y tercera semana de cada mes de la toma de datos.

Tabla 38

Valores promedio de humedad relativa de la segunda y tercera semana para el nodo 3

JULIO		AGOSTO		SEPTIEMBRE	
Humedad	Fecha 1	Humedad	Fecha 2	Humedad	Fecha 3
R %		R %		R %	
47,3	4/7/2022	30,52	8/8/2022	66,4	12/9/2022
37,45	5/7/2022	43,62	9/8/2022	74,01	13/9/2022
68,47	6/7/2022	77,23	10/8/2022	66,83	14/9/2022
34,67	7/7/2022	59,43	11/8/2022	79,01	15/9/2022
47,92	8/7/2022	42,21	12/8/2022	45,86	16/9/2022
62,33	9/7/2022	61,77	13/8/2022	75,25	17/9/2022
31,4	10/7/2022	45,65	14/8/2022	74,03	18/9/2022
55,82	11/7/2022	77,22	15/8/2022	38	19/9/2022
59,29	12/7/2022	40,19	16/8/2022	46,56	20/9/2022

Humedad R %	Fecha 1	Humedad R %	Fecha 2	Humedad R %	Fecha 3
54,88	13/7/2022	49,22	17/8/2022	60,34	21/9/2022
37,69	14/7/2022	34,61	18/8/2022	44,11	22/9/2022
52,5	15/7/2022	72,64	19/8/2022	39,39	23/9/2022
60,81	16/7/2022	63,56	20/8/2022	44,84	24/9/2022
49,58	17/7/2022	71,46	21/8/2022	47,15	25/9/2022
52,55	18/7/2022	46,29	22/8/2022	45,66	26/9/2022
49,07	19/7/2022	35,68	23/8/2022	45,97	27/9/2022

Figura 113

Niveles de humedad mes de julio nodo 3

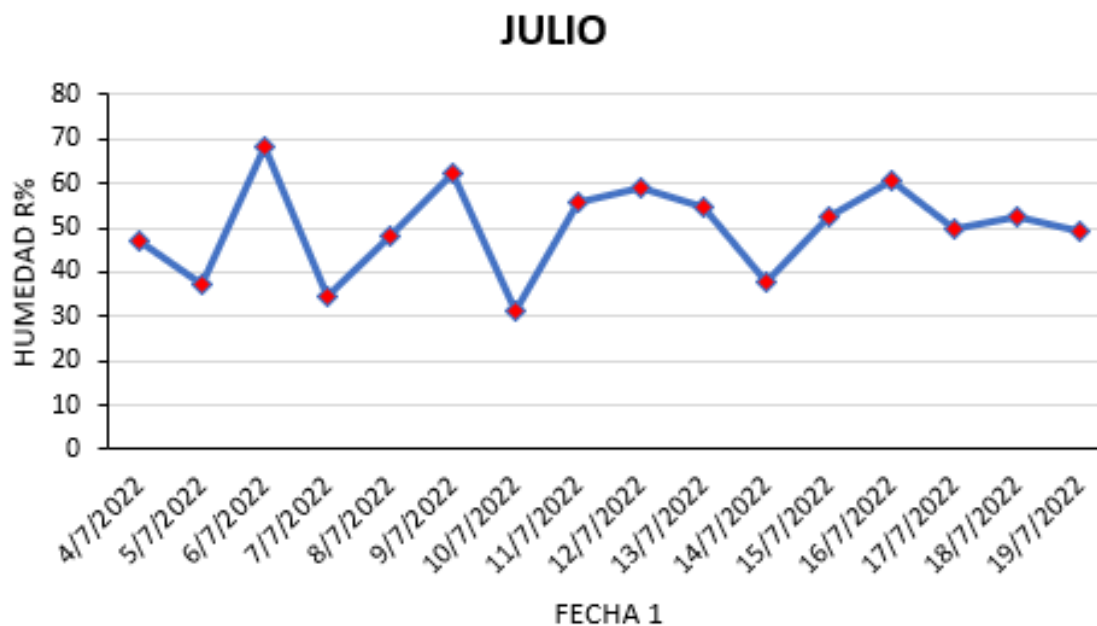
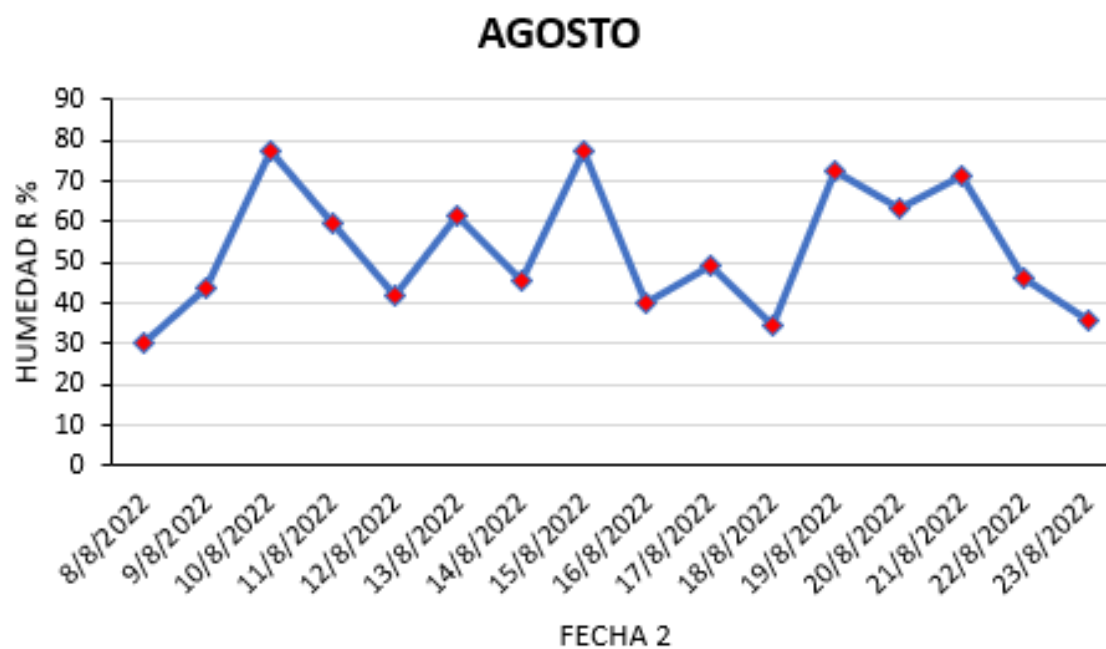


Figura 114

Niveles de humedad mes de agosto nodo 3

**Figura 115**

Niveles de humedad mes de septiembre nodo 3

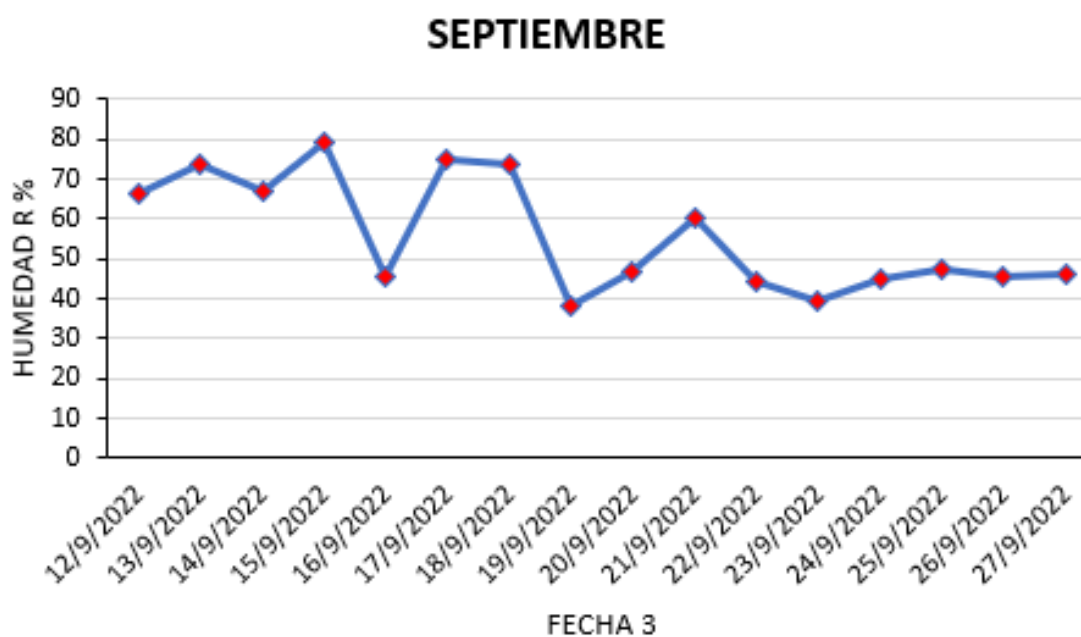
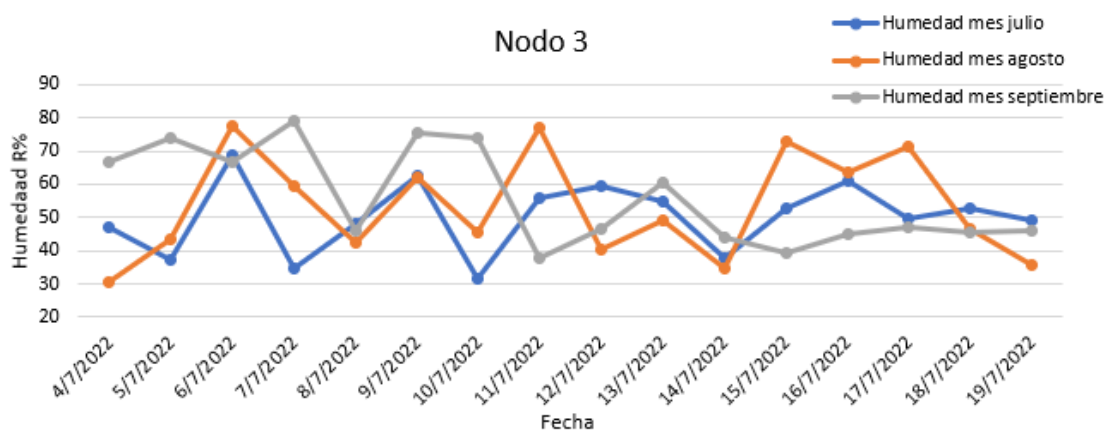


Figura 116

Niveles de humedad de la segunda y tercera semana de cada mes



Como se observa en las cuatro anteriores gráficas, se analiza los rangos de humedad relativa, los cuales no superan el 80% y tampoco se reducen menos del 30 %, lo que indica que el frigorífico no tiene algún desperfecto y que produce una humedad ideal para la conservación de los productos en su interior.

Costos de los Nodos Sensores

A lo largo de este proyecto de investigación se ha invertido un capital para comprar los materiales necesarios para la creación e implementación de los nodos sensores y recursos de la nube, en las Tablas 39 y 40 se describe los materiales y recursos usados en el proyecto con la cantidad usada y su valor.

Tabla 39

Material y costo para implementación de nodos sensores

Material	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Dev Kit Thinxtra Sigfox	3	43.25	129.75
Arduino Mega	1	22.56	22.56
Sensor de temperatura y humedad DHT22	5	9.50	47.5

Material	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Módulo GPS NEO 6M	1	6,5	6,5
Cajas Impermeables	3	5,5	16,5
30m de cable FTP para exteriores	1	18	18
Batería 1.5V	4	4,5	18
Batería 6V a 2.7A	1	8	8
Porta baterías	2	1,5	3
Baquelita perforada	3	1,5	4,5
Tomacorriente y cable	1	3	3
Costo de importación	1	16	16
TOTAL			293,3

Nota. La tabla indica los materiales y sus costos necesarios para la colocación e implementación de los nodos sensores.

Tabla 40

Recursos de la nube de Azure y sus costos.

Recursos de la Nube	Costo
Stream Analytics	247,21
IoT Hub	Gratis
SQL Server	Gratis
SQL Database	Gratis
TOTAL	247,2

Nota. La tabla indica los recursos utilizados de la nube para almacenaje y transmisión de datos.

Los materiales y recursos más elevados fueron los módulos de desarrollo de Sigfox y el uso de Stream Analytics, los cuales son la parte principal tanto para la adquisición de datos como la transmisión de estos, el costo total para el desarrollo de este proyecto es de 540.52 dólares.

Conclusiones

Se diseñó una red de sensores constituida por tres nodos sensores que permitió la recolección de datos de variables físicas de temperatura, humedad y geoposicionamiento. El sensor para medición de temperatura y humedad fue el DHT22 que permite la medición de las dos variables al mismo tiempo y para geoposicionamiento se integró el módulo GPS NEO 6M, que entrega datos de latitud y longitud.

Se acopló el sistema de medición de variables en el cuarto frío del IASA, el vehículo de transporte de productos perecederos y un frigorífico, a través del uso de la tecnología Sigfox. La transmisión de datos se la realizó por medio de la red LPWAN SigFox y el módulo Dev Kit Thinxtra.

Se analizó el desempeño de la red de sensores respecto de la cantidad de mensajes obteniendo un 98.63% de mensajes recibidos y un 1.37% de mensajes perdidos para el nodo 1. Un 63.61% de mensajes recibidos y un 36.39% de mensajes perdidos para el nodo 2 y un 97.74% de mensajes recibidos y un 2.26% de mensajes perdidos para el nodo 3. Como resultado, se evidenció que el nodo 2, posee la mayor cantidad de mensajes perdidos debido a que el vehículo de transporte realizó recorridos hacia la ciudad de Latacunga donde no existe cobertura de la red SigFox.

Respecto de los parámetros RSSI y LQI de la red LPWAN SigFox, se analizó el desempeño de la red de sensores y se evidenció un promedio un promedio de -108dBm para el nodo 1, un promedio de -118dBm para el nodo 2 y un promedio de -111dBm para el nodo 3. Por otro lado, en referencia al LQI se evidenciaron valores de 89.05% (Excelente), 8.57% (Bueno), 2.38% (Promedio) para el nodo sensor 1, de 3.51% (Excelente), 52.27% (Bueno), 44.22% (Promedio) para el nodo sensor 2 y de 31.13% (Excelente), 62.97% (Bueno), 5.90% (Promedio) para el nodo sensor 3. En base a los resultados obtenidos, se comprobó que la red de SigFox es buena en términos de calidad de señal y cobertura.

Mediante el análisis de datos de las variables de temperatura y humedad de la red de nodo sensores, se determinó diversos patrones que aseguraron el mantenimiento de la cadena de frío. Para el nodo sensor 1, se obtuvo un rango de temperatura que varía entre 3°C a 5.5°C y un rango de humedad entre 85% a 99%; estas son condiciones favorables para el almacenamiento y conservación de flores. Para el nodo sensor 2, el rango de temperatura osciló entre -6°C a 0°C, cuando se transportó productos cárnicos y 0°C a 19°C cuando se transportaron legumbres, hortalizas y frutas. Los datos obtenidos del GPS permitieron determinar la ruta que diariamente realiza el vehículo. Para el nodo sensor 3 se obtuvo un rango de temperatura que oscila entre -22°C a -15°C y un rango de humedad que oscila entre 30% a 80%.

Se desarrolló una aplicación web con el uso de Power BI Desktop y una aplicación para dispositivos móviles Android con la herramienta APP INVENTOR, las cuales permitieron la visualización y monitoreo de las variables físicas de temperatura, humedad y geoposicionamiento. Estas aplicaciones fueron diseñadas de forma intuitiva y amigable con el propósito de facilitar su uso al usuario y poder realizar un monitoreo de forma continua.

Con el desarrollo del presente proyecto se consiguió monitorizar la temperatura y controlar la cadena de frío en el transporte de productos perecibles mediante el uso de sensores y de la red LPWAN SigFox.

Recomendaciones

Replicar el proyecto utilizando otras tecnologías de redes LPWAN, tales como LoraWan y NB-IoT, para realizar un análisis comparativo entre dichas tecnologías de comunicación.

Utilizar los servicios de cloud computing orientados a Big Data y analítica de datos para implementar algoritmos de inteligencia artificial y aprendizaje automático que permitan detectar patrones y predecir anomalías.

Referencias

- Akyildiz, I., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4), 393-422. [https://doi.org/10.1016/S1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4)
- Aosong Electronics Co.,Ltd. (2022). *Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302)*. datasheetpdf: <https://datasheetpdf.com/pdf-file/792209/ABCPROYECTOS/DHT22/1>
- Arduino. (5 de febrero de 2018). *¿Qué es Arduino?* Arduino: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- Arduino. (2022). *Arduino Mega 2560*. Arduino: <https://store-usa.arduino.cc/collections/boards/products/arduino-mega-2560-rev3>
- Arduino. (2022). *ARDUINO UNO R3*. Arduino: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>
- Balseca, W. (8 de julio de 2021). *Implementación de un dispositivo de monitorización de energía eléctrica orientado al Internet*. Repositorio Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/25208/1/T-ESPE-044590.pdf>
- Baquero, L. (2021). *Cadena de Frío*. GoConqr: <https://www.goconqr.com/mindmap/13408935/cadena-de-friod>
- Beyene, Y., Jäntti, R., Tirkkonen, O., Ruttik, K., Iraj, S., Larmo, A., Tirronen, T., & Torsner, J. (2017). NB-IoT Technology Overview and Experience from Cloud-RAN Implementation. *IEEE Wireless Communications*, 24(3), 26-32. <https://doi.org/10.1109/mwc.2017.1600418>
- Burton Mwakwata , C., Malik, H., Mahtab Alam, M., Le Moullec, Y., Parand, S., & Mumtaz, S. (2019). Narrowband Internet of Things (NB-IoT):From Physical (PHY) and Media Access

- Control (MAC) Layers Perspectives. *MDPI-Sensors*, 19(2613), 1-34.
<https://doi.org/10.3390/s19112613>
- Campos, F. (21 de julio de 2020). *LPWAN: qué son y para qué se utilizan*. m2mlogitek:
<https://www.m2mlogitek.com/lpwan-que-son-y-para-que-se-utilizan/>
- Castillo, P. (junio de 2018). *Monitorización de parámetros medioambientales mediante sensores y la red Sigfox*. Repositorio de Trabajos Académicos de la Universidad de Jaén: https://tauja.ujaen.es/bitstream/10953.1/8385/1/tfg_pablo_castillo_segura.pdf
- Chaudhari, B., Zennaro, M., & Borkar, S. (2020). LPWAN Technologies: Emerging Application Characteristics, Requirements, and Design. *Future Internet*, 12(3), 1-25.
<https://doi.org/10.3390/fi12030046>
- Chiriboga, Á. (2020). *Diseño e Implementación de una Solución con Tecnología LORA para el Monitoreo de Ubicación Vehicular con un Aplicativo Web*. Repositorio Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE:
<http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/21864/T-ESPE-043466.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- CONFOREMPRESARIAL. (29 de enero de 2020). *Cuarto Frío*. CONFOREMPRESARIAL:
<https://www.confopresarial.com/simulador-de-cuarto-frio/>
- Devalal, S., & Karthikeyan, A. (2018). LoRa technology-an overview. *Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*.
<https://doi.org/10.1109/iceca.2018.8474715>
- Díaz, A., & Merino, P. (2017). The 3GPP NB-IoT system architecture for the Internet of Things. *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. . España. <https://doi.org/10.1109/iccw.2017.7962670>

- Díaz, I. (mayo de 2019). *Red de Sensores Intercomunicados Bidireccionalmente usando Tecnología Sigfox*. Repositorio Universidad Politécnica del Estado de Morelos: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/18656/2019ivonndiaz.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Digi-Key. (9 de abril de 2018). *XKit Sigfox Ready Development Kit*. Digi-Key: <https://www.digikey.com/en/product-highlight/t/thinxtra/xkit-sigfox-ready-development-kit>
- EKCIT. (14 de marzo de 2022). *Microsoft Azure*. European Knowledge Center for Information Technology: <https://www.ticportal.es/temas/cloud-computing/microsoft-cloud/microsoft-azure>
- Fantacci, R., Pecorella, T., Viti, R., & Carlini, C. (2014). A Network Architecture Solution for Efficient IoT wsn Backhauling: *Challenges and Opportunities*, 21(4), 113-119. <https://doi.org/10.1109/MWC.2014.6882303>
- Feltrin, L., Tsoukaneri, G., Condoluci, M., Buratti, C., Mahmood, T., Dohler, M., & Verdone, R. (2019). Narrowband IoT: A Survey on Downlink and Uplink Perspectives. *Feltrin, L., Tsoukaneri, G., Condoluci, M., Buratti, C., Mahmoodi, T., Dohler, M., & Verdone, R. (2019). Narrowband IoT: A Survey on IEEE Wireless Communications*, 26(1), 78-86. <https://doi.org/10.1109/MWC.2019.1800020>
- Gastro Corp. (s.f.). *Refrigerador Industrial GVR2PS-1400V*. Gastro Corp.: <http://gastro-corp.com/producto/refrigerador-industrial-gvr2ps-1400v/>
- Global Cold Chain Alliance. (21 de julio de 2020). *About Cold Chain*. Global Cold Chain Alliance: <https://www.gcca.org/about/about-cold-chain#:~:text=What%20is%20the%20cold%20chain,chain%20to%20the%20final%20consumer.>

Glynstore. (2022). *Módulo WISOL Sigfox WSSFM10R4AT*. Glynstore:

<https://www.glynstore.com/WSSFM10R4AT/>

Google Maps. (2022). *Google Maps*. Google: [https://www.google.com.ec/maps/@-0.3862375,-](https://www.google.com.ec/maps/@-0.3862375,-78.4177577,350m/data=!3m1!1e3?hl=es)

[78.4177577,350m/data=!3m1!1e3?hl=es](https://www.google.com.ec/maps/@-0.3862375,-78.4177577,350m/data=!3m1!1e3?hl=es)

Hanna Instruments. (9 de diciembre de 2014). *La Cadena de Frío, clave en la Seguridad*

Alimentaria. Hanna Instruments: <https://www.hannacolombia.com/blog/post/18/la-cadena-frio-clave-en-la-seguridad-alimentaria>

Hemjal, M. A. (May de 2019). *Sigfox based Internet of Things*.: Tempere University:

<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/27666/Hemjal.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

INTARCON. (2021). *¿Qué es la cadena de frío?* INTARCON:

<https://www.intarcon.com/category/instalacion-mantenimiento-averias/>

International Telecommunication Union. (2012). *Next Generation Networks - Frameworks and*

functional architecture models. International Telecommunication Union:

<https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I>

Khanna , A., & Kaur, S. (2020). *Internet of Things (IoT), Applications and Challenges*.: *Springer*

Nature. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07446-4>

Lavric, A., Petrariu, A., & Popa, V. (2019). *Long Range SigFox Communication Protocol*

Scalability Analysis Under Large-Scale., *IEEE Access*, 7, 35816-35825.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2903157>.

López, F. (6 de mayo de 2019). *Mantenemos el frío y el calor*. CEVISPAM:

<https://www.revistacesvimap.com/mantenemos-el-frio-y-el-calor/>

- Lora Alliance. (noviembre de 2015). *A technical overview of LoRa and LoRaWAN*. Lora Alliance: <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf>
- M L, L., & M, A. (2020). LoRa technology for Internet of Things(IoT):A brief Survey. *M L, L., & M, A. (2020). LoRa technology for Internet of Things(IoT):A brief Survey. 2020 Fourth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*. doi:10.1109/i-smac49090.2020.9243449 , 8-11. [https://doi.org/M L, L., & M, A. \(2020\). LoRa technology for Internet of Things\(IoT\):A brief Survey. 2020 Fourth International Con](https://doi.org/M L, L., & M, A. (2020). LoRa technology for Internet of Things(IoT):A brief Survey. 2020 Fourth International Con)10.1109/i-smac49090.2020.9243449
- Madakam, S. R. (2015). Internet of Things (IoT): A Literature Review. *Journal of Computer and Communications, 03(05)*, 164-173. <https://doi.org/10.4236/jcc.2015.35021>
- Martínez, M. (2020). *Monitorización de las variables ambientales durante el transporte de productos perecederos para estimar en tiempo real las pérdidas de calidad*. Repositorio Universidad Politécnica de Cartagena: <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/8813/mtmz.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT. *ICT Express, 5(1)*, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005>
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express, 5*, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005>
- Microsoft . (2022). *Microsoft Azure*. Microsoft: <https://azure.microsoft.com/en-us/overview/what-is-azure/>

- Microsoft . (2022). *Servicios de Azure*. Microsoft Azure: <https://azure.microsoft.com/es-es/services/>
- Microsoft. (2022). *Grupo de Recursos*. Microsoft: <https://docs.microsoft.com/es-es/azure/azure-resource-manager/management/manage-resource-groups-portal>
- Microsoft. (2022). *Power Bi* . Microsoft Power Bi: <https://docs.microsoft.com/es-es/power-bi/fundamentals/power-bi-overview>
- Microsoft IoT Hub. (2022). *IoT Hub*. Microsoft: <https://docs.microsoft.com/es-es/azure/iot-hub/iot-hub-devguide-quotas-throttling>
- Microsoft SQL Database. (2022). *SQL Database*. Microsoft: <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/azure-sql/database/sql-database-paas-overview?view=azuresql>
- Microsoft SQL Server. (2022). *SQL Server*. Microsoft: <https://docs.microsoft.com/es-ES/azure/azure-sql/virtual-machines/windows/sql-server-on-azure-vm-iaas-what-is-overview?toc=%2Fazure%2Fvirtual-machines%2Fwindows%2Ftoc.json&view=azuresql#overview>
- Microsoft Stream Analytics. (2022). *Stream Analytics*. Microsoft: <https://docs.microsoft.com/es-es/azure/stream-analytics/stream-analytics-introduction>
- NIST. (septiembre de 2011). *National Institute of Standards and Technology*. NIST: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf>
- Organización Panamericana de Salud. (2016). La Cadena de Frío. En O. P. Salud, *Programa Ampliado de Inmunizaciones (PAI)* (págs. 154-161). Honduras.
- Pickering, P. (29 de junio de 2017). *Desarrollar con LoRa para aplicaciones IoT de baja tasa y largo alcance*. Digi-Key: <https://www.digikey.com/es/articles/develop-lora-for-low-rate-long-range-iot->

- Rodríguez, J., & Martínez, M. (2020). *Medición de condiciones ambientales para productos perecederos a través de tecnología Sigfox de IoT*. Repositorio Digital Universidad Francisco José de Caldas:
<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/25523/MartinezChaconMichaelAndres2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- SigFox. (Mayo de 2017). *Sigfox Technical Overview*. Sigfox: <https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>
- SigFox. (2022). *Backend de Sigfox*. Sigfox: <https://backend.sigfox.com/device/list>
- Sigfox. (2022). *Sigfox*. Sigfox Support: <https://support.sigfox.com/docs/link-quality:-general-knowledge>
- Sigfox. (2022a). *Smart Cities*. SigFox: <https://www.sigfox.com/en/smart-cities>
- Sigfox. (2022b). *Agriculture*. Sigfox: <https://www.sigfox.com/en/agriculture>
- SigFox Support. (enero de 2022). *Radio Configuration*. Sigfox Support:
<https://support.sigfox.com/docs/radio-configuration>
- ThinXtra. (2021). *ThinXtra Sigfox Developer Xkit*. ThinXtra: <https://thinXtra.com/iot-connectivity/xkit/>
- U-blox. (19 de octubre de 2011). *NEO-6 u-blox 6 GPS Modules*. u-blox. com: https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf?utm_source=en%2Fimages%2Fdownloads%2FProduct_Docs%2FNEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf
- Vange enclosure Store. (2022). *Vange enclosure Store*. Vange enclosure Store:
<https://es.aliexpress.com/item/32765191463.html?gatewayAdapt=glo2esp>

- Vejlgaard, B., Lauridsen, M., Nguyen, H., Kovács, I., Mogensen, P., & Sorensen, M. (2017). Coverage and Capacity Analysis of Sigfox, LoRa, GPRS, and NB-IoT. *IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 1-5.
<https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2017.8108666>.
- Wu, M., Lu, T., Ling, F., Sun, J., & Du, H. (2010). Research on the architecture of Internet of things. *2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE)*, (págs. 484-487). Chengdu.
- Yacchirema, D. (septiembre de 2019). *Arquitectura de Interoperabilidad de Dispositivos Físicos para el Internet de las Cosas (IoT)*. Universidad Politécnica de Valencia:
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/129858/Yacchirema%20-%20Arquitectura%20de%20Interoperabilidad%20de%20dispositivos%20f%C3%ADsicos%20para%20el%20%20Internet%20de%20las%20C....pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Apéndice