



ESPE

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

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

**TEMA: ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL ESTÁNDAR LORAWAN PARA
SOLUCIONES DE SMART CAMPUS, IMPLEMENTANDO UN SISTEMA DE
MONITOREO IOT EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS -
ESPE.**

AUTOR: FERNÁNDEZ PAGUAY, MARITZA PAOLA

UQUILLAS ANGUISACA, JHON FABRICIO

DIRECTOR: ING. TRIVIÑO CEPEDA, ROBERTO DANIEL

SANGOLQUÍ

2020



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación *“ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL ESTÁNDAR LORAWAN PARA SOLUCIONES DE SMART CAMPUS, IMPLEMENTANDO UN SISTEMA DE MONITOREO IOT EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE”* fue realizado por los señores *Fernández Paguay, Maritza Paola y Uquillas Anguisaca, Jhon Fabricio*, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 16 de enero del 2020

Ing. Triviño Cepeda, Roberto Daniel Mgs.

CI. 1712197522



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, Y
TELECOMUNICACIONES**

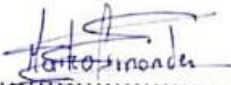
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**


AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, *Fernández Paguay, Maritza Paola y Uquillas Anguisaca, Jhon Fabricio*, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *“ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL ESTÁNDAR LORAWAN PARA SOLUCIONES DE SMART CAMPUS, IMPLEMENTANDO UN SISTEMA DE MONITOREO IOT EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE”* es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 16 de enero del 2020


.....
Fernández Paguay, Maritza Paola
CI. 0604952952


.....
Uquillas Anguisaca, Jhon Fabricio
CI. 0942058728



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

iv

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

AUTORIZACIÓN

Nosotros, Fernández Paguay, Maritza Paola y Uquillas Anguisaca, Jhon Fabricio, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL ESTÁNDAR LORAWAN PARA SOLUCIONES DE SMART CAMPUS, IMPLEMENTANDO UN SISTEMA DE MONITOREO IOT EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 16 de enero del 2020

.....
Fernández Paguay, Maritza Paola
CI. 0604952952

.....
Uquillas Anguisaca, Jhon Fabricio
CI. 0942058728

DEDICATORIA

En primer lugar quiero dedicar este trabajo a Dios, quien considero me ha permitido alcanzar todas mis metas, de igual manera a mis padres, hermanos y familia por su apoyo incondicional en esta gran experiencia que es la Universidad.

JHON FABRICIO UQUILLAS ANGUISACA

Este presente trabajo de investigación lo dedico a mis padres Manuel y Piedad, por su amor, trabajo y por los valores inculcados durante todos estos años. A mi hermana Sandra por su apoyo incondicional.

MARITZA PAOLA FERNANDEZ PAGUAY

AGRADECIMIENTO

Un especial agradecimiento a todas las personas que forman parte de mi vida, dado que por su apoyo y sus consejos he logrado superar todas y cada una de las pruebas de esta etapa.

JHON FABRICIO UQUILLAS ANGUISACA

Un especial agradecimiento a Dios y a mi familia por estar en los momentos difíciles y que forman parte de mi vida, dado que por su apoyo y amor he logrado superar todas las barreras.

MARITZA PAOLA FERNANDEZ PAGUAY

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO DEL DIRECTOR.....	ii
AUTORIA DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACION.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
RESUMEN.....	xxii
ABSTRACT	xxiii
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación e Importancia.....	4
1.3. Alcance del Proyecto.....	7
1.4. Objetivos.....	8
1.4.1. Objetivo General	8

1.4.2. Objetivos Específicos	8
1.5. Descripción General del Proyecto	9
CAPÍTULO II	11
2. ESTADO DEL ARTE	11
2.1. Introducción.....	11
2.2. Smart City.....	11
2.3. Smart Campus	13
2.3.1. Smart People: Comunidad Senspeople.....	14
2.3.2. Smart Living: Microentorno de Calidad.....	14
2.3.3. Smart Economy: Economía Inteligente.....	15
2.3.4. Smart Government: Gobernanza del Futuro.....	16
2.3.5. Smart Environment: Un Entorno de Calidad de Vida	17
2.3.6. Smart Mobility: Movilidad Urbana	17
2.4. Internet of Things (IoT).....	18
2.5. Arquitectura IoT	20
2.6. Aplicaciones IoT	20
2.7. Modelos de red para IoT.....	21
2.8. Tecnologías de comunicación para IoT.....	24
2.9. Redes Low-Power Wide Área Network (LPWAN)	25

2.9.1. Longe Range (LoRa)	26
2.9.2. Low Power Wide Area Network (LoRaWAN)	33
2.9.3. Seguridad LoRaWAN.	37
2.10. Sensor y Transductor	38
2.10.1. Red de Sensores.....	39
2.10.2. Aplicación de sensores en IoT.....	40
CAPITULO III	42
3. Tecnología LoRa	42
3.1. Análisis de LoRaWAN.....	42
3.1.1. Frecuencia de trabajo.....	43
3.1.2. Ciclo de Trabajo	43
3.1.3. Configuraciones de LoRa	44
3.2. Descripción de dispositivos	45
3.2.1. Chip Transceptores LoRa	46
3.2.2. Módulos LoRa	46
3.3. Análisis de la placa.....	51
3.3.1. ESP32 con LoRa.....	52
3.3.2. LoRa SX1276	55
3.4. Software.....	56

3.4.1. Programa en Arduino	57
3.4.2. Definición de Parámetros	58
3.5. Características de la red LoRaWAN	59
3.5.1. Dispositivos de reducido tamaño.....	59
3.5.2. Bajas frecuencias de operación	60
3.5.3. Largo alcance de comunicación	60
3.5.4. Bajo consumo energético	75
3.5.5. Bajas tasas de transmisión de datos.....	83
3.6. Conclusiones.....	85
CAPITULO IV	88
4. DISEÑO E IMPLEMENTACION DE SISTEMA DE MONITOREO	88
4.1. Requerimientos del Diseño.....	88
4.1.1. Descripción de Hardware	89
4.1.2. Requerimientos de Software.....	91
4.2. Selección de dispositivos de medición y unidad de control de Tx/Rx	94
4.2.1. Parámetros de selección de dispositivos.....	94
4.2.2. Temperatura y Humedad	94
4.2.3. pH	99
4.2.4. Dióxido de Carbono (CO ₂)	103

4.2.5. Sensor Radiación Ultravioleta.....	106
4.2.6. Unidad de control de Tx y Rx	110
4.2.7. Energía y Alimentación.....	111
4.3. Diseño de Hardware	111
4.3.1. Carcasa	112
4.3.2. Diagrama de Conexiones.....	114
4.4. Diseño de Software.....	115
4.4.1. Software para los Nodos.....	115
4.4.2. Software para el Gateway.....	118
4.4.3. Plataforma Web.....	120
4.5. Implementación.....	127
4.5.1. Escenario de estudio	127
4.5.2. Comunicación Gateway LoRa – Server – BD.....	129
4.5.3. Implementación de dispositivo de medición	130
4.5.4. Desarrollo de la Plataforma Web	131
4.6. Protocolos de Prueba	134
4.6.1. Prueba 1: Recolección de datos en los Nodos finales	134
4.6.2. Prueba 2: Recolección de datos del Gateway.....	135
4.6.3. Prueba 3: Conectividad.....	136

4.6.4. Prueba 4: Almacenamiento.....	138
4.6.5. Prueba 5: Duración de las baterías	139
4.6.6. Prueba 6: Radio de cobertura.	140
4.6.7. Prueba 7: Sistema de monitoreo de variables ambientales.....	141
4.6.8. Prueba 8: Descarga y análisis de Datos	141
CAPITULO V	143
5. RESULTADOS	143
5.1. Sistema de monitoreo y escenario de prueba	143
5.1.1. Sistema de monitoreo	143
5.1.2. Escenario de prueba.....	143
5.2. Evaluación de hardware	145
5.2.1. Recolección de datos en los nodos finales	145
5.2.2. Recolección de datos en el Gateway	150
5.2.3. Conectividad.....	152
5.2.4. Almacenamiento.....	157
5.2.5. Duración de la batería.....	160
5.2.6. Radio de cobertura.....	163
5.2.7. Sistema de monitoreo de variables	167
CAPITULO VI.....	185

6.	Conclusiones y Recomendaciones	185
6.1.	Conclusiones.....	185
6.2.	Recomendaciones	189
	Referencias Bibliográficas	191
	ANEXOS.....	204

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Aplicaciones de IoT</i>	21
Tabla 2 <i>Tasa de bits y Sensibilidad según los valores de SF</i>	27
Tabla 3 <i>Estructura de la trama física de LoRA para Uplink</i>	29
Tabla 4 <i>Estructura de la trama física de LoRA para Downlink</i>	29
Tabla 5 <i>PHY Payload</i>	29
Tabla 6 <i>PHY Payload</i>	30
Tabla 7 <i>MAC Payload</i>	30
Tabla 8 <i>Estructura FHDR</i>	31
Tabla 9 <i>Valores de frecuencia por región</i>	32
Tabla 10 <i>Parámetros de configuración LoRa</i>	44
Tabla 11 <i>Características de los chips transceptores Semtech</i>	46
Tabla 12 <i>Características de los chips transceptores Microchip</i>	46
Tabla 13 <i>Características Modulo REYAX RYLR869</i>	47
Tabla 14 <i>Características módulo Dragino LoRa Shield</i>	49
Tabla 15 <i>Características del módulo MKR WAN 1300</i>	50
Tabla 16 <i>Características de las versiones del módulo TTGO LoRa32</i>	51
Tabla 17 <i>Tabla comparativa de modos de bajo consumo</i>	54
Tabla 18 <i>Configuraciones de los dispositivos LoRa</i>	58
Tabla 19 <i>Comparación de precio y tamaño de los módulos LoRa</i>	59
Tabla 20 <i>Descripción de las rutas</i>	62
Tabla 21 <i>Factores medioambientales</i>	64
Tabla 22 <i>Límites máximos y mínimos de RSSI</i>	66
Tabla 23 <i>Límites máximos y mínimos de SNR</i>	68
Tabla 24 <i>Radio de cobertura en función de la ruta y configuración</i>	69
Tabla 25 <i>Abreviaturas y valores de los estados durante la transmisión</i>	78
Tabla 26 <i>Datos de corrientes y tiempos para cada configuración</i>	80
Tabla 27 <i>Tamaño en bytes de la trama payload</i>	83
Tabla 28 <i>Calculo del Throughput para las diferentes configuraciones</i>	84
Tabla 29 <i>Niveles de cobertura de los dispositivos TTGO LoRa32</i>	86

Tabla 30 <i>Requisitos Funcionales del software de los módulos LoRa</i>	92
Tabla 31 <i>Requisitos No Funcionales del software de los módulos LoRa</i>	92
Tabla 32 <i>Requisitos Funcionales y No Funcionales del software del Back-end</i>	93
Tabla 33 <i>Requisitos Funcionales del software del Front-end</i>	93
Tabla 34 <i>Requisitos No Funcionales del software del Front-end</i>	94
Tabla 35 <i>Especificación técnica sensor DHT11 y DHT22</i>	95
Tabla 36 <i>Factores medioambientales de estación meteorológica INAMHI San Rafael</i>	97
Tabla 37 <i>Ejemplos y rangos de ph</i>	99
Tabla 38 <i>Especificación técnica de la Sonda E201</i>	99
Tabla 39 <i>Especificación técnica de la placa pH-4502C</i>	100
Tabla 40 <i>Especificación técnica sensor MG-811 y MQ-135</i>	104
Tabla 41 <i>Categoría de exposición a la radiación UV</i>	107
Tabla 42 <i>Especificación técnica sensor SII145 y ML8511</i>	107
Tabla 43 <i>Índice UV de estación meteorológica INAMHI – Guamaní</i>	109
Tabla 44 <i>Descripción de Componente</i>	113
Tabla 45 <i>Periodos y tiempos de muestreo de variables</i>	116
Tabla 46 <i>Componentes del código de programa Arduino para Nodo</i>	118
Tabla 47 <i>Componentes del código de programa Arduino para Gateway</i>	119
Tabla 48 <i>Atributos de las variables</i>	125
Tabla 49 <i>Periodos y tiempos de muestreo de variables</i>	126
Tabla 50 <i>Variables implementadas por Nodo</i>	128
Tabla 51 <i>Características de los nodos</i>	144
Tabla 52 <i>Calculo del error entre los datos medidos de temperatura y humedad con INAMHI</i>	146
Tabla 53 <i>Calculo del error entre los datos medidos de UV con INAMHI</i>	147
Tabla 54 <i>Identificador del nodo</i>	150
Tabla 55 <i>Identificador y nombre del archivo php</i>	158
Tabla 56 <i>Valores de corriente y tiempo de los sensores</i>	160
Tabla 57 <i>Corriente media de los distintos nodos</i>	161
Tabla 58 <i>Tiempo de vida de las baterías calculado</i>	161
Tabla 59 <i>Valores de RSSI medidos en los diferentes nodos</i>	165

Tabla 60 <i>Numero de datos y porcentaje de paquetes recibidos</i>	166
Tabla 61 <i>Tipo de archivo y tamaño de descarga de la página web</i>	171
Tabla 62 <i>Variable de temperatura en los diferentes nodos</i>	172
Tabla 63 <i>Coeficientes de correlación de variable temperatura</i>	174
Tabla 64 <i>Variable de humedad en los diferentes nodos</i>	175
Tabla 65 <i>Coeficientes de correlación de variable humedad</i>	177
Tabla 66 <i>Variable de calidad de aire en los diferentes nodos</i>	177
Tabla 67 <i>Coeficientes de correlación de variable CO2</i>	179
Tabla 68 <i>Variable de radiación UV en los diferentes nodos</i>	180
Tabla 69 <i>Valores máximos diarios de radiación UV</i>	181
Tabla 70 <i>Coeficientes de correlación de variable UV</i>	182
Tabla 71 <i>Variable pH en el nodo 4</i>	183

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de Interconexión IoT.	19
Figura 2. Arquitectura de tres capas IoT.	20
Figura 3. Comunicación dispositivo a dispositivo	22
Figura 4. Comunicación dispositivo a la nube.	22
Figura 5. Comunicación dispositivo a puerta de enlace.....	23
Figura 6. Modelo de intercambio de datos a través del back-end.....	24
Figura 7. Topología red LoRa.	27
Figura 8. Formato de mensaje LoRa.	28
Figura 9. Distribución de las frecuencias por región.	32
Figura 10. Topología lógica LoRaWAN.....	34
Figura 11. Arquitectura del protocolo LoRaWAN	35
Figura 12. Topología de redes de sensores.	40
Figura 13. Relación entre SF, Bit Rate y Airtime.	42
Figura 14. Distribución de canales para la banda AU.....	45
Figura 15. Modulo REYAX RYLR869.	47
Figura 16. Modulo Dragino LoRa Shield	48
Figura 17. Modulo MKR WAN 1300	49
Figura 18. Modulo TTGO LoRa32	50
Figura 19. Módulo TTGO LoRa 32	52
Figura 20. Diagrama de Bloques ESP32.....	53
Figura 21. Chip Transceptor SX1276.	55
Figura 22. Diagrama de flujo para LoRa.....	57
Figura 23. Código para configuración de parámetros.....	58
Figura 24. Distribución de las rutas en la ESPE.	61
Figura 25. Valores de RSSI configuración DR0 ruta 1.....	64
Figura 26. Valores de RSSI configuración DR0 ruta 1.....	65
Figura 27. Valores SNR configuración DR0 ruta 1.	66
Figura 28. Paquetes recibidos configuración DR0 ruta 1.	67
Figura 29. Valores SNR configuración DR0 ruta 1.	68

Figura 30. Radio de cobertura. a) Configuración DR0, b) Configuración DR1, c) Configuración DR2, d) Configuración DR3, e) Configuración DR4, f) Configuración DR5, g) Configuración DR6	71
Figura 31. Media de paquetes recibidos configuración DR0	72
Figura 32. Desviación estándar valores SNR configuración DR0 ruta 2.....	73
Figura 33. Desviación estándar valores SNR configuración DR0 ruta 3.....	73
Figura 34. Desviación estándar valores SNR configuración DR0 ruta 4.....	74
Figura 35. Desviación estándar valores SNR configuración DR0 ruta 5.....	75
Figura 36. Diagrama de medición de corriente	76
Figura 37. Diagrama de medición de tiempos.....	77
Figura 38. Dispositivos clase A ventanas Transmisión.	77
Figura 39. Medición Osciloscopio dispositivo clase A.....	78
Figura 40. Consumo medio de una transmisión.....	81
Figura 41. Tiempo de vida de la batería.....	82
Figura 42. Cobertura de los dispositivos TTGO LoRa32.	86
Figura 43. Esquema general del sistema de monitoreo.....	89
Figura 44. Diagrama de bloques de un nodo.....	90
Figura 45. Requisitos de diseño.	90
Figura 46. Módulo DHT11	96
Figura 47. Respuesta de temperatura del sensor DHT11 al ambiente externo	97
Figura 48. Respuesta de humedad del sensor DHT11 al ambiente externo.....	98
Figura 49. Sonda pH E201	100
Figura 50. Placa pH-4502C.....	101
Figura 51. Respuesta de sensor de pH y colores de banda de pH.....	102
Figura 52. Módulo MQ-135	105
Figura 53. Respuesta del sensor MQ135.....	106
Figura 54. Sensor ML8511	108
Figura 55. Respuesta del sensor UV al ambiente externo.....	109
Figura 56. Respuesta del sensor UV al ambiente interno.	110
Figura 57. Batería Ion litio 5V	111

Figura 58. Componentes de hardware de un nodo.	112
Figura 59. Diseño de carcasa con distribución de sensores.	113
Figura 60. Diagrama general de conexiones del nodo.	114
Figura 61. Diagrama de flujo generalizado de nodos.....	116
Figura 62 Diagrama de tiempo de las variables	117
Figura 63. Diagrama de flujo del dispositivo Gateway.....	119
Figura 64. Diagrama de Tecnologías	121
Figura 65. Interfaces y componentes de la página web.....	122
Figura 66. Diagrama entidad relación: a) BD usuarios, b) BD nodos	125
Figura 67. Distribución de Zonas de Estudio.....	128
Figura 68. Diseño de base de datos.....	129
Figura 69. Secuencia de escritura y lectura de datos en la BD.	130
Figura 70. Dispositivo de Medición.....	130
Figura 71. Diagrama Jerárquico de Plataforma Web	131
Figura 72. Diagrama de secuencia para el registro y/o acceso de usuario.	132
Figura 73. Diagrama de secuencia de gráfica y descarga de datos.	133
Figura 74. Esquema de aplicación de prueba 1.....	134
Figura 75. Esquema de aplicación de prueba 2.....	135
Figura 76. Esquema de aplicación de prueba 3.....	136
Figura 77. Escenario de prueba 4.....	138
Figura 78. Escenario de aplicación de prueba 6.....	140
Figura 79. Diagrama de red.....	143
Figura 80. Mapa de ubicación de los nodos	144
Figura 81. Variables del nodo 2 mostradas en el monitor serie.	145
Figura 82. Diagrama de transmisión de paquete LoRa en capa 2.	146
Figura 83. Datos de temperatura y humedad comparadas con base de INAMHI. a) Nodo 1, b) Nodo 2, c) Nodo 3, d) Nodo 4,e) Nodo 5, f) Nodo 6	148
Figura 84. Datos de variable CO2.....	149
Figura 85. Datos de variable índice UV	149
Figura 86. Datos de variable pH.	149

Figura 87. Estructura de los datos recibidos.	150
Figura 88. Esquema de formato de paquete en la etapa de transmisión.....	151
Figura 89. Comparación entre los datos enviados y datos recibidos.	151
Figura 90. Nombre y clave de la red Wi-Fi.....	152
Figura 91. Dirección IP del nodo Gateway	152
Figura 92. Configuración de la red Wi-Fi.....	153
Figura 93. Ping computadora conectada a la red y nodo Gateway.	154
Figura 94. Latencia del canal inalámbrico.	154
Figura 95. Ping entre un dispositivo de la red hacia el servidor.	155
Figura 96. Traza hacia el servidor "smartuniversity.tech"	155
Figura 97. Captura del tráfico.	156
Figura 98. Trama Metadata.	156
Figura 99. Login de Hostinger.	157
Figura 100. Nombre de archivo php.	158
Figura 101. Comparación de tiempos. a) Monitor Serie Gateway, b) Base de datos	159
Figura 102. Captura de tráfico.	159
Figura 103. Almacenamiento en la base de datos.	159
Figura 104. Indicadores de estado de carga de batería.....	162
Figura 105. Consumo estimado y real de la batería del nodo 1.	163
Figura 106. Radio de Cobertura.....	164
Figura 107. Monitor serie valores de RSSI.	165
Figura 108. Paquetes perdidos por Nodo	166
Figura 109. Página de inicio de la plataforma web.....	168
Figura 110. Ubicación de los nodos de acuerdo al mapa de la universidad.....	168
Figura 111. Gráfica de las variables del nodo 1.....	169
Figura 112. Opción de filtrado de las gráficas por fechas.....	170
Figura 113. Opción exportar de la página web.	170
Figura 114. Archivo descargado	171
Figura 115. Valores de temperatura de la primera semana en los diferentes nodos	173
Figura 116. Correlaciones con $\rho > 0,9$	174

Figura 117. Distribución diaria temporal de humedad.....	176
Figura 118. Distribución temporal calidad de aire.....	178
Figura 119. Correlaciones con $\rho > 0,7$	179
Figura 120. Distribución temporal radiación UV	180
Figura 121. Correlación con $\rho > 0,85$	182
Figura 122. Distribución temporal pH.	183

RESUMEN

El presente proyecto de investigación se enfoca en el estudio de la tecnología LoRa (Long Range) y su protocolo LoRaWAN perteneciente a redes de baja potencia (LPWAN), para el desarrollo de servicios de Internet de las cosas (IoT) en un ambiente de Campus Inteligente (Smart Campus), enfocado a la medición de variables ambientales. Para esto la investigación consta de dos partes: inicialmente se realizará el análisis de desempeño de LoRa orientado al alcance de transmisión, consumo energético y capacidad de transmisión de datos, a través de parámetros como: factor de dispersión (SF), ancho de Banda (BW) y frecuencia de transmisión (f); para la segunda parte diseñar e implementar una red de monitoreo de variables ambientales que consta de seis nodos finales y un nodo central ubicados alrededor del campus de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, que recolectarán datos de variables como: temperatura, humedad, calidad del aire, radiación UV y pH del agua, con el fin de analizar el desempeño de LoRA en un ambiente de producción, además de proveer un medio de visualización para la información obtenida a través de un aplicativo web, todo esto con el fin de aportar a la comunidad Universitaria de información del estado del campus.

PALABRAS CLAVE:

- INTERNET DE LAS COSAS
- CAMPUS INTELIGENTE
- REDES WAN DE BAJA POTENCIA
- LONG RANGE

ABSTRACT

This research project focuses on the study of LoRa technology (Long Range) and its LoRaWAN protocol belonging to low power networks (LPWAN), for the development of Internet of things (IoT) services in a Campus environment Smart (Smart Campus), focused on measuring environmental variables. For this, the investigation consists of two parts: initially, the LoRa performance analysis will be carried out, oriented to the transmission range, energy consumption and data transmission capacity, through parameters such as: dispersion factor (SF), Bandwidth (BW) and transmission frequency (f); for the second part, design and implement a monitoring network of environmental variables consisting of six final nodes and a central node located around the campus of the University of the Armed Forces - ESPE, which will collect data from variables such as: temperature, humidity, quality of the air, UV radiation and pH of the water, in order to analyze the performance of LoRA in a production environment, in addition to providing a means of visualization for the information obtained through a web application, all this in order to provide to the University community of campus state information.

KEYWORDS:

- INTERNET OF THINGS
- SMART CAMPUS
- LOW POWER WAN NETWORKS
- LONG RANGE

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El Ecuador destina un alto porcentaje de inversión para la educación superior según datos del Banco Mundial (2015), como resultado se espera que las universidades respondan de acuerdo a las expectativas, actualizando conocimientos y generando proyectos de innovación. Sin embargo, existen otros problemas al interior de las universidades como: la gestión de recursos medioambientales, el consumo energético y la calidad de servicios básicos; que afectan el desenvolvimiento adecuado de la institución. El concepto Smart Campus aparece como solución a estas problemáticas y se define como la práctica de una Ciudad Inteligente aplicado al ámbito universitario, que consiste en el uso de dispositivos conectados que monitorean y entregan datos para ser interpretados como información con el objetivo de gestionar los recursos, minimizar el consumo desbordado y acercarse hacia la sostenibilidad y eficiencia energética.

Aunque existen varios dispositivos, sensores o redes para este objetivo, existen limitaciones de consumo energético y alcance. Por tal motivo requieren soluciones de conectividad con una baja complejidad y consumo de energía, además para coberturas extensas es conveniente que estas tecnologías sean de largo alcance con el fin de reducir costes de infraestructura. Una de las nuevas tecnologías que cumple estas características se ha desarrollado en los últimos años y se denomina LoRa (Long Range) con su estándar LoRaWAN, correspondiente a las redes LPWAN (Low Power WAN) de baja potencia orientada al uso del Internet de las Cosas (IoT), para el monitoreo de Campus y Ciudades Inteligentes.

Ya que los campus son considerados como pequeñas ciudades, donde estudiantes y profesores pueden encontrar todo lo que necesitan; se busca aprovechar el desarrollo y el auge de estas nuevas tecnologías que se encuentran al alcance, para mejorar las condiciones de vida de la comunidad universitaria (Martínez, 2017). La mayoría de estas soluciones se enfocan en el uso de IoT que está permitiendo conectar cada vez más dispositivos a la red, brindando a las personas la posibilidad de aprovechar los datos de mejor manera para la toma de decisiones en las empresas y la vida cotidiana. Evans (2011) pronostica que para el año 2020 habrá 50 billones de dispositivos conectados a Internet.

En este ámbito, España es uno de los países con mayor inversión en la iniciativa Smart ya que en el año 2017 se invirtieron entre 20 y 40 millones para impulsar este proceso. Por ejemplo, en la Universidad de Zaragoza, se implementó un rectorado de sostenibilidad e infraestructura donde uno de sus primeros proyectos se basa en crear un sistema de información geográfica y espacial del campus; para el proyecto se hizo uso de bases de datos, dedicadas a la gestión de actividades en el campus a través del mapeo de instalaciones y aulas. (KPMG, 2017)

Por otro lado, la Universidad de Malanga busca ir acorde con el avance de la tecnología, por tal motivo pone énfasis en las soluciones inteligentes como un recurso para el bienestar de los ciudadanos. Tomando en cuenta la importancia de la salud en cada una de las personas que permanentemente se encuentran en el campus; se llevó a cabo el análisis del estado de cada edificio evaluando valores de temperatura, grado de humedad y la presencia de alérgenos, que pueden causar problemas en la salud. La universidad lanzó el proyecto en el que se han invertido 150.000 euros para la formación de equipos de trabajo en los que interfieran empresas, profesorado y alumnos para promover el concepto de Smart Campus. (Malanga, 2017)

El Dr Thiruchelvam, decano de la facultad de Informática y Tecnología de la APU (Asia Pacific University) estableció una colaboración con Semtech Corporation, con el objetivo que el Campus APU este equipado con una tecnología de red de área amplia (LPWAN) de bajo consumo y larga duración que está diseñado para satisfacer las demandas de las aplicaciones y servicios de IoT mediante la conexión de dispositivos, como sensores. Lo que le permite al Campus APU convertirse en el primero de Malasia en aplicar el concepto de “Smart Campus” buscando el beneficio de cada uno de los integrantes de la universidad tanto para estudiantes como profesores. (Thiruchelvam, 2017)

Actualmente, en América Latina existen algunos proyectos encaminados a la iniciativa Smart, tal es el caso de la Universidad Católica de Colombia en la cual se desarrolló el concepto de Smart Buildings que se trata de instalaciones y sistemas dedicados a una gestión y monitoreo automatizado, con el objetivo de aumentar la eficiencia energética, la seguridad, la usabilidad y la accesibilidad para un manejo medioambiental del campus universitario. (Jimenes, Anderson, & Diaz, 2017)

En la Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito, se realizó un trabajo llamado “Smart City aplicada a la decanatura de ingeniería en sistemas de la Escuela Colombiana de Ingeniería” donde se realizó la implementación del reconocimiento facial de personas que puedan tener acceso a las oficinas administrativas de esta forma buscando amplificar la seguridad institucional. (Ayala, Becerra, & Escobar, 2016)

En Ecuador, el municipio del Distrito Metropolitano de Quito se encuentra trabajando en impulsar el concepto de ciudad inteligente con la estrategia de “Agenda Digital, socialmente innovadora 2022” cuyo objetivo es alcanzar un nivel alto de desarrollo digital, para que en un futuro

la ciudad sea considerada como un referente de innovación social y tecnología para toda la región. (Jimbo, Jimbo, & Aguilar, 2017)

Debido a la tendencia de Smart campus y las posibles aplicaciones actuales y futuras el presente trabajo de titulación pretende aportar a su desarrollo con el análisis del estándar de comunicación LoRa/LoRaWAN, para posteriormente implementar una red de sensores y crear un servicio para campus inteligente de bajo costo y largo alcance dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, entregando datos para generar información y mostrarlos en una página web disponible para la comunidad universitaria como un servicio que pertenece al ámbito de Smart Living y Smart Environment dentro del concepto de “Smart Campus”.

1.2. Justificación e Importancia

Actualmente el concepto de “Smart City” es uno de los más conocidos (Enerlis, Young, Ferrovia, & Network, 2012), esto es debido al avance de la tecnología y sus innovaciones; aparece como una solución contra los problemas a los que se enfrenta como sociedad y que se centran en una mejor gestión de los recursos medioambientales, la reducción del consumo energético, la disminución de residuos, etc. La práctica “Smart Campus” es sinónimo de lo que se hace en las ciudades inteligentes aplicado al ámbito universitario.

En el 2015 las Naciones Unidas definen una serie de objetivos para alcanzar metas de desarrollo sostenible donde todo el mundo debe poner de su parte, según el objetivo 6 (Agua limpia y Saneamiento), la mala calidad del agua y el saneamiento inadecuado repercuten en la seguridad alimentaria y los medios de subsistencia, de igual forma según el objetivo 13 (Acción por el clima) el cambio climático afecta negativamente en la vida de las personas y comunidades, donde se busca

que la sociedad sea más respetuosa con el ambiente aplicando soluciones para reducir emisiones y aumentar los esfuerzo de adaptación; cuidar los ecosistemas aporta a combatir el cambio climático como lo indica el objetivo 15 (Vida de ecosistemas terrestres), se deben adoptar soluciones de protección mediante el continuo cuidado y monitorización de los bosques y áreas verdes; todo esto conlleva al desarrollo de valores, cultura y conocimiento que permite generar sociedades sostenibles según el objetivo 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles), en donde el conocimiento del entorno ayuda a generar inteligencia cultural, salud, seguridad y crear innovación social para el desarrollo continuo de la ciudad o comunidad. (Naciones Unidas, 2015)

Debido a que muchos campus universitarios por sus características y entorno, permiten a la comunidad de estudiantes, profesores y trabajadores convivir como sociedad donde se busca impulsar y mejorar la calidad de vida, lo que puede ser posible si todas las personas que conforman esta comunidad conocen las condiciones y estado del lugar que habitan, el medio para conocer esta información se presenta mediante el uso de IoT, que permite conectar cada vez más dispositivos a una sola red, permitiendo a las personas tener acceso a la información y poder tomar decisiones en su vida cotidiana.

Dentro de este ámbito se tienen 3 etapas del desarrollo de red, donde la primera etapa con el internet fijo conectó a 1.000 millones de usuarios mediante PC, la segunda etapa involucra el internet móvil que conecto a más de 2.000 millones con el uso de teléfonos inteligentes; para la tercera etapa se pronostica que para el 2020, IoT conecte 28.000 millones de objetos a Internet desde objetos personales, vehículos, equipos para el hogar y equipos industriales. (Barcena, Prado, Cimoli, & Perez, 2018)

Para proveer conectividad a un gran número de dispositivos de IoT, existen soluciones cotidianas como redes inalámbricas. Pero existe un problema con estas redes clásicas ya que, para lograr un diseño viable, las redes deben proporcionar a los dispositivos comunicaciones de muy bajo consumo y alto alcance, por lo que a partir del 2000 aparecen las redes LPWAN (redes de área amplia de baja potencia). (Mompó, 2018)

En los últimos años la aplicación de redes LPWAN (Low-Power Wide Area Network) ha aumentado significativamente. Actualmente en un gran porcentaje se trabaja con la tecnología denominada LoRa que se caracteriza por el uso eficiente de la energía con baterías que pueden durar hasta 10 años, cobertura con línea de vista de más de 10 km en entornos rurales, así como un rápido despliegue de red con nodos de bajo costo; características que facilitan la implementación en ambientes específicos como Smart Cities. (Campos, 2017)

El parlamento Europeo (Unión Europea 2014), fija los ejes fundamentales del concepto de Smart City como Smart Campus en 6 ámbitos o áreas: smart governance, smart economy, smart mobility, smart environment, smart people y smart living.

Enfocando dos principales aspectos para el desarrollo sostenible de una comunidad universitaria, Smart living permite mejorar la calidad de vida de las personas por medio de la innovación social, tanto en seguridad, sanidad y salud; por otro lado, el concepto de Smart Environment impulsa el cuidado y preservación del medio ambiente mediante la toma de medidas preventivas y decisiones que permitan crear una cultura de cuidado del medio ambiente en la comunidad universitaria. (Borja, Gallegos, Paz, Esponera, & Kolotouchkina, 2016)

En base a lo anterior y tomando en cuenta la necesidad de mantener a la comunidad universitaria en desarrollo sostenible en varios aspectos, este proyecto de investigación es importante ya que representa un medio por el cual la comunidad puede obtener información en tiempo real del estado del campus en donde conviven, generar cultura social de protección y preservación del medio ambiente y áreas verdes, de igual forma aportar al cuidado personal y al cuidado al campus universitario mediante la toma de decisiones respecto a la información presentada; para hacer esto posible el proyecto involucra el concepto de Smart campus con la tecnología correspondiente a redes LPWAN orientado al uso del internet de las cosas y entrega de datos e información a través de la web.

1.3. Alcance del Proyecto

A través de la realización del presente proyecto de titulación se pretende desarrollar un sistema de monitoreo Wireless Sensor Network en el campus matriz de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, involucrando el concepto de “Smart Campus” con una tecnología correspondiente a redes LPWAN, orientada al uso del IoT y entrega de datos e información a través de la Web que esté disponible para la comunidad universitaria como un servicio que pertenece al ámbito de Smart Living y Smart Environment.

Para ello el proyecto de investigación consta de dos partes: en la primera se pretende analizar el desempeño de la tecnología LoRa y su estándar LoRa-WAN enfocándose en: alcance máximo, consumo energético y capacidad de transmisión; probando en una red LPWAN básica conformada por dos nodos (maestro y esclavo).

Para completar el análisis de desempeño sobre una red Smart Campus en la segunda parte se pretende la implementación del sistema de monitoreo que medirá cuatro variables: calidad del aire, pH, temperatura, humedad y radiación UV enfocada a servicios Smart Living y Smart Environment; mediante el uso de siete nodos ubicados estratégicamente en el campus, todos conectados con una topología tipo estrella extendida, para ser controlados por un nodo central de procesamiento y recolección de datos.

Finalmente, los datos recolectados serán enviados por conexión directa a Internet y a una base de datos para ser procesados, interpretados, mostrados y visualizados a través de una página web, con el fin de que la comunidad universitaria tenga acceso a la información en tiempo real del estado del campus con respecto a las variables que se han medido y tengan la posibilidad de usar esta información para el desarrollo de innovación social.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Evaluar el desempeño del estándar LoRaWAN para redes inalámbricas de baja potencia y su aplicabilidad en Smart Campus dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar el estado del arte sobre redes de baja potencia LoRaWAN, redes de sensores inalámbricos (WSN), Internet de las cosas (IoT) y Smart Campus.
- Analizar el estándar LoRaWAN para redes inalámbricas de baja potencia.
- Comprobar el consumo energético, alcance máximo y capacidad de transmisión de LoRaWAN.

- Validar el uso de LoRaWAN aplicada a una red de sensores inalámbricos (WSN).
- Diseñar el sistema de monitoreo de temperatura, humedad, PH, calidad de aire y luminosidad para Smart Campus.
- Caracterizar los sensores que van hacer implementados para el sistema de monitoreo inalámbrico.
- Implementar la red de monitoreo inalámbrico usando LoRaWAN.
- Probar el envío, almacenamiento e interpretación de los datos para presentar la información hasta el Front-End web.
- Evaluar el desempeño del estándar LoRaWAN sobre la red implementada como servicio de Smart Campus.
- Proponer los protocolos de pruebas del sistema
- Analizar resultados.

1.5. Descripción General del Proyecto

La organización del proyecto de investigación se presenta de la siguiente manera:

Primero, se indica de forma general la descripción del trabajo de titulación, como los antecedentes, importancia y justificación, el alcance y la descripción de los objetivos a cumplir con el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Como segundo punto se desarrolla el Estado del Arte, detallando teórica y técnicamente, los conceptos como Smart Cities, Smart Campus, Internet de las Cosas (IoT), redes LPWAN, tecnología LoRaWAN, monitoreo remoto y redes de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Networks).

Para una tercera sección, se realiza el análisis de la tecnología LoRaWAN en base a dos nodos (maestro y esclavo), para medir parámetros de desempeño obteniendo información cuantitativa que permita comprobar el consumo energético, alcance máximo y capacidad de transmisión para validar el uso de LoRaWAN aplicada a una red de sensores inalámbricos.

En la cuarta sección, se continúa con la caracterización de los sensores, así como el diseño de la topología de red e implementación del sistema de monitoreo, que consta de la unión de los bloques de software y hardware, para luego realizar las pruebas de funcionamiento, y mostrar los datos e información a través de la web.

Finalmente se analizarán los resultados y se darán conclusiones y recomendaciones al respecto del estudio.

CAPÍTULO II

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción.

En cualquier campo de investigación, sea que ésta involucre solo una o varias áreas de conocimiento resulta importante familiarizarse con los temas que se van abordar. Para este proyecto de investigación se revisará los conceptos de Smart City, Smart University y el Internet de las cosas (IoT); posteriormente se analizará la estructura de la tecnología Longe Range (LoRa) y del protocolo Low Power Wide Area Network (LoRaWan), hasta llegar al funcionamiento de los sensores con aplicación en IoT.

Con el fin de formar lineamientos correspondientes a las redes Low-Power Wide Area Network (LPWAN) y su estándar LoRa, se va estudiar cada uno de los conceptos mencionados anteriormente brindando una perspectiva hacia el área universitaria, siendo este tema clave para la constitución del presente trabajo.

2.2. Smart City

En los últimos informes emitidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) para el año 2050, dos tercios de la población mundial vivirán en ciudades. Por tal motivo estos juegan un nivel protagónico tanto en el aspecto económico, social y político. (Basterrechea, 2012)

Una smart city es un medio para avanzar hacia un modelo de ciudad. Utilizando la tecnología para facilitar de forma más eficaz los servicios urbanos, mejorar la calidad de vida de los

ciudadanos y transformar la relación entre entidades locales, empresas y pobladores preparando una nueva forma de vivir la ciudad. (Borja, Gallego, Paz, Esponera, & Kolotouchkina, 2015)

El proceso de evolución de cada ciudad está en función de su situación de partida y las necesidades de sus ciudadanos. Según Navarro (2015) los expertos de la escuela de negocios de España y la empresa Telefónica resaltan cuatro fases comunes en el proceso de evolución hacia una Smart city:

- Vertical: se provee a los servicios urbanos de tecnología, para mejorar su gestión.
- Horizontal: desarrolla una plataforma de gestión transversal que conecta los diferentes servicios.
- Conectada: es aquí donde las ciudades empiezan a compartir información y a interoperar las diferentes verticales a través de la plataforma de gestión.
- Inteligente: se gestiona de forma avanzada, predictiva y en tiempo real la ciudad. Ofreciendo información y servicios de calidad a los ciudadanos y empresas, creando un sistema de innovación.

Cada ciudad define su propia visión y ritmo de transformación hacia una gestión inteligente. Sin embargo, para lograr un avance efectivo es necesario contar con un sólido liderazgo por parte de los propios municipios y la intervención del resto de niveles de la Administración de las empresas, de las universidades y los ciudadanos que guíen hacia un ecosistema de ciudad involucrado en la creación de la Smart City. (Borja, Gallego, Paz, Esponera, & Kolotouchkina, 2015)

2.3. Smart Campus

Dentro del concepto de Smart City se desprende el concepto de Smart Campus. Los campus universitarios son lugares donde estudian o trabajan diariamente miles de personas, por tal motivo se las compara con pequeñas ciudades por los servicios que aportan, las infraestructuras necesarias para alojarlos, las redes de comunicaciones y transporte que se requieren para la gestión de la vida universitaria. (Benedito, y otros, 2013)

La solución de universidades inteligentes o Smart campus se ha diseñado para superar obstáculos como la gestión de los recursos medioambientales, la reducción del consumo energético y la disminución de los residuos. De esta forma se adopta una arquitectura de las tecnologías de información y comunicación (TIC) avanzada, para desarrollar y aumentar la eficacia diaria del campus a través de sólidas funciones. (Martinez, 2017)

La Unión Europea (2014), en su informe Mapping Smart Cities in the EU menciona que el desarrollo económico y urbano de una universidad se basa en mantener una política de sostenibilidad, explotación de los recursos de manera eficiente en todas sus áreas, una correcta gestión y una apuesta para la innovación. Por tal motivo, en el informe se proponen seis ámbitos Smart que se especifican a continuación:

- Smart People
- Smart Living
- Smart Economy
- Smart Government
- Smart Environment

- Smart Mobility

2.3.1. Smart People: Comunidad Senspeople

Cuando se considera Smart People se lo ve como la capacidad de los ciudadanos de ser proveedores de datos para las universidades.

Un Smart Campus en el ámbito Smart People está formado por cuatro pilares fundamentales que se puede definir a continuación (Pérez, Martínez, Bernabéu, Fonseca, & Guilló, 2016):

- E-habilidades: otorga conocimiento en las tecnologías de información (TI) a los ciudadanos con el objetivo de proveer una mejor calidad de vida, impulsando la integración social, la accesibilidad y el desarrollo de ideas y conocimientos.
- Senspeople: utiliza a los ciudadanos como sensores inteligentes de tal modo que sean partícipes de la entrada de datos en el Smart Campus, favoreciendo a la retroalimentación de la información y a la mejora de la calidad de los servicios.
- Teletrabajo/Teleducación/e-Capacitación: permite una mejora en la capacitación y formación de las personas, tanto estudiantes como el personal docente y administrativo de la Universidad.
- Smart Service: desarrollar herramientas de creación de servicios tanto para la administración como para los estudiantes, E-encuestas, e-Votaciones y e-participación.

2.3.2. Smart Living: Microentorno de Calidad

Según el estudio Smart Living actúa en los ámbitos de: salud, seguridad ciudadana, cultura, domótica en viviendas. Proporcionando servicios inteligentes como e-salud, e-accesibilidad y e-

turismo, con el objetivo de incrementar los niveles de cohesión social, el capital y la seguridad de las urbes. (Pérez, Martínez, Bernabéu, Fonseca, & Guilló, 2016)

Los cuatro pilares básicos que engloban todas las características anteriormente mencionadas son:

- **Innovación Social:** mejorar y desarrollar nuevos servicios en beneficio de la sociedad mediante las TI y diseñar nuevas herramientas que benefician la accesibilidad para personas con discapacidad proporcionándoles cierto nivel de autonomía.
- **e-Salud:** implementar nuevas tecnologías en el ámbito de la salud entre ellas la teleasistencia, servicios médicos y monitorización de pacientes a distancia.
- **e-Cultura:** mediante plataformas de TI transmitir y fomentar la identidad cultural a través de la digitalización del patrimonio histórico y cultural.
- **Seguridad:** con la ayuda de sensores integrar servicios de emergencia, cámaras de video vigilancia y análisis de grandes cantidades de datos en tiempo real con el objetivo de aumentar el nivel de respuesta ante situaciones de emergencia.

2.3.3. Smart Economy: Economía Inteligente

Este pilar se basa en una serie de conceptos para estimular el desarrollo, la sostenibilidad y el atractivo para nuevas inversiones, los principales son: e-bussiness, e-commerce, incremento de la productividad, empleo e innovación en TI, generación de servicios y nuevos productos. Permitiendo oportunidades de negocio y emprendimiento, centrándose en (Pérez, Martínez, Bernabéu, Fonseca, & Guilló, 2016):

- Emprendimiento | Productividad | Competitividad: genera iniciativas emprendedoras, incrementa la competitividad y fomenta una alta productividad.
- Urban Labs: busca obtener un Retorno de la Inversión por medio de la creación de servicios innovadores y laboratorios urbanos.
- Atractivo turístico e internacionalización: creación de una marca que generara una perspectiva para el fomento turístico tanto social como económico.
- Formación: fomento de la capacidad creativa, desarrollo personal y formación de la comunidad.

2.3.4. Smart Government: Gobernanza del Futuro

Smart Government tiene como función principal el desarrollo de políticas que promuevan la incorporación de las TI para el servicio de los ciudadanos. Las TI no son el objetivo sino el medio para que las universidades obtengan los elementos necesarios para convertirse en un campus inteligente y sostenible, siendo sus cuatro pilares (Pérez, Martínez, Bernabéu, Fonseca, & Guilló, 2016):

- Transparencia: la información y los procesos realizados por la administración serán de fácil acceso para los ciudadanos mediante las TI.
- e-Gobierno: permite una mejora de los procesos democráticos y desarrolla las oportunidades de los ciudadanos para interactuar con los gobiernos.
- e-Administración: factores como la realización de trámites, pago de impuestos y firma electrónica de manera online, facilitan la relación de los ciudadanos con la administración.
- Open Data: brindar acceso a datos de manera sencilla y libre, son clave para la transparencia y la creación de servicios para el ciudadano.

2.3.5. Smart Enviorenmet: Un Entorno de Calidad de Vida

Este ámbito se basa en el uso de Green Computing and Information Technology (Green TI) para desarrollar un entorno inteligente, capaz de optimizar los recursos naturales, preservar y proteger el medio ambiente, reducir los gases y residuos de manera sostenible, y de controlar y racionalizar el consumo de energía.

Con el fin de conseguir los objetivos, Smart Environment se centra en los siguientes ámbitos (Pérez, Martínez, Bernabéu, Fonseca, & Guilló, 2016):

- Energía (Smart Grid): consumo y eficiencia energética
- Agua (Smart Water): control, gestión y optimización del agua.
- Residuos (Smart Waste): control y sensorización de contenedores. Monitorización de flotas encargadas de la recolección de residuos.
- Medio Ambiente (Smart Green): monitorización de la contaminación, el ruido, eco-edificios sostenibles.

2.3.6. Smart Mobility: Movilidad Urbana

Por otro lado, Smart Mobility permite proporcionar información relevante en tiempo real para que el público puede acceder para actualizar y mejorar el sistema de movilidad, reduciendo las emisiones de gases CO₂ y optimizando la gestión de los servicios de redes de transporte.

Según Pérez y Martínez (2016), los tres pilares de un Smart Campus en el ámbito Smart Mobility son:

- Transporte: desarrollar, mejorar y fomentar los modelos de transporte para favorecer al medioambiente, el ahorro y la sostenibilidad a través de la gestión del tráfico priorizando

rutas alternas, gestión temprana de accidentes, monitorización y sistemas de regulación del tráfico.

- Ubicación: uso de herramientas para la geolocalización con el fin de evitar retrasos, gestión eficiente de accesibilidad a las ciudades y creación de modelos de predicción para su gestión autónoma.
- Movilidad: incentivar al uso de transporte sostenible mediante la dotación de información útil y precisa para los ciudadanos.

2.4. Internet of Things (IoT)

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), publicó en el 2005 su primer estudio sobre Internet de las Cosas. En donde se afirma que:

“Una nueva dimensión se ha agregado al mundo de las tecnologías de información y la comunicación (TIC): a cualquier hora, en cualquier lugar, ahora se va a tener conectividad para cualquier cosa. Las conexiones se multiplican y crearan una nueva red dinámica de redes con redes, una internet de las cosas”. (Guerra & Alberto, Agosto 2016)

El Internet y las Comunicaciones máquina a máquina (M2M) son las dos áreas que originan IoT, e integran tecnologías como: cloud computing, redes de sensores inalámbricas, identificación por radiofrecuencia, middleware y software IoT. Una de las características primordiales que presenta, es el tratamiento de los datos que siguen un proceso de recolección, procesamiento y análisis para convertirlos en información y posteriormente en conocimiento. (Rueda & Talavera, 2017)

De acuerdo con Selinger (2017), IoT integra cuatro pilares: las personas, los procesos, los datos y las cosas. Específicamente en el ámbito educativo la integración de estos pilares está convirtiendo gradualmente la forma tradicional como se concibe y lleva a cabo los procesos y actividades educativas, de investigación, administrativas y otros aspectos relacionados con las Instituciones de Educación Superior. (Rueda-Rueda, Manrique, & Cruz, 2017)

Universidades de Estados Unidos como la de Wisconsin-Madison han dedicado sus esfuerzos al desarrollo de un laboratorio de Internet de las Cosas. El cual está enfocado a explorar y extender tecnologías de punta, así como su potencial aplicación en salud, industria y los diferentes medios que buscan una innovación de este tipo. (Sanchez, 2017)

IoT permite realizar la interconexión de sistemas y personas, además de estimular la innovación para facilitar un conjunto de objetivos en beneficio de la mayoría. La estructura de la interconexión se muestra en la figura 1.

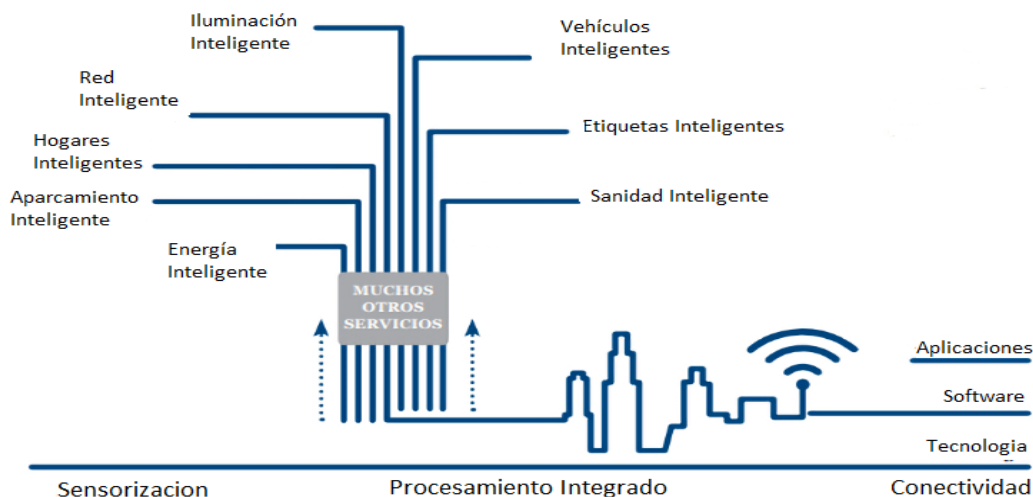


Figura 1. Estructura de Interconexión IoT.

Fuente: (Staff, 2018)

2.5. Arquitectura IoT

Es importante tomar en cuenta la arquitectura de servicio que ofrece IoT (figura 2), la más sencilla que está formada por tres capas (Gubbi, Buyya, Marusic, & Palaniswami, 2012):

- Capa de Percepción: desarrolla los componentes de hardware y dispositivos de comunicación necesarios para la implementación de IoT.
- Capa de Red: sistema diseñado para almacenar y procesar los datos enviados por miles de dispositivos conectados al IoT.
- Capa de Aplicación: presentación con el usuario final de la información obtenida.

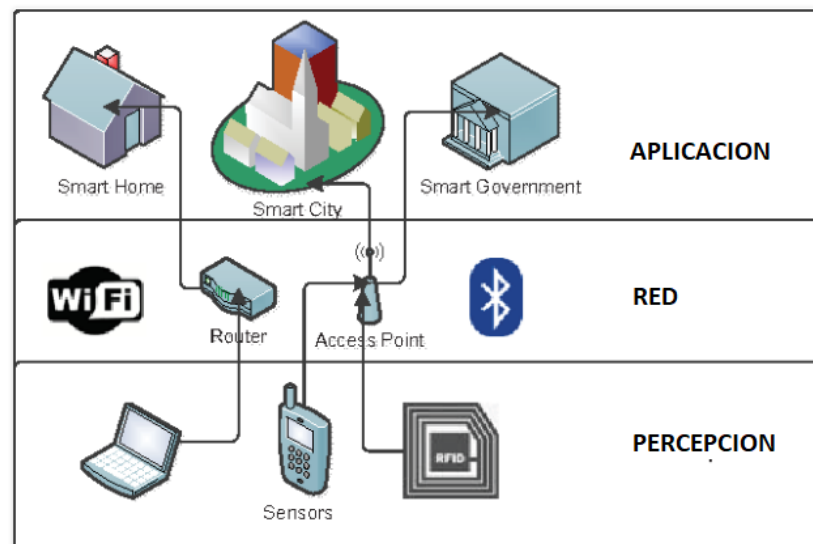


Figura 2. Arquitectura de tres capas IoT.

Fuente: (Geber, 2017)

2.6. Aplicaciones IoT

Actualmente, existe un amplio sector de aplicación para IoT esto es debido a la creciente evolución de los servicios en la nube, abaratamiento de hardware, gran capacidad de potencia y

alto despliegue de redes de acceso. Los entornos más importantes de aplicación para IoT se especifican en la tabla 1 (Garces, 2017).

Tabla 1

Aplicaciones de IoT.

Entorno	Característica
Cuerpo Humano	Dispositivos dedicados al monitoreo de la salud y el bienestar de las personas. Manejar enfermedades, aumentar la aptitud física y la productividad
Hogar	Controladores y sistemas de seguridad para el hogar
Puntos de venta	Sistemas de auto pago, ofertas de compras presenciales, optimización de inventarios, etc.
Oficinas	Gestión de energía y seguridad en los edificios de oficinas
Fabricas	Eficiencia operativa, optimización del uso de equipos e inventarios.
Obras	Eficiencia operática, mantenimiento predictivo, salud y seguridad
Vehículos	Mantenimiento basado en la condición, diseño y uso.
Ciudades	Sistemas de control adaptativo de tráfico, contadores inteligentes, monitoreo ambiental y gestión de recursos.
Exteriores	Enrutamiento en tiempo real, la navegación conectada y seguimiento de envíos.

Fuente: McKinsey Global Institute

2.7. Modelos de red para IoT

El Comité de Arquitectura de Internet (2015), emitió un informe referente a la guía de creación de redes de objetos inteligentes, en el cual se especifica cuatro modelos de comunicación que utilizan los dispositivos de IoT (Rose, Eldridge, & Chapin, 2015).

- a) **Dispositivo a dispositivo:** Son dos o más dispositivos que se conectan y se comunican entre sí y no a través de un servidor de aplicación intermedio, como se observa en la figura 3. Este modelo de comunicación es usado para aplicaciones en las cuales no se requiere enviar una amplia cantidad de paquetes de datos, por ejemplo, en sistemas de automatización del hogar.



Figura 3. Comunicación dispositivo a dispositivo

Fuente: (McPherson, 2015)

- b) **Dispositivo a la nube:** en este tipo de comunicación los dispositivos IoT se conectan directamente a un servicio en la nube. La comunicación se lo realiza a través de mecanismos existentes como Wi-Fi o Ethernet para establecer la conexión entre el dispositivo y la red IP.

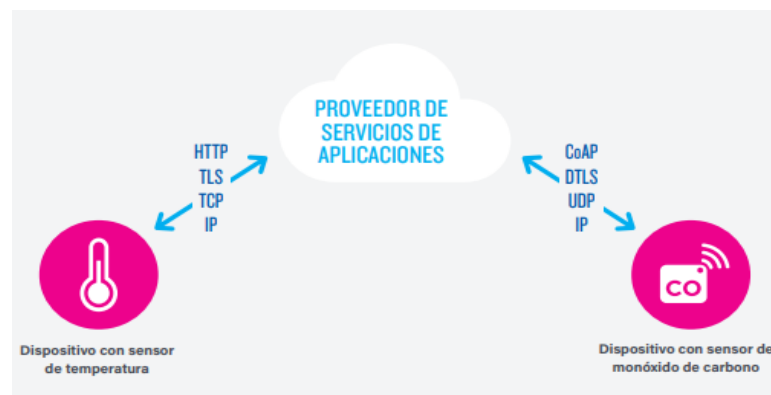


Figura 4. Comunicación dispositivo a la nube.

Fuente: (McPherson, 2015)

- c) **Dispositivo a puerta de enlace:** Se utiliza un dispositivo de puerta de enlace como intermediario entre el dispositivo IoT y el servicio en la nube, cumple funciones de proveedor seguridad y traductor de protocolos y datos.

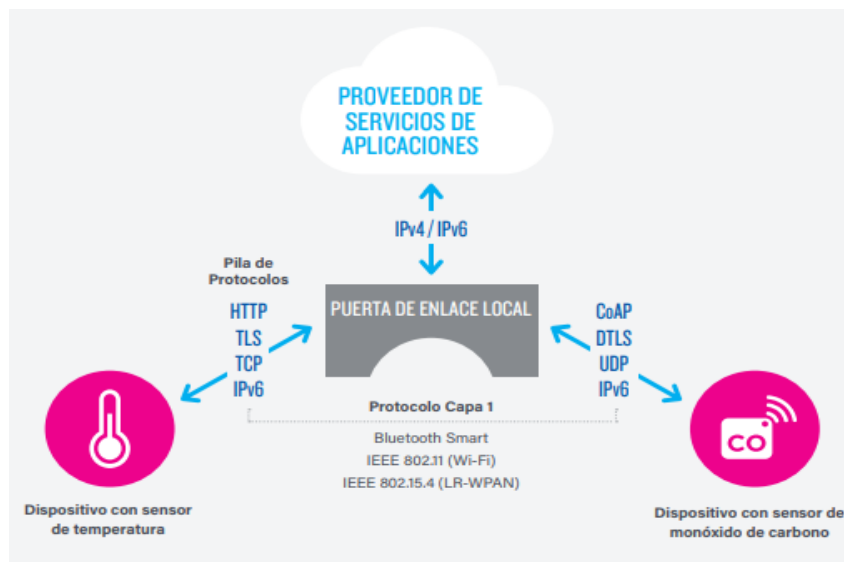


Figura 5. Comunicación dispositivo a puerta de enlace.

Fuente: (McPherson, 2015)

- d) **Modelo de intercambio de datos a través del back-end:** Este modelo de comunicación permite que los usuarios exporten y analicen datos de objetos inteligentes de un servicio en la nube en combinación con datos de otras fuentes. El diagrama del modelo se observa en la figura 6.

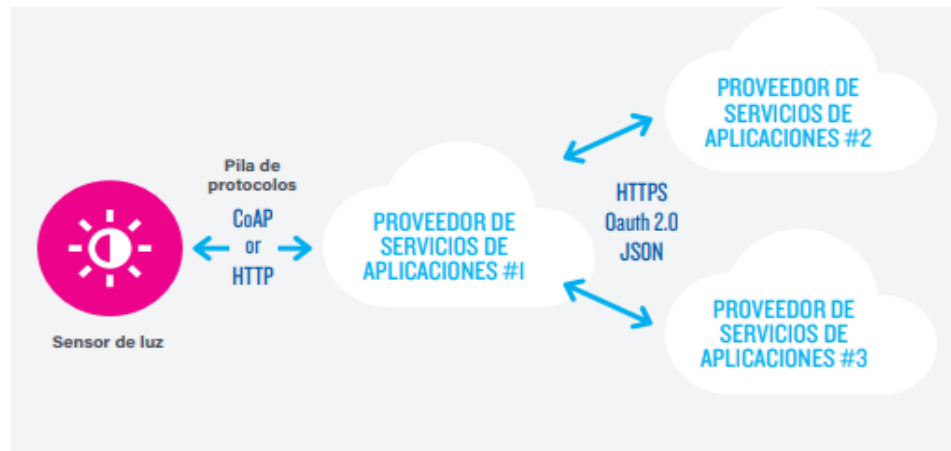


Figura 6. Modelo de intercambio de datos a través del back-end.

Fuente: (McPherson, 2015)

2.8. Tecnologías de comunicación para IoT

Interconectar una gran cantidad de dispositivos en un mismo entorno de red crea la necesidad de contar con una tecnología que se adapte a las características de transmisión, consumo energético, bajo costo de implementación y escalabilidad.

En general los requisitos de una red de comunicaciones de IoT son: (Roche, 2017)

- Bajas tasas de Transmisión de datos.
- Dispositivos de reducido tamaño
- Bajas frecuencias de operación.
- Bajo consumo energético.
- Largo alcance de comunicación.

Los primeros trabajos de IoT tuvieron como base los estándares más extendidos y usado en el mundo como son IEEE, específicamente 802.11 (WIFI) y 802.15 (Bluetooth y Zigbee). Sin

embargo, a pesar de que estas tecnologías son ampliamente extendidas y presentan mejores características para transmisión dado que definen políticas tanto en capa física y capa MAC, no se ajustan a los requisitos de una red de comunicaciones IoT ya que son poco ideales para interconectar gran cantidad de dispositivos. Eso es debido a las limitaciones de cobertura y excesivo consumo de energía de los terminales. (Bliznakoff del Valle, 2014)

Por los motivos mencionados anteriormente, el desarrollo de tecnologías dedicadas a IoT ha ido en crecimiento. Estos desarrollos se denominan redes Low-Power Wide Area Network (LPWAN), siendo más accesibles para el público tanto en costo como en implementación. (Moya, 2018)

2.9. Redes Low-Power Wide Área Network (LPWAN)

Según Ordoñez (2017), las redes LPWAN tienen diferentes características dependiendo de su aplicación, las más comunes son:

- Operar en la banda de radio industriales, científicas y médicas (ISM) menores a 1Ghz. Este tipo de señales poseen un menor factor de ruido, atenuación y desvanecimiento respecto a la banda libre ISM de 2,4 Ghz. Beneficiando el radio de cobertura de los dispositivos.
- Poseer esquemas de modulación que faciliten la creación de enlaces de varios kilómetros o decenas de kilómetros en zonas urbanas o rurales respectivamente y con muy bajo consumo energético. Las técnicas de modulación más usadas son: banda estrecha y espectro expandido.

En la modulación de banda estrecha y ultra estrecha los niveles de ruido para cada canal son muy pequeños lo que permite aumentar el alcance de la señal, pero disminuye la velocidad de transmisión.

En espectro expandido se amplía una señal permitiendo que sea robusta a las interferencias externas, siendo señales difíciles de interceptar. Sin embargo, el proceso extra requiere de transceptores más complejos y por lo tanto más costosos.

Ordóñez (2017), también menciona que actualmente en el mercado existe una amplia variedad de propuestas de redes que se ajustan a los requisitos para IoT, pero son tres las que ofrecen soluciones competitivas: SigFox, Ingenu y Longe Range (LoRa). La diferencia entre las dos primeras y LoRa es que continúan con un modelo de negocios totalmente propietario, es decir, las empresas proveen todos los servicios de IoT. Por lo contrario, LoRa y su empresa propietaria Semtech solo proveen la capa física, la capa de acceso al medio es desarrollada por la entidad sin fines de lucro llamada LoRa Alliance. Este proceso permite que las empresas pueden utilizar esta tecnología y ofrecer servicios e infraestructura a sus clientes sin ningún tipo de restricción.

2.9.1. Longe Range (LoRa)

Longe Range es una tecnología de capa física con características como la velocidad de datos variable (DR), ancho de banda escalable (BW), alta robustez y factores ortogonales de ensanchamiento (SF). (Yang, 2017)

Los dispositivos LoRa permiten escoger entre seis SF (7 – 12), con el fin de mejorar la calidad en el uso del espectro y la capacidad de la red. Para cada uno de estos valores se estableció una relación entre potencia y tasa de transferencia, dicho relación se puede observar en la tabla 2 (Moya, 2018).

Tabla 2

Tasa de bits y Sensibilidad según los valores de SF.

SF	Tasa de Bits equivalente (Kb/s)	Sensibilidad (dBm)
12	0.293	-137
11	0.537	-134,5
10	0.976	-132
9	1.757	-129
8	3.125	-126
7	5.468	-123

Fuente: (Moya, 2018)

2.9.1.1. Topología LoRa

La topología de la red LoRa está formada por tres elementos, como se observa en la figura 7:

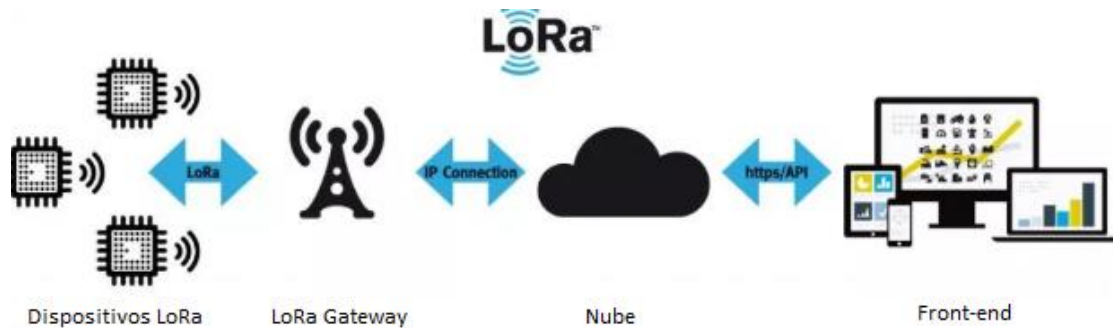


Figura 7. Topología red LoRa.

Fuente: (Staff, 2018)

- **Dispositivos Finales:** Son los dispositivos usados para establecer la conexión de los objetos a la red LoRa.
- **Pasarelas:** Conocidas también como estación base LoRa, esta recibe la información enviada desde los dispositivos finales y la reenvía hacia los servidores de red
- **Servidores de red:** Se refiere a los servidores que se encargan de la recepción y el procesamiento de la información proveniente de los dispositivos finales.

Entre los dispositivos finales y las pasarelas se forma una red de tipo estrella de un solo salto, esta topología es usada debido a su facilidad de implementación y gestión. En este caso al no existir un dispositivo que actúe como enrutador se logra un ahorro energético ya que no retransmite el tráfico (Ducrot, Ray, & Saadani, 2016).

2.9.1.2. Formato de la trama física

La trama LoRa está formada de mensajes de enlace ascendente (uplink) y mensajes de enlace descendentes (downlink). Los primeros transmiten desde los dispositivos finales al servidor usando una o varias puertas de enlace, por lo contrario, los mensajes de enlace descendentes se transmiten desde el servidor a un solo dispositivo final LoRa.

Tanto los mensajes uplink y downlink están formados por una carga útil PHY que empieza con un encabezado MAC de un octeto (MHDR), a continuación, una carga MAC Payload y por último un mensaje de integridad de código (MIC). En la figura 8 se observa el formato para los mensajes LoRa (Avila, 2017).

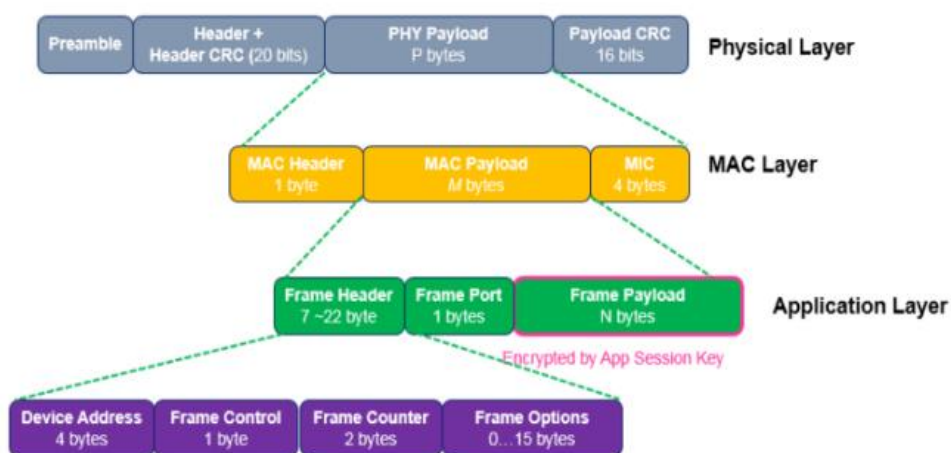


Figura 8. Formato de mensaje LoRa.

Fuente: (LoRa Alliance, 2018)

En la tabla 3 se puede observar el formato de la trama física de LoRa para mensajes uplink. El mismo que consta de un preámbulo utilizado para la sincronización y en el cual se define el esquema de modulación del paquete, una cabecera (PHDR) y un campo PAYLOAD con un tamaño máximo de 255 bytes, estos dos últimos con sus respectivos códigos de detección de errores (CRC) (Aloÿs Augustin, 2016).

Tabla 3

Estructura de la trama física de LoRA para Uplink.

PREAMBULO	PHDR	PHDR_CRC	PHY PAYLOAD	CRC
-----------	------	----------	-------------	-----

Para los mensajes de tipo Downlink la estructura de la trama física que se utiliza está compuesta por los campos que se muestran en la tabla 4 (Avila, 2017).

Tabla 4

Estructura de la trama física de LoRA para Downlink.

PREAMBULO	PHDR	PHDR_CRC	PHY PAYLOAD
-----------	------	----------	-------------

En el campo PHY PAYLOAD se localiza la trama de la capa de acceso al medio Low Power Wide Area Network (LoRaWAN). Está formado por una cabecera MAC, el MAC PAYLOAD y un Message Integrity Code (MIC).

Tabla 5

PHY Payload

MHDR	MACPayload	MIC
1 byte	1-M bytes	4 bytes

A través de la cabecera MAC se especifica el tipo de mensaje y la versión del formato de la trama de la capa LoRaWAN. Existen seis tipos de mensajes como se muestra en la tabla 6 (Pérez R. , 2017).

Tabla 6
PHY Payload.

MType	Descripción
000	Join Request
001	Join Accept
010	Unconfirmed Data UP
011	Unconfirmed Data Down
100	Confirmed Data UP
101	Confirmed Data Down
110	Reservado para el futuro(RFU)
111	Propietary

El campo MACPayload está formado por una cabecera de trama, un campo de puerto opcional y campo de Payload de trama opcional.

Tabla 7
MAC Payload.

FHDR	FPort	FRMPayload
7-23 bytes	0-1 bytes	0-N bytes

Por último, la cabecera de trama está formada por la dirección con la que se identifica el dispositivo en la red, un campo FCtrl que usa para habilitar el Adaptive data rate, un contador de tramas y un FOpts en el caso de enviar un comando MAC.

Tabla 8*Estructura FHDR.*

DevAddr	FCtrl	FCnt	FOpts
4 bytes	1 byte	2 bytes	0-15 bytes

Es importante tener en cuenta que los bits más significativos del campo DevAddr sirven como identificadores de red (NwkID), por lo tanto, los siguientes veintiocho bits corresponden a la dirección de red (NwkAddr).

2.9.1.3. Modulación LoRa y Frecuencia de trabajo

A. Modulación LoRa

La modulación LoRa es escalable tanto de ancho banda como de frecuencia, lo que permite que pueda usarse en aplicaciones de salto de frecuencia de banda estrecha como de secuencia directa de banda ancha. (Semtech-Corporation, 2015)

LoRa es un método patentado de modulación de espectro ensanchado y utiliza una variación de la modulación de espectro extendido de Chirp (CSS) que tiene características de baja potencia, bajo consumo y robustez frente a interferencias. Dicha tecnología de espectro de propagación permite que los mensajes a diferentes velocidades de datos sean ortogonales, generando un conjunto de canales virtuales lo que permite incrementar la capacidad de la puerta de enlace. (LoRa-Alliance, 2015)

CSS es ampliamente utilizado en comunicaciones militares y espaciales por su amplio rango de alcance y su resistencia al ruido, siendo LoRa la primera aplicación comercial de esta tecnología (FEC).

B. Frecuencia de trabajo

Opera en la banda ISM menor a 1Ghz. Trabaja a distintos rangos de frecuencias dependiendo de la región del mundo en la que encuentre, dichos valores son lo suficientemente similares para admitir un mismo protocolo independiente de la región. Se debe aclarar que esta especificación es de manera general ya que depende de la regulación de los planes de frecuencia de cada país.

La distribución por región se observa en la figura 9 donde destacan los países en los cuales funcionan los dispositivos LoRa y sus correspondientes frecuencias, las que se pueden observar en la tabla 9 (LoRa Alliance, 2018).

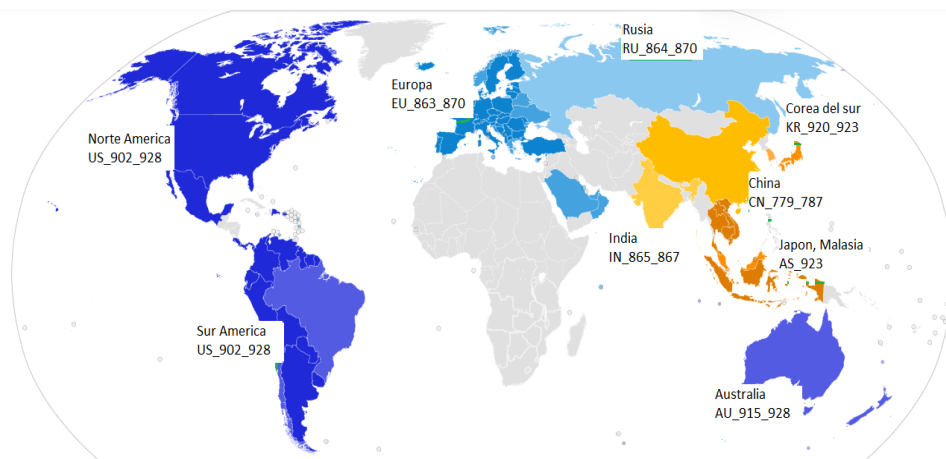


Figura 9. Distribución de las frecuencias por región.

Fuente: (LoRa Alliance, 2018)

Tabla 9

Valores de frecuencia por región.

Plan de frecuencia	Región
EU 863-870MHZ	Europa
US 902-928 MHz	Estados Unidos
CN 779-787 MHz	China

CONTINÚA 

AU 915-928 MHz	Australia
AS 923 MHz	Asia
KR 920-923 MHz	Corea del Sur
IN 865-867 MHz	India
RU 864-870 MHz	Rusia

2.9.1.4. Ciclo de Trabajo

De acuerdo a los parámetros regionales establecidos por LoRa Alliance, las bandas de frecuencia EU 863-870MHz, CN 779-787 MHz, AS 915-928MHz y RU 864-870 MHz poseen un ciclo de trabajo limitado al 0.1% y 1%, lo que provoca restricciones en el número diario de transmisiones que puede realizar un dispositivo (Loy, Karingattil, & Williams, 2005).

Las restricciones impuestas por el ciclo de trabajo tienen como consecuencia la reducción de la latencia y el consumo de energía, pero el rendimiento de la red puede ser afectado ya que existe un aumento en la probabilidad de colisiones, lo que disminuye la fiabilidad del dispositivo en aplicaciones en tiempo real (Mikhaylov, Petaejaejaervi, & Haenninen, 2016).

2.9.2. Low Power Wide Area Network (LoRaWAN)

LoRaWAN es el protocolo MAC o la capa de acceso al medio de la red LoRa, define las reglas de comunicación y arquitectura de red. Al comparar con el modelo OSI, LoRaWAN se puede considerar equivalente a la capa 2 y 3, es decir, la capa de enlace y red respectivamente (LoRa-Alliance, 2015). LoRaWAN opera sobre LoRa, que es el equivalente de la capa física de OSI.

2.9.2.1. Elementos LoRaWAN

Una red LoRaWAN está formada por los siguientes elementos (Moya, 2018):

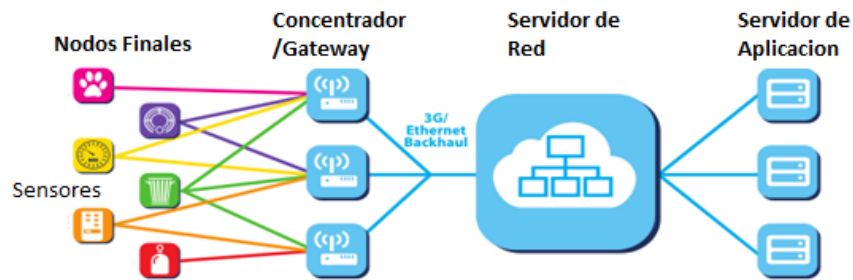


Figura 10. Topología lógica LoRaWAN.

Fuente: (LoRa-Alliance, 2015)

- **Dispositivos finales:** Son un conjunto de sensores inalámbricos que envían los datos hacia el gateway.
- **Gateways/Concentradores:** El Gateway recibe la comunicación LoRa que viene de los dispositivos finales y la reenvía hacia el servidor de red a través de una conexión IP.
- **Servidor de red:** Se encarga de gestionar la red, filtrar los paquetes redundantes recibidos y realizar comprobaciones de seguridad
- **Servidor de aplicación:** Sus principales funciones son el manejo cifrado de mensaje, el almacenamiento de datos y la unión a la red.

2.9.2.2. Arquitectura LoRaWAN

La comunicación entre dispositivos finales y gateways utiliza diferentes frecuencias y canales, bajo las siguientes reglas (Avila, 2017):

- El dispositivo final cambia de canal de manera pseudoaleatoria en cada transmisión.
- El dispositivo final respeta el máximo ciclo de trabajo de transmisión relativo a la sub banda y a las regulaciones locales.
- El dispositivo final respeta la máxima duración de transmisión

Una transmisión con LoRAWAN, usa las capas que se observan en la figura 11.

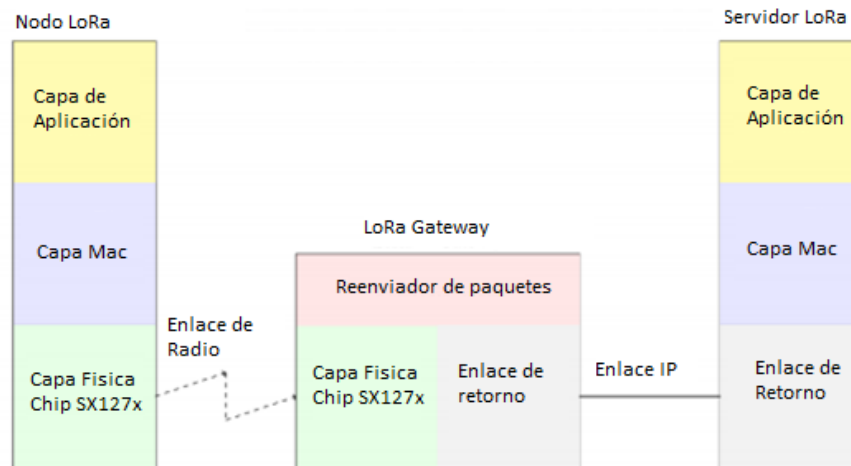


Figura 11. Arquitectura del protocolo LoRaWAN

Fuente: (Vangelista, Zanella, & Zorzi, Sep. 2015)

- **Capa de Aplicación:** Proporciona la interfaz a la red.
- **Capa MAC:** La capa MAC maneja la transmisión y recepción de comandos MAC y datos de la capa de aplicación. Agrega un encabezado MAC (HHDR) y un código de integridad del mensaje (MIC) al principio y al final de la carga útil como se observa en la tabla 5.
- **Capa Física:** La capa física construye la trama para transmitir la carga útil desde la capa MAC a través del enlace RF, utilizando las bandas especificadas para cada región. Se encarga de insertar un PHDR, preámbulo y un código de corrección de errores (CRC) a cada trama.
- **Capa RF LoRa:** Opera en las bandas libres ISM de acuerdo a la región (tabla 9).

2.9.2.3. Clases LoRaWAN

LoRaWAN define tres clases de dispositivos, de acuerdo a las funcionalidades que soportan estas son: A, B y C. Es importante que todos los dispositivos cumplan con las especificaciones que

se describen en la clase A y opcionalmente cumplir con los de la clase B y C. (Saari, Baharudin, Sillberg, Hyrynsalmi, & Yan, 2018)

- *Clase A*

Los dispositivos de clase A, después de la transmisión de un paquete (uplink), abren dos ventanas de recepción (downlink) que permiten aceptar un acuse de recibido (ACK), posteriormente permanece inactivos hasta una próxima transmisión. Son clases eficientes en cuanto al consumo energético, pero tienen el mayor tiempo de latencia. Son utilizados para aplicaciones en las que los dispositivos no deben recibir datos habituales.

- *Clase B*

La clase B permite abrir ventanas de recepción en tiempos específicos, debido a que no es necesario el envío de un paquete Uplink al momento de recibir datos en el dispositivo. Para poder abrir las ventanas de recepción se necesita del envío de beacon desde el Gateway con el fin de conocer cuando está escuchando el dispositivo final, por tal motivo el consumo de energía se incrementa.

- *Clase C*

Los dispositivos de clase C sirven para comunicaciones bidireccionales, no tienen eficiencia energética pero los tiempos de latencia son menores, esto sucede porque los dispositivos finales permanecen escuchando a espera de información a excepción de cuando transmite, es decir, las ventanas de recepción se mantienen siempre abiertas excepto cuando transmiten.

2.9.3. Seguridad LoRaWAN.

La conexión de los dispositivos finales a la red es uno de los aspectos más importantes a evaluar relacionados con la seguridad. Debido a que solo los dispositivos autorizados deben poder conectarse, se estableció un mecanismo seguro denominado registro y activación de un dispositivo final en una red LoRaWAN (Ordóñez, 2017).

El mecanismo de registro y activación finaliza, cuando almacena en los dispositivos ciertos parámetros (Yang, 2017):

- Dirección del dispositivo (DevAddr)
- Identificador de aplicación (AppEUI)
- Identificador global único (DevEUI)
- Llave criptográfica AES-128 (AppKey)
- Llave criptográfica de sesión (NwkSKey)
- Llave criptográfica de sesión de aplicación (AppSKey)

Para realizar el proceso de configuración y registro de los dispositivos finales en la red se hace uso de los métodos de activación: Over The Air Activation (OTTA) y Activation By Personalization (ABP)

El método de activación ABP es el más sencillo ya que se configura de forma manual la DevAddr y las llaves de sesión (NwkSKEY y AppSKEY), de esta forma el gateway valida que los datos sean los correctos e inicia la transmisión.

Para el método OTTA el proceso de activación es más largo y comienza cuando el dispositivo final envía una petición de unión (join-request), formado por los parámetros AppEUI y DevEUI. El

servidor de red responde con una aceptación de unión (join-accept), formado por los parámetros AppKey y DevAddr. Posterior a recibir el mensaje de aceptación, los dispositivos finales generan las llaves de sesión y empieza a transmitir.

2.10. Sensor y Transductor.

Un transductor se define como un dispositivo que transforma o convierte una magnitud física en otra magnitud, normalmente eléctrica (Cosco, 2012).

Un sensor es un transductor que se utiliza para medir diferentes magnitudes físicas o químicas de interés, conocidas como variables de instrumentación, y posteriormente transformarlas en variables eléctricas fáciles de cuantificar y manipular (Fraden, 2004). Existe una amplia gama de sensores, pero se mencionan los más importantes para este trabajo de investigación:

- A. Sensor de temperatura y humedad:** Son dispositivos que se utilizan para medir la temperatura ambiente y la humedad relativa. La mayoría de ellos son de tipo resistivo ya que varía una resistencia en función de la temperatura, existen dos clases: coeficiente de temperatura positivo (PTC) que aumenta la resistencia al aumentar la temperatura y coeficiente de temperatura negativo (NTC) que disminuye la resistencia al aumentar la temperatura. Otro tipo de sensor son los llamados termopares y están formados por dos metales distintos que producen una diferencia de potencial al ser sometido a temperaturas diferentes (Garage, 2017).
- B. Sensor de radiación ultravioleta (UV):** Son sensores que se utilizan para medir la intensidad o potencia de la radiación ultravioleta incidente. Esta forma de radiación

electromagnética tiene longitudes de onda más larga que los rayos X, pero aún más corta que la radiación visible.

La mayoría de estos sensores utilizan un material activo conocido como diamante policristalino para asegurar una detección ultravioleta confiable (Ventura, 2016).

C. Sensor de PH: Los sensores de PH permiten medir la acidez o la alcalinidad de una solución dentro de una escala que va de 0 a 7.

El valor de PH está relacionado a la proporción de las concentraciones de hidrógeno $[H^+]$ e hidroxilo $[OH^-]$. Si los valores de H^+ y OH^- son iguales se trata de un material neutral, si la concentración H^+ es mayor a OH^- es un material ácido y por último si la concentración de OH^- es mayor que H^+ el material es básico (Artero & Noguera, 2012).

D. Sensor de calidad de aire: Son dispositivos usados para la detección de contaminantes en el aire como por ejemplo partículas y gases nocivos que pueden perjudicar la salud humana. Uno de los gases más comunes es el CO_2 que se mide en partes por millón (ppm) y utiliza un infrarrojo no dispersivo (NDIR) para detectar la presencia del gas, debido a que las moléculas de CO_2 observan longitudes de ondas específicas de luz y el sensor se encarga de detectarlas. (Cremates, Castro, Fernandez, & Clausen, 2013)

2.10.1. Red de Sensores

Es un conjunto de nodos sensores y actuadores distribuidos en una región a monitorizar y estos al ser integrados permiten a la red examinar, recolectar, procesar y transmitir datos de variables dentro del área de cobertura. Una red de sensores inalámbricos de la forma más simple puede fundamentarse en una estación base que realiza la recolección de los datos sensados por los otros

nodos. Las rutas y protocolos de comunicación se especifican en el software y se ejecutan generalmente en un microcontrolador de gama baja. (Cama, Acosta, Piñeres, & Caicedo, 2016)

La característica más importante de este tipo de redes es su facilidad de despliegue, su gestión eficiente de energía y su auto-configuración, es decir, son capaces de convertirse en todo momento en emisor, receptor, brindar servicios de enrutamiento entre nodos, así como registrar datos referentes a los sensores locales de cada nodo. (Tibaduiza, Chio, Aparicio, & Caro, 2011)

La red de sensores se agrupa de diversas formas en busca de la mejor para envío y recepción de información, las topologías más usadas se encuentran especificadas en la figura 12. (Aakvaag & Frey, 2006)

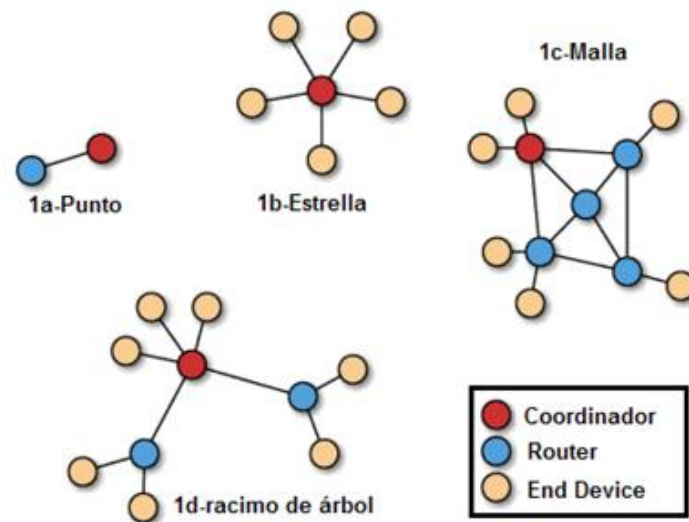


Figura 12. Topología de redes de sensores.

Fuente: (Aakvaag & Frey, 2006)

2.10.2. Aplicación de sensores en IoT

Actualmente los sensores han sufrido grandes transformaciones debido a su aplicación en IoT, esto explica Majeed Ahmad, autor de “IoT and the Evolution of Smart Sensors”. Los sensores

Smart son un paso hacia la mejora en la eficiencia de procesamiento y la recolección de datos en infraestructuras IoT permitiéndoles realizar funciones autónomas de calibración y diagnóstico; generando condiciones límites sin la intervención de un operador humano, posteriormente los datos serán analizados de manera local o enviados a través de la nube al usuario en forma de alertas (Ahmad, 2014).

Con el fin de monitorear los niveles de contaminación ambiental dentro de una ciudad sostenible, a finales del 2015 se lanzó un rastreador de entorno portátil (TZOA) formado por sensores inteligentes que permiten medir la calidad de aire, temperatura, humedad, presión atmosférica, la luz ambiente y exposición UV; los datos obtenidos se muestran a través de una aplicación móvil. En el mismo ámbito existe el LiteBeam, se trata de un dispositivo LED que cambia sus colores dependiendo de los niveles de calidad del aire y la contaminación presente en ciertos instantes de tiempo. (Moe, 2016)

Para un ambiente de Smart University se pueden encontrar aplicaciones como alumbrado inteligente, monitoreo de la calidad del suelo, aire y agua, estacionamiento inteligente, recolección inteligente de basura y otros servicios de gestión verde. Esto mediante la implementación de sensores adecuados para cada aplicación y la respectiva visualización a través de plataformas digitales o inteligentes. (ZhongTao, 2016)

CAPITULO III

3. Tecnología LoRa

3.1. Análisis de LoRaWAN

LoRa es una tecnología de capa física con características como la velocidad de datos variable (DR), ancho de banda escalable (BW), alta robustez y factores ortogonales de ensanchamiento (SF). En la figura 13 se observa la relación existente entre las características mencionadas.

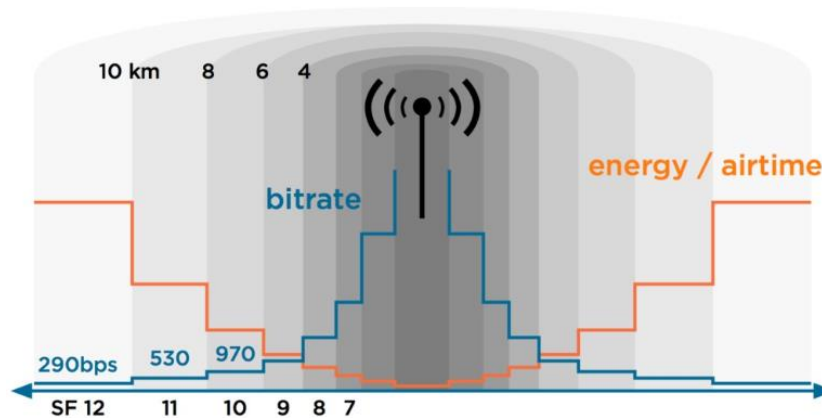


Figura 13. Relación entre SF, Bit Rate y Airtime.

Fuente: (Alliance, 2018)

Los valores de SF altos permiten que el radio de cobertura sea mayor, por lo tanto, el tiempo en aire va a aumentar, pero la tasa de transmisión y la sensibilidad van a disminuir, siendo la señal más sólida frente a interferencias. Los valores de SF bajos, aumentan la tasa de transmisión con un menor tiempo en aire, provocando un menor consumo de energía (Digi-Key, 2016).

Por otro lado, el ancho de banda tiene una relación inversa con el tiempo en aire y el radio de cobertura, es decir, a menor BW mayor tiempo en aire y cobertura.

3.1.1. Frecuencia de trabajo

LoRa trabaja a un rango de frecuencias distintas dependiendo de la región en la que se encuentre según lo especificado en la tabla 9. Para Ecuador se puede usar los planes de frecuencia de AU 915-928 MHz, US 902-928MHz y AS 923Mhz, de acuerdo a lo establecido por LoRa Alliance (2018).

Para este proyecto de investigación se usará AU 915-928 MHz, debido a que la resolución del Plan Nacional de Frecuencia aprobado por la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) el 13 de diciembre del 2017, establece:

“En las bandas 915 – 928 MHz, 2 400 – 2 483,5 MHz, 5 150 – 5 350 MHz, 5 470 – 5 725 MHz y 5 725 – 5 850 MHz y 24,05 – 24,25 GHz operan, a título secundario, sistemas que ocupan espectro radioeléctrico para Uso Determinado en Bandas Libres (UDBL), para los servicios fijo y móvil” (ARCOTEL, 2018).

3.1.2. Ciclo de Trabajo

Para el rango de frecuencias establecido el ciclo de trabajo no se encuentra limitado, por tal motivo no existe restricciones en el número diario de transmisiones que puede realizar un dispositivo. El rendimiento de la red no estará afectado ya que probabilidad de colisiones será mínima, pero provocará un aumento en la latencia y consumo energético. (Mikhaylov, Petaejaevaervi, & Haenninen, 2016)

3.1.3. Configuraciones de LoRa

En el documento LoRaWAN™ 1.1 (2018), se describen configuraciones propias de la banda AU 915-928 MHz donde varían los valores de los parámetros SF y BW, como se observa la tabla 10.

Tabla 10

Parámetros de configuración LoRa.

DataRate(DR)	Configuración	Bit rate (bit/s)
0	LoRa: SF12 / 125KHz	250
1	LoRa: SF11 / 125KHz	440
2	LoRa: SF10 / 125KHz	980
3	LoRa: SF9 / 125KHz	1760
4	LoRa: SF8 / 125KHz	3125
5	LoRa: SF7 / 125KHz	5470
6	LoRa: SF8 / 500KHz	12500
7	Libre	
8	LoRa: SF12 / 500KHz	980
9	LoRa: SF11 / 500KHz	1760
10	LoRa: SF10 / 500KHz	3900
11	LoRa: SF9 / 500KHz	7000
12	LoRa: SF8 / 500KHz	12500
13	LoRa: SF7 / 500KHz	21900
14	Libre	

Fuente: (LoRa Alliance, 2018)

La banda AU tiene tres planes de canales que se encuentran distribuidos como se muestra en la figura 14:

- Uplink: formado por 64 canales numerados del 0 al 63, utiliza un BW de 125KHz que varía de DR0 a DR5, empieza a una frecuencia de 915.2 MHz.
- Uplink: formado por 8 canales numerados de 64 al 71, utiliza un BW de 500KHz en DR6 y empieza a una frecuencia de 915.9 MHz.
- Downlink: formado por 8 canales numerados del 0 al 7 utilizando un BW de 500KHz que varía de DR8 a DR13, empieza a una frecuencia de 923.3 MHz.

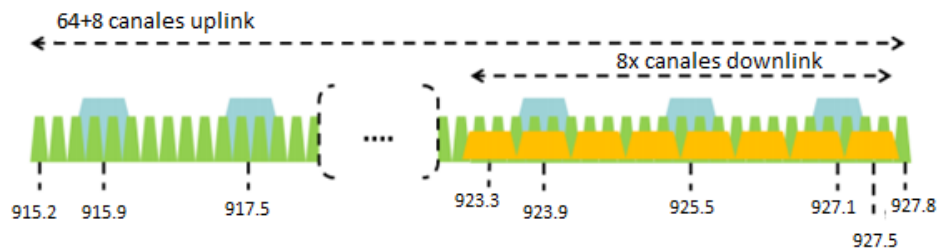


Figura 14. Distribución de canales para la banda AU.

Fuente: (LoRa Alliance, 2018)

Los mensajes que se van a utilizar en el proyecto de investigación son de tipo uplink, es decir, transmiten desde los dispositivos finales al servidor, por tal motivo se usaran las configuraciones desde DR0 a DR6.

3.2. Descripción de dispositivos

Actualmente, el mercado para los dispositivos dedicados a IoT ha ido creciendo significativamente, por tal motivo se mencionan aquellos con más relevación para el proyecto de investigación.

3.2.1. Chip Transceptores LoRa

Semtech es la empresa propietaria de LoRa y provee una amplia gama de chips transceptores LoRa, los mismos que se puede observar en la tabla 11. Otra empresa dedicada a la distribución de este tipo de dispositivos es Microchip, que empezó a incursionar en este medio desde el año 2015 con los chips que se muestran en la tabla 12 (MICROCHIP, 2015).

Tabla 11

Características de los chips transceptores Semtech.

	Rango de Frecuencia	SF	BW	Bitrate	Sensibilidad
SX1272	860-1020 MHz	6-12	125-500kHz	0.24-37.5 kps	-117 a -137 dBm
SX1276	137-1020 MHz	6-12	7.8-500kHz	0.018-37.5 kps	-111 a -148 dBm
SX1278	137-525 MHz	6-12	7.8-500kHz	0.018-37.5 kps	-111 a -148 dBm
LLCC68	150-960 MHz	7-12	125,250,500kHz	1.76-62.5 kps	-129 dBm
SX1301	868-900 MHz	7-12	125,250,500kHz	0.29-21.87kbs	-120 a -139 dBm

Fuente: (SEMTECH, 2016)

Tabla 12

Características de los chips transceptores Microchip.

	Rango de Frecuencia	Modulación	Bitrate	Sensibilidad
SAM R34	862-1020 MHz	FSK,GFS, LoRa	0.3 a 10.93 kps	-148 dBm
RN2483	433,868 MHz	FSK,GFS, LoRa	0.3 a 10.93 kps	-148 dBm
RN2903	915 MHz	FSK,GFS, LoRa	0.3 a 10.93 kps	-146 dBm

Fuente: (MICROCHIP, 2015)

3.2.2. Módulos LoRa

Los chips transceptores LoRa de Semtech vienen incorporados en placas para su mejor manejo e implementación dirigida aplicaciones IoT. Existen varios módulos LoRa y entre los más conocidos están:

- Módulo REYAX RYLR869
- Módulo Dragino LoRa Shield
- Módulo MKR WAN 1300
- Módulo TTGO LoRa32

3.2.2.1. Módulo REYAX RYLR869

Se trata de un módulo pequeño y simple, contiene un chip transceptor de largo alcance LoRa SX1276 que proporciona comunicación de espectro extendido de ultra largo alcance e inmunidad de interferencia mientras minimiza el consumo de corriente. En la figura 15, se observa el módulo REYAX (REYAX, 2017).

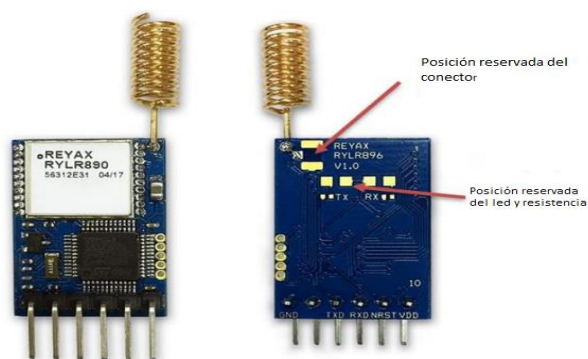


Figura 15. Modulo REYAX RYLR869.

Fuente: (REYAX, 2017)

En la tabla 13 se muestra las características más importantes del módulo.

Tabla 13

Características Modulo REYAX RYLR869.

RYLR869	
Chip LoRa	SX1276
Frecuencia de trabajo	862 a 1020 MHz

CONTINÚA 

Rango de comunicación	4,5 a 15 km
Sensibilidad	-148 dBm
Interfaz	Antena Integrada de PCB
Cifrado de datos	AES128
Alimentación	3,3 V~3,6 V
Tamaño	42.5 x 18.36 x 5.5 mm
Costo	\$15

Fuente: (REYAX, 2017)

3.2.2.2. Módulo Dragino LoRa Shield

LoRa Shield permite al usuario enviar datos y alcanzar rangos de cobertura largos a bajas velocidades de transmisión, proporciona comunicación de espectro extendido de rango ultra largo y alta inmunidad a interferencias mientras se minimiza el consumo de corriente (DRAGINO, 2017). La forma del módulo le permite adaptarse más fácil a la placa de Arduino, como se observa en la figura 16.

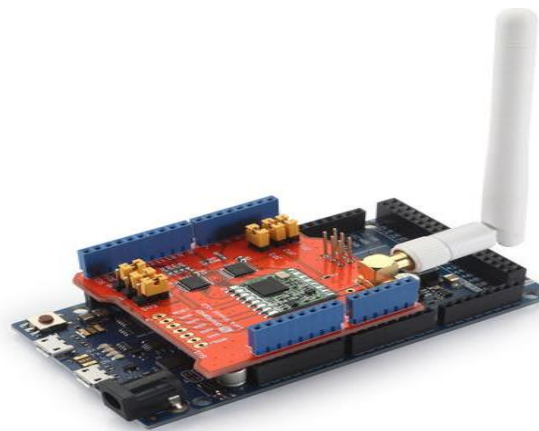


Figura 16. Módulo Dragino LoRa Shield

Fuente: (DRAGINO, 2017)

En la tabla 14 se muestra las características más importantes del módulo.

Tabla 14*Características módulo Dragino LoRa Shield.*

Dragino LoRa Shield	
Chip LoRa	SX1276/SX1278
Frecuencia de trabajo	915/868/433 MHz
Rango de comunicación	2 a 15 km
Sensibilidad	-148 dBm
Interfaz	Antena Integrada de IPEX
Compatible	Arduino Leonardo, Uno, Mega, DUE
Alimentación	3,3 V~5 V
Tamaño	62 x 43 x 23 mm
Costo	\$16,60

Fuente: (DRAGINO, 2017)

3.2.2.3. Módulo MKR WAN 1300

El MKR 1300 WAN de Arduino está basada en el módulo de Atmel SAM D21 y un chip transceptor LoRa, ofrece una solución práctica y rentable para agregar conectividad LoRa de baja potencia. El uso del software Arduino para el desarrollo y programación de código lo convierten en una gran opción (ARDUINO, 2019).

**Figura 17.** Modulo MKR WAN 1300

Fuente: (ARDUINO, 2019)

Las características más importantes del módulo se observan en la tabla 15.

Tabla 15

Características del módulo MKR WAN 1300

MKR WAN 1300	
Microprocesador	SAM D21
Frecuencia de trabajo	915/868 MHz
SRAM	32 KB
Memoria Flash	256 KB
Región de trabajo	EU/US
Interfaz	Antena 2dB
Alimentación	3,3 V~5 V
Tamaño	67,64 x 25 x 23 mm
Costo	\$39,90

Fuente: (ARDUINO, 2019)

3.2.2.4. Módulo TTGO LoRa32

Por otro lado, la empresa Shenzhen Xin Yuan Electronic especializada en el desarrollo y fabricación de productos electrónicos implemento sus propios módulos para la serie TTGO. Se trata de una placa basada en ESP32 + SX127x, tiene incorporado una batería Li-Po y una pantalla OLED, como se muestra en la figura 18.



Figura 18. Modulo TTGO LoRa32

Fuente: (TTN, 2018)

Actualmente, existen tres versiones de estos módulos cada una con características que se muestran en la tabla 16.

Tabla 16

Características de las versiones del módulo TTGO LoRa32

	TTGO LoRa32 V1.0	TTGO LoRa32 V2.0	TTGO LoRa32 V2.1.6
Microprocesador	ESP32-D0WDQ6	ESP32 PICO-D4	ESP32 PICO-D4
Chip LoRa	SX1276	SX1276, SX1278	SX1276
Bandas LoRa	SX1276 (versión 868 y 915 MHz)	SX1276 (versión 868 y 915 MHz) SX1278 (versión 433 y 470 MHz)	SX1276 (versión 868 MHz)
Flash	4M bytes	4M bytes	4M bytes
USB-Serial Converter	CP2102	CP2104	CP2104
Interfaz	Interfaz de antena LoRa (IPX) x 1	Micro USB x 1; Interfaz de antena LoRa (IPX) x 1	Micro USB x 1; Interfaz de antena LoRa (SMA) x 1
Monitor	Pantalla OLED de 0.96 pulgadas	Pantalla OLED de 0.96 pulgadas	Pantalla OLED de 0.96 pulgadas
Tipo de batería	3,3 V Litio	1,8~3,3 V Litio	1,8~3,3 V Litio
Tamaño	51 x 25 x 10,3 mm	52,4 x 26 x 12,3 mm	64,47 x 27 x 22,15 mm
Precio módulos	\$14,50	\$19,61	\$21,15

Fuente: (TTGO, 2013)

3.3. Análisis de la placa

Para este proyecto de investigación se utilizará la placa TTGO LoRa32 V1, ya que a diferencia de los otros módulos se adapta a la complejidad del proyecto debido a las características basadas

en el microcontrolador ESP32 y al chip SX1276. El módulo cuenta con 36 pines que facilitan la conexión de varios sensores y una pantalla OLED para la visualización de los resultados. También se tomó en cuenta el costo y el tamaño de los dispositivos con el fin de obtener una presentación modular y adaptable a las diferentes aplicaciones en IoT.



Figura 19. Módulo TTGO LoRa 32

Fuente: (SEMTECH, 2016)

3.3.1. ESP32 con LoRa

Creado por Espressif Systems, ESP32 es un sistema de bajo costo y bajo consumo de energía en una serie de chips (SoC) con capacidades de Wi-Fi y Bluetooth de modo dual.

Esta altamente integrado con interruptores de antenas, balun RF, amplificador de potencia, amplificador de recepción de bajo ruido, filtros y módulos de administración de energía. Diseñado específicamente para dispositivos móviles, dispositivos electrónicos portátiles y aplicaciones IoT.

ESP32 tiene un consumo de energía ultra bajo a través de características de ahorro de energía que incluyen sincronización de reloj de resolución fina, modos de energía múltiples y escalado dinámico de energía (Magajin, 2017).

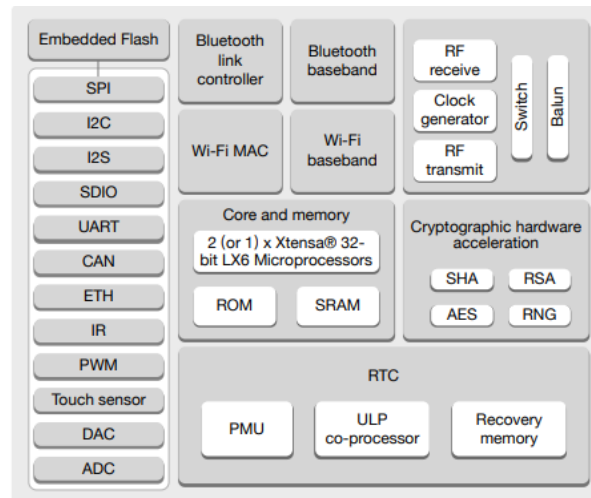


Figura 20. Diagrama de Bloques ESP32

Fuente: (*Espressif, 2019*)

La arquitectura se divide en bloques funcionales que describen las operaciones de comunicación, almacenamiento, procesamiento, capa física de transmisión y tecnologías MAC para la transmisión como Wi-Fi y Bluetooth.

Los protocolos de comunicación de datos varían de acuerdo el modelo, destacan los de transmisión por Interfaz Periférica Serial (SPI) que es usado con los chips LoRa (Chicaiza, 2019).

3.3.1.1. Modos de bajo consumo energético

El ESP32 puede variar entre diferentes modos de potencia:

- Modo activo
- Modo de sueño ligero
- Modo de sueño profundo

- Modo de hibernación

En la tabla 17 se comparan las diferentes características de los modos mencionados anteriormente (Series, 2019):

Tabla 17

Tabla comparativa de modos de bajo consumo.

	Modo Activo	Modo de sueño ligero	Modo de sueño profundo	Modo de hibernación
CPU	ON	PAUSE	OFF	OFF
Wi-Fi	ON	OFF	OFF	OFF
Memoria y Periféricos RTC	ON	ON	ON	OFF
Co-procesador ULP	ON	ON	ON/OFF	OFF
Corriente Consumida	240mA	0,8mA	10uA	5uA

Fuente: (Series, 2019)

Para despertar al dispositivo después de entrar en el modo de sueño profundo existen tres formas:

- Mediante un temporizador: activa su ESP32 utilizando periodos de tiempo predefinidos.
- Con uso de los alfileres táctiles: puede activar el ESP32 desde el sueño profundo con los pines táctiles.
- Activación externa: permite usar un pin para activar el ESP32.

3.3.2. LoRa SX1276

Los transceptores LoRa de Semtech, cuentan con un módem inalámbrico de largo alcance que proporciona comunicaciones de espectro extendido de rango ultra largo e inmunidad de alta interferencia mientras minimiza el consumo de corriente.

En figura 21 se muestra la distribución de los pines del chip SX1276.

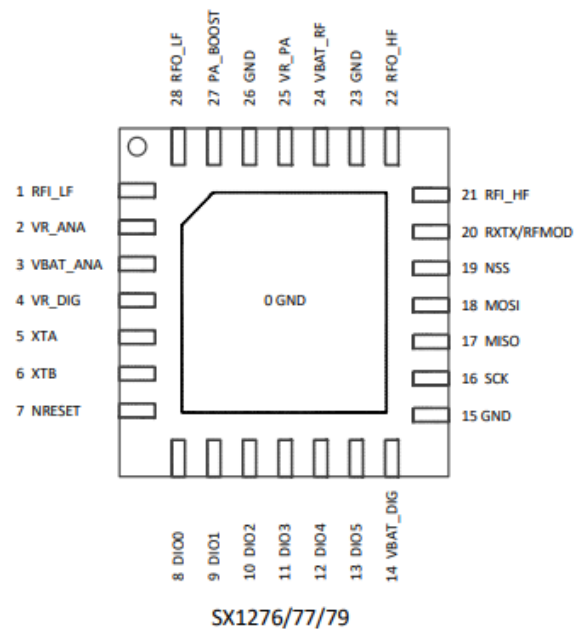


Figura 21. Chip Transceptor SX1276.

Fuente: (TTGO, 2013)

Para conectar el modulo LoRa con el microprocesador ESP32, se utiliza el protocolo SPI con Arduino. En una conexión SPI siempre hay un dispositivo maestro que controla los dispositivos periféricos. Por lo general, hay tres líneas comunes a todos los dispositivos (Rodríguez, 2018):

- MISO (Master In Slave Out): La línea usada por los periféricos para enviar datos al maestro.
- MOSI (Master Out Slave In): La línea usada por el maestro para enviar datos a los periféricos.

- SCK (Serial Clock): Los pulsos de reloj que sincronizan la transmisión de datos generada por el maestro.

Y una línea específica para cada dispositivo:

- SS (Slave Slect): El pin en cada dispositivo que el maestro puede usar para habilitar y deshabilitar dispositivos específicos.

3.4. Software

El software es necesario para implementar el protocolo LoRaWAN, ya que el transceptor SX1276 LoRa proporciona la modulación de radio LoRa pero no implementa el protocolo. El protocolo debe implementarse por software que debe ejecutarse en el ESP32.

La programación de los dispositivos se lo realiza en el entorno de desarrollo integrado (IDE) Arduino que utiliza el lenguaje de programación Arduino, en específico se trata de un conjunto de instrucciones del lenguaje C y C++. Estas instrucciones están planteadas con el fin de facilitar el desarrollo del programa y el uso de la plataforma en conjunto hardware-software.

La placa TTGO LoRa32 están disponibles en el IDE de Arduino desde la versión 1.0.3 pero se recomienda la instalación de la última versión para evitar posibles problemas de compatibilidad, también es necesario la instalación del soporte para la plataforma ESP32 y sus respectivos controladores (ARDUINO, 2019). Se debe incluir un conjunto de librerías importantes para el funcionamiento del chip SX1276, entre las cuales están:

- LoRa.h: deberá estar instalada en el administrador de librerías de Arduino, ya que permite enviar y recibir datos entre módulos LoRa con los mismos parámetros.

- SPI.h: esta librería permite comunicarse con dispositivos SPI, a través Arduino como dispositivo maestro.
- Wire.h: esta librería permite comunicarse con dispositivos de circuito integrado (I2C).

El programa usado para la configuración de los módulos LoRa se divide en dos partes. En la primera se detalla los parámetros del módulo como la frecuencia de trabajo, BW, SF y la tasa de codificación de errores y en la segunda parte se especifica la función encargada de la transmisión y recepción de los paquetes.

3.4.1. Programa en Arduino

En la figura 22, se observan los diagramas de flujo utilizados para la programación en Arduino. El primer diagrama desde izquierda se utiliza para el módulo receptor, el segundo diagrama para el módulo transmisor.

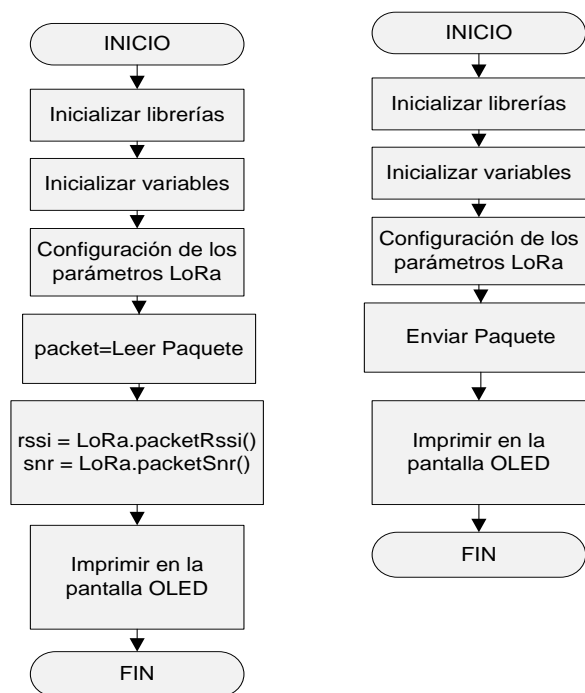


Figura 22. Diagrama de flujo para LoRa.

3.4.2. Definición de Parámetros

De acuerdo a lo especificado en sección 3.1, las configuraciones que pueden tener los dispositivos LoRa varían de acuerdo a los valores de SF y BW, como se observa en la tabla 18.

Tabla 18

Configuraciones de los dispositivos LoRa.

DataRate(DR)	Configuración	Bit rate (bit/s)
0	LoRa: SF12 / 125KHz	250
1	LoRa: SF11 / 125KHz	440
2	LoRa: SF10 / 125KHz	980
3	LoRa: SF9 / 125KHz	1760
4	LoRa: SF8 / 125KHz	3125
5	LoRa: SF7 / 125KHz	5470
6	LoRa: SF8 / 500KHz	12500

Fuente: (LoRa Alliance, 2018)

Dichas configuraciones serán aplicadas en los módulos a través del algoritmo realizado en el IDE de Arduino. Es importante tener en cuenta que tanto el módulo transmisor como el módulo receptor deben tener la misma configuración para poder realizar la comunicación.

La variación de los parámetros se realiza en las dos líneas de código que se muestra en la figura 23. En la primera línea se cambiarán los valores del parámetro SF y en la segunda el valor de BW.

```
LoRa.setSpreadingFactor(7);
LoRa.setSignalBandwidth(125E3);
```

Figura 23. Código para configuración de parámetros.

3.5. Características de la red LoRaWAN

Como específica Roche (2017), los requisitos que deben cumplir los dispositivos LoRa para formar parte de la red LPWAN con aplicación en IoT son:

1. Dispositivos de reducido tamaño
2. Bajas frecuencias de operación.
3. Largo alcance de comunicación.
4. Bajo consumo energético.
5. Bajas tasas de Transmisión de datos.

En base a esto, se plantea la realización de pruebas sobre los módulos TTGO LoRa32 V1, con el fin de verificar su desempeño de acuerdo a los requisitos planteados. La realización de estas pruebas permitirá tener una idea más clara del funcionamiento de los módulos en un ambiente específico como es el campus matriz de la ESPE.

3.5.1. Dispositivos de reducido tamaño

De acuerdo al análisis realizado en la sección 3.2.2, se obtuvo los resultados especificados en la tabla 19.

Tabla 19

Comparación de precio y tamaño de los módulos LoRa.

	Tamaño	Precio
Módulo REYAX RYLR869	42.5 x 18.36 x 5.5 mm	\$15
Módulo Dragino LoRa Shield	62 x 43 x 23 mm	\$16,60
Módulo MKR WAN 1300	67,64 x 25 x 23 mm	\$39,90
Módulo TTGO LoRa32 V1	51 x 25 x 10.3 mm	\$14,50

CONTINÚA 

Módulo TTGO LoRa32 V2	52,4 x 26 x 12,3 mm	\$19,61
Módulo TTGO LoRa32 V2 1_6	64,47 x 27 x 22,15 mm	\$21,15

Se puede concluir que el módulo REYAX y módulo TTGO LoRa32V1 poseen un reducido tamaño y precio a diferencia de los otros módulos analizados. Por la aplicación que va tener el dispositivo en este trabajo de investigación se hará uso del módulo TTGO LoRa32V1.

3.5.2. Bajas frecuencias de operación

El chip transceptor LoRa SX1276 incorporado en el módulo, trabaja a frecuencias libres ISM menores a 1GHz, a diferencia de otras tecnologías inalámbricas como lo son Wi-Fi y Zigbee que trabajan a frecuencias de 2,4GHz.

Específicamente trabaja a 868MHz y 915MHz dependiendo de la región en la que encuentre, para este trabajo de investigación se utilizara la frecuencia de 915MHz ya que esa es la frecuencia indicada para Ecuador como se muestra en la sección 3.1. De acuerdo a lo especificado se concluye que el modulo cumple con esta característica.

3.5.3. Largo alcance de comunicación

Para verificar si los dispositivos LoRa cumplen con la característica de largo alcance, se realiza un conjunto de mediciones con el fin de identificar la intensidad y la calidad de la señal recibida en diferentes puntos alrededor de la ESPE.

Para estas mediciones se tomaran en cuenta dos parámetros, que son:

- Intensidad de la señal recibida (RSSI): Se define como la potencia de la señal recibida y se mide en dBm. Es un valor comprendido entre: -111dBm y -139dBm establecido para LoRa

(Alliance, 2018), por lo tanto la señal mejora mientras más cerca este del umbral de -111dBm.

- Relación señal a ruido (SNR): es la relación entre la señal recibida y el nivel de potencia de ruido. Los valores típicos de LoRa SNR se encuentran entre: -20dB y +10dB, donde los valores más cercanos a +10dB significan que la señal recibida esta menos dañada. (SEMTECH, 2016).

3.5.3.1. Prueba para Medición

Para la medición y caracterización se establecerá una comunicación punto a punto, es decir, un módulo transmisor y otro receptor. Por lo tanto, se fijan rutas que parten desde el módulo receptor colocado en el Edificio Administrativo, como se observa en la figura 24; dichas rutas son trazadas de tal forma que permitan abarcar la mayor superficie del campus para poder caracterizar el área de interés.



Figura 24. Distribución de las rutas en la ESPE.

En la tabla 20, se tiene una breve descripción de todas las rutas.

Tabla 20*Descripción de las rutas.*

	Distancia	Características
Ruta 1- Centro Medico	258 m	Existe presencia del edificio de la biblioteca
Ruta 2- Laboratorios	420 m	Atraviesa el edificio del bloque D. Atraviesa los laboratorios de biotecnología y electrónica.
Ruta 3- Gasolinera	380 m	Existe la presencia de zonas con vegetación.
Ruta 4- Hangar CICTE	617 m	Atraviesa una zona con vegetación Atraviesa los edificios del CICTE.
Ruta 5- Residencias Estudiantiles	402 m	Existe la presencia de pequeñas zonas con vegetación

Con el fin de caracterizar la zona de estudio, se realizan varias pruebas para obtener los valores de RSSI y SNR respectivos; para ello se tomarán los datos a lo largo de todas las rutas usando las siete configuraciones especificadas en la tabla 18. Esta toma de datos se repetirá por cuatro días seguidos para cada una de las rutas y configuraciones con el fin de lograr una buena caracterización.

3.5.3.2. Descripción del Procedimiento

Paso 1.- Se colocó el módulo receptor en la terraza del edificio administrativo, siendo el módulo transmisor el que se movió a lo largo de toda la ruta.

Paso 2.- Se empezó con la configuración DR0 hasta DR6 con el fin de completar las siete configuraciones mostradas en la tabla 18.

Paso 3.- La toma de datos con el dispositivo transmisor se inicia desde el edificio administrativo hasta el punto final de la ruta. Y posteriormente siendo almacenados de forma automática en una base de datos.

Paso 4.- Finalmente se repiten los pasos del 1 al 3, para las diferentes rutas especificadas en la figura 24.

3.5.3.3. Análisis de Resultado

a. Intervalos de Medición

Para identificar los intervalos de medición se usara el proceso llamado *promediado espacial* (Lee, 1985), el cual consta de moverse una distancia de entre 20λ y 40λ en una frecuencia especifica.

El módulo TTGO LoRa funciona a una frecuencia de 915 MHz por tal motivo se usara dicho valor en la ecuación 1.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 * 10^8}{915 * 10^6} = 0,327 \text{ m} \quad (1)$$

$$20\lambda = 20 * 0,327 \text{ m} = 6,54\text{m} \quad (2)$$

$$40\lambda = 40 * 0,327 \text{ m} = 13,08\text{m} \quad (3)$$

El intervalo de medición debe estar entre los valores de 6,54m y 13,08m, por lo tanto, se escoge 10m por operatividad.

b. Factores Medioambientales

Es importante tener en cuenta que los factores medioambientales afectan a los enlaces de radio. De acuerdo al informe desarrollado por Orozco (2010), la humedad tiene un efecto más fuerte debido a la presencia de pequeñas partículas de agua que dificultan la transmisión, mientras que la temperatura es la que menos afecta. Los valores de temperatura y humedad que se presentaron en los días de medición se observan en la tabla 21.

Tabla 21*Factores medioambientales.*

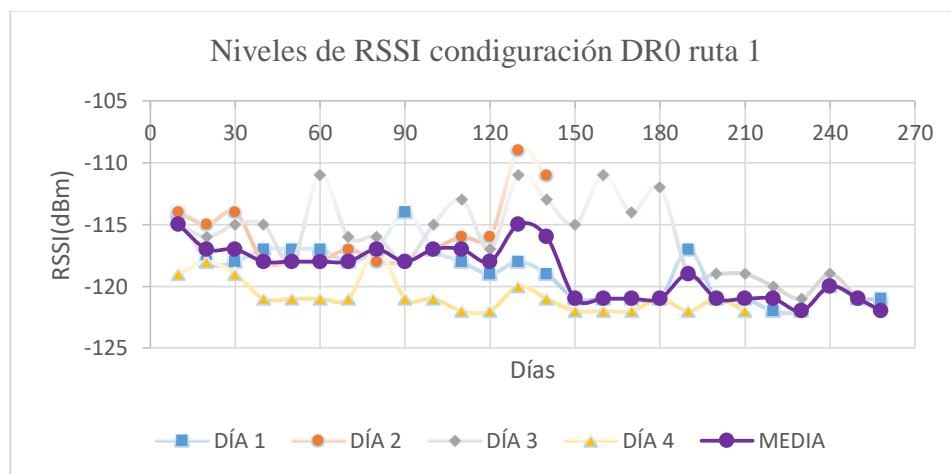
	Temperatura	Humedad
Día 1	13°C-21°C	28-41%
Día 2	13°C -21°C	32-52%
Día 3	14°C -20°C	27-41%
Día 4	12°C -21°C	31-56%

Fuente: (AccuWeather, 2019)

Después de realizar el procedimiento descrito por cuatro días seguidos se calculó el promedio de cada muestra medida en intervalos de 10m, posteriormente se utilizará la desviación estándar con el fin de observar el rango de dispersión de los valores de RSSI y determinar si se encuentran dentro de lo establecido para dispositivos LoRa.

c. Valores de RSSI y SNR

Entre los dispositivos hay limitada línea de vista lo que dificulta la comunicación, ya que a lo largo de la ruta existe la presencia de edificios de la biblioteca que interfiere en la transmisión de los datos. En la figura 25 y figura 27 se observan los valores de RSSI y SNR respectivamente.

**Figura 25.** Valores de RSSI configuración DR0 ruta 1.

En la figura 25 se compara los datos de RSSI de las mediciones realizadas en los cuatro días. Se observa que en el día 1 y en el día 3 los dispositivos transmitieron hasta que se completó la ruta establecida, esto no sucede para el día 2 y día 4 ya que las transmisiones se detuvieron mucho antes de completar la ruta, por lo tanto, el alcance disminuyó. Este comportamiento se le atribuye a la humedad presente en esos días (tabla 21), de tal manera se pudo comprobar que el porcentaje de humedad presente en el ambiente afecta al alcance de las transmisiones de radio LoRa.

Se obtuvo la media de los valores de RSSI que se tomó durante los cuatro días, posteriormente se graficó la desviación estándar con el fin de observar la dispersión de los valores de RSSI, como se muestra en la figura 26.

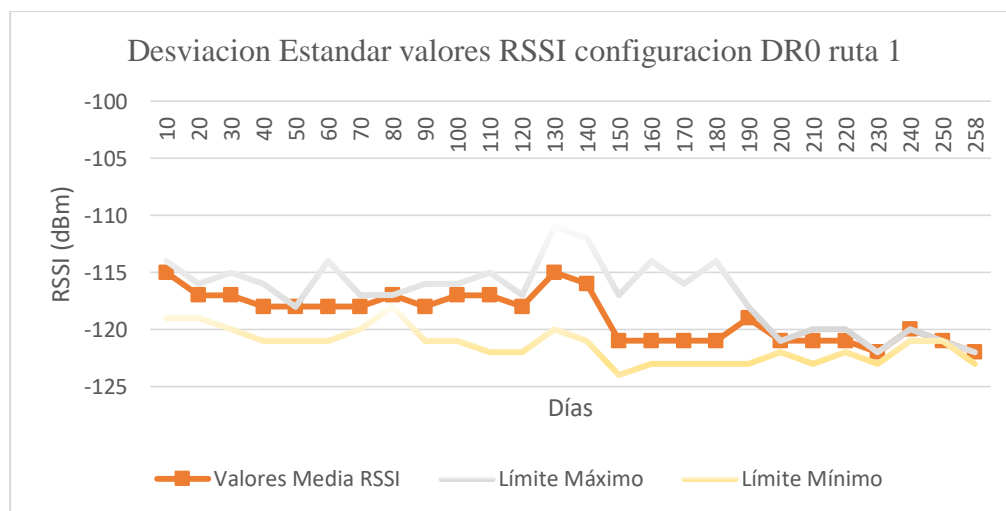


Figura 26. Valores de RSSI configuración DR0 ruta 1.

Los datos de RSSI oscila entre -114 dBm y -122 dBm, rango permitidos para los dispositivos LoRa (Alliance, 2018); los valores más cercanos al umbral de -111dBm se presentan durante los primeros metros de medición por lo tanto la potencia de la señal recibida es más fuerte. En la tabla

22 se observa un resumen de los límites máximos y mínimos de RSSI para las siete configuraciones en las cinco rutas.

Tabla 22

Límites máximos y mínimos de RSSI.

	RUTA 1		RUTA 2		RUTA 3		RUTA 4		RUTA 5	
	Límite Máximo	Límite Mínimo	Límite Máximo	Límite Mínimo	Límite Máximo	Límite Mínimo	Límite Máximo	Límite Mínimo	Límite Máximo	Límite Mínimo
DR0	-114	-124	-115	-121	-119	-125	-117	-127	-114	-124
DR1	-116	-126	-112	-122	-119	-125	-118	-124	-121	-122
DR2	-113	-119	-112	-118	-113	-119	-113	-119	-113	-121
DR3	-112	-121	-110	-118	-116	-120	-120	-123	-109	-112
DR4	-114	-121	-109	-115	-113	-123	-115	-121	-112	-121
DR5	-108	-118	-110	-120	-112	-120	-116	-123	-110	-119
DR6	-108	-114	-109	-114	-111	-114	-109	-115	-105	-114

La configuración DR6 posee valores fuera del rango de -111dBm establecidos para los dispositivos LoRa, provocando problemas de conexión entre el modulo transmisor y receptor. Por el contrario, la configuración DR0 posee valores de hasta -127dBm para la ruta del CICTE o ruta 4 debido a que es la distancia más larga que se cubrió y como consecuencia la potencia de la señal recibida es inferior.

En la figura 27, se compara los datos de SNR tomados durante los cuatro días de medición.

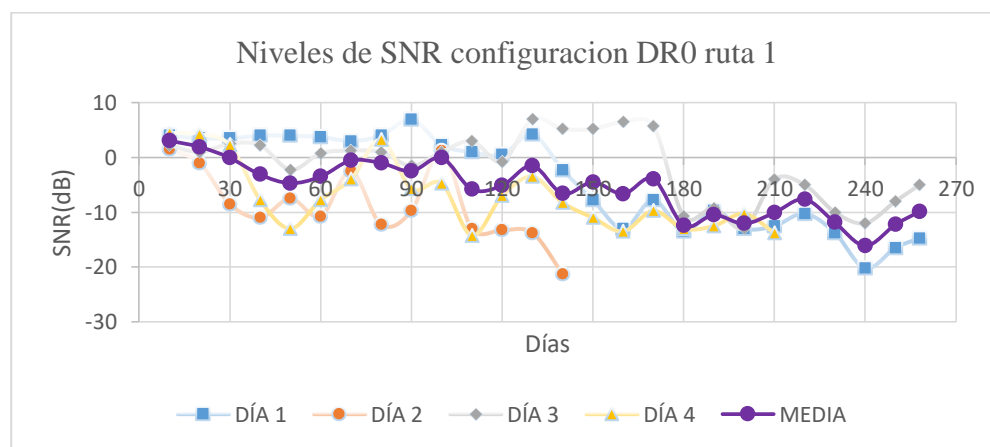


Figura 27. Valores SNR configuración DR0 ruta 1.

Se puede observar que los valores de SNR obtenidos tiene un comportamiento parecido al RSSI, pero oscila entre valores de +7dB y -21dB. En el día 1 y día 3 se encuentra que tiene datos positivos hasta los 140m lo que indica que la señal no ha sufrido daños, es decir, no existe perdida de paquetes, como se puede observar en la figura 28. Por otro lado, en el día 2 y día 4 la señal empieza a sufrir daños o interferencias desde los 30m ya que tienen datos negativos de SNR y su porcentaje de paquetes recibidos bajo a 98%.

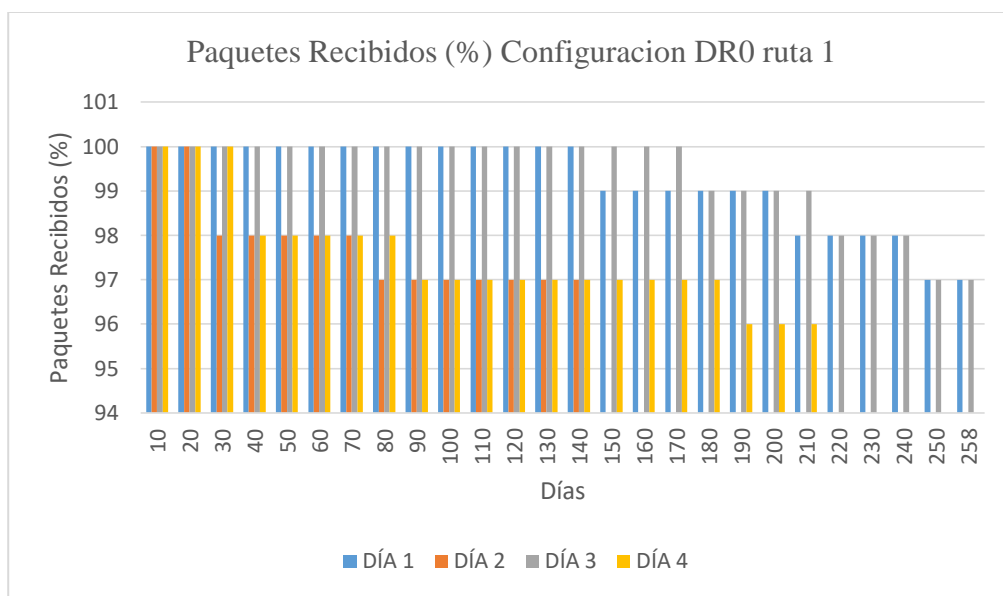


Figura 28. Paquetes recibidos configuración DR0 ruta1.

A continuación, se realizó el promedio de los datos con el fin de estimar la media de la relación señal a ruido. Los datos promedio de SNR, presentes en la figura 29, oscilan entre 4dB y -13,61dB; estos empiezan con valores positivos durante los primeros metros de transmisión, sin embargo, conforme avanza la señal, se vuelven negativos pero no supera el nivel -20dB establecidos para los dispositivos LoRa, ya que si supera dicho umbral la señal no podrá ser demodulada.

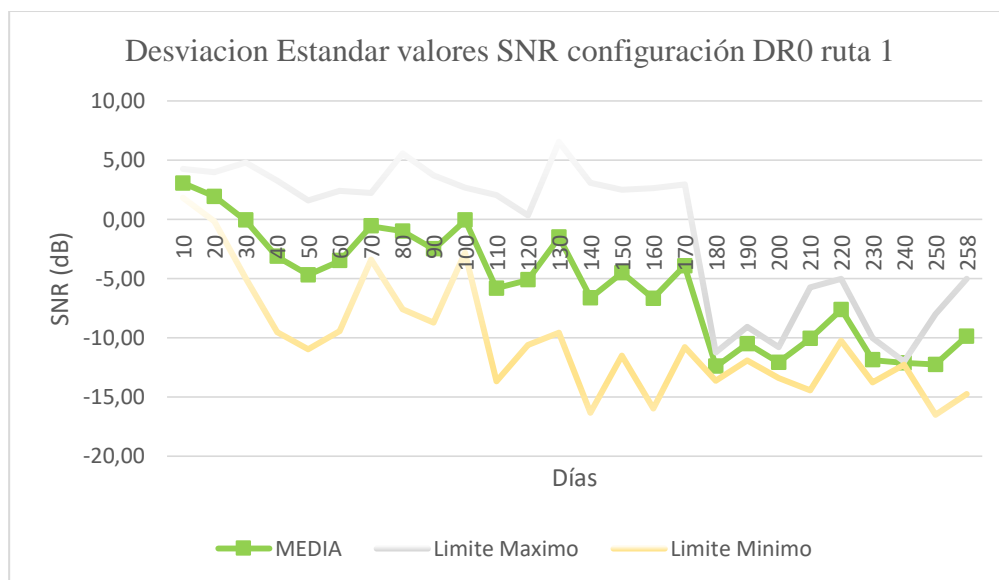


Figura 29. Valores SNR configuración DR0 ruta 1.

Se verifica que a los 50m de distancia desde el edificio administrativo los valores de SNR bajan hasta los -5dB, eso es debido a la existencia del edificio de la biblioteca lo que produce un aumento en la relación señal a ruido.

En la tabla 23 se observa un resumen de los límites máximos y mínimos de SNR para las siete configuraciones en las cinco rutas.

Tabla 23

Límites máximos y mínimos de SNR.

	RUTA 1		RUTA 2		RUTA 3		RUTA 4		RUTA 5	
	Límite Máximo	Límite Mínimo	Límite Máximo	Límite Mínimo	Límite Máximo	Límite Mínimo	Límite Máximo	Límite Mínimo	Límite Máximo	Límite Mínimo
DR0	6,05	-16,3	7,35	-19,75	3,55	-17,25	3,66	-18,25	1,89	-17,00
DR1	2,31	-13,38	7,625	-17,63	1,21	-17,75	1,88	-19,75	1,35	-19,00
DR2	4,38	-10,00	2,875	-12,25	4,59	-16,25	2,35	-15,38	2,40	-18,50
DR3	3,00	-10,75	2,70	-14,75	0,82	-16,00	0,72	-14,90	2,83	-15,25
DR4	2,25	-12,83	3,06	-10,25	3,10	-10,00	0,95	-10,50	2,55	-12,50
DR5	3,75	-9,00	4,67	-9,00	3,64	-11,00	5,54	-10,25	0,02	-9,00
DR6	3,00	-9,75	5,56	-12,25	0,41	-9,75	0,46	-13,00	0,81	-12,25

Se observa que para las diferentes configuraciones en las cinco rutas los valores de SNR se encuentran dentro del rango de +10dB a -20dB establecidos por LoRa, teniendo un máximo de -19.75dB en la ruta del CICTE o ruta 4 que se le atribuye a la larga distancia que recorre la señal y a las interferencias presentes en el medio.

De acuerdo a los resultados obtenidos con las pruebas realizadas se puede concluir que los dispositivos están trabajando bajo los rangos establecidos para la transmisión con LoRa, con la excepción de los valores de RSSI para la configuración DR6. Por tal motivo se espera un desempeño adecuado de los dispositivos en las diferentes rutas.

d. Radio de cobertura

Son siete las configuraciones desde DR0 a DR6 que se aplicaron en cada una de las rutas, cada configuración varía los parámetros de SF y BW. De acuerdo a lo especificado en la sección 3.1 el valor de SF actúa directamente sobre el radio de cobertura de la transmisión LoRa, mientras más pequeño el valor, mayor es el radio de cobertura y viceversa.

En la tabla 24 se observa el alcance máximo que tuvo la transmisión durante las pruebas de medición con las diferentes configuraciones y rutas.

Tabla 24

Radio de cobertura en función de la ruta y configuración.

	RUTA1	RUTA2	RUTA3	RUTA4	RUTA5	Área
DR0	258m	420m	380m	617m	400m	267.1 m ²
DR1	250m	390m	310m	550m	380m	214.3 m ²
DR2	230m	380m	270m	420m	340m	258.9 m ²
DR3	230m	370m	240m	380m	330m	136 m ²
DR4	200m	340m	220m	360m	250m	108.5m ²
DR5	180m	280m	190m	240m	240m	73.58 m ²
DR6	100m	160m	130m	220m	130m	36.4 m ²

En la figura 30, usando los datos de la tabla anterior se realizó las gráficas del radio de cobertura de las siete configuraciones. La figura (a), tiene la mayor superficie con $267.1m^2$, esto es debido a la configuración DR0 que posee como parámetros SF=12 y BW=125kHz; en (b) configurado con DR1, se observa una disminución de $52.8m^2$ en la superficie comparado con DR0; para la figura (c) que posee la configuración DR2, el alcance se reduce a $258.9 m^2$; en (d) que posee como parámetro SF=9, el alcance se redujo a $136 m^2$; (e) configurado con DR4 y SF=8, se observa una disminución de $158,6m^2$ comparado con la configuración DR0; la figura (f) configurado con DR5 y SF=7, posee una superficie de $73.58 m^2$; la última configuración se muestra en (g) que posee una reducida superficie de tan solo $36.4 m^2$. Por lo tanto, se puede concluir que el comportamiento del valor de SF es directamente proporcional al radio de cobertura de los dispositivos, comprobando a través de esta prueba que se cumple el funcionamiento especificado en la sección 3.1.



a)



b)

CONTINÚA →

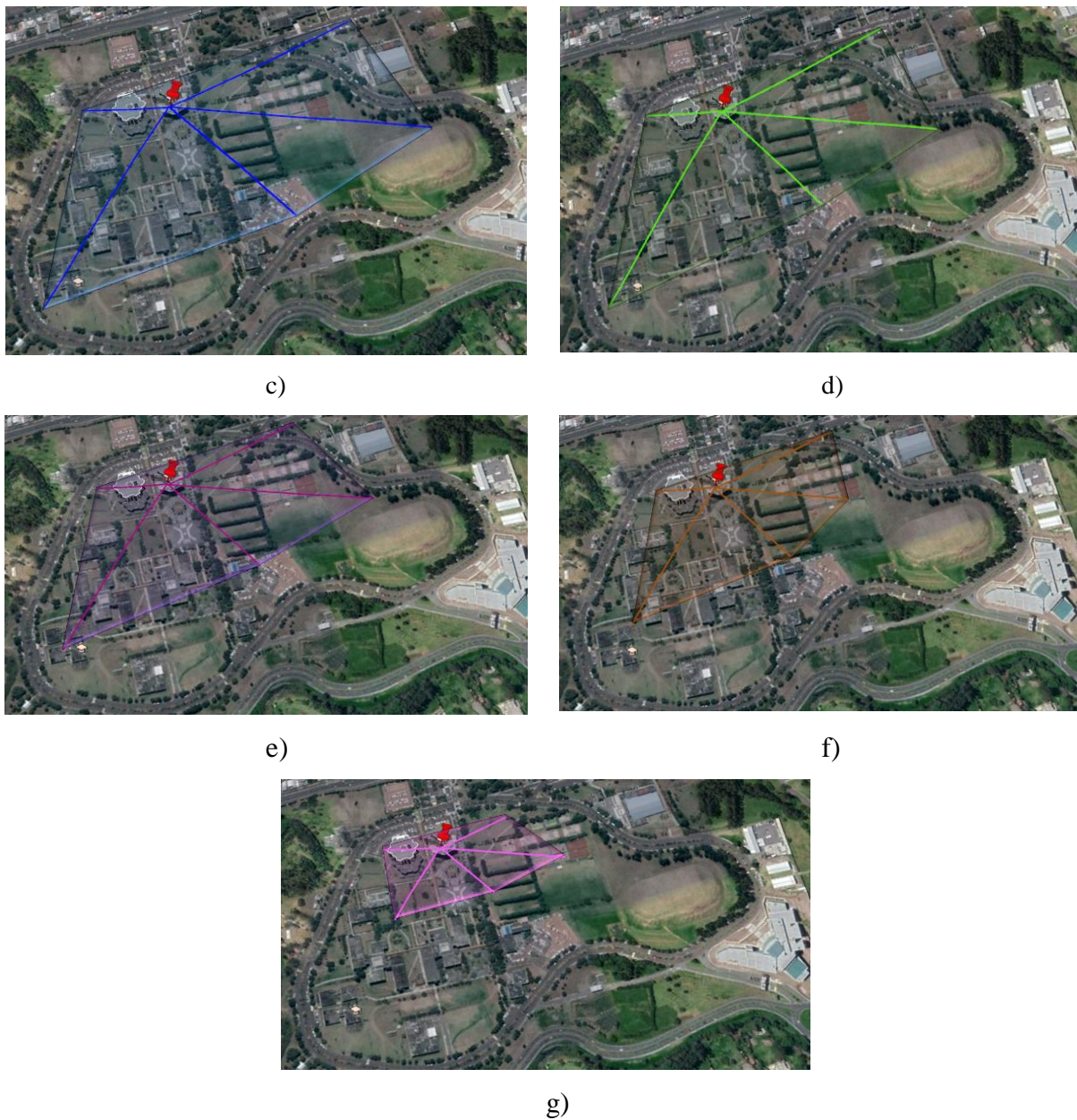


Figura 30. Radio de cobertura. a) Configuración DR0, b) Configuración DR1, c) Configuración DR2, d) Configuración DR3, e) Configuración DR4, f) Configuración DR5, g) Configuración DR6

Es importante tomar en cuenta los obstáculos presentes en el medio ya que producen interferencias en la señal, por tal motivo se realiza un análisis de todas las rutas configuradas con

DR0, tomando en cuenta que el análisis de la ruta 1 se especifica junto a la figura 29 en la sección 3.5.3.3.c.

A continuación, la figura 31 muestra el promedio del porcentaje de paquetes recibidos durante la transmisión con los módulos configurados con DR0, para las diferentes rutas especificadas en la tabla 20.

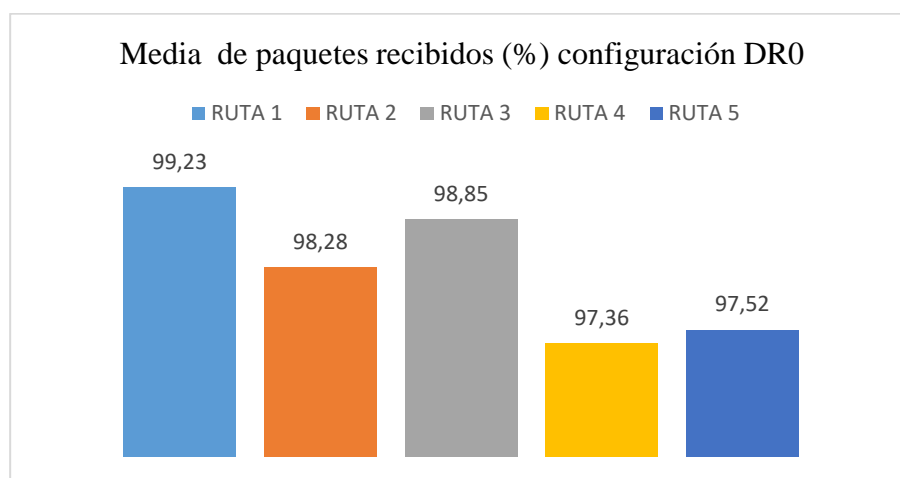


Figura 31. Media de paquetes recibidos configuración DR0

En la ruta de los laboratorios o ruta 2 se localizan dos estructuras principales. A 230m del edificio administrativo se halla el edificio de postgrado en donde se mide un pico de -15,3dB, como se observa en la figura 32; avanzando 70m más hacia los laboratorios de biotecnología se puede observar la presencia de otro pico con valor de -16,3dB. En la figura 31 se observa un porcentaje del 98.28% de paquetes recibidos para la ruta 2 lo cual indica que la influencia de los edificios afecta en la recepción de los paquetes de datos.

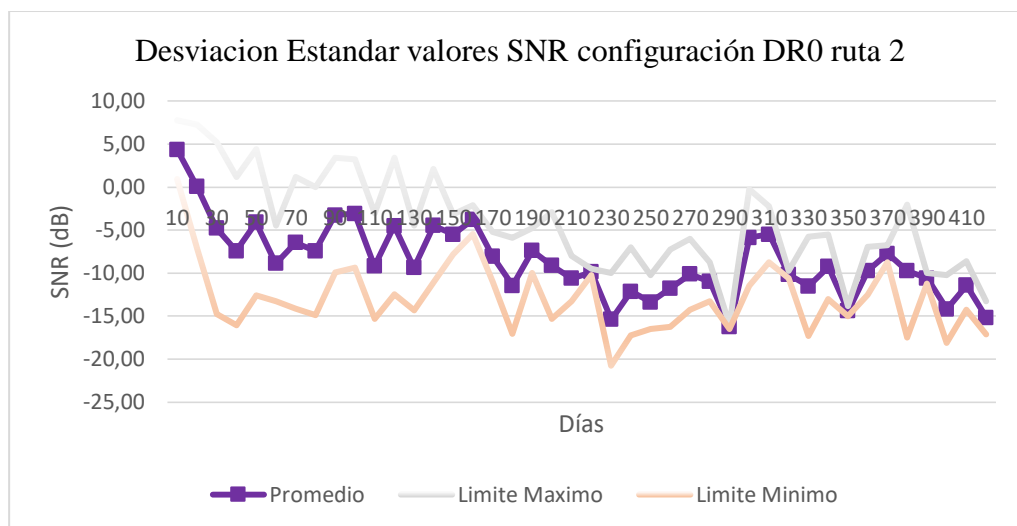


Figura 32. Desviación estándar valores SNR configuración DR0 ruta 2.

En la ruta 3, a los 90m desde el edificio administrativo, se encuentra una zona de vegetación; por tal motivo se tiene el primer pico de -8dB, como se observa en la figura 33. Avanzando 110m hacia el edificio del almacén universitario se tiene otro pico -18.3 dB. La figura 31 muestra que posee un 1,72 % de paquetes perdidos, inferior a lo que se mostró para la ruta 2 debido a que no posee grandes edificaciones en el medio.

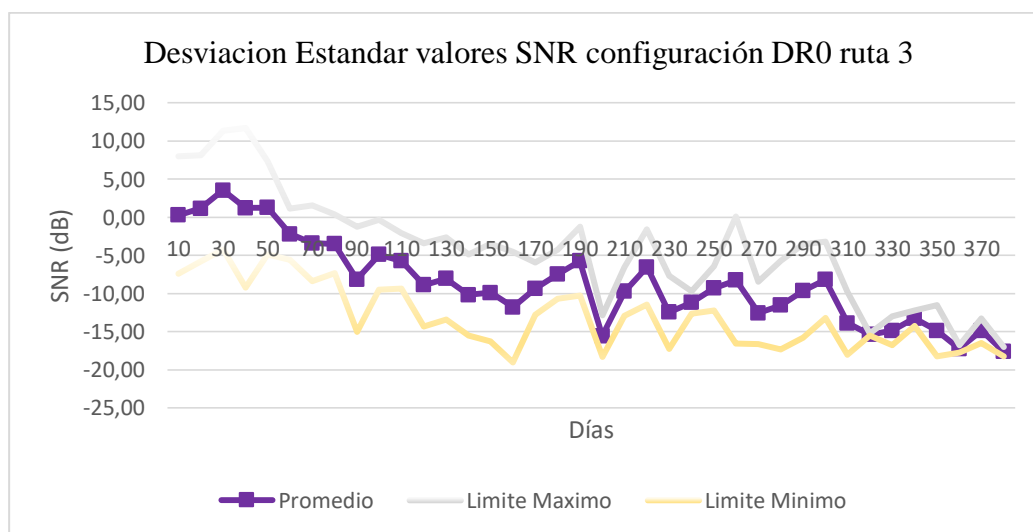


Figura 33. Desviación estándar valores SNR configuración DR0 ruta 3

En la figura 34 se observa la ruta 4 que recorre la mayor distancia, a diferencia de las otras rutas. Su medio está formado por pequeñas zonas de vegetación hasta la parte final, en la cual se encuentra los edificios del CICTE, donde se presenta los picos más bajos de SNR con valores de -17dB. El porcentaje de paquetes recibidos en esta ruta es de 97,36% (figura 31) siendo este el valor más pequeño en comparación con las otras rutas, debido a la larga distancia que recorre y al edificio del CICTE presente.

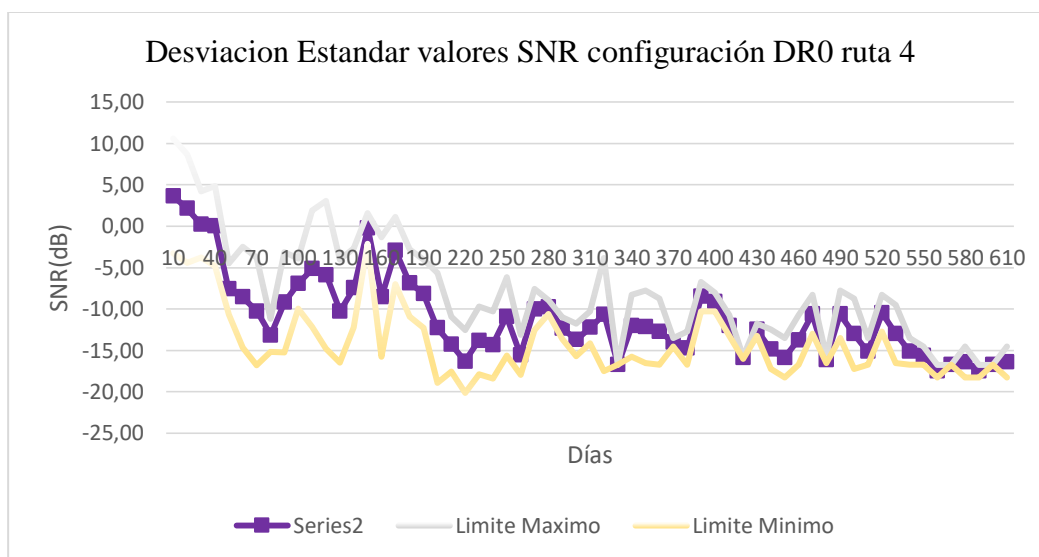


Figura 34. Desviación estándar valores SNR configuración DR0 ruta 4.

Por ultimo en la figura 35 se tiene la ruta 5. En este medio se presentan pequeñas zonas de vegetación desde los 50m de distancia desde el edificio administrativo, donde se observa un pico de -9dB; de aquí en adelante los datos varían entre -8dB y -12 dB, indicativo que la señal a sufrido daños. En esta ruta se presenta un valor de 2,48% de paquetes perdidos debido a las interferencias causadas en el medio.

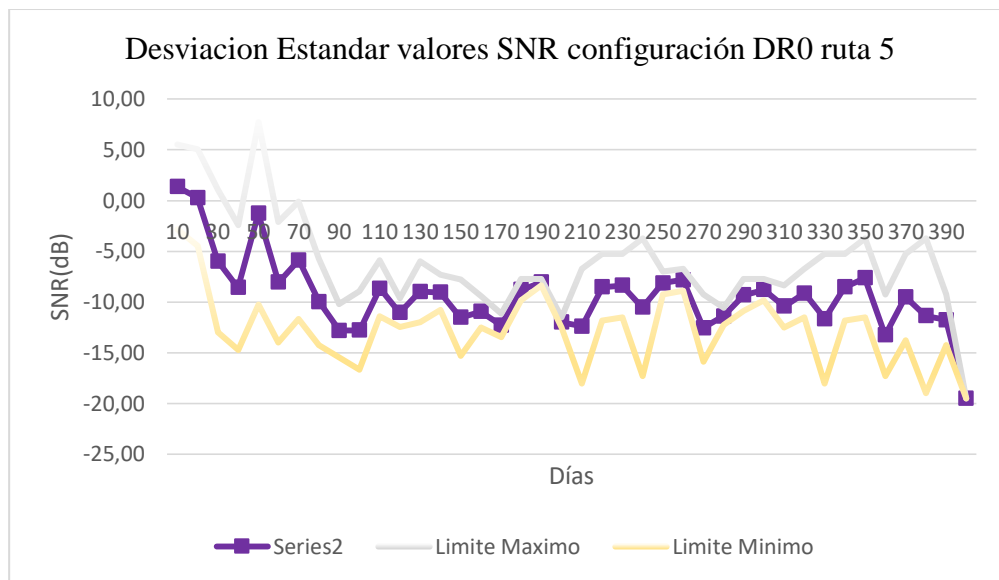


Figura 35. Desviación estándar valores SNR configuración DR0 ruta 5.

A través de estas figuras se pudo observar el impacto de los obstáculos sobre la señal que se transmite, esto es debido a las interferencias presentes en el medio, ya que los edificios y la vegetación perjudican la transmisión de los datos, aumentan el porcentaje de paquetes perdidos y disminuyen la potencia con la que los dispositivos reciben la señal, lo cual es un indicativo que la señal sufre más daños antes de llegar al receptor.

3.5.4. Bajo consumo energético

Los modulo LoRa se presentan como una tecnología de bajo consumo energético y uno de sus parámetros más importantes es el tiempo de vida de las baterías que alimentan a los módulos. Para determinar dicho tiempo de vida se realizara varias pruebas a través de la medición de corrientes y tiempo durante la comunicación. (Casals, Mir, Vidal, & Gomez.Carles, 2017)

Para cada una de las configuraciones descritas en la tabla 18, se medirá la corriente efectiva y el tiempo de duración que emplean los dispositivos en la transmisión y recepción. El proceso de medición se realizará de la siguiente manera:

- **Medición de Corriente:** Se mide la corriente que consume un dispositivo LoRa. Está varía si está transmitiendo, recibiendo, o en modo sleep.

Durante la transmisión y modo sleep, lo que se hace es medir la corriente que fluye a través de una carga colocada entre la batería de 3,3 V y el dispositivo LoRa, como se observa en la figura 36.

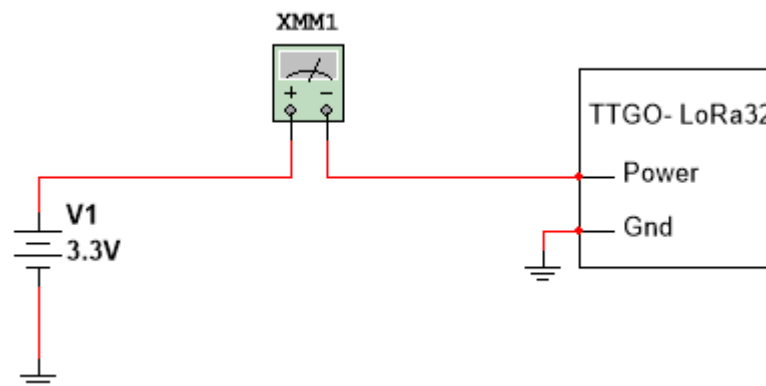


Figura 36. Diagrama de medición de corriente

- **Medición de tiempos de Transmisión y Recepción:** Para medir los tiempos de transmisión y recepción se hace uso de un osciloscopio, mismo que se conecta al pin MOSI del módulo TTGO LoRa32, ya que este pin es usado para la transmisión de los datos desde el maestro al esclavo.

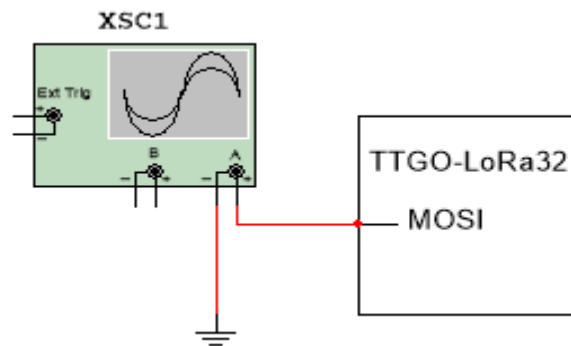


Figura 37. Diagrama de medición de tiempos.

En los dispositivos de clase A durante la transmisión se puede observar distintos estados, como se muestra en la figura 38. El primer escalón representa la transmisión, mientras que las otras dos son ventanas de recepción descritas en el protocolo LoRaWAN; las ventanas de recepción son abiertas a pesar de haber enviado un mensaje que no requiere confirmación.

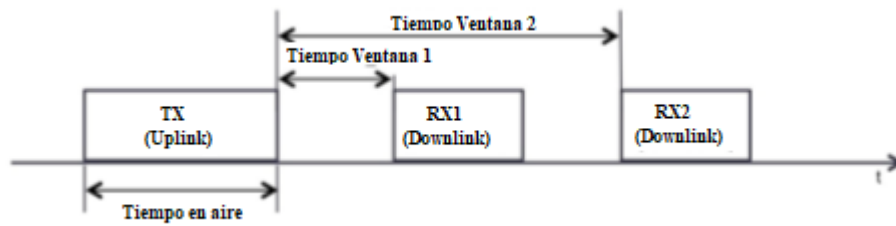


Figura 38. Dispositivos clase A ventanas Transmisión.

De las pruebas realizadas con el osciloscopio se obtuvo la figura 39.

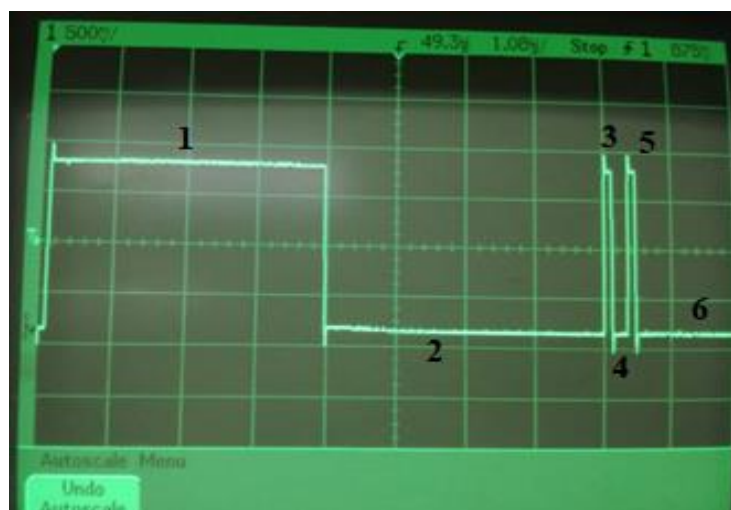


Figura 39. Medición Osciloscopio dispositivo clase A.

En la tabla 25 se observa la descripción de cada uno de los puntos numerados en la figura 39, con sus respectivas abreviaturas y valores obtenidos del datasheet. (SEMTECH, 2016)

Tabla 25

Abreviaturas y valores de los estados durante la transmisión.

N°	Descripción	Variable tiempo	Valor (ms)	Variable corriente	Valor (mA)
1	Transmisión Uplink	t_{TX}	Tabla 25	I_{Tx}	Tabla 25
2	Espera 1er ventana	t_{w1v}	893.23	I_{w1v}	27.0
3	Primera ventaja de recepción	t_{1v}	268.1	I_{1v}	38.1
4	Espera 2da ventana	t_{w2v}	265.1	I_{w2v}	27.1
5	Segunda ventaja de recepción	t_{2v}	233.0	t_{2v}	35.0
6	Sleep	t_{sleep}	300000	I_{sleep}	0,00014

Es importante tomar en cuenta que el valor de t_{sleep} va a variar, ya que la tasa de envío de paquetes va ir disminuyendo desde enviar un paquete cada quince minutos hasta enviar un paquete

por día. Por otro lado, los valores de transmisión Uplink varían de acuerdo a la configuración desde DR0 a DR6.

3.5.4.1. Descripción del Procedimiento

Paso 1: Se midió la corriente en la carga que se encuentra entre la batería y el modulo durante la transmisión y el modo sleep.

Paso 2: Con la ayuda del osciloscopio, se midió el tiempo de cada uno de los estados por los que pasa durante la transmisión y recepción de datos.

Paso 3: Los pasos del 1 al 2 se repiten, variando los parámetros hasta terminar con las siete diferentes configuraciones mostradas en la tabla 18.

3.5.4.2. Análisis de Resultados

Para la realización de estas pruebas se va hacer uso del modo deep sleep de los dispositivos LoRa mediante un despertador de tipo temporizador, programados en el IDE de Arduino a través de las líneas de comando `esp_sleep_enable_timer_wakeup` y `esp_deep_sleep_start()`.

a. Consumo de corriente media

Conociendo los tiempos y corrientes de cada uno de los estados por los que pasa durante la transmisión, se puede calcular la corriente media consumida con el uso de la ecuación 4 (Avila, 2017). Cabe aclarar que los tiempos entre ventanas se especifican en la tabla 25.

$$I_{avg} = t_{TX} * I_{TX} + t_{1v} * I_{1v} + t_{2v} * I_{2v} + t_{sleep} * I_{sleep} \quad (4)$$

Donde:

I_{avg} : Corriente media consumida.

t_{TX}, I_{TX} : Tiempo de transmisión y corriente mientras transmite.

t_{1v}, I_{1v} : Tiempo que esta la primera ventana abierta y corriente mientras está abierta.

t_{2v}, I_{2v} : Tiempo que esta la segunda ventana abierta y corriente mientras está abierta.

t_{sleep}, I_{sleep} : Tiempo en modo sleep y corriente en modo sleep.

En la tabla 26, se observa la tabulación de los datos medidos para cada uno de las configuraciones.

Tabla 26

Datos de corrientes y tiempos para cada configuración.

	Isleep(mA)	Ttx (s)	Trx (s)	Itx (mA)	Irx (mA)
DR0	0,00014	0,827	0,826	7,92	7,08
DR1	0,00014	0,414	0,404	6,38	6,85
DR2	0,00014	0,248	0,248	5,92	6,77
DR3	0,00014	0,124	0,123	5,62	6,69
DR4	0,00014	0,062	0,062	5,46	6,62
DR5	0,00014	0,031	0,030	5,38	6,77
DR6	0,00014	0,016	0,016	5,15	7,54

DR0 presenta los valores más altos de tiempo y corriente lo que la convierte en una configuración de transmisión lenta y alto consumo energético

La tasa de envío de paquetes utilizada fue disminuyendo, desde enviar un paquete cada 15 min hasta enviar un paquete por día, como consecuencia el tiempo de sleep fue creciendo progresivamente. Posteriormente, aplicando la ecuación 4 y según el tiempo que pasa entre transmisiones se obtiene la figura 40.

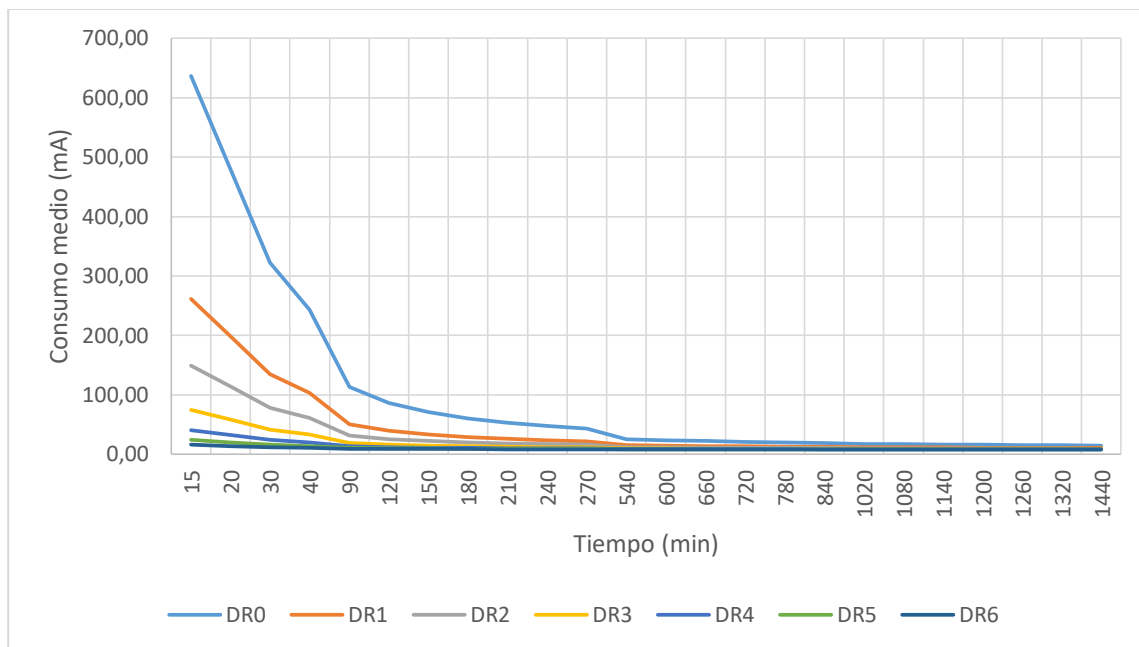


Figura 40. Consumo medio de una transmisión.

En la figura 40 se observa el comportamiento del consumo medio de la corriente en función del tiempo de sleep, mientras más pequeño sea el tiempo de sleep entre cada transmisión mayor es el consumo de corriente que se produce, por lo contrario, si el tiempo que permanece en sleep es mayor el consumo tiende al valor del consumo en modo sleep. Por ejemplo, al transmitir un paquete cada 15 min configurado con DR0 el consumo se eleva a los 636.29mA, por lo contrario si se transmite un paquete cada 1440min el valor disminuye hasta 14,65mA.

El consumo de corriente promedio disminuye con la configuración, debido a la corriente y tiempo de transmisión y recepción (tabla 26), dando como resultado un mayor consumo de corriente con DR0 y menor con DR6 como se observa en la figura 40. Sin embargo, todas las configuraciones tienden hacia un mismo valor conforme aumenta el tiempo en la que el dispositivo permanece en modo sleep.

b. Tiempo de vida de la batería

El tiempo de vida de la batería se puede expresar por:

$$Lifetime(h) = \frac{C(mAh)}{I_{avg}(mA)} \quad (5)$$

Donde:

$C(mAh)$: Capacidad nominal de la batería establecida por el fabricante. En este caso en específico se usó una batería 6600 mAh.

Los resultados de emplear la ecuación 5 se pueden observar en la figura 41.

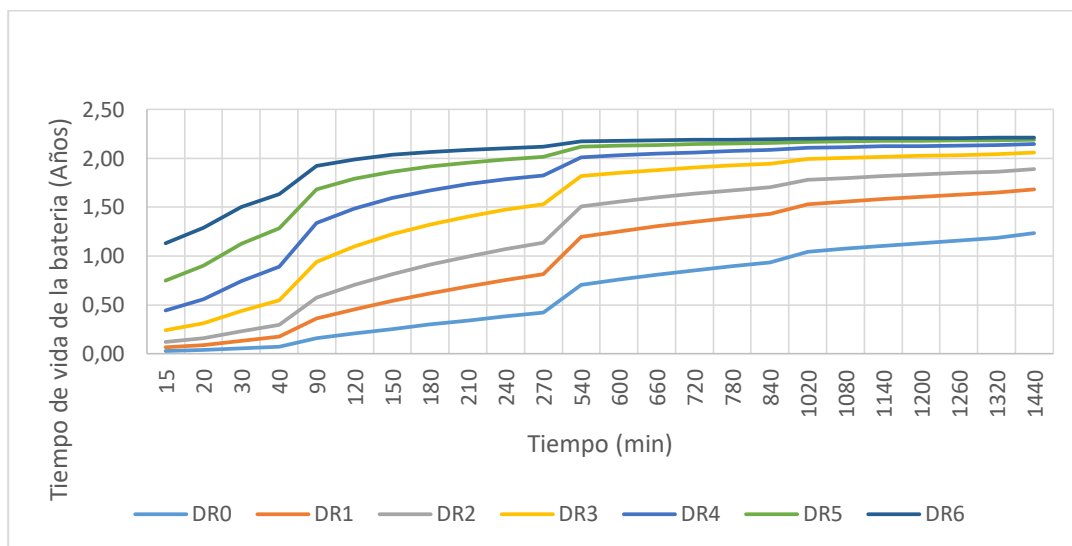


Figura 41. Tiempo de vida de la batería.

En la figura 41, se observa que el comportamiento de la vida útil de la batería es el inverso del consumo de corriente medio presentado en figura 40. Se obtiene mayor vida útil con un intervalo de sleep y DR mayor, por lo contrario, si el DR disminuye, la vida útil del dispositivo también disminuye. Este efecto es mayor cuando el intervalo de sleep decrece.

Por ejemplo, si $t_{sleep} = 15min$, la vida útil de la batería es menor a un año para todas las configuraciones, excepto DR6; en cambio, si el valor de $t_{sleep} = 1200min$, se puede llegar a alcanzar más de 2 años con la configuración DR6, DR5, DR4 y DR3, y más de 1 año para las demás configuraciones.

Por lo tanto, las baterías usadas por los módulos configurados con DR6 tienen mayor tiempo de vida, pero sacrifican el radio de cobertura; en cambio, DR0 es una configuración orientada a transmisiones de largas distancias, por tal motivo el consumo de corriente es mayor, lo que provoca que el tiempo de vida de las baterías sea el mínimo.

3.5.5. Bajas tasas de transmisión de datos.

Para comprobar la veracidad de esta característica, se calculará el throughput usado en la transmisión de los datos, con el fin de obtener la cantidad de carga útil (payload) que se transmite por unidad de tiempo y que se calcula a través de la ecuación 6.

$$Thr = \frac{Data}{T_{tx}} \quad (6)$$

Como se mencionó en la sección 2.9.1.2, los datos se encapsulan dentro del PHY payload, el cual está formado por una cabecera MAC, el payload y un mensaje de integridad de código (MIC) (Tabla 5). La trama payload puede tomar valores desde 1-M, donde M se especifica en la tabla 27.

Tabla 27

Tamaño en bytes de la trama payload

	M (bytes)
DR0	59
DR1	59
DR2	59

CONTINÚA 

DR3	123
DR4	230
DR5	230
DR6	230

Para este cálculo se envió un mensaje de 59 bytes, la máxima posible para la configuración DR0, DR1 y DR2, de modo que todos los mensajes transmitidos puedan ser idénticos a pesar de que las otras configuraciones soporten más bytes en su campo payload (Pérez R. , 2017).

Tomando los parámetros de configuración y el tiempo de transmisión medido de la tabla 26, se calcula el throughput para cada DR, como se observa en la tabla 28.

Tabla 28

Calculo del Throughput para las diferentes configuraciones.

	Ttx(s)	Throughput (bps)
DR0	0,827	493,35
DR1	0,414	985,51
DR2	0,248	1645,16
DR3	0,124	3290,32
DR4	0,062	6580,65
DR5	0,031	13161,29
DR6	0,016	25500,00

De la tabla anterior se puede comprobar que LoRa es un protocolo para redes con un reducido throughput cuyo valor varía de acuerdo a los DR, es decir, la configuración DR0 con parámetro SF=12 y BW=125kHz tiene menor tasa de transmisión a diferencia de DR5 que posee un SF=7 y BW=125kHz. Los valores de SF influye directamente en la tasa de transmisión y el alcance, mientras menor sea el throughput mayor es el alcance de cobertura.

Por otro lado, la configuración DR6 tiene como parámetros SF=8 y BW=500kHz, lo que le permitirá tener una mayor tasa de transmisión a diferencia de las configuraciones que usan BW=125kHz.

3.6. Conclusiones

Posteriormente en este proyecto de investigación se implementará una red de monitoreo LPWAN con aplicación en IoT que se encargará de medir cinco variables: temperatura, humedad, ph, luminosidad y calidad de aire en diferentes puntos de la universidad.

A través de las pruebas realizadas se buscó la configuración que asegure el mejor desempeño de los módulos LoRa escogidos en la sección 3.3, ya que, dependiendo de la configuración que posee el dispositivo, se obtiene un mejor rendimiento en función de la distancia de cobertura, consumo energético y throughput.

Para el diseño de la red que va ser posteriormente implementada, con el fin de garantizar el radio de cobertura de los módulos LoRa y de acuerdo a los resultados obtenidos que se muestran en la sección 3.5.3, se hará uso de la configuración DR0. Posterior al análisis realizado, se grafican los niveles de potencia de la señal recibida que se presenta a lo largo del campus con la configuración DR0, como se muestra en la figura 42, en donde se puede observar el comportamiento de los dispositivos elegidos en un ambiente específico como lo es la ESPE.



Figura 42. Cobertura de los dispositivos TTGO LoRa32.

Tabla 29

Niveles de cobertura de los dispositivos TTGO LoRa32.

Nivel Alto	-114dBm a -118dBm
Nivel Medio	-119dBm a -123dBm
Nivel Bajo	-124dBm a -127 dBm

El color verde representa la mejor transmisión posible ya que los valores de RSSI son los más cercanos al umbral de -111dBm, por lo tanto, la señal de potencia recibida es la mejor y no posee pérdida de paquetes (figura 31). Posteriormente, el color amarillo presenta valores desde -119dBm a -123dBm indicativos de la disminución de la potencia recibida con un 98% de paquetes recibidos. Por último, tenemos los valores más críticos registrados para RSSI en este escenario que son los de color rojo, ya que en esta sección existió pérdida de paquetes de hasta un 4% (figura 31).

El resultado de las pruebas realizadas en torno al consumo energético se puede observar en la sección 3.5.4, en donde se concluye que el mejor comportamiento en función del tiempo de vida de la batería lo tiene la configuración DR6, pero debido a su limitado radio de cobertura se descarta para este proyecto. Al ser DR0 una configuración orientada a largas distancias y menor throughput, el tiempo de vida de las baterías que alimentan los modulo disminuyen ya que el consumo energético es mayor. Para este proyecto solo se envían datos de sensores más no audio y video, por tal motivo es suficiente con una pequeña tasa de transmisión de datos.

CAPITULO IV

4. DISEÑO E IMPLEMENTACION DE SISTEMA DE MONITOREO

Para evaluar el desempeño de la tecnología LoRa en condiciones de producción y ejecución, se plantea el diseño e implementación de una red de monitoreo, de acuerdo a los requerimientos de obtención de información que soluciona una problemática presente en el entorno de implementación, que en el caso propuesto será dentro de la Universidad.

Para un campus universitario se consideran varias variables que permitan obtener información en ámbitos sobre investigaciones para el desarrollo de energías renovables, cuidado personal y optimización de recursos (Galeano, Bellon, Zabala, Romero, & Duro, 2018), de donde se puede monitorear las siguientes variables:

- Temperatura Ambiental
- Humedad Ambiental
- Dióxido de Carbono (CO₂)
- Radiación Ultravioleta (UV)
- Ph del Agua

4.1. Requerimientos del Diseño

Para un diseño adecuado los requerimientos de hardware y software mínimos necesarios para el funcionamiento de este proyecto de investigación deben ser definidos.

En la figura 43 se muestra la arquitectura general del sistema de monitoreo.

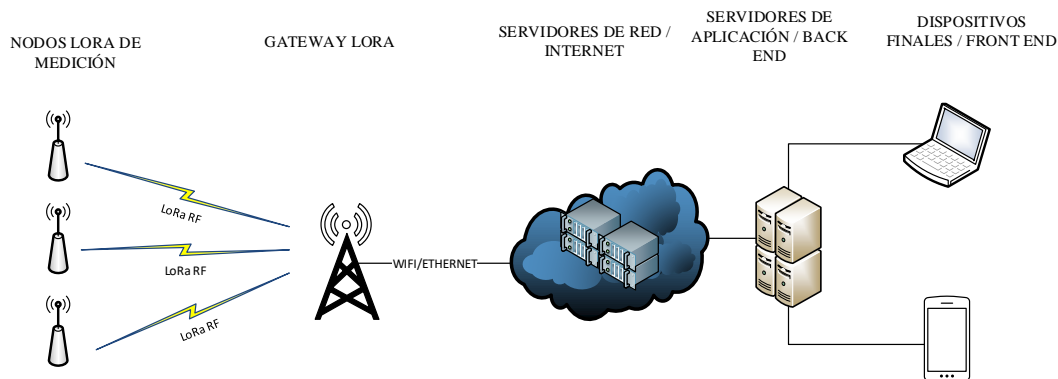


Figura 43. Esquema general del sistema de monitoreo.

4.1.1. Descripción de Hardware

En lo referente al hardware, se realiza la implementación de una red de nodos inalámbricos ubicados en diferentes partes de la universidad, los mismos que poseen sensores de temperatura, pH, calidad de aire y luminosidad. Posteriormente los datos son recolectados por un nodo central o Gateway y se envían para ser almacenados en una base de datos, a partir de este visualizar la información en la página web.

Para el diseño e implementación de una red de nodos inalámbricos se debe tener un conjunto de elementos que permitan el funcionamiento de la arquitectura propuesta. En esta sección se describe el hardware y características mínimas necesarias para la implementación del sistema de monitoreo. En la figura 44 se muestra el diagrama de bloques de un nodo.

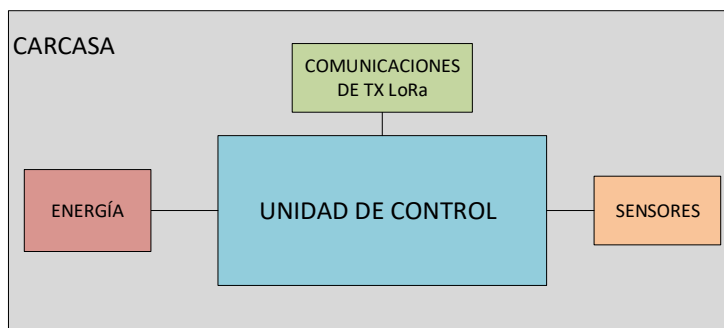


Figura 44. Diagrama de bloques de un nodo.

4.1.1.1. Dispositivos de arquitectura de la Red

En la Figura 45 se especifican los requisitos más importantes de cada uno de los dispositivos que conforman la red.

<p style="text-align: center;">Sensor de temperatura</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensibilidad ± 2 °C • Salida Digital • Alimentación $\leq 5.5V$ 	<p style="text-align: center;">Sensor de pH</p> <ul style="list-style-type: none"> • Salida Analógica • Sensibilidad ± 0.2 pH • Alimentación $\leq 5V$ 	<p style="text-align: center;">Sensor de CO2</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rango de Medición: 350 - 10000 ppm (CO2) • Salida Analógica • Sensibilidad: Con Temp: 20 y Humedad: 65% ± 30ppm • Alimentación $\leq 5V$
<p style="text-align: center;">Sensor de Luminosidad</p> <ul style="list-style-type: none"> • Salida Digital • Rango de medida ≥ 0 [$\frac{mV}{cm^2}$] • longitud de Onda 280-390nm 	<p style="text-align: center;">Modulos TTGO LoRa</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones 5.5 x 2.8 x 0.25 cm • Compatible con Arduino • Alimentación 3.3V a 7V • Frecuencia 915Mhz LORA • WIFI IEE 802.11 b/g/n / 2.4Ghz 	<p style="text-align: center;">Alimentación</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bateria Ion de Litio recargable • Voltaje 3,3V - 5V • Capacidad 2000mAh

Figura 45. Requisitos de diseño.

4.1.2. Requerimientos de Software

La finalidad del proyecto es facilitar una página web que permita el monitoreo de las variables obtenidas a través de sensores colocados estratégicamente en la universidad, con el fin de obtener información del estado ambiental del campus. Para la recolección de los datos medidos por los sensores se usan los módulos TTGO LoRa de acuerdo al análisis realizado en la sección 3.3, posteriormente los datos obtenidos por cada nodo se envían a un Gateway, que envía los datos hacia la base de datos, y cuya información se muestra en la página web a través de gráficas u otros recursos.

Para una mejor depuración del proyecto es necesario realizar un análisis de los requerimientos del software con fin de garantizar su funcionalidad, para ello se usa el estándar IEEE-830, 1998 donde divide los requerimientos en funcionales y no funcionales. (Gomez, 2011)

Los requerimientos funcionales (RF) son aquellos que permiten describir las interacciones entre el sistema y el ambiente, es decir, lo que el sistema debe hacer y cómo debe reaccionar ante situaciones particulares. Por lo contrario los requerimientos no funcionales (RNF) permiten poner límites y restricciones de los servicios o funciones que ofrece el sistema, estos pueden ser requerimientos de interfaz, performance, diseño, fiabilidad, mantenibilidad, portabilidad, entre otros (Rojo, 2012).

En las tablas 30, 31, 32, 33 y 34 presentan los requerimientos necesarios de software, cada una está formado por tres parámetros que son: identificador, nombre del requerimiento y una descripción.

4.1.2.1. Software Módulos TTGO LoRa

Tabla 30

Requisitos Funcionales del software de los módulos LoRa.

Identificador	Nombre	Descripción
RF	Transmisión de datos entre los módulos	Envío de datos desde el nodo hasta el Gateway
RF	Lectura de datos de sensores	Recoger datos de los sensores implementados en cada nodo.
RF	Envío hacia la base de datos.	Conexión y almacenamiento de los datos en la base de datos.
RF	Especificación de la banda de frecuencia.	Los módulos trabajan a una frecuencia de 915 MHz en el continente americano.

Tabla 31

Requisitos No Funcionales del software de los módulos LoRa.

Identificador	Nombre	Descripción
RNF	El lenguaje de programación debe ser para Arduino	Los dispositivos LoRa pueden usar otros tipos de software para su programación como lo es Python.
RNF	Deep Sleep	Modo de sueño profundo de los dispositivos para minimizar el consumo energético
RNF	Envío de los datos usando el método GET.	Se utiliza el método GET para enviar datos hacia la base de datos.
RNF	Alta velocidad de procesamiento de datos	El tiempo de respuesta del servidor a peticiones de escritura o lectura de datos.

4.1.2.2. Software Base de Datos

Tabla 32

Requisitos Funcionales y No Funcionales del software del Back-end

Identificador	Título	Descripción
RF	Almacenamiento de datos	Almacena los datos recolectados de cada uno de los nodos.
RF	Procesamiento y detección	Identificación de paquetes en la red para evitar colisiones.
RNF	Método GET	En la programación del php se usa el método GET para enviar los datos

4.1.2.3. Software Pagina Web

Tabla 33

Requisitos Funcionales del software del Front-end

Identificador	Título	Descripción
RF	Ingresar a la página WEB	El proyecto cuenta con un propio dominio dedicado a la visualización de la información.
RF	Usuario y Contraseña	Para mayor seguridad se genera un usuario y una contraseña con el fin de validar el acceso
RF	Distribución de los nodos en un mapa.	En el mapa de la universidad se visualizara la distribución de los nodos y sus sensores.
RF	Histórico de datos	Se visualizara una base de datos de la medición de los dispositivos
RF	Visualización de gráficas	Se mostraran las gráficas de los datos recopilados por los sensores.
RF	Descarga de datos	Permite descargar el datos almacenados a lo largo de un periodo de tiempo

Tabla 34*Requisitos No Funcionales del software del Front-end*

Identificador	Título	Descripción
RNF	Diseño de la interfaz gráfica	Uso adecuado de colores y visualización del funcionamiento de la página WEB
RNF	Contenido mostrado en la página WEB	Contenido explícito y entendible de la información que se muestra en la página WEB
RNF	Manejo de la página WEB	Es intuitiva para cualquier tipo de usuario.
RNF	Disponibilidad e Interfaz adaptativa	Se puede acceder a la página WEB desde cualquier dispositivo de búsqueda.

4.2. Selección de dispositivos de medición y unidad de control de Tx/Rx

4.2.1. Parámetros de selección de dispositivos.

Según las variables definidas en la sección 4 existen gran cantidad de sensores que permiten obtener los datos, como parámetros de selección se tienen los siguientes:

- Disponibilidad en el mercado.
- Precio
- Consumo energético
- De acuerdo a la aplicación cumplir con los requerimientos funcionales para la obtención de datos.

4.2.2. Temperatura y Humedad

El conocimiento de la Temperatura y Humedad en el campus son de gran importancia para estudios meteorológicos, ambientales, agrícolas y cuidado personal (Galeano, Bellon, Zabala, Romero, & Duro, 2018).

Existen varias opciones de sensores para obtener datos de temperatura y humedad, dadas las condiciones del entorno, consumo energético y escalabilidad se eligen sensores digitales sobre analógicos debido a su bajo consumo energético y facilidad de operación.

Los sensores DHT11 y DHT22 son las mejores opciones ya que permiten obtener datos de temperatura y humedad, además de poseer salidas digitales que facilitan la obtención y procesamiento de datos; la diferencia de costos en el mercado entre DHT11 y DHT22 indica una relación de 1 a 3 respectivamente. En la tabla 35 se presenta la especificación técnica de los sensores.

Tabla 35

Especificación técnica sensor DHT11 y DHT22

	Sensor DHT11		Sensor DHT22	
Voltaje de operación	3 V – 5.5 V		3.3 V – 5.5 V	
Corriente de operación	0.5mA a 2.5mA		1mA a 1.5 mA	
Rango de medición (Temp/ Hum)	0° a 50° C	0% a 90%	-40° a 80° C	0% - 100%
Margen de error	± 2°C	±5%	± 0.5°C	±2%
Resolución	1°C	1%	0.1°C	0.1%
Tiempo de respuesta	6-30 seg	6-15 seg	< 5 segundos	< 10 segundos

Fuente: Extracto de datasheet del sensor DHT11 y DHT22

Considerando que la medición se realiza en un ambiente abierto, una resolución de 1°C en el dispositivo de medición es suficiente para la toma de datos (Meteorología y Climatología, 2004), por lo tanto, se utiliza el DHT11 ya que cumple con los requerimientos mínimos, costo y consumo energético bajos.

4.2.2.1. Sensor de temperatura y humedad DHT11.

El sensor DHT11 está formado por componente de tipo resistivo para medir la humedad y coeficientes de temperatura negativos (NTC) conectados a un microcontrolador de 8 bits obteniendo una salida de señal digital calibrada. Este sensor garantiza una alta fiabilidad y una excelente estabilidad a largo plazo debido a la forma de obtener las señales digitales y la técnica de medición de temperatura y humedad.

Este dispositivo tiene pequeñas dimensiones y bajo consumo energético, existen dos tipos de presentaciones en el mercado: sensor DHT11 y otra con una placa PCB.

Para la caracterización se usa la presentación que tiene incorporado la placa PCB debido a que aporta una resistencia pull-up de $5k\Omega$ y un led de funcionamiento. La distribución de pines y sus funcionalidades se muestra en la figura 46 (DTH11 Product Manual, 2006).



Figura 46. Módulo DHT11

Fuente: Extracto de datasheet del sensor DHT11

4.2.2.2. Respuesta del Sensor DHT11

Para verificar la respuesta del sensor se realizan mediciones continuas, se comparan datos con los medidos por el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) y con un termómetro ambiental con resolución de $0,5^{\circ}\text{C}$.

Los datos de la estación meteorológica del INAMHI consultada se muestran en la tabla 36.

Tabla 36

Factores medioambientales de estación meteorológica INAMHI San Rafael.

Hora			
<i>Día 11/12/2019</i>	<i>12H</i>	<i>13H</i>	<i>14H</i>
<i>Temperatura (°C)</i>	23.3	22.5	19.7
<i>Humedad (%)</i>	42.9	47.1	56.2

Fuente: (INAMHI, 2019)

Se plantea la medición por cerca de dos horas entre las 12H y 14H, debido a que el ambiente en la ciudad en este horario alcanza los niveles máximos de temperatura y humedad.

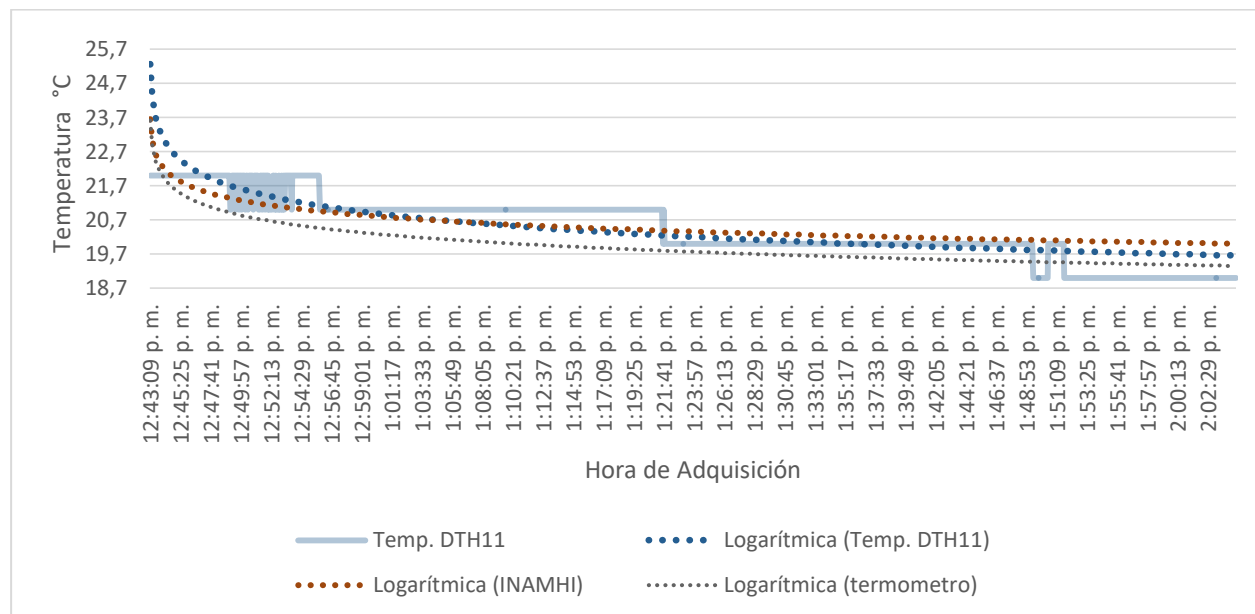


Figura 47. Respuesta de temperatura del sensor DHT11 al ambiente externo

En la figura 47 se observa las líneas de tendencia del sensor DHT11, estación meteorológica del INAMHI y termómetro ambiental; dada la resolución del sensor usado (1°C) existe un error de medición respecto a los medios de comparación de 0.5% que se consigue al realizar en el sensor una compensación por software de -2°C en la toma de temperatura.

Para validar la respuesta del sensor en la toma de humedad se compara la medición obtenida en el mismo periodo de la prueba anterior con los datos de la tabla 36.

En la figura 48 se aprecia la respuesta de medición de humedad, la línea de tendencia da un estimado del comportamiento del sensor junto con los datos de la estación meteorológica del INAMHI, dada la resolución del sensor para humedad de 1% existe un error en la medición de 0.7% respecto a la referencia, este error fue alcanzado realizando una compensación por software de +3% de humedad en el sensor.

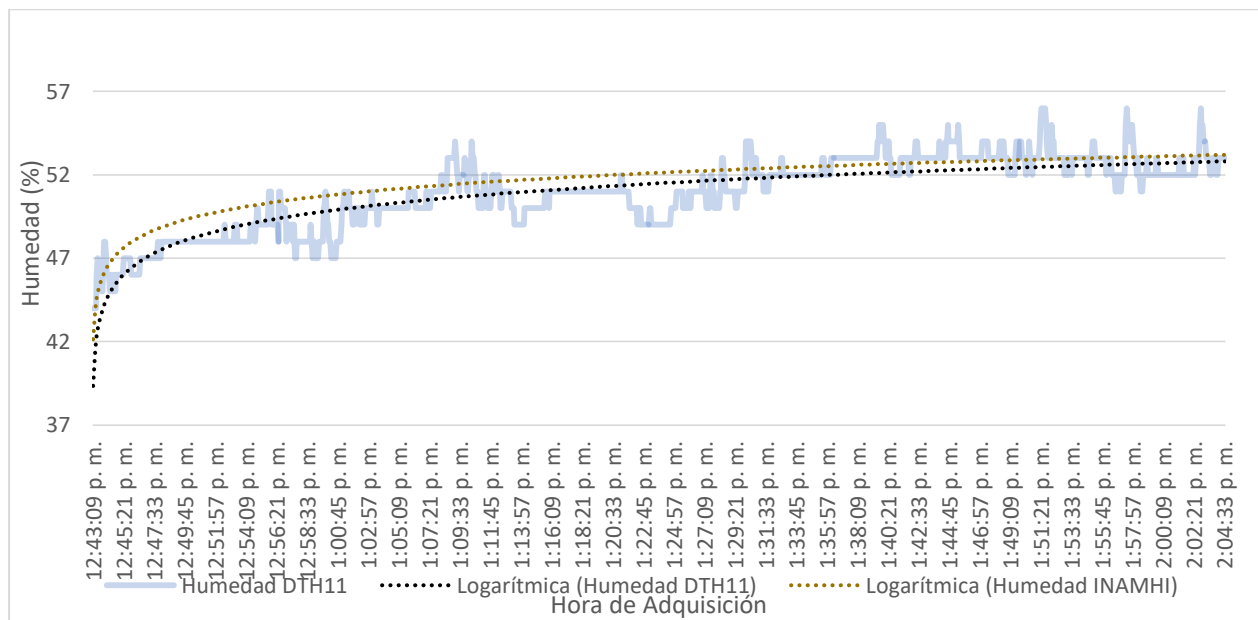


Figura 48. Respuesta de humedad del sensor DHT11 al ambiente externo.

De las gráficas 47 y 48, se valida la relación inversa entre temperatura y humedad, es decir a menor temperatura la humedad es mayor y viceversa. Martínez (2007), indica que este comportamiento es debido a la condensación del vapor de agua, a medida que la temperatura disminuye las moléculas de vapor pasan a condensarse formando gotas por ende aumentando la humedad del ambiente.

4.2.3. pH

El pH es la medida de acidez de una solución, dado por su concentración de iones hidronio $[H_3O^+]$; es comúnmente usado para determinar la calidad de agua, debido a los valores definidos en un rango de pH de 0 a 14, que se muestran en la tabla 37 (Montes, 2016).

Tabla 37

Ejemplos y rangos de ph.

Tipo de Agua	Media	Mínimo	Máximo
Cisterna	7.56	6.4	8.3
Deposito	7.74	2.0	10.5
Red distribución	7.84	4.0	10.9
Grifo	7.64	4.0	10.4

Fuente: (Ambientalys, 2016)

En el mercado ecuatoriano son pocas las opciones de sensores para medir pH dado que en su mayoría son aparatos comerciales que sirven para el uso en laboratorios con precios muy elevados, la opción más factible es la sonda E201-BNC integrado con la placa PH-4502C.

En las tablas 38 y 39 se muestran las características técnicas de la sonda E201 y la placa pH-4502C respectivamente.

Tabla 38

Especificación técnica de la Sonda E201

Rango de medición pH	0 pH -14 pH
Precisión	± 0.2 pH
Temperatura (°C)	5°C~60°C
Punto Cero (pH)	7 ± 0.5
Tiempo de respuesta (min)	< 2
Ruido (mV)	<0.5

CONTINÚA 

Porcentaje teórico de pendiente	98.5%
Resistencia Interna(Ω)	250 M Ω
Bloques de terminales	Conector BNC
Longitud del cable(cm)	70 cm
Color	Negro/Azul

Fuente: (Kedida, 2018)



Figura 49. Sonda pH E201

Tabla 39

Especificación técnica de la placa pH-4502C.

Fuente de alimentación	5V
Corriente de trabajo	5mA – 10mA
Consumo	$\leq 0.5W$
Temperatura de trabajo	10°C - 50°C
Tiempo de respuesta	≤ 5 s
Tiempo de estabilización	$\leq 60s$
Salida	Analógica

Fuente: (Kedida, 2018)

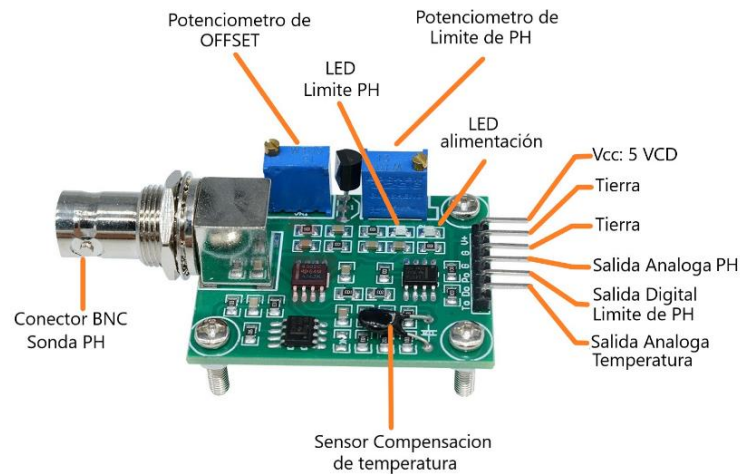


Figura 50. Placa pH-4502C

Para cuantificar el pH la sonda E201 mide la diferencia de potencial entre dos electrodos: un electrodo de referencia y uno de vidrio. La sonda se conecta directamente por medio de un conector BNC a la placa que es la encargada de procesar, instrumentar los datos y presentar los valores en niveles de pH

4.2.3.1. Calibración de la placa pH-4502C

En la figura 50, se observa que la placa PH-4502C contiene dos potenciómetros: offset y límite de pH. (Cervantes, 2017)

- **Potenciómetro Offset:** para poder utilizar este circuito es necesario añadir un valor de offset al valor medido por la sonda, por tal motivo, se fuerza un pH de 7.0 desconectando la sonda y cortocircuitando la parte interna del conector BNC con la parte exterior. Finalmente, con un multímetro se procede a medir el voltaje en pin Po y ajustando el potenciómetro para obtener un valor de 2.5 V.

Respuesta del Módulo pH:

Luego de realizada la calibración se procede a medir los valores nominales para verificar la respuesta del módulo; se consideran 3 líquidos: la solución que viene integrada en el sensor con pH 4, leche con pH 6 y bicarbonato de sodio con pH 9, todos los valores se comprobaron mediante el uso de bandas medidoras de pH. En la figura 51 se muestra la respuesta del sensor y los resultados de las mediciones con bandas de pH.

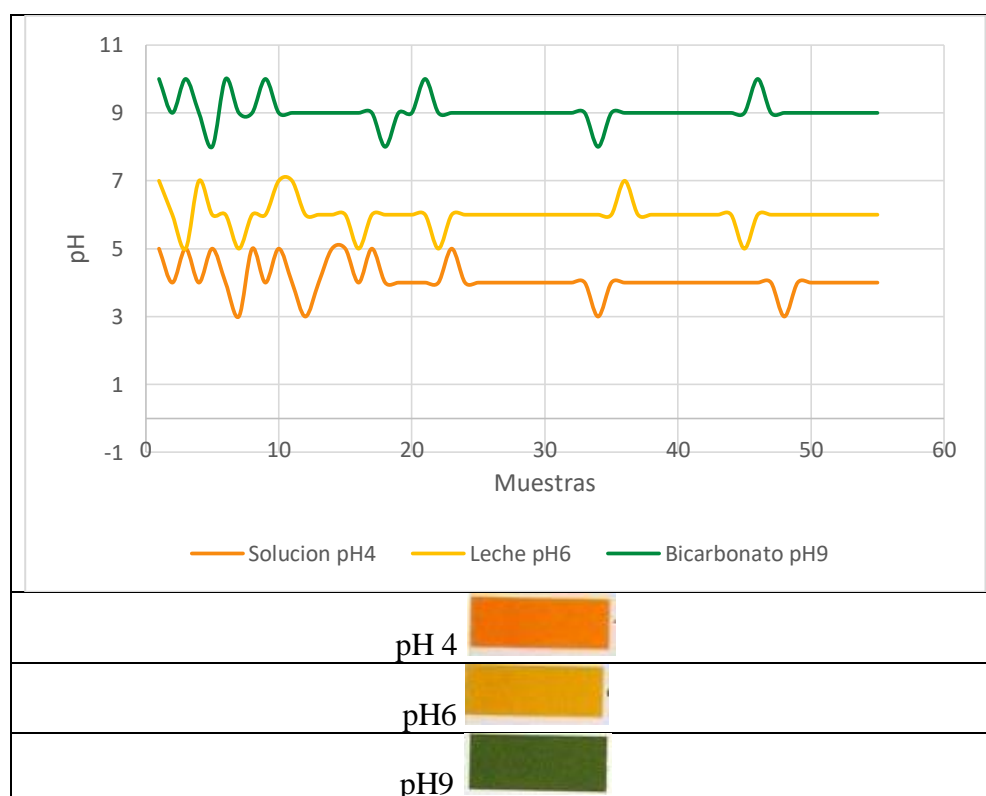


Figura 51. Respuesta de sensor de pH y colores de banda de pH

En la figura 51 se muestra la respuesta del sensor a las muestras de líquidos, en la parte inferior las gráficas de las bandas medidas experimentalmente indican el pH medido. Se puede observar que el sensor captura con gran precisión los cambios en el pH.

4.2.4. Dióxido de Carbono (CO₂)

Según estimaciones de Organización Mundial de la Salud (OMS), en el 2012 se produjeron cerca de 6,5 millones de muertes asociadas a la contaminación del aire. Además se asocia a la contaminación atmosférica como la causa principal de (OMS, 2014):

- 25% de muertes por cardiopatías
- 34% de muertes por accidentes cerebrovasculares
- 36% de muertes por cáncer de pulmón

Esto ha llevado a impulsar campañas como Respira Vida de la OMS, además de generar conciencia ambiental por parte de los gobiernos de naciones, municipios y cantones para la toma de medidas ambientales e informar a la comunidad de cuan saludable es el aire que respiran (Morawska & Jamriskja, 1999).

Generalmente en la atmósfera predominan dos tipos de contaminantes, Material Particulado (PM) y Gases nocivos (Oyarzun, 2010).

Dentro de los PM se han estandarizado de acuerdo a su diámetro aerodinámico en dos tipos: PM_{2,5} tienen un diámetro $\leq 2.5 \mu\text{m}$ se miden en $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$ en su mayoría son partículas finas generadas por condensación de gases, coagulación de partículas pequeñas y evaporación de neblina se consideran 100% respirables, por otro lado las PM₁₀ con diámetro $\leq 10 \mu\text{m}$ son partículas gruesas generadas por abrasión, molienda, rompimiento de sólidos pueden penetrar a diferentes profundidades el sistema respiratorio (Prendez, Cohen, & Henring, 1995).

Para objetivos de este proyecto de investigación se considera medir el CO₂, debido a que es producto del metabolismo siendo emitido por personas, animales y plantas que habitan espacios

cerrados y abiertos, de igual forma se produce por calefactores de gas o diésel y el humo del tabaco.

Según Oyarzún (2010), la concentración de CO_2 en ppm en un ambiente cerrado ventilado es de máximo 1000 ppm y para ambientes exteriores la concentración de ppm estándar es de 300 ppm.

Para la medición de CO_2 en el mercado están disponibles dos opciones de sensores: MG-811 y MQ-135; la especificación técnica del sensor MG-811 y del sensor MQ-135 se muestran en la tabla 40.

Tabla 40

Especificación técnica sensor MG-811 y MQ-135

	MG-811	MQ-135
Voltaje de operación	5 V – 6.0 V	5 V
Corriente de operación	200 mA	160 mA
Temperatura de operación	-20° a 70° C	-20° a 70° C
Disipación de potencia	1200 mW	800 mW
Salida	350 – 10000 ppm CO_2	10 – 10000 ppm CO_2
Fiabilidad	Alta	Alta

Fuente: (Olimex, 2016)

La diferencia de costos en el mercado entre el sensor MQ-135 y MG-811 es de 1 a 6 respectivamente. Considerando la disponibilidad, bajo costo y el mínimo consumo energético del sensor MQ-135, lo cual se traduce en mayor tiempo de vida de la batería, se escoge como la mejor opción para la medición de esta variable.

4.2.4.1. Sensor de Co2 MQ135

El sensor MQ-135, se obtiene en el mercado acoplado a un módulo que permite conectarlo directamente a un microcontrolador o dispositivo de adquisición de datos, la distribución de pines del módulo y sus funcionalidades se muestra en la figura 52.

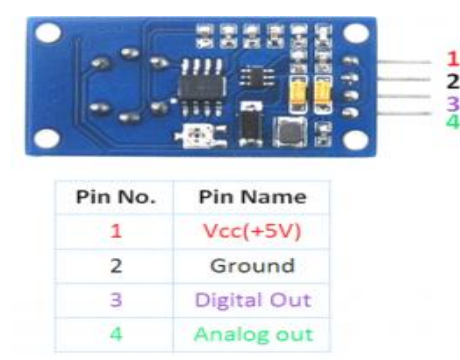


Figura 52. Módulo MQ-135

4.2.4.2. Respuesta del Sensor MQ-135

La verificación de la respuesta de los sensores se realiza exponiendo los sensores a la toma de datos en un ambiente interno como oficina cerrada donde la concentración es mayor a 300ppm y un ambiente externo donde la concentración de ppm es baja, en la figura 53 se muestra la respuesta de los sensores durante el mismo periodo de tiempo ante los dos ambientes.

Se comprueba que la concentración de Co2 en un ambiente externo está por debajo de los 100 ppm, sin embargo, la concentración de ppm en el ambiente interno con poca ventilación alcanza hasta los 450 ppm debido al aumento en la afluencia de personas.

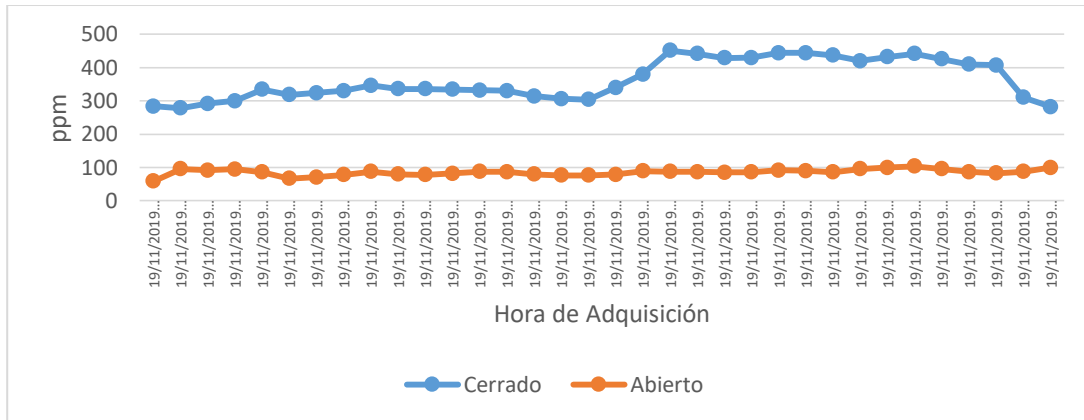


Figura 53. Respuesta del sensor MQ135

4.2.5. Sensor Radiación Ultravioleta.

La radiación Ultravioleta (UV) es parte del espectro radioeléctrico que corresponde a longitudes de onda de 100nm a 400nm, que resulta beneficioso para la vida y en exposiciones por corto tiempo aporta a la salud con la producción de vitamina D de igual manera la excesiva exposición a estas ondas se relaciona diversos tipos de cáncer cutáneo, quemaduras solares, daño de la piel y afecciones oculares (Organizacion Mundial de Salud, 2015).

Las regiones cercanas al ecuador reciben mayor cantidad de rayos UV, además las ciudades y regiones que se ubican a mayor altitud presentan una atmósfera más delgada y por ende absorbe una menor proporción de radiación. No es un misterio la importancia de la capa de ozono para la protección de radiación UV en la superficie terrestre, debido a las propiedades de absorción de rayos UV que posee, sin embargo, el problema actual es su constante deterioro presente durante las últimas décadas.

El índice UV (IUV) es una medida de intensidad de radiación UV, se mide en $\left[\frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}\right]$ estandarizado por la OMS, Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) en el apartado de comunicación “Guía práctica

de Índice Solar Mundial”, estableciendo que un medidor de intensidad de UV debe proporcionar la información del IUV máximo durante el día y si se manejan mediciones continuas el valor promedio de periodos de 2 a 10 minutos.

El IUV debe presentarse como un valor único redondeado al más próximo entero de forma que la comunidad pueda interpretar la información de acuerdo a la clasificación de la tabla 41, donde se establece la categoría de exposición a la radiación sin fijar tiempos recomendados para exponerse dado que es considerado información errónea debido a que la norma es mantener la protección en todo momento. (Organización Mundial de la salud, 2003)

Tabla 41

Categoría de exposición a la radiación UV

CATEGORÍA DE EXPOSICIÓN	INTERVALOS DE VALORES DE IUV
BAJA	< 2
MODERADA	3 a 5
ALTA	6 a 7
MUY ALTA	8 a 10
EXTREMADAMENTE ALTA	Más de 11

Fuente: (Organización Mundial de la salud, 2003)

En el mercado existen varias opciones de sensores que permiten la medición de la intensidad UV de los cuales destacan el sensor SI1145 y ML8511, las especificaciones técnicas de los sensores se presentan en la tabla 42.

Tabla 42

Especificación técnica sensor SI1145 y ML8511

	SI1145	ML8511
Voltaje de operación	1.71 V a 3.6 V	3.3 V a 4.6 V
Corriente de operación	5.5 mA	5 mA
Temperatura de operación	-40° a 85° C	-30° a 85° C

CONTINÚA 

Espectro de detección	400nm 800nm	280nm a 390nm
Salida	I2C (7 bits)	Analógica

Fuente: (Silicon, 2014) (LAPIS, 2013)

Dadas las condiciones de medición el sensor SI1145 no se adapta a los requerimientos dado que está enfocado en gran parte a rayos Infrarrojos, se elige el sensor ML8511 que mide en el espectro UV siendo el más adecuado para la aplicación.

4.2.5.1. Sensor de radiación UV ML8511

Este sensor es de fácil uso debido a que emite una señal analógica de 0 a 3 V relacionado directamente con la intensidad UV en $[\frac{mW}{cm^2}]$. El sensor viene integrado en una placa cuya distribución de pines y sus funcionalidades se muestra en la figura 54.

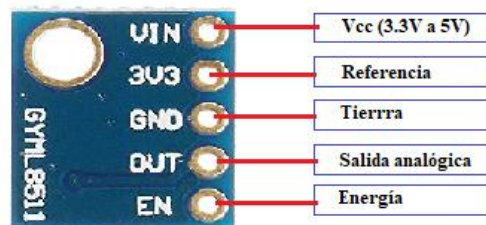


Figura 54. Sensor ML8511

Fuente: (LAPIS, 2013)

4.2.5.2. Respuesta del Sensor:

Se considera medir la respuesta del sensor en factores reales del ambiente, realizando dos mediciones tanto para un ambiente exterior como interior, en la tabla 43 se aprecia el índice UV máximo y las condiciones climáticas presentadas en el día de la medición:

Tabla 43

Índice UV de estación meteorológica INAMHI – Guamaní.

Día 18/08/2019	Hora	
	12 H	13H
Índice UV promedio de 1 Hora.	5	4

Fuente: (INAMHI, 2019)

En la figura 55 se muestra los índices UV alcanzados durante un periodo de medición de 2 horas en un ambiente exterior expuesto directamente a los rayos del sol, la medida se realizó a partir de las 12 horas de la tarde dado que es el punto donde el sol alcanza la mayor altura y de acuerdo a la teoría se obtiene la mayor intensidad de radiación UV, se puede verificar que el valor de índice UV máximo es de 5 en comparación con los datos del INAMHI en las dos horas de medición.

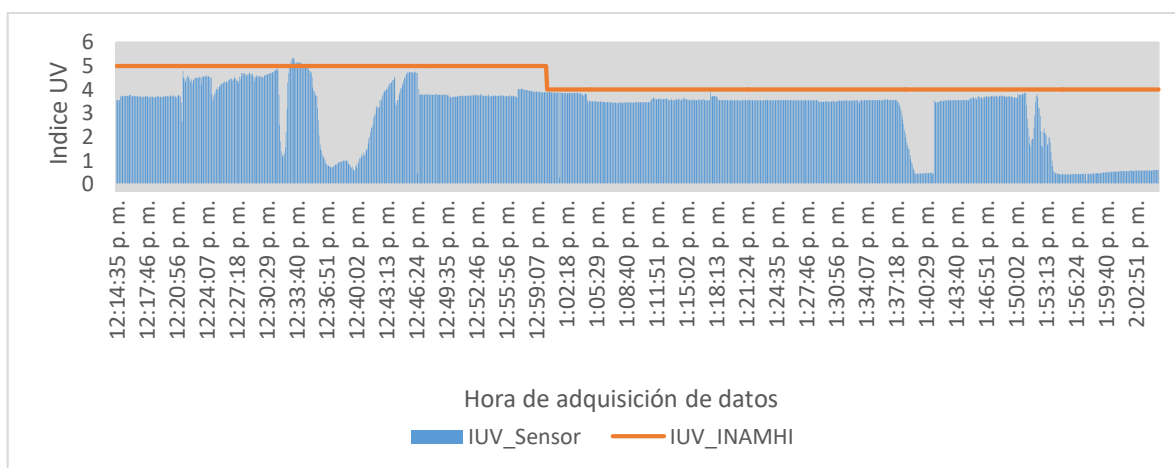


Figura 55. Respuesta del sensor UV al ambiente externo.

Para apreciar de mejor manera la precisión del sensor en decimales en el segundo escenario se presenta la respuesta del sensor a un ambiente interno donde la radiación UV es prácticamente nula, por este motivo se muestra en la figura 56 el valor de la intensidad UV [mW/cm^2], el IUV máximo en esta medición es de 1.

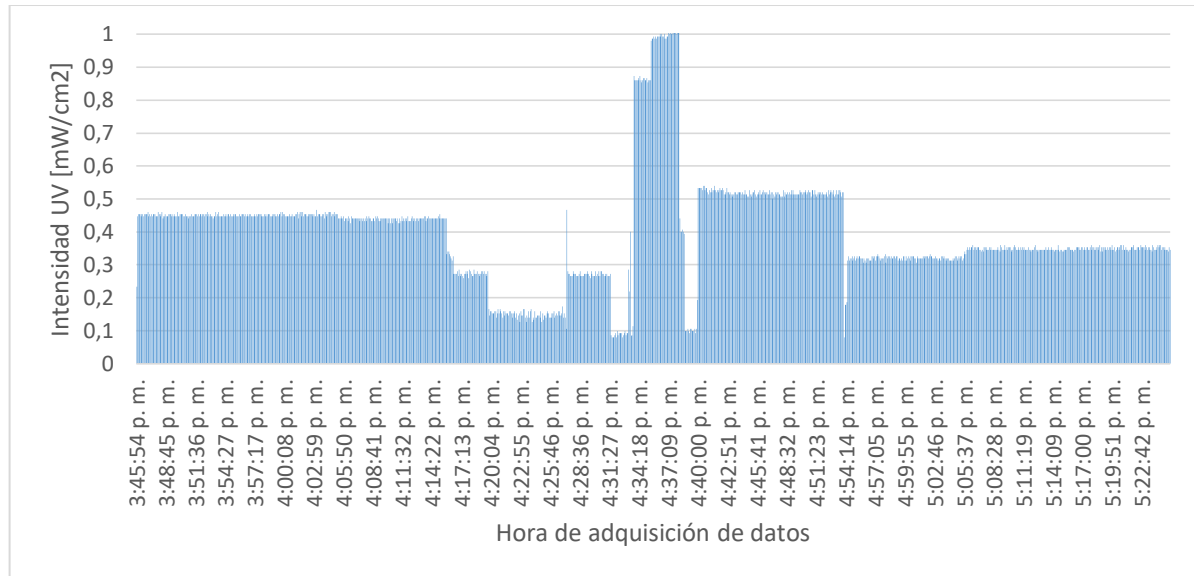


Figura 56. Respuesta del sensor UV al ambiente interno.

4.2.6. Unidad de control de Tx y Rx

Como se especifica en la sección 3.2 y 3.3 la unidad de control elegida es el módulo TTGO LoRa32, la placa tiene incorporado el chip LoRa SX1276 y la unidad de control ESP32. Por tal motivo posee una interfaz de transmisión LoRa RF de largo alcance que proporciona comunicaciones de espectro extendido de rango ultra largo e inmunidad de alta interferencia mientras minimiza el consumo de corriente.

La transmisión y recepción del dispositivo se ve altamente influenciada por los valores de SF y BW, en la sección 3.4 y 3.5 se detalla las pruebas y resultados obtenidos referente al alcance máximo, throughput y consumo energético que permitieron llegar a la conclusión que un SF de valor 12 tiene un radio de cobertura mayor, por lo tanto, el tiempo en aire va a aumentar pero la tasa de transmisión y la sensibilidad van a disminuir, siendo la señal más sólida frente a interferencias; por lo contrario un SF de valor 6, aumentan la tasa de transmisión con un menor tiempo en aire, provocando un menor consumo de energía y radio de cobertura.

4.2.7. Energía y Alimentación.

Con el fin de diseñar dispositivos portátiles que se adapten al medio de estudio, se utilizan baterías de corriente continua (DC) recargables para alimentar los nodos. De acuerdo al análisis realizado en la sección 3.5.4 y al consumo de corriente de los sensores revisados en la sección 4.3, se estima que el consumo de los módulos incorporando los sensores es de aproximadamente 490mA por día enviando paquetes cada 30min. Por lo tanto, para garantizar un tiempo de vida de aproximadamente 1 mes se considera una batería de capacidad 15000mAh.



Figura 57. Batería Ion litio 5V

4.3. Diseño de Hardware

Como se indica en la sección 4.1 el sistema consta de nodos de recolección de datos y un nodo central de recepción de información, en la figura 58 se muestra el esquema general de los nodos con la distribución de sensores a usar, la unidad de control LoRa, la unidad de almacenamiento y la carcasa que contendrá el dispositivo portátil.

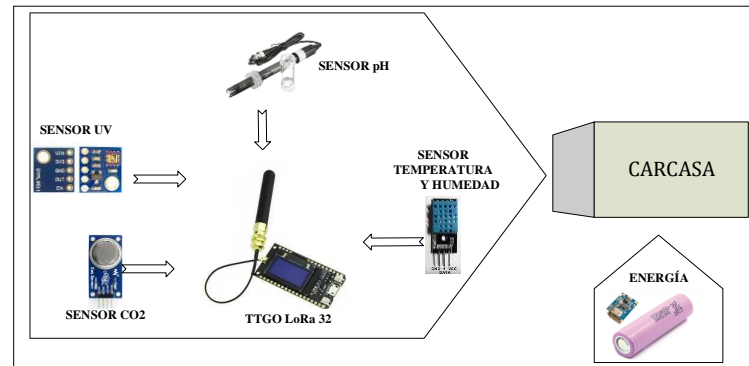


Figura 58. Componentes de hardware de un nodo.

Es importante tomar en cuenta que el nodo central está colocado de manera fija e instalada con alimentación directa a la red eléctrica junto con un Access Point que brinda el acceso a la red de Internet por conexión inalámbrica WiFi.

4.3.1. Carcasa

El diseño de la carcasa se basa considerando las recomendaciones de la OMM en su guía de instrumentos meteorológicos y métodos de observación (Organization, 2008). Donde indica las características que deben tener las carcasas que contienen los dispositivos para una mejor obtención de datos, entre las principales recomendaciones se tiene:

1. Material resistente madera, plástico principalmente robusto.
2. Pintada o de color blanco para reflejar la radiación e impedir la absorción de humedad.
3. Cubierta con inclinación y lugar de ventilación.
4. Se considera que para la toma de información los dispositivos deben estar a una altura de 1,5 a 2 metros.

Tomando en cuenta las características recomendadas por la OMM haciendo énfasis en la resistencia, portabilidad y bajo costo de implementación se utiliza el diseño de la figura 59 fabricado en material PVC resistente a condiciones extremas con la distribución de sensores externa a la caja de forma que estén expuesto directamente al ambiente de medición. (Organización Meteorologica Mundia, 2017)

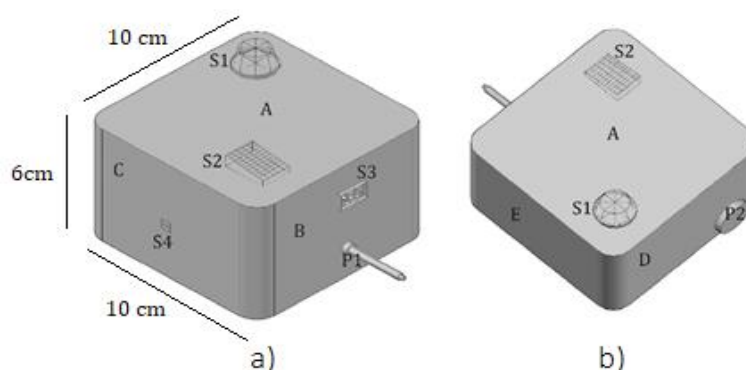


Figura 59. Diseño de carcasa con distribución de sensores.

a) Vista superior frontal, b) Vista inferior frontal.

El material de la caja es plástico PVC blanco, resistente para condiciones extremas, la distribución de los sensores y su ubicación es externa a la caja de forma que sean expuestos al ambiente de medición con pequeños protectores de plástico. En las tablas 44, se describen los componentes.

Tabla 44

Descripción de Componente

Identificador	Descripción
S1	Sensor de Co2 (MQ 135)
S2	Sensor de temperatura y humedad (DHT11)
S3	Sensor de radiación uv (ML8511)

CONTINÚA →

S4	Apertura para cableado de sensor de pH (Sonda pH)
P1	Antena de RF LoRa
P2	Puerto para carga de batería

4.3.2. Diagrama de Conexiones

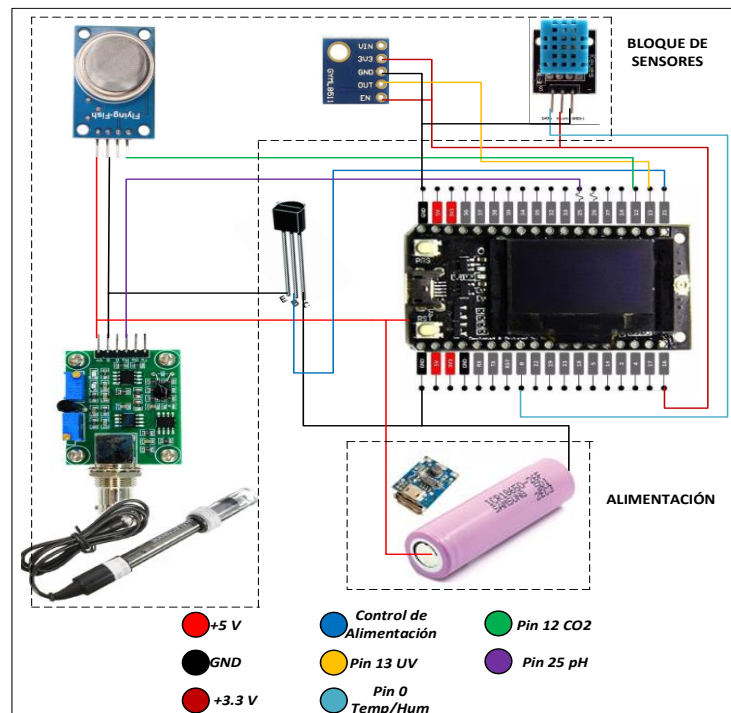


Figura 60. Diagrama general de conexiones del nodo.

En la figura 60 se muestra un esquema generalizado de las conexiones y pines utilizados por los sensores en los nodos, cabe destacar el uso de un transistor 2N2222 operando en la región de corte y saturación con el fin de controlar el flujo de energía en los sensores de CO₂ y pH dado que son los que mayor consumo energético requieren, las conexiones y arquitectura de cada nodo se detallan en la sección de implementación.

4.4. Diseño de Software

El diseño del software se compone de varias etapas, además se destaca el uso del IDE de Arduino dada la compatibilidad del módulo TTGO LoRa32 con esta plataforma, como se describe en la sección 3.4.

4.4.1. Software para los Nodos.

Dado los requerimientos de diseño se establecen parámetros para la toma de datos de forma que cada nodo dependiendo de los sensores que contenga, realice la recolección de datos en periodos definidos de tiempo.

4.4.1.1. Periodos de muestreo de las variables.

Según la OMS la información del índice UV se debe incluir al menos el máximo valor al día como el promedio de una toma de 30 minutos o con mediciones continuas para mostrar cambios a corto plazo en periodos de 2 a 10 minutos. Por otro lado la OMM recomienda para la medición de variables meteorológicas como temperatura y humedad la medición debe darse durante las 24 horas con tiempos de hasta 10 minutos de medición; de igual forma el monitoreo de CO₂ del aire según la norma ambiental de calidad del aire NA-AI-001-03 (NA-AI-00, 2010) establece límites para contaminantes durante periodos de un año y 24 horas, de igual forma en la norma Ecuatoriana de Calidad del Aire (Ministerio del Ambiente, 2011) establece medidas de contaminantes durante un periodo cada 8 horas con el fin de verificar cambios en el ambiente. Para la medición de calidad del agua el pH según la Guía de monitoreo Participativo de la calidad del agua (Herrera, Pacheco, Orihuela, & Cobo, 2018), establecen periodicidad de medidas de un mes por cuenca, de igual forma

el muestreo puede ser más frecuente dependiendo de condiciones que afecten al ecosistema como cambio de estaciones, temporadas de lluvia entre otros.

Dadas estas condiciones en la tabla 45 se establece los periodos y tiempos de muestreo de cada variable (figura 61) usados en este proyecto de investigación.

Tabla 45
Periodos y tiempos de muestreo de variables.

Variable	Periodo	Muestreo
Temperatura y Humedad	Cada 30 min	Cada 60 segundos durante 5 minutos
CO2	Cada 2 Horas	Cada 60 segundos durante 5 minutos
pH del Agua	Cada 12 horas	Cada 60 segundos durante 5 minutos
Radiación UV	Cada 30 min	Cada 60 segundos durante 5 minutos

En la figura 62 se muestra el diagrama de flujo del código implementado en los nodos para la obtención de datos, durante los tiempos de espera entre toma de datos de cada variable la unidad de control permanece en modo Sleep con el fin de optimizar el consumo energético del sistema.

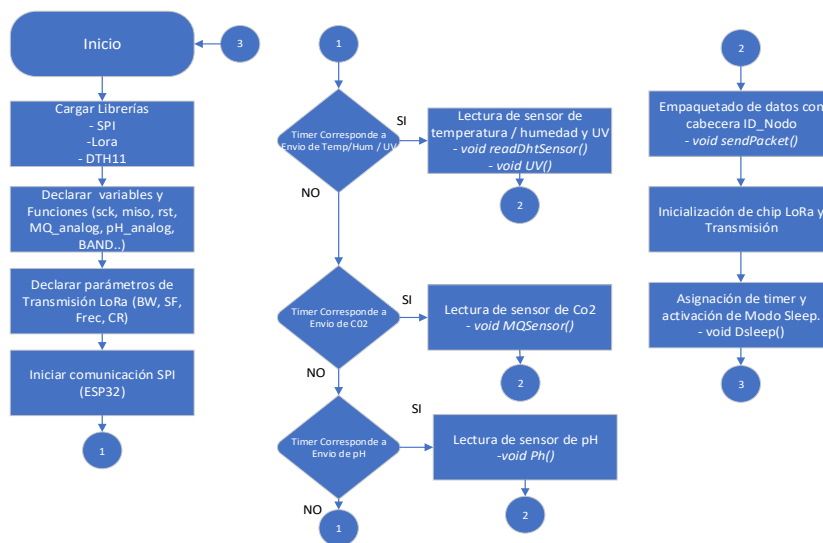


Figura 61. Diagrama de flujo generalizado de nodos.

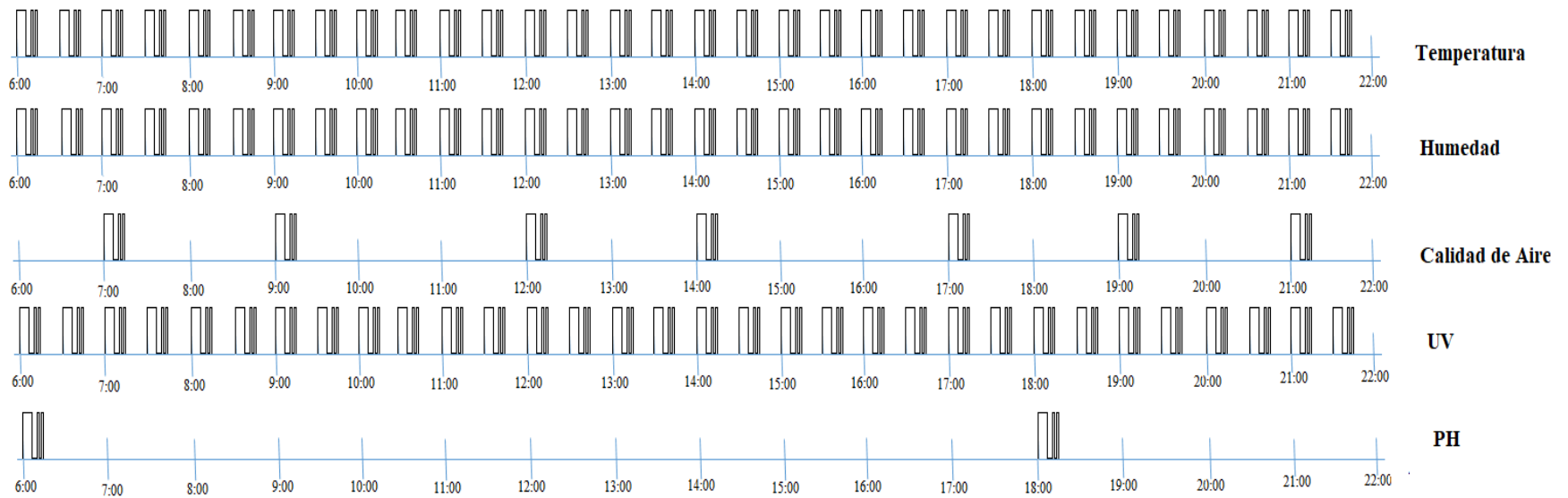


Figura 62. Diagrama de tiempo de las variables

En la tabla 46 se describen los componentes del código en Arduino para nodo.

Tabla 46

Componentes del código de programa Arduino para Nodo.

Tipo	Nombre	Funcionalidad
Librería	SPI	Controla la comunicación serial entre unidad de control y chip de Tx
	LoRa	Permite controlar la Tx LoRa
	DHT11	Permite el control del sensor de Humedad y Temperatura.
Variables	sck, miso, mosi, ss, rst, DIO0	Variables de inicialización de chip LoRa
	MQ_analog	Variable de asignación de pin de recepción
	pH_analog	Variable de asignación de pin de recepción
	BAND	Constante de definición de banda de Tx
	DHTPin	Variable de asignación de pin de recepción
	float h, c, ppm, uv, ph	Variables de almacenamiento de humedad, temperatura, co2, uv y pH del agua.
	Count timer	Contador de tiempo de envío
String Packet	Formato String del paquete a transmitir	
Métodos	void sendPacket()	Conecta la unidad de control con el chip LoRa de Tx para el envío del paquete
	void readDhtSensor()	Permite realizar la lectura del sensor DHT11
	void MQSensor()	Permite realizar la lectura del sensor MQ135
	void UV()	Permite realizar la lectura del sensor ML8511
	void Ph()	Permite realizar la lectura del sensor de Ph
	void Dsleep()	Permite ingresar al nodo en modo sleep.

4.4.2. Software para el Gateway.

La unidad de control de recepción de datos (Gateway LoRa) consta de un código de escucha continuo identificando cada nodo por medio de la cabecera de cada paquete, a diferencia de los nodos este dispositivo tiene activas dos interfaces de comunicación: Radio LoRa para la recepción de datos de los nodos y Wireless WiFi para el envío de datos a la red Internet. En la figura 63 se muestra el diagrama de flujo del código implementado en el dispositivo Gateway.

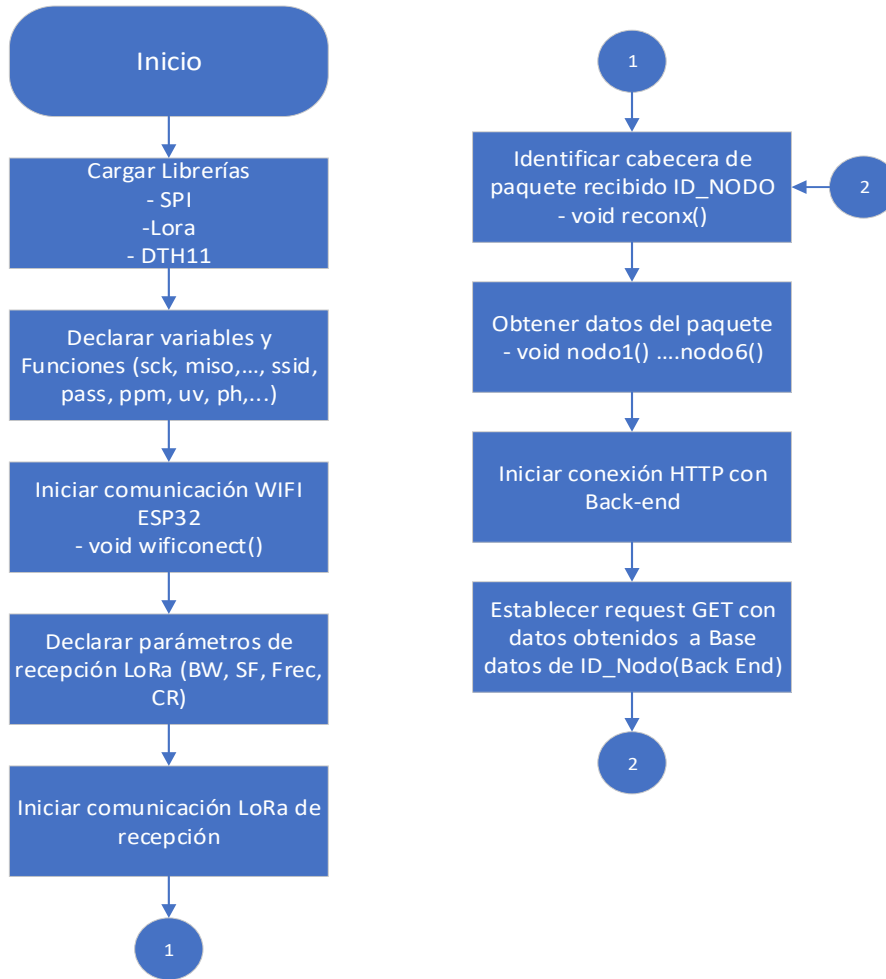


Figura 63. Diagrama de flujo del dispositivo Gateway.

En la tabla 47 se muestra los componentes del código de Arduino para el Gateway.

Tabla 47

Componentes del código de programa Arduino para Gateway.

Tipo	Nombre	Funcionalidad
Librería	SPI	Controla la comunicación serial entre unidad de control y chip de Tx
	LoRa	Permite controlar la Tx LoRa
	Wifi	Permite la conexión a Wifi de la unidad de control
Variables	sck, miso, mosi, ss, rst, DI00	Variables de inicialización de chip LoRa
	Char ssid	Nombre del BSSID
	Char password	Contraseña del BSSID
	Char host	Dirección del Servidor Web

CONTINÚA ➡

	BAND	Constante de definición de banda de Tx
	float h, c, ppm, uv, ph	Variables de almacenamiento de humedad, temperatura, co2, uv y pH del agua.
	Count timer	Contador de tiempo de envío
	String Packet	Formato String del paquete a recibir
Métodos	void reconx()	Permite reconocer la cabecera e identificar el nodo correcto
	void nodo1()	Permite enviar los datos en la BD del nodo
	void nodo2()	Permite enviar los datos en la BD del nodo
	void nodo3()	Permite enviar los datos en la BD del nodo
	void nodo4()	Permite enviar los datos en la BD del nodo
	void nodo5()	Permite enviar los datos en la BD del nodo
	void nodo6()	Permite enviar los datos en la BD del nodo
	void wificonect()	Permite la conexión a la red Wifi

4.4.3. Plataforma Web

En ingeniería web existen dos grupos que componen una plataforma web: Front End que comprende todas las tecnologías que interactúan directamente con el cliente, es decir, comprende principalmente la interfaz de usuario, diseño y experiencia de interacción, los principales lenguajes que predominan este bloque son HTML, CSS y JavaScript. Por otro lado, el Back End comprende las tecnologías de lado del servidor son procesos y algoritmos que hacen posible la comunicación, traspaso de información con las bases de datos, entre los principales lenguajes que predominan este bloque están: Java, PHP, Python, .Net (C#). Toda la plataforma web se muestra accesible al mundo por medio de un servidor que mediante un nombre de Dominio es accesible a través de protocolo Http. (Bezanilla, 2015)

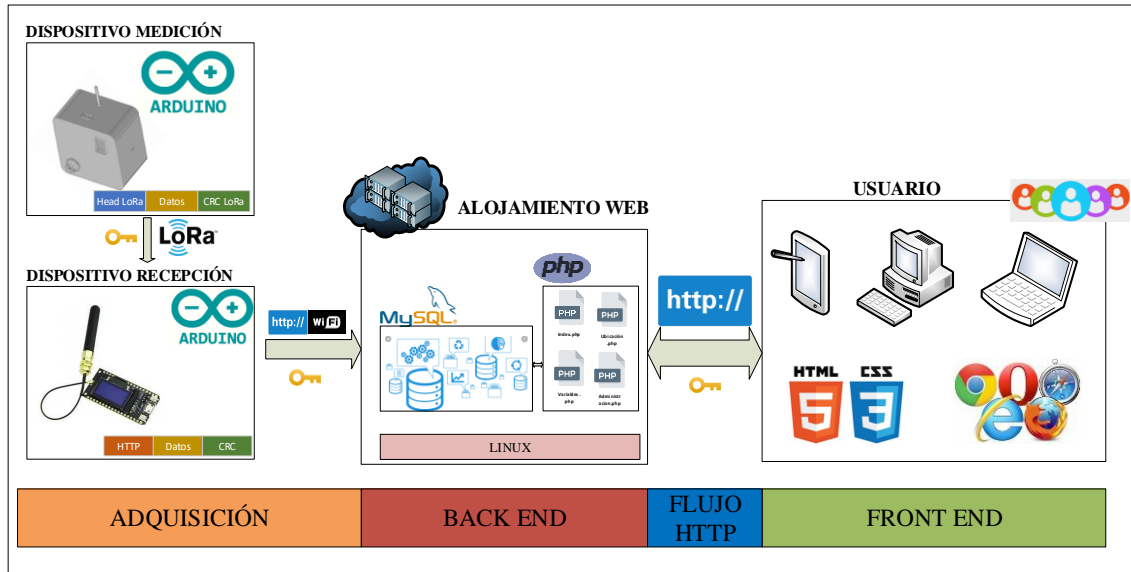


Figura 64. Diagrama de Tecnologías

4.4.3.1. Diseño de Front End

El objetivo del desarrollo de la plataforma web es proveer de un medio de visualización de la información que sea amigable y de fácil comprensión, para esto se plantea el uso de gráficas dinámicas donde se presenta la información de cada zona de estudio, dando la opción de comparar las variables y descargar la información para uso del usuario.

A. Sistema de Gestión de Contenidos (CMS)

- **HTML (HyperText Markup Language):** Es un lenguaje de marcado usado ampliamente para el desarrollo de páginas web.
- **CSS (Hypertext Preprocessor):** Es un lenguaje de diseño gráfico usado para definir y estructurar la presentación gráfica de una página generada por un lenguaje de marcado.

- **PHP (Hypertext Preprocessor):** Es un lenguaje de programación de propósito general, orientado inicialmente para el desarrollo de código del lado del servidor (Back End) como tareas de escritura y lectura en las bases de datos, sin embargo luego se aplicó al desarrollo web dando paso al desarrollo de aplicativos web.

B. Componentes de Interfaz gráfica

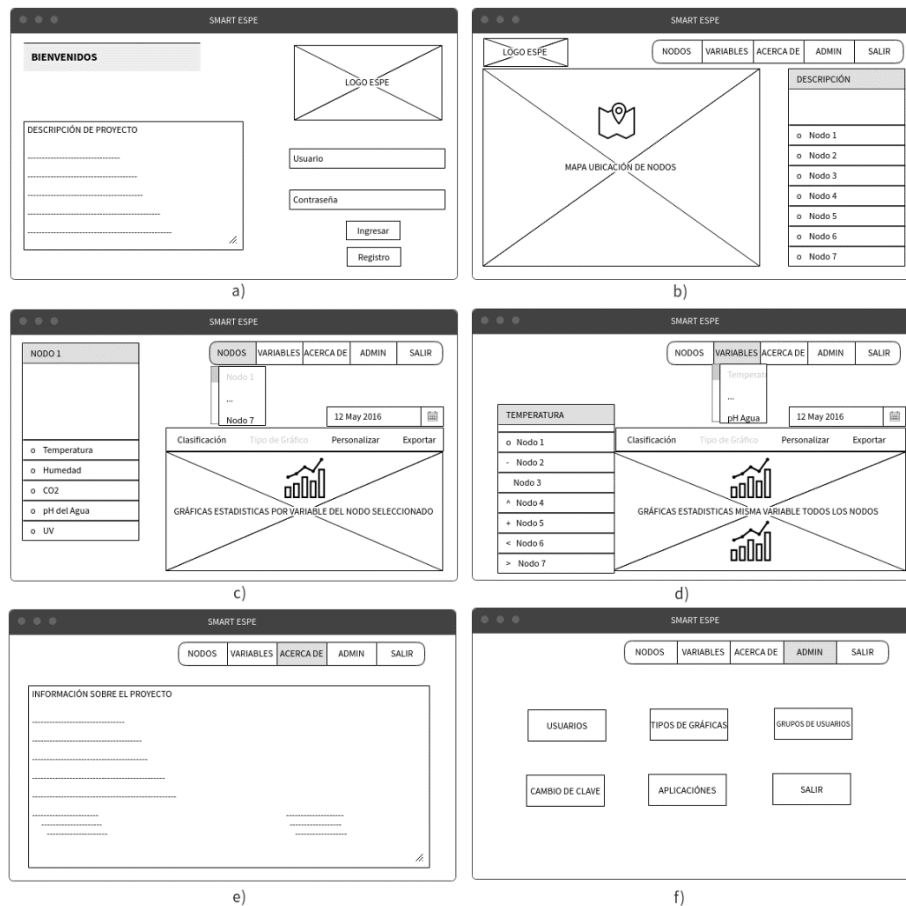


Figura 65. Interfaces y componentes de la página web

En la figura 65 se muestra las principales opciones que componen la plataforma web.

- a) **Página Principal:** La página principal de la plataforma consta de un formulario de acceso, por motivos de seguridad y una breve descripción del proyecto.

- b) **Página de Inicio:** Consta del menú de opciones y permite la visualización de nodos de acuerdo a su distribución en el campus de la ESPE.
- c) **Graficas por Nodos:** Esta opción permite desplegar todas las gráficas del nodo seleccionado.
- d) **Gráficas por variables:** Permite visualizar en una sola gráfica la variable seleccionada de todos los nodos que la tienen en común, con el fin de realizar comparaciones.
- e) **Acerca de:** Esta opción permite acceder a la información con más detalle del desarrollo del proyecto.
- f) **Admin:** El menú disponible para el administrador permite realizar cambios en las visualizaciones y accesos de usuarios en general.

4.4.3.2. Diseño de Back End

Los procesos que permiten la comunicación y generación de contenido en el front end por parte del administrador de la plataforma corresponden al diseño del back end, toda petición efectuada desde la interfaz de usuario pasa a través de un proceso generado por tecnologías de comunicación web que permiten el acceso a la información.

Para el desarrollo del back-end se utilizan herramientas como:

- **Alojamiento Web (Hosting):** Es un servicio que permite a los usuarios almacenar información digital en los servidores del proveedor, a través de internet.
- **Servidor Web apache:** Para el caso de proyectos web, el proveedor ofrece software como servicio (SaaS), el servidor apache contiene software y protocolos que permiten iniciar procesos para ejecutar aplicativos web, para este proyecto de investigación el servidor cumple los requisitos funcionales si contiene MySQL y ejecuta código PHP.

- **MySQL:** Es un software de gestión de bases de datos ampliamente usado en desarrollo web, permite gestionar la BD por interfaz gráfica o línea de comandos, es muy usado junto con php para la comunicación de front end con back end.
- **PHP:** Al igual que en el front end, este código de programación es muy usado para la escritura y lectura de las bases de datos desde el front end.
- **Almacenamiento en disco:** El almacenamiento se solicita al proveedor, de igual manera se puede solicitar aumentar el mismo incrementando el valor de la suscripción.
- **IP Pública:** Para que el servidor sea visible al mundo debe estar configurado con un direccionamiento que permita acceder desde cualquier parte del mundo por medio de internet para esto el proveedor asigna al servidor una IP pública.
- **Dominio:** Para evitar que los usuarios ingresen en las peticiones HTTP una IP se contrata un nombre de dominio direccionado a la IP pública del servidor, en este caso “smartuniversity.com”, el cual permite identificar y acceder al servidor desde cualquier parte del mundo de una forma más amigable.

Disponibilidad: Acorde a las condiciones de la suscripción el proveedor define un porcentaje de disponibilidad, de acuerdo a las actividades de mantenimientos programados o preventivos en la infraestructura, donde el servicio permanecerá indisponible.

La estructura de la base de datos se presenta mediante el diagrama entidad relación de la figura 66.

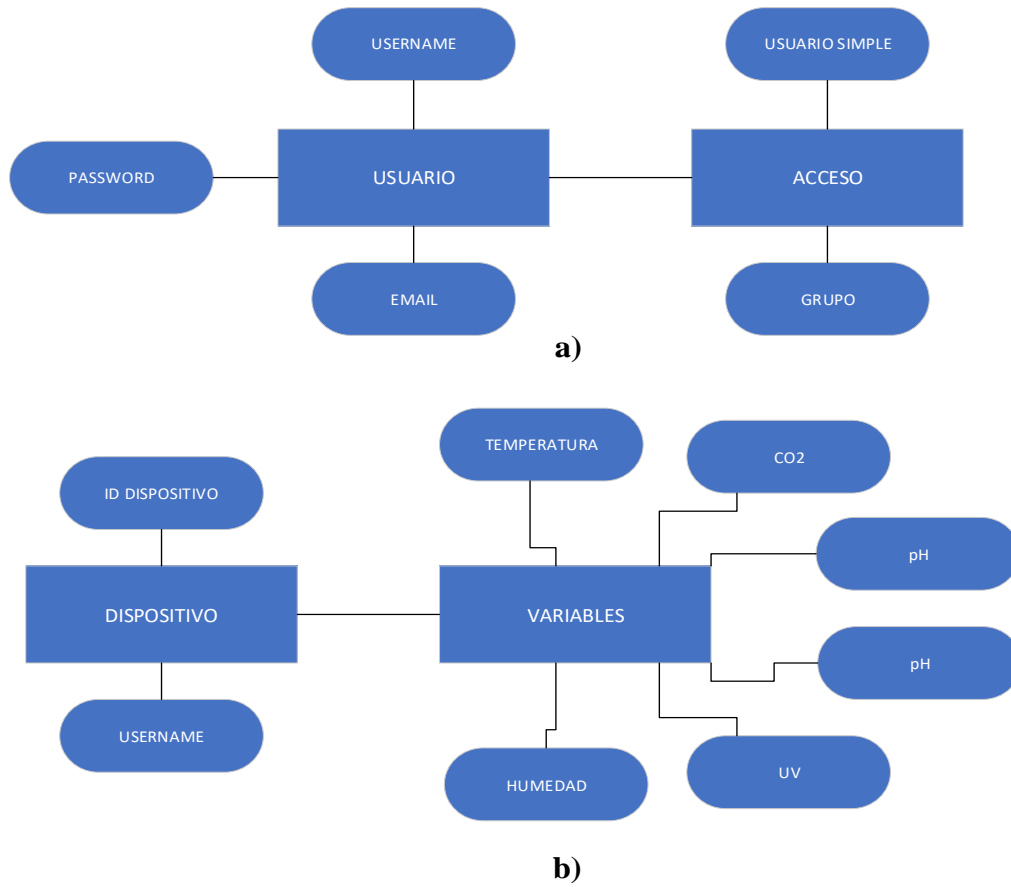


Figura 66. Diagrama entidad relación: a) BD usuarios, b) BD nodos

Dependiendo del ingreso del cliente este se crea en la tabla de datos de usuario o grupo de visualización, de igual forma cada variable sensada se implementará en la tabla de acuerdo al “id” de dispositivo, los atributos de cada variable se muestran en la tabla 48.

Tabla 48

Atributos de las variables.

Nombre	Tipo de dato
ID	Int (11)
Temperatura	Int (11)
Humedad	Int (11)
Co2	Int (11)

CONTINÚA ➡

pH	Float
Luminosidad	Float
Fecha y Hora	Data time

4.4.3.3. Servidor Web

En la red existen gran cantidad de servidores de alojamiento web, que permiten alojar la plataforma de acuerdo a planes contratados donde el costo depende de características como: almacenamiento, capacidad de procesamiento, tecnologías de bases de datos, cuenta de email y bases de datos, de igual forma cuenta con la capacidad de ejecutar código PHP hasta la versión 7.2, dado que no es un servicio de cloud la administración es realizada por interfaz gráfica de usuario; para este proyecto de investigación se utilizó el alojamiento Hostinger.ar por el bajo costo de adquisición ya que cumple con los requerimientos funcionales para implementar la plataforma web, en la tabla 49 se presenta las características del servidor elegido.

Tabla 49
Periodos y tiempos de muestreo de variables.

Características	Detalle
Almacenamiento	10 Gb
Versión PHP	7.2
Versión Apache	2.4
Versión MySQL	10.2
Administración	GUI- ePanel
Dominio	smartuniversity.tech
Subdominio	Ilimitados
Dirección Ip	213.190.6.87

CONTINÚA 

Nivel de Servicio	SLA 99.9%
Bases de Datos	2
Cuenta FTP	Ilimitadas
Cuenta Email	1

4.5. Implementación

4.5.1. Escenario de estudio

El escenario de estudio para el proyecto de investigación comprende todo el campus universitario de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE matriz, como resultado del análisis de desempeño desarrollado en el capítulo 3 se obtuvo el mapa de cobertura del campus (Figura 42), en base a este estudio se eligen las zonas donde se ubican los nodos de medición como se muestra en la figura 67.

De igual forma se toma en cuenta las variables a medir para cada nodo según su ubicación y conforme lo expuesto en la sección 4.2 cada sensor requiere ser compensado por software para obtener la medición correcta, en la tabla 50 se lista las variables implementadas en cada nodo y su respectiva compensación.

Considerando las características de los nodos de recolección no es necesario disponer de alimentación a la red eléctrica ni cobertura de señal de Internet dado que la transmisión es por medio de radioenlace LoRa.

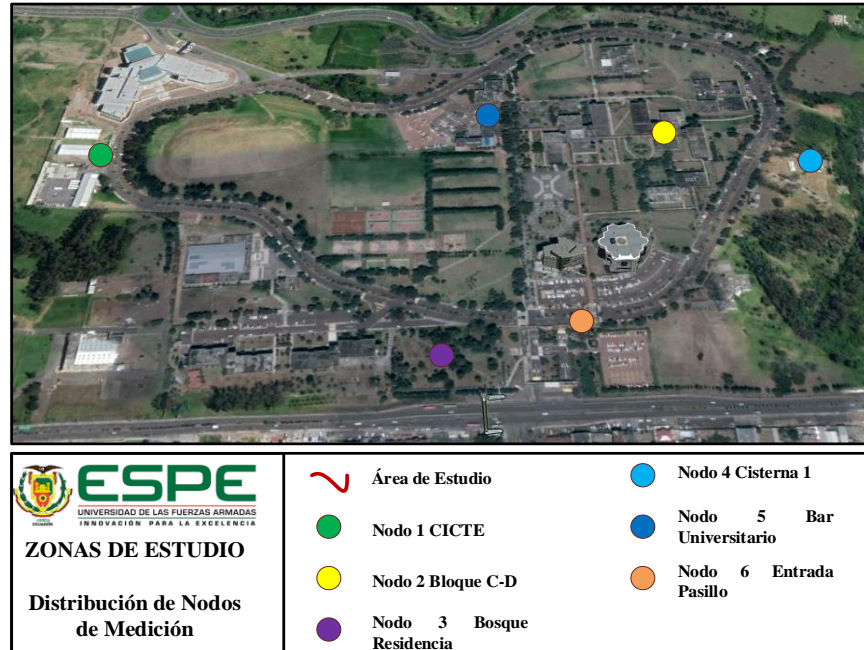


Figura 67. Distribución de Zonas de Estudio.

Tabla 50

Variables implementadas por Nodo

Nodo	Variables	Compensación
Nodo 1 CICTE	Radiación UV	+1 (IUV)
	Temperatura	-2 (°C)
	Humedad	+3 (%)
	CO2	-
Nodo 2 Bloque C-D	Temperatura	-3 (°C)
	Humedad	+2 (%)
	CO2	-
Nodo 3 Bosque Residencia	Temperatura	-2 (°C)
	Humedad	+2 (%)
	CO2	-
Nodo 4 Cisterna 1	pH de Agua	-
	Temperatura	-1 (°C)
	Humedad	+3 (%)
	CO2	-
Nodo 5 Bar Universitario	Temperatura	-3 (°C)
	Humedad	+2 (%)
	CO2	-
Nodo 6 Entrada Pasillo	Radiación UV	+1 (IUV)
	Temperatura	-2 (°C)
	Humedad	+2 (%)

4.5.2. Comunicación Gateway LoRa – Server – BD

Para el almacenamiento se crea la BD para recepción de datos, dado el esquema de tiempos de transmisión se generan tablas para cada nodo con el fin de segmentar los datos y realizar consultas de forma más eficaz en la BD.

El dispositivo Gateway LoRa realiza la escritura de los datos mediante peticiones HTTP al servidor que por medio de códigos PHP accede y selecciona la tabla adecuada en la BD, tal como se muestra en el esquema de la figura 68.

Usando el esquema entidad – relación se generan tablas de acuerdo al dispositivo y tipo de variable (Figura 66 b)

#	Nombre	Tipo	Cotejamiento	Atributos	Nulo	Predeterminado	Comentarios	Extra	Acción
1	id	int(11)			No	Ninguna		AUTO_INCREMENT	Cambiar Eliminar Más
2	temperatura	int(11)			No	Ninguna			Cambiar Eliminar Más
3	humedad	int(11)			No	Ninguna			Cambiar Eliminar Más
4	fecha	datetime			No	current_timestamp()			Cambiar Eliminar Más

Figura 68. Diseño de base de datos.

Para explicar de mejor manera la iteración durante el almacenamiento de datos se emplea el diagrama secuencia de la figura 69, donde se muestra el proceso de acceso y almacenamiento a la BD desde el Gateway además de la solicitud del usuario final al acceso al sistema para acceder a los datos.

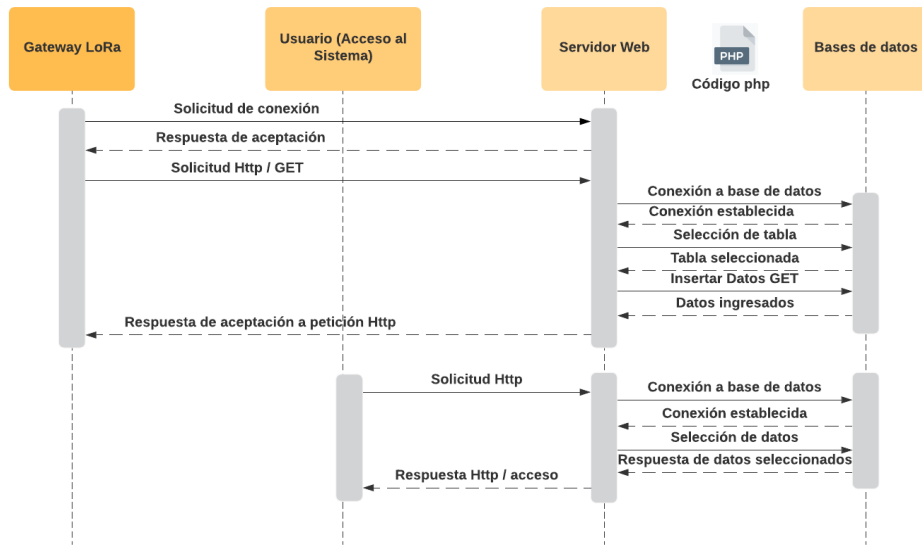


Figura 69. Secuencia de escritura y lectura de datos en la BD.

4.5.3. Implementación de dispositivo de medición

Según el diseño propuesto en la sección 4.3, en la figura 70 se muestra el dispositivo de medición conformado por la caja de PVC para la protección de los sensores, unidad de control y la fuente de energía, de acuerdo al tipo de nodo la distribución de sensores varía, cada dispositivo fue instalado en la zona de estudio designada.

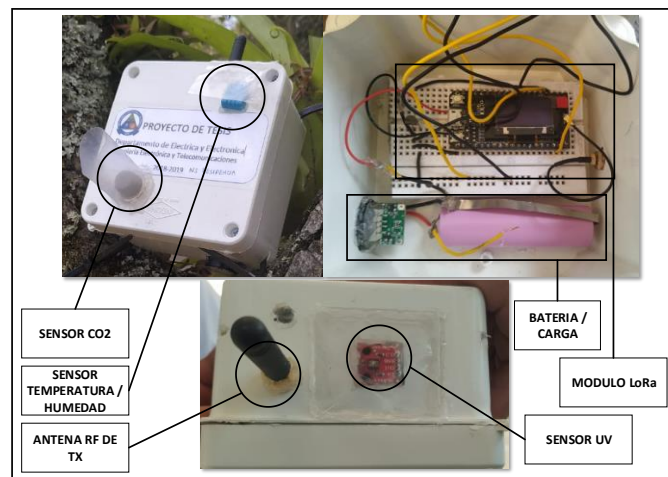


Figura 70. Dispositivo de Medición.

4.5.4. Desarrollo de la Plataforma Web

El desarrollo de la plataforma Web comprende una serie de códigos y librerías vinculadas de manera que conforman un solo sistema, para este diseño se consideran tres códigos principales en lenguaje php junto con la librería Scriptcase que es un desarrollador php ambientado para gráficas de front –end.

En la figura 71 se muestra el diagrama jerárquico de la plataforma Web donde consta de una página principal que comprende el acceso al sistema y registro de nuevos usuarios, tres códigos que permiten de acuerdo a la selección del usuario opciones desde la visualización de gráficas por nodo, gráficas conjuntas de acuerdo al tipo de variable y administración de credenciales y cambio de clave.

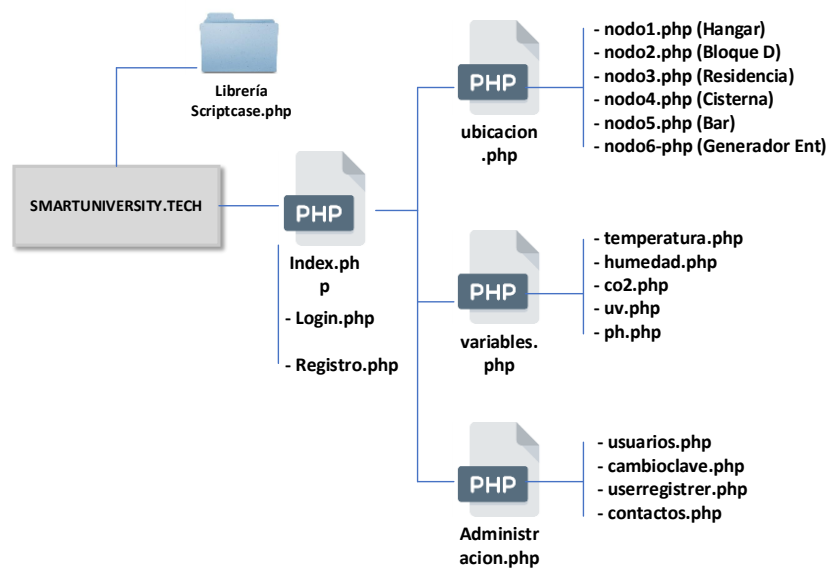


Figura 71. Diagrama Jerárquico de Plataforma Web

4.5.4.1. Página Principal.

La página principal comprende del archivo index.php (figura 71) debido a que realiza la primera interacción con el usuario permite opciones de acceso y registro de acceso mediante formularios haciendo el llamado a los códigos Login.php y Registro.php. En la figura 72 se muestra el diagrama que secuencia con la interacción de Usuario – Servidor – BD, para el registro de un nuevo usuario y/o el acceso de un usuario ya registrado.

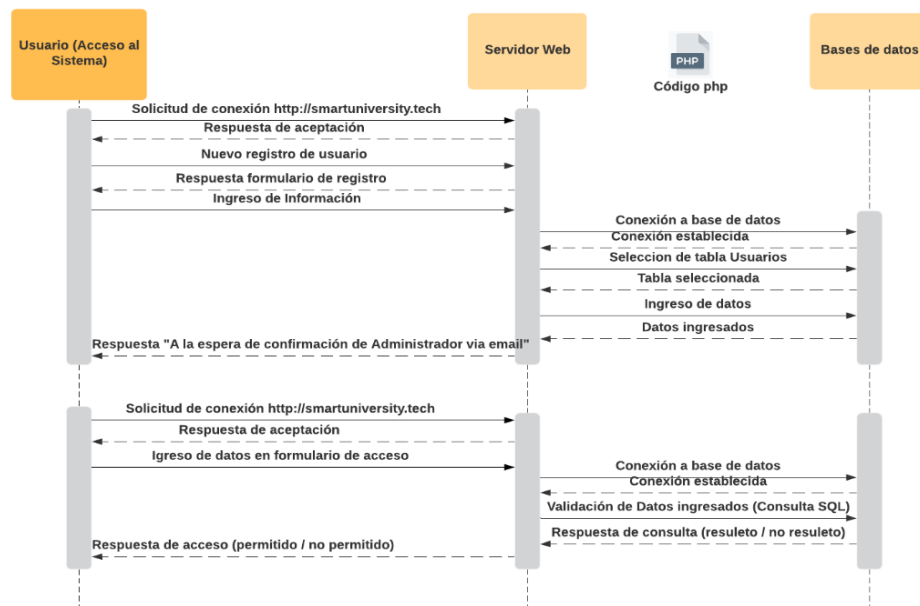


Figura 72. Diagrama de secuencia para el registro y/o acceso de usuario.

4.5.4.2. Opciones de visualización y menú de administrador.

Una vez el usuario ha accedido a la plataforma con sus credenciales de acuerdo al diseño de la sección 4.4.3.1 se despliegan principalmente tres opciones:

- Administración (en caso de ser usuario administrador)
- Visualización de gráficas por nodo y ubicación
- Visualización de gráficas conjuntas por variables de medición

De acuerdo al tipo de usuario se despliega la opción de administración que permite la gestión de usuarios y credenciales con las que acceden a la plataforma mediante el archivo *Administracion.php*; la visualización de gráficas por nodo está definido en el archivo *ubicacion.php* que vincula a códigos php de acuerdo al nodo seleccionado por el usuario, esta visualización permite descargar la información en distintos formatos de archivo; para visualizar las gráficas conjuntas de los nodos el archivo *variables.php* realiza el llamado de código php correspondiente al tipo de variable. El usuario puede filtrar la información que desee visualizar o descargar por periodos de tiempo en la plataforma.

En la figura 73 se muestra el diagrama de secuencia para la visualización de gráficas por nodo y/o variable, así como la descarga de información.

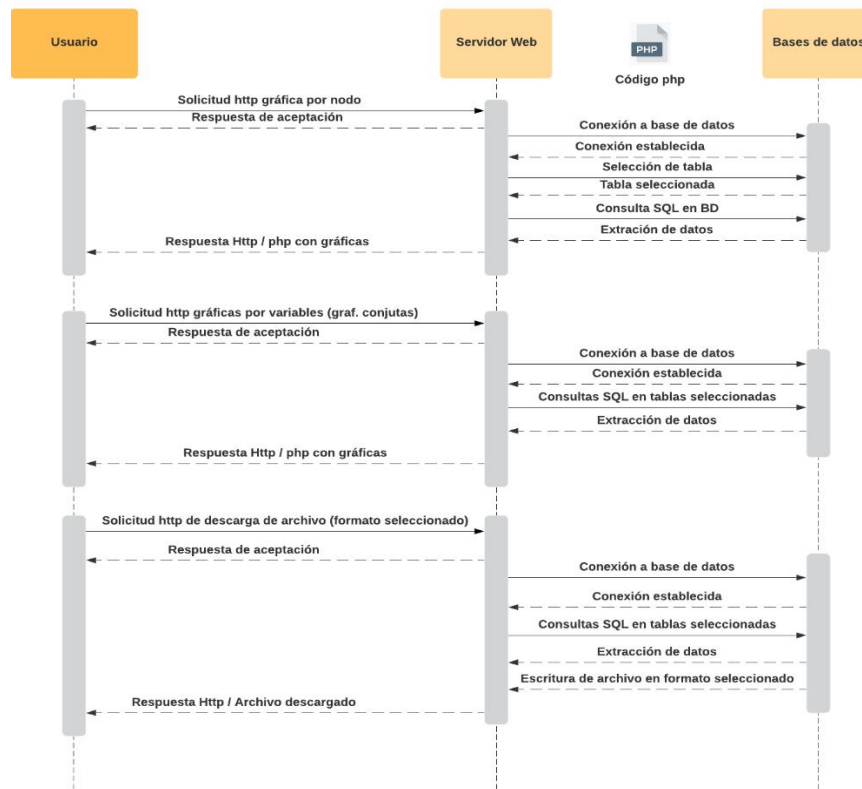


Figura 73. Diagrama de secuencia de gráfica y descarga de datos.

4.6. Protocolos de Prueba

Con el objetivo de verificar la implementación y el funcionamiento del sistema de monitoreo, se aplica un protocolo de pruebas a cada uno de los elementos que componen el sistema. Es importante tomar en cuenta que para la realización de las pruebas los módulos están previamente cargados con los programas de Arduino correspondientes.

El escenario donde se ejecutan las pruebas es el descrito en el apartado 4.5.1.

4.6.1. Prueba 1: Recolección de datos en los Nodos finales

La primera prueba se realiza con el objetivo de verificar el funcionamiento del nodo final al momento de recolectar los valores medidos por los diferentes sensores, previo a la implementación del sistema (figura 74).

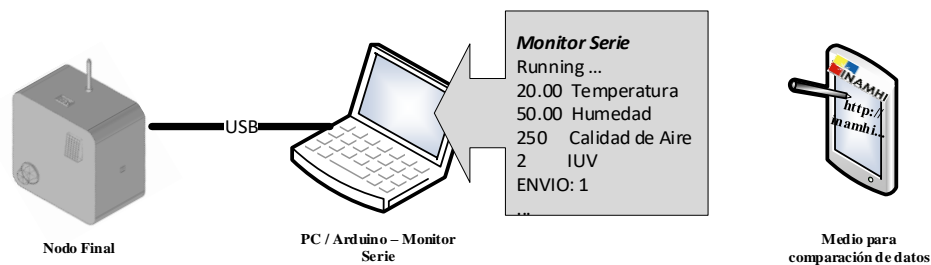


Figura 74. Esquema de aplicación de prueba 1.

Procedimiento

1. Encender el nodo final.
2. Conectar el módulo LoRa a la computadora a través del cable USB.
3. Abrir el programa de Arduino dedicado a transmisión LoRa y posteriormente habilitar el monitor serie.

4. Comprobar la ejecución del programa a través de la visualización en el monitor serie de los valores obtenidos por los sensores.
5. Comprobar en el monitor serie la recolección de los valores medidos tomando en cuenta el número de paquetes enviado durante un periodo de dos horas.
6. Comparar los valores medidos con una fuente de referencia (INAMHI) acorde al ambiente de medición.
7. Analizar los resultados

Repetir los pasos del 1 al 7 para todos los nodos implementados.

4.6.2. Prueba 2: Recolección de datos del Gateway

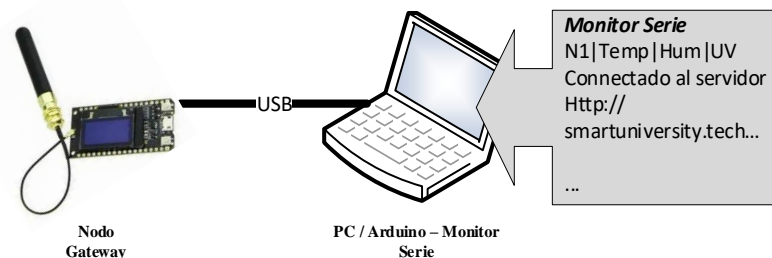


Figura 75. Esquema de aplicación de prueba 2.

El objetivo de esta prueba es verificar la conexión del nodo final con el nodo Gateway y comprobar la correcta recepción de los valores recolectados y enviados desde el nodo final.

Procedimiento

1. Encender el nodo y el Gateway.
2. Conectar el nodo Gateway a una computadora a través del cable USB

3. Abrir el programa de Arduino dedicado a la recepción LoRa y posteriormente habilitar el monitor serie durante el tiempo de transmisión establecido para cada una de las variables por un periodo de dos horas.
4. Validar la conexión nodo final – Gateway mediante la cabecera en el paquete recibido, Ej. N1|Datos...| usando el monitor serie.
5. Visualizar en el monitor serie la recepción de datos en el Gateway, de acuerdo a la cantidad y periodo de envío de datos del nodo final.
6. Verificar que los valores recolectados en el nodo final son los mismos que recibe el Gateway, mediante la visualización del monitor serie de los dos dispositivos al momento del envío y recepción de datos.

Repetir los pasos del 1 al 6 para todos los nodos implementados.

4.6.3. Prueba 3: Conectividad

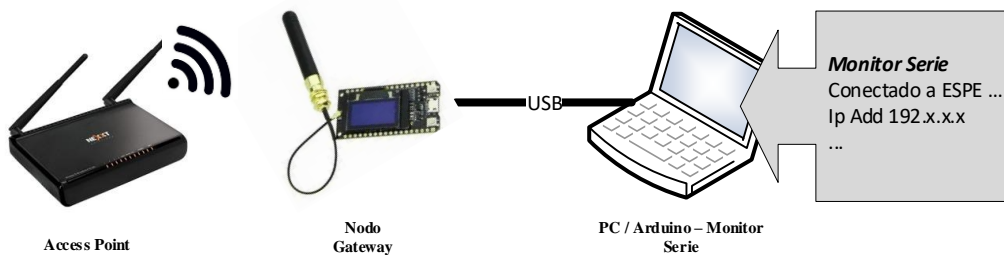


Figura 76. Esquema de aplicación de prueba 3.

Dado que el nodo Gateway es el eje central para la comunicación de datos desde la red LoRa a Internet, la tercera prueba se realiza con el fin de verificar la conectividad entre Internet, red Wi-Fi de la ESPE y el nodo Gateway, de esta forma se realiza el envío de datos hacia la base de datos alojada en la nube.

Procedimiento

1. Encender el nodo Gateway.
2. Conectar el nodo Gateway a una computadora a través del cable USB
3. Abrir el programa de Arduino dedicado a la recepción LoRa y posteriormente habilitar el monitor serie.
4. Comprobar que se establezca la conexión entre el nodo Gateway y la red Wi-Fi a través de la asignación de una dirección IP al Gateway que se visualiza en el monitor serie.
5. Verificar que la IP asignada en el paso 3 esté registrada en la tabla ARP del router.
6. Utilizando un computador conectado a la misma red Wi-Fi, realizar una petición ICMP a través del comando ping hacia el nodo Gateway y a la IP del servidor de esta manera verificar la conexión en red interna y salida a Internet.
7. Utilizar el servidor TTN (The Thing Network) para obtener la información de la trama Metadata (Parámetros de transmisión) en capa 2.
8. Utilizar el software Wireshark y verificar el tráfico de datos en capa 3 (Red, Modelo OSI) identificando las peticiones HTTP.
9. Analizar los resultados.

4.6.4. Prueba 4: Almacenamiento

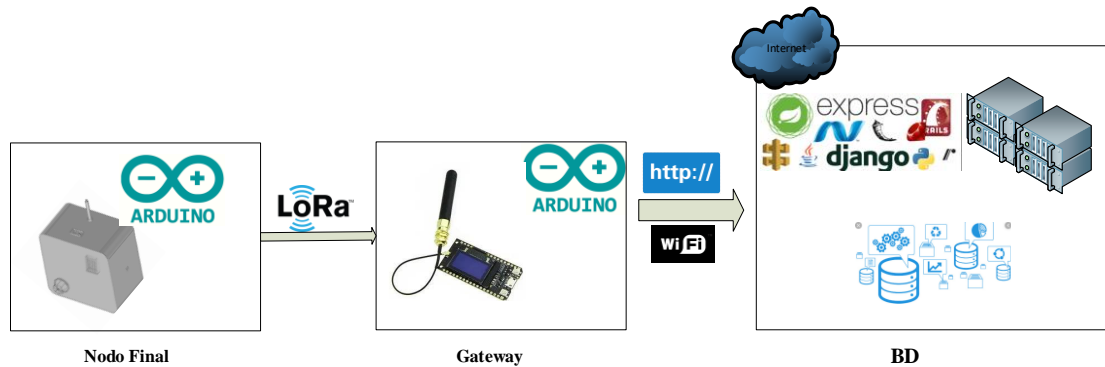


Figura 77. Escenario de prueba 4.

Esta prueba se realiza con el objetivo de determinar el funcionamiento del método de almacenamiento en la base de datos alojada en la nube, para posteriormente comparar los datos enviados desde el Gateway con los datos almacenados en la base.

Procedimiento

1. Encender el nodo Gateway y los nodos finales.
2. Conectar el nodo Gateway a una computadora a través del cable USB
3. Abrir el programa de Arduino dedicado a la recepción LoRa y habilitar el monitor serie.
4. Usar el monitor serie para identificar el nodo transmisor mediante la cabecera del paquete recibido y el archivo php que direcciona a la tabla respectiva en la base de datos.
Ej. N1|Datos../Conexion1.php
5. Ingresar al administrador de bases de datos en el servidor web y validar que el almacenamiento de los datos se realiza en la tabla correcta de acuerdo al paso 3.

6. Visualizar en el monitor serie la hora que registra el Gateway al momento de envío del paquete y comparar con la hora en que se almaceno el dato en la tabla, con el fin de validar el tiempo de escritura en el servidor.
7. Utilizar el software Wireshark para verificar el tráfico de datos enviados, haciendo énfasis en el archivo php usado para la escritura en la tabla y los datos de las variables.
8. Usando la captura de tráfico del paso 7, comparar los datos enviados por el nodo Gateway con los datos almacenados en la tabla respectiva.

4.6.5. Prueba 5: Duración de las baterías

La prueba 5 tiene como objetivo estimar teóricamente el tiempo de vida de las baterías que usan los nodos tomando en cuenta el análisis realizado en el capítulo 3 sección 3.5.4.

Procedimiento

1. Conectar el módulo LoRa a la batería de alimentación y encender el dispositivo.
2. Considerar el consumo energético de cada uno de los sensores especificados en la sección 4.2.
3. Especificar los periodos de transmisión de datos de cada una de las variables.
4. Calcular el consumo del nodo, tomando en cuenta los datos de la sección 3.5.4 y añadiendo el consumo de los sensores.
5. Calcular el tiempo estimado de vida de las baterías aplicando la ecuación 5.

$$Life_{time}(h) = \frac{C(mAh)}{I_{avg}(mA)} \quad (5)$$

Repetir los pasos del 1 al 5 para los diferentes módulos y sensores utilizados.

4.6.6. Prueba 6: Radio de cobertura.



Figura 78. Escenario de aplicación de prueba 6

La prueba 6 se realiza posterior a la implementación de la red LPWAN y tiene como objetivo analizar el radio de cobertura entre los nodos y el Gateway tomando en cuenta las pruebas realizadas en el capítulo 3 sección 3.5.3.

Procedimiento

1. Conectar los módulos LoRa a las baterías de alimentación y encenderlos.
2. Conectar el Gateway a un computador y posteriormente habilitar el monitor serie.
3. Verificar en el monitor serie la recepción de datos en el Gateway.
4. Identificar el radio de cobertura de los nodos comparando con los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en la sección 3.5.3, figura 41.
5. De acuerdo a la cantidad de datos que deberían haber sido registrados en la BD calcular el porcentaje de paquetes perdidos.

4.6.7. Prueba 7: Sistema de monitoreo de variables ambientales

La prueba 7 se la realiza con fin de comprobar el funcionamiento de la red LPWAN implementada, usabilidad y la visualización de los datos a través de la página web.

Procedimiento

1. Encender los seis nodos conectando los módulos a sus baterías de alimentación.
2. Conectar el Gateway a un computador y posteriormente habilitar el monitor serie.
3. Verificar la transmisión de datos entre los nodos y el Gateway verificando datos escritos en las tablas de la BD.
4. Acceder a la página web a través de la dirección <http://smartuniversity.tech>
5. En la página de login del sitio web colocar usuario y contraseña.
6. Elegir una zona de estudio de estudio en la página de inicio.
7. Visualizar las gráficas del área seleccionada.
8. Verificar que la información mostrada sea acorde a la monitoreada.
9. Analizar los datos.

4.6.8. Prueba 8: Descarga y análisis de Datos

La prueba 8 se la realiza con fin de comprobar el funcionamiento de la página web y posteriormente realizar el análisis de los datos de las variables medidas en cada uno de los nodos.

1. A partir de la prueba 7, elegir una variable o conjunto de variables a visualizar.
2. Verificar la opción de filtrado por fecha.
3. Previo a la descarga validar en la pestaña *resumen*, que los datos filtrados correspondan a los registrados en la tabla de la BD.

4. Verificar la opción de archivo de descarga
5. Descargar la información de la página web.
6. Clasificar la información de acuerdo al tipo de variable y nodo.
7. Analizar correlaciones entre variables y áreas de estudio.

CAPITULO V

5. RESULTADOS

5.1. Sistema de monitoreo y escenario de prueba

5.1.1. Sistema de monitoreo

En la figura 79, se observa el diagrama de red del sistema de monitoreo implementado.

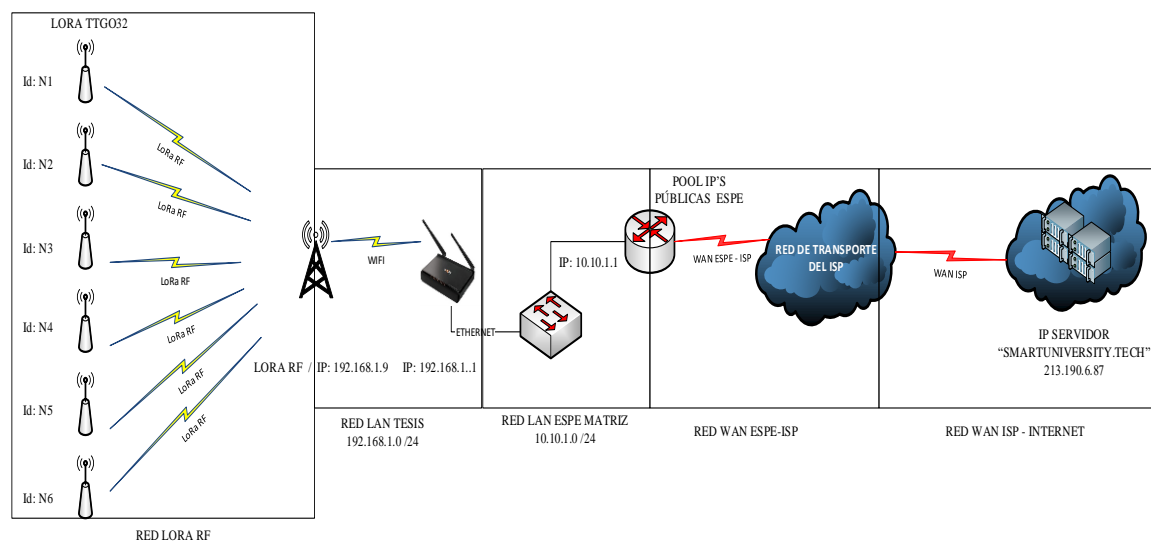


Figura 79. Diagrama de red

5.1.2. Escenario de prueba

El escenario de prueba está localizado en el campus de la universidad, distribuidos como se observa en la figura 80.



Figura 80. Mapa de ubicación de los nodos

Cada nodo posee características específicas del medio de acuerdo a la ubicación en la que se encuentran, como se muestran en la tabla 51, se puede encontrar medios con vegetación, edificaciones y de acuerdo al tránsito puede ser alto (AT), medio (MT), bajo (BT).

Tabla 51

Características de los nodos

Nodos	Distancia a Nodo Central	Altura desde el suelo	Consideraciones	Vegetación	Ed. Alta	Ed. Bajas	AT	MT	BT
Nodo1	617 m	2,5 m	Edificaciones bajas, vegetación y poco afluencia de personas	X	X			X	
Nodo2	311 m	2,2 m	Edificaciones altas, afluencia de personas y no tiene vegetación		X		X		
Nodo3	140 m	3,5 m	Sin edificaciones, sin afluencia de personas y con alta densidad de vegetación	X					X
Nodo4	345 m	2 m	Edificaciones bajas, poca afluencia de personad y alta densidad de vegetación	X		X			X

CONTINÚA 

Nodo5	256 m	3 m	Edificaciones altas, afluencia de personas y vegetación.	X	X		X		
Nodo6	85 m	2,5 m	Edificaciones altas, poca afluencia de personas y vegetación	X	X		X		

5.2. Evaluación de hardware

5.2.1. Recolección de datos en los nodos finales

Con el fin de verificar el funcionamiento correcto de cada uno de los nodos al momento de recolectar datos de las variables sensadas, se llevó a cabo el procedimiento de la prueba 1 expuesto en el protocolo de pruebas del capítulo 4.

Es importante tomar en cuenta que cada uno de los sensores fue calibrado y compensado a través de software, de acuerdo al análisis realizado en sección 4.2 y subsección 4.5.1 dedicada a la caracterización de los sensores e implementación respectivamente.

En la figura 81 se observa el monitor serie en el IDE de Arduino del nodo final donde se muestran los datos de las variables y un contador de paquetes enviados; estas variables son medidas por los sensores y recogidas en el módulo LoRa transmisor.

```

COM3
26.00 TEMPERATURA
46.00 HUMEDAD
352 CALIDAD DE AIRE
Boot number: 1
26.00 TEMPERATURA
46.00 HUMEDAD
352 CALIDAD DE AIRE
Boot number: 2
26.00 TEMPERATURA
46.00 HUMEDAD
328 CALIDAD DE AIRE
Boot number: 3
26.00 TEMPERATURA
46.00 HUMEDAD
346 CALIDAD DE AIRE
Boot number: 4
  
```

Figura 81. Variables del nodo 2 mostradas en el monitor serie.

Para esta etapa de la transmisión siguiendo, el esquema del modelo OSI capa 2- enlace de datos, el paquete es completamente LoRa con la estructura indicada en la tabla 3, de forma general se presenta en la figura 82, el esquema de transmisión del paquete LoRa.

De acuerdo a los resultados de la figura 81 se verifico que el número de paquetes enviados corresponde al establecido para el nodo 2 ya que tomo un total de 5 muestras de las variables de temperatura, humedad y CO2 durante un periodo de 5 min, es decir una muestra por cada 60s como se había determinado.

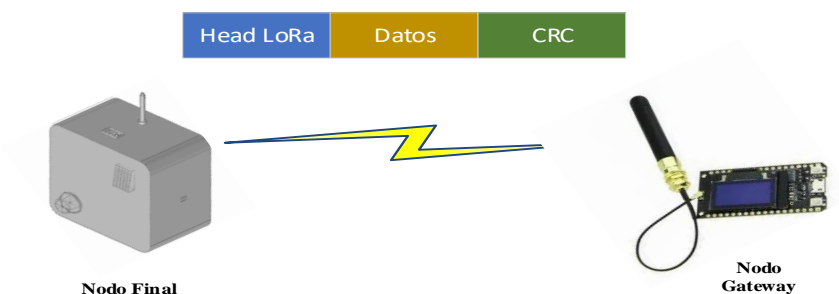


Figura 82. Diagrama de transmisión de paquete LoRa en capa 2.

Los valores de temperatura y humedad se muestran en la figura 83 para un periodo de dos horas durante el 14 de diciembre de 2019. Con el fin de verificar la correcta toma de los datos, se compara con los datos del INAMHI para el mismo periodo y se verifica que por cada nodo el error no sobrepasa el 2% en las mediciones, como se observa en la tabla 52.

Tabla 52

Calculo del error entre los datos medidos de temperatura y humedad con INAMHI.

	Temperatura	Humedad	Error Temperatura (%)	Error Humedad (%)
Nodo 1	16,5	60,5	1,79	0,11
Nodo 2	17,1	59,3	1,79	1,77
Nodo 3	16,5	59,7	1,39	1,21
Nodo 4	16,8	59,9	0,20	0,77

CONTINÚA



Nodo 5	16,7	59,4	0,60	1,66
Nodo 6	16,7	59,9	0,60	0,88
INAMHI	16,8	60,4		

Para la comprobación de la variable de índice UV se ha recolectado la información de los nodos 1 y 6 para comparar con el valor promedio que da el INAMHI, de esta forma se comprueba según la gráfica 85 y la tabla 53 que el error respecto a la referencia del INAMHI está por debajo del 5%, teniendo mayor similitud con el comportamiento del nodo 6.

Tabla 53

Calculo del error entre los datos medidos de UV con INAMHI.

	UV	Error UV(%)
Nodo 1	2,6	4,93
Nodo 6	2,9	4,24
INAMHI	2,8	

En la figura 84 se muestran las mediciones de los nodos que tienen la variable CO₂ en su configuración, de esta gráfica se puede apreciar que los nodos 1 y 4 tienen la menor concentración de CO₂ dado que se encuentran instalados en sectores con gran ventilación y lejos de afluencia de personas y vehículos, los nodos 2, 3, 5 y 6 presentan mayor concentración de CO₂ debido a su ubicación, sin embargo, se encuentran por debajo de nivel promedio especificado por Oyarzún (2010) para lugares abiertos y cerrados.

Por último, solo existe un nodo con la medición de pH (nodo 4) y se presenta en la gráfica 86 la respuesta a la medición con un intervalo de 12 horas. Según la tabla 37, el pH se mantiene dentro de los valores esperados dado el ambiente de una cisterna, de esta manera siendo aceptable para el consumo y por lo tanto no representa riesgos para la salud.



Figura 83. Datos de temperatura y humedad comparadas con base de INAMHI. a) Nodo 1, b) Nodo 2, c) Nodo 3, d) Nodo 4, e) Nodo 5, f) Nodo 6

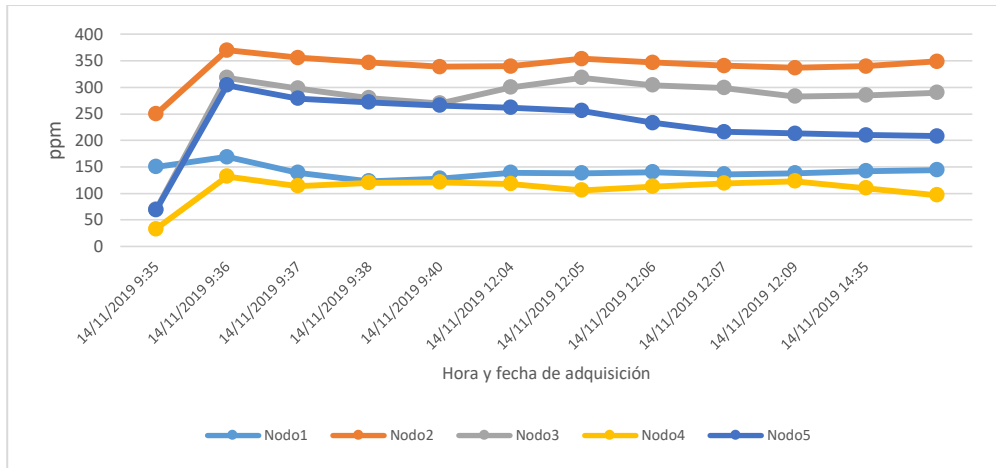


Figura 84. Datos de variable CO2

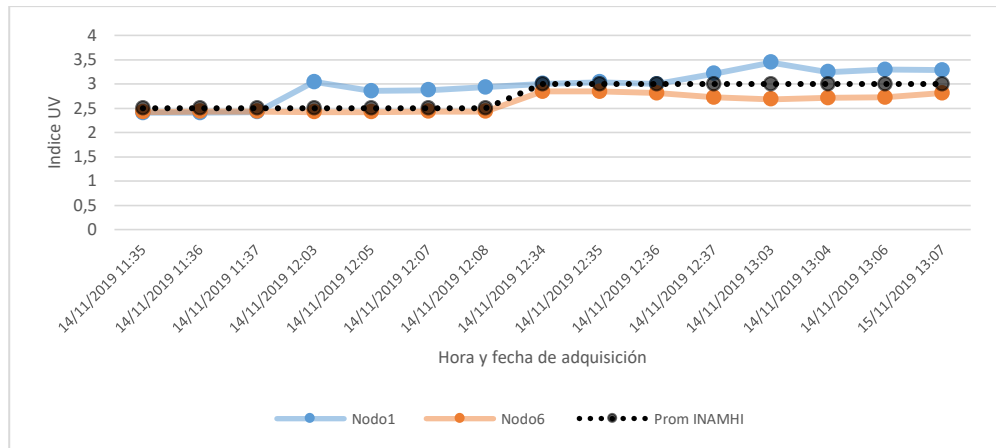


Figura 85. Datos de variable índice UV

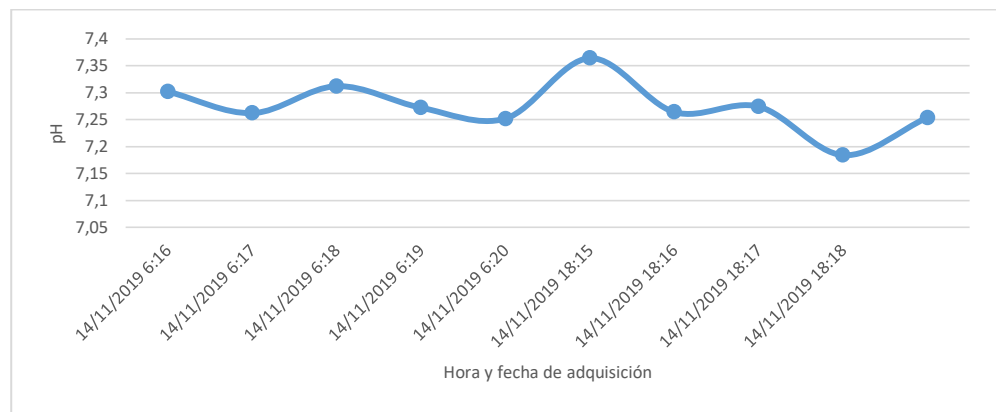


Figura 86. Datos de variable pH.

5.2.2. Recolección de datos en el Gateway

La prueba 2 especificada en el protocolo de pruebas se lleva a cabo con el objetivo de verificar la conexión de cada nodo con el Gateway y para comprobar la correcta recepción de los valores sensados y enviadas desde el nodo final.

Realizando los pasos descritos en la prueba 2 se obtiene el resultado de la figura 87 donde se muestra la estructura de los datos recibidos, al inicio se tiene el identificador, a continuación se observan los datos de las variables separados por una barra vertical.



Figura 87. Estructura de los datos recibidos.

El Gateway permite administrar los seis nodos a través de un identificador colocado en la cabecera de la trama, conforme al diseño esta es la única manera de identificar el origen del paquete enviado, dicho identificador se especifica en la tabla 54 de acuerdo al nodo que corresponde.

Tabla 54

Identificador del nodo

Identificador	Nodo
N1	Nodo 1 – CICTE
N2	Nodo2 – Bloque D
N3	Nodo 3 – Residencia
N4	Nodo 4 – Cisterna 1

CONTINÚA →

N5	Nodo 5 – Bar
N6	Nodo 6 – Entrada

Luego de que el Gateway recibe el paquete procede a extraer los datos de las variables y a través de la petición HTTP establece la comunicación en capa 3 – Red, direccionando los datos al servidor apuntando al archivo `conexion<número_nodo>.php`, en la figura 88 se muestra el esquema de cambio de capa en la transmisión de datos.

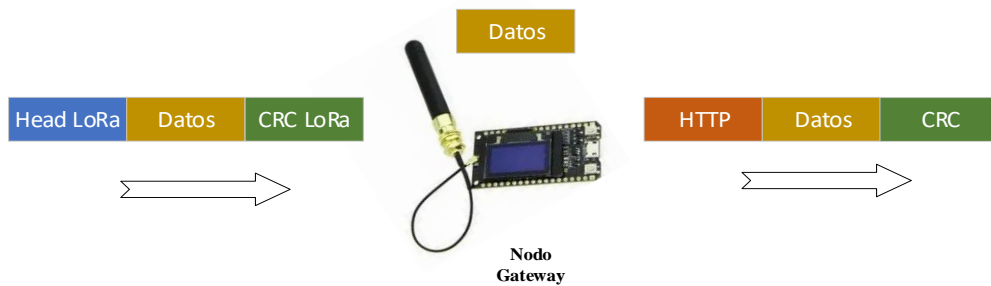


Figura 88. Esquema de formato de paquete en la etapa de transmisión

La figura 89, muestra la comparación de los datos recibidos por el Gateway con los datos enviados por el nodo.



Figura 89. Comparación entre los datos enviados y datos recibidos.

a) Datos enviados por el nodo 1, b) Datos recibidos por el Gateway

Se observa que los datos de las variables enviadas por el nodo son los mismos que se reciben por el Gateway, por consiguiente se puede corroborar que no se presentan pérdidas ni distorsión en la transmisión de datos para los nodos ubicados a diferentes distancias.

Este proceso se repite para todos los nodos con sus respectivas variables, donde cambia el identificador de cabecera.

5.2.3. Conectividad

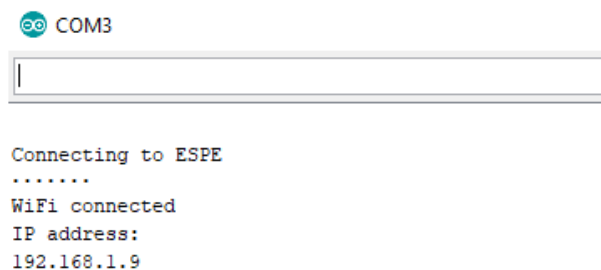
Se requiere de una conexión Wi-Fi con acceso a Internet para poder enviar los datos de las variables hacia una base de datos alojada en la nube, por tal motivo se aplica el procedimiento de la prueba 3 del protocolo especificado en la sección 4.6.

En el programa de Arduino encargado de la recepción de datos se especifica el nombre y la clave de la red Wi-Fi a la que posteriormente se conectara, como se observa en la figura 90.

```
const char* ssid      = "ESPE";
const char* password = "*****";
```

Figura 90. Nombre y clave de la red Wi-Fi

Se conecta el nodo Gateway a un computador a través del cable USB y se procede a abrir el monitor serie en el cual se observa un mensaje afirmativo en el caso de conectarse a la red asignándole una dirección IP al nodo Gateway (ver figura 91).



```
COM3

Connecting to ESPE
.....
WiFi connected
IP address:
192.168.1.9
```

Figura 91. Dirección IP del nodo Gateway

En la configuración de la red Wi-Fi del router se puede verificar el número de dispositivos conectados a la red, la dirección IP y la dirección MAC, como se observa en la figura 92. En (a) se puede comprobar la dirección IP que fue asignada al nodo Gateway y en (b) la dirección MAC que pertenece a la compañía Espressif Inc dedicada a la distribución del chip ESP32.

Nombre del dispositivo	Dirección IP	Dirección física (MAC)
Desconocido	192.168.1.9	24:0a:c4:30:95:24

a)

Enter a MAC Address

24:0a:c4:30:95:24

Espressif Inc.

b)

Figura 92. Configuración de la red Wi-Fi.

a) Dirección IP del nodo Gateway, b) Dirección MAC del módulo LoRa

Con un computador conectado a la misma red se procede a enviar una petición *ICMP* a través del comando *ping* hacia la dirección IP 192.168.1.9 especificada en la figura 93. Dando como resultado el envío y recepción de 20 paquetes lo que indica 0% paquetes perdidos, además los tiempos aproximados de ida y vuelta de un paquete es 5ms como mínimo, 350ms como máximo y un promedio de 237ms; de esta manera verificando la conexión entre el nodo Gateway y la red Wi-Fi.

Con el fin de verificar la latencia del enlace se monitorea el ping a la IP 192.168.1.9 durante un periodo de 3 horas, según se muestra en la figura 94 se observan los tiempos de respuesta ICMP oscilando con picos de hasta 300ms, en este caso corresponden a un canal inalámbrico.


```

C:\Users\fabrizio>ping 192.168.1.9 -t

Haciendo ping a 192.168.1.9 con 32 bytes de datos:
Respuesta desde 192.168.1.9: bytes=32 tiempo=265ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.9: bytes=32 tiempo=210ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.9: bytes=32 tiempo=242ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.9: bytes=32 tiempo=264ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.9: bytes=32 tiempo=270ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.9: bytes=32 tiempo=179ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.9: bytes=32 tiempo=307ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.9: bytes=32 tiempo=5ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.9: bytes=32 tiempo=350ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.9: bytes=32 tiempo=160ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.9: bytes=32 tiempo=58ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.9: bytes=32 tiempo=196ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.9: bytes=32 tiempo=212ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.9: bytes=32 tiempo=240ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.9: bytes=32 tiempo=252ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.9: bytes=32 tiempo=267ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.9: bytes=32 tiempo=288ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.9: bytes=32 tiempo=318ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.9: bytes=32 tiempo=327ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.1.9: bytes=32 tiempo=346ms TTL=64

Estadísticas de ping para 192.168.1.9:
    Paquetes: enviados = 20, recibidos = 20, perdidos = 0
    (0% perdidos),
    Tiempo aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
        Mínimo = 5ms, Máximo = 350ms, Media = 237ms

```

Figura 93. Ping computadora conectada a la red y nodo Gateway.

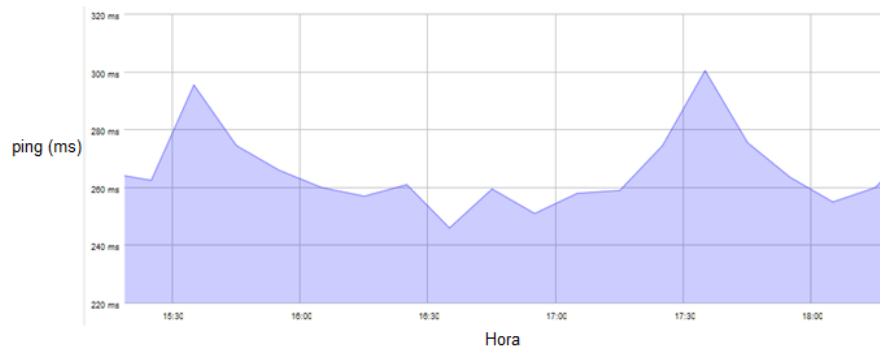


Figura 94. Latencia del canal inalámbrico.

De igual forma la conexión entre la red y el servidor se comprueba por medio de una prueba ICMP a través del comando ping al dominio *smartuniversity.tech* o a su vez a la IP 213.190.6.87 que es donde está apuntando el dominio del servidor, en la figura 95 se muestra la conexión al servidor con tiempos de respuesta de hasta 94ms, tiempo que depende del estado de la red interna y las características del enlace dado por el ISP (Proveedor de servicios de internet.)

```

C:\Users\fabrizio>ping smartuniversity.tech

Haciendo ping a smartuniversity.tech [213.190.6.87] con 32 bytes de datos:
Respuesta desde 213.190.6.87: bytes=32 tiempo=110ms TTL=47
Respuesta desde 213.190.6.87: bytes=32 tiempo=94ms TTL=47
Respuesta desde 213.190.6.87: bytes=32 tiempo=96ms TTL=47
Respuesta desde 213.190.6.87: bytes=32 tiempo=99ms TTL=47

Estadísticas de ping para 213.190.6.87:
    Paquetes: enviados = 4, recibidos = 4, perdidos = 0
    (0% perdidos),
    Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
        Mínimo = 94ms, Máximo = 110ms, Media = 99ms

```

Figura 95. Ping entre un dispositivo de la red hacia el servidor.

Para verificar el tránsito de la red para acceder al servidor se usa el comando *tracert* para conocer el número de saltos hasta llegar al destino, en este caso como se observa en la figura 96 toma un total de 18 saltos, donde se observan redes privadas que no son visibles debido al uso de algún dispositivo firewall para cyber seguridad, la cantidad de saltos depende de la infraestructura del proveedor de servicios.

```

C:\Users\fabrizio>tracert smartuniversity.tech

Traza a la dirección smartuniversity.tech [213.190.6.87]
sobre un máximo de 30 saltos:

  1  <1 ms    1 ms    <1 ms    192.168.1.1
  2  1 ms     1 ms     1 ms     10.10.1.1
  3  *         *         *         Tiempo de espera agotado para esta solicitud.
  4  *         *         *         Tiempo de espera agotado para esta solicitud.
  5  *         *         *         Tiempo de espera agotado para esta solicitud.
  6  *         *         *         Tiempo de espera agotado para esta solicitud.
  7  *         *         *         Tiempo de espera agotado para esta solicitud.
  8  *         *         *         Tiempo de espera agotado para esta solicitud.
  9  89 ms    88 ms    89 ms    be2784.ccr41.atl01.atlas.cogentco.com [154.54.28.105]
 10 85 ms    99 ms   107 ms   be2847.ccr41.atl04.atlas.cogentco.com [154.54.6.102]
 11 96 ms    86 ms    87 ms    38.122.47.118
 12 94 ms    95 ms   100 ms   74.112.175.238
 13 90 ms    98 ms   100 ms   74.112.174.195
 14 93 ms    98 ms    94 ms   74.112.174.245
 15 98 ms    99 ms    93 ms   ashv1.main-hosting.com [208.69.231.10]
 16 *         *         *         Tiempo de espera agotado para esta solicitud.
 17 *         *         *         Tiempo de espera agotado para esta solicitud.
 18 99 ms    99 ms   100 ms   213.190.6.87

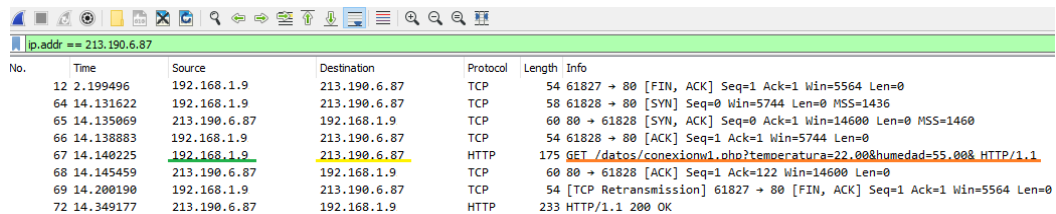
Traza completa.

```

Figura 96. Traza hacia el servidor "smartuniversity.tech"

Posteriormente, se captura el tráfico en la red inalámbrica con el software Wireshark, obteniendo información como se observa en la figura 97. De color verde se encuentra subrayado la IP del

Gateway, de amarillo la dirección IP del dominio en donde se encuentra alojado la base de datos y de color naranja un ejemplo de los datos de las variables enviadas a través del método GET programado en php para el almacenamiento de los datos, como se indicó en la figura 88 en este punto el Gateway ya realizó la petición HTTP motivo por el cual ya no se presenta el identificador sino se muestran los datos de la variables y el archivo conexión<número_nodo>.php que direcciona a la tabla de la BD del servidor.



No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
12	2.199496	192.168.1.9	213.190.6.87	TCP	54	61827 → 80 [FIN, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=5564 Len=0
64	14.131622	192.168.1.9	213.190.6.87	TCP	58	61828 → 80 [SYN] Seq=0 Win=5744 Len=0 MSS=1436
65	14.135069	213.190.6.87	192.168.1.9	TCP	60	80 → 61828 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=14600 Len=0 MSS=1460
66	14.138883	192.168.1.9	213.190.6.87	TCP	54	61828 → 80 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=5744 Len=0
67	14.140225	192.168.1.9	213.190.6.87	HTTP	175	GET /datos/conexion1.php?temperatura=22.00&humedad=55.00 HTTP/1.1
68	14.145459	213.190.6.87	192.168.1.9	TCP	60	80 → 61828 [ACK] Seq=1 Ack=122 Win=14600 Len=0
69	14.200190	192.168.1.9	213.190.6.87	TCP	54	[TCP Retransmission] 61827 → 80 [FIN, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=5564 Len=0
72	14.349177	213.190.6.87	192.168.1.9	HTTP	233	HTTP/1.1 200 OK

Figura 97. Captura del tráfico.

Finalmente, se usó la plataforma The Things Network (TTN) para observar la trama metadata del tráfico que circula entre el Gateway y la red Wi-Fi, de donde se especifica que el tipo de modulación es LoRa y como esta subrayada de color rojo en la figura 98, además se obtiene los parámetros de modulación para la configuración DR0 especificados en la tabla 18 subrayados de color amarillo.



```

Metadata
{
  "time": "2019-09-19T17:08:21.121164931Z",
  "modulation": "LORA",
  "data_rate": "SF12BW125",
  "coding_rate": "4/5",
}

```

Figura 98. Trama Metadata.

Con esto se verifica que el sistema está conectado tanto a nivel de LoRa como WiFi.

5.2.4. Almacenamiento

Para verificar el método de almacenamiento de las variables medidas en la base de datos alojada en la nube, se lleva a cabo los pasos especificados en la prueba 4 del protocolo de pruebas del capítulo 4.

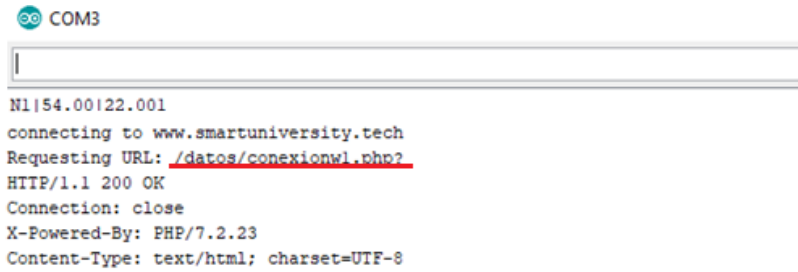
Como se especificó en la sección 4.4.3.3, se utilizó Hostinger como proveedor de alojamiento web y registrador de dominio de Internet, es aquí donde se almacenan los datos enviados por el nodo Gateway en una base Mysql. En la figura 99 se observa la estructura de la base de datos según el diseño previo de entidad – relación de la figura 66.

#	Nombre	Tipo	Cotejamiento	Atributos	Nulo	Predeterminado	Comentarios	Extra	Acción
1	id	int(11)			No	Ninguna		AUTO_INCREMENT	Cambiar Eliminar Más
2	temperatura	int(11)			No	Ninguna			Cambiar Eliminar Más
3	humedad	int(11)			No	Ninguna			Cambiar Eliminar Más
4	fecha	datetime			No	current_timestamp()			Cambiar Eliminar Más

Acción	Nombre de la clave	Tipo	Único	Empaquetado	Columna	Cardinalidad	Cotejamiento	Nulo	Comentario
Editar Eliminar	PRIMARY	BTREE	SI	No	id	0	A	No	

Figura 99. Login de Hostinger.

Realizando los pasos descritos en la sección 4.6.4. Prueba 4, se obtiene el resultado de la figura 100 donde se puede verificar el nombre del archivo PHP subrayado de color rojo, dicho programa realiza el almacenamiento en la base de datos y está alojado en el gestor de archivos del servidor Hostinger.



```

COM3
N1|54.00122.001
connecting to www.smartuniversity.tech
Requesting URL: /datos/conexionw1.php?
HTTP/1.1 200 OK
Connection: close
X-Powered-By: PHP/7.2.23
Content-Type: text/html; charset=UTF-8

```

Figura 100. Nombre de archivo php.

Dependiendo del identificador colocado en la cabecera de los paquetes (figura 100) direcciona a un archivo php distinto, como se muestra en la tabla 55. De esta manera comprobando que se almacenen los datos en la base correspondiente a cada uno de los nodos.

Tabla 55

Identificador y nombre del archivo php.

Identificador	Nombre del archivo
N1	conexionw1.php
N2	conexionw2.php
N3	conexionw3.php
N4	conexionw4.php
N5	conexionw5.php
N6	conexionw6.php

Posteriormente se procede a comparar el tiempo en el que envía el Gateway el paquete y el tiempo en la que se registra en la base de datos, como se observa en la figura 101. En a) se observa que el tiempo registrado es el 20/11/2019 13:19:22 mientras en b) se tiene 20/11/2019 13:19:27 teniendo una diferencia de 5 segundos en promedio para el almacenamiento en la base.

```

N1|51.00|22.001
connecting to www.smartuniversity.tech
Requesting URL: /datos/conexionw1.php?
HTTP/1.1 200 OK
Connection: close
X-Powered-By: PHP/7.2.23
Content-Type: text/html; charset=UTF-8
Content-Length: 0
Date: Wed, 20 Nov 2019 13:19:22 GMT
Server: LiteSpeed
    
```

a)

temperatura	humedad	fecha
22	51	2019-11-20 13:19:27

b)

Figura 101. Comparación de tiempos. a) Monitor Serie Gateway, b) Base de datos

Usando el software Wireshark se procede a capturar el tráfico entre el nodo Gateway y la base de datos alojada en la nube. En la figura 102 se observa la estructura y los datos de las variables enviadas por el nodo, que en este caso son: temperatura, humedad y calidad de aire; a través del método GET en el archivo conexionw1.php para la base de datos que corresponde al nodo 1.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
12	2.199496	192.168.1.9	213.190.6.87	TCP	54	61827 → 80 [FIN, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=5564 Len=0
64	14.131622	192.168.1.9	213.190.6.87	TCP	58	61828 → 80 [SYN] Seq=0 Win=5744 Len=0 MSS=1436
65	14.135069	213.190.6.87	192.168.1.9	TCP	60	80 → 61828 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=14600 Len=0 MSS=1460
66	14.138883	192.168.1.9	213.190.6.87	TCP	54	61828 → 80 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=5744 Len=0
67	14.140225	192.168.1.9	213.190.6.87	HTTP	175	GET /datos/conexionw1.php?temperatura=22.008&humedad=55.008 HTTP/1.1
68	14.145459	213.190.6.87	192.168.1.9	TCP	60	80 → 61828 [ACK] Seq=1 Ack=122 Win=14600 Len=0
69	14.200190	192.168.1.9	213.190.6.87	TCP	54	[TCP Retransmission] 61827 → 80 [FIN, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=5564 Len=0
72	14.349177	213.190.6.87	192.168.1.9	HTTP	233	HTTP/1.1 200 OK

Figura 102. Captura de tráfico.

Posteriormente, se puede verificar el almacenamiento de los datos en la base especificada en conexiónw1.php, como se observa en la figura 103.

id	temperatura	humedad	fecha
1129	22	51	2019-11-20 13:19:27

Figura 103. Almacenamiento en la base de datos.

De esta manera se verifica los mismos datos enviados en la base de datos y se confirma su funcionamiento.

5.2.5. Duración de la batería

Los siete nodos que están distribuidos en toda la superficie de la universidad cuentan con una batería de 5V y 15000 mAh para la alimentación del módulo y los sensores. En el capítulo 3 sección 3.5.4, se realizó un análisis del tiempo estimado de vida de dichas baterías pero en diferentes condiciones, ya que durante la medición no se utilizó sensores. Por lo tanto, se lleva a cabo la prueba 7 propuesta en el protocolo de pruebas.

En la tabla 56 se muestra el consumo de corriente máximo de todos los sensores obtenido a través del datasheet de cada uno de ellos; también se especifica el tiempo de sleep entre transmisiones (figura 61).

Tabla 56

Valores de corriente y tiempo de los sensores.

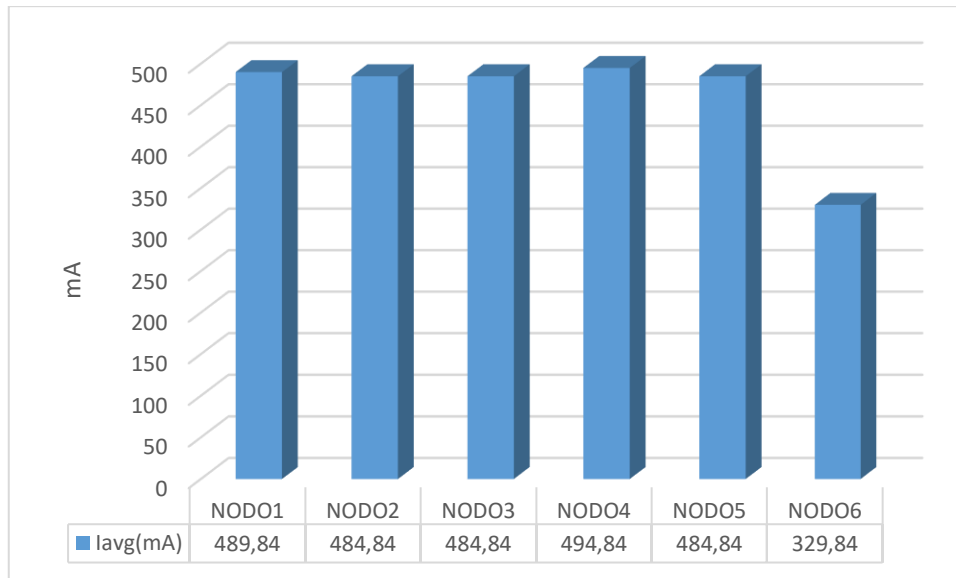
	DHT11	MQ135	ML8511	PH
I_{max} (mA)	2,5	160	5	10
t_{sleep} (min)	30	120	30	720

Al consumo energético calculado en la sección 3.5.4 es necesario sumarle el consumo de cada uno de los sensores, con el fin de estimar el tiempo de vida de los siete nodos; cabe aclarar que este va a ser distinto dependiendo del nodo, ya que poseen una diferente distribución de acuerdo a las variables de medición (tabla 50). También hay que tener en cuenta el número de transmisiones que se realiza ya que para las variables de temperatura, humedad y UV envían cinco datos cada 30 min, para el caso de calidad de aire se espera la recepción de cinco datos cada dos horas y por último para el pH se enviarán cinco datos cada doce horas.

En la tabla 57 se muestra los valores de corriente media calculados a través de la ecuación 4 añadiendo la corriente máxima de consumo de los sensores especificados en la tabla 56.

Tabla 57

Corriente media de los distintos nodos.



Como se puede observar en la tabla 57 el consumo de corriente es el mismo para el nodo2, nodo 3 y nodo 5 esto es debido a que poseen la mismas distribución de sensores, el nodo 1 y el nodo 4 tienen tres sensores cada uno por eso presentan los valores más altos de consumo de corriente y por último el nodo 6 con sensores DHT11 y ML8511 presenta los valores más bajos de consumo de corriente media.

En la tabla 58 muestra el tiempo de vida estimado de las baterías, calculado a través de la ecuación (5), con el uso de una batería de capacidad 15000 mAh.

Tabla 58

Tiempo de vida de las baterías calculado.

	NODO1	NODO2	NODO3	NODO4	NODO5	NODO6
Vida batería (días)	30,62	30,94	30,94	30,31	30,94	45,48

De acuerdo a las condiciones anteriormente mencionadas y a los nuevos cálculos realizados en función del sistema, todos los nodos presentan un tiempo de vida de la batería en un rango de 30,3 a 30,9 días, con excepción del nodo 6 que al poseer un menor consumo energético el tiempo de vida de la batería se extiende hacia los 45 días; de forma empírica se validó la duración la batería durante el tiempo de toma de datos con el uso de la página web y un permanente monitoreo, ya que si las baterías se descargan el módulo se desconecta de la red y por ende los datos no se almacenan en la base de datos impidiendo la actualización de las gráficas, lo cual se toma como indicativo de que la batería se encuentra descargada.

Las power bank usadas en la alimentación de los dispositivos cuentan con leds identificadores de carga, cuando el led es azul está cargada al 100%, verde 75%, amarillo 50% y rojo 25%. La primera semana de la implementación el led azul estaba encendido, conforme avanzaba la segunda semana el led cambio a color verde como se observa en la figura 104, posteriormente en la tercera semana cambio a color amarillo y por último a color rojo.



a)



b)

Figura 104. Indicadores de estado de carga de batería. a) Carga al 75%, b) Carga al 50 %.

Cinco de los seis nodos implementados tienen un consumo de corriente similar, por tal motivo se toma como referencia el nodo 1. En la gráfica 105 se observa el consumo medio estimado y el real obtenido cada semana a través de los identificadores de carga de las power bank. Las baterías solo duraron 28 días de los 30,6 días calculados, la disminución del tiempo es debido a que en condiciones reales las baterías no cumplen con el valor nominal y además las conexiones físicas provocan pérdidas que influyen en la disipación de la energía por medio del calor.

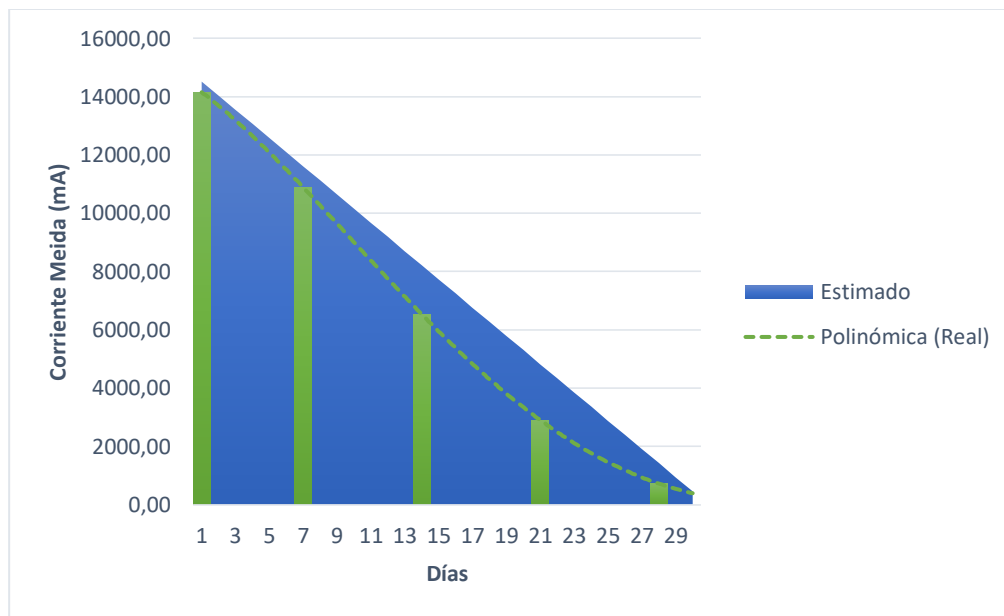


Figura 105. Consumo estimado y real de la batería del nodo 1.

5.2.6. Radio de cobertura.

Con el objetivo de analizar el radio de cobertura entre los seis nodos y el Gateway se lleva a cabo la prueba 6. Se instala el Gateway en el sexto piso del edificio administrativo, posteriormente se colocaron los nodos con sus respectivos sensores en varios lugares determinados del campus matriz de la ESPE (figura 67).

En la figura 106 se observa la posición de cada uno de los nodos y los niveles de potencia de señal recibida, especificada en el capítulo 3 en la sección 3.6. Recordando que cada uno de los módulos fueron configurados con DR0 que posee parámetros SF=12 y BW=125kHz, asegurando de esta manera el máximo radio de cobertura de cada uno de los dispositivos.



Figura 106. Radio de Cobertura

Solo para esta prueba se procedió añadir la línea de código `rss_i = LoRa.packetRssi()` en el programas de recepción LoRa, para obtener los valores de RSSI de cada nodo en cada una de las ubicaciones a través del monitor serie, la figura 107 muestra un ejemplo de la información entregada.



```

COM3
rssi:-125
N1151.00122.001
connecting to www.smartuniversity.tech
Requesting URL: /datos/conexionwl.php?
HTTP/1.1 200 OK
Connection: close

```

Figura 107. Monitor serie valores de RSSI.

A continuación, en la tabla 59 se muestran los valores de RSSI medidos en cada uno de los nodos.

Tabla 59

Valores de RSSI medidos en los diferentes nodos.

	RSSI
Nodo1-CICTE	-125dBm
Nodo2-Bloque D	-119dBm
Nodo3-Residencia	-115dBm
Nodo4-Cisterna	-118dBm
Nodo5-Bar	-122dBm
Nodo6-Entrada	-114dBm

Se puede observar que tres de los nodos (nodo 3, nodo 4 y nodo 6) se encuentran dentro de los rangos de -114dBm y -118dBm considerados como la transmisión más óptima y sin pérdida de paquetes; posteriormente dos nodos más (nodo 2 y nodo 5) se encuentran dentro del rango de color amarillo que posee valores de RSSI entre -119dBm y -123dBm rango en el cual se puede presentar hasta un 2% de paquetes perdidos de acuerdo al análisis realizado en la sección 3.6 a través de la

figura 31, y por último solo el nodo 1 se encuentra en la zona roja en la cual durante las pruebas del capítulo 3 se presentaron una pérdida de paquetes de hasta un 4%.

Durante el mes de la implementación de la red se esperaba un total de 6195 datos para todos los nodos, en la tabla 60 se muestra el número de datos almacenados y el porcentaje de paquetes recibidos.

Tabla 60

Numero de datos y porcentaje de paquetes recibidos

	N° DATOS	% de Paquetes Recibidos
Nodo1-CICTE	5692	91,9
Nodo2-Bloque D	5790	93,5
Nodo3-Residencia	6077	98,1
Nodo4-Cisterna	6016	97,1
Nodo5-Bar	5906	95,3
Nodo6-Entrada	6123	98,8

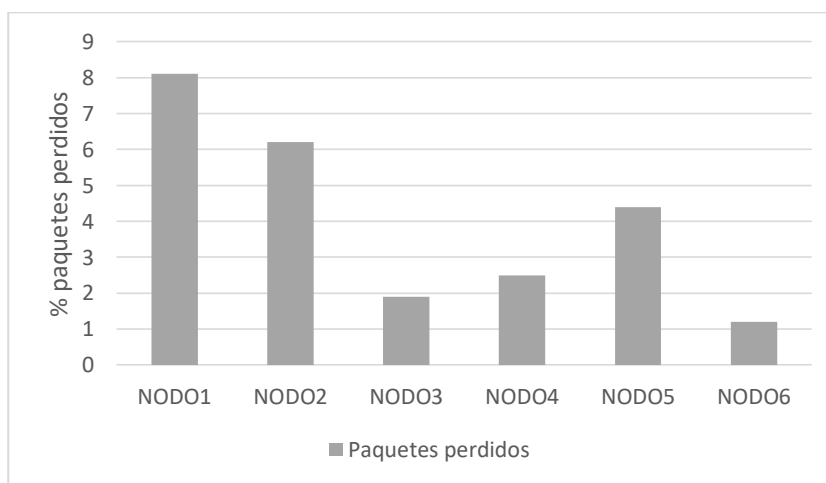


Figura 108. Paquetes perdidos por Nodo

Se puede observar en la figura 108 que existe una notable diferencia entre los resultados obtenidos en la sección 3 con los datos obtenidos durante la implementación ya que los nodos 3,4 y 6 presentan hasta un 3% de paquetes perdidos, los nodos 2 y 5 hasta un 7% y el nodo 1 un 8% ;

este aumento en el número de paquetes perdidos es causado debido a la carga de datos que maneja el Gateway ya que implementada toda la red se produjo la colisión de datos debido a que en ciertos horarios varios nodos envían al mismo tiempo, y no a la intensidad de la señal recibida ya que los valores de RSSI se encuentran dentro de los rangos establecidos como se muestran en la tabla 59.

5.2.7. Sistema de monitoreo de variables

Posterior a la implementación de la red LPWAN en el campus matriz de la ESPE, se lleva a cabo la prueba 7 especificada en el protocolo de pruebas con el fin de comprobar su funcionamiento y la visualización de los datos a través de la página web.

Para visualizar los datos que miden los sensores de los diferentes nodos y que posteriormente se almacenan en la base de datos del sistema, se hace uso de una plataforma web. Con el objetivo de mostrar de forma más sencilla y gráfica los datos medidos de las cinco variables: temperatura, humedad, calidad de aire, uv y pH, y de esta forma poder realizar un seguimiento en función del tiempo.

En la figura 109 se observa el acceso a la página web a través de la dirección <http://smartuniversity.tech>. Cabe indicar que se puede acceder usando cualquier navegador web.



Figura 109. Página de inicio de la plataforma web

Al ingresar, se despliega una ventana para la visualización de las zonas de estudio y sus respectivas ubicaciones (figura 110).

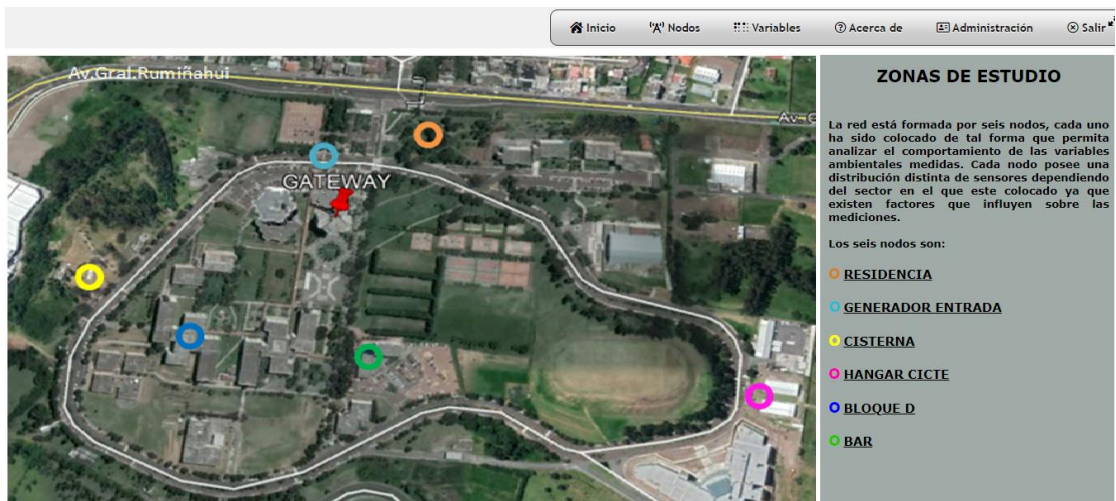


Figura 110. Ubicación de los nodos de acuerdo al mapa de la universidad.

Al dar clic sobre cualquiera de los nodos se observa las gráficas de las variables medidas, dependiendo de los sensores colocados en cada uno ellos.

La figura 111 muestra un ejemplo de los datos medidos por el nodo 1 – CICTE, para las variables: temperatura, humedad y radiación UV, junto con los datos recolectados del INAMHI para el día 28/11/2019.

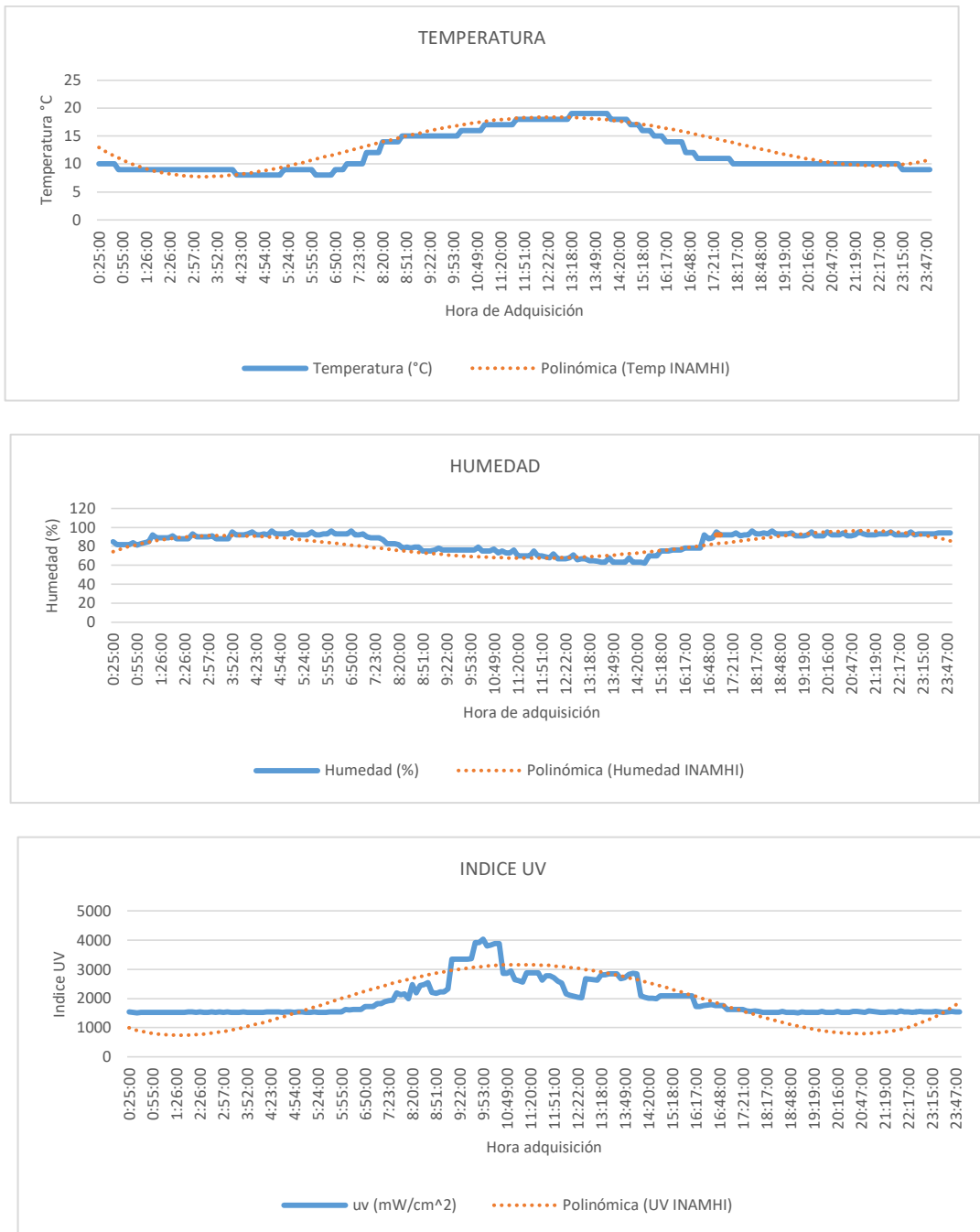


Figura 111. Gráfica de las variables del nodo 1.

5.1.1. Descarga y análisis de datos.

En este apartado se aplica la prueba 8, a través del botón *NODOS* se puede realizar el filtrado de las gráficas, especificando la fecha de inicio y final de toma de datos, como se observa en la figura 112.



Figura 112. Opción de filtrado de las gráficas por fechas.

La opción de descargar permite exportar la gráfica a cualquier tipo de archivo de los indicados en la figura 113.

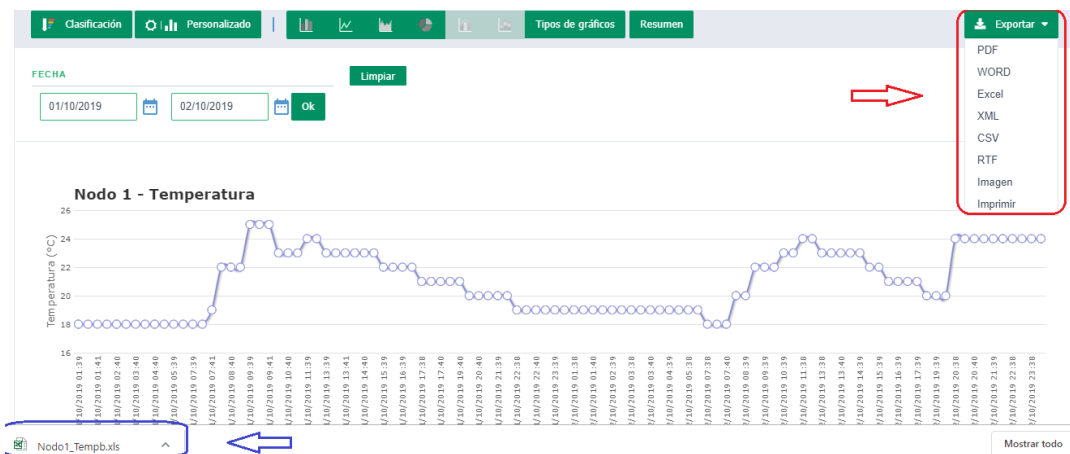


Figura 113. Opción exportar de la página web.

En la tabla 61 se observa el tamaño de cada uno de los tipos de archivos que permite la descarga la página web. Teniendo un tamaño mínimo de 4KB en tipo PDF, en el caso que se necesite un mejor manejo de los datos se recomienda utilizar Excel que tiene un tamaño de 8,88 KB.

Tabla 61

Tipo de archivo y tamaño de descarga de la página web.

Tipo de Archivo	Tamaño
PDF	4 KB
Word	50,5 KB
Excel	8,88 KB
XML	29,7 KB
Imagen PNG	54,7 KB

Se descarga el archivo en formato Excel como se observa en la figura 114, aquí se tiene la fecha y el valor de la variable dependiendo del nodo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Date	hour	minuto	Temperatura (°C)									
2	22/11/2019	00:25		8									
3	22/11/2019	00:26		8									
4	22/11/2019	00:27		8									
5	22/11/2019	00:28		8									
6	22/11/2019	00:29		8									
7	22/11/2019	00:55		8									
8	22/11/2019	00:56		8									
9	22/11/2019	00:57		8									
10	22/11/2019	00:58		8									
11	22/11/2019	00:59		8									
12	22/11/2019	01:25		8									
13	22/11/2019	01:26		8									

Figura 114. Archivo descargado

A continuación, se analiza las gráficas y los datos con el fin de verificar el funcionamiento de cada uno de los nodos y sus respectivos sensores. Los datos de las gráficas se descargan a través de la opción *exportar* de la plataforma, posteriormente se clasifican de acuerdo a las variables de medición y al periodo de transmisión comprendido entre el 15/11/2019 al 12/12/2019.

Es importante tomar en cuenta que los datos de las variables de temperatura, humedad y radiación UV van a ser influenciados por la posición de los nodos, ya que factores como edificaciones y vegetación cercana ayudan a la formación de sombras provocando cambios en la medición.

5.2.7.1. Temperatura

A) Tabulación y análisis de máximos y mínimos

Se empieza por la variable de temperatura, de la cual se calculó la media semanal de todas las muestras tomadas durante un mes de medición y posteriormente tabuladas en la tabla 62, también se obtuvo el dato máximo y mínimo con el fin de conocer el rango dentro del que se mueve la variable. Los valores más bajos de temperatura se encuentran en el nodo 1, 3, 4 y 6, ya que son nodos ubicados en el exterior, por lo contrario, los nodos 2 y 5 presentan valores más altos debido a que están ubicados en lugares cerrados.

Tabla 62

Variable de temperatura en los diferentes nodos.

	Nodo1			Nodo2			Nodo3			Nodo4			Nodo5			Nodo6		
	\bar{X}	M	n	\bar{X}	M	n	\bar{X}	M	n	\bar{X}	M	n	\bar{X}	M	n	\bar{X}	M	n
SEMANA1	11,12	22	5	14,14	20	11	11,40	20	7	12,62	23	8	13,75	22	9	11,93	22	5
SEMANA2	11,86	20	4	14,73	20	11	12,69	22	7	13,37	27	6	14,84	23	9	13,18	24	6
SEMANA3	11,57	21	6	14,01	21	11	12,00	21	7	12,46	21	7	15,65	22	12	12,70	23	7
SEMANA4	10,66	20	6	13,69	22	10	11,15	20	8	11,88	25	6	14,56	21	11	12,10	23	8

En la figura 115, se observan los valores diarios de temperatura de la primera semana con la información descrita en el anexo 2. Comparando las gráficas se puede observar que hay diferencia entre los sectores de medición dentro de la universidad ya que existen pequeños ecosistemas que alteran el comportamiento del entorno generando microclimas, como menciona Rodríguez (2017) en su trabajo.

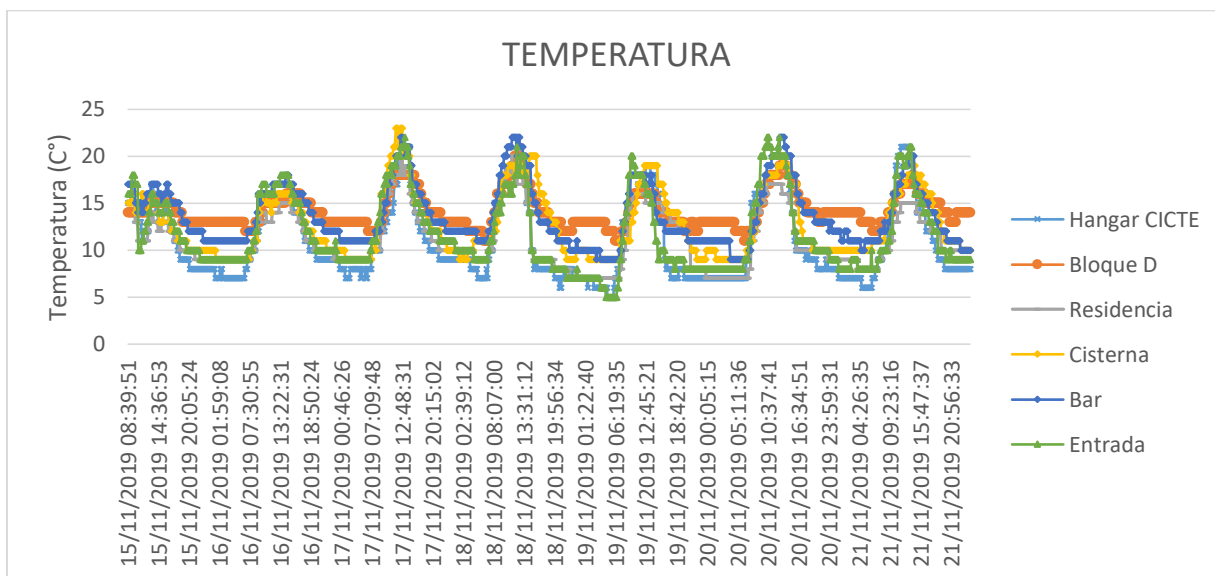


Figura 115. Valores de temperatura de la primera semana en los diferentes nodos

B) Análisis de correlación

Se usa el coeficiente de correlación (ρ) como indicador de la fuerza de la relación de los datos de un nodo a otro, con el fin de identificar semejanzas y diferencias entre zonas de estudios, se tomará en consideración $\rho > 0,9$ como correlación perfecta y $\rho > 0,7$ como correlación fuerte (Santabárbara, 2019).

Se realiza el análisis del coeficiente de correlación para los nodos que contienen la variable temperatura. Como se muestra en la tabla 63, los valores de correlación varían entre un rango de

$0,95 < \rho > 0,80$, teniendo cuatro puntos en los cuales la correlación se considera perfecta, por lo contrario, las demás presentan solo una correlación fuerte.

Tabla 63

Coefficientes de correlación de variable temperatura

	Hangar CICTE/Nodo1	Bloque D/Nodo2	Residencia/ Nodo3	Cisterna/ Nodo4	Bar/ Nodo5	Entrada/ Nodo6
Hangar CICTE/Nodo1	1					
Bloque D/Nodo2	0,812416426	1				
Residencia/Nodo3	0,917508392	0,85555922	1			
Cisterna/Nodo4	0,866429943	0,85122843	0,90920393	1		
Bar/Nodo5	0,892451117	0,80349665	0,89390418	0,8463097	1	
Entrada/Nodo6	0,951865658	0,822405	0,9161414	0,8619170	0,88128965	1

En la gráfica 116 se muestra las relaciones con mayor coeficiente de correlación $\rho > 0,9$.

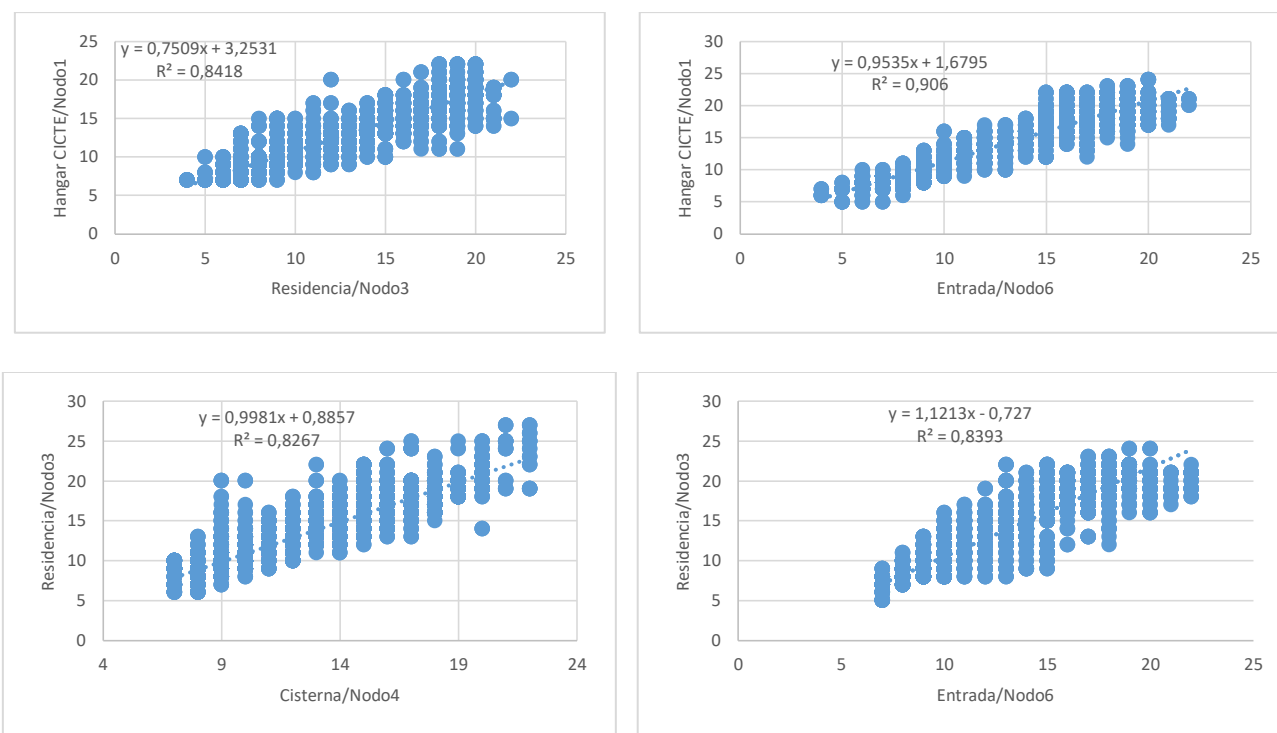


Figura 116. Correlaciones con $\rho > 0,9$

El nodo 1, 3, 4 y 6 están ubicados en espacios abiertos con vegetación a su alrededor y baja densidad de edificaciones, por tal motivo, la correlación entre estos nodos es considerada perfecta

ya que los valores de temperatura son muy parecidos entre sí. Por lo contrario, el nodo 2 y el nodo 5 están ubicados en ambientes cerrados, pero entre ellos solo existe una correlación fuerte debido a que el nodo 5 no está totalmente rodeado de edificaciones como es el caso del nodo 2.

5.2.7.2. Humedad

A) Tabulación y análisis de máximos y mínimos.

Se calculó la media semanal, máximo y mínimo, como se observa en la tabla 64, con el fin de visualizar el rango de variación de humedad. Tomando en cuenta los valores máximos registrados, el nodo 1 midió un valor de 108% de humedad siendo el mayor presente a diferencia de los demás nodos, el nodo 3 y 6 midieron valores máximos inferiores a 95%.

Tabla 64

Variable de humedad en los diferentes nodos.

	Nodo1			Nodo2			Nodo3			Nodo4			Nodo5			Nodo6		
	\bar{X}	M	n	\bar{X}	M	n	\bar{X}	M	n	\bar{X}	M	n	\bar{X}	M	n	\bar{X}	M	n
SEMANA1	86,56	108	48	86,60	103	56	90,40	94	62	89,70	102	45	90,53	103	48	87,06	95	38
SEMANA2	81,00	107	50	83,21	103	48	86,09	95	45	85,58	103	40	82,25	102	45	80,00	95	40
SEMANA3	89,06	108	61	91,45	103	51	89,42	94	61	93,93	103	58	89,27	103	51	82,79	95	36
SEMANA4	91,60	108	67	93,16	103	59	90,92	95	66	93,77	103	45	92,01	103	61	86,36	95	45

Es importante tomar en cuenta que factores externos como densidad de vegetación, edificaciones y las continuas lluvias presentes en las tardes y noches afectan los valores promedios obtenidos para los nodos.

En la figura 117 se observan la gráfica de los valores diarios de humedad de la primera semana obtenidas con la información descrita en el anexo 3.

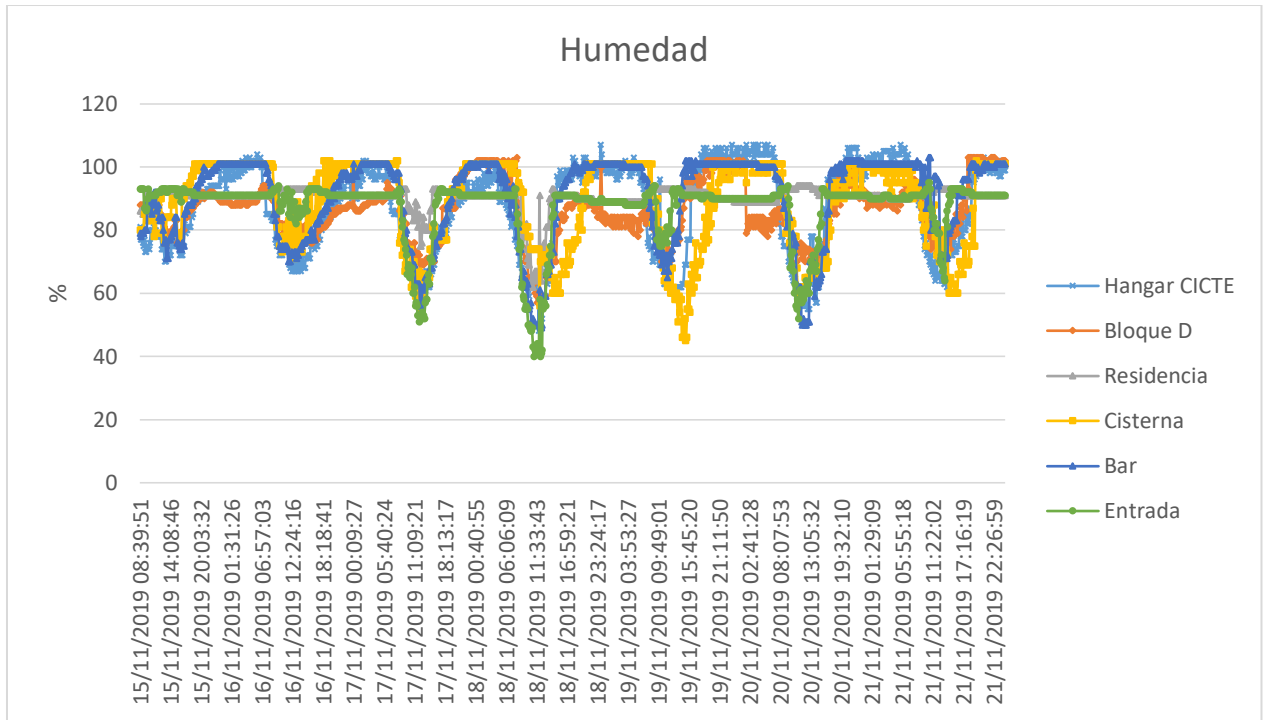


Figura 117. Distribución diaria temporal de humedad

B) Análisis de Correlación.

En la tabla 65 se muestra los coeficientes de correlación de los nodos para la variable humedad, se puede observar que la correlación varía entre $0,88 > \rho > 0,39$. Entre el nodo 1 y 3 existe una $\rho = 0,39$ la más baja registrada entre los nodos y $\rho = 0,88$ que se presenta entre el nodo 1 y 5 debido a que los valores de humedad son muy parecidos entre dichos nodos como se observa en la figura 117. Por lo tanto, el nodo 1 que está ubicado en el CICTE posee los porcentajes de humedad más altos registrados debido a que es un lugar abierto, lo contrario sucede en el nodo 3 y 6 que están colocados sobre un árbol y miden los porcentajes más bajos de humedad.

Tabla 65*Coefficientes de correlación de variable humedad*

	Hangar CICTE/Nodo1	Bloque D/Nodo2	Residencia/ Nodo3	Cisterna/ Nodo4	Bar/Nodo5	Entrada/ Nodo6
Hangar CICTE/Nodo1	1					
Bloque D/Nodo2	0,72449989	1				
Residencia/Nodo3	0,39760256	0,44586636	1			
Cisterna/Nodo4	0,76925291	0,71299658	0,46339893	1		
Bar/Nodo5	0,88788123	0,75233967	0,5181265	0,7745697 6	1	
Entrada/Nodo6	0,7124182	0,6701039	0,60844238	0,6770448	0,78528467	1

5.2.7.3. Calidad de Aire**A) Tabulación y análisis de máximos y mínimos.**

En la tabla 66 se puede observar los valores de la media, máximo y mínimo de CO₂ medidos en el ambiente para los cinco nodos. El nodo 2, 3 y 5 presentan los valores más altos de CO₂ debido a que se encuentran ubicados en lugares semi abiertos, con alta afluencia de personas y vehículos; y por el contrario, en el nodo 1 y 4 se presentan los valores más bajos ya que están ubicados en lugares ventilados y con vegetación que ayudan a disminuir los niveles de CO₂ en el ambiente.

Tabla 66*Variable de calidad de aire en los diferentes nodos.*

	Nodo1			Nodo2			Nodo3			Nodo4			Nodo5		
	\bar{X}	M	n	\bar{X}	M	n	\bar{X}	M	n	\bar{X}	M	n	\bar{X}	M	n
SEMANA1	79,20	169	0	324,18	383	250	260,50	451	64	73,65	132	9	182,43	466	0
SEMANA2	78,20	174	0	330,41	394	250	255,10	470	65	64,76	101	7	148,20	456	0
SEMANA3	109,63	220	0	315,00	400	250	256,58	431	98	79,95	128	10	202,14	329	2
SEMANA4	112,04	187	0	314,00	372	250	258,79	426	66	75,81	133	5	184,87	300	0

Posteriormente en la figura 118 se muestran las gráficas de las mediciones diarias de la primera semana obtenidas con la información del anexo 4.

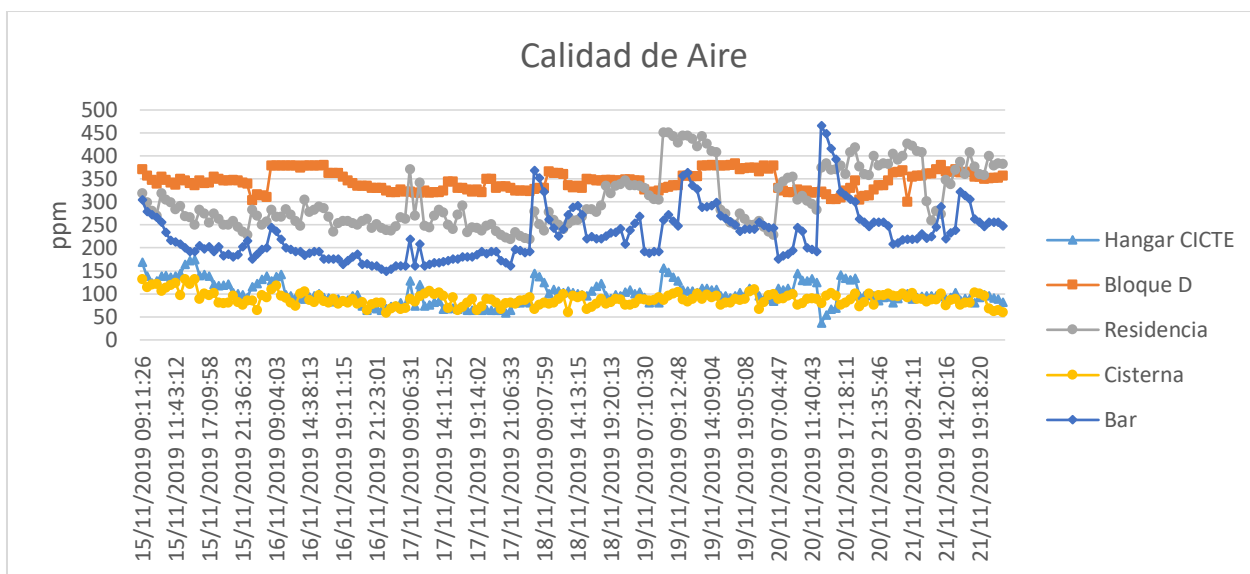


Figura 118. Distribución temporal calidad de aire.

Los valores de CO₂ medidos están dentro de los rangos establecidos por Oyarzún (2010), para un ambiente cerrado ventilado es de máximo 1000 ppm y para ambientes exteriores la concentración es de 300 ppm. De esta manera teniendo como el lugar más contaminado al nodo 2 con valores superiores a los 300ppm, el incremento es debido a que en días laborables la afluencia de personas es superior al de otros nodos, por lo contrario el nodo 4 registra los niveles más bajos de CO₂ ya que es un ambiente abierto con baja afluencia de persona y rodeado de vegetación que favorece a la disminución de la contaminación.

B) Análisis de correlación

En la tabla 67 se presentan los coeficientes de correlación para la variable CO₂, en donde se puede observar que existe una correlación fuerte ($\rho > 0,7$) entre el nodo 5 con el nodo 1, 3 y 4, producto de la semejanza de los valores de CO₂ especificados en la tabla 66. El valor de $\rho = 0,52$ es el

más pequeño registrado entre el nodo 1 y 2 esta diferencia es debido a la comparación de un lugar semi abierto (nodo 2) con un lugar totalmente abierto (nodo1).

Tabla 67

Coefficientes de correlación de variable CO2

	Hangar CICTE/Nodo1	Bloque D/Nodo2	Residencia/ Nodo3	Cisterna/ Nodo4	Bar/Nodo5
Hangar CICTE/Nodo1	1				
Bloque D/Nodo2	0,52357251	1			
Residencia/Nodo3	0,62272802	0,60658935	1		
Cisterna/Nodo4	0,67801998	0,60165135	0,65007545	1	
Bar/Nodo5	0,73907846	0,62047943	0,73824782	0,7331971	1

En la figura 119 se observan la correlación fuerte ($\rho > 0,7$) entre el nodo 5 con los nodos 1, 3 y 4.

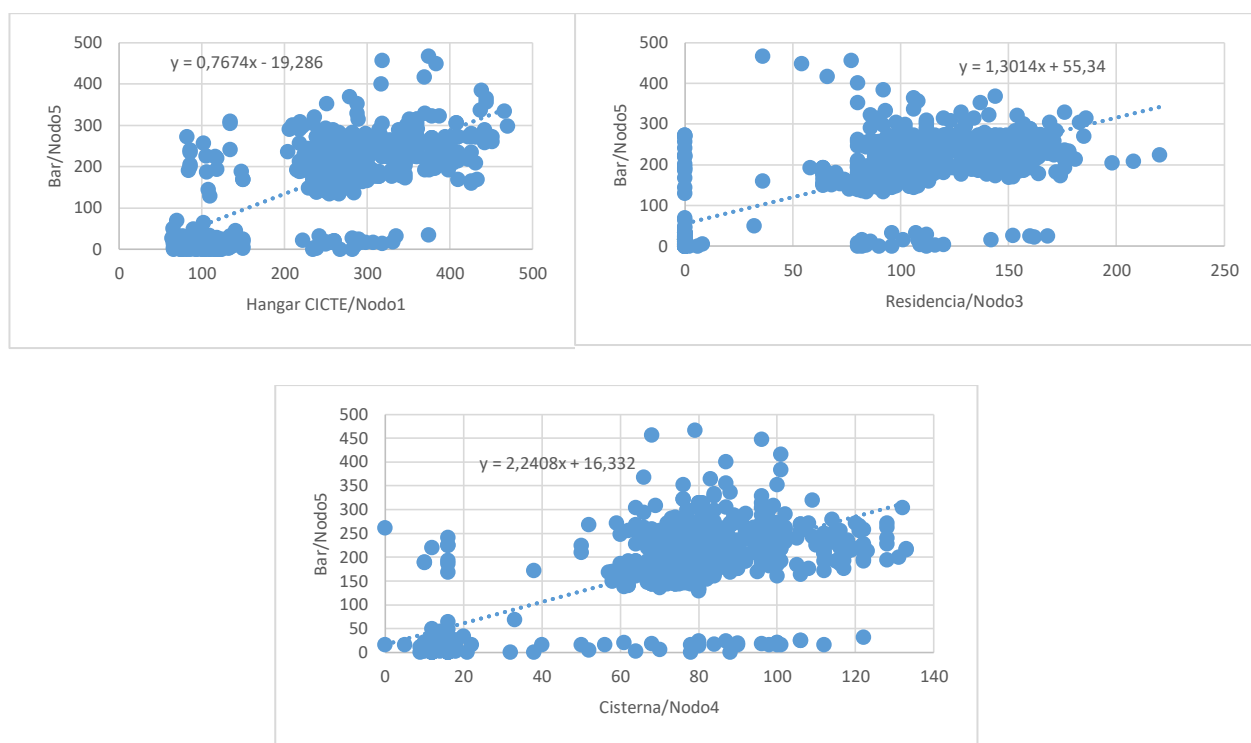


Figura 119. Correlaciones con $\rho > 0,7$

5.2.7.4. Radiación UV

A) Tabulación y análisis de máximos y mínimos.

En la tabla 68 se puede observar los valores de radiación UV presentes en el nodo 1 y nodo 6. Se puede observar que existe mayor radiación UV en el nodo 1 ya que está ubicado en un lugar totalmente abierto, por lo contrario el nodo 6 presenta los valores más bajos ya que tiene influencia de sombras provocadas por la vegetación o edificios altos que hay a su alrededor.

En la figura 120 se muestran las gráficas de las mediciones diarias durante la primera semana obtenidas con la información del anexo 5.

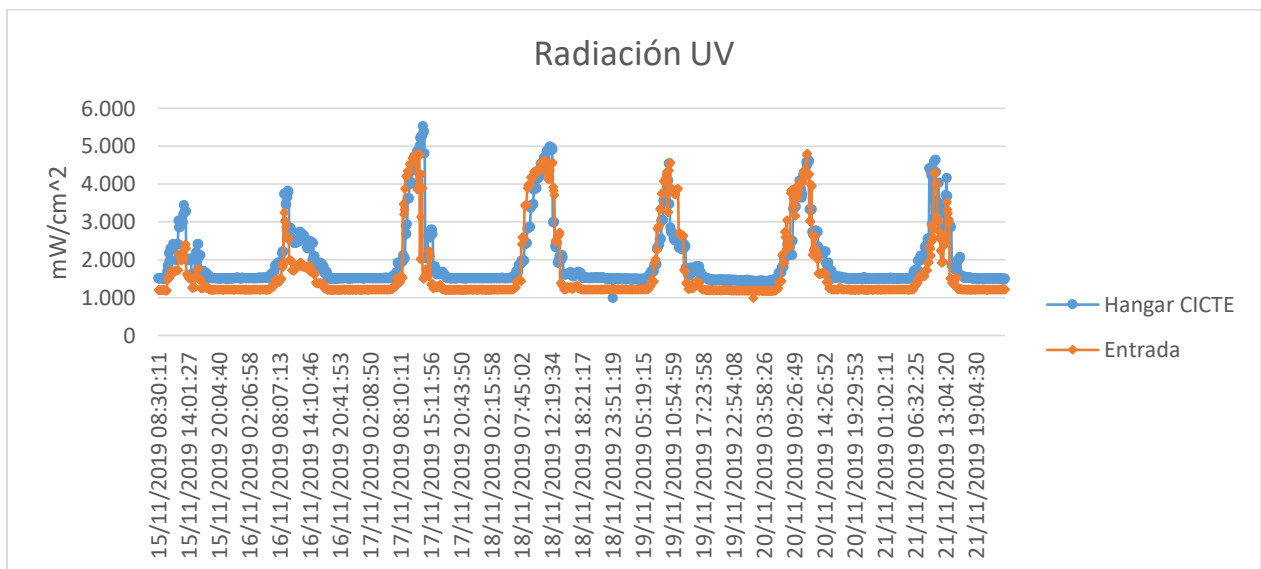


Figura 120. Distribución temporal radiación UV

Tabla 68

Variable de radiación UV en los diferentes nodos

	Nodo1			Nodo6		
	\bar{X}	M	n	\bar{X}	M	n
SEMANA1	1,96	5,53	1,00	1,65	4,81	1,00
SEMANA2	2,06	5,11	1,00	1,79	5,97	1,00
SEMANA3	2,00	6,28	1,50	2,04	7,69	1,00
SEMANA4	1,96	5,55	1,47	1,86	7,24	1,00

Los valores mínimos de 1.00 tomados en ambos dispositivos se presentaron en la tarde y noche de las mediciones ya que al no haber la presencia del sol, la radiación UV baja significativamente.

En la tabla 69 se puede observar los valores de radiación UV en cada uno de los días de medición tomando en cuenta los valores especificados en la tabla 41, para los nodos de medición en la semana 1 y 2 se presenta índices UV de 4 y 5, este tipo de radiación representa un nivel de riesgo moderado para la salud; por lo contrario, en la semana 3 y 4 se presentaron índices de 6 y 7 valores que representan un nivel alto de riesgo para la salud y en cuales se deben tomar medidas de precaución para evitar enfermedades.

Tabla 69.

Valores máximos diarios de radiación UV

NODO 1 - CICTE							NODO 6 - ENTRADA							Identificador
Noviembre							Noviembre							<2
LU	MA	MI	JU	VI	SA	DO	LU	MA	MI	JU	VI	SA	DO	3 a 5
				1	2	3					1	2	3	6 a 7
4	5	6	7	8	9	10	4	5	6	7	8	9	10	
11	12	13	14	15	16	17	11	12	13	14	15	16	17	
18	19	20	21	22	23	24	18	19	20	21	22	23	24	
25	26	27	28	29	30		25	26	27	28	29	30		
Diciembre							Diciembre							
LU	MA	MI	JU	VI	SA	DO	LU	MA	MI	JU	VI	SA	DO	
						1							1	
2	3	4	5	6	7	8	2	3	4	5	6	7	8	
9	10	11	12	13	14	15	9	10	11	12	13	14	15	
16	17	18	19	20	21	22	16	17	18	19	20	21	22	
23	24	25	26	27	28	29	23	24	25	26	27	28	29	
30	31						30	31						

B) Análisis de correlación

En la tabla 70 se muestra el coeficiente de correlación, dado que el nodo 1 y 6 miden índice UV el valor esperado es que el ρ sea lo más cercano a 1, sin embargo existe un correlación de 0.85 considerada fuerte pero no perfecta, esto es debido a factores externos como los edificios y vegetación que producen sombras y que afectan la medición de la variable, sin embargo se puede considerar similar para tomar una referencia del índice UV, ya que se considera una sola zona de estudio dado que no hay mucha distancia entre puntos.

Tabla 70

Coefficientes de correlación de variable UV

	Hangar	
	CICTE/Nodo1	Entrada/Nodo6
Hangar CICTE/Nodo1	1	
Entrada/Nodo6	0,84931678	1

En la figura 121 se muestra la dispersión de los datos.

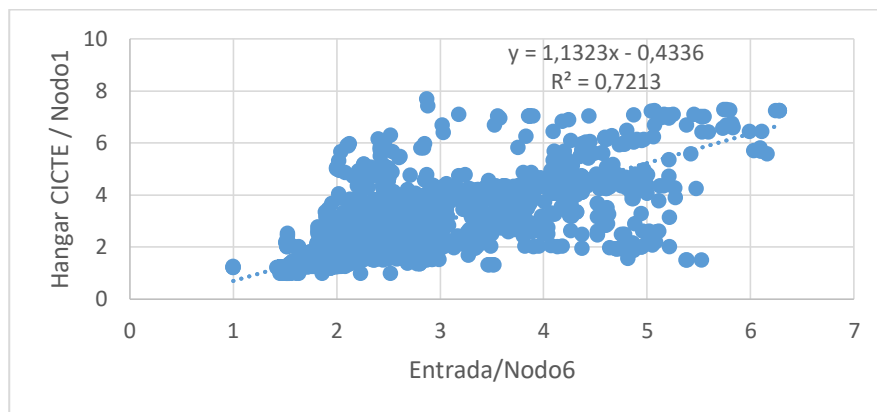


Figura 121. Correlación con $\rho > 0,85$

5.2.7.5. pH

En la tabla 71 se puede observar los valores de la media calculada, mínimos y máximos en los diferentes periodos, medidos a través de la sonda colocada en la cisterna 1 de la universidad.

Posteriormente en la figura 122 se observa la gráfica de las mediciones diarias junto a una proyección representada en líneas entrecortadas de los valores obtenidos a través de la información del anexo 6, en donde se puede observar que existe una tendencia a aumentar los valores de pH a lo largo del tiempo.

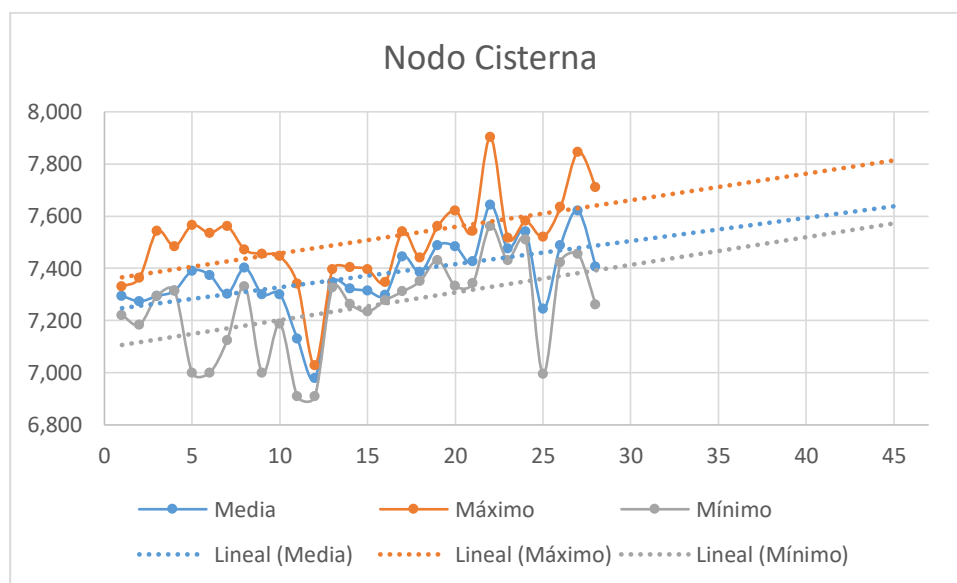


Figura 122. Distribución temporal pH.

Tabla 71

Variable pH en el nodo 4

Nodo4			
	\bar{X}	M	n
SEMANA1	7,32	7,57	7,00
SEMANA2	7,25	7,47	6,91
SEMANA3	7,41	7,62	7,23
SEMANA4	7,49	7,90	7,00

Como se puede observar la media semanal varía entre 7.25 a 7.41, teniendo como valor máximo 7.90 y como mínimo 6,91, aquí es importante tomar en cuenta la tabla 37 en donde se verifica que los valores del pH normales para el agua de cisterna varía entre 6.4 y 8.3; de tal forma se puede

verificar que los valores medidos están dentro del rango establecido y por lo tanto no representan un riesgo para la salud. En la semana 4 se presentan los valores más altos pH con 7,9, en este caso se puede observar un incremento del valor debido a que la limpieza de la cisterna se realizó a finales del mes de diciembre, de donde se puede concluir que si el tiempo de limpieza de la cisterna aumenta, aumenta la posibilidad de superar el valor máximo y se vuelve dañino.

CAPITULO VI

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

- LoRa es una tecnología inalámbrica para redes de baja potencia LPWAN enfocado a soluciones de IoT, que maneja un modelo de negocio propietario a nivel de capa física dando la posibilidad al investigador de utilizar esta tecnología y ofrecer servicios e infraestructura sin ningún tipo de restricción.
- La tecnología LoRaWAN permite realizar transmisiones en diferentes configuraciones de acuerdo a los requerimientos del usuario, modificando parámetros como ancho de bando (BW), factor de dispersión (SF) y frecuencia de trabajo; la elección de estos factores determinan la calidad de transmisión en función del alcance de cobertura, tasa de transmisión y consumo energético.
- Basado en el análisis de desempeño de LoRaWAN se comprobó que la mejor configuración de transmisión considerando cobertura y bajo tiempo de latencia fue de DR0 (SF12 y BW125), ya que presenta una mayor área de cobertura de $267,1m^2$ con pérdida de paquetes de hasta 4% en los sectores más alejados del nodo central (figura 42), sin embargo su consumo energético es mayor en comparación con las demás configuraciones teniendo un tiempo de vida de hasta 1 año considerando que transmite una vez al día.
- Del análisis desempeño del dispositivo LoRa respecto al consumo energético, se puede concluir que la configuración que presenta menor consumo es DR6 (SF7 y BW125), hasta 50mA transmitiendo un paquete cada 15 min, por lo tanto teniendo un tiempo de vida de la

batería de hasta 2 años, sin embargo sacrifica la cobertura con un área de alcance de hasta $36,4m^2$.

- Se comprobó mediante el análisis que se cumple la teoría (figura 13) en base a la relación entre el SF con el consumo energético y radio de cobertura; ya que a mayor SF se obtiene mayores alcance en la transmisión y mayor consumo energético, por ende menor tiempo de vida en las baterías y menor tasa de transmisión.
- LoRaWAN utiliza un diseño centralizado de red, es decir, una topología de tipo estrella que permite una mejor gestión de los recursos desde un Gateway, sin embargo, se tiene un solo punto de falla ya que si se pierde el nodo Gateway todo el sistema deja de funcionar.
- Para este proyecto se diseñó una red con topología estrella, constando de seis nodos LoRa y un módulo LoRa central funcionando como puerta de enlace monocanal. Se implementó la red para la toma de datos de variables como: temperatura, humedad, calidad de aire, radiación UV y pH a través de nodos ubicados en sectores estratégicos del campus universitario, tomando datos durante un periodo de 28 días entre el mes de noviembre y diciembre que son temporadas donde el clima es muy variable.
- Para que los sensores obtengan una medida real, se compararon con bases externas (INAMHI) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM), por lo tanto se identifica que era necesario realizar una compensación por software de los valores obtenidos, con el fin de minimizar los errores presentados durante la medición, obteniendo un error del 2% para las variables de temperatura y humedad, y hasta 5% en las variables de radiación UV, para calidad de aire se considera el rango definido por Oyarzun (2010) de hasta 300ppm en sectores abiertos y

1000ppm para cerrados; para pH se considera los valores de la tabla 37 con un rango entre 6,4 y 8,3 para cisternas.

- El diseño del protocolo de pruebas permitió validar el funcionamiento de los bloques que conforman el sistema previo a la implementación y durante la ejecución. Por lo que se pudo verificar en los nodos finales la recolección y transmisión de datos hacia el gateway mediante el protocolo LoRaWAN, en el nodo Gateway se validó la recepción de los datos enviados con su respectivo identificador (Ej: N1|datos...) para posteriormente realizar la petición HTTP hacia la base de datos del servidor, finalmente comprobando el funcionamiento del Front-End para la visualización y administración de la información.
- Se comprobó que la red LPWAN basada en LoRa cumple con las expectativas requeridas para la implementación de un servicio IoT como soluciones para Smart Campus, teniendo un radio de cobertura de 617m con SF=12 y BW=125 teniendo en cuenta el nodo más alejado del Gateway(Nodo1/CICTE), de esta manera se aseguró transmisiones con bajas tasas de paquetes perdidos con un máximo de 8%. Por otro lado el consumo energético no superó las expectativas dado que se ve limitado por el consumo de los sensores que disminuye notablemente el tiempo de vida que fue de 28 días para una batería de 15000mAh de capacidad.
- Con la información obtenida de la plataforma web se realizó la tabulación y análisis de los datos de las variables de los seis nodos, pudiendo identificar los valores máximos y mínimos de las variables medidas de cada nodo así como las relaciones existentes entre ellos.

Para la variable temperatura se obtuvo que los nodos 1, 3, 4 y 6 presentaron los valores más bajos esto se explica debido a que se encuentran ubicados en exteriores, por lo contrario los nodos 2 y 5 presentan valores de temperatura más altos dado que se encuentran en

ambientes internos, por este motivo se comprobó que existe una perfecta correlación entre los nodos ubicados en exteriores ($\rho > 0,9$).

El sector con mayor humedad registrada es el nodo 1 ubicado en el hangar de CICTE, estos valores indican que las edificaciones y estructuras son más propensas a sufrir corrosión o degradación en comparación con los demás sectores, por lo contrario el nodo 6 ubicado en sector de la caseta de cobro del parqueadero midió los porcentajes más bajos de humedad esto se puede explicar dado que existe poca vegetación a su alrededor y gran cantidad de edificaciones.

Los nodos 1 y 6 que miden UV presentan pequeñas diferencias en las mediciones, debido a la corta distancia entre ellos, esto se explica por la presencia de vegetación y edificios que crean pequeñas variaciones en sombras en los entornos para la medición. Además se identifica durante las 2 primeras semanas de medición que se tuvo índices de 4 y 5, considerados como riesgo moderado, sin embargo en las semanas 3 y 4 se midieron índices de 6 y 7 valores que representan un nivel alto de riesgo para la salud.

En el caso de calidad de aire se comprobó que en ambientes internos la concentración de CO₂ es mayor a 300 ppm, de acuerdo a las mediciones obtenidos en el nodo 2 ubicado en el interior del bloque D siendo este el lugar más contaminado debido a que presenta mayor afluencia de personas a diferencia de otros nodos; el caso contrario son los nodos ubicados en ambientes externos donde se presentaron concentración menores a 200 ppm lo cual indica menor contaminación, destacando el sector del nodo 4 (cisterna 1) que está rodeado de vegetación donde se obtuvo hasta 150ppm. Los niveles de CO₂ se encuentran dentro de los rangos establecidos por Oyarzun (2010).

Con respecto a la variable de pH, los valores medidos varían alrededor de 7,32 que se encuentran dentro del rango de 6.4 y 8.3, valores establecidos como seguros para la salud en el caso de una cisterna. Tomando en cuenta que la limpieza de la cisterna se lo realiza cada tres semanas, si dicho tiempo se prolonga los valores de pH pueden resultar nocivos para la salud de acuerdo a las proyecciones mostradas en la figura 127.

6.2.Recomendaciones

- Se recomienda configurar la frecuencia de trabajo de la placa TTGO LoRa32 de acuerdo a las normativas de regulación de frecuencias del Ecuador (ARCOTEL), ya que destina la banda libre ISM para trabajar con frecuencias de 915MHz, caso contrario si se ignora esta regulación puede provocar interferencias con otros dispositivos y tener sanciones por parte de la entidad regulatoria.
- Establecer en las bases de datos el horario GMT-5 caso contrario de no estar configurado este parámetro que corresponde a la ubicación puede provocar la recolección inadecuada de los horarios de toma de datos.
- La línea de vista entre los dispositivos es importante para garantizar bajas tasas de pérdida de paquetes durante la transmisión de datos y un amplio radio de cobertura para toda la superficie de la universidad dentro de una red LPWAN.
- Se recomienda analizar las características técnicas de las placas de desarrollo LoRa haciendo énfasis en los pines de entradas y salidas para conexión de dispositivos externos como sensores de acuerdo al alcance del proyecto.

- Para prolongar el tiempo de vida de las baterías se recomienda analizar los diferentes algoritmos de optimización de energía y recursos que posee la placa LoRa de acuerdo a las características de cada uno de ellos.

Referencias Bibliográficas

Aakvaag, N., & Frey, J. (Junio de 2006). *Redes de sensores inalámbricos*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/28135303_Redес_de_sensores_inalambricos

AccuWeather. (2019). *Ecuador El tiempo*. Obtenido de <https://www.accuweather.com/es/ec/sangolqui/129809/month/129809?monyr=8/01/2019>

Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., & Melia, J. (2016). Understanding the limits of LoRaWAN. *CoRR*, vol. abs/1607.08011.

Ahmad, M. (12 de 08 de 2014). *IoT and the Evolution of Smart Sensors*.

Alliance, L. (May de 2018). *Introduction to LoRa and Technology*. Obtenido de <https://www.slideshare.net/FI-WARE/fiware-global-summit-introduction-to-lora-alliance-and-technology-97029099>

Aloÿs Augustin, J. Y. (2016). A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *MDPI*, 10-11.

ARCOTEL. (2018). *Resolución Arcotel-2018*. Obtenido de <http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2018/04/norma-espectro-de-uso-libre-y-espectro-para-uso-determinado-en-bandas-libres.pdf>

ARDUINO. (2019). *Placa de conectividad MKR WAN 1300*. Obtenido de <https://www.digikey.com/es/product-highlight/a/arduino/mkr-wan-1300>

- Artero, C., & Nogueras, M. (2012). *PH SENSOR*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/12988/PH.pdf?sequence=1>
- Avila, E. (2017). *Evaluación del Rango de Transmisión de LoRa para Redes de Sensores Inalámbricas con LoRaWAN en Ambientes Forestales*. Cuenca.
- Ayala, O., Becerra, B., & Escobar, D. (2016). *Smart city aplicada a la decanatura de ingeniería de sistemas de la Escuela Colombiana de Ingeniería. (SmartDIS)*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Barcena, A., Prado, A., Cimoli, M., & Perez, R. (2018). *La nueva revolucion Digital*. CEPAL.
- Basterrechea, I. (2012). Presidente Ejecutivo de Enerlis. En *Smart City* (pág. 4). España: Imprintia.
- Benedito, M., Gargallo, D., Avariento, J., Sanchis, A., Gould, M., & Huerta.Joaquin. (2013). *Smart Campus*. Obtenido de Un ejemplo de integracion de recursos de la Univerditat Jaume I de Castelló: <http://hdl.handle.net/10234/160210>
- Benhiba, B., Madi, A., & Addaim, A. (2018). Comparative Study of The Various new Cellular IoT Technologies. *International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS)*, 1-4.
- Bezanilla, P. (9 de 2015). *Gestión de datos para aplicaciones generales usando tecnologías .NET y metodologías de tipo 'Design Pattern'* . Obtenido de <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/7308/378093.pdf?sequenc>
- Bliznakoff del Valle, D. (2014). *IoT: Tecnologías, usos, tendencias y desarrollo futuro (Tesis de Maestría)*. Universidad de Cataluña. Obtenido de

<http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/40044/6/dbliznakoffTFM0115memoria.pdf>

Borja, R., Gallego, G., Paz, J. d., Esponera, J., & Kolotouchkina, O. (2015). *Smart Cities La transformación digital de las ciudades*. Mexico: Centro de Innovación del Sector Público de PwC e IE Business School.

Borja, R., Gallegos, G., Paz, X., Esponera, J., & Kolotouchkina, O. (2016). *Smart Cities: La Transformacion Digital de las Ciudades*.

Cama, A., Acosta, M., Piñeres, G., & Caicedo, J. (2016). *Diseño de una red de sensores inalámbricos para la monitorización de inundaciones repentinas en la ciudad de Barranquilla, Colombia*. Obtenido de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052016000400005

Casals, L., Mir, B., Vidal, R., & Gomez.Carles. (2017). Modeling the Energy Performance of LoRaWAN. *sensors*, 4.

Cervantes, D. (10 de 3 de 2017). *Como usar un sensor de pH con Arduino*. Obtenido de <https://scidle.com/es/como-usar-un-sensor-de-ph-con-arduino/>

Chicaiza, A. (Marzo de 2019). *Desarrollo de un sistema automático de monitoreo para las máquinas cizallas y plegadoras de la empresa MAPROMECA*. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17111/1/UPS%20-%20ST004040.pdf>

Ciencia, M. E. (2004). Meteorología y Climatología. *Fundación española para la ciencia y tecnología*, 12.

Corona, L., Abarca, G., & Mares, J. (2014). *Sensores y Actuadores*. Azcopotzalco: Patria, S.A.

Cosco, J. (2012). *Sensores y Transductores*. Obtenido de https://www.academia.edu/29082893/Sensores_y_transductores

Cremates, P., Castro, F., Fernandez, R., & Clausen, R. (09 de 2013). *Desarrollo de un monitos abierto de calidad de aire*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/306442802_desarrollo_de_un_monitor_abierto_de_calidad_del_aire_maca

Digi-Key. (22 de 11 de 2016). *LoRaWAN Parte 1: Cómo obtener 15 km de batería inalámbrica y 10 años de duración de la batería para IoT*. Obtenido de <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2016/nov/lorawan-part-1-15-km-wireless-10-year-battery-life-iot>

DRAGINO. (2017). *LoRa Shield*. Obtenido de <https://www.dragino.com/products/module/item/102-lora-shield.html>

Ducrot, N., Ray, D., & Saadani, A. (2016). *LoRa Device Developer Guide*. orange.

Espressif, S. (2019). ESP32 Series Datasheet. *Espressif Systems*, 20-50.

Fraden, J. (2004). *Handbook of moern sernsors*. San Diego, California : Springer.

Galeano, C., Bellon, D., Zabala, S., Romero, E., & Duro, V. (23 de 04 de 2018). *Identificación de los pilares que direccionan a una institución universitaria hacia un smart-campus*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2027-83062018000200127

- Garage, E. (2017). *Different Types of Sensors*. Obtenido de <https://www.engineersgarage.com/articles/sensors>
- Garces, P. (14 de Julio de 2017). *Redes de Área Extensa para aplicaciones de IoT: modelado de comunicaciones Sigfox*. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/86052/PARDAL%20-%20Redes%20de%20C3%81rea%20Extensa%20para%20aplicaciones%20de%20IoT%203A%20modelado%20de%20comunicaciones%20Sigfox.pdf?sequence=1>
- Geber, A. (04 de 10 de 2017). *Simplifique el desarrollo de sus soluciones de IoT con arquitecturas de IoT*. Obtenido de <https://www.ibm.com/developerworks/ssa/library/iot-lp201-iot-architectures/index.html>
- Gomez, M. d. (2011). *Analisis de Requerimientos*. Obtenido de http://www.cua.uam.mx/pdfs/conoce/libroselec/Notas_Analisis_Requerimiento.pdf
- Goursaud, C., & Gorce, J.-M. (19 de Noviembre de 2015). *Dedicated networks for IoT: PHY / MAC state of the art and challenges*. Obtenido de <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01231221>
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (07 de 2012). *Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/228095891_Internet_of_Things_IoT_A_Vision_Architectural_Elements_and_FutureDirections
- Guerra, I., & Alberto, M. (Agosto 2016). El internet de las cosas en contextos universitarios: realidad y retos. *Congreso Universidad*, 68.

- Hawei, T. (2015). *Nb-iot - enabling new business opportunities*. Obtenido de Tech. Rep.: <https://www.huawei.com/minisite/hwmbbf15/img/nb-iot-white-paper-mbb-forum-2015.pdf>
- Herrera, C., Pacheco, P., Orihuela, M., & Cobo, E. (2018). *Guía de monitoreo participativo de la calidad del agua*. Obtenido de <https://www.iucn.org/sites/dev/files/content/documents/guia-monitoreo-participativo-calidad-agua-digital.pdf>
- INAMHI. (Diciembre de 2019). *Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología*. Obtenido de Red de Estaciones Hidrometeorológicas: <http://186.42.174.236/InamhiEmas/>
- Jimbo, P., Jimbo, M., & Aguilar, A. (2017). *Smart City para el 2022*. *latinindex*.
- Jimenes, P., Anderson, J., & Diaz, A. (2017). *Propuesta de plan de manejo ambiental a partir de los indicadores de "GreenMetric ranking" para la Universidad Católica de Colombia*.
- Jiménez, J., & Ochovo, J. (Septiembre de 2017). *Evaluación Comparativa de redes móviles (Tesis de Pregrado)*. *Politecnica de Madrid*. Obtenido de http://oa.upm.es/49728/1/pfc_Jesus_Jimenez_Motilla_Jaime_Ochovo_Pavon.pdf
- Kedida. (2018). *pH electrode*. Obtenido de <http://www.kedida.com.cn/en/category/electrodeseries/117.html>
- LAPIS, S. (2013). *ML8511*. Obtenido de https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/LightImaging/ML8511_3-8-13.pdf

Lee, W. (Febrero de 1985). *Estimate of local average power of a mobile radio signal*. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1623289>

LoRa Alliance, T. C. (07 de 2018). *LoRaWAN™ 1.1 Regional Parameters*. Obtenido de https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_regional_parameters_v1.1rb_-_final.pdf

LoRa-Alliance. (Noviembre de 2015). *A technical overview of LoRa and LoRaWAN*. Obtenido de <https://lora-alliance.org/>

Loy, M., Karingattil, R., & Williams, L. (05 de 2005). *ISM-Band and Short Range Device Regulatory Compliance Overview*. Obtenido de <http://www.ti.com/lit/an/swra048/swra048.pdf>

Magajin, R. (2017). *The Internet of Things witch ESP32*. Obtenido de <http://esp32.net/>

Manville, C., Cochrane, G., Cave, J., & Millard, J. (2014). *Mapping Smart Cities in the EU*. Union Europea.

Martinez, N. (22 de 11 de 2017). *Smart Campus, construyendo universidades más inteligentes*. Obtenido de <https://www.nobbot.com/futuro/smart-campus-construyendo-universidades-mas-inteligentes/>

MICROCHIP. (2015). *Embedded Wireless: Low-Power Wide-Area Network*. Obtenido de <https://www.microchip.com/design-centers/wireless-connectivity/low-power-wide-area-networks/lora-technology>

Mikhaylov, K., Petaejaervi, J., & Haenninen, T. (05 de 2016). *Analysis of Capacity and Scalability of the LoRa Low Power Wide Area Network Technology*. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7499263>

Ministerio del Ambiente. (7 de 6 de 2011). *Norma ecuatoriana de calidad de aire*. Obtenido de http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria_Ambiente/red_monitoreo/informacion/norma_ecuato_calidad.pdf

Moe, L. (17 de Junio de 2016). *Sensores Inteligentes*. Obtenido de <https://reportedigital.com/tic-lo-que-te-interesa-conocer/sensores-inteligentes/>

Montes, I. (2016). *Agua, pH y Equilibrio químico*. Obtenido de <http://www.sems.gob.mx/work/models/sems/Resource/12235/5/images/agua-ph-ciencias.pdf>

Morawska, L., & Jamriskja, S. (1999). *Modality of particle size distribution of environmental aerosols*.

Moya, M. (2018). *Evaluación de pasarela LoRa/LoRaWAN en entornos urbanos. (Tesis de Maestría). Politecnica de Valencia*. Obtenido de <https://riunet.upv.es/handle/10251/109791>

N.-A.-0. 1.-0. (2010). *Norma Ambiental de Calidad del Aire*. Obtenido de <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/dom60781.pdf>

Navarro, M. (2015). *Smart City: Hacia un nuevo modelo de ciudad*. byte.

- Nokia, T. R. (2016). *Lte evolution for iot connectivity*. Obtenido de Nokia White Paper:
<https://onestore.nokia.com/asset/200178>
- OMS. (25 de 03 de 2014). *Contaminacion Atmosferica* . Obtenido de
<https://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/es/>
- Ordóñez, I. (13 de 06 de 2017). *Estudio de la arquitectura y el nivel de desarrollo de la red LoRaWAN y dispositivos LoRa*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10609/64365>
- Organizacion Meteorologica Mundia, O. (2017). *Manual del sistema mundial de observacion* .
Obtenido de https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3967
- Organizacion Mundial de la salud. (2003). *Indice UV Solar Mundial*.
- Organizacion Mundial de Salud. (2015). *Radiacion ultravioleta*. Obtenido de
https://www.who.int/topics/ultraviolet_radiation/es/
- Organization, W. M. (2008). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*.
Obtenido de <https://www.weather.gov/media/epz/mesonet/cwop-wmo8.pdf>
- Orozco, I. (2010). *Modelo matemático para evaluar el efecto de los fenómenos atmosféricos en enlaces de radio microondas de 2.4 ghz*. Obtenido de
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3720271>
- Oyarzun, M. (2010). *Contaminacion aerea y sus efectos en la salud*. Obtenido de
<https://scielo.conicyt.cl/pdf/rcher/v26n1/art04.pdf>

Pérez, F. M., Martínez, J. V., Bernabéu, J. M., Fonseca, I. L., & Guilló, A. F. (2016 de 09 de 2016).

Smart University: Hacia una universidad mas abierta. Obtenido de Ámbitos Smart University: <https://web.ua.es/es/smart/el-proyecto.html>

Pérez, R. (5 de Febrero de 2017). *Trabajo final de grado.* Obtenido de

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100922/memoria.pdf>

Pérez, V. M. (s.f.). *Plug-in para la simulación de sonido.* Obtenido de SGITT-OTRI (Universidad

de Alicante) : <https://sgitt-otri.ua.es/es/empresa/documentos/ot-0747-plugin-sonido3d-wfs.pdf>

Prendez, M., Cohen, & Henring. (1995). *Características de los contaminantes atmosféricos.*

Ramos, H., Maciá, F., & Jorquera, D. (2006). *Redes Inalámbricas de Sensores Inteligentes.* .

Obtenido de <https://www.dtic.ua.es/grupoM/recursos/articulos/JDARE-06-H.pdf>

REYAX. (2017). *RYLR896.* Obtenido de <http://reyax.com/products/rylr896/>

Roche, B. (2017). Tecnología de comunicación para IoT. *EFOR Internet y tecnología*, 2. Obtenido

de <https://www.efor.es/recursos/tecnologias-de-comunicacion-para-iot.html>

Rodríguez, C. (2017). *Identificación de microclimas con redes inalámbricas dentro de la*

Universidad de las Fuerza Armadas - ESPE. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/13258/1/T-ESPE-057295.pdf>

Rodríguez, M. (2018). *Design of IoT temperature sensor for Lora network.* Obtenido de

<http://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/30636/TFG-P-800.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Rojo, S. d. (04 de 2012). *Requerimientos no funcionales para aplicaciones Web*. Obtenido de https://www.academia.edu/28559545/Requerimientos_no_funcionales_para_aplicaciones_Web
- Rueda, J., & Talavera, J. (2017). Similitudes y diferencias entre Redes de Sensores Inalámbricas e Internet de las Cosas: Hacia una postura clarificadora. *Revista Colombiana de Computacion*.
- Rueda-Rueda, J. S., Manrique, J. A., & Cruz, J. D. (2017). Internet de las Cosas en las Instituciones de Educación Superior. *CIINATIC 2017*, 2.
- Saari, M., Baharudin, A., Sillberg, P., Hyrynsalmi, S., & Yan, W. (2018). LoRa - A Survey of Recent Research Trends. *2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*.
- Sanchez, I. (2017). *El Internet de las Cosas lo cambia todo incluso la educación superior*. Obtenido de U-PLANNER.COM
- Santabárbara, j. (2019). Cálculo del intervalo de confianza para los coeficientes de correlación mediante sintaxis en SPSS. *REIRE, Univesidad de Barcelona*, 6,7.
- SEMTECH. (5 de Agosto de 2016). *SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver*. Obtenido de DATASHEET: <https://www.mouser.com/ds/2/761/sx1276-944191.pdf>
- Semtech-Corporation. (2 de Mayo de 2015). *LoRa Modulation Basics*. Obtenido de Semtech: www.semtech.com

- Series, E. (2019). *ESP32 DATASHEET*. Obtenido de https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- Silicon, L. (2014). *UV*. Obtenido de <https://www.silabs.com/documents/public/datasheets/Si1145-46-47.pdf>
- Staff, E. (30 de 8 de 2018). *IoT smart cities: the long-range forecast for wireless connectivity*. Obtenido de <https://www.electronicweekly.com/news/iot-smart-cities-the-long-range-forecast-for-wireless-connectivity-2018-08/>
- T. Rama Rao, D. B. (2012). RF propagation measurements in forest & plantation environments for Wireless Sensor Networks. *ICRTIT*, 308-313.
- TECH, A. (2006). *DTH11 Product Manual*. Obtenido de Akizuki Denshi Tsusho Co.: <https://akizukidenshi.com/download/ds/aosong/DHT11.pdf>
- Thiruchelvam, D. V. (18 de Decenber de 2017). First LoRa Smart Campus in Malasia. *Asia Pacific UNiversity*. Obtenido de Asia Pacific University of Technology y Innovation .
- Tibaduiza, D., Chio, N., Aparicio, L., & Caro, L. M. (Junio de 2011). *Redes de sensores inalambricos*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/267214014_Redex_de_sensores_inalambricos
- TTGO. (2013). *TTGO products*. Obtenido de <http://www.lilygo.cn/products.aspx?TypeId=50003&FId=t3:50003:3>
- TTN. (2018). *Big ESP32 + SX127x topic part 3*. Obtenido de <https://www.thethingsnetwork.org/forum/t/big-esp32-sx127x-topic-part-3/18436>

- Unidas, N. (2015). *Naciones Unidas*. Obtenido de Objetivos de Desarrollo Sostenible: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Usman, P., & Mahesh, S. (2017). Low Power Wide Area Networks: An Overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, 855-873.
- Vangelista, L., Zanella, M., & Zorzi, A. (Sep. 2015). “Long-range IoT technologies: The dawn of LoRaTM,”. Fabolous.
- Ventura, V. (23 de 03 de 2016). *Sensor de radiación ultravioleta con Arduino*. Obtenido de <https://polaridad.es/sensor-radiacion-ultravioleta-arduino-indice-uv-uvm30a-guva-s12sd/>
- Verdú, M. (01 de 09 de 2017). *IoT: Llega una nueva generación de sensores inteligentes para el Internet de las Cosas*. Obtenido de <http://www.techweek.es/infraestructuras-tic/noticias/1018355003701/iot-generacion-sensores-inteligentes-autonomos-internet-cosas.1.html>
- Wireless, R. (2012). *PHY vs MAC | Diferencia entre capa PHY, capa MAC*. Obtenido de <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/PHY-vs-MAC.html>
- Yang, X. (2017). *LoRaWAN: Vulnerability Analysis and Practical Exploitation*. BrightsightB.V.
- ZhongTao, C. (22 de Noviembre de 2016). *Ambiente Inteligentes*. Obtenido de <https://www.semtech.com/lora/lora-applications/smart-environment>

ANEXOS