

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO

ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,

INFORMÁTICA Y MECÁNICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN A NIVEL PROTOTIPO DE UN
SISTEMA IoT DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE LA
OCUPACIÓN DE ZONAS RÍGIDAS VEHICULARES EN LA CIUDAD
DEL CUSCO”**

Tesis Para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico

BACHILLER: VILLANUEVA BAYONA VICO ELVIS

ASESOR: ING. ARIZACA CUSICUNA JORGE LUIS

Cusco – Perú

2021

ÍNDICE

ÍNDICE.....	ii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
RESUMEN.....	x
ABSTRAC.....	xi
AGRADECIMIENTOS.....	xii
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	1
1.1 TÍTULO	1
1.2 RESPONSABLE.....	1
1.3 ASESOR.....	1
1.4 ÁMBITO GEOGRÁFICO.....	1
1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.5.1 Problemática.....	1
1.5.2 Antecedentes del problema.....	3
1.5.3 Formulación del problema.....	5
1.6 JUSTIFICACIÓN.....	5
1.7 OBJETIVOS.....	6
1.7.1 Objetivo general	6
1.7.2 Objetivos específicos.....	6
1.8 ALCANCES.....	7
1.9 LIMITACIONES	8
1.10 METODOLOGÍA	8
1.10.1 Método	8
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 INTERNET DE LAS COSAS	10
2.2 TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA IOT	10
2.3 LoRAWAN.....	13
2.3.1 LoRa	13
2.3.2 LoRaWAN.....	14
2.3.3 Modulación LoRa.....	15
2.3.4 Arquitectura de red LoRaWAN.....	16
2.3.5 Clases de dispositivos LoRAWAN	17

2.3.6 Estructura de mensaje LoRaWAN	19
2.3.7 Seguridad en LoRaWAN.....	20
2.3.8 Métodos de activación del dispositivo final	21
2.4 SISTEMAS DE DETECCIÓN VEHICULAR.....	22
2.4.1 Detectores de lazo inductivo	22
2.4.2 Detección por video.....	22
2.4.3 Detección por radar	22
2.4.4 Detectores infrarrojos	22
2.4.5 Detectores por sensores magnéticos	23
2.5 REGLAMENTO NACIONAL DE TRANSITO	24
2.6 CLASIFICACIÓN VEHICULAR.....	27
2.6.1 Categoría L: vehículos automotores con menos de 4 ruedas	27
2.6.2 Categoría M: vehículos automotores de 4 ruedas o más diseñados para el transporte de personas	27
2.6.3 Categoría N: vehículos automotores de 4 ruedas o más diseñados para el transporte de mercancías	28
2.6.4 Categoría O: remolques y semirremolques	28
2.7 MARCO LEGISLATIVO DE LAS BANDAS NO LICENCIADAS EN EL PERÚ	28
2.7.1 Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones	28
2.7.2 Según parámetros regionales definidos por LoRa Alliance	29
CAPÍTULO 3: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA IOT	31
3.1 ELECCIÓN DE COMPONENTES DEL SISTEMA IOT.....	31
3.1.1 Nodos terminales LoRaWAN.....	31
3.1.2 Gateway LoRaWAN	33
3.1.3 Sensores magnéticos para la detección de vehículos	35
3.1.4 Servidor de red LoRaWAN	37
3.2 DISEÑO DEL PROTOTIPO IOT	39
3.2.1 Diseño del nodo sensor.....	40
3.2.2 Implementación del gateway	46
3.2.3 Implementación del servidor	49
3.2.4 Diseño e implementación de la interface visual	52
3.2.5 Planificación de red usando Radio Mobile.....	55

CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS.....	58
4.1 PRUEBAS DE COBERTURA.....	58
4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE COBERTURA	61
4.2.1 Análisis del porcentaje de paquetes recibidos	61
4.2.2 Análisis del RSSI de los paquetes recibidos.....	63
4.3 PRUEBAS Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE DETECCIÓN DE VEHÍCULOS ESTACIONADOS EN UNA ZONA RÍGIDA	65
4.3.1 Caracterización del campo magnético medido dentro y fuera de la superficie terrestre	66
4.3.2 Caracterización del campo magnético medido con presencia de vehículo	67
4.3.3 Caracterización del campo magnético en dirección Z cuando el motor pasa de encendido a apagado.....	71
4.3.4 Análisis del campo magnético en dirección Z cuando un vehículo se estaciona frontalmente.....	72
4.3.5 Análisis del campo magnético en dirección Z cuando un vehículo se estaciona en retroceso.	74
4.3.6 Diseño del filtro	76
4.3.7 Validación del sistema implementado.....	78
CONCLUSIONES.....	82
RECOMENDACIONES	83
BIBLIOGRAFÍA	84
ANEXOS	87

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Parque automotor nacional estimado por clase de vehículo según departamento: 2016 (Posada, 2018).</i>	2
<i>Figura 2: Principales tecnologías inalámbricas para IoT (Kumar, 2019).</i>	11
<i>Figura 3: Capas del protocolo LoRaWAN (Ruano Lin, 2016).</i>	14
<i>Figura 4: Representación de una señal LoRa en tiempo y frecuencia (Ruano Lin, 2016).</i>	16
<i>Figura 5: Arquitectura de red LoRaWAN (LoRa Alliance, 2015).</i>	17
<i>Figura 6: Ventas de recepción para los nodos finales de clase A (Sornin (Semtech), 2016).</i>	18
<i>Figura 7: Estructura del formato de mensaje LoRaWAN (Ruano Lin, 2016).</i>	20
<i>Figura 8: Efecto magnetorresistivo de Permalloy (Elaboración propia).</i>	23
<i>Figura 9: Distribución de frecuencias de canales AU915 (LoRa Alliance Technical committee, 2017).</i>	30
<i>Figura 10: Velocidad de datos (DR) (LoRa Alliance Technical committee, 2017).</i>	30
<i>Figura 11: Nodo terminal: Rak811 y Arduino Uno (Elaboración propia).</i>	32
<i>Figura 12: Rak 831 Pilot Gateway (Rakwireless Technology , 2018).</i>	35
<i>Figura 13: Identificación del chip sensor del módulo HMC5883L (Elaboración propia).</i>	36
<i>Figura 14: Arquitectura de red del servidor The Things Network (thethingsnetwork).</i>	39
<i>Figura 15: Esquema de la estructura de hardware del nodo sensor diseñado (Elaboración propia).</i>	40
<i>Figura 16: Nodo sensor implementado. (Elaboración propia)</i>	41
<i>Figura 17: Diagrama de flujos del algoritmo para la detección de vehículos estacionados (Elaboración propia).</i>	44
<i>Figura 18: Distribución de sensores en una vía de tránsito (Elaboración propia).</i>	46
<i>Figura 19: Estructura del Hardware del Gateway RAK831 (Rakwireless Technology , 2018).</i>	47
<i>Figura 20: Acondicionamiento del gateway para la intemperie (imagen frontal y postrior) (Elaboración propia).</i>	47
<i>Figura 21: Instalación de gateway en torre la torre de comunicaciones (Elaboración propia).</i>	48
<i>Figura 22: Gateway instalado (Elaboración propia).</i>	49
<i>Figura 23: Registro del RAK831 Pilot Gateway en TTN (Elaboración propia).</i>	50
<i>Figura 24: Creación de la aplicación en TTN (Elaboración propia).</i>	51

<i>Figura 25: Registro del nodo sensor 1 en TTN (Elaboración propia).</i>	51
<i>Figura 26: Esquema de integración entre TTN Node-RED mediante MQTT. (Elaboración propia)</i>	52
<i>Figura 27: Diagrama de flujos en Node-RED que implementa la interfaz web del sistema IoT (Elaboración propia).</i>	53
<i>Figura 28: Cobertura LoRaWAN mediante Radio Mobile para la ciudad del Cusco (Elaboración propia).</i>	57
<i>Figura 29: Recorrido para toma de muestras de cobertura LoRaWAN, en la ciudad del Cusco (Elaboración propia).</i>	59
<i>Figura 30: Esquema de red del sistema implementado (Elaboración propia).</i>	60
<i>Figura 31: Pruebas de cobertura para la Ruta A, B y C (Elaboración propia).</i>	60
<i>Figura 32: Registro de mensajes en el servidor TTN (Elaboración propia).</i>	61
<i>Figura 33: Porcentaje de paquetes recibidos para las rutas A, B y C en función de la distancia alcanzada (Elaboración propia).</i>	62
<i>Figura 34: Niveles de RSSI registrados para las rutas A, B y C en función de la distancia alcanzada (Elaboración propia).</i>	64
<i>Figura 35: Medición del campo magnético terrestre cuando el nodo sensor se encuentra enterrado y sobre la superficie del suelo (Elaboración propia).</i>	66
<i>Figura 36: Vehículos A, B y C utilizados durante el desarrollo de pruebas de caracterización del campo magnético medido (Elaboración propia).</i>	68
<i>Figura 37: Pruebas y Adquisición de datos cuando un vehículo C atraviesa sobre el nodo sensor por eventos (Elaboración propia).</i>	68
<i>Figura 38: Caracterización del campo magnético medido cuando un vehículo A atraviesa sobre el sensor por eventos (Elaboración propia).</i>	69
<i>Figura 39: Caracterización del campo magnético medido cuando un vehículo B atraviesa sobre el sensor por eventos (Elaboración propia).</i>	70
<i>Figura 40: Caracterización del campo magnético medido cuando un vehículo C atraviesa sobre el sensor por eventos (Elaboración propia).</i>	70
<i>Figura 41: Caracterización del campo magnético medido en dirección Z, cuando el vehículo B atraviesa sobre el sensor por eventos (Elaboración propia).</i>	71
<i>Figura 42: Campo magnético medido en dirección Z para vehículos que se estacionan frontalmente (Elaboración propia).</i>	73
<i>Figura 43: Campo magnético medido en dirección Z para vehículos que se estacionan en retroceso (Elaboración propia).</i>	75
<i>Figura 44: Flujo de vehículos en la Av. Universitaria (Elaboración propia).</i>	79

<i>Figura 45: Interfaz web que muestra el estado de vía de validación del sistema de detección de vehículos estacionados (Elaboración propia).....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 46: Diagrama de bloques interno del sensor QMC5883L (QST Corporation).....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 47: Configuración de parámetros de la Red (Elaboración propia).....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 48: Configuración de parámetros del Gateway Rak831(Elaboración propia).</i>	<i>89</i>
<i>Figura 49: Configuración de parámetros del Nodo Rak811(Elaboración propia).</i>	<i>90</i>
<i>Figura 50: Conexión de pines para grabar el gestor de arranque (Elaboración propia)</i>	<i>91</i>
<i>Figura 51: Configuración y conexión de la herramienta STM32CubeProgrammer con la tarjeta RAK811 (Elaboración propia).</i>	<i>91</i>
<i>Figura 52: Pantalla que muestra el nuevo gestor de arranque grabado en la tarjeta RAK811 (Elaboración propia).</i>	<i>92</i>
<i>Figura 53: Interface de la herramienta de puerto serial (Elaboración propia).....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 54: Interface para la actualización de firmware (Elaboración propia).</i>	<i>93</i>
<i>Figura 55: Actualización exitosa del firmware del RAK811(Elaboración propia).</i>	<i>94</i>
<i>Figura 56: Puerto serial con el firmware actualizado (Elaboración propia).</i>	<i>95</i>
<i>Figura 57: Configuración de la tarjeta de red de la PC (Elaboración propia).</i>	<i>96</i>
<i>Figura 58: Configuración de conexión ssh (Elaboración propia).....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 59: Primer acceso al S.O. Raspbian del Gateway Rak831 (Elaboración propia)....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 60: Menú de configuración del Gateway Rak831 (Elaboración propia).....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 61: Elección del servidor de red TTN (Elaboración propia).....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 62: Elección de la banda de frecuencia AU 915-928 MHz (Elaboración propia). ...</i>	<i>99</i>
<i>Figura 63: Configuración del IP del Gateway Rak831 (Elaboración propia).....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 64: Configuración de la puerta de enlace del Router (Elaboración propia).....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 65: Principales características del RAK811 (RAKwireless, 2016).</i>	<i>124</i>
<i>Figura 66: Principales características del sensor HMC5883L (QST Corporation).</i>	<i>125</i>
<i>Figura 67: Principales características del Rak831 Pilot Gateway (Rakwireless Technology , 2018).</i>	<i>126</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Comparación de las principales características de las tecnologías LPWAN (elaboración propia).</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 2: Comparación de las principales características de nodos terminales LoRaWAN (Elaboración propia)</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 3: Características de la placa de desarrollo Arduino Uno (Elaboración propia)</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 4: Comparación de principales características de Gateway LoRaWAN (Elaboración propia)</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 5: Comparación de las principales características de sensores magnéticos usados para la detección de vehículos (Elaboración propia).</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 6: Característica del módulo sensor HMC5883L (Elaboración propia).</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 7: Cuadro comparativo de servidores de red LoRaWAN (Elaboración propia)</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 8: Configuración de parámetros LoRaWAN para el nodo sensor (Elaboración propia).</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 9: Tabla de verdad que determina el estado actual de la vía rígida en la interfaz web (Elaboración propia).</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 10: Características técnicas de los dispositivos de red (Elaboración propia)</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 11: Síntesis del estudio de cobertura experimental a SF12 (Elaboración propia)</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 12: Resultados del campo magnético terrestre cuando el nodo sensor se encuentra enterrado y sobre la superficie del suelo (Elaboración propia).</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 13: Resultados del análisis de la variación del campo magnético medido en dirección del eje Z sin presencia de vehículos (Elaboración propia).</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 14: Resultados del análisis del evento más crítico para la determinación de un vehículo estacionado que ingresa frontalmente sobre el sensor (Elaboración propia).</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 15: Resultados del análisis de la variación del campo magnético medido en dirección del eje Z sin presencia de vehículos (Elaboración propia).</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 16: Resultados del análisis del evento más crítico para la determinación de un vehículo estacionado en retroceso (Elaboración propia).</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 17: Resultados de aplicar el filtro de histéresis diseñado para los vehículos A,B y C (Elaboración propia).</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 18: Resultados obtenidos del registro de los ciclos de estacionamiento de forma visual y por el sistema implementado (Elaboración propia).</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 19: Configuración del rango de medida sensor HMC5883L (elaboración propia)</i>	<i>88</i>

RESUMEN

En este trabajo de tesis se ha diseñado e implementado un prototipo de un sistema IoT de recolección de información sobre la ocupación de zonas rígidas vehiculares para la ciudad del Cusco, de manera que a través del uso de nuevas tecnologías se pueda conocer el estado actual de las vías de tránsito, para una mejor administración del flujo vehicular por las autoridades e instituciones que regulan el transporte en la ciudad.

El desarrollo de la tesis consistió: primero en la elección de la tecnología LoRaWAN para la comunicación inalámbrica, la elección de los componentes del sistema como son los nodos terminales RAK811 WistNode, el RAK831 Pilot Gateway, el sensor HMC5883L, el servidor de red TTN y el kit de desarrollo de software Node-Red. Segundo, se procedió con el diseño del sistema IoT haciendo uso de los dispositivos seleccionados; implementando el nodo sensor, el Gateway y la interfaz web. Tercero, se desarrollaron las pruebas experimentales de cobertura LoRaWAN, pruebas experimentales de detección de vehículos estacionados y finalmente se procedió con la validación del prototipo implementado.

En conclusión, el sistema IoT implementado alcanzó una cobertura de hasta tres kilómetros con una precisión en la detección de vehículos estacionados del 96 %, mostrando el estado de la vía de tránsito vehicular en tiempo real a través de Google Maps y una gráfica de estado vs tiempo de ocupación, mediante una interfaz web.

ABSTRACT

In this thesis work, has been designed and implement a prototype of an IoT system to collect information on the occupation of prohibited parking vehicular for Cusco city, so that through the use new technologies, the current state of the traffic can be known, for a better management of vehicular flow by the authorities and institutions that regulate transport in the city.

Development the thesis consisted: First, selection of LoRaWAN technology for wireless communication, selection of system components such as the RAK811 WistNode terminal nodes, the RAK831 Pilot Gateway, the HMC5883L sensor, the TTN network server and the Node-Red software development kit. Second, we proceeded with the design of the IoT system using the selected devices; implementing sensor node, Gateway and web interface. Thirdly, experimental LoRaWAN coverage tests, experimental parked vehicle detection tests were developed, and finally implemented prototype was validated.

In conclusion, the IoT system implemented achieved coverage up to three kilometers with an accuracy in detecting parked vehicles of 96%, showing real-time status the vehicular traffic lane on Google Maps and a graph of status vs. occupancy time, through web interface.

AGRADECIMIENTOS

A Dios porque a pesar de todas las dificultades me ha permitido concretar este objetivo, a mi madre por todas sus oraciones su apoyo y comprensión, a mi padre por ser una persona noble y estar siempre dispuesto apoyarme a pesar de sus dificultades, a mi hermana por todo su apoyo moral, por estar siempre a mi lado en todo momento, a mi familia.

También agradezco a mi asesor M.Sc. Jorge L. Arizaca Cusicuna, por su apoyo incondicional durante el desarrollo del trabajo de tesis, al Dr. Jinmi G. Lezama Calvo, por todo el apoyo que me brindó durante el desarrollo del artículo de investigación, a todos los docentes por haber sido parte de mi formación profesional, y a todas las personas que apoyaron para concretar con el presente trabajo.

Finalmente agradezco al programa Yachaynichis Wiñarinanpaq de la Unsaac por el apoyo económico, que a pesar de todas las dificultades por la pandemia se alcanzó los objetivos planteados.

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1 TÍTULO

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN A NIVEL PROTOTIPO DE UN SISTEMA IoT DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE LA OCUPACIÓN DE ZONAS RÍGIDAS VEHICULARES EN LA CIUDAD DEL CUSCO”.

1.2 RESPONSABLE

Br. VILLANUEVA BAYONA VICO ELVIS.

1.3 ASESOR

Ing. ARIZACA CUSICUNA JORGE LUIS

1.4 ÁMBITO GEOGRÁFICO

El prototipo diseñado en el presente trabajo de tesis contemplará como ámbito geográfico el campus de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, en la escuela profesional de Ingeniería Electrónica, donde se tiene una torre en el quinto piso del pabellón, en el que se ubicará un Gateway. Los sensores serán instalados en una vía señalizada como zona rígida vehicular, dentro del alcance de cobertura del Gateway en los alrededores de la UNSAAC, donde será validado el prototipo diseñado.

1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.5.1 Problemática

Según información del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, el parque vehicular en el Perú desde el 2012 ha crecido en promedio 7%, llegando en el 2016 a 2'661.719 vehículos.

Lima Metropolitana (incluyendo Callao) es la región que tiene más vehículos circulando por sus vías (1'752.919 vehículos), representando el 66% de vehículos que existen en el parque automotor en todo el Perú; es decir más de la mitad que hay en el país circulan por las vías y carreteras de nuestra capital. Como se describe en la figura 1. (Posada, 2018)

Departamentos	CLASE DE VEHICULO									
	TOTAL	Automóvil	Station wagon	Camionetas			Omnibus	Camión	Remolcador	Remolque Símilares
				Pick-up	Rural	Panel				
TOTAL	2'661.219	1'167.041	403.193	283.479	365.316	43.307	80.119	213.155	43.604	62.425
Lima / Callao	1'752.919	807.529	284.251	163.793	236.502	31.006	50.441	116.601	29.520	33.276
La Libertad	190.073	77.440	21.459	25.037	18.382	1.372	7.105	21.208	4.548	13.522
Arequipa	187.929	89.335	14.236	21.353	27.142	1.989	5.099	16.853	4.804	7.118
Cusco	73.997	29.313	12.253	9.108	11.300	578	2.938	8.160	281	66
Lambayeque	68.261	30.741	5.908	9.192	9.418	1.034	1.348	8.088	572	1.960
Junín	67.049	22.296	12.308	8.749	9.715	295	2.139	9.231	881	1.435
Piura	55.060	23.771	4.922	10.378	7.915	400	1.280	5.503	518	373
Tacna	49.382	18.040	11.476	4.777	5.580	1.556	1.703	4.727	614	909
Puno	47.696	8.711	8.867	4.740	14.029	3.246	2.562	4.887	297	357
Ancash	33.542	14.484	5.472	4.009	5.555	235	940	2.415	199	233
Los demás	135.811	45.381	22.041	22.343	19.778	1.676	4.564	15.482	1.370	3.176

Fuente: MTC Elaboración: MTC

Figura 1: Parque automotor nacional estimado por clase de vehículo según departamento: 2016 (Posada, 2018).

El crecimiento del parque automotor en la ciudad del Cusco, para un reporte presentado por la Gerencia de Tránsito, Vialidad y Transporte de la comuna provincial en año 2016, se tenía 115 mil vehículos que recorrían las calles, mientras en el año 2006, había 35 mil unidades contabilizadas. Es decir, el número superó el triple en tan solo diez años (La República, 2016).

En Noviembre del 2017, el alcalde de la Municipalidad Provincial del Cusco, Carlos Moscoso Perea afirmó que, de acuerdo a datos proporcionados por el Banco Interamericano del Desarrollo, en el Cusco se tenía 120 000 vehículos, de los cuales 1000 buses eran de transporte turístico, carros que no transportaban a la población cusqueña; por otro lado, 1000 vehículos eran de transporte masivo, los cuales transportaban al 42% de la población; además se contaba con 7000 taxis que transportaban al 10% de los cusqueños y en cuanto a vehículos privados se tenía 111000, los cuales solo transportaban al 5% de la población (Rueda De Negocios, 2017).

Todas estas cifras indican que el parque automotor en la ciudad del Cusco se encuentra en constante crecimiento, lo alarmante de estas cifras sin duda son los vehículos privados, siendo éstos los que ocupan gran parte de las vías en la ciudad, no sólo estando en plena circulación, sino que muchos de ellos se hallan estacionados en plena vía de tránsito, obstaculizando el flujo normal de vehículos en calles y avenidas; lo cual significa que muchos conductores estacionan sus vehículos en las vías señalizadas como zonas rígidas. Además, en la ciudad del Cusco, en estos últimos años se ha estado experimentando un crecimiento en cuanto a establecimientos comerciales, donde no existen estacionamientos autorizados, conduciendo al problema de que los vehículos permanezcan estacionados en las vías demarcadas como zonas rígidas, haciendo un mal uso de las vías de tránsito.

1.5.2 Antecedentes del problema

En el artículo publicado en la IEEE titulado: “The efficient parking bay allocation and management system using LoRaWAN”; presenta el desarrollo de un sistema eficiente de asignación y gestión de plazas de estacionamiento utilizando LoRaWAN. Describe que los problemas de tráfico generalmente ocurren debido a un alto aumento en el número de vehículos en las vías; así como a la infraestructura del transporte y al desarrollo de instalaciones de estacionamiento que no pueden contener la cantidad de vehículos. Para superar este problema, propone un sistema de estacionamiento haciendo uso de un sensor magnético (HMC5883L) que detecte la presencia de vehículos estacionados, esa información sea llevada a una base de datos utilizando tecnología LoRaWan, de tal manera que ya no sea un problema buscar plazas donde estacionar. Como conclusión, indica que se pudo proporcionar un sistema de estacionamiento, así como su implementación utilizando la tecnología LoRa. (Saifil Allif, 2017).

En el trabajo de tesis denominado: “DISEÑO DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA EL AVISO AUTOMÁTICO DE DISPONIBILIDAD DE ESTACIONAMIENTOS VEHICULARES”, tuvo como objetivo principal realizar el diseño de un sistema detector de automóviles que permita mejorar las condiciones de atención al cliente dentro de los estacionamientos; así evitar que los conductores de vehículos, pierdan tiempo buscando un espacio disponible para estacionar; para lo cual se realizó un estudio de los principales estacionamientos de la ciudad de Lima incluidos los centros comerciales. De las pruebas realizadas, se concluyó que el sistema diseñado fue eficiente al 97%, con esto se pudo asegurar el correcto funcionamiento del circuito de lazo inductivo diseñado. El problema principal radica en la detección de vehículos con baja masa metálica en su estructura (Crisologo Borquez, 2008).

En el trabajo de tesis denominado: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA LA MEDICIÓN DE FLUJO VEHICULAR UTILIZANDO SENSORES INDUCTIVOS”, tuvo como objetivo principal realizar el diseño de un sensor inductivo para analizar el flujo vehicular usando la comunicación serial PIC-PC, en una intersección semaforizada de la ciudad del Cusco, de forma que se pueda ayudar a tomar una mejor decisión en los tiempos de cambio de los semáforos y consecuentemente agilizar el tránsito vehicular. En una de sus conclusiones afirma que el prototipo diseñado tiene un error de detección entre 3% y 6%. Este error se debe principalmente a que, los vehículos pasan muy descentrados y no llegan a ser detectados por el sensor de lazo inductivo. Aún con este inconveniente se puede asegurar que el prototipo funcionará correctamente (Vargas Cusi, 2017).

Todos los estudios previos, demuestran que se desarrollaron proyectos para la gestión de estacionamientos, así como para la administración eficiente de los sistemas que controlan el flujo vehicular (semáforos); sin embargo, no existen estudios enfocados a la detección de

vehículos estacionados en zonas rígidas de la vía de tránsito, sabiendo que al permanecer estacionados generan consecuentemente tráfico vehicular.

1.5.3 Formulación del problema

¿En qué medida se detectaría la presencia de vehículos estacionados en zonas rígidas de la Ciudad del Cusco mediante el uso de tecnologías IoT?

1.6 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, el crecimiento desmedido del parque automotor en la ciudad del Cusco es un hecho evidente a todas luces, considerando que no se cuenta con estacionamientos públicos, muchos vehículos permanecen estacionados durante horas en zonas rígidas a pesar de estar señalizadas las vías, reduciendo así su capacidad de tráfico de las mismas, generando la lentitud en el adecuado flujo del tránsito vehicular.

Realizar el diseño e implementación a nivel prototipo de un sistema IoT de recolección de información sobre la ocupación de zonas rígidas vehiculares, permitirá detectar la presencia de vehículos estacionados en zonas rígidas, de tal manera que ayuden a afrontar este fenómeno como alternativa en mejora del flujo vehicular adecuado, que podrían ser utilizados por las autoridades e instituciones que regulan el transporte en la ciudad del Cusco.

En una entrevista obtenida con el subgerente de circulación de tránsito de la Municipalidad Provincial del Cusco, Ing. Herbert Jesús Zevallos Guzmán, afirma que para el caso de zonas rígidas vehiculares actualmente se viene desarrollando un proyecto con cámaras para implementar la foto papeleta a aquellos vehículos que estén infringiendo las señales de tránsito. Al comentarle sobre el planteamiento del presente tema de tesis para la detección de vehículos estacionados en zonas rígidas con tecnología IoT, se mostró muy interesado en el tema manifestando que sería un complemento para el proyecto que ellos vienen impulsando, en el que serviría para dar a conocer a la central de monitoreo en tiempo real que zona rígida de la

ciudad está siendo ocupada por vehículos y proceder a aplicar las foto papeletas, por lo que el desarrollo del presente trabajo de tesis estará enfocado en complementar el proyecto de foto papeletas.

Internet de las cosas (IoT) es una herramienta tecnológica que permite interconectar objetos a internet, ya que la convergencia de tecnologías inalámbricas, sistemas micro-electromecánicos (MEMS), micro-servicios e internet han ayudado a integrar la tecnología operativa (OT) y la tecnología de la información (TI), permitiendo que los datos no estructurados generados por las máquinas sean analizados para obtener información que impulse mejoras. A través de sensores y/o actuadores es posible realizar mediciones de parámetros externos y automatizar muchas actividades que realiza el ser humano. Es así que hoy en día ya se viene usando en la industria, control ambiental, salud, control de infraestructura urbana, etc. En infraestructura urbana cada vez en más ciudades ya se controlan semáforos, puentes, vías de tren y cámaras urbanas. Permitiendo monitorear el correcto funcionamiento de sus infraestructuras además de hacer más flexible su funcionamiento ante nuevos eventos.

1.7 OBJETIVOS

1.7.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un prototipo de un sistema IoT para detectar la presencia de vehículos estacionados en las vías demarcadas como zonas rígidas en la ciudad del cusco.

1.7.2 Objetivos específicos

- Seleccionar una tecnología IoT para el diseño del prototipo.
- Acondicionar electrónicamente nodos sensores con tecnología IoT que detecten la presencia de vehículos estacionados en zonas rígidas.

- Implementar un gateway con tecnología IoT para recoger la información generada por los nodos sensores.
- Mostrar en una interfaz gráfica un mapa con el estado de los sensores de la zona rígida vehicular de validación.
- Validar el prototipo en un punto de la ciudad donde se indique una zona rígida dentro del rango de cobertura del gateway implementado.

1.8 ALCANCES

El prototipo diseñado será capaz de detectar hasta dos vehículos de las categorías M1 o N1, y un único vehículo de las categorías M2 o N2; debido a que son las categorías de vehículos con mayor presencia en el entorno urbano. Con lo que se limita a que la validación del prototipo será realizada en una longitud de 10 metros lineales aproximadamente de la zona rígida, donde estarán acondicionados los nodos sensores. El prototipo será implementado en una única zona rígida vehicular con mejores prestaciones para su validación, en una de las vías alrededor del campus universitario de Perayoc de la UNSAAC, dentro del alcance de cobertura del gateway; considerando el permiso que se deberá tener por las autoridades competentes. El único gateway estará ubicado en la torre de la escuela profesional de Ingeniería Electrónica por las prestaciones ya disponibles para su instalación.

Para garantizar el enlace de comunicación adecuado se realizará una simulación previa de cobertura del gateway en Radio Mobile y posteriormente se realizarán pruebas de enlace experimental, con lo que será posible simular un escenario para el Centro Histórico de la ciudad como un estudio a futuro.

La validación se realizará mediante la comparación de un registro visual (por un tiempo que se determinará durante el desarrollo de la tesis), considerando las horas con mayor tráfico vehicular durante el día.

La interfaz gráfica mostrará un mapa con el estado de los sensores, activándose una alarma cuando estos hayan detectado la presencia de un vehículo. También será posible conocer el tiempo de ocupación en la zona rígida vehicular y la hora del día en el que permanecen estacionados.

1.9 LIMITACIONES

No se considerarán alarmas visuales ni audibles en zonas rígidas vehiculares debido a que, para su instalación sería necesario una infraestructura adicional, lo que no se contempla para este trabajo.

El prototipo diseñado no contempla la detección de vehículos de la categoría “L” (vehículos automotores con menos de 4 ruedas), ni de la categoría “O” (remolques y semirremolques); puesto que estas categorías tienen muy poca presencia en un entorno urbano.

No se desarrollará aplicaciones móviles para la visualización de los datos obtenidos por los sensores, debido a que se trata más de un tema de desarrollo de software.

1.10 METODOLOGÍA

1.10.1 Método

El método a utilizarse en el presente trabajo es el método empírico, en base de aplicar tecnologías existentes, para desarrollar una solución al problema planteado.

Este proyecto de ingeniería, consistirá en el diseño y fabricación a nivel prototipo de un sistema de detección de vehículos, estacionados en zonas rígidas en la ciudad del Cusco.

El trabajo iniciará con la recopilación de la información necesaria, incluyendo publicaciones y trabajos de tesis similares en otros escenarios. Luego se elegirá la tecnología IoT que integrará el sistema, como son: la tecnología de comunicación inalámbrica, los nodos terminales, el sensor detector de vehículos, el gateway y el servidor de red. Seleccionados los componentes

del sistema, se realizará el diseño del nodo sensor, el cual comprenderá el diseño electrónico y el algoritmo para la detección de vehículos estacionados, luego se implementará el gateway que permitirá recoger los datos generados por los nodos sensores y por último se implementará el servidor de red, que integrará el diseño de la aplicación web para el monitoreo de la zona rígida. Ya habiendo diseñado e implementado el sistema, se realizará una planificación de red mediante Radio Mobile, este software predecirá el alcance de comunicación inalámbrica de la tecnología IoT seleccionada, para la ciudad del Cusco. Finalmente se desarrollarán pruebas experimentales y la validación del sistema implementado, para ello se iniciará realizando pruebas experimentales de comunicación inalámbrica en base a la simulación en Radio Mobile, luego se desarrollarán pruebas experimentales para determinar la presencia de vehículos estacionados y por último, se validará el sistema diseñado en una zona rígida específica de la ciudad, mostrando mediante el entorno web diseñado, el estado en tiempo real de la vía monitoreada.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 INTERNET DE LAS COSAS

“**Internet de las cosas** (en inglés, Internet of Things, abreviado IoT) es un concepto que aún no ha sido establecido, sin embargo, se entiende como la interconexión digital de objetos mediante internet. Es decir, IoT permite escenarios de conectividad de objetos físicos (cosas) que llevan sensores integrados, software y otras tecnologías con capacidad de computo; con el fin de conectar e intercambiar datos con otros dispositivos y sistemas a través de internet con una mínima intervención humana.

En 1999, Kevin Aston afirmó que el IoT cambiaría el mundo del mismo modo que pasó con el internet, conectando todos los equipos electrónicos a internet y automatizando las labores humanas; este ingeniero británico fue fundador del Centro de Investigación Auto-ID del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) en EE.UU (Gusev, 2017).

Las principales aplicaciones IoT inmediatas a nuestra vida cotidiana son los dispositivos de uso personal (reloj inteligente, prendas con GPS, etc) y la domótica, sin embargo, IoT es aplicable a enfoques de mayor escala como son: ciudades inteligentes, la agricultura, la ganadería, en el sector turismo, el sector retail, el sector de la salud, etc. Según Cisco, en 2023 habrá 29300 millones de dispositivos conectados a Internet, donde la mitad de ellos serán dispositivos IoT (Cisco, 2020).

2.2 TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA IOT

Para que los dispositivos IoT puedan conectarse a internet existen una diversidad de tecnologías de comunicación inalámbrica, entre las que destacan como Bluetooth, Wifi, ZigBee; la tecnología celular (2G,3G,4G,5G) y las tecnologías LPWAN (SigFox, LoRaWAN, NB-IoT); cuya principal diferencia radica en el alcance de comunicación, la tasa de transmisión de datos y el consumo de energía, como se puede observar en la siguiente figura.

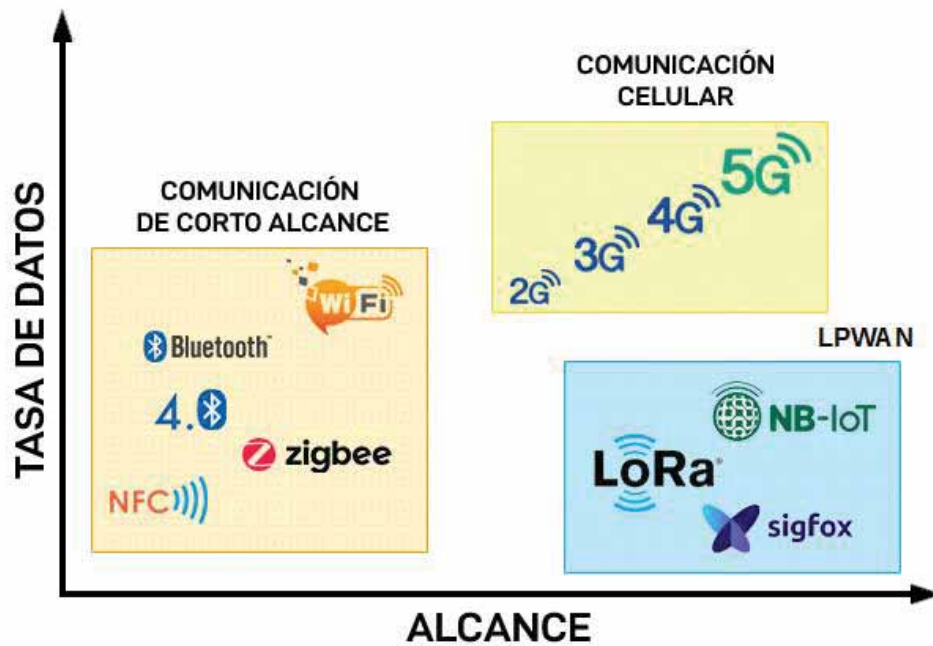


Figura 2: Principales tecnologías inalámbricas para IoT (Kumar, 2019).

La comunicación inalámbrica de largo alcance, con un bajo consumo de energía y con un ancho de banda reducido, son las características más relevantes de la tecnología LPWAN, tal como se observa en la figura 2; estas prestaciones son idóneas para soluciones haciendo uso de sensores en entornos urbanos, por lo tanto, para el diseño del sistema propuesto se hará uso de la tecnología LPWAN.

Para determinar la Tecnología LPWAN a utilizar, se realiza una comparación de cuatro tecnologías, considerando las características más importantes.

En la tabla 1, la tecnología LoRaWAN, hace uso de la modulación CSS (LoRa), que se caracteriza por su alta inmunidad a las interferencias; la transferencia de datos alcanza velocidades de hasta 50 Kbps, con una carga útil de hasta 243 bytes, permitiendo un número de mensajes Half-Duplex ilimitados por día; ésta tecnología, opera en la banda no licenciada (ISM) entre 915 a 928 MHz, además ofrece una cobertura de hasta 5 km en entornos urbanos. Lo más importante, es que permite construir una red libre de operadores de pago, debido a que

es una tecnología de código abierto. Por lo tanto, para el desarrollo de esta tesis se hace uso de la tecnología LoRaWAN.

TECNOLOGÍAS LPWAN				
CARACTERÍSTICAS	LORAWAN	SIGFOX	LTE-M	NB-IoT
Modulación	CSS (LoRa)	BPSK	QPSK,16QAM	QPSK
Ancho de Banda	250 KHz - 125KHz	100 Hz	1.4 MHz	200 KHz
Frecuencia de trabajo	Banda ISM no licenciada (915-928 MHz en Perú)	Banda ISM no licenciada (915-928 MHz en Perú)	Bandas de frecuencias LTE licenciadas	Bandas de frecuencias LTE licenciadas y 2G
Velocidad de datos máxima	50 kbps	100 bps	1 Mbps	200 Kbps
Rango de cobertura promedio (Zona urbana)	5 Km	10 Km	1 Km	1 Km
Consumo de energía	bajo	bajo	Medio	bajo
Máximo # de mensajes / día	ilimitado	140 (UL) y 4 (DL)	ilimitado	ilimitado
Inmunidad a la interferencia	Muy alto	Bajo	Medio	Bajo
Operadores de servicio	Operadores de pago y gratuito	Un solo operador de pago	Operadores de telefonía móvil	Operadores de telefonía móvil
Longitud máxima de carga útil	243 bytes	12 bytes (UL) y 8 bytes (DL)	62.5 bytes (UL) y 27.2 bytes (DL)	1600 bytes
Dirección de comunicación	Half-duplex	Half-duplex	Full-duplex	Half-duplex

Tabla 1: Comparación de las principales características de las tecnologías LPWAN

(elaboración propia).

2.3 LORAWAN

2.3.1 LoRa

LoRa es la tecnología inalámbrica utilizada para crear enlaces de comunicación de largo alcance y de baja potencia. LoRa está basado en la modulación del espectro ensanchado chirp (Chirp Spread Spectrum Modulation), al igual que FSK mantiene las mismas características de bajo consumo energético, incrementando en gran medida el alcance de la comunicación. Debido a estas razones, la modulación CSS fue utilizada por décadas para las comunicaciones militares y espaciales, considerando adicionalmente su alta robustez a la interferencia.

Las técnicas de modulación de espectro ensanchado (Spread Spectrum, abreviado SS), son métodos mediante los cuales una señal generada con un ancho de banda específico se disemina deliberadamente en el dominio de la frecuencia, dando como resultado una señal con un ancho de banda más amplio. Existen varias técnicas de espectro ensanchado, siendo las más conocidas la de Secuencia Directa (DS) y salto de frecuencia (FH); pero, para el caso de LoRa se usa la técnica Chirp.

Debido a la capacidad de largo alcance de la tecnología LoRa, con un solo gateway se puede cubrir ciudades enteras, dependiendo de las obstrucciones presentes en el entorno, sin embargo, LoRa implementan un presupuesto de enlace superior a otras tecnologías (LoRa Alliance, 2015).

LoRa fue desarrollada por Cycleo el 2010, empresa que dos años más tarde fue adquirida por Semtech, quien actualmente es el fabricante de los chips LoRa y ofrece a disposición del usuario una librería creada por Libelium, que permite la comunicación entre nodos LoRa (Del Cisne Carrión González, 2017).

2.3.2 LoRaWAN

LoRaWAN establece el protocolo de comunicación y la arquitectura para la red, haciendo uso de la modulación LoRa como la capa física, LoRaWAN fue propuesta por la LoRa Alliance el 2015. El protocolo y la arquitectura de red son influyentes en la determinación de la vida útil de la batería de un nodo, la capacidad de la red, la calidad del servicio, la seguridad y la diversidad de aplicaciones (LoRa Alliance, 2015). LoRaWAN, es un protocolo de red de código abierto que utiliza espectro radioeléctrico sin licencia en las bandas Industrial, Científica y Médica (ISM).

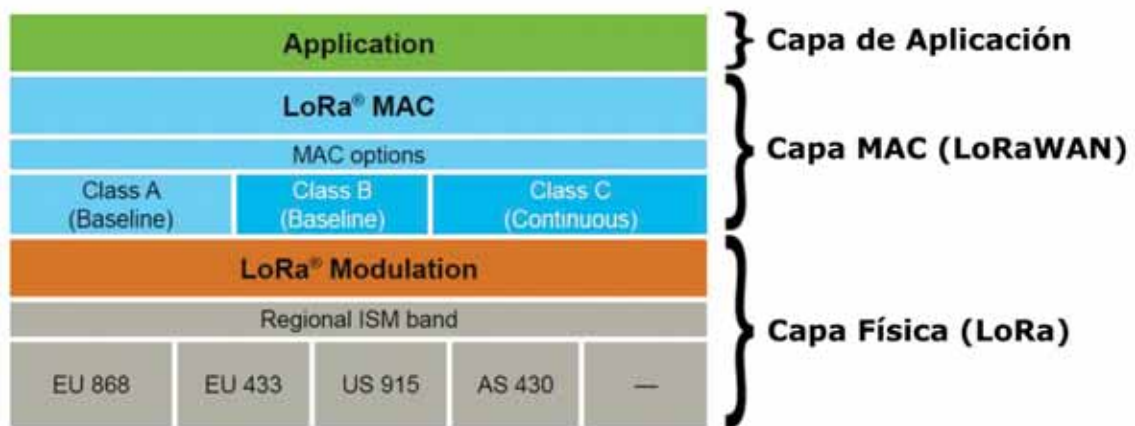


Figura 3: Capas del protocolo LoRaWAN (Ruano Lin, 2016).

En la figura 3 se observa las capas del protocolo LoRaWAN, que está compuesto por la capa de aplicación, la capa MAC y la capa física (PHY).

Los datos de la capa de aplicación y los comandos MAC necesarios para establecer la conexión entre el dispositivo final y la puerta de enlace se transportan como carga útil MAC (MAC payload), luego la capa MAC construye la trama MAC utilizando la carga útil MAC. Finalmente la capa física (PHY) utiliza la trama MAC como carga útil de la capa física (PHY) y construye la trama física (PHY) después de insertar el preámbulo, el encabezado PHY, el CRC y el CRC de trama completa. Esta trama final se transmite al aire en la portadora RF

requerida. Los parámetros de RF, incluidas las frecuencias, las bandas, los niveles de potencia, la modulación y los protocolos básicos de RF, están todos encapsulados en los atributos LoRa RF o de capa física (Ruano Lin, 2016), esta descripción se puede observar en la figura 7.

2.3.3 Modulación LoRa

LoRa se deriva de la modulación de espectro ensanchado Chirp (Chirp Spread Spectrum CSS), que implementa una velocidad de datos variable, utilizando factores de dispersión ortogonales (en inglés, Spreading Factor, abreviado SF), que permiten al diseñador del sistema cambiar la velocidad de datos por rango o potencia, a fin de optimizar el rendimiento de la red en un ancho de banda constante (Semtech Corporation, 2015).

CSS, fue desarrollado para aplicaciones de radar en la década de 1940, usado tradicionalmente en una serie de aplicaciones de comunicaciones militares; debido a que requiere una potencia de transmisión relativamente baja y su robustez inherente a los mecanismos de degradación del canal, tales como interferencias de trayectos múltiples, desvanecimiento, Efecto Doppler e interferencia en banda (jamming) (Semtech Corporation, 2015).

La modulación LoRa varía de manera continua y lineal la frecuencia de su portadora, donde la excursión de la frecuencia se da en una banda limitada por f_{final} y f_{inicio} , es así que al llegar a la f_{final} la frecuencia se resetea tomando el valor f_{inicio} y creciendo de nuevo desde ahí. Cada tiempo de símbolo (T_s) la frecuencia brinca a un valor fijo y comienza a crecer, el valor al que brinca representa el símbolo del mensaje enviado. La cantidad de bits que se pueden codificar por símbolo viene dado por un parámetro ajustable llamado factor de dispersión (SF), por lo tanto si su valor es N , el símbolo representa N bits y puede tener 2^N posibles valores de frecuencia a los que puede brincar (Solera, 2018). La cantidad de símbolos depende de una manera compleja de la cantidad de bytes que envíe, dado que la modulación agrega varios símbolos de preámbulo, un encabezado, algunos campos CRC y también envía algunos

bits adicionales para que todo se redondee siempre a un número de bits divisibles por 4. En la Figura 4, se observa 5 símbolos LoRa, que varían la frecuencia de la portadora linealmente en el tiempo y los saltos de frecuencia para representar diferentes símbolos, también se observa cómo el chirp cubre nominalmente todo el ancho de banda (BW) una vez durante el tiempo de símbolo.

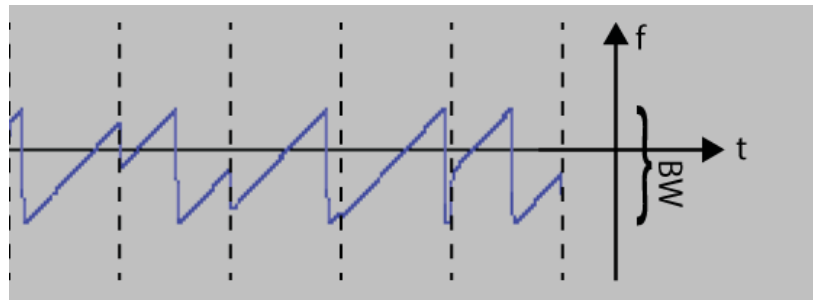


Figura 4: Representación de una señal LoRa en tiempo y frecuencia (Ruano Lin, 2016).

2.3.4 Arquitectura de red LoRaWAN

La arquitectura de red LoRaWAN implementa una topología en estrella, los gateway son los intermediarios entre los nodos sensores y el servidor de red en el back-end. Para la comunicación entre los nodos sensores y los gateways se implementa el protocolo LoRaWAN y el enlace entre los gateways y el servidor de red se conectan mediante protocolos IP estándar (Ethernet, Telefonía celular, wifi, Radio enlace, etc).

En una red LoRaWAN, los dispositivos finales no están asociados con un Gateway específico, por lo que los datos transmitidos por un dispositivo se reciben típicamente por múltiples Gateways. Si un nodo está en movimiento no se necesita traspaso (handover) de un gateway a otro, lo cual es una característica fundamental para permitir que las aplicaciones de seguimiento de activos sean una importante aplicación de destino para IoT (LoRa Alliance, 2015).

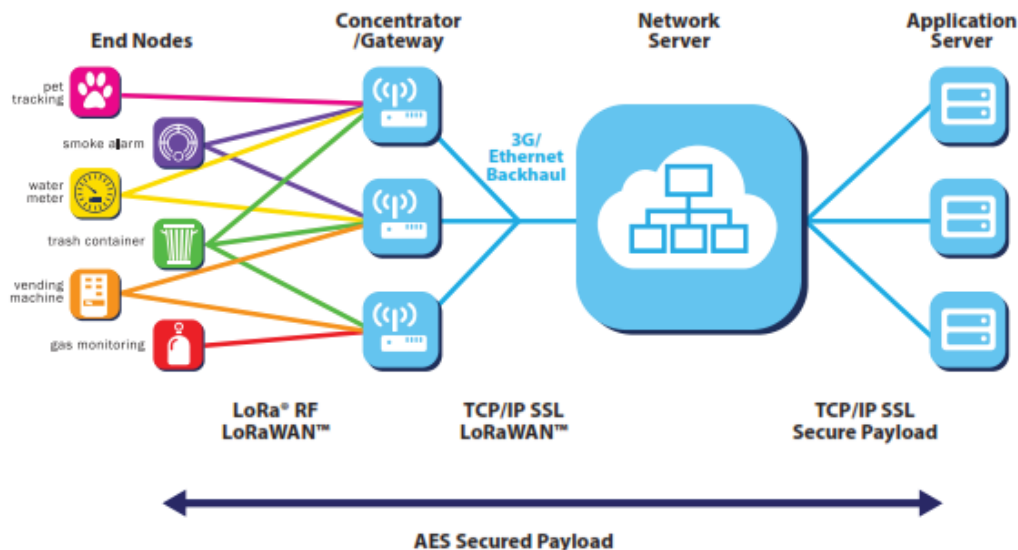


Figura 5: Arquitectura de red LoRaWAN (LoRa Alliance, 2015).

Como se observa en la figura 5, las comunicaciones son bidireccionales, las comunicaciones de enlace ascendente, es decir desde un nodo sensor al servidor de red, son las comunicaciones predominantes. El servidor de red implementa la inteligencia y la complejidad para gestionar la red, por lo tanto, se encarga de filtrar los paquetes redundantes recibidos, realizando comprobaciones de seguridad, programando mensajes de confirmación (ACK) de recibido a través del Gateway más óptimo y gestionando una tasa de datos adaptable (ADR). Todo ello con el propósito de maximizar tanto la capacidad total de la red como la duración de la batería de los nodos sensores.

2.3.5 Clases de dispositivos LoRAWAN

LoRaWAN implementa tres clases de nodos finales, clase A, clase B y clase C; donde la clase B y C son extensiones de la clase A para implementar una amplia gama de aplicaciones IoT que se requieran en distintos escenarios.

2.3.5.1 Clase A

Los nodos finales de Clase A permiten comunicaciones bidireccionales, en el que solo se recibe datos (Downlink) siempre que se haya enviado una solicitud (Uplink), es decir que la transmisión ascendente de cada nodo final es seguida por dos ventanas cortas de recepción para el enlace descendente. Este es un tipo de protocolo ALOHA.

Los nodos finales de clase A, son de menor consumo de energía, debido a que para establecer una comunicación de enlace descendente (Downlink), el servidor tendrán que esperar hasta el siguiente enlace ascendente (Uplink) programado y el nodo sensor puede entrar en un modo de suspensión el tiempo definido por la aplicación (LoRa Alliance, 2021).

Después de cada transmisión de enlace ascendente, se abre dos ventanas de recepción cortas, los tiempos de inicio de las ventanas de recepción se definen utilizando el final de la transmisión como referencia; como se observa en la figura 6.

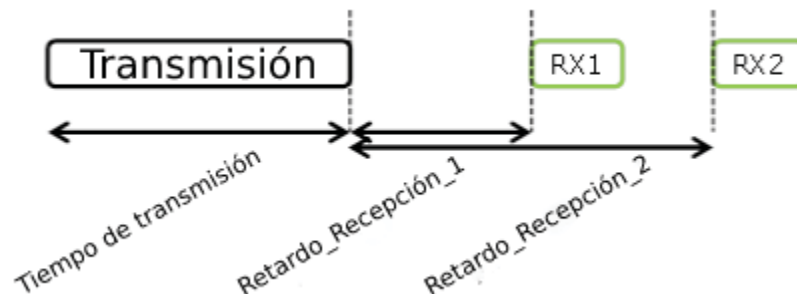


Figura 6: Ventas de recepción para los nodos finales de clase A (Sornin (Semtech), 2016).

La primera ventana de recepción RX1 utiliza la misma frecuencia y velocidad de datos del enlace ascendente, para la segunda ventana RX2 su frecuencia y velocidad de datos son configurables a través de comandos MAC. Normalmente se establece que RX1 se abre un segundo después que haya terminado el enlace ascendente (Transmisión), y RX2 se abre un segundo después de la apertura de RX1, es decir $\text{Receive_Delay2} = \text{Receive_Delay1} + 1\text{s}$.

2.3.5.2 Clase B

Además de las ventanas de recepción iniciadas de clase A, los nodos de clase B se sincronizan con la red mediante mensajes periódicos (balizas), para ello se abren ventanas de recepción de enlace descendente adicionales. Esto proporciona a la red la capacidad de enviar comunicaciones de enlace descendente con una latencia definida, pero a expensas de un mayor consumo de energía, la latencia puede ser programada hasta 128 segundos, sin embargo aún es posible alimentar los nodos finales con baterías (LoRa Alliance, 2021).

2.3.5.3 Clase C

Además de las ventanas de recepción iniciadas de clase A, la clase C, reduce aún más la latencia en el enlace descendente, manteniendo abierta las ventanas de recepción del dispositivo final todo el tiempo, inclusive cuando el dispositivo no está transmitiendo (semidúplex). En base a esto, el servidor de red puede iniciar una transmisión de enlace descendente en cualquier instante, por lo que no hay latencia; el costo es el consumo de energía del receptor, por lo que la clase C es adecuada para aplicaciones en las que se dispone de suministro de energía permanente (LoRa Alliance, 2021).

2.3.6 Estructura de mensaje LoRaWAN

A continuación, se muestra un gráfico que contiene un resumen de la estructura del mensaje a nivel de capa física y a su vez como es que está contenida en ella una estructura de mensaje a nivel de capa Mac, lo cual hace más comprensible la explicación de la estructura de la trama de mensaje LoRaWAN, como se observa a continuación.

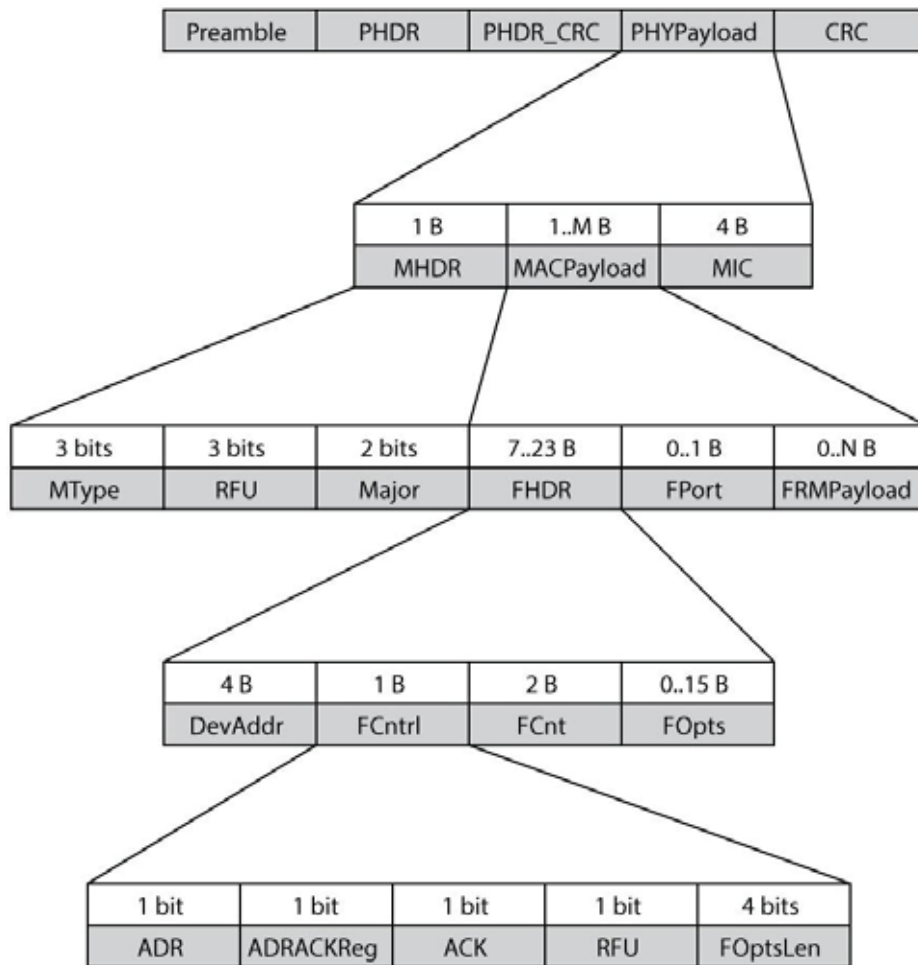


Figura 7: Estructura del formato de mensaje LoRaWAN (Ruano Lin, 2016).

2.3.7 Seguridad en LoRaWAN

La seguridad es uno de los factores más vitales para garantizar comunicaciones confiables, con ese propósito LoRaWAN utiliza dos capas de seguridad, estableciendo una a nivel de red y otra a nivel de aplicación; donde la seguridad a nivel de capa de red asegura que el nodo sea único y la seguridad a nivel de capa de aplicación asegura que los datos no sean vulnerados por un algún operador en la red. Estos mecanismos de seguridad utilizan algoritmos de cifrado AES128

2.3.7.1 Clave de sesión de red (en inglés, Network Session Key)

Una clave de sesión de red única de 128 bits compartida por el servidor de red como por el dispositivo final, esta clave se utiliza para validar la integridad de cada mensaje mediante su Código de integridad de mensajes (verificación MIC).

2.3.7.2 Clave de sesión de aplicación (en inglés, Application Session Key)

Una clave de sesión de aplicación única de 128 bits compartida de extremo a extremo a nivel de aplicación. Se usa para el cifrado y descifrado de la carga útil, asegurando que solo el usuario de la aplicación pueda leer el mensaje que envía o recibe.

2.3.8 Métodos de activación del dispositivo final

Para que un dispositivo final pueda unirse a una red LoRaWAN se establece un mecanismo seguro por el que se autoriza a un dispositivo final unirse a la red. Existen dos procedimientos para realizar la configuración y registro de los dispositivos finales denominados métodos de activación que son: **Over The Air Activation (OTAA)** y **Activation By Personalization (ABP)**.

Si la activación es dinámicamente (OTAA), la clave de sesión de red y de aplicación se vuelven a generar en cada activación, los dispositivos activados dinámicamente usan la clave de aplicación (AppKey), a partir del cual se derivan la clave de sesión de red (NwkSKey) y de sesión de aplicación (AppSKey).

Si la activación es estáticamente (ABP), las claves de sesión de red y de aplicación son configurados previamente tanto en el servidor como en los dispositivos finales y se mantienen permanentemente.

2.4 SISTEMAS DE DETECCIÓN VEHICULAR

2.4.1 Detectores de lazo inductivo

El método tradicional de detección de vehículos es el que se realiza mediante bucles de inducción insertados en la superficie de las vías de tránsito, se utilizan en una amplia variedad de instalaciones, especialmente cuando se necesitan datos precisos de los vehículos como medir la velocidad, longitud, detectar presencia y hasta su clasificación (Vargas Cusi, 2017).

2.4.2 Detección por video

La detección por video se basa en el procesamiento de imágenes en tiempo real que proporciona una amplia área de detección a través de la captura de imágenes o video, muy adecuada para el registro de incidentes en carreteras y túneles. Conectada a los controladores de tráfico, la aplicación también puede usarse para la detección de vehículos en cruces señalizados donde sea difícil o costoso instalar bucles inductivos (Bizarro Álvarez, 2018).

2.4.3 Detección por radar

Los radares son definidos como equipos que emiten una señal electromagnética y reciben el eco de la señal que es objeto a detectar. El radar, se utiliza para detectar vehículos en movimiento dentro de un área de detección limitada, también para recopilar información sobre objetos distantes. Está bien probada y es muy eficiente (Bizarro Álvarez, 2018).

2.4.4 Detectores infrarrojos

Los sensores infrarrojos son dispositivos fotoeléctricos cuyo espectro de trabajo se encuentra en la longitud de onda infrarroja (entre los 700 y 900 nanómetros), son usados con frecuencia para detectar vehículos detenidos y también peatones en los cruces peatonales (Bizarro Álvarez, 2018).

2.4.5 Detectores por sensores magnéticos

El principio del sensor magnético se basa en la “resistencia eléctrica de una aleación de capa fina ferromagnética cambia debido a un campo magnético exterior”, por lo que puede ser llamado resistencia magnéticamente controlada. Estos sensores resaltan debido a que pueden realizar mediciones precisas, son de tamaño pequeño, muy robustos, de bajo consumo y están contruidos de materiales especiales como aleaciones mixtas de hierro y níquel. Es más conveniente su uso donde no se dispone de una alimentación eléctrica continua, es así que estos sensores magnetorresistivos son usados para la determinación de campos magnéticos, en teléfonos móviles, aparatos médicos, mediciones de recorrido y ángulos, interruptores sin contacto, detección de metales, etc (Rechner sensors). Por lo tanto, se determina que éste, sea el sistema utilizado para la detección de vehículos en el desarrollo de la tesis.

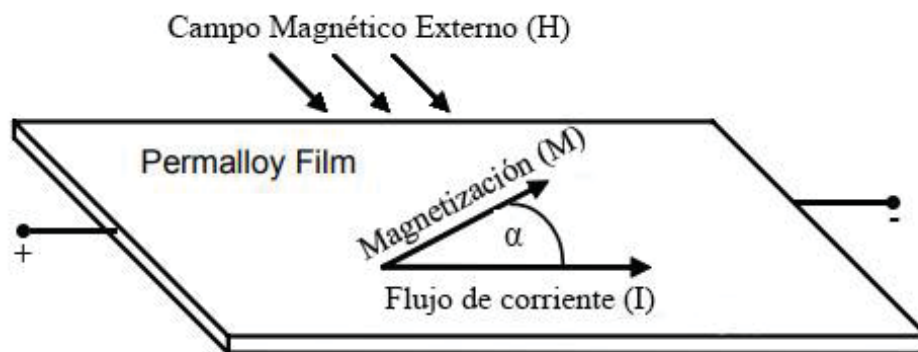


Figura 8: Efecto magnetorresistivo de Permalloy (Elaboración propia).

En la figura 8 se muestra el principio básico de un sensor magnetorresistivo con una película de material ferromagnético llamado Permalloy (20% de Fe, 80% de Ni). Cuando la corriente fluye a través del material ferromagnético, el Permalloy obtiene un vector de magnetización interno (M) (que describe el comportamiento magnético del material producto del movimiento de rotación de los electrones), paralelo al flujo de la corriente (I), en este caso con dirección de izquierda a derecha. Si se aplicará un campo magnético externo (H) paralelo al plano del

Permalloy, pero perpendicular al flujo de la corriente 'I', el vector de magnetización interno del Permalloy rotará alrededor de un ángulo α . Provocando que la resistencia 'R' del 'Permalloy' cambie en función del ángulo de rotación α , dado por la siguiente ecuación:

$$R = R_0 + \Delta R_0 \cos^2 \alpha$$

Donde R_0 y ΔR_0 son parámetros del material.

La resistencia es **máxima** si el flujo de corriente y el vector de magnetización interna son **paralelas**, en cambio si el ángulo entre el flujo de corriente y el vector de magnetización interna es de **90 °**, la resistencia en el material ferromagnético es **mínimo**.

Los principales materiales que exhiben un efecto magnetorresistivo y que son utilizados en la actualidad como sensores, son conocidos como magnetorresistencia anisotrópica (AMR), magnetorresistencia gigante (GMR) y magnetorresistencia de túnel (TMR).

2.5 REGLAMENTO NACIONAL DE TRANSITO

En el reglamento nacional de tránsito del Perú, en su título IV, capítulo II, sección VIII; habla sobre las consideraciones que debe cumplir un vehículo en estado de **detenimiento o estacionado**.

Se considera que un vehículo automotor se ha detenido, cuando se encuentre inmovilizado en la vía, por los siguientes motivos: 1) Cuando se recoge o deja pasajeros; 2) Para cargar o descargar mercancías". Se considera también que un vehículo automotor se ha detenido, cuando se encuentre inmovilizado en la vía, por los siguientes motivos: 1) En cumplimiento de la orden de un Efectivo de la Policía Nacional o del mensaje de las señales o semáforos. 2) Para evitar conflictos en el tránsito (Texto único ordenado del reglamento nacional de tránsito, 2010, art. 203-204).

“Se considera que un vehículo automotor se ha estacionado, cuando se encuentre inmovilizado, por cualquier motivo no contemplado en los Artículos 203 y 204” (Texto único ordenado del reglamento nacional de tránsito, 2010, art. 205).

A los conductores de vehículos del servicio público de transporte regular urbano de pasajeros, sólo les está permitido recoger o dejar pasajeros en los paraderos de ruta, en el carril derecho de la vía, en el sentido de la circulación, a no más de 20 cm. del borde de la acera y paralelo a la misma, dejando entre vehículos un espacio no inferior a 50 cm (Texto único ordenado del reglamento nacional de tránsito, 2010, art 206).

El ascenso o descenso de personas de un vehículo automotor de servicio particular ó de un vehículo de transporte no regular de pasajeros, está permitido en la vía pública, siempre y cuando no signifique peligro u obstaculice la circulación. La detención del vehículo debe efectuarse en el sentido de la circulación en el carril derecho de la vía, utilizando luces intermitentes a no más de 20 centímetros del borde de la acera y en paralelo a la misma (Texto único ordenado del reglamento nacional de tránsito, 2010, art. 207).

“Los vehículos no deben efectuar detenciones para cargar o descargar mercancías en la calzada, en los lugares que puedan constituir un peligro u obstáculo a la circulación” (Texto único ordenado del reglamento nacional de tránsito, 2010, art. 209).

Cuando por razones de fuerza mayor, no fuese posible evitar que el vehículo constituya un obstáculo o una situación de peligro para el tránsito vehicular o peatonal, el conductor debe proceder a señalizar el lugar, colocando dispositivos de seguridad para advertir el riesgo a los usuarios de la vía, y a retirar el vehículo tan pronto como le sea posible (Texto único ordenado del reglamento nacional de tránsito, 2010, art. 210).

Está prohibido que los conductores estacionen los vehículos que conducen en los siguientes casos: a) En los lugares en que las señales lo prohíban; b) Sobre las aceras, pasos peatonales y rampas destinadas a la circulación de personas minusválidas; c) En doble fila, respecto a otros

vehículos ya estacionados, parados o detenidos junto a la acera, cuneta o borde exterior; d) Al costado antes o después de cualquier obstrucción de tránsito, excavación o trabajos que se efectúen en la calzada; e) Dentro de una intersección; f) En las curvas, puentes, túneles, zonas estrechas de la vía, pasos a nivel, pasos a desnivel, cambios de rasante, pendientes y cruces de ferrocarril; g) Frente a entradas de garajes y de estacionamientos públicos ó a la salida de una vía privada; h) Frente a recintos militares y policiales; i) Por más tiempo del permitido oficialmente, en lugares autorizados para el efecto; j) Fuera de las horas permitidas por los dispositivos de tránsito o señales correspondientes, en lugares autorizados para el efecto; k) A una distancia menor de 5 metros de una bocacalle, de las entradas de hospitales o centros de asistencia médica, cuerpos de bomberos o de hidrantes de servicio contra incendios; l) A menos de 20 metros de un cruce ferroviario a nivel; m) Sobre o junto a una berma central o isla de tránsito; n) A menos de 10 metros de un paso peatonal o de una intersección; o) Diez metros antes o después de un paradero de buses, así como en el propio sitio determinado para la parada del bus. p) A menos de 3 metros de las puertas de establecimientos educacionales, teatros, iglesias, hoteles, y hospitales, salvo los vehículos relacionados a la función del local. q) A la salida de salas de espectáculos y centros deportivos en funcionamiento. r) En cualquier lugar que afecte la operatividad del servicio público de transporte de pasajeros o carga. s) En cualquier lugar que afecte la seguridad, visibilidad o fluidez del tránsito ó impida observar la señalización (Texto único ordenado del reglamento nacional de tránsito, 2010, art. 215).

Se considera el abandono de un vehículo, el hecho de dejarlo en la vía pública sin conductor, en lugares en donde no esté prohibido el estacionamiento, por un tiempo mayor de 48 horas. En los lugares prohibidos para el estacionamiento, se considera el abandono de un vehículo, transcurridas 24 horas después de haberlo dejado el conductor. En zonas rígidas, se considera el abandono de un vehículo transcurrida una (1) hora después de haberlo dejado el conductor (Texto único ordenado del reglamento nacional de tránsito, 2010, art. 219).

2.6 CLASIFICACIÓN VEHICULAR

2.6.1 Categoría L: vehículos automotores con menos de 4 ruedas

- L1: Dos ruedas, hasta 50 cm³ y Velocidad máxima de 50 km/h.
- L2: Tres ruedas, hasta 50 cm³ y Velocidad máxima de 50 km/h.
- L3: Dos ruedas, más de 50 cm³ o Velocidad mayor a 50 km/h.
- L4: Tres ruedas asimétricas al eje longitudinal, más de 50 cm³ ó Velocidad mayor a 50 km/h.
- L5: Tres ruedas simétricas al eje longitudinal, más de 50 cm³ o Velocidad mayor a 50 km/h y PBV menor a 1 tonelada.

2.6.2 Categoría M: vehículos automotores de 4 ruedas o más diseñados para el transporte de personas

- M1: De hasta 9 asientos (incluido el conductor).
- M2: De más de 9 asientos (incluido el conductor) y peso bruto vehicular de hasta 5 toneladas.
- M3: De más de 9 asientos (incluido el conductor) y peso bruto vehicular mayor a 5 toneladas.

Los M2 y M3 pueden ser:

- Clase I: Con áreas para pasajeros de pie permitiendo el desplazamiento frecuente de éstos (Metropolitano).
- Clase II: Para el transporte de pasajeros sentados y con áreas para pasajeros de pie.
- Clase III: Exclusivamente para el transporte de pasajeros sentados (Ómnibus Interprovincial).

2.6.3 Categoría N: vehículos automotores de 4 ruedas o más diseñados para el transporte de mercancías

- N1: De peso bruto vehicular de 3,5 toneladas. o menos.
- N2: De peso bruto vehicular mayor a 3,5 toneladas. hasta 12 toneladas.
- N3: De peso bruto vehicular mayor a 12 toneladas.

2.6.4 Categoría O: remolques y semirremolques

- O1: Remolques de peso bruto vehicular de 0.75 toneladas o menos
- O2: Remolques de peso bruto vehicular mayor a 0.75 toneladas hasta 3.5 toneladas
- O3: Remolques de peso bruto vehicular mayor a 3.5 toneladas hasta 10 toneladas
- O4: Remolques de peso bruto vehicular mayor a 10 toneladas

2.7 MARCO LEGISLATIVO DE LAS BANDAS NO LICENCIADAS EN EL PERÚ

2.7.1 Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) en el Perú, mediante el decreto supremo N° 006-2013, en el artículo 28 del Texto Único Ordenado del Reglamento General de la Ley de Telecomunicaciones, aprobado por el decreto Supremo N° 020-2007-MTC, define y establece la banda de 915 - 928 MHz como una de las bandas de frecuencia no licenciadas. Donde decreta aquellos servicios cuyos equipos, utilizando la banda de 915 - 928 MHz transmiten con una potencia no superior a un vatio (1 W) o 30 dBm en antena (potencia efectiva irradiada) (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013).

Así también, de acuerdo al artículo 232 (Asignaciones no afectadas al pago de canon), del Texto Único Ordenado del Reglamento General de la Ley de Telecomunicaciones, específica Tratándose de servicios, cuyos equipos utilicen el espectro radioeléctrico comprendido en los alcances del artículo 28 (bandas de frecuencia no licenciadas), no están afectos al pago de canon (Ministerio de Justicia, 2015).

2.7.2 Según parámetros regionales definidos por LoRa Alliance

LoRa Alliance es quien establece las especificaciones y parámetros regionales para cada país del mundo. Es así que para el Perú define que haremos uso de las bandas AU915 y AS923-1, el cual comprende el rango de frecuencia de 915MHz hasta 928MHz, que es una de las bandas no licenciadas en nuestro país. Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se hace uso de la banda AU915, cuyas características regionales se describen a continuación.

2.7.2.1 Distribución de frecuencias para la banda AU915

Para la recolección de datos generados por los nodos sensores, se hace uso de la tecnología de comunicación LoRaWAN versión 1.0.2, donde la distribución de frecuencias de la banda Australiana (AU915), comprenden canales asignados para los enlaces ascendentes y descendentes, como se observa en la figura 9, del modo siguiente:

- **Enlace ascendente (uplink)**, consiste en 64 canales numerados de 0 a 63 utilizando un ancho de banda (BW) LoRa de 125 kHz con una tasa de datos (DR) variando de 0 a 5, usando la tasa de codificación (CR) de 4/5, a partir de 915,2 MHz e incrementando linealmente por 200 kHz hasta 927,8 MHz. Además, se tiene 8 canales numerados 64 a 71 utilizando LoRa de 500kHz de ancho de banda (BW), con una tasa de datos de 6 (DR6), a partir de 915,9 MHz e incrementando linealmente por 1,6 MHz hasta 927,1 MHz. Haciendo un total de 72 canales para el enlace ascendente.
- **Enlace descendente (downlink)**, consiste en 8 canales numerados de 0 a 7 utilizando LoRa de 500 kHz de ancho de banda (BW), con una tasa de datos (DR) entre 8 a 13 a partir de 923,3 MHz e incrementando linealmente por 600 kHz hasta 927,5 MHz (LoRa Alliance Technical committee, 2017).

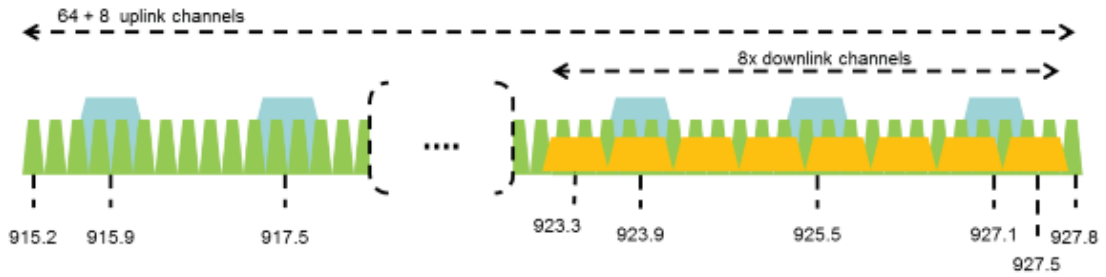


Figura 9: Distribución de frecuencias de canales AU915 (LoRa Alliance Technical committee, 2017).

2.7.2.2 Codificación de velocidad de datos de salida para un dispositivo final

La siguiente codificación se utiliza para la configuración de la velocidad de datos (DR) en la banda AU915-928.

DataRate	Configuration	Indicative physical bit rate [bit/sec]
0	LoRa: SF12 / 125 kHz	250
1	LoRa: SF11 / 125 kHz	440
2	LoRa: SF10 / 125 kHz	980
3	LoRa: SF9 / 125 kHz	1760
4	LoRa: SF8 / 125 kHz	3125
5	LoRa: SF7 / 125 kHz	5470
6	LoRa: SF8 / 500 kHz	12500
7	RFU	
8	LoRa: SF12 / 500 kHz	980
9	LoRa: SF11 / 500 kHz	1760
10	LoRa: SF10 / 500 kHz	3900
11	LoRa: SF9 / 500 kHz	7000
12	LoRa: SF8 / 500 kHz	12500
13	LoRa: SF7 / 500 kHz	21900
14:15	RFU	

Figura 10: Velocidad de datos (DR) (LoRa Alliance Technical committee, 2017).

El DR6 y el DR12 permiten velocidades de datos idénticos. El DR7, DR14 y DR15, están reservados para usos futuros.

CAPÍTULO 3: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA IOT

3.1 ELECCIÓN DE COMPONENTES DEL SISTEMA IOT

Previo al diseño e implementación del sistema IoT, se realizó la selección de los dispositivos que integra. Mediante cuadros comparativos se determinaron, el nodo terminal, el gateway, el sensor para la detección vehicular, el servidor de red y el entorno para el desarrollo de la aplicación web; como se detalla a continuación.

3.1.1 Nodos terminales LoRaWAN

En la tabla 2, se realizó la comparación de tres fabricantes de nodos terminales. De las características descritas se destacó que, el nodo terminal RAK811 WisNode, opera con una potencia de transmisión de 14 dBm, una sensibilidad de -146 dBm, alcanzando distancias mayores a 5 Km en áreas urbanas; bajo consumo de energía tanto en el modo de transmisión como en recepción, un rango de temperatura de operación entre -40 °C a +85 °C. La mayor sensibilidad de recepción, es la característica determinante que presenta el nodo terminal Rak811 para implementar nodos sensores a nivel de la superficie de la vía de tránsito, sumado a que presenta un menor costo para la adquisición, además, el fabricante ofrece buen soporte bibliográfico. Por lo tanto, para el desarrollo del presente proyecto se eligió el nodo terminal RAK811.

Teniendo en cuenta que el RAK811 es compatible con la placa de desarrollo Arduino; para la implementación del prototipo del nodo sensor se utilizó la tarjeta Arduino Uno como microcontrolador; cuyas características se describen en la tabla 3 y las tarjetas se muestran en la figura 11.

NODOS TERMINALES LORAWAN			
Características	Libelium LoRaWAN	TTGO T-Beam	RAK811 WisNode LoRa
Fabricante	Microchip	LilyGO	RAK Wireless
Transceptor	RN2903 (SX1276)	TTGO (SX1276)	RAK811 WisNode (SX1276)
Dispositivo	Clase A	Clase A	Clase A y C
Frecuencia de operación	AU915	AU915	AU915 y AS923
Potencia de Transmisión	+18.5 dBm	+20 dBm	+14 dBm
Sensibilidad	-136 dBm	-139 dBm	-146 dBm
Alcance	Mayor a 5 km en áreas urbanas	Mayor a 5 km en áreas urbanas	Mayor a 5 km en áreas urbanas
Consumo de corriente	Trasmisión 124.4 mA, y encendido 2.7 mA.	Trasmisión 120 mA Encendido 14 mA	Trasmisión 30 mA, modo Dormido 7.2 uA.
Temperatura de operación	-30 °C hasta +70 °C	-40 °C hasta + 85 °C	-40 °C hasta +85 °C
Precio referencial	\$ 324.90	\$ 48.50	\$ 22.50.

Tabla 2: Comparación de las principales características de nodos terminales LoRaWAN (Elaboración propia)

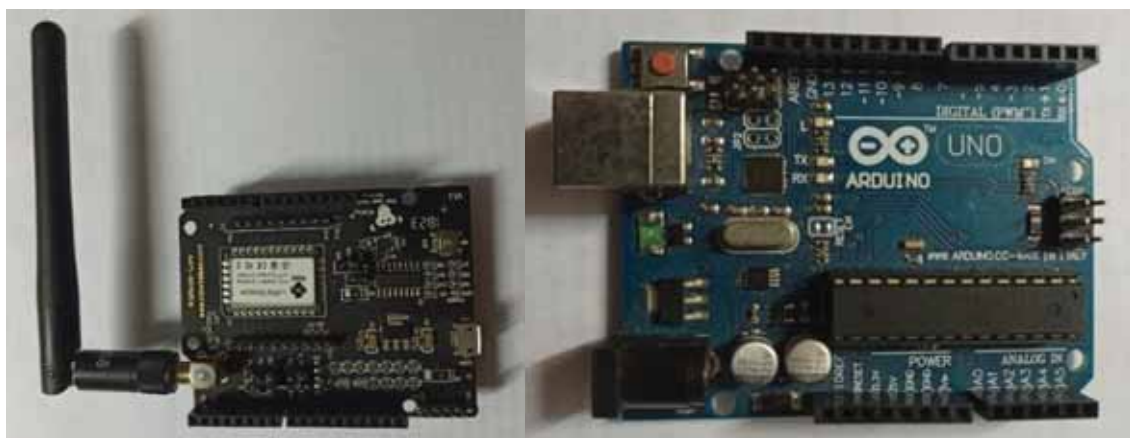


Figura 11: Nodo terminal: Rak811 y Arduino Uno (Elaboración propia)

ARDUINO UNO	
Microcontrolador	Microchip ATmega328P
Voltaje de entrada	7 a 12 voltios
Voltaje de operación	5 voltios
Pines de E/S digitales	14 (de los cuales 6 proporcionan salida PWM)
Pines de E analógica	6
Memoria Flash	32 KB de los cuales 0.5 KB utilizados por el gestor de arranque
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM:	1 KB (ATmega328P)
Velocidad del reloj	16 MHz
Dimensiones	68.6mm x 53,4mm

Tabla 3: Características de la placa de desarrollo Arduino Uno (Elaboración propia)

3.1.2 Gateway LoRaWAN

Existen una diversidad de gateways ofrecidos por distintos fabricantes. Para el desarrollo del sistema planteado, se realizó una comparación de tres fabricantes y a partir de ello se determinó el gateway más conveniente en base a las especificaciones descritas en la tabla 4.

Se observa que el Rak831 Pilot Gateway, tiene características muy similares a las marcas comparadas, diferenciándose drásticamente en que está diseñado para ambientes internos (no tiene protección IP67), éste hecho da lugar a la enorme diferencia en costo, además, al tener ya elegido en la marca Rak el nodo terminal, es conveniente que el Gateway sea de la misma marca. Por lo tanto, para el diseño del sistema IoT a nivel prototipo, se elige el RAK831 Pilot Gateway, el cual se muestra en la figura 12.

GATEWAYS LORAWAN			
Características	Kerlink Wirnet iStation	MultiTech Conduit IP67 Base Station	RAK831 Pilot Gateway
Frecuencias de operación	AU915 y AS 923	AU915 y AS 923	AS 923 y AU915
Número de canales soportados	9 canales (Half Duplex)	16 canales (Half Duplex)	8 canales (Half Duplex)
Conectividad de Backhaul	4G, 3G, 2G y Ethernet.	4G, 3G, 2G y Ethernet.	Ethernet.
Potencia de transmisión	27 dBm	27 dBm	27 dBm
Sensibilidad de Recepción	-141 dBm	-	-142.5 dBm
Sistema operativo	Basado en Linux.	Basado en Linux.	Basado en Linux.
Tipo de Alimentación	PoE	PoE y PoE+	Fuente de 5V a 2.5A
Temperatura de operación	-40°C a +60°C	-30°C a +75°C	0°C a 70°C
Protección IP67	si	si	no
Precio Referencial	\$ 750	\$ 1238	\$ 199

Tabla 4: Comparación de principales características de Gateway LoRaWAN

(Elaboración propia)

El Gateway RAK831, para su implementación fue acondicionado, de manera que resista las condiciones a la intemperie durante las pruebas desarrolladas. Estas especificaciones fueron descritas en el capítulo 3.2.2.



Figura 12: Rak 831 Pilot Gateway (Rakwireless Technology , 2018).

3.1.3 Sensores magnéticos para la detección de vehículos

En el mercado existen una gran diversidad de fabricantes de sensores para la determinación de presencia de vehículos, que están basados en sensores como: lazo inductivo, cámaras, radar, infrarrojos, ultrasónicos, magnéticos, etc. Sin embargo, existen factores decisivos para la elección, como son la infraestructura, factores climáticos, el costo y la implementación para el modo de detección (invasivos y no invasivos). Es así que los sensores magnéticos son más robustos a factores climáticos como lluvia, neblina y polvo; pudiendo instalarse inclusive por encima del asfalto. Por lo tanto, para la detección de vehículos estacionados en las vías de tránsito se hace uso de sensores magnéticos. En la tabla 5, se compara dos sensores magnéticos que tienen antecedentes de haber sido usados para la detección de vehículos.

Para la implementación del sistema de detección de vehículos estacionados en las zonas prohibidas, se elige el sensor HMC5883L, debido a las siguientes razones:

Incorpora un ADC integrado junto con un protocolo de comunicación I2C de fácil implementación para su lectura; ahorrando el proceso de adquisición de datos, Además incorpora tres ejes de sensibilidad, trabajando en un rango de temperatura dentro de lo que se puede alcanzar en un día normal en la ciudad del Cusco a la intemperie (8 °C a 22 °C),

considerando además la diferencia en el precio que es prácticamente la mitad del sensor AAH002-02E.

SENSORES MAGNÉTICOS		
CARACTERÍSTICAS	Sensor AAH002-02E	Sensor HMC5883L
Tecnología (Efecto magnetorresistivo)	GMR	AMR
Rango lineal	0.6 a +3 Gauss	0 a +2 Gauss
Voltaje de alimentación	1 a 12 V	2.16 a 3.6 V
Rango de temperatura de operación	-50 a 150 °C	-40 a 85 °C
ADC integrado	No	Si (ADC 16 Bit)
Dirección de Sensibilidad	Uno (Perpendicular al plano del CI)	Tres (X,Y, Z)
Precio referencial	\$20.41	\$11.5

Tabla 5: Comparación de las principales características de sensores magnéticos usados para la detección de vehículos (Elaboración propia)

El HMC5883L utiliza la tecnología magnetorresistiva anisotrópica (AMR), por lo que está diseñado para medir tanto la dirección como la magnitud del campo magnético de la tierra. Este hecho hace que sea muy adecuado para la detección de vehículos, dado que se medirá la intensidad del campo magnético de la tierra en el lugar implementado, la perturbación de esta medida por la presencia de una masa metálica (vehículo) es considerada como la detección de la presencia de un vehículo estacionado.

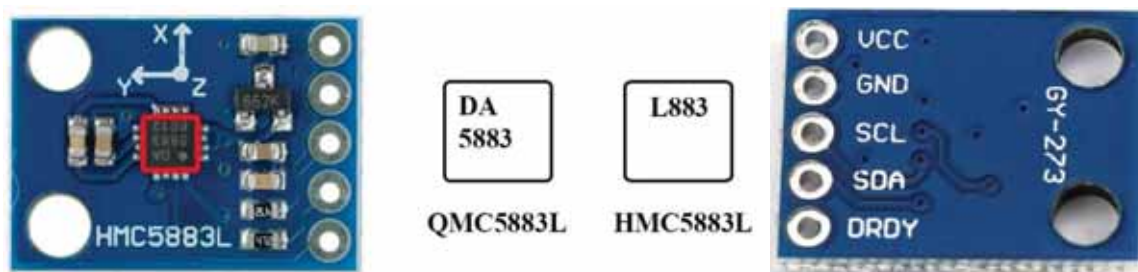


Figura 13: Identificación del chip sensor del módulo HMC5883L (Elaboración propia)

Se debe indicar que existen dos tipos de chips que se puede encontrar en los sensores HMC5883L, para la implementación de la presente tesis se identifica el chip usado como se muestra en la figura 13.

El módulo sensor HMC5883L adicionalmente tiene las características descritas en la siguiente tabla.

SENSOR HMC5883L	
Características	Descripción
Rango de Voltaje de Operación	3V a 5V
Rango de Medida	± 2 Gauss / ± 8 Gauss
Chip Sensor	QMC5883L
Protocolo de Comunicación	I2C
Dirección I2C	0x0D
Dimensiones	14.8 x 13.5 x 3.5mm

Tabla 6: Característica del módulo sensor HMC5883L (Elaboración propia)

A partir de la figura 13, se determinó que el sensor HMC5883L usado, está basado en el chip sensor QMC5883L, adicionalmente se observa que cuenta con 5 pines, dos para la alimentación, donde el primero es VCC y el segundo es GND; dos para la comunicación I2C, donde el tercero es el SCL usado para la señal de reloj y el cuarto es el SDA para transmitir los datos. Por último, el quinto es el DRDY, el cual no se usa.

3.1.4 Servidor de red LoRaWAN

Para hacer la recolección de la información es necesario contar con un servidor de red que sea capaz de administrar los dispositivos que componen la red y la información generada por los nodos. Se realizó un análisis de dos servidores de red LoRaWAN descrito en el siguiente cuadro comparativo.

SERVIDORES DE RED LORAWAN		
Características	ChirpStack	The Things Network
N° de Gateway y nodos soportados	Ilimitado.	Ilimitado.
Clases de dispositivos soportados	Soporta dispositivos de clase A, B y C	Soporta dispositivos de clase A, B y C
Versiones de LoRaWAN soportados	Admite todas las versiones de LoRaWAN (V 1.0 y V 1.1)	Admite todas las versiones de LoRaWAN (V 1.0 y V 1.1)
Protocolos de Integración	MQTT, gRPC y HTTP	HTTP y MQTT
Seguridad	Cifrado de extremo a extremo con TLS (seguridad de la capa de transporte) y claves de cifrado de 128 bits para cada dispositivo final.	Cifrado de extremo a extremo con TLS (seguridad de la capa de transporte) y claves de cifrado de 128 bits para cada dispositivo final.
Licencia	Software libre	Software libre
Infraestructura de servidor	Local	Nube
Soporte	Ofrece soporte comunitario	Ofrece soporte comunitario

Tabla 7: Cuadro comparativo de servidores de red LoRaWAN (Elaboración propia)

A partir del análisis realizado en la tabla 7, se observa que ambos servidores ofrecen características muy similares. The Things Network, ofrece una infraestructura en la nube que es capaz de soportar una cantidad de nodos finales y gateways ilimitados implementando seguridad de extremo a extremo (TLC); siendo ésta una gran ventaja, debido a que es un servidor de red alojado en internet, lo cual permite monitorear el tráfico de la información generada por los nodos sensores desde cualquier lugar del mundo. Por lo tanto, se elige el servidor de red The Things Network (TTN); éste, implementa APIs que permiten la integración de soluciones en la nube con seguridad de extremo a extremo; mediante su arquitectura red, como se observa en la figura 14.

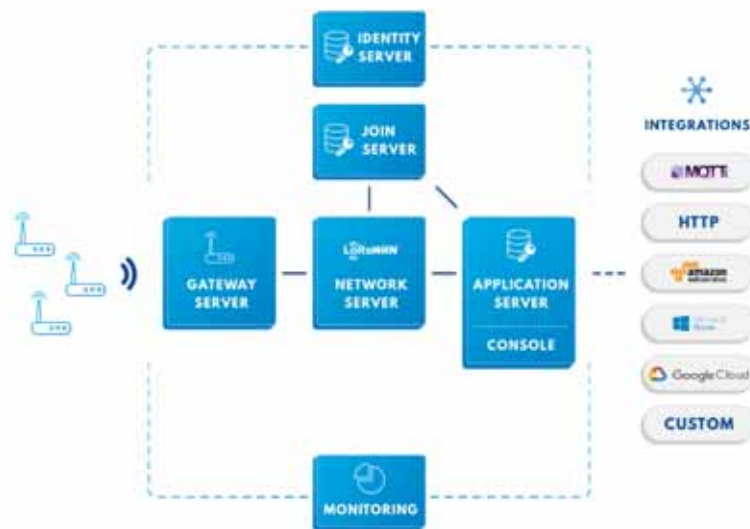


Figura 14: Arquitectura de red del servidor The Things Network (thethingsnetwork).

3.2 DISEÑO DEL PROTOTIPO IOT

Para la detección de vehículos estacionados en zonas prohibidas, en base a la elección de componentes realizado; primero se diseñó e implementó el nodo sensor, que será el encargado de enviar mensajes LoRaWAN sobre su estado actual.

Luego se procedió con la configuración del gateway, estableciendo la banda y los canales de frecuencias sobre los que trabaja el sistema. Posteriormente se realizó el registro en el servidor TTN y finalmente se acondicionó el Gateway RAK831 para su funcionamiento en condiciones a la intemperie.

Para que esta información sea procesada es necesario contar con un servidor de red, para este caso se hizo uso del servidor TTN (The Things Network), el cual cuenta con un servidor de red y un servidor de aplicaciones, donde el servidor de red muestra el mensaje codificado, el cual se decodifica en el servidor de aplicaciones. Sin embargo, no basta con tener la información decodificada de forma instantánea, es necesario contar con un entorno gráfico para el propósito específico de la tesis, donde en un mapa muestre el estado actual del nodo sensor en la vía señalizada como estacionamiento prohibido. Para lograr este propósito se hace uso de

un Kit de desarrollo de software (SDK) llamado Node-RED, haciendo uso de la API MQTT para la integración entre el servidor de red y Node-RED. En Node-RED, mediante una programación en flujos se implementa una base de datos MongoDB, para almacenar los mensajes enviados por los nodos sensores y también se crea un entorno web que hace uso de la API de Google maps y muestra el estado actual de los nodos sensores, así como el tiempo de permanencia.

3.2.1 Diseño del nodo sensor

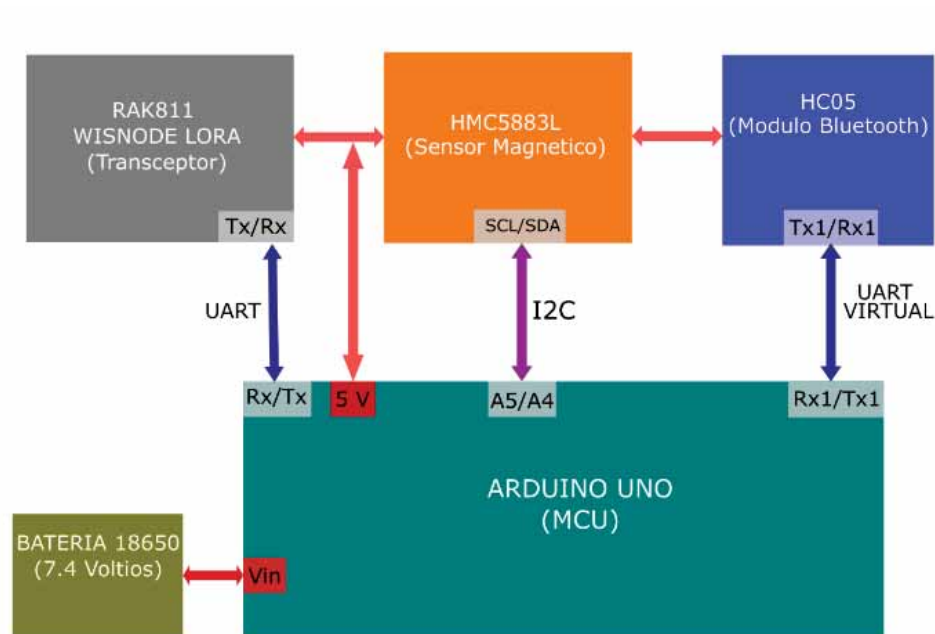


Figura 15: Esquema de la estructura de hardware del nodo sensor diseñado

(Elaboración propia).

Para el diseño del nodo sensor, se Utilizó la tarjeta de desarrollo Arduino Uno como el microcontrolador, al cual se integra el sensor magnetorresistivo HMC5883L mediante el protocolo de comunicación I2C conectados a los pines analógicos A4 y A5. La tarjeta de desarrollo RAK811 WisNode LoRa también se conecta al microcontrolador mediante los pines de comunicación serial Rx y Tx. Adicionalmente se une el módulo Bluetooth HC05 mediante

la comunicación serial, para ello se crea otro puerto serial virtual en el Arduino Uno que está compuesto de los pines 10 y 11.

Todos los módulos integrados comparten el mismo punto de tierra y una alimentación de 5 voltios regulado por la tarjeta Arduino Uno, a partir de una alimentación con dos baterías recargables de litio18650 de 3.7 voltios, finalmente el esquema del nodo sensor diseñado resulta como se observa en la figura 15.

El módulo bluetooth HC05 permitirá realizar la lectura del campo magnético terrestre mediante el sensor HMC5883L de forma inalámbrica y poder hacer registros de datos en una computadora para analizar las muestras tomadas durante el proceso experimental y de validación.

3.2.1.1 Implementación del nodo sensor

En base al diseño realizado de la figura 15, se implementa el nodo sensor tal como se observa en la fig. 16.



Figura 16: Nodo sensor implementado. (Elaboración propia)

El nodo sensor implementado en la figura 16, se observa que fue acondicionado para realizar pruebas de campo, mediante una caja solera de 15x15x8 cm³ de PVC, en cuyo interior se alojan las tarjetas que componen el nodo sensor, debido a que garantiza la comunicación por radio, además tampoco es un obstáculo para la detección de la variación del campo magnético por presencia de un automóvil.

Luego, se configuran el módulo transceptor RAK811 WisNode LoRa y el sensor HMC5883L, como se indica en la parte del Anexo A.

3.2.1.2 Diseño del algoritmo de detección

Teniendo el nodo sensor integrado físicamente, se procedió a diseñar un algoritmo que permita determinar cuándo un vehículo se encuentra estacionado en una zona prohibida de la vía de tránsito. El algoritmo diseñado se muestra en la figura 17, inicia con la configuración de los parámetros básicos del protocolo LoRaWAN para la comunicación, como indica la siguiente tabla.

Parámetro	Característica
Modo de trabajo	LoRaWAN
Clase de dispositivo	A
Región de trabajo	AU915
Tipo de mensaje	Sin confirmación
Modo de unión	ABP
Dirección del dispositivo	26062352
Clave de red	19CF85EB2714D91B4B3EEF298C453D3E
Clave de aplicación	DF9A22AD48E7ED452F2B7F9161984C95
Tasa de datos (DR)	0 (SF=12)

Tabla 8: Configuración de parámetros LoRaWAN para el nodo sensor (Elaboración propia).

Configurado el nodo sensor, se continua con el proceso de calibración, lo cuál consiste en tomar 120 muestras en un periodo de dos minutos sin presencia de masa metálica (vehículo). Además, como resultado del análisis realizado en el capítulo 4, se diseñó un filtro en 4.3.6. el cual, calcula la magnitud del campo magnético que determina la presencia de un vehículo (mIZ y MSZ).

Seguidamente se realiza la lectura del campo magnético, si de la magnitud medida, el filtro determina la presencia de un vehículo, entonces se inicia una temporización, haciendo un registro del instante t_1 de la primera detección. Luego nuevamente se hace lectura del campo magnético, si el filtro nuevamente determina la presencia de un vehículo, se registra un segundo instante de tiempo t_2 , esto significa que el vehículo aun se encuentra detenido, en ese instante se determina la diferencia entre t_2 y t_1 ; esta diferencia debe alcanzar un tiempo de **5 minutos**, que se establece como tiempo límite para determinar que un vehículo pasa de un **estado de detención a un estado de estacionamiento**, por lo tanto mientras el filtro determine la presencia de un vehículo, se actualiza continuamente el instante t_2 hasta que la diferencia alcance los 5 minutos establecidos. En el instante que se alcanzó los 5 minutos, el nodo sensor envía un mensaje de “1” lógico determinando que un vehículo se encuentra estacionado.

Si durante el registro de t_1 y t_2 , ocurre que la magnitud del campo magnético medido no supera el patrón establecido se inicia nuevamente la lectura del campo magnético.

Una vez que se ha enviado el mensaje indicando el inicio de la detección de vehículo estacionado, se lee continuamente el campo magnético hasta que el filtro determine la ausencia del vehículo, cuando esto ocurre significa que el vehículo se ha retirado y en ese instante se envía un mensaje de “0” lógico; terminando el ciclo del algoritmo. Seguidamente retorna al inicio y se ejecuta el ciclo continuamente.

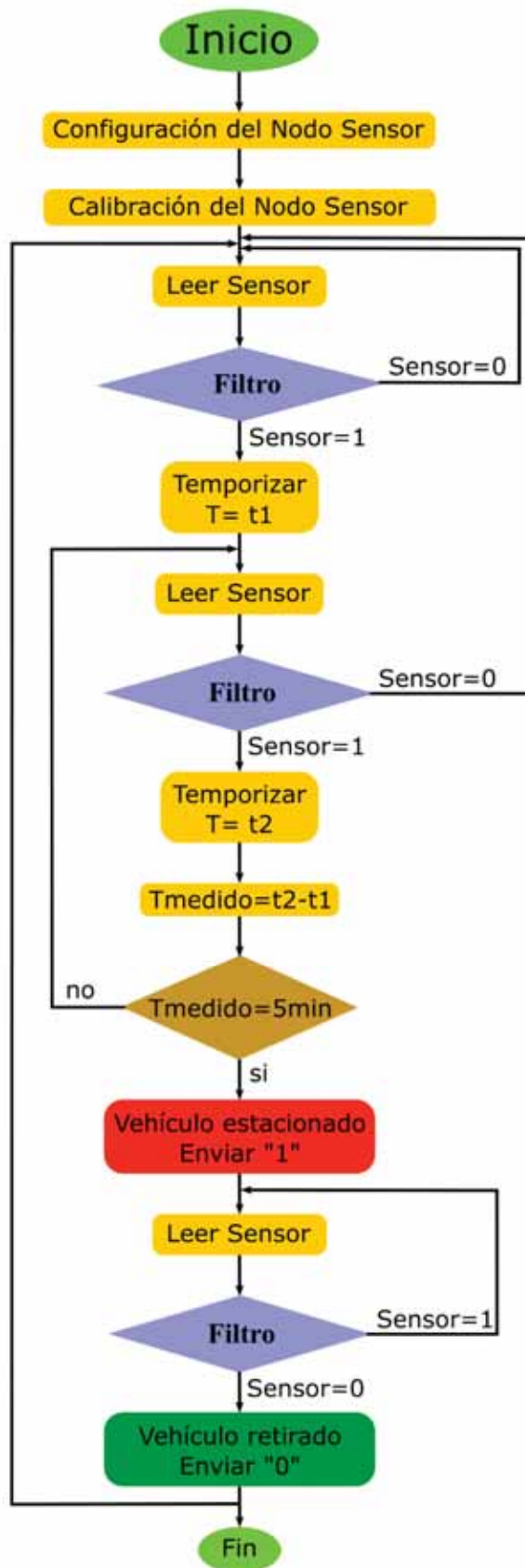


Figura 17: Diagrama de flujos del algoritmo para la detección de vehículos estacionados (Elaboración propia).

3.2.1.3 Diseño de la disposición de los nodos sensores en la vía de tránsito

El diseño de ubicación de los nodos sensores sobre el asfalto, para la detección de vehículos estacionados en zonas rígidas, está basado en el REGLAMENTO NACIONAL DE TRANSITO DEL PERU, en su sección VIII donde manifiesta sobre DETENCIÓN Y ESTACIONAMIENTO lo siguiente.

El **Artículo 217** indica que, los vehículos no deben ser estacionados a menor distancia de un metro de otro ya estacionado. La distancia con respecto a la acera al que debe estacionarse un vehículo según el **artículo 206**, está permitido a no más de 20 cm del borde de la acera y paralelo a la misma, dejando entre vehículos un espacio no inferior a 50 cm. El **artículo 207**, indica que la detención del vehículo debe efectuarse en el sentido de la circulación en el carril derecho de la vía, utilizando luces intermitentes a no más de 20 centímetros del borde de la acera y en paralelo a la misma.

En base a estos artículos descritos se realizó un diseño de ubicación de los nodos sensores sobre el asfalto. Para este fin se sabe de los alcances planteados, que el prototipo debe estar implementado en una distancia de 10 metros lineales de la vía aproximadamente. Entonces se dispone ubicarlos cada tres metros uno seguido de otro, a un metro de la acera, esto considerando la distancia entre ejes mínima del vehículo más pequeño que transita en la ciudad del Cusco; tal es el caso del vehículo de marca Suzuki modelo Alto que tiene una longitud de 3.5 metros y un ancho de 1.6 metros. De esta manera la disposición de sensores en la vía tendrá la capacidad de detectar vehículos de la categoría M1, M2, N1 y N2. Como se muestra en la siguiente figura.



Figura 18: Distribución de sensores en una vía de tránsito (Elaboración propia).

3.2.2 Implementación del gateway

El gateway RAK831 está integrado por una tarjeta concentradora de radio RAK831 LoRa, encargada de recibir hasta 8 comunicaciones a la vez por 8 canales diferentes. Integra una Raspberry Pi3 como MCU, donde se almacena Raspbian, el driver del SX1301 y el Packet forwarder (Reenviador de paquetes). Una tarjeta GPS encargada de enrutar las señales entre la Raspberry Pi3 y el RAK831 Pilot Gateway, el chip GPS no se usa para el desarrollo de la presente tesis. Todos ellos conectados mediante SPI como se aprecia en la siguiente imagen.

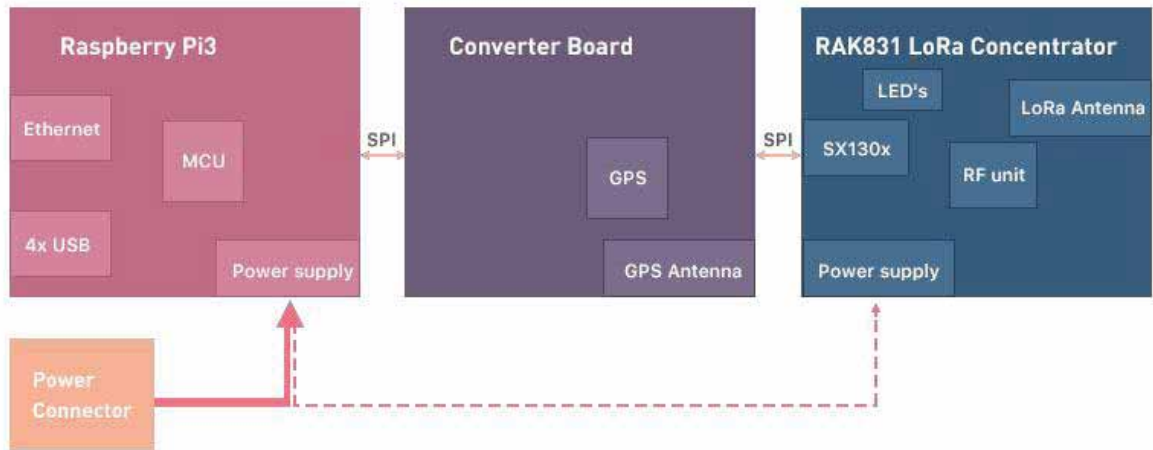


Figura 19: Estructura del Hardware del Gateway RAK831 (Rakwireless Technology , 2018).

3.2.2.1 Acondicionamiento de gateway



Figura 20: Acondicionamiento del gateway para la intemperie (imagen frontal y posterior) (Elaboración propia).

Dado que el Gateway RAK831 está diseñado para interiores, se acondicionó para que pueda tolerar las condiciones climáticas de intemperie durante el proceso de pruebas. Se usó una caja de paso de 20x20x8 cm³ PVC, en cuyo interior se fija el Gateway RAK831 y una toma de energía de 220V para la alimentación del Gateway. Adicionalmente se adosa a esta caja la

antena omnidireccional de 6dBi de fibra de vidrio con diseño para exterior y por ultimo una sujeción para ser fijado en la torre de comunicaciones de la escuela profesional de Ingeniería Electrónica. La caja de paso cuenta con dos orificios para el acceso a la energía eléctrica y la comunicación entre el gateway y el servidor de red mediante cable UTP. Tal como se puede observar en la figura 20.

3.2.2.2 Implementación de gateway en la torre



Figura 21: Instalación de gateway en torre la torre de comunicaciones (Elaboración propia).

Para la implementación del gateway, se hace uso de la torre ubicada en la azotea del quinto nivel del pabellón de Ingeniería Electrónica. Se instaló el cableado de alimentación de energía AC desde el Centro de Investigación y Servicios Tecnológicos, así como la conexión de cable UTP Cat6 para la comunicación del gateway con el servidor de red. El gateway es fijado a una

altura de 30 metros desde el piso hasta el punto de instalación en torre, a esa altura es sellado con silicona para proteger de las condiciones climatológicas. En las imágenes 21 y 22 se muestran el proceso de la instalación.



Figura 22: Gateway instalado (Elaboración propia).

3.2.3 Implementación del servidor

El servidor de red se ejecuta sobre el Sistema Operativo Linux (Ubuntu), debido a que es la plataforma más usada para la implementación de servidores en la actualidad, además que ofrece soporte a largo plazo y es gratuito. Sin embargo, este servidor también se puede ejecutar sobre Windows.

Como se mencionó anteriormente para la implementación del servidor se hace uso de The Things Network (TTN) que, implementa un servidor de red y un servidor de aplicaciones en la nube, específicamente para el protocolo LoRaWAN. Inicialmente se creó una cuenta de forma gratuita, lo que permitió tener acceso a éste servidor, registrar el gateway RAK831 y crear la

aplicación para administrar y gestionar la red LoRaWAN. Estas especificaciones se observan en las figuras 23, 24 y 25.

3.2.3.1 Registro del gateway Rak831

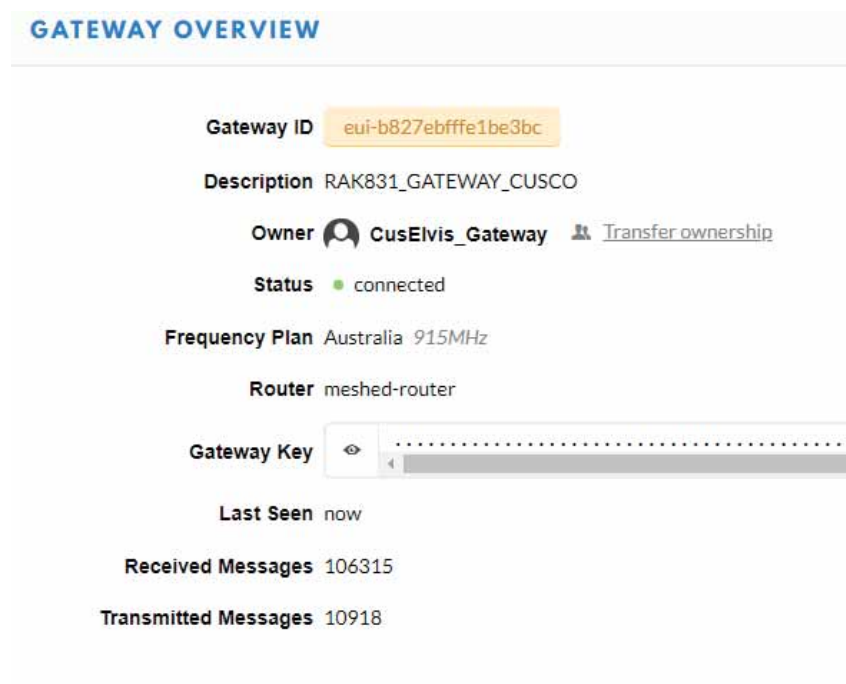


Figura 23: Registro del RAK831 Pilot Gateway en TTN (Elaboración propia).

Como se observa en la figura 23, el gateway se registró en la sub banda 2, es decir los canales del 8 al 15 de la banda Australiana (916.8 a 918.2 MHz).

Adicionalmente se estableció las coordenadas de ubicación, en la torre de la escuela profesional de ing. Electrónica.

3.2.3.2 Creación de la aplicación

Las características de la aplicación creada, se describen como se observa en la figura 24. La clave de acceso de la aplicación (Access Keys), es generado automáticamente por el servidor, el cual es utilizado para la integración mediante APIs (MQTT).

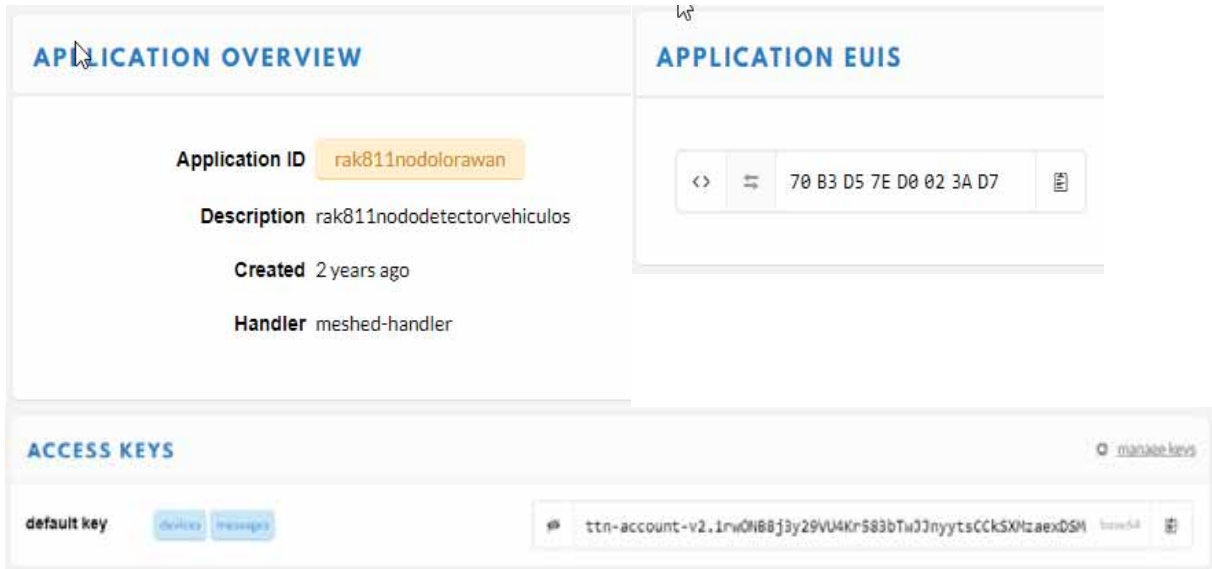


Figura 24: Creación de la aplicación en TTN (Elaboración propia).

3.2.3.3 registro de nodos sensores:

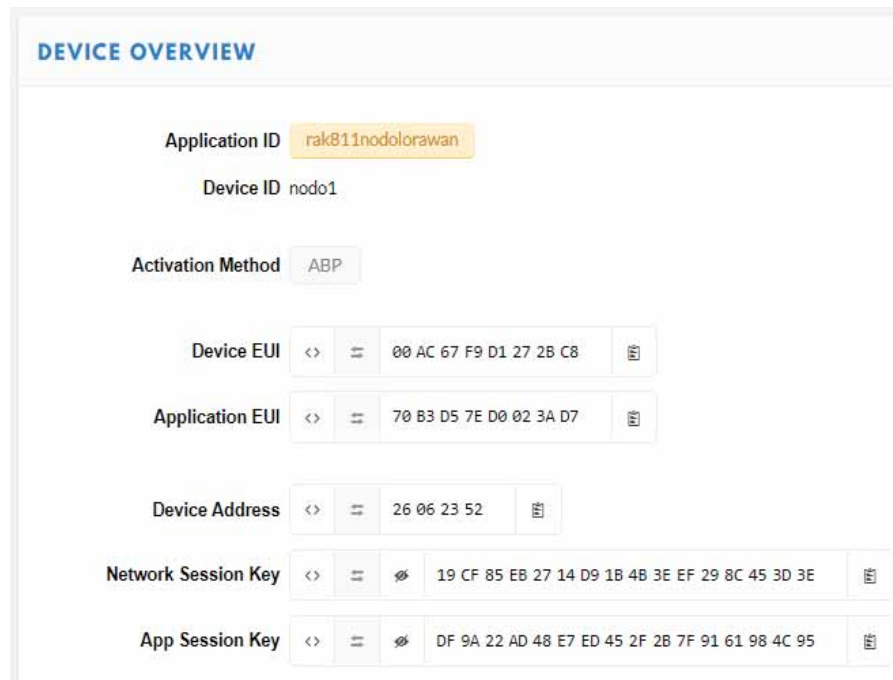


Figura 25: Registro del nodo sensor 1 en TTN (Elaboración propia).

En la aplicación creada, se procede a registrar los nodos sensores con las características que se describe en la figura 25; se establece el modo de unión a la red mediante ABP y se genera de forma automática las claves de sesión de red (Network Session Key) y de aplicación (App Session Key), con lo cual se encripta los mensajes durante la comunicación.

El sistema de detección de vehículos infractores de la vía rígida diseñado, contempla tres nodos sensores, para los cuales el registro se realizó del mismo modo que para el nodo sensor 1.

3.2.4 Diseño e implementación de la interfaz visual

Con el servidor de red TTN implementado, se procede a diseñar la aplicación de la interfaz visual donde se muestra un mapa con la ubicación y el estado actual de la vía de tránsito demarcada como rígida. Para ello, se integra el servidor TTN con Node-RED mediante el protocolo MQTT.

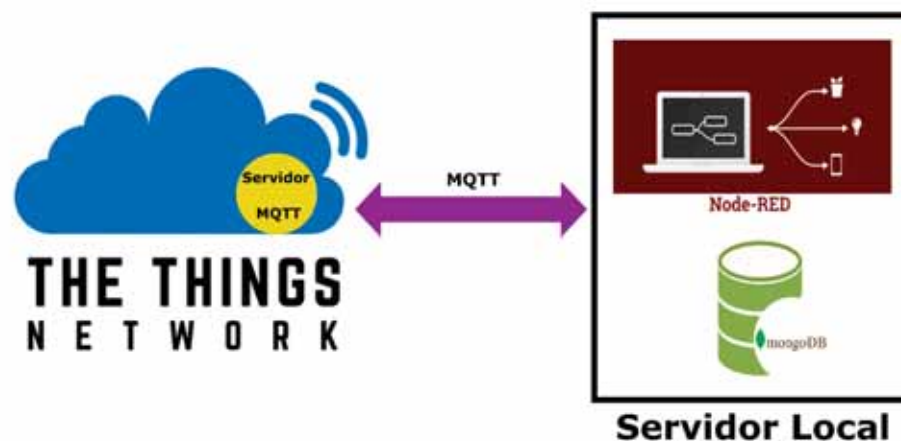


Figura 26: Esquema de integración entre TTN Node-RED mediante MQTT.

(Elaboración propia)

En un servidor local se instala Node-Red, el cual se ejecuta sobre Node.JS (motor de ejecución asíncrono de JavaScript para servidores). Adicionalmente se implementa el servidor de base de datos MongoDB para almacenar la información generada por los nodos sensores y

su interface visual MogoDB Atlas para una mejor administración de la información almacenada. En consecuencia, el servidor es implementado como se observa en el esquema de la figura 26.

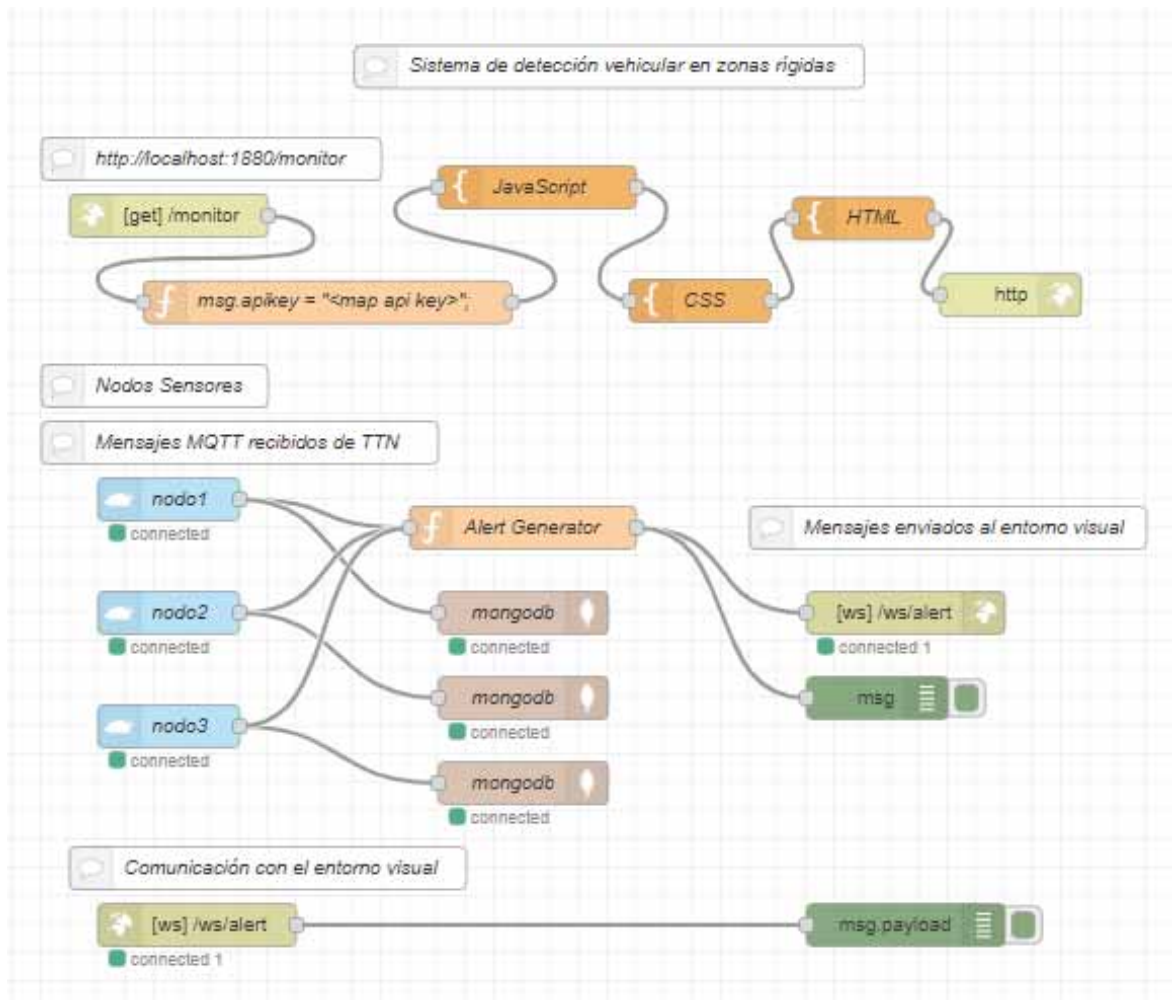


Figura 27: Diagrama de flujos en Node-RED que implementa la interfaz web del sistema IoT (Elaboración propia).

Para el diseño de la interfaz visual, se crea un flujo de bloques que implementa una aplicación web, mediante Node-Red, como se observa en la figura 27, la cual utiliza el lenguaje de programación JavaScript, el lenguaje de maquetado HTML y el lenguaje de estilos CSS. Adicionalmente se crean flujos que implementa la base de datos para almacenar la información generada por los nodos sensores.

La interfaz web diseñada permite visualizar un mapa con el estado actual y la ubicación de los nodos sensores, mostrando el estado de ocupación de la zona rígida, para ello se utiliza la API de Google Maps, la aplicación web creada se ejecuta en el local host por el puerto 1880 de Node-RED y mediante web socket se obtiene los mensajes de estado de ocupación de la zona rígida recibida por los bloques nodo1, nodo2 y nodo3 que se encuentran integrados a TTN mediante MQTT.

Mediante el código de programación JavaScript y en el bloque del mismo nombre, se determina cuándo un vehículo inicia y termina el ciclo de estacionamiento. Esta programación obedece la siguiente tabla de verdad:

Estado anterior	Estado actual	Flanco	Resultado Final
0	0	-	0 (Mantiene su estado)
0	1	Subida	1
1	0	Bajada	0
1	1	-	1 (Mantiene su estado)

Tabla 9: Tabla de verdad que determina el estado actual de la vía rígida en la interfaz web (Elaboración propia).

El código inicia con la lectura del estado actual y considerando siempre que por primera vez el estado anterior es un 0 lógico. Si el resultado final es “1” significa la presencia de un vehículo estacionado en la zona rígida y “0” es la ausencia.

Cuando se da el caso de que el estado anterior es “0” y luego pasa al estado actual “1”; se le conoce como flanco de subida y produce el resultado final de “1”. En ese caso, en la interfaz web se muestra un icono de un vehículo que representa el estado ocupado en la zona rígida monitoreada por el nodo sensor y a la vez se captura el instante del tiempo en que inicia el periodo de estacionamiento.

Cuando se presenta el caso en que el estado anterior es “1” y luego el estado actual es “0” representa un flanco de bajada y produce el resultado final de “0”. Entonces en la interfaz web, se retira el icono que representa el vehículo estacionado y se captura el tiempo de finalización del estado de ocupación, seguido se grafica este tiempo de ocupación (estado de ocupación vs tiempo). Estos resultados se observan en la figura 45.

Para los casos en los que el estado actual sea el mismo que el estado anterior (00 ó 11), no existe flanco. De acuerdo con la tabla 9, si el estado anterior y el actual son “0”, se obtiene como resultado final “0”; sin embargo, de acuerdo con el algoritmo de detección diseñado, significa que un vehículo se retiró de la vía rígida luego de estacionarse, y sin haber detectado un nuevo ciclo de estacionamiento, se detecta el que el vehículo se retiró, lo cual no es real. Por otro lado, si el estado anterior y el actual son “1”, se obtiene como resultado final “1”; de acuerdo con el algoritmo diseñado, significa que se ha iniciado un ciclo de estacionamiento y sin haberse retirado el vehículo, se vuelve a detectar un nuevo ciclo; lo cual tampoco es correcto. Por lo tanto, los dos casos descritos, son detecciones con pérdidas de paquetes en la comunicación o detecciones erróneas por el nodo sensor.

Toda la implementación del código de la aplicación creada se muestra en el anexo B.

3.2.5 Planificación de red usando Radio Mobile

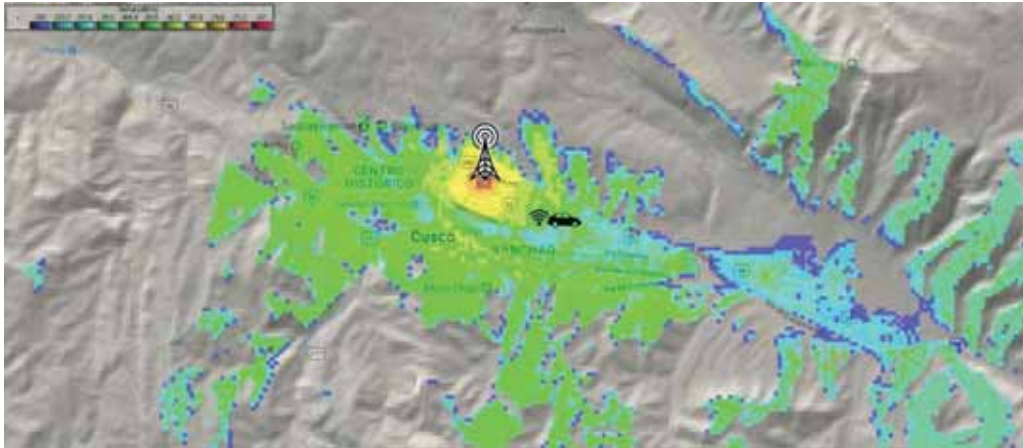
Para el estudio de la cobertura de la tecnología LoRaWAN, la planificación de red se realizó utilizando el software de simulación Radio Mobile. Para ello se tomó en cuenta las características técnicas del Gateway RAK831 y del RAK811 WisNode LoRa, que fueron los dispositivos utilizados para el desarrollo de esta tesis. Estas características son descritas en la tabla 10. Adicionalmente, se consideró que el gateway se encuentra ubicado en la torre de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica y el nodo en un punto próximo al gateway dentro del área de cobertura.

Para la simulación se consideró un sistema móvil, con antenas polarizadas verticalmente. Dado que el entorno de trabajo es un área urbana se estableció que, el 80% es ciudad y un clima continental templado, debido a que Cusco es considerado como parte de las superficies en la zona templada. En el desarrollo de la tesis, se determinó la cobertura de la tecnología LoRaWAN **para sensores ubicados a nivel de piso**, sin embargo, Radio Mobile solo permite establecer una altura mínima para el dispositivo final (Rak811) de 0.5 metros.

Características	RAK831 Pilot Gateway	RAK811 WisNode LoRa
Ancho de banda	915-928 MHz (AU915MHz)	915-928 MHz (AU915MHz)
Potencia de transmisión	27dBm	14dBm
Sensibilidad de recepción	-135.7dBm	-130dBm
Perdidas por conexiones	2dB	0 dB
Ganancia de antena	6dBi	2dBi
Altura de antena	30m	0.5m
Tipo de antena	Omnidireccional	Dipolo

Tabla 10: Características técnicas de los dispositivos de red (Elaboración propia)

Una vez configurados los dispositivos usados para la comunicación, se procede con la simulación de cobertura de radio mediante el análisis cartesiano combinado, para lo cual se estableció que, el enlace de comunicación está dado por el Gateway Rak831 como transmisor y el nodo Rak811 como receptor, por tanto, la sensibilidad limite a evaluar se establece entre -67dBm a -130dBm.



*Figura 28: Cobertura LoRaWAN mediante Radio Mobile para la ciudad del Cusco
(Elaboración propia).*

La figura 28, muestra los resultados de la simulación en base a los parámetros definidos en la tabla 10. El área de cobertura generada por el software Radio Mobile, muestra una distribución de mapa de calor, donde el color cambia en función del nivel de potencia que el receptor será capaz de percibir y la distancia entre el receptor y el gateway.

Para analizar la figura 28 generada por Radio Mobile, es exportado a Google Earth y se determina que: el primer kilómetro de cobertura, se pinta de colores rojo, amarillo, verde y muy pocos puntos de celeste, que corresponde a niveles de potencia entre -67 a -111.1 dBm; el segundo kilómetro, se pinta de colores amarillo, verde y algunos puntos de celeste, comprendido entre -85.9 a -117.4 dBm de potencia; el tercer kilómetro, se pinta de colores verde, celeste y con ligeros puntos azules, que corresponde entre -98.5 a -117.4 dBm de potencia; el cuarto kilómetro, se pinta de colores verde y celeste con mayor intensidad, que corresponde entre -98.5 a -123.7 dBm; y por último el quinto kilómetro se pinta de colores verde, celeste y azul comprendido entre -104.8 a -130 dBm, a esta distancia el área de cobertura ya se muestra con niveles de potencia muy bajos.

CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS

Durante el desarrollo de todas las pruebas para la obtención de resultados se realizó un plan de **puesta en operatividad del sistema** mediante los siguientes pasos:

1. Comprobación de conectividad del gateway con el servidor TTN.
2. Test de envío de mensajes periódicos del nodo sensor al servidor TTN.
3. Ejecución del servidor local (Node-Red, MongoDB y la aplicación web).
4. Test de recepción, almacenamiento y ejecución de la aplicación web con los mensajes recibidos en el servidor local.

4.1 PRUEBAS DE COBERTURA

En base a la simulación realizada en Radio Mobile, el alcance de cobertura del gateway muestra un rango de 5 Km. Para el desarrollo de las pruebas experimentales se estableció tres rutas a lo largo de la ciudad tomando como centro el pabellón de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica; La ruta A, comprende en sentido este (hacia el distrito de San Sebastián) a lo largo de la Av. De la Cultura; la Ruta B, comprende en sentido oeste (hacia el Centro Histórico) y la ruta C, comprende en sentido sur (Hacia el Distrito de Wanchaq). Estas tres rutas permiten muestrear los diferentes escenarios urbanos de la ciudad del Cusco como se observa en la figura 29, descrito por los iconos verdes.

La recolección de información se realizó en puntos fijos de la vía de tránsito vehicular, **considerando una altura de 0 metros a nivel del piso para los dispositivos finales**. Por criterio se tomó muestras de paquetes de mensajes del modo siguiente: primero a cada 100 metros del gateway hasta llegar a un kilómetro de distancia. Luego se tomó muestras a cada 200 metros, hasta llegar a los 2 kilómetros. A continuación, a cada 300 metros hasta alcanzar los 3 kilómetros. Seguidamente cada 500 metros hasta llegar a los 4 kilómetros y por último a

los 5 kilómetros de distancia. Tal como indica los círculos concéntricos e iconos en la figura 29.

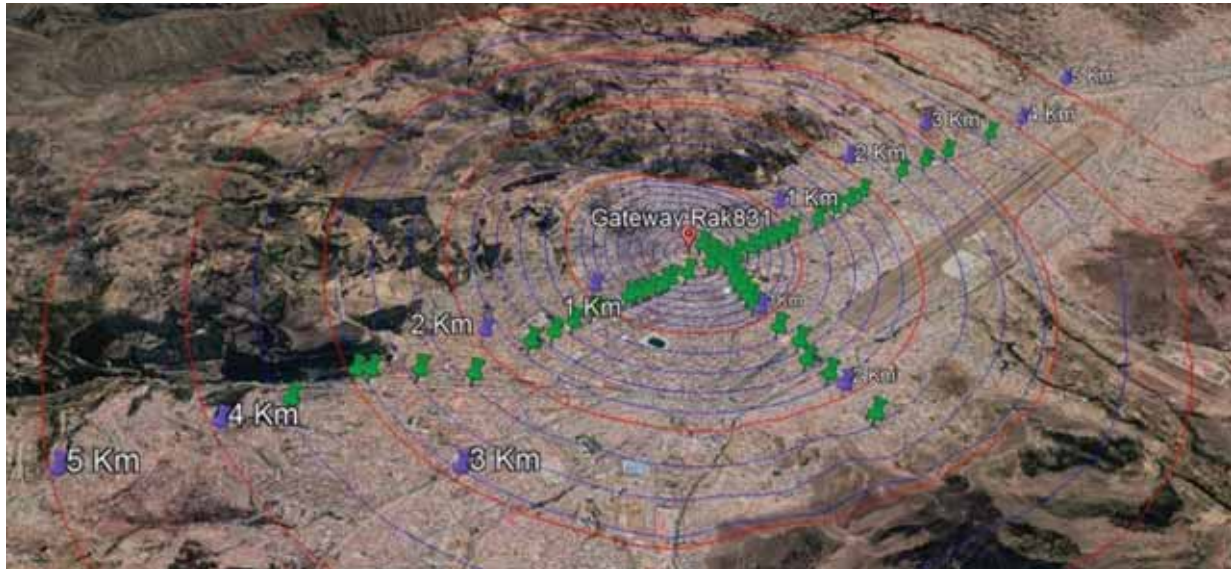


Figura 29: Recorrido para toma de muestras de cobertura LoRaWAN, en la ciudad del Cusco (Elaboración propia).

Los dispositivos (gateway y nodos sensores), fueron configurados considerando sus características técnicas, tal como se describe en la tabla 10. Adicionalmente los nodos sensores, fueron programados usando un Arduino Uno como microcontrolador (MCU), considerando un factor de dispersión (SF) de 12, esto con la finalidad de evaluar condiciones extremas de alcance máximo en cobertura, a una velocidad mínima de transmisión.

Para la recolección de datos, cada muestra tomada se compone de 100 paquetes de mensajes transmitidos en intervalos de 3 segundos. En la figura 30 se muestra el esquema usado para la recolección de datos, donde los mensajes transmitidos desde cada posición, son retransmitidos al servidor de red The Things Networks (TTN) mediante el Gateway Rak831, estos datos son almacenados en la base de datos de MongoDB y se ejecuta en la aplicación web creada en Node-RED sobre el servidor local.

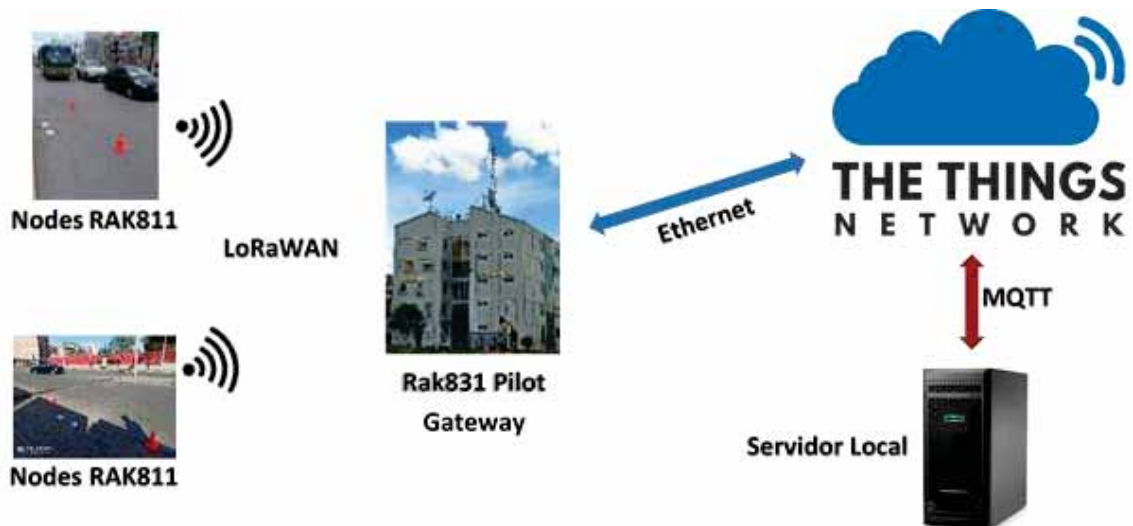


Figura 30: Esquema de red del sistema implementado (Elaboración propia).

Las pruebas de cobertura se realizaron utilizando dos nodos, los cuales fueron configurados a un SF12 como se mencionó anteriormente, la posición fue tomada mediante una aplicación Google Earth que hace uso del GPS del celular para Android, tal como se muestra en la imagen 31.



Figura 31: Pruebas de cobertura para la Ruta A, B y C (Elaboración propia).

Los mensajes transmitidos por los nodos sensores desde cada uno de los puntos donde se toma las muestras, se reciben en el servidor TTN como se observa en la figura 32. Se puede apreciar que el tiempo entre mensajes recibidos es de 6 segundos; esto es debido al protocolo LoRaWAN, es decir que cada evento de transmisión incluyendo las dos ventanas de recepción

debe tomar alrededor de 3 segundos. Adicionalmente se observa que el tamaño del payload es de 18 Bytes para todos los mensajes recibidos.

time	frequency	mod.	CR	data rate	airtime (sec)	rssi	payload size
12:46:38	918	lora	4/5	1012 BW125	1318.9	-74	18 bytes
12:46:32	917.8	lora	4/5	1012 BW125	1318.9	-73	18 bytes
12:46:26	917	lora	4/5	1012 BW125	1318.9	-72	18 bytes
12:46:20	917	lora	4/5	1012 BW125	1318.9	-71	18 bytes
12:46:14	917.8	lora	4/5	1012 BW125	1318.9	-70	18 bytes
12:46:07	917.2	lora	4/5	1012 BW125	1318.9	-68	18 bytes
12:45:54	918	lora	4/5	1012 BW125	1318.9	-67	18 bytes
12:45:50	917.6	lora	4/5	1012 BW125	1318.9	-66	18 bytes

Figura 32: Registro de mensajes en el servidor TTN (Elaboración propia).

Adicionalmente, cabe aclarar que durante el desarrollo de las pruebas de cobertura el gateway se mantuvo encendido día y noche por tres meses continuos, debido a las restricciones de acceso a la universidad por causa de la pandemia; además las pruebas experimentales fueron desarrolladas durante los días entre las 8 a.m. y las 6 p.m., sin embargo, también se desarrollaron test de comunicación durante las noches.

4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE COBERTURA

Para realizar el análisis de cobertura se analizó el porcentaje de paquetes recibidos y los niveles de RSSI en función de la distancia recorrida. Después de haber realizado los recorridos planteados, con los resultados obtenidos se realizó los siguientes análisis.

4.2.1 Análisis del porcentaje de paquetes recibidos

De la figura 33, a partir de los resultados obtenidos se realiza el siguiente análisis:

Para la ruta A, entre los primeros mil metros, se obtiene por encima del 88% de paquetes recibidos; luego, en el segundo kilómetro disminuye hasta un 43% y el tercer kilómetro la pérdida de paquetes se hace más notoria, es así que para los 2300 metros solo se obtiene un 39% de paquetes recibidos, luego a 2600 metros solo alcanzan 25% y a los tres kilómetros solo se logra obtener 5% de paquetes recibidos. Este hecho limita que el recorrido se continúe hasta los cinco kilómetros como se había indicado en la simulación, por lo tanto, las muestras para este recorrido concluyen a una distancia de tres kilómetros.

La disminución drástica del porcentaje de paquetes recibidos en el tercer kilómetro, se debe a que el relieve de la superficie terrestre muestra mayor desnivel con la distancia, que no permite una comunicación efectiva; además de la presencia obstáculos como edificios con más de 7 niveles.

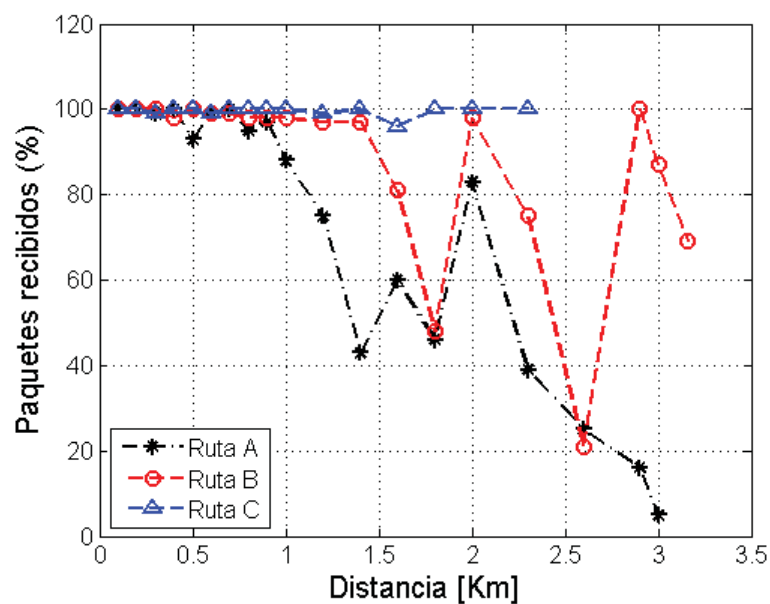


Figura 33: Porcentaje de paquetes recibidos para las rutas A, B y C en función de la distancia alcanzada (Elaboración propia).

Para la ruta B, se observa que los paquetes recibidos para los primeros mil metros, están por encima del 98%. Luego en el segundo kilómetro, disminuye hasta un 48% a los 1800 metros de recorrido. Entre los dos mil y tres mil metros, la mayor pérdida de paquetes se da a los 2600

metros, alcanzando solo un 21%, sin embargo, a 2900, 3000 y 3159 metros se obtiene desde 69% y alcanzando inclusive el 100% como se puede apreciar en la curva de color rojo. En este recorrido, las muestras tomadas finalizan por la calle Saphy, la misma que se encuentra en una quebrada, donde permite muestrear con mayores obstáculos el área urbana y, así obtener un dimensionamiento correcto para la cobertura LoRaWan en el centro histórico de la ciudad del Cusco. También cabe mencionar que este recorrido ofrece un mejor rendimiento que el realizado en sentido este.

Para la ruta C, en los primeros mil metros, se obtiene por encima del 99% de paquetes recibidos, luego en el segundo kilómetro, disminuye hasta un 96% y entre dos mil y tres mil metros, la geografía limita el recorrido hasta los 2300 metros con 100% de paquetes recibidos, por encima de esta distancia ya no existe un entorno urbano. Sin embargo, cabe mencionar que en este recorrido se obtiene un mejor porcentaje comparado con los dos anteriores.

4.2.2 Análisis del RSSI de los paquetes recibidos

De la figura 34, a partir de los resultados obtenidos se realiza el siguiente análisis:

Para la ruta A, en el gráfico se observa que el nivel de RSSI disminuye casi de forma gradual con la distancia, esto se debe a la característica de este entorno urbano, pues en este recorrido se halla la mayor parte de las construcciones actuales, es decir edificios de hasta 10 niveles; en un entorno geográfico no muy cambiante en su recorrido.

En el caso de la ruta B, el RSSI va disminuyendo también en función a la distancia, sin embargo, a 900 y 1000 metros cambia ligeramente incrementando el nivel del RSSI, así como ocurre a los 2000 metros. Este hecho explica que, en el trayecto donde se tomaron las muestras, existen puntos con mayor elevación en relieve terrestre, a diferencia de la ruta A; además que las construcciones para este recorrido en su mayoría son de dos pisos y a lo más de tres pisos,

que son propios y característicos de construcciones coloniales del Centro Histórico del Cusco; por lo que inclusive el alcance de comunicación es superior a los 3000 metros.

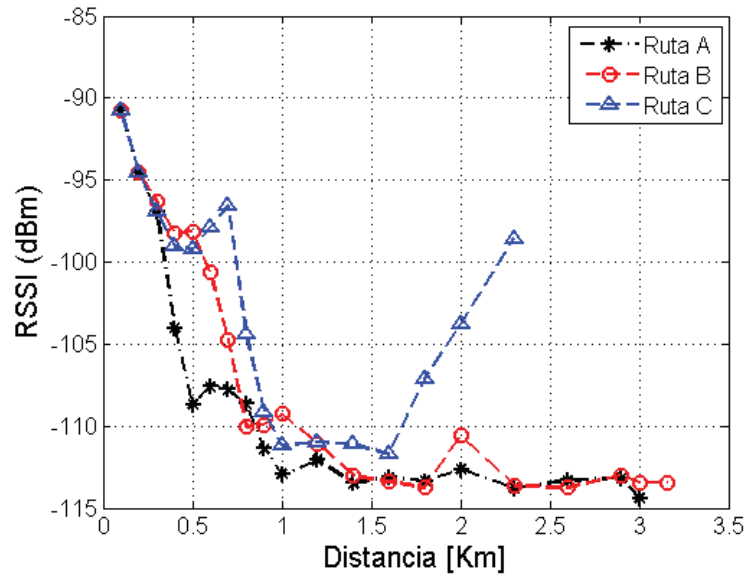


Figura 34: Niveles de RSSI registrados para las rutas A, B y C en función de la distancia alcanzada (Elaboración propia).

Por último, en el recorrido de la ruta C, el comportamiento del RSSI es bastante variado con bajadas y subidas de niveles de potencia, esto se debe a que el entorno geográfico hasta los 700 metros tiene una trayectoria relativamente plana, luego se tiene un desnivel de bajada hasta 1km prácticamente, seguidamente se observa una trayectoria plana a ese desnivel hasta los 1600 metros, a partir del cual se inicia nuevamente a tener un ascenso hacia la falda del cerro, con lo que el nivel del RSSI incrementa nuevamente. Hay que advertir que en este escenario los edificios llegan a alcanzar hasta los 8 pisos de altura con una diversidad muy variada.

A partir del análisis del porcentaje de paquetes recibidos y niveles de RSSI promedio de las figuras 33 y 34, se resume el estudio realizado para el nodo sensor configurado a un SF12 en la tabla 11.

DISTANCIA (Km)		0 a 1	1 a 2	2 a 3
Ruta A	Paquetes recibidos (%)	100% - 88%	83% - 43%	39% - 5%
	RSSI (dBm)	-90.8 a -112.94	-112.07 a -113.49	-113.32 a -114.4
Ruta B	Paquetes recibidos (%)	100% - 98%	98% - 48%	100% - 21%
	RSSI (dBm)	-90.8 a -110.03	-110.6 a -113.73	-112.98 a -113.76
Ruta C	Paquetes recibidos (%)	100% - 99%	100% - 96%	100%
	RSSI (dBm)	-90.8 a -111.21	-103.8 a -111.72	-98.59

Tabla 11: Síntesis del estudio de cobertura experimental a SF12 (Elaboración propia).

4.3 PRUEBAS Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE DETECCIÓN DE VEHÍCULOS ESTACIONADOS EN UNA ZONA RÍGIDA

Los datos obtenidos del campo magnético medido mediante el sensor HMC5883L, fueron capturados a través de la comunicación Bluetooth que integra el nodo sensor, para lo cual se utilizó una laptop con otro módulo Bluetooth y a través del puerto COM se capturan los datos leídos mediante el software RealTerm y se realizan los análisis para cada prueba, como se observa en la figura 37.

En vista que el nodo sensor debe determinar cuándo un vehículo se ha estacionado en una vía de tránsito, se caracteriza la lectura del sensor magnetorresistivo HMC5883L en tres eventos puntuales:

- **Evento 1**, el vehículo atraviesa el sensor hasta el primer eje.
- **Evento 2**, el vehículo atraviesa el sensor hasta la mitad del cuerpo.
- **Evento 3**, el vehículo atraviesa el sensor hasta el segundo eje.

Para el caso de la validación del sistema implementado, además de los pasos de puesta en operatividad y los tres eventos planteados, se realiza la calibración del nodo sensor, en base al diseño de filtro de histéresis descrito en 4.3.6.

4.3.1 Caracterización del campo magnético medido dentro y fuera de la superficie terrestre

El nodo sensor implementado debe ser enterrado o incrustado en la vía de tránsito para evitar que pueda ser dañado por el peso de los vehículos al momento de ser atravesados y además evitar actos de vandalismo. Dado que se trata de la implementación de un sistema a nivel prototipo, las pruebas experimentales se llevaron a cabo sobre la superficie de la vía de tránsito; sin embargo, para validar que las pruebas experimentales desarrolladas en adelante sean reales, se capturaron muestras del campo magnético medido cuando el nodo sensor se encuentra enterrado y cuando se encuentra sobre la superficie del suelo; cabe aclarar que el sensor magnético al ser enterrado se encuentra en la parte superior de la caja, ubicándose prácticamente a nivel de la superficie del piso experimental. Por lo tanto, se toman una muestra por segundo, durante alrededor de 5 minutos para cada caso, como se muestra en la figura 35.



Figura 35: Medición del campo magnético terrestre cuando el nodo sensor se encuentra enterrado y sobre la superficie del suelo (Elaboración propia).

En la figura 35, el sensor magnético HMC5883L, fue ubicado con los ejes de sensibilidad X, Y, formando un plano paralelo a la superficie del suelo y, la dirección sensible Z, perpendicular al plano formado. Esta disposición es la misma para todas las pruebas realizadas.

Luego de realizar varias mediciones se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 12, donde se observa que para un mismo punto el campo magnético promedio medido en las direcciones X, Y y Z son aproximadamente iguales, con una variación estándar de alrededor de 2 mGauss. Además, si se analiza la resultante del vector del campo magnético medido, solo varía en un rango de decimas con una desviación estándar también de 2 mGauss. Este hecho significa que podemos obtener lecturas del campo magnético por encima o debajo del promedio a lo más en 2 mGauss, siendo este valor una variación pequeña. Por lo tanto, es válido hacer mediciones del campo magnético con el nodo sensor implementado a nivel de la superficie de la vía de tránsito.

Campo Magnético	Nodo Sensor Enterrado		Nodo Sensor Sobre suelo	
	Promedio (mGauss)	Desviación Estándar	Promedio (mGauss)	Desviación Estándar
X	154.55	1.74	154.52	1.87
Y	-3.11	1.81	0.27	1.06
Z	47.55	1.79	48.40	1.85
F (Resultante)	162.40	1.77	162.57	1.93

Tabla 12: Resultados del campo magnético terrestre cuando el nodo sensor se encuentra enterrado y sobre la superficie del suelo (Elaboración propia).

4.3.2 Caracterización del campo magnético medido con presencia de vehículo

Para el desarrollo de la caracterización del campo magnético medido, se utilizaron tres vehículos diferentes, el vehículo A corresponde a una camioneta SUV Cherry X-Cross, el B corresponde a un Station Wagon Toyota Succeed y el C corresponde a una camioneta Renault Duster Oroch, como se observa en figura 36.

Se consideraron tres eventos mencionados inicialmente, teniendo en cuenta que el sensor siempre tomará una de las tres ubicaciones con respecto al vehículo (primer eje, parte media o segundo eje), debido a que la distribución de sensores en vía de tránsito demarcada como zona rígida se encuentran a distancias mínimas entre ejes del vehículo más pequeño (Suzuki Alto).

Por otro lado, los eventos transitorios (posible detenimiento, maniobras de estacionamiento, paso de vehículos, etc, menos de 5 minutos) son despreciables, debido a que son indicios de presencia de vehículos, pero no definen que un vehículo esté estacionado.



Figura 36: Vehículos A, B y C utilizados durante el desarrollo de pruebas de caracterización del campo magnético medido (Elaboración propia).

Con todas las consideraciones antes mencionadas se desarrollaron las pruebas y la adquisición de resultados, como se muestra en la figura 37



Figura 37: Pruebas y Adquisición de datos cuando un vehículo C atraviesa sobre el nodo sensor por eventos (Elaboración propia).

En la figura 38, se observa los resultados de la lectura de la magnitud del campo magnético medido para cada vector del eje cartesiano (X,Y,Z), así como la resultante de los tres ejes. Para el eje X (curva negra), el rango de variación del campo magnético es casi despreciable respecto a su referencia. En el caso del eje Y (curva roja), presenta variaciones en la parte inicial, pero luego se hace poco diferenciable con su referencia. En el eje Z (curva azul), existe una variación más evidente con rangos bastante diferenciados respecto a su referencia. Por ultimo esta la resultante (curva verde), el cual no muestra una variación muy apreciable. Por lo tanto, se determina que, para la detección de un vehículo estacionado en una zona rígida, se analiza la lectura del campo magnético en dirección del eje Z.

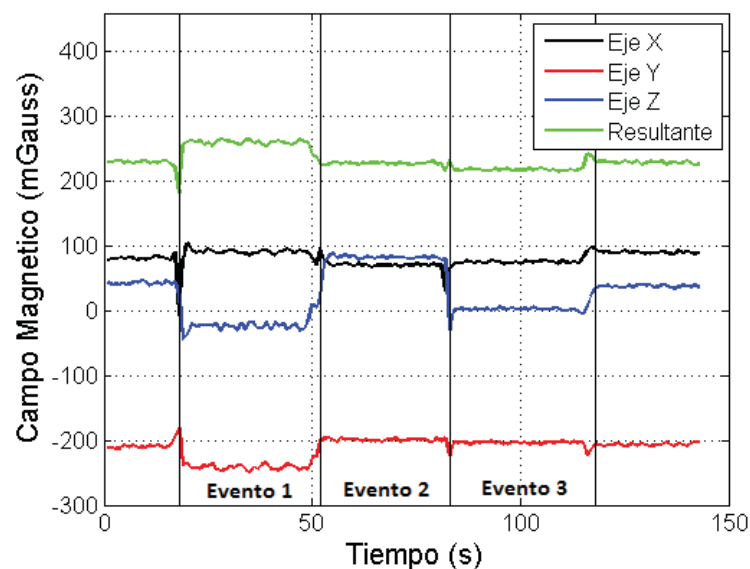


Figura 38: Caracterización del campo magnético medido cuando un vehículo A atraviesa sobre el sensor por eventos (Elaboración propia)

Luego de realizar varias mediciones del campo magnético, en base a las consideraciones planteadas, se corroboró el análisis descrito anteriormente, el mayor rango de variación se observa en la medición del campo magnético en dirección del eje Z, es decir, perpendicular a la superficie del suelo; tal como se observa en las figuras 39 y 40.

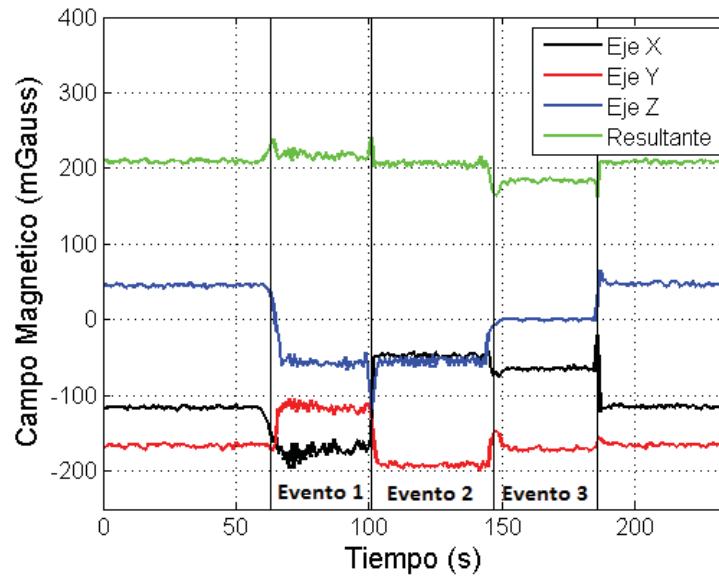


Figura 39: Caracterización del campo magnético medido cuando un vehículo B atraviesa sobre el sensor por eventos (Elaboración propia).

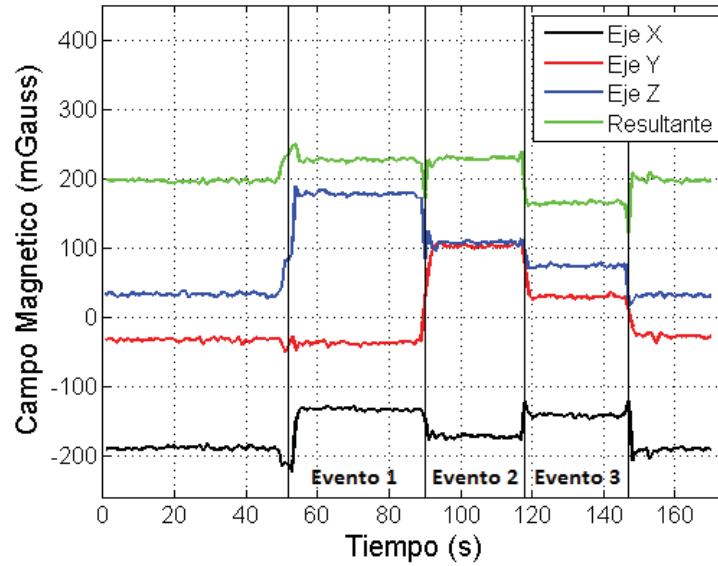


Figura 40: Caracterización del campo magnético medido cuando un vehículo C atraviesa sobre el sensor por eventos (Elaboración propia).

4.3.3 Caracterización del campo magnético en dirección Z cuando el motor pasa de encendido a apagado

Para realizar el análisis del impacto que el motor podría generar al campo magnético, por la presencia del alternador, se caracterizó la variación de la lectura del campo magnético, cuando un vehículo B se estaciona (por eventos) sobre el sensor con el motor encendido y luego es apagado.

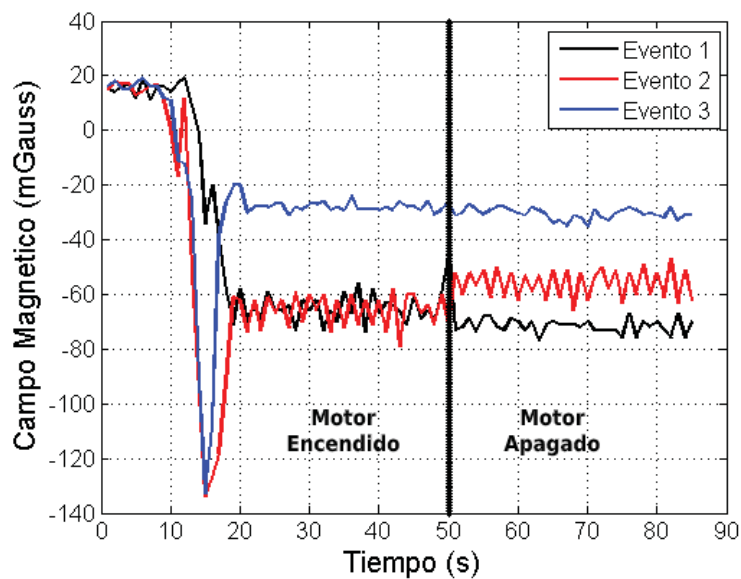


Figura 41: Caracterización del campo magnético medido en dirección Z, cuando el vehículo B atraviesa sobre el sensor por eventos (Elaboración propia).

La Figura 41 muestra los resultados cuando un vehículo se detiene frontal sobre el nodo sensor. La curva negra representa cuando el nodo sensor se encuentra debajo del primer eje (motor), con el motor encendido y luego se apaga. Inicialmente la amplitud del campo magnético medido disminuye en amplitud, producto de la presencia del vehículo, luego se establece en un nivel de forma continua, inclusive hasta luego de que el motor se apaga. La curva roja, representa la lectura cuando el vehículo se detiene con el sensor ubicado en la parte media, en la gráfica se observa que en la parte inicial varía el campo magnético por efecto de la presencia del vehículo sobre el sensor, pero luego se establece por debajo de la referencia de

forma constante; cuando el motor se apaga, la amplitud incrementa ligeramente; sin embargo, se mantiene de forma continua. La curva de color azul, muestra la magnitud del campo magnético cuando el vehículo se detiene con el sensor ubicado en el segundo eje, con una variación de la amplitud de la medida del campo magnético como un evento transitorio producto del evento 1, donde del mismo modo que las curvas en azul y rojo también se establece de forma continua hasta después de ser apagado el motor.

Por lo tanto, a partir de este análisis realizado se obtiene que el campo magnético medido cuando un vehículo se detiene sobre el sensor y posteriormente se apaga el motor, el campo magnético resulta no ser cambiante significativamente, es decir, el alternador no produce gran efecto en la variación del campo magnético.

Luego de realizar la caracterización del campo magnético, adicionalmente se realizaron dos análisis para determinar la presencia de un vehículo estacionado. El primer análisis se realizó cuando un vehículo se estaciona sobre el sensor ingresando por la parte frontal y un segundo análisis se realizó cuando un vehículo se estaciona por la parte posterior. Considerando en ambos casos los eventos planteados, como se muestra a continuación.

4.3.4 Análisis del campo magnético en dirección Z cuando un vehículo se estaciona frontalmente.

En la figura.42 se observa que, la variación amplitud del campo magnético medido, cuando el nodo sensor se encuentra debajo del primer eje alcanza el valor máximo, luego cuando el nodo sensor se encuentra en la parte media del vehículo, la amplitud se mantiene y/o disminuye (en dirección +Z / -Z), y por último cuando el sensor se encuentra debajo del segundo eje, la amplitud del campo magnético medido, disminuye hasta la variación mínima.

Para determinar si un vehículo está estacionado, primero se realizó un análisis cuando el sensor se encuentra libre (sin presencia de vehículo), se identifica el valor máximo (MZ) y

mínimo (mZ) en el que varía el campo magnético medido. Estas medidas se definen como la “Referencia” para tomar decisiones; además se calcula la diferencia entre el valor máximo y mínimo medido, que viene a ser el “Rango de referencia”. Los resultados de este análisis en base a la figura 42 se muestran en la tabla 13.

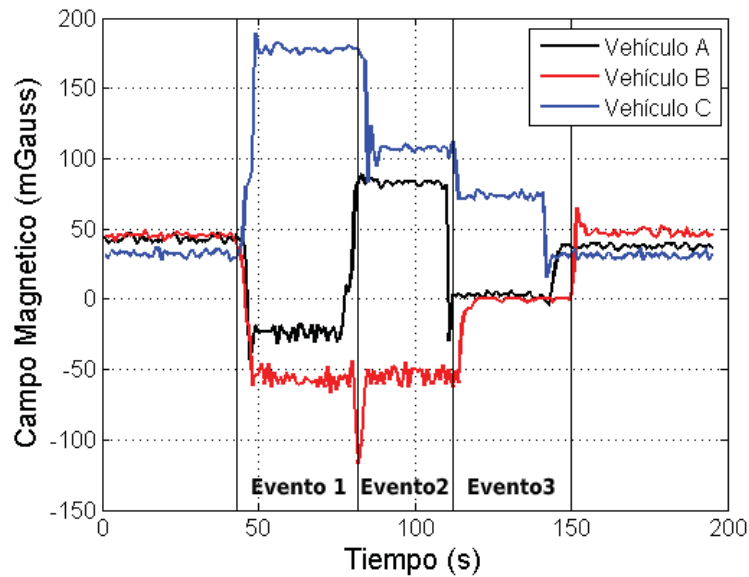


Figura 42: Campo magnético medido en dirección Z para vehículos que se estacionan frontalmente (Elaboración propia).

Caracterización de la referencia		Vehículo A	Vehículo B	Vehículo C
Referencia (R) [mGauss]	MZ	47	49	36
	mZ	39	41	27
Rango de Referencia (RR) [mGauss]	MZ-mZ	8	8	9

Tabla 13: Resultados del análisis de la variación del campo magnético medido en dirección del eje Z sin presencia de vehículos (Elaboración propia).

En segundo lugar, se realizó el análisis del evento que determina la presencia de un vehículo estacionado. El evento 3 de la figura 42 define los límites para la determinación de un vehículo estacionado, puesto que la variación de la amplitud es mínima con respecto a la variación de la referencia, sin embargo, para algunos vehículos puede estar definido por el evento 2. Por lo

tanto, se identifica el valor máximo (MZE) y mínimo (mZE) en el que varía el campo magnético del “evento” (2 o 3), para un límite superior o inferior respecto a la referencia, como se muestra en la tabla 14.

Caracterización del evento		Vehículo A	Vehículo B	Vehículo C
		Evento 2	Evento 3	Evento 3
Límite superior [mGauss]	MZE	89	-	78
	mZE	78	-	70
	mZE-MZ (Intervalo)	31	-	34
Límite inferior [mGauss]	MZE	-	1	-
	mZE	-	-2	-
	mZ- MZE (Intervalo)	-	40	-

Tabla 14: Resultados del análisis del evento más crítico para la determinación de un vehículo estacionado que ingresa frontalmente sobre el sensor (Elaboración propia).

Adicionalmente en la tabla 14 se determina el intervalo de variación de la amplitud del campo magnético medido para determinar la detección del vehículo estacionado, este intervalo permite evitar lecturas falsas durante el proceso de estacionamiento.

4.3.5 Análisis del campo magnético en dirección Z cuando un vehículo se estaciona en retroceso.

Otra variante en la que un vehículo puede estacionarse, es de reversa e ingresando a un espacio en la vía, haciendo una maniobra de encajonamiento, por lo que es necesario analizar la lectura en estas condiciones, estos resultados se muestran en la figura 43, para los vehículos A, B y C. El evento mínimo ocurre cuando el nodo sensor se encuentra debajo del segundo eje o al medio de los vehículos; en el evento 1, la lectura del campo magnético adquiere su máxima amplitud.

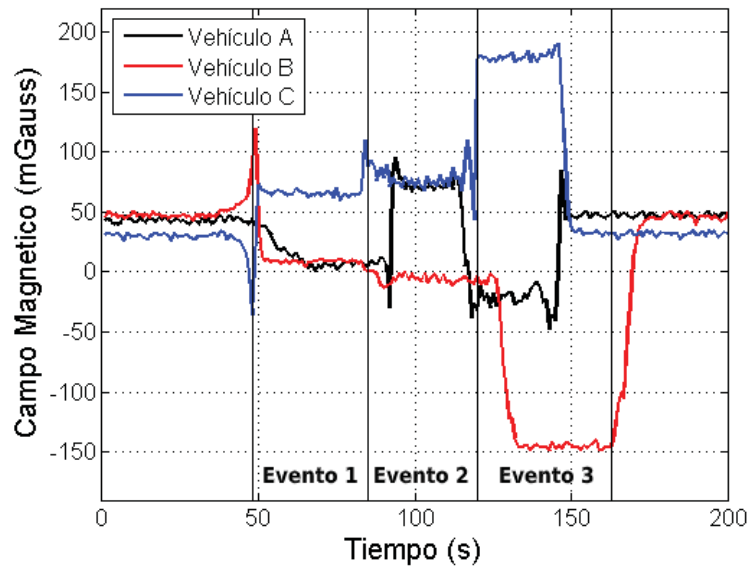


Figura 43: Campo magnético medido en dirección Z para vehículos que se estacionan en retroceso (Elaboración propia).

Luego que se realizó el análisis de la figura 43, se obtienen los resultados mostrados en las tablas 15 y 16.

Caracterización de la referencia		Vehículo A	Vehículo B	Vehículo C
Referencia (R) [mGauss]	MZ	47	52	34
	mZ	40	43	26
Rango de Referencia (RR) [mGauss]	MZ-mZ	7	9	8

Tabla 15: Resultados del análisis de la variación del campo magnético medido en dirección del eje Z sin presencia de vehículos (Elaboración propia).

Caracterización del evento		Vehículo A	Vehículo B	Vehículo C
		Evento 2	Evento 3	Evento 3
Límite superior [mGauss]	MZE	95	-	70
	mZE	67	-	60
	mZE-MZ (Intervalo)	20	-	26
Límite inferior [mGauss]	MZE	-	11	-
	mZE	-	4	-
	mZ- MZE (Intervalo)	-	32	-

Tabla 16: Resultados del análisis del evento más crítico para la determinación de un vehículo estacionado en retroceso (Elaboración propia).

4.3.6 Diseño del filtro

A partir de los análisis realizados en 4.3.4 y 4.3.5, se observa que el sensor HMC5883L, tiende a conservar la magnitud del campo magnético medido, luego de que el vehículo se retira, lo cual es una propiedad de histéresis del sensor. Por lo tanto, para determinar cuándo un vehículo se encuentra estacionado en una zona rígida de la vía de tránsito, se desarrolló un filtro de histéresis que permita discriminar los cambios del campo magnético en dirección del eje Z provocados por algún material metálico que no sea un automóvil (Henrique de Marchi & Guimaraes, 2019). El cálculo del filtro de histéresis se basa en las siguientes ecuaciones:

$$RRZ = MZ - mZ \quad (1)$$

$$mIZ = mZ - A * RRZ \quad (2)$$

$$MIZ = mZ - B * RRZ \quad (3)$$

$$mSZ = MZ + B * RRZ \quad (4)$$

$$MSZ = MZ + A * RRZ \quad (5)$$

Donde:

RRZ = magnitud del rango de referencia (sin presencia de vehículos).

mIZ = magnitud mínima del límite inferior en dirección del eje Z.

MIZ = magnitud máxima del límite inferior en dirección del eje Z.

mSZ = magnitud mínima del límite superior en dirección del eje Z.

MSZ = magnitud máxima del límite superior en dirección del eje Z.

A = factor que determina la presencia de vehículo estacionado.

B = factor que determina vía libre (sin presencia de vehículo).

La ecuación 1, determina la variación del campo magnético **medido** en vacío (Sin presencia de vehículos), es decir es usado para el proceso de calibración del nodo sensor.

A partir de la ecuación 1, las ecuaciones 2 y 5 **calculan** los límites inferior y superior del campo magnético, para determinar la presencia de un vehículo estacionado, durante el evento mínimo; por otro lado, las ecuaciones 3 y 4 **calculan** los límites donde no existe presencia de vehículos.

En base a las ecuaciones del filtro de histéresis y los resultados de análisis que determinan si un vehículo se encuentra estacionado, se calculan los valores mínimos correspondientes de $A= 2.8$ y $B=0$; luego de realizar varias mediciones del campo magnético con ausencia y presencia de diferentes vehículos estacionados, se determinó que el parámetro A debe tomar un valor de 2 y B debe tomar un valor de 0.1.

El algoritmo implementado en el nodo sensor hace uso del filtro de histéresis como un proceso de calibración, donde el nodo sensor determina el valor máximo (MZ) y el valor mínimo (mZ) del campo magnético medido en ausencia de vehículos, tomando 120 muestras durante dos minutos de forma automática y por último calcula las ecuaciones del 2 al 5.

El resultado de aplicar el filtro de histéresis diseñado para las pruebas experimentales con los vehículos A,B y C, se muestran mediante la 17.

Cálculo del filtro de Histéresis		Vehículo A	Vehículo B	Vehículo C	Resultado
Vehículo ingresando frontalmente sobre el nodo sensor [mGauss].	mIZ	23	25	9	1
	MIZ	38.2	40.2	26.1	0
	mSZ	47.8	49.8	36.9	0
	MSZ	63	65	54	1
Vehículo ingresando en retroceso sobre el nodo sensor [mGauss].	mIZ	26	25	10	1
	MIZ	39.3	42.1	25.2	0
	mSZ	47.7	52.9	34.8	0
	MSZ	61	70	50	1

Tabla 17: Resultados de aplicar el filtro de histéresis diseñado para los vehículos A,B y C (Elaboración propia).

El nodo sensor, mediante su algoritmo programado obtendría los resultados mostrados en la tabla 17, si el resultado es “1” lógico, significa la presencia de un vehículo y “0” lógico que la vía se encuentra libre.

El filtro de histéresis diseñado y las condiciones que determinan el estacionamiento de un vehículo, son implementados en la programación del nodo sensor, descrito en el anexo B.

4.3.7 Validación del sistema implementado

Para la validación del sistema diseñado, las pruebas fueron realizadas en la Av. Universitaria, debido a que esta vía conecta recorridos de los vehículos de transporte urbano como particulares, considerando que se trata de un punto de unión principal, debido a las siguientes razones.

La Av. Universitaria, conecta dos vías principales con un tráfico vehicular pesado, como son, La Av. de la Cultura y la Av. Collasuyo; por lo tanto, presenta un tráfico vehicular pesado durante algunas horas del día, además se trata de una vía que permite el acceso vehicular a la principal universidad de la ciudad de Cusco. Otro aspecto es que ésta avenida, contempla dos vías en ambos sentidos y tiene señalizaciones que prohíben el estacionamiento, sin embargo, se presta a la presencia de vehículos estacionados en una de las vías en ambos sentidos, como

se puede apreciar en la figura 44; siendo una clara muestra del enfoque que plantea como problema el presente trabajo de tesis. Por las razones mencionadas es idóneo realizar la validación en este punto de la ciudad.



Figura 44: Flujo de vehículos en la Av. Universitaria (Elaboración propia).

Cabe aclarar que la validación de sistema fue realizada en la Av. Universitaria, debido a las razones descritas, así como al planteamiento de la tesis, que estableció realizar la validación en una vía alrededor de la UNSAAC; sin embargo, en la ciudad del Cusco existen calles y avenidas que presentan un tráfico más pesado por presencia de vehículos estacionados en zonas rígidas.

Para el desarrollo de la validación del sistema implementado se estableció un procedimiento que consiste en realizar 25 ciclos de estacionamiento, un ciclo consiste en estacionar el vehículo sobre el nodo sensor, durante un tiempo aleatorio mayor a 5 minutos, luego el vehículo estacionado se retira.

También se estableció que la validación sea realizada durante un día, para tener una mejor evaluación, del modo siguiente:

- Tomar 8 ciclos de estacionamiento a partir de las 8 a.m.
- Tomar 9 ciclos de estacionamiento a partir de las 1 p.m.
- Tomar 8 ciclos de estacionamiento a partir de las 5 p.m.

Habiendo determinado el lugar y el procedimiento de validación, se desarrollaron los ciclos de estacionamiento haciendo uso de un vehículo Toyota Succeed.

El nodo sensor, mediante el filtro de histéresis y el algoritmo implementado determinó la presencia del vehículo estacionado y envió mensajes LoRaWAN. Los mensajes enviados fueron procesados mediante el servidor TTN y la aplicación web diseñada en Node-red. Mostrando los siguientes resultados.

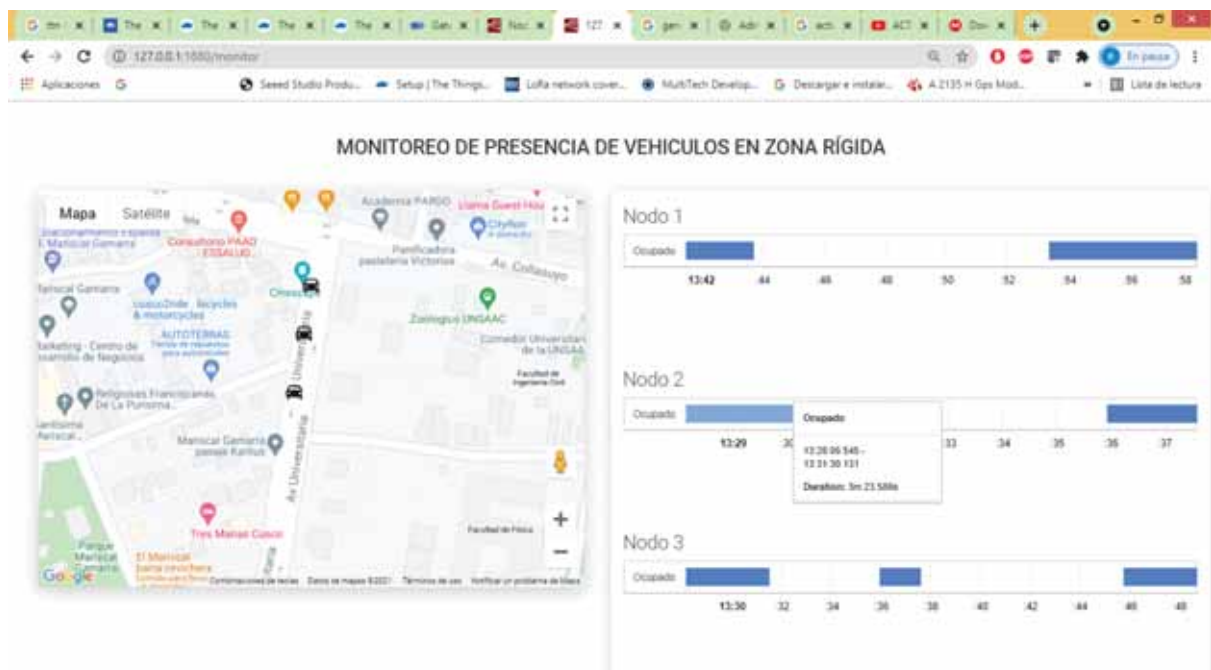


Figura 45: Interfaz web que muestra el estado de vía de validación del sistema de detección de vehículos estacionados (Elaboración propia).

El icono del vehículo estacionado aparece en el mapa en el instante que se detecta un vehículo estacionado y desaparece cuando el vehículo se retira. Adicionalmente el sistema temporiza el periodo que dura el estacionamiento, una vez finalizado el ciclo de estacionamiento se muestra una gráfica de ocupación vs tiempo (bloque azul), indicando el periodo que duró el estacionamiento. Tal como se puede apreciar en la figura 45.

Validación de detección de vehículos estacionados	
Vía de validación	Av. Universitaria
Registro ínsito	25
Registro del sistema	24
Distancia	450 m
RSSI	-104.66 dBm

Tabla 18: Resultados obtenidos del registro de los ciclos de estacionamiento de forma visual y por el sistema implementado (Elaboración propia).

La tabla 18, muestra los ciclos de estacionamientos registrados por una persona en el lugar de validación y digitalmente mediante la base de datos implementado por el sistema, donde los ciclos de estacionamientos registrados de forma visual coinciden con el registro generado por el sistema en 96%, considerando que la validación se realizó dentro del rango de cobertura óptima del gateway. El margen de error de 4% indica que pueden existir partes del vehículo donde los materiales de fabricación estén elaborados en plástico o en materiales que no alteren el campo magnético, como es el caso de los parachoques.

CONCLUSIONES

1. Se desarrolló un prototipo del sistema IoT de recolección de información sobre la ocupación de zonas rígidas vehiculares, alcanzando una cobertura de hasta tres kilómetros con una precisión en la detección de vehículos estacionados del 96 %.
2. De la comparación de distintas tecnologías de comunicación IoT en el mercado, se eligió la tecnología LoRaWAN por alcanzar grandes distancias de comunicación con bajo consumo de energía y ser además una tecnología desarrollada sobre software libre, lo cual facilita el despliegue de una red de sensores, independiente de empresas operadoras de comunicaciones, en escenarios urbanos como la ciudad del Cusco.
3. El diseño del nodo sensor, integrado por los sistemas electrónicos y el algoritmo de detección, determinaron la presencia o ausencia de vehículos estacionados.
4. El Rak831 Pilot Gateway, acondicionado e instalado en la torre de comunicaciones de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica, recibió eficazmente los mensajes enviados por los nodos sensores.
5. La interfaz web desarrollada cumple satisfactoriamente su propósito informativo, al integrar Google Maps, indicar el estado actual del nodo sensor y mostrar una gráfica de ocupación vs tiempo.
6. El prototipo diseñado, con nodos sensores implementados en la Av. Universitaria, detectaron los ciclos de estacionamiento propuestos para la validación con un margen de error del 4%, concluyendo que el prototipo diseñado fue validado con éxito.
7. Con sensores ubicados a nivel del piso para la ciudad del Cusco, LoRaWAN, garantiza las comunicaciones para distancias de un kilómetro con más del 88% de eficacia.

RECOMENDACIONES

1. El proceso de calibración del nodo sensor debe llevarse a cabo en condiciones donde no exista presencia de masas metálicas cercanas, puesto que pueden llevar consigo a obtener lecturas falsas durante los ciclos de estacionamiento o también obtener puntos muertos en algunas partes del vehículo.
2. Para garantizar una comunicación óptima de la red, la polarización de las antenas de los nodos sensores deben ser la misma que la polarización de la antena del gateway. Es posible utilizar antenas con diferentes polaridades, pero el rendimiento y la conectividad serán menos eficaces.
3. Para distancias donde la comunicación alcance porcentajes de paquetes recibidos por debajo del 70%, es recomendable configurar el nodo sensor con confirmación de mensaje recibido (ACK), puesto que esto garantizará que el mensaje enviado sea recibido con hasta 8 envíos del mismo mensaje.
4. Los nodos sensores para ser soterrados deben ser implementados en una carcasa PVC con clasificación IK10, para protección contra impactos mecánicos, e IP67, para protección a la intemperie. El uso del PVC garantiza que las comunicaciones por radiofrecuencia no se atenúen.
5. El sistema desarrollado también puede ser implementado en ingresos o salidas de hospitales, estaciones de bomberos y accesos para discapacitados, donde son invadidos por vehículos mal estacionados.

BIBLIOGRAFÍA

- Bizarro Álvarez, A. V. (2018). *Sistema de detección de tránsito vehicular (Tesina)*. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, San Pedro Tlaquepaque, Jalisco.
- British Geological Survey. (s.f.). *The Earth's Magnetic Field: An Overview*. Obtenido de <http://www.geomag.bgs.ac.uk/education/earthmag.html>
- Cisco. (9 de marzo de 2020). *Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper*. Obtenido de <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>
- Crisologo Borquez, I. B. (2008). *Diseño de un sistema para el aviso automático de disponibilidad en estacionamientos vehiculares*. Lima, Perú.
- Del Cisne Carrión González, M. (2017). *Desarrollo De Una Pasarela LORA y Evaluación De Prestaciones*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Gusev, J. C. (20 de Mayo de 2017). *RT*. Obtenido de <https://actualidad.rt.com/actualidad/238956-internet-cosas-conectar-todo-dispositivos-red-iot>
- Henrique de Marchi, P., & Guimaraes, K. (2019). *Smart Parking – Sistema Inteligente Para Estacionamientos. (Trabajo final de graduación)*. Pontificia Universidad Católica de Paraná., Curitiba.
- Kumar, A. (27 de Febrero de 2019). *INTRODUCTION TO LORA TECHNOLOGY*. Obtenido de Embien Technologies: <https://www.embien.com/blog/introduction-to-lora-technology/>
- La República. (09 de Mayo de 2016). *Parque automotor de la ciudad de Cusco aumentó en 328% los últimos 10 años*. Cusco, Cusco, Perú. Obtenido de <https://larepublica.pe/economia/937429-parque-automotor-de-la-ciudad-de-cusco-aumento-en-328-los-ultimos-10-anos>

LoRa Alliance. (Noviembre de 2015). *LoRa Alliance*. Obtenido de https://docs.wixstatic.com/ugd/eccc1a_ed71ea1cd969417493c74e4a13c55685.pdf

LoRa Alliance. (2021). *What is LoRaWAN® Specification*. Obtenido de LoRa Alliance: <https://lora-alliance.org/about-lorawan>

LoRa Alliance Technical committee. (Febrero de 2017). Obtenido de https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-05/lorawan_regional_parameters_v1.0.2_final_1944_1.pdf

Ministerio de Justicia. (29 de 10 de 2015). *Osiptel*. Obtenido de <https://www.osiptel.gob.pe/repositorioaps/data/1/1/1/par/tuo-reglamento-general-ley-de-telecomunicaciones/TUO-Reglamento-General-Ley-de-Telecomunicaciones.pdf>

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (4 de Abril de 2013). Normas Legales. *El Peruano*, págs. 492144-492146. Obtenido de <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/modifican-el-tuo-del-reglamento-general-de-la-ley-de-telecom-decreto-supremo-n-006-2013-mtc-920101-7/>

Posada, C. (2018). Aumento continuo del parque automotor, un problema que urge solucionar. *Comercio Exterior*, 24-26. Obtenido de https://apps.camaralima.org.pe/repositorioaps/0/0/par/r816_3/comercio%20exterior.pdf

QST Corporation. (s.f.). Obtenido de https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/1811081618_QST-QMC5883L-TR_C192585.pdf

RAKwireless.(2016).Obtenidode https://downloads.rakwireless.com/en/LoRa/WisNode/Hardware-Specification/RAK811_LoRa_Module_Datasheet_V1.3.pdf

Rakwireless Technology . (2018). *RAK831 Pilot Gateway Product Specification V1.0*. Shenzhen : SHENZHEN RAKWIRELESS TECHNOLOGY CO., LTD.

Rechner sensors. (s.f.). Obtenido de

<https://www.rechner-sensors.com/es/documentacion/knowledge/sensor-magnetorresistivo>

Ruano Lin, E. (2016). *LoRa™ protocol Evaluations, limitations and practical test*. Grenoble, Francia.

Rueda De Negocios. (21 de Noviembre de 2017). Más del 50% de los vehículos del parque automotor del Cusco son privados y solo transportan al 5% de la población cusqueña. cusco, cusco, Perú.

Saifil Allif, A. F. (2017). The efficient parking bay allocation and management system using LoRaWAN. *IEEE*, 127-131.

Semtech Corporation. (2 de Mayo de 2015). [www.semtech.com](http://wiki.lahoud.fr/lib/exe/fetch.php?media=an1200.22.pdf) . Obtenido de <http://wiki.lahoud.fr/lib/exe/fetch.php?media=an1200.22.pdf>

Solera, E. (27 de Agosto de 2018). Obtenido de <https://medium.com/pruebas-de-laboratorio-de-la-modulaci%C3%B3n-lora/modulaci%C3%B3n-lora-4ad74cabd59e>

Sornin (Semtech), N. L. (Julio de 2016). *LoRa™ Alliance - LoRaWAN® Specification v1.0.2*. Obtenido de https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-05/lorawan1_0_2-20161012_1398_1.pdf

Texto único ordenado del reglamento nacional de tránsito. (10 de febrero de 2010). Ministerio de Transportes y Comunicaciones, & Ministerio del Interior. Lima, Perú.

thethingsnetwork. (s.f.). Obtenido de <https://www.thethingsnetwork.org/>

Vargas Cusi, B. (2017). *Diseño e implementación de un prototipo para la medición de flujo vehicular utilizando sensores inductivos*. cusco.

ANEXOS

ANEXO A: GENERALIDADES

1. Descripción del funcionamiento del sensor QMC5883L

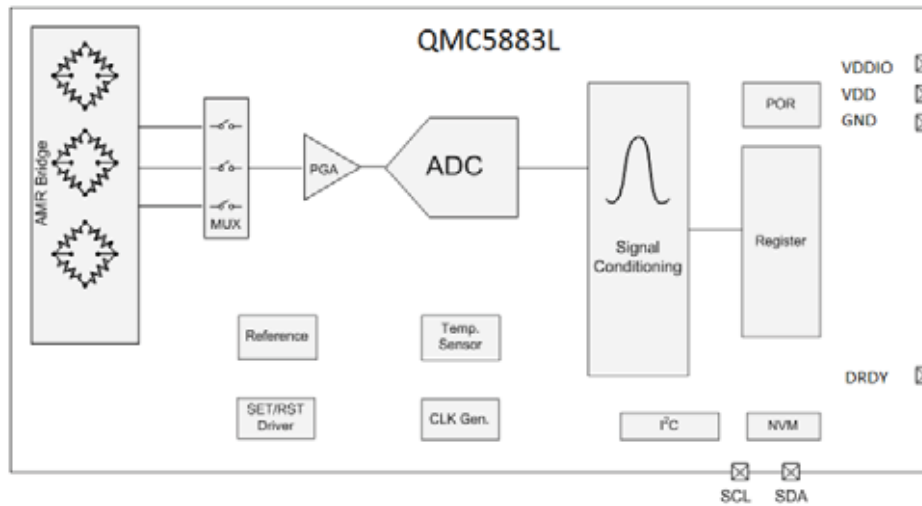


Figura 46: Diagrama de bloques interno del sensor QMC5883L (QST Corporation)

El mecanismo de detección del sensor QMC5883L es detectar el campo magnético de la tierra en tres ejes de forma digital, del mismo modo que lo hace una brújula clásica. El bloque AMR Bridge, está compuesto por tres sensores basados en un elemento magnetoresistivo en una configuración de puente Wheatstone, donde cada una de las resistencias varía su valor en función del campo magnético al cual se expone, en el que cada puente (sensor) mide la variación en un eje (X, Y y Z) del campo magnético terrestre, estas variaciones son convertidas en tensión y a través del bloque ADC es digitalizado para posteriormente ser enviado a través del bus I2C mediante los pines SDA y SCL.

Así mismo podemos configurar el rango de medición con ganancias entre ± 2 Ga ó ± 8 Ga a las que se le aplica ganancias de 12000 y 3000 respectivamente y de esta forma tener un rango de salida de 16 bits, es decir el rango numérico de salida del ADC es -32768 y 32767. Entonces los valores que el sensor HMC5883L envía a través del bus I2C se muestran con ganancia, por

lo que para tener el valor real hay que dividirlo entre 12000 o 3000 y de esta forma obtener la medida del campo magnético en Gauss. Tal como se muestra en la tabla 19.

Rango de Medida	Ganancia	Factor de Sensibilidad	Rango de Medida (ADC 16 bits)
Mínima (± 2)	12000	$1/12000 = \pm 83.3 \text{ uG} / \text{LSB}$	0G ~ 2.73 G
Máxima (± 8)	3000	$1/3000 = \pm 0.244 \text{ mG} / \text{LSB}$	0G ~ 10.92 G

Tabla 19: Configuración del rango de medida sensor HMC5883L (elaboración propia)

El campo magnético en la superficie de la tierra puede variar entre 0.25 Gauss a 0.65 Gauss. Entonces para determinar la presencia de un vehículo estacionado se configura en el rango de ± 8 Gauss, debido a que el sensor será sometido a campos magnéticos que genere los distintos componentes de un vehículo (motor, alternador, batería y chasis); pudiendo generar errores al momento de la lectura si se configurase en un rango mínimo.

En cualquier lugar, el vector de campo magnético terrestre se describe mediante las componentes ortogonales X (intensidad Norte), Y (intensidad Este) y Z (intensidad vertical, positiva hacia abajo). Por ende, la magnitud de la intensidad total (F) del campo magnético terrestre medido en un punto específico, viene dado por la siguiente ecuación (British Geological Survey).

$$F (nT) = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

Donde: $1 \text{ Gauss} = 100000 \text{ nT}$

2. Configuración de parámetros para simulación de cobertura en Radio Mobile

Para realizar la simulación de cobertura LoRaWAN para la ciudad del Cusco se hace uso de Radio Mobile, donde se configura los parámetros de la red, del Gateway y del nodo sensor; como se muestra en las siguientes imágenes.

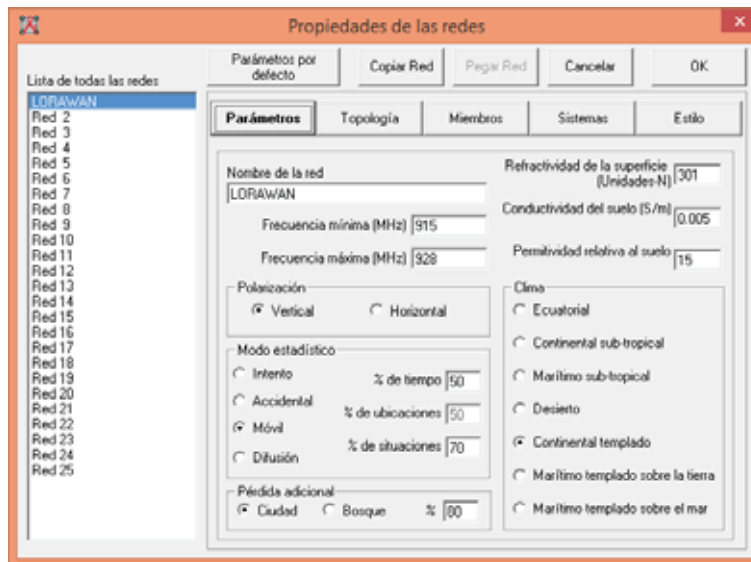


Figura 47: Configuración de parámetros de la Red (Elaboración propia).



Figura 48: Configuración de parámetros del Gateway Rak831 (Elaboración propia).

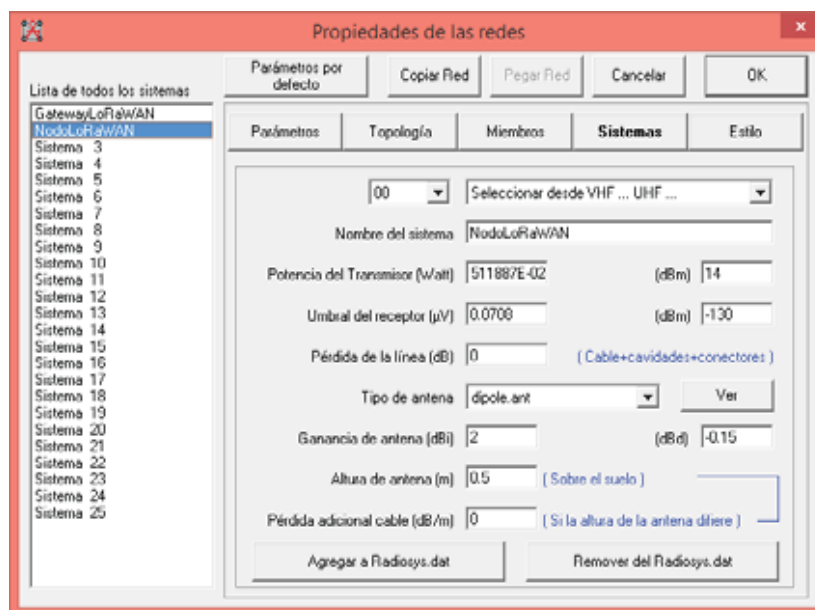


Figura 49: Configuración de parámetros del Nodo Rak811 (Elaboración propia).

3. Configuración del Módulo RAK811 WisNode LoRa

De acuerdo con la guía de configuración del fabricante, para versiones anteriores a V3.0.0.0. es necesario realizar una actualización de Firmware. Los módulos RAK811 adquiridos cuenta con una versión de firmware por defecto V.2.0.3.0, por lo que es necesario realizar una actualización, sin embargo, para realizar esta tarea necesitamos contar con un gestor de arranque (bootloader). Para ello hacemos lo siguiente:

a) Grabación del gestor de arranque en RAK811 WisNode LoRa.

- Primero se instala la herramienta “STM32Cube Programmer” en Windows.
- Segundo, se une con un jumper el pin “BOOT” y el pin “3V3” para activar el modo de arranque (boot mode). Como se indica en la siguiente figura 59.
- Tercero, se enciende el WisNode Rak811 alimentándolo mediante la interface USB.
- Cuarto, se presiona el botón de reset (RST).

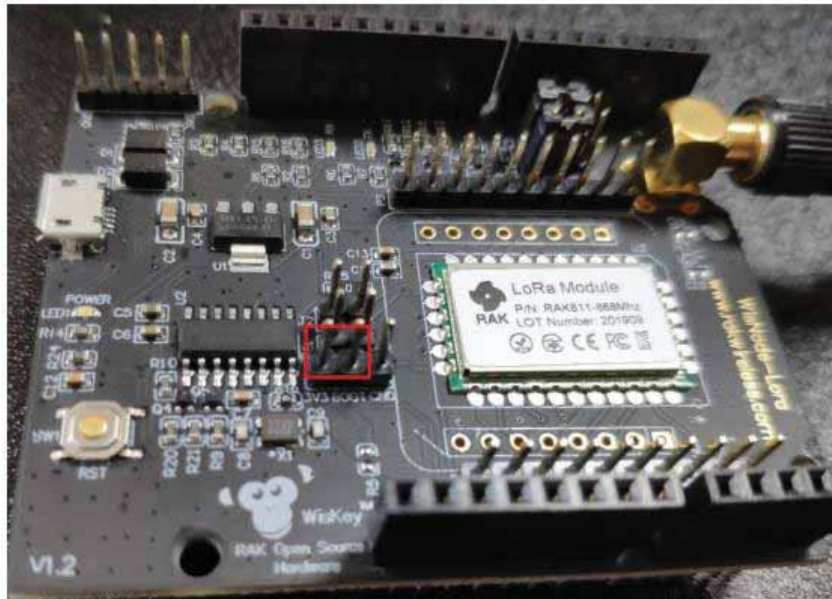


Figura 50: Conexión de pines para grabar el gestor de arranque (Elaboración propia)

- Quinto, mediante la herramienta “STM32CubeProgrammer” (software para programar microcontroladores STM32), se selecciona el tipo de UART, se configura el puerto, la velocidad de transmisión (baudrate), la paridad y presionamos en conectar, donde el registro correcto se muestra en la figura 60.

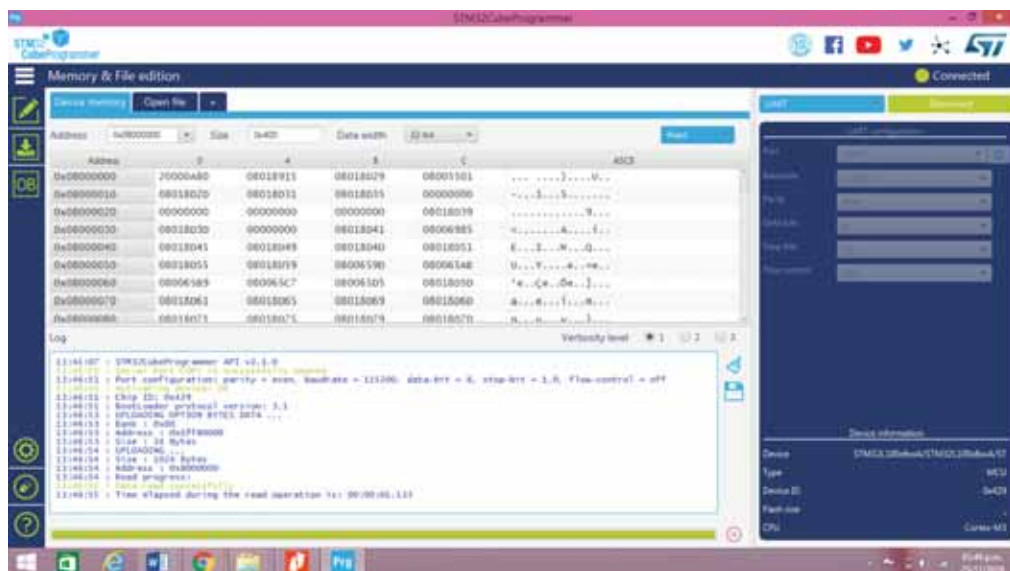


Figura 51: Configuración y conexión de la herramienta STM32CubeProgrammer con la tarjeta RAK811 (Elaboración propia).

- Sexto, se graba un gestor de arranque en RAK811 WisNode; para ello es necesario inicialmente borrar todos los datos que viene por defecto, luego se carga el nuevo gestor de arranque proporcionado por el fabricante, seguidamente se desconecta la tarjeta y se muestra la siguiente pantalla.

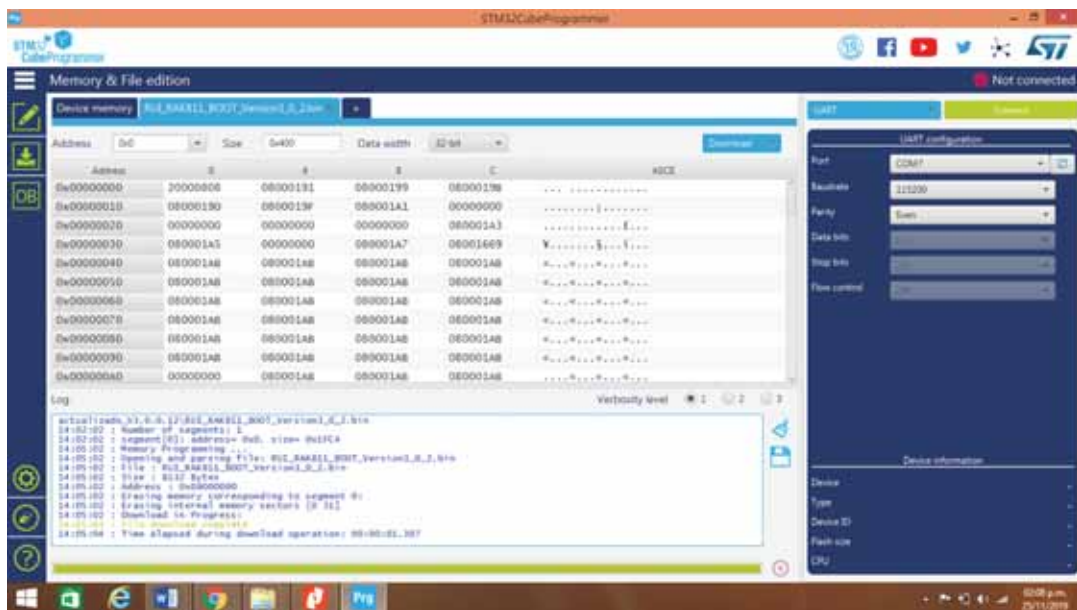


Figura 52: Pantalla que muestra el nuevo gestor de arranque grabado en la tarjeta RAK811 (Elaboración propia).

- Séptimo: Se apaga el módulo RAK811 y se devuelve el jumper en los pines “BOOT” Y “GND” como inicialmente se encontraba.
- Octavo: finalmente volvemos a conectar a la PC el módulo RAK811 WisNode y abrimos la herramienta de puerto serial recomendado por el fabricante, el cual muestra la interface como la figura 62.

Esta primera pantalla que se muestra en la Fig. N°100 significa que se tiene grabado exitosamente un gestor de arranque en RAK811 WisNode, para realizar el proceso de grabado de firmware debe permanecer el modulo en el modo de arranque (BOOT MODE). Finalmente cerrar la interface de la herramienta de puerto serial.

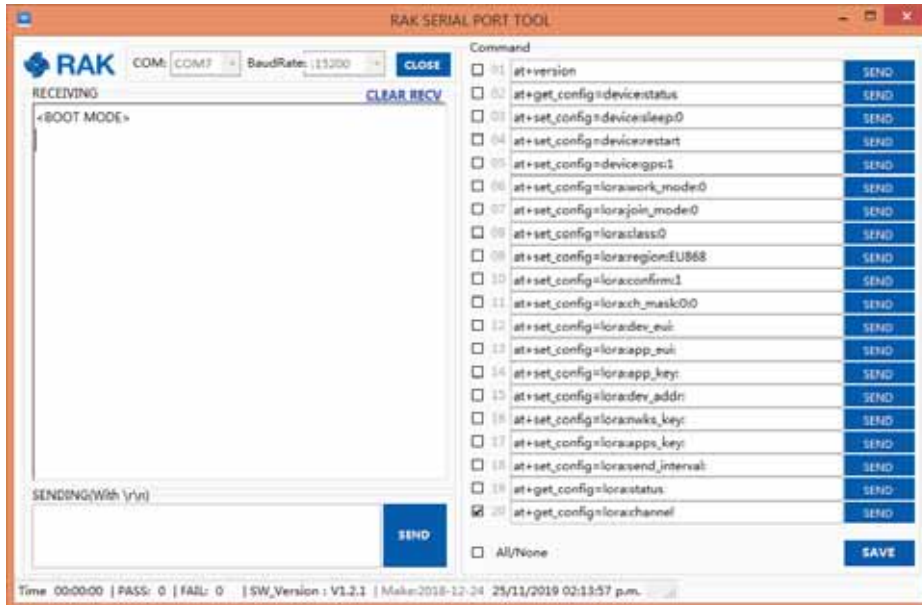


Figura 53: Interface de la herramienta de puerto serial (Elaboración propia).

b) Grabación de firmware en RAK811 WisNode LoRa.

Primero: se descarga la herramienta de actualización del firmware de la web de RAK, al ejecutar esta herramienta se muestra la siguiente interface.

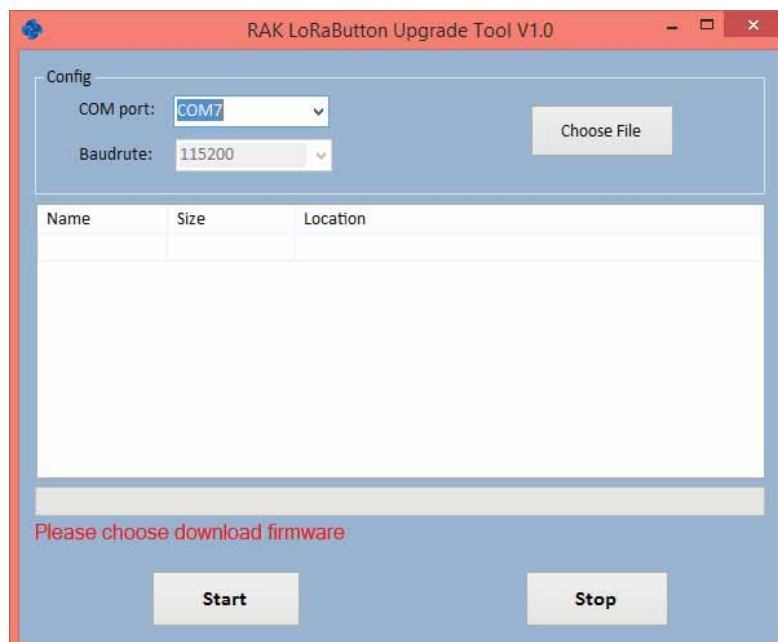


Figura 54: Interface para la actualización de firmware (Elaboración propia).

Segundo: Ya en esta interface cargamos el archivo del firmware de actualización haciendo clic en la pestaña “elegir archivo”, luego se da inicio a la actualización y finalmente se muestra la siguiente pantalla indicando que la actualización fue exitosa.

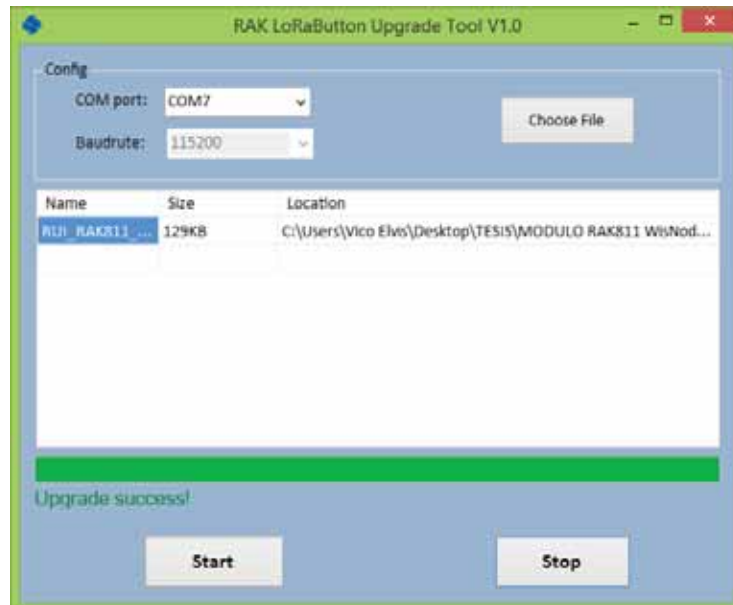


Figura 55: Actualización exitosa del firmware del RAK811 (Elaboración propia).

Una vez terminado de cargar el firmware de actualización, se cierra esta herramienta. Luego se abre la herramienta de puerto serial, donde se elige el puerto COM correcto y la velocidad de transmisión a 115200. Esta herramienta de puerto serial ya dispone de algunos comandos AT que hacen que la interacción con la tarjeta RAK811 sea mucho más sencillo.

Al presionar el botón de reset de la tarjeta RAK811, la herramienta de puerto serial muestra la versión actualizada del Firmware y la configuración LoRaWAN.

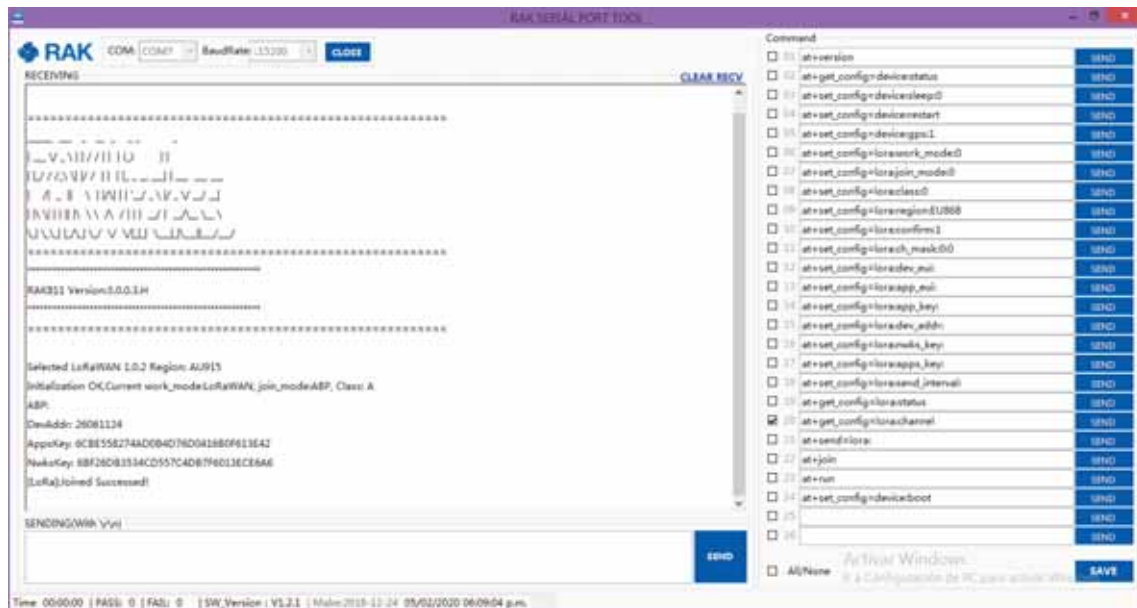


Figura 56: Puerto serial con el firmware actualizado (Elaboración propia).

4. Configuración del Gateway RAK831

Para realizar la configuración del Gateway es necesario contar con los siguientes materiales:

- RAK831 Pilot Gateway.
- Una memoria SD de 16Gb.
- Una herramienta ssh (putty) instalada en una PC.
- Un archivo de imagen .ISO que contenga el S.O. Raspbian, firmware del RAK831 y el Packet forwarder.
- Win32diskimager, para la grabación del archivo .ISO en la SD.

Para configurar el Gateway, primero se configura la tarjeta de red de la PC en el mismo segmento que la Raspberri Pi. La IP por defecto es 192.168.10.10, por lo tanto, la configuración IP de la PC es como se observa en la figura 66.

Una vez confirmado la conexión del Gateway Rak831 y la PC en la misma Vlan, a través de la herramienta Putty, se hace la conexión SSH desde la PC a la Raspberry Pi con la IP 192.168.10.10 y así poder acceder al entorno de configuración mediante el usuario y la clave (**pi** y **raspberry**). Este proceso se aprecia en las figuras 67 y 68.

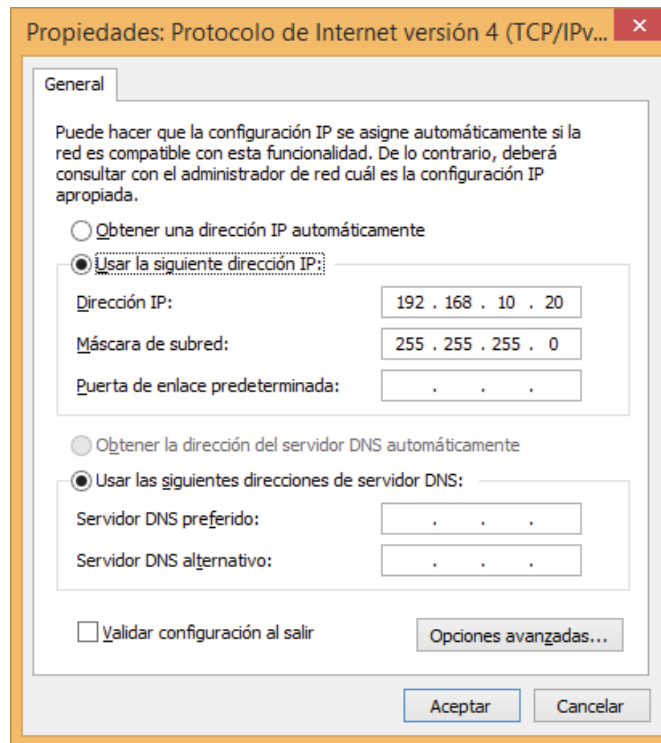


Figura 57: Configuración de la tarjeta de red de la PC (Elaboración propia).

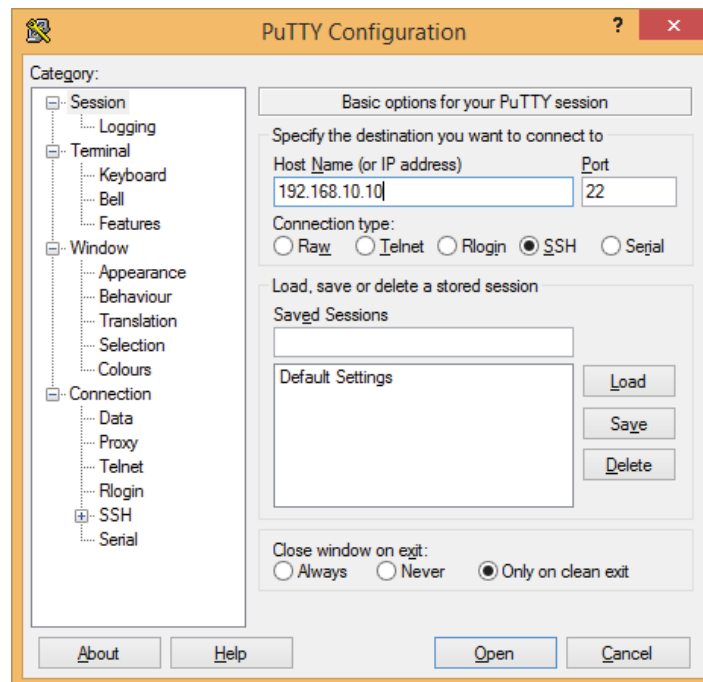


Figura 58: Configuración de conexión ssh (Elaboración propia).



Figura 59: Primer acceso al S.O. Raspbian del Gateway Rak831 (Elaboración propia).

Ya dentro de la configuración del Gateway se escribe el siguiente comando: `sudo gateway-config` y se accede al menú de configuración.

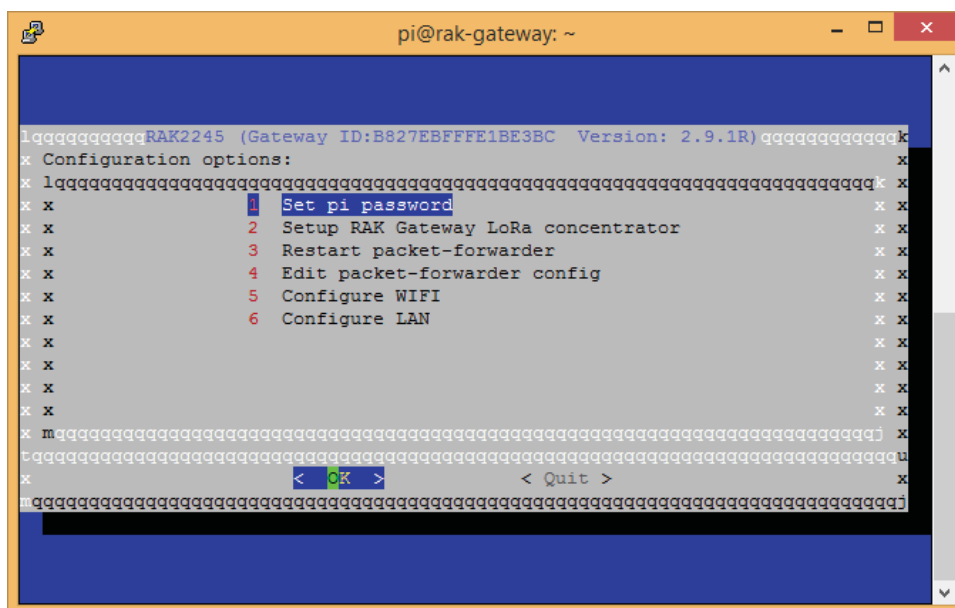


Figura 60: Menú de configuración del Gateway Rak831 (Elaboración propia).

Esta ventana de configuración muestra un menú con 6 opciones que permite lo siguiente:

- 1) Set pi password, esta opción permite cambiara el usuario y contraseña de acceso a la Raspberry Pi.
- 2) Setup Rak Gateway LoRa concentrator, esta opción permite configurar el servidor a usar y la banda de frecuencia en el que se desea trabajar.
- 3) Restart packet-forwarder, es la opción que permite realizar el reinicio del reenviador de paquetes.
- 4) Edit packet-forwarder config, esta opción permite configurar el archivo config.json, que contiene la información de configuración de canales del Chip SX1301 y el chip SX1257.
- 5) Configure WIFI, esta opción permite configurar el Gateway como un Access point o en modo cliente, así como el usuario y contraseña; el cual puede ser usado para la configuración remota del Gateway de forma inalámbrica.
- 6) Configure LAN, esta opción permite hacer la configuración de la Ip del Gateway y la Ip de la puerta de enlace para realizar la configuración del Gateway usando un cable UTP.

Además, en la fig. N°32 aparece por defecto el ID del Gateway (B827EBFFFE1BE3BC), que es usado al momento de hacer el registro en el servidor de red. Para el propósito de esta tesis solo se configura la opción 2 y la opción 6, lo demás se deja por defecto.

Primero, se elige la opción 2 del menú donde se configura el servidor de red y la banda de frecuencia ISM permitida para el Perú. Por lo tanto, Se elige el servidor de red TTN y la banda Australiana AU915-928. Estas configuraciones se muestran en la figura 70 y 71.

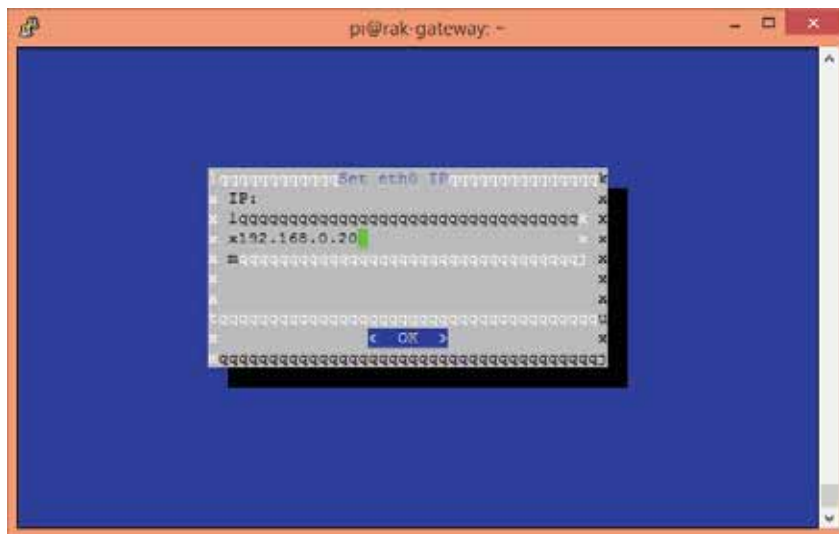


Figura 63: Configuración del IP del Gateway Rak831 (Elaboración propia).



Figura 64: Configuración de la puerta de enlace del Router (Elaboración propia).

Concluido el proceso de configuración, el Gateway se encuentra listo para recibir los primeros mensajes, sin embargo, para poder visualizar los mensajes recibidos desde el nodo sensor es necesario contar con el servidor de red.

ANEXO B: CÓDIGOS DE PROGRAMACIÓN DEL NODO SENSOR

El siguiente código fue desarrollado en C++ e implementado en la tarjeta de desarrollo Arduino Uno. El código implementa el filtro de histéresis diseñado para la detección del vehículo, estableciendo un tiempo de 5 minutos para determinar el estacionamiento, además implementa el envío del mensaje del estado actual del nodo sensor haciendo uso del CLI que contiene la librería del Rak811 para el protocolo LoRaWAN.

```
/* Creacion del algoritmo para la deteccion de vehiculos estacionados
 * en zonas rigidas haciendo uso de un sensor magnetorresistivo HMC5883L,
 * la placa arduino como unidad de control y para la transmision inalambrica
 * el modulo RAK811 que implenta la comunicacion LoRaWAN.
 */

#include "SoftwareSerial.h"// libreria necesaria para la creacion del puerto serie virtual
#include <Wire.h> //libreria necesaria para la omuicacion i2c del sensor HMC5883L
#include <MechaQMC5883.h> // libreria del sensor HMC5883L

SoftwareSerial Serial_2 (10, 11); // Creacion de un objeto Serial_2 para la nueva conexion serie
virtual TX y RX
MechaQMC5883 qmc; //creacion de un objeto qmc de la clase MechaQMC5883

////////////////////Variable del sensor HMC5883L////////////////////
int x,y,z,acimut; //variables para almacenar las componentes del campo magnetico
float X,Y,Z;
float F;
////////////////////Variable para calibracion del sensor QMC5883L en Z////////////////////

float A = 2;
float B = 0.1;
float mZ;
float MZ;
float RRZ = MZ-mZ;
float mIZ = mZ - A*RRZ;
```



```

float MIZ = mZ - B*RRZ;
float mSZ = MZ + B*RRZ;
float MSZ = MZ + A*RRZ;
////////////////////////////////////

//////////variables para determinar vehiculos estacionados//////////
int TiempoNecesario = 300; //constante de tiempo necesario para determinar que un vehiculo
se ha estacionado
int S, TiempoMedido;
int sensor;
int Vaux;

//////////variable para almacenar respuesta a los comandos por el RAK811//////////
String response = ""; // Variable de cadena de caracteres para almacenar el mensaje

//////////inicializacion y configuracion del nodo sensor//////////
void setup() {
  Wire.begin(); //inicializamos la comunicacion i2c
  Serial_2.begin(9600); // Iniciamos el puerto nuevo Serial_2 a 115200 Baudios
  Serial.begin(115200); // Iniciamos el puerto que esta conectado al PC a 115200 Baudios
  qmc.init(); //iniciamos la funcion init sobre el objeto qmc
  //qmc.setMode(Mode_Continuous,ODR_10Hz,RNG_8G,OSR_512); //configuracion de
sensor HMC5883L

  Calibracion_QMC5883(); //Calibracion del sensor QMC5883L

  sendCommand("at+version\r\n"); // solicitud de version de firmware
  delay(1000);
  ////////////configuracion para la union por ABP//////////
  setConnConfig("lora:dev_addr", "26062352");
  delay(1000);
  setConnConfig("lora:nwks_key", "19CF85EB2714D91B4B3EEF298C453D3E");
  delay(1000);
  setConnConfig("lora:apps_key", "DF9A22AD48E7ED452F2B7F9161984C95");

```

```

delay(1000);
//////////configuracion de mensaje confirmado o sin confirmar//////////
setConnConfig("lora:dr", "0");
delay(1000);
typeMessages(0);
delay(1000);
//////////solicitud de union a la red//////////
sendJoinReq();
delay(1000);
}

void loop() {
    //Obtenemos del magnetometro las componentes del campo magnético
    qmc.read(&x,&y,&z,&acimut); // leer los valores de los tres ejes y calcula el valor del azimut
    magnético, luego asignar a las variable creadas
    //X=x*0.0833; Y=y*0.0833; Z=z*0.0833; //para rango de +/-2G
    X=x*0.244; Y=y*0.244; Z=z*0.244; //para rango de +/-8G
    Serial_2.print("mz:"); Serial_2.print(Z); Serial_2.print("\t");

    //Calculo de la magnitud del campo magnetico
    //F=sqrt(pow(x,2)+pow(y,2)+pow(z,2))*0.0833; //para rango de +/-2G
    //F=sqrt(pow(x,2)+pow(y,2)+pow(z,2))*0.244; //para rango de +/-8G
    //Serial_2.print("F:"); Serial_2.println(F); Serial_2.print("\t");

    //Primer instante en que se detecta un vehiculo//////////
    if(Z < mIZ || Z > MSZ){
        millis();
        S=millis()/1000;
        sensor = 1;
        Vaux = 1;
        //Estmacion del tiempo de detencion y determinacion de vehiculo estacionado//////////
        while ((Z <= mIZ || Z >= MSZ) && Vaux == 1){
            TiempoMedido=(millis()/1000)-S;
            Serial_2.println(TiempoMedido);
        }
    }
}

```

```

if (TiempoMedido == TiempoNecesario){
    sensor = 1;
    sendData(2,"0000000001");
    Vaux = 0;
}
qmc.read(&x,&y,&z,&acimut);
X=x*0.244; Y=y*0.244; Z=z*0.244;
if (Z > mIZ && Z < MSZ){
    sensor = 0;
    Vaux = 0;
}
}

//////////Determinacion de vehiculo retirado//////////
while ((Z <= mIZ || Z >= MSZ) && (sensor == 1)){
    sensor =1;
    qmc.read(&x,&y,&z,&acimut);
    X=x*0.244; Y=y*0.244; Z=z*0.244;
    if (Z > mIZ && Z < MSZ){
        sensor = 0;
        sendData(2,"0000000000");
    }

}
}

//////////ausencia de vehiculo//////////
else {
    sensor = 0;
}

Serial_2.print("EstadoSensor:");
Serial_2.println(sensor);

delay(5000);

```

```

}

//////////Función para envío y recepción mediante puerto serial de Arduino//////////
void sendCommand(String atComm){
response = "";
Serial.print(atComm);
while(Serial.available()){
//Re = Serial_2.readStringUntil('\n');
char ch = Serial.read();
//Re += ch;
response += ch;
}
Serial_2.println(response);
}

//////////Función para envío de comandos de configuración//////////
void setConnConfig(String key, String value){
sendCommand("at+set_config=" + key + ":" + value + "\r\n");
}

//////////Función que permite la solicitud de unión//////////
void sendJoinReq(){
sendCommand("at+join\r\n");
}

//////////Función para determinar el tipo de mensaje (confirmado o sin confirmar)
void typeMessages(int type){
String command = (String)"at+set_config=lora:confirm:" + type + (String)"\r\n";
sendCommand(command);
}

//////////Función para enviar dato//////////
void sendData(int port, String data){
String command = (String)"at+send=lora:" + port + ":" + data + (String)"\r\n";
sendCommand(command);
}

```

```

delay(3000);
}

//////////Función que calibra el sensor QMC588L sin presencia de vehiculo//////////
void Calibracion_QMC5883(){

Serial_2.print("Inicio de Calibración \r\n");
Serial_2.print(" El sensor debe estar libre/r/n");
delay(100);

int i = 0;
qmc.read(&x, &y, &z,&acimut);
Z=z*0.244;//campo magnetico en mGauss
MZ = mZ = Z;

do {
  qmc.read(&x, &y, &z,&acimut);
  Z=z*0.244;//campo magnetico en mGauss
  //Actualizamos los valores de Z para determinar el max y min
  MZ = max(Z,MZ);
  mZ = min(Z,mZ);

  delay(100);
  Serial_2.println(i);
  Serial_2.print("Z: ");
  Serial_2.println(Z);
  delay (500);
  //delay (1000);
} while(i++ < 120);

Serial_2.println("Sensor Calibrado:");
delay(500);

Serial_2.print("MZ: ");

```

```

Serial_2.println(MZ);
Serial_2.print("mZ: ");
Serial_2.println(mZ);
//----- eje Z -----
RRZ = MZ-mZ;
mIZ = mZ - A*RRZ;
MIZ = mZ - B*RRZ;
mSZ = MZ + B*RRZ;
MSZ = MZ + A*RRZ;
Serial_2.print("mIZ: ");
Serial_2.println(mIZ);
Serial_2.print("MIZ: ");
Serial_2.println(MIZ);
Serial_2.print("mSZ: ");
Serial_2.println(mSZ);
Serial_2.print("MSZ: ");
Serial_2.println(MSZ);

delay(10000);
}

```

ANEXO C: CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN DE LA APLICACIÓN WEB

Para el desarrollo de la aplicación se ha desarrollado un entorno web utilizando los lenguajes de programación en Java Script, CSS y HTML. Estos códigos se muestran a continuación.

Código implementado en Java Script

```
////////////////////////////////////  
  
// configuración Global  
  
var loc = window.location;  
  
var ws;  
  
var wsUri = "ws:";  
  
var map;  
  
var marker=[];  
  
/*variables para registro de tiempo*/  
  
var estadoAnterior = 0;  
  
var t01;  
  
var t02;  
  
  
if (loc.protocol === "https:") { wsUri = "wss:"; }  
  
// This needs to point to the web socket in the Node-RED flow  
  
// ... in this case it's ws/simple  
  
wsUri += "://" + loc.host + loc.pathname.replace("monitor","ws/alert");  
  
////////////////////////////////////  
  
// google map  
  
function initMap() {
```

```

    map = new google.maps.Map(document.getElementById('map'), { center: {lat: -13.520602,
lng: -71.960813}, zoom: 18 });
}

//Determinando si es flanco de subida o bajada
function queFlancoEs(state) {
    var flanco;

    if(estadoAnterior == 0){
        if(state==1){
            flanco="subida";
            estadoAnterior = state;
        }
    }

    ////////////

    if(estadoAnterior == 1){
        if(state==0){
            flanco="bajada";
            estadoAnterior = state;
        }
    }

    ////////////

    else {
        estadoAnterior = state;
    }

    return flanco;
}

```



```

//Visualizar si está ocupado o no el área.
function visualizarEstado(idNode, state) {
  console.log(idNode)
  console.log(state)
  /**/
  var image = {
    path: "M20.772,10.1551-1.368-
4.104C18.995,4.824,17.852,4,16.559,4H7.441C6.148,4,5.005,4.824,4.596,6.0511-
1.368,4.104
C2.507,10.457,2,11.169,2,12v5c0,0.738,0.404,1.376,1,1.723v1.174V21c0,0.553,0.447,1,1,1h
1c0.553,0,1-0.447,1-1v-2h12v2 c0,0.553,0.447,1,1,1h1c0.553,0,1-0.447,1-1v-2.277c0.596-
0.347,1-0.984,1-1.723v-5C22,11.169,21.493,10.457,20.772,10.155z
M7.441,6h9.117c0.431,0,0.813,0.274,0.949,0.684L18.613,10h-0.794H6.181H5.38711.105-
3.316C6.629,6.274,7.011,6,7.441,6z M5.5,16
C4.672,16,4,15.328,4,14.5S4.672,13,5.5,13S7,13.672,7,14.5S6.328,16,5.5,16z M18.5,16c-
0.828,0-1.5-0.672-1.5-1.5 s0.672-1.5,1.5-1.5s1.5,0.672,1.5,1.5S19.328,16,18.5,16z",
    fillColor: '#000000',
    fillOpacity: .9,
    anchor: new google.maps.Point(0,50),
    strokeWeight: 0,
    scale: 1
  };

```

```
var myLatLng = [{lat: -13.520115, lng: -71.960883},{lat: -13.520437, lng: -71.960930},{lat:  
-13.520820, lng: -71.960994}];
```

```
var nodo = idNode;  
switch (nodo) {  
  case 'nodo1':  
    if(state==1){  
      marker[0] = new google.maps.Marker({ map: map, position: myLatLng[0], icon: image  
});
```

```
//Capturar t0
```

```
var flanco = queFlancoEs(state);
```

```
if(flanco == "subida"){
```

```
  t01 = new Date();
```

```
}
```

```
}else {
```

```
  if(marker[0]){
```

```
    marker[0].setMap(null);
```

```
//Capturar tf
```

```
var flanco = queFlancoEs(state);
```

```
if(flanco == "bajada"){
```

```
  var tf = new Date();
```

```
}
```

```
if(t01 && tf){
```

```

        graficoTiempoDeOcupacionNodo(t01,tf,tiempoOcupacionNodo1,"chart_div_node1");
    }
}
}
break;
case 'nodo2':
    if(state==1){
        marker[1] = new google.maps.Marker({ map: map, position: myLatLng[1], icon: image
});

//Capturar t0
var flanco = queFlancoEs(state);
if(flanco == "subida"){
    t02 = new Date();
}
}else {
    if(marker[1]){
        marker[1].setMap(null);

//Capturar tf
var flanco = queFlancoEs(state);
if(flanco == "bajada"){
    var tf = new Date();
}
}
if(t02 && tf){

```

```

        graficoTiempoDeOcupacionNodo(t02,tf,tiempoOcupacionNodo2,"chart_div_node2");
    }
}
}
break;
case 'nodo3':
    if(state==1){
        marker[2] = new google.maps.Marker({ map: map, position: myLatLng[2], icon: image
});

//Capturar t0
var flanco = queFlancoEs(state);
if(flanco == "subida"){
    t03 = new Date();
}

}else {
    if(marker[2]){
        marker[2].setMap(null);

//Capturar tf
var flanco = queFlancoEs(state);
if(flanco == "bajada"){
    var tf = new Date();
}
}
}

```

```

    if(t03 && tf){
        graficoTiempoDeOcupacionNodo(t03,tf,tiempoOcupacionNodo2,"chart_div_node3");
    }

}

}

break;
case 'nodo4':
    if(state==1){
        marker[3] = new google.maps.Marker({ map: map, position: myLatLng[3], icon: image
});
    }else {
        if(marker[3]){
            marker[3].setMap(null);
        }
    }

    break;
default:
    console.log('Reinicia.');
```

```
//Registrando los tiempos en el que un nodo es ocupado
```

```
var tiempoOcupacionNodo1 = [
    ['Activity', 'Start Time', 'End Time']
```

```

];
var tiempoOcupacionNodo2 = [
  ['Activity', 'Start Time', 'End Time']
];
var tiempoOcupacionNodo3 = [
  ['Activity', 'Start Time', 'End Time']
];
/*Graficar tiempos de ocupacion */
function graficoTiempoDeOcupacionNodo(t0,tf,tiempoOcupacionNodo,chart_div_node){
  google.charts.load('current', {'packages':['timeline']});
  google.charts.setOnLoadCallback(drawChart);

  tiempoOcupacionNodo.push(['Ocupado', t0, tf]);
  console.log(tiempoOcupacionNodo1)
  function drawChart() {
    var data = google.visualization.arrayToDataTable(tiempoOcupacionNodo);

    var options = {
      height: 150,
    };
    Var
    chart = new google.visualization.Timeline(document.getElementById(chart_div_node));
    chart.draw(data, options);
  }
}

```

```

}

////////////////////////////////////

// WebSocket

function wsConnect() {

    console.log("connect",wsUri);

    ws = new WebSocket(wsUri);

    ws.onopen = function() {

        console.log("connected");

    }

    ws.onclose = function() {

        setTimeout(wsConnect,5000);

    }

    ws.onmessage = function(msg) {

        msgRecived = JSON.parse(msg.data);

        idNode = msgRecived.dev_id;

        state = msgRecived.payload;

        visualizarEstado(idNode, state);

    }

}

function action(m) {

    // Nothing has been defined yet

    if (ws) { ws.send(m); }

}

```

Código implementado en CSS:

```
body{  
    font-family: 'Roboto','Droid Sans', 'Helvetica', Arial, sans-serif;  
    margin:5px;  
}  
  
#map{  
    display: block;  
    width: 95%;  
    height: 500px;  
    margin: 0 auto;  
    -moz-box-shadow: 0px 5px 20px #ccc;  
    -webkit-box-shadow: 0px 5px 20px #ccc;  
    box-shadow: 0px 5px 20px #ccc;  
}  
  
#map.large {  
    height:600px;  
}  
  
.overlay{  
    display:block;  
    text-align:center;  
    color:#fff;  
    font-size:60px;  
    line-height:80px;  
    opacity:0.8;  
    background:#4477aa;
```



```
border:solid 3px #336699;
border-radius:4px;
box-shadow:2px 2px 10px #333;
text-shadow:1px 1px 1px #666;
padding:0 4px;
}
.overlay_arrow{
left:50%;
margin-left:-16px;
width:0;
height:0;
position:absolute;
}
.overlay_arrow.above{
bottom:-15px;
border-left:16px solid transparent;
border-right:16px solid transparent;
border-top:16px solid #336699;
}
.overlay_arrow.below{
top:-15px;
border-left:16px solid transparent;
border-right:16px solid transparent;
border-bottom:16px solid #336699;
}
```

```
#toast-container > .toast {  
  background-image: none !important;  
}  
  
#toast-container > .toast:before {  
  position: fixed;  
  font-family: FontAwesome;  
  font-size: 24px;  
  line-height: 18px;  
  float: left;  
  color: #FFF;  
  padding-right: 0.5em;  
  margin: auto 0.5em auto -1.5em;  
}  
  
#toast-container > .toast-warning:before {  
  content: "\f119";  
}  
  
#toast-container > .toast-error:before {  
  content: "\f119";  
}  
  
#toast-container > .toast-info:before {  
  content: "\f005";  
}  
  
#toast-container > .toast-success:before {  
  content: "\f002";  
}
```

```

#ocupateTime {
    background-color: green;
}

/**/

/*.hero {
    margin-left: 1rem;
    margin-right: 1rem;
}*/

.main-title {
    font-weight: 500;
    font-size: 2.5rem;
    text-transform: uppercase;
}

.second-title {
    font-weight: lighter; }

```

Código implementado en HTML:

```

<!doctype html>

<html>

<head>

    <!-- Required meta tags -->

    <meta charset="utf-8">

    <meta http-equiv="X-UA-Compatible" content="IE=edge">

```

```
<meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1, shrink-to-
fit=no">

<!-- Google font -->

<link href="https://fonts.googleapis.com/css?family=Roboto&display=swap"
rel="stylesheet">

<!-- Bootstrap CSS -->

<!-- Latest compiled and minified CSS -->

<link rel="stylesheet"
href="https://maxcdn.bootstrapcdn.com/bootstrap/3.3.7/css/bootstrap.min.css"
integrity="sha384-
BVYiSIFeK1dGmJRAkyCuHAHRg32OmUcww7on3RYdg4Va+PmSTsz/K68vbdEjh4u"
crossorigin="anonymous">

<link rel="stylesheet" href="https://use.fontawesome.com/releases/v5.1.0/css/all.css"
integrity="sha384-
lKuwvrZot6UHsBSfcMvOkWwlCMgc0TaWr+30HWe3a4ltaBwTZhyTEggF5tJv8tbt"
crossorigin="anonymous">

<link rel="stylesheet"
href="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/toastr.js/2.1.4/toastr.min.css"
crossorigin="anonymous">

<style>{{{payload.style}}}</style>

<!-- jQuery first, then Bootstrap JS -->

<script src="https://code.jquery.com/jquery-2.2.4.js" integrity="sha256-
iT6Q9iMJYuQiMWNd9lDyBUSTlq/8PuOW33aOqmvFpqI="
crossorigin="anonymous"></script> <!-- Latest compiled and minified JavaScript -->
```

```

    <script      src="https://maxcdn.bootstrapcdn.com/bootstrap/3.3.7/js/bootstrap.min.js"
integrity="sha384-
Tc5IQib027qvyjSMfHjOMaLkfuWVxZxUPnCJA712mCWNIPg9mGCD8wGNIcPD7Txa"
crossorigin="anonymous"></script>

    <script      src="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/toastr.js/2.1.4/toastr.min.js"
crossorigin="anonymous"></script>

    <script>{{{payload.script}}}</script>
</head>
<body onload="wsConnect();" onunload="ws.disconnect();">

<div class="container">
    <div class="page-header">
        <h1 class="text-center main-title">Monitoreo de presencia de vehiculos en zona
rígida</h1>
    </div>
</div>
<div class="container-fluid">
    <div class="row justify-content-center">
        <div class="col-6 col-lg-6 col-md-6">
            <div id="map"></div>
        </div>
        <div class="col-6 col-lg-6 col-md-6" style="box-shadow: rgba(0, 0, 0, 0.2) 0px 4px
16px;">
            <h3 class="second-title">Nodo 1</h3>

```

```
<div id="chart_div_node1"></div>

<h3 class="second-title">Nodo 2</h3>

<div id="chart_div_node2"></div>

<h3 class="second-title">Nodo 3</h3>

<div id="chart_div_node3"></div>

</div>

</div>

</div>

<script async defer

src="https://maps.googleapis.com/maps/api/js?key={{payload.apikey}}&callback=initMa
p">

</script>

<!--Google Char Script-->

<script type="text/javascript" src="https://www.gstatic.com/charts/loader.js"></script>

</body>

</html>
```

ANEXO D: HOJAS DE DATOS DEL SISTEMA IOT

A continuación, se muestra un extracto de las hojas de datos con las principales características de los componentes del sistema de detección de vehículos estacionados en zonas rígidas de la vía de tránsito.

1. Rak811 WisNode LoRa

6.1 General specification

Model Name	RAK811
Dimension	L x W x H: 22 x 14 x 1.7 mm
Interface	UART1, GPIOs
Operating temperature	-40°C to 85°C
Storage temperature	-40°C to 85°C

6.2 Recommended Operating Rating

	Min.	Typ.	Max.	Unit
Operating Temperature	-40	25	85	deg.C
VCC	3.15	3.3	3.45	V

6.3 Specification

Feature	Description				
General Specification					
Frequency Band	868/915 MHz				
Host Interface	UART				
Characteristics	Condition	Min	TYP	MAX	UNIT
Transmit	TX Power		14	20	dBm
RX Sensitivity	RSSI	-130	-		dBm
	SNR	-15			dB
Current Consumption	TX mode	30 (14dBm)			mA
	RX mode	5.5			mA
	Sleep mode	7.2			uA

Figura 65: Principales características del RAK811 (RAKwireless, 2016).

2. Sensor HMC5883L (QMC5883L)

2.1 Product Specifications

Table 2. Specifications (* Tested and specified at 25°C except stated otherwise.)

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Supply Voltage	VDD	2.16		3.6	V
I/O Voltage	VDDIO	1.65		3.6	V
Standby Current	Total Current on VDD and VDDIO		3		μA
Continuous Mode Current	Low/High Power Mode (OSR=64 or 512)	ODR = 10Hz	75/100		μA
		ODR = 50Hz	150/250		μA
		ODR = 100Hz	250/450		μA
		ODR = 200Hz	450/850		μA
Peak Current in Active State	Peak Current on VDD and VDDIO During Measurement		2.6		mA
Sensor Field Range	Full Scale	-8		+8	Gauss
Dynamic Output Field Range	Programmable with 2 options	±2		±8	Gauss
Sensitivity ⁽¹⁾	Field Range = ±2G		12000		LSB/G
	Field Range = ±8G		3000		LSB/G
Linearity (Best fit linear curve)	Field Range = ±2G		0.1		%FS
Hysteresis	All Ranges		0.3		%FS
Cross Axis Sensitivity	Cross field = 1 Gauss, Happlied = ±2 Gauss		0.1		%/G
Offset			±10		mG
Sensitivity Tempco	Ta = -40°C~85°C		±0.05		%/°C
Temperature Sensor Sensitivity	Ta = -40°C~85°C		100		LSB/°C
Digital Resolution	Change with Gain	0.1		1.0	mGauss
Field Resolution	Standard deviation 100 Data, FS ±2G		2		mGauss
Output Data Rate	Programmable. 10Hz/50Hz/100Hz/200Hz	10		200	Samples /sec
X-Y-Z Orthogonality	Sensitivity Directions		90±1		degree
Operating Temperature		-40		85	°C
ESD	HB Model	2000			V
	Charge Device Model	750			

Figura 66: Principales características del sensor HMC5883L (QST Corporation).

3. Rak 831 Pilot Gateway

Parameter	Description
Computing	Resaberry pi 3(Liunx)
Protocol	LoRaWAN 1.0.2
Lora Chipset	SX1301 base band processor, 70 dB CW interference suppression when 1 MHz offset; Able to work with negative SNR and CCR up to 9dB; Emulation 49x LoRa demodulator and 1x (G) FSK demodulator; Dual digital TX&RX radio front-end interface; 10 programmable parallel demodulation paths; Dynamic data rate (DDR) adaptation; True antenna diversity or simultaneous dual band operation.
Frequency Range	470MHz, 868MHz, 915MHz
Supply Voltage	VDD: 5V-2.5A
Interfaces	Front: USB power, HDMI, Audio Left: GPS Antenna, LoRa Antenna, 1xTF Card, 2xLED(indication the status of TX or RX) Right: LAN, 2xDual USB Port
Antenna	SMA(female) for GPS Antenna, SMA(male) for LoRa Antenna
Range	Urban2~4km/Subur5~10km/Open Area>15km
Current Consumption	Depending on the operating mode up to 2300mA
RX Sensitivity	Down to -142.5 dBm
TX Power	Up to 25.5dBm at setting 27 dBm
Max RF Output	Up to +25 dBm
Mean RF Output	Up to +23 dBm
Modulation	LoRa™/FSK
Operation Temperature	0°C ~ 70°C
Relative Humidity	20%~75% non condensing
Housing	Top cover, body, bottom cover with riveted motherboard standoff
Application Environment	Indoor
Size	92mm x 68.3mm x 53.5mm

Table 4.1: Technical Features

Figura 67: Principales características del Rak831 Pilot Gateway (Rakwireless Technology , 2018).