

INFOTEC CENTRO DE INVESTIGACIÓN E
INNOVACIÓN EN TECNOLOGÍAS DE LA
INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN

DIRECCIÓN ADJUNTA DE INNOVACIÓN Y
CONOCIMIENTO
GERENCIA DE CAPITAL HUMANO
POSGRADOS

“Mobile LoRaWAN Gateway”

PROYECTO DE TITULACIÓN
Que para obtener el grado de MAESTRO EN
SISTEMAS EMBEBIDOS

Presenta:

Jorge Israel Martinez Durón

Asesores:

Dr. Jesús Antonio Sosa Herrera

Dr. Jorge Varona Salazar

Aguascalientes, noviembre, 2021.

Autorización de Impresión y no adeudo en biblioteca



AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN Y NO ADEUDO EN BIBLIOTECA MAESTRÍA EN SISTEMAS EMBEBIDOS

Ciudad de México, 8 de febrero de 2022.
INFOTEC-DAIC-GCH-CSE-022/2022.

La Gerencia de Capital Humano / Gerencia de Investigación hacen constar que el trabajo de titulación intitulado:

"Mobile LoRaWAN Gateway"

Desarrollado por el alumno **Jorge Israel Martínez Durón** y bajo la asesoría del **Dr. Jesús Antonio Sosa Herrera** y del **Dr. Jorge Varona Salazar**; cumple con el formato de biblioteca. Por lo cual, se expide la presente autorización para impresión del proyecto terminal al que se ha hecho mención.

Asimismo se hace constar que no debe material de la biblioteca de INFOTEC.

Vo. Bo.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several vertical and horizontal strokes, positioned above a horizontal line.

Lic. Juan Ramón Abarca Damián
Coordinador de Biblioteca

Anexar a la presente autorización al inicio de la versión impresa del trabajo referido que ampara la misma.

Agradecimientos

La conclusión de esta etapa profesional la cual culmina con la realización de este trabajo no hubiera sido posible sin la ayuda de ciertas personas. Quisiera dedicar este logro principalmente a mi **esposa**, Tania López de Luna ya que, sin ella, sin su apoyo incondicional constante y sin la motivación que genera en mí no me hubiera sido posible llegar al final de este gran paso.

También gracias a mi familia, principalmente a mis **padres** y a mi **abuela**, quienes me educaron y enseñaron con su ejemplo a ser siempre la mejor versión de mí. Gracias a ellos por tenerme la paciencia y dedicación, por darme la mejor educación y por inculcarme los valores necesarios para ser una buena persona.

A mis **hermanas**, con quienes he compartido mucho y siempre han estado al pendiente de mí, gracias.

Y finalmente a todos mis **compañeros de clase** y a mis **profesores y asesores**, he aprendido mucho de todos ellos no únicamente en el ámbito académico, también en lo personal. Gracias a todos y cada uno de ellos.

Índice de contenidos

<i>Introducción</i>	1
<i>Capítulo 1: Contexto Tecnológico</i>	7
1.2 <i>Marco Teórico</i>	7
1.2.1 <i>RSSI</i>	7
<i>Capítulo 2: Planeación de Proyecto</i>	9
2.1 <i>Planteamiento del problema</i>	9
2.2 <i>Objetivos</i>	9
2.2.1 <i>Objetivo General</i>	9
2.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	10
2.3 <i>Metodología</i>	10
2.4 <i>Análisis de Requerimientos</i>	12
2.4.1 <i>Requerimientos</i>	13
2.4.2 <i>Requerimientos no funcionales</i>	13
2.4.3 <i>Requerimientos funcionales</i>	13
<i>Capítulo 3: Desarrollo del Proyecto</i>	15
3.1 <i>Diagrama de Bloques</i>	15
3.2 <i>Selección de Hardware</i>	16
3.2.1 <i>Raspberry Pi 3 B+</i>	16
3.2.2 <i>Mini LoRa Gateway HT-M01 de HELTEC</i>	17
3.2.3 <i>SIM800L EVB Modulo de Modem</i>	18
3.3 <i>Selección de Software</i>	19
3.3.1 <i>The Things Network</i>	19
3.4 <i>Mobile LoRaWAN Gateway</i>	19
3.4.1 <i>Estudio de consumo de batería</i>	20
3.4.2 <i>Nodo</i>	21
<i>Capítulo 4: Pruebas y Resultados</i>	24
<i>Conclusiones</i>	27
<i>Referencias</i>	29
<i>Anexo 1</i>	32
<i>Configuración de The Things Network</i>	32

Índice de figuras

<i>Figura 1: Ilustración "Mobile LoRaWAN Gateway"</i>	2
<i>Figura 2: Ejemplos de Aplicaciones 1 a 3</i>	3
<i>Figura 3: Ejemplo de Aplicacion 4, solución para rastreo de vida silvestre</i>	5
<i>Figura 4: Margen aceptable para RSSI</i>	7
<i>Figura 5: Ciclo de procesos de desarrollo de Sistemas Embebidos (Modificado)</i>	11
<i>Figura 6: Diagrama Funcional de Bloques "Mobile LoRaWAN Gateway"</i>	15
<i>Figura 7: Raspberry Pi 3 B+</i>	16
<i>Figura 8: Mini LoRa Gateway HT-M01</i>	17
<i>Figura 9: SIM800L EVB Modem</i>	18
<i>Figura 10: Mobile LoRaWAN Gateway</i>	19
<i>Figura 11: Mobile LoRaWAN Gateway 360 grados</i>	20
<i>Figura 12: Nodo WiFi LoRa 32 (V2) de Heltec</i>	21
<i>Figura 13: Sensor DHT11</i>	22
<i>Figura 14: Diagrama en protoboard del Nodo LoRaWAN</i>	22
<i>Figura 15: The Things Network (Mobile LoRaWAN Gateway)</i>	32
<i>Figura 16: The Things Network (Aplicacion)</i>	33
<i>Figura 17: The Things Network (Nodo)</i>	34
<i>Figura 18: The Things Network (Datos de Nodo)</i>	34
<i>Figura 19: The Things Network (Datos del Gateway)</i>	35

Siglas y abreviaturas

IoT: *Internet of Things (Internet de las cosas)*

LPWAN: *Low Power Wide Area Network (Red de área amplia y de baja potencia)*

LoRa: *Long Range (Largo alcance), tecnología LPWAN.*

LoRaWAN: *Red LPWAN dedicada a la tecnología LoRa.*

Resumen

Este desarrollo tiene como principal propósito explicar en detalle el proceso de desarrollo para el dispositivo "Mobile LoRaWAN Gateway" propuesto como proyecto de titulación. El cual como su nombre lo indica es una radio-base o "gateway" que opera con el protocolo de red LoRaWAN y tiene capacidades móviles [1].

A su vez también se presentarán los beneficios clave que nos brinda la tecnología de radiocomunicación LoRa, en particular utilizando una red LoRaWAN que al complementarse con dispositivos de Internet de las cosas (IoT) y las capacidades de movilidad del "Mobile LoRaWAN Gateway" nos brindan novedosas capacidades para el desarrollo de soluciones y aplicaciones [2].

Estas aplicaciones son aquellas que, debido a sus requerimientos remotos, requisitos de movilidad constante o recursos limitados no es posible desplegar eficientemente en una red LPWAN o LoRaWAN convencional y las soluciones existentes tienen costos elevados.

El alcance de esta propuesta es probar las capacidades de este dispositivo móvil "Mobile LoRaWAN Gateway" en comparación con otras soluciones similares que no utilizan tecnología LoRa ni hacen uso del protocolo de red LoRaWAN.

Introducción

Hoy en día el Internet de las Cosas (IoT) está generando de manera incremental cada vez más importancia en nuestra sociedad tecnológica, es tanto el impacto que el pronóstico indica que se contará con alrededor de diez mil millones de dispositivos conectados para este año 2020 [3]. Esto es, sin tomar en cuenta las redes de área amplia y baja potencia (LPWAN) sin licencia que están ganando impulso debido a sus características de bajo costo, bajo consumo de potencia y su largo alcance, que resultan adecuadas para muchas aplicaciones en este campo [4].

LoRaWAN es un protocolo de red LPWAN basada en la nube, de acceso abierto y estandarizado para comunicar una o varias radiobases o Gateways con dispositivos o nodos utilizando tecnología LoRa, este protocolo de red está soportado por la "LoRa Alliance" [5]. En este proyecto, se propone un dispositivo con completa integración a la red LoRaWAN, que contará con acceso a internet mediante las redes móviles GSM y 2G y será alimentado por una batería de Litio para brindar una solución para aquellas aplicaciones las cuales no tienen recursos garantizados y que requieran una red LPWAN con capacidades de movimiento.

Vale la pena mencionar la tecnología LTE-M. Esta fue diseñada para ser empleada por dispositivos conectados al IoT y ayuda a conectar estos a la red 4G sin la necesidad de ningún Gateway adicional a los ya existentes dentro de la infraestructura de red celular, esta tecnología es más barata y de menor consumo de potencia que GSM/LTE. Sin embargo, conforme al estudio comparativo de varias tecnologías de comunicación LPWAN y de celular se encontró que LoRaWAN logra mejores resultados en cuanto a consumos de potencia tanto en el transmisor como en estados de reposo [6-8].

Con respecto a la seguridad en la comunicación de datos, el servidor de cualquier red LoRaWAN es el encargado de realizar revisiones de seguridad a todo el tráfico de datos recibidos de los distintos Gateways conectados. La seguridad es uno de los mayores puntos de venta de LoRaWAN. La seguridad a nivel de la red garantiza que los nodos y los puntos finales sean auténticos mientras que la seguridad a nivel de la aplicación se asegura que los operadores de red no sean capaces de tener acceso a los datos de ninguna de las aplicaciones de los usuarios finales. Las redes LoRaWAN hacen uso de llaves de seguridad basadas en estándares avanzados de encriptación (AES) las cuales son únicas para cada dispositivo y aplicación [9].

Los siguientes ejemplos explican varios casos en donde un dispositivo "Mobile LoRaWAN Gateway" puede ser una solución adecuada y cómo esta se compara con las soluciones actuales para dichas aplicaciones.

La *Ilustración 2* es únicamente de carácter ilustrativo, en esta se ilustran los tres ejemplos dados a continuación: para transporte público, para una red de distribución y para el rastreo de alumnos en una escuela.

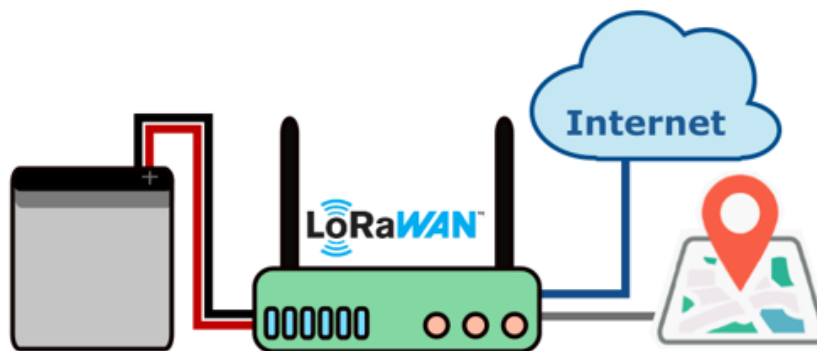


Figura 1: Ilustración "Mobile LoRaWAN Gateway"

Fuente: Elaboración Propia



Figura 2: Ejemplos de Aplicaciones 1 a 3

Fuente: Elaboración Propia

Para transporte público, actualmente es posible conocer en tiempo-real información sobre el estado de los vehículos, incluyendo su ubicación aproximada y tiempos de llegada. Existen algunas aplicaciones implementadas en algunas ciudades, como en Londres donde utilizando GPS y triangulación con redes móviles (es decir celulares) es posible conocer la posición exacta de los vehículos de transporte público, sin embargo, el uso de estas tecnologías es caro y sus costos terminan siendo elevados [10]. Si en vez de utilizar estas tecnologías implementamos una red LoRaWAN móvil colocando un "Mobile LoRaWAN Gateway" en algunos de los vehículos, y un nodo de bajo consumo para monitoreo en todos los vehículos restantes es posible desplegar una red LoRaWAN en movimiento en la cual los vehículos con un "Mobile LoRaWAN Gateway" instalado se encargarán de monitorear los vehículos con nodos a su alrededor y actualizar esta información a la red LoRaWAN. Para su geoposicionamiento cada "Mobile LoRaWAN Gateway" contará con un módulo GPS, lo cual resultaría en una solución

de menor costo ya que el total de dispositivos GPS requeridos se verá reducido al total de "Mobile LoRaWAN Gateways" empleados. Puesto en otras palabras, quiere decir que los camiones con nodos no requerirán GPS puesto que es posible emplear triangulación entre los "Mobile LoRaWAN Gateways" y los nodos para obtener la posición de estos últimos, resultando en una reducción en los costos.

El segundo ejemplo es para una cadena de suministros de comida entre varias ciudades. Actualmente existen compañías como Nimble Wireless [11] que se dedican a ofrecer servicios y soluciones como su monitor multi-punto de temperatura "M5 Multi-point Temperature Monitor" el cual mide la temperatura y humedad interna y externa, sin embargo, también se basa en tecnologías GSM para comunicarse con su servidor y únicamente soporta hasta cinco dispositivos por cada Gateway. Implementando una red LoRaWAN móvil en cada camión y colocando un nodo sensor en cada charola hace posible el monitoreo del estado de los alimentos, tales como su temperatura, humedad y así determinar su grado de frescura.

Esta aplicación del segundo ejemplo podría ser una solución más barata y eficiente para el proveedor que a su vez podrá garantizar la calidad de sus productos a los clientes y es una manera eficiente de monitoreo en tiempo-real en caso de cualquier falla o accidente. Y un solo "Mobile LoRaWAN Gateway" es capaz de monitorear considerablemente más de cinco dispositivos.

El tercer ejemplo de aplicación es para el rastreo del usuario final sin necesidad de ninguna configuración complicada. Actualmente existen algunas soluciones en el mercado, sin embargo, todas estas se enfocan a rastrear a un solo individuo y no a un grupo, y todas utilizan ya sea GPS, Wifi o GSM lo cual eleva el precio, o Bluetooth que es más económico, pero está limitado en el rango de alcance. Por ejemplo, un maestro de primaria puede utilizar un "Mobile LoRaWAN Gateway" en conjunto con brazaletes con un sensor de localización integrado que trabajara como un nodo LoRaWAN para así poder mantener un rastreo constante de todos los alumnos en un viaje de campo o excursión. Esto podría ser de gran

utilidad ya que el maestro no necesitará desplegar ningún sistema complicado y solo tendrá que prender el dispositivo "Mobile LoRaWAN Gateway" previamente configurado junto con su aplicación. Cabe mencionar que esta misma solución tiene varias aplicaciones, también se puede aplicar para el monitoreo de signos vitales en personas con cuidados especiales debido a enfermedades o personas de la tercera edad.

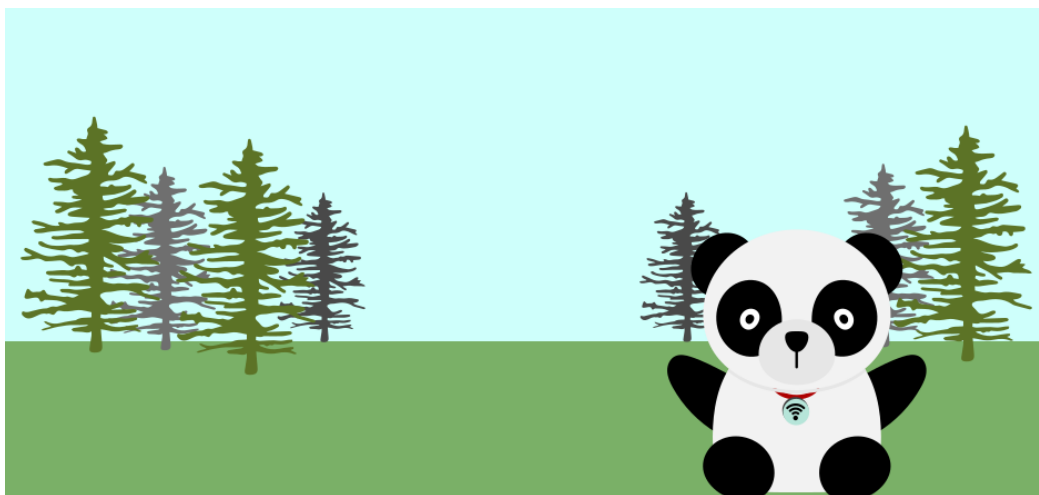


Figura 3: Ejemplo de Aplicacion 4, solución para rastreo de vida silvestre.

Fuente: Elaboración Propia

Como cuarto ejemplo, "Mobile LoRaWAN Gateway" puede ser una solución interesante para el monitoreo de sensores en regiones remotas y de bajos recursos tecnológicos y de comunicación. En la actualidad existen compañías como "Argos Systems" [12] las cuales brindan servicios de rastreo por satélite, las cuales cuentan con ventajas como su cobertura mundial y sus sistemas robustos tanto en seguridad como en su infraestructura, sin embargo, el precio de sus servicios tiene a ser muy elevado. Como ejemplo práctico, para el monitoreo de especies en reservas ecológicas, o en regiones como selvas o desiertos. No es necesario tener un monitoreo constante, con ayuda dispositivos nodo con sensores que sean colocados en cada espécimen a monitorear y estén encargados de almacenar esta información por un tiempo definido. Posteriormente sería posible recolectar todos estos datos de toda la zona simplemente con hacer un recorrido con el "Mobile LoRaWAN Gateway" que se encargaría de recibir toda esta información sin interferir con la especie y su habitat.



Capítulo 1: Contexto Tecnológico

Capítulo 1: Contexto Tecnológico

1.2 Marco Teórico

1.2.1 RSSI

RSSI que en inglés significa “Received Signal Strength Indication”, y se refiere a la potencia de la señal que se está recibiendo en mili-Watts y es medido en dBm, este es un valor negativo, y entre más cercano sea este a cero la señal recibida será de mejor calidad. Este valor nos sirve como una medida de que tan bien un receptor puede escuchar una señal de un emisor.

Los valores de RSSI típicos en LoRaWAN se ilustran en la siguiente imagen, en donde un RSS menor a -130 dBm es lo mínimo aceptable para que una señal sea recibida de manera muy débil y un valor ideal de RSSI sería de -30dBm aproximadamente.

Este parámetro será la manera para verificar la calidad de la comunicación del dispositivo “Mobile LoRaWAN Gateway” en las pruebas a realizar.



Figura 4: Margen aceptable para RSSI

Fuente: Elaboración Propia



Capítulo 2: Planeación del Proyecto

Capítulo 2: Planeación de Proyecto

2.1 Planteamiento del problema

Actualmente el alcance tecnológico del Internet y del IoT es muy amplio, pero, aun así, sigue siendo limitado geográficamente y existen regiones remotas con recursos limitados o inexistentes. Estos recursos pueden ser en la infraestructura de la región, como la falta de conectividad de redes móviles, falta de acceso a Internet o incluso en casos extremos falta de acceso a electricidad. En estas regiones muchas veces no es una opción viable el construir tal infraestructura y servicios haciendo necesario buscar otras alternativas.

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo General

Este proyecto de desarrollo tecnológico tiene como finalidad el desarrollo de un dispositivo capaz de brindar una solución práctica y simple en comparación con otras soluciones para el despliegue temporal de una red LoRaWAN en movimiento capaz de dar una solución accesible a la necesidad de crear una red de muestreo y monitoreo en regiones remotas y en situaciones con recursos limitados.

El objetivo principal del proyecto es la creación de la primera versión prototipo del "Mobile LoRaWAN Gateway". Se espera que este dispositivo Gateway LoRa sea eficiente y de bajo costo en comparación con otros puntos de acceso o Gateways de LoRa y en comparación con soluciones que emplean otras tecnologías. El "Mobile LoRaWAN Gateway" deberá ser capaz de funcionar en cualquier red LoRaWAN y en conjunto con los demás puntos de acceso y dispositivos nodos existentes en dicha red. Además, este dispositivo deberá tener la capacidad de funcionar eficientemente en movimiento y tener la opción de trabajar de manera independiente sin requerir de acceso a internet y alimentación constante.

2.2.2 Objetivos Específicos

- **Objetivo específico 1:** Implementación de un sistema embebido utilizando una tarjeta de desarrollo Raspberry Pi [13] y el mini Gateway de LoRa HT-M01 de Heltec.
- **Objetivo específico 2:** Integración y configuración del Gateway HT-M01 en la red LoRaWAN de "The Things Network".
- **Objetivo específico 3:** Integración de batería y acceso a internet GSM.
- **Objetivo específico 4:** Integración de software.
- **Objetivo específico 5:** Pruebas en movimiento del sistema e integración con otros dispositivos Gateways y nodos de LoRa en la misma red LoRaWAN.

2.3 Metodología

La metodología empleada para el desarrollo de este proyecto está basada en el ciclo de procesos de desarrollo de sistemas embebidos registrada por INFOTEC [14]. Se eligió esta metodología debido a que fue la más adecuada conforme a los requerimientos y objetivos del proyecto. Aunque cabe mencionar que para este desarrollo se omitieron los dos últimos pasos de la metodología: Administración del producto y manufactura en serie, debido a que el desarrollo de el "Mobile LoRaWAN Gateway" concluirá con el primer dispositivo prototipo, no se incluirán ni la administración del producto ni su manufactura en serie. Resultando de la siguiente manera:

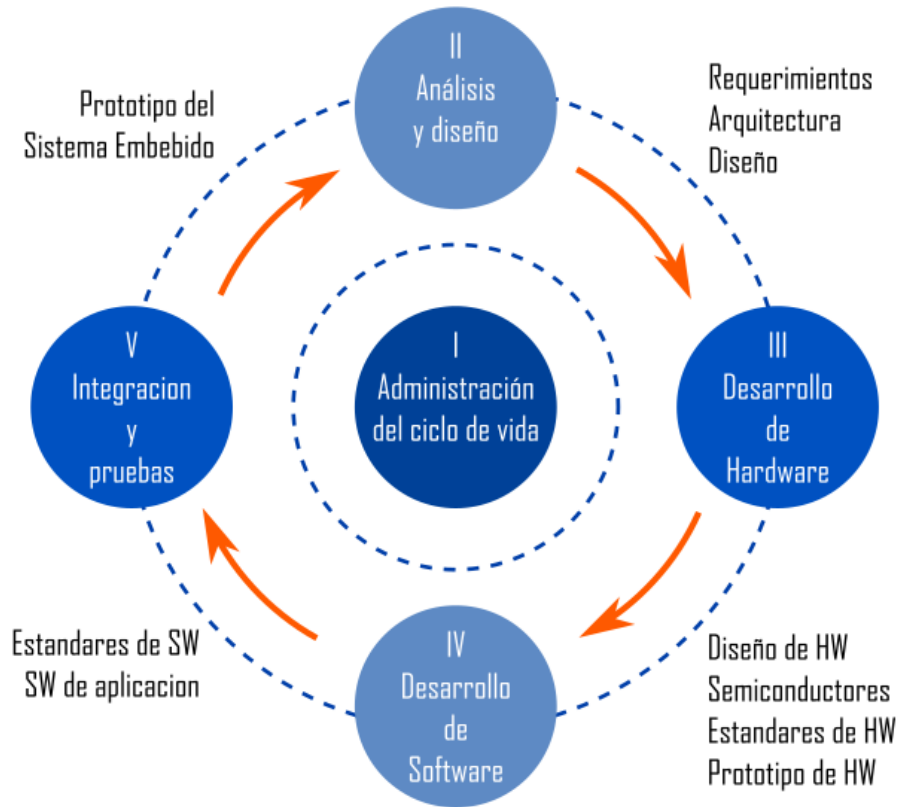


Figura 5: Ciclo de procesos de desarrollo de Sistemas Embebidos (Modificado)

Fuente: Elaboración Propia

1. **Análisis y desarrollo:** En esta etapa se realiza el análisis inicial, se definen los requerimientos del sistema y se realiza el diseño de la arquitectura donde se definen los componentes de hardware y software como la tarjeta de desarrollo, Gateway, batería, módulos, componentes electrónicos y herramientas de software del sistema “Mobile LoRaWAN Gateway”.
2. **Desarrollo de Hardware:** Ensamble e integración de los componentes de hardware previamente seleccionados para el desarrollo del “Mobile LoraWAN Gateway”.
3. **Desarrollo de Software:** Diseño y codificación del software en el “Mobile LoRaWAN Gateway” así como configuraciones de la red LoRaWAN y la aplicación.

4. **Integración y pruebas:** Etapa caracterizada por probar intensivamente el dispositivo ya integrado con todas sus partes para poder obtener conclusiones y de ser necesario, volver al inicio del ciclo para la corrección, optimización o diseño de cualquier problema que surgiera en esta etapa.

Para nuestro dispositivo esto se refiere a probar sus alcances y limitaciones en el campo, su desempeño y su integración con la red LoraWAN. Para finalmente decidir si el resultado es satisfactorio o si se puede regresar y mejorar algo del proceso.

2.4 Análisis de Requerimientos

El motivo de realizar un análisis de requerimientos es apoyarnos de este para hacer una investigación y desarrollo correctos al poder establecer puntos concretos que describen necesidades mínimas e indispensables para el “Mobile LoRaWAN Gateway”, estos requerimientos se dividen en funcionales y no funcionales.

Los requerimientos son aquellas características o restricciones que un sistema, proyecto o desarrollo debe cumplir para su correcto funcionamiento. Estos requerimientos se dividen en funcionales, los cuales definen una función del sistema y los no funcionales, que se centran en las características específicas de diseño o implementación.

2.4.1 Requerimientos

2.4.2 Requerimientos no funcionales

Los requerimientos no funcionales del sistema son aquellos atributos necesarios y restricciones existentes del “Mobile LoRaWAN Gateway”. Estos requerimientos no funcionales se encuentran en el cuadro a continuación.

#	Requerimiento	Descripción
RNF1	Programación	Modificaciones a los programas de software corriendo en el sistema para poder soportar todos los requerimientos. Por ejemplo, modificación del acceso a internet y la movilidad a nivel del software.
RNF2	Alimentación	El Sistema “Mobile LoRaWAN Gateway” deberá contar con alimentación propia de una batería dedicada para permitir al sistema funcionar en movimiento.
RNF3	Integración	El Sistema deberá satisfactoriamente integrar todos sus módulos y funcionar correctamente como un sistema en conjunto.
RNF4	Desempeño	El sistema deberá mostrar un buen desempeño en su totalidad y en cada uno de sus módulos, esto referente tanto al hardware como al software.
RNF5	Movilidad	El Sistema será capaz de funcionar de manera óptima en cualquier red LoRaWAN mientras se encuentre en movimiento. Requerimiento más importante.
RNF6	Acceso a Internet	El Sistema “Mobile LoRaWAN Gateway” deberá contar con acceso a internet en todo momento para así ser capaz de enviar y recibir los datos de la red LoRaWAN a la plataforma en la nube (IoT), debido al requerimiento anterior es necesario que este acceso a internet sea posible mientras el sistema se encuentre en movimiento.
RNF7	Independencia	El Sistema “Mobile LoRaWAN Gateway” deberá contar con todo lo indispensable para poder ser desplegado de manera autónoma e independiente.

Cuadro 1: Requerimientos no funcionales


Fuente: Elaboración Propia

2.4.3 Requerimientos funcionales

#	Requerimiento	Descripción
RNF1	Raspberry Pi	El procesamiento del sistema se llevará a cabo en una tarjeta de desarrollo Raspberry Pi, debido a su flexibilidad y alcance.
RNF2	Capacidad de la batería	El Sistema empleará una batería de 3.7V / 4000MAh que brinde alimentación constante por al menos 5 horas.
RNF3	Capacidad de redes móviles	El Sistema se limitará a emplear la red móvil 2G o GPRS para conectarse a internet, limitación propia de la tarjeta SIM800L.

Cuadro 2: Requerimientos Funcionales

Fuente: Elaboración Propia



Capítulo 3: Desarrollo del Proyecto

Capítulo 3: Desarrollo del Proyecto

3.1 Diagrama de Bloques

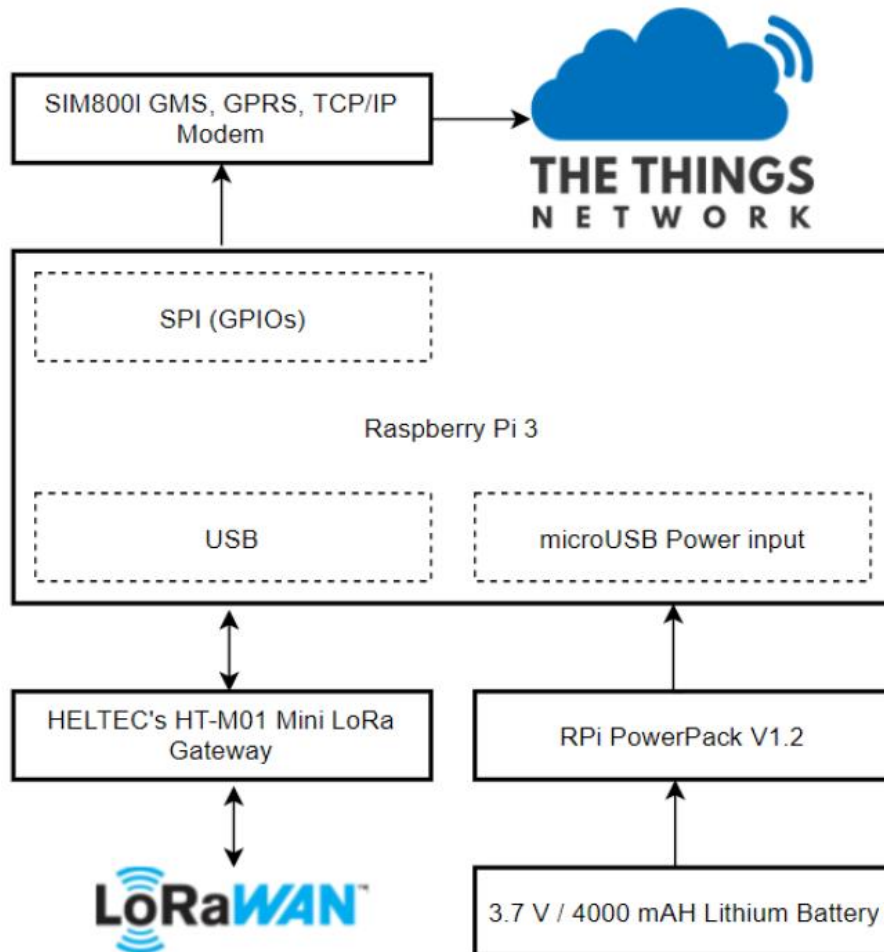


Figura 6: Diagrama Funcional de Bloques "Mobile LoRaWAN Gateway"

Fuente: Elaboración Propia

La ilustración anterior muestra el diagrama de bloques propuesto para la integración del "Mobile LoRaWAN Gateway". Con este diagrama se puede obtener una idea general de como los diferentes bloques de hardware se integran para trabajar en conjunto como un sistema independiente, el centro de procesamiento y control se llevará a cabo en una tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 3 desde donde estarán conectados el Gateway de LoRa HT-M01 Mini de HELTEC, el módulo SIM8000I que contiene un modem de GSM, GPRS y TCP/IP y el módulo "RPi PowerPack V1.2" el cual se encarga de controlar la alimentación de la Raspberry Pi 3 con una batería de litio de 3.7 V / 4000 mA.

3.2 Selección de Hardware

A continuación, se muestra cada componente de hardware del sistema con una breve descripción de sus características más relevantes para el proyecto (no es una descripción completa).

3.2.1 Raspberry Pi 3 B+



Figura 7: Raspberry Pi 3 B+

Fuente: www.raspberrypi.org

Raspberry Pi 3 B+ es una computadora integrada en una sola tarjeta. El procesamiento principal del “Mobile LoRaWAN Gateway” se llevará a cabo en esta tarjeta la cual estará corriendo el sistema operativo Raspbian, una versión dedicada de Linux Debian para sistemas embebidos. Las características relevantes para el desarrollo son:

Característica	Descripción
Alimentación	5V / 2.5A DC
Consumo	350mA – 980mA

Cuadro 3: Características de Raspberry Pi 3 B+

Fuente: www.raspberrypi.org

3.2.2 Mini LoRa Gateway HT-M01 de HELTEC



Figura 8: Mini LoRa Gateway HT-M01

Fuente: heltec.org

El *Mini Lora Gateway HT-M01* de HELTEC funciona con el chip SX1301 producido por Semtech. Es un Gateway pequeño, de alto desempeño y de grado industrial que funciona con los estándares LoRa/LoRaWAN. Existen varias versiones del *Mini Lora Gateway HT-M01* para los distintos estándares de LoRaWAN, para el “Mobile LoRaWAN Gateway” se emplea la versión de 915MHz (Estándar de LoRaWAN para norte América). El HT-M01 es multicanal capaz de emular hasta 49 demuladores de LoRa, cuenta con 10 caminos programables para demulación paralela, soporta los protocolos de LoRaWAN de las clases A, B y C y cuenta con adaptación dinámica de velocidades de datos. Las principales especificaciones son las siguientes:

Característica	Descripción
Chip base LoRa	SX1301
Chip RF LoRa	SX1257
Banda de trabajo	US 902MHz – 928MHz
Máxima potencia de salida	20dB +/- 1dB
Sensibilidad de entrada	-142.5dBm @ 300bps
Interfaces	Micro USB, SPI y Antena SMA
Alimentación	5V / 500mA DC
Consumo	153mA – 284mA

Cuadro 4: Características de Mini LoRa Gateway HT-M01

Fuente: heltec.org

3.2.3 SIM800L EVB Modulo de Modem



Figura 9: SIM800L EVB Modem

Fuente: makersgonnamake.com.mx

El SIM800L EVB es una tarjeta de evaluación modem que es capaz de trabajar GSM (850MHz), EGSM (900MHz) DCS (1800MHz) y PCS (1900MHz) [15]. El SIM800L cuenta con una ranura GPRS clase 12 y soporta los esquemas de código CS-1, CS-2, CS-3 y CS-4. Para el “Mobile LoRaWAN Gateway” se utilizará una tarjeta SIM de cualquier compañía celular, la cual tendrá acceso a datos móviles de prepago. Las características principales de la tarjeta SIM800L son:

Característica	Descripción
Alimentación	3.4V – 4.4V DC
Consumo	0.7mA – 453mA

Cuadro 5: Características de SIM800L EVB

Fuente: makersgonnamake.com.mx

3.3 Selección de Software

3.3.1 The Things Network

The Things Network es un proyecto abierto y de libre uso para la comunidad, está dedicado a construir una red LPWAN, específicamente empleando dispositivos de comunicación LoRa para trabajar en una red LoRaWAN. Se eligió esta plataforma para trabajar el “Mobile LoRaWAN Gateway” debido a que es una herramienta gratuita que brinda acceso a una red LoRaWAN global, que, además, es ampliamente soportada y pone a disposición de los usuarios herramientas de control y monitoreo, así como fácil integración con otras aplicaciones en la nube y servicios.

3.4 Mobile LoRaWAN Gateway

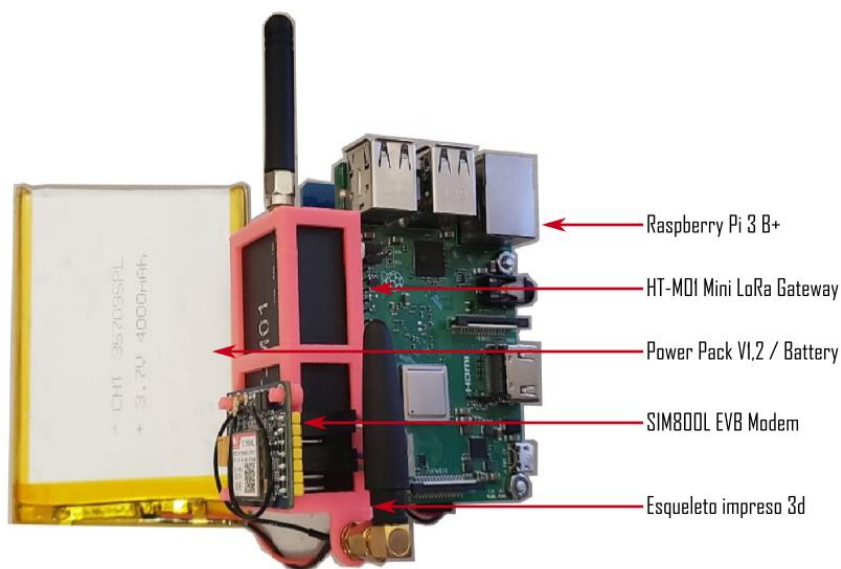


Figura 10: Mobile LoRaWAN Gateway

Fuente: Elaboración Propia

La integración de todos los componentes y bloques de hardware y software mencionados en los capítulos anteriores del documento resultan en el primer prototipo del dispositivo “Mobile LoRaWAN Gateway”. Todos los componentes se

integran a un solo dispositivo gracias a un soporte impreso en tres dimensiones diseñado específicamente para este desarrollo.

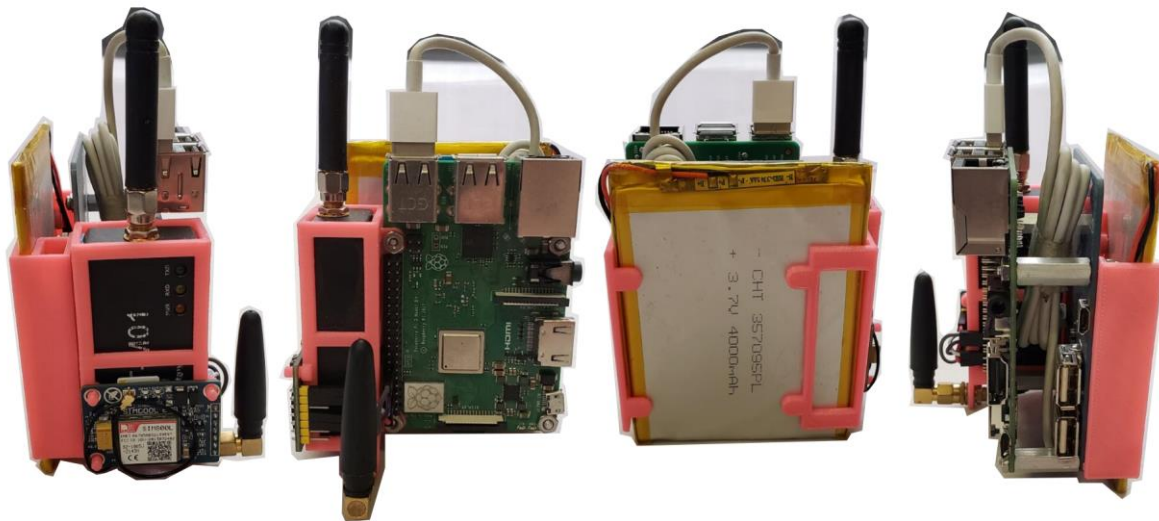


Figura 11: Mobile LoRaWAN Gateway 360 grados.

Fuente: Elaboración Propia

3.4.1 Estudio de consumo de batería.

Componente	Consumo promedio (mA)
Raspberry Pi 3 B+	~500
HT-M01 Mini LoRa Gateway	~153
Modem SIM800L	~0.7
TOTAL	~653.7

Cuadro 6: Consumo promedio de batería

Fuente: Elaboración Propia

El cuadro anterior muestra un resumen del consumo promedio de cada uno de los componentes del sistema, así como un total promedio de consumo. Con esto se calcula que, en teoría, el “Mobile LoRaWAN Gateway” es capaz de funcionar con batería alrededor de 6.119 horas seguidas.

3.4.2Nodo

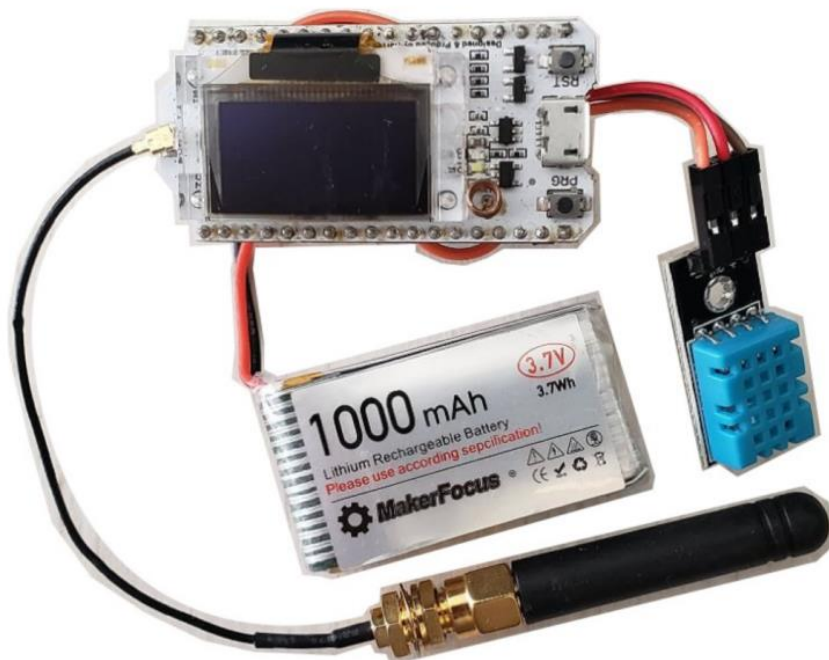


Figura 12: Nodo WiFi LoRa 32 (V2) de Heltec

Fuente: Elaboración Propia

Para realizar las pruebas pertinentes al dispositivo “Mobile LoRaWAN Gateway” es necesario conectarlo con un nodo de LoRaWAN, para esto se ha seleccionado el nodo *WiFi LoRa 32 (V2)* de Heltec. Se selecciono este dispositivo debido a su fácil programación, a que cuenta con una interfaz Micro USB con un regulador de voltaje integrado que facilita la utilización de baterías. Las características de interés de esta tarjeta de desarrollo son las siguientes:

Característica	Descripción
Microprocesador	ESP32 (dual-core 32-bit MCU)
LoRa chip	SX1278
Máxima potencia de salida	18dB +/- 2dB
Batería	Litio de 3.7V
Consumo en hibernación	800uA

Cuadro 7: Características de Nodo WiFi LoRa 32 (V2)

Fuente: heltec.org

El nodo emplea una batería de litio de 3.7 volts con una capacidad de 1000 mAh para poder ser utilizado en movimiento, lo cual es un requerimiento básico para la realización de las pruebas del “Mobile LoRaWAN Gateway”.

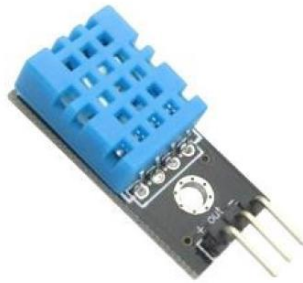


Figura 13: Sensor DHT11

Fuente: www.pixelectric.com

Para fines prácticos el nodo cuenta con un sensor de temperatura y humedad relativa DHT11, esto permitirá tener un dato en transmisión al momento de realizar pruebas de comunicación y alcance.

El código utilizado para leer el sensor DHT11 [16], y conectarse al TheThingsNetwork a través del “Mobile LoRaWAN Gateway” se puede encontrar en la sección de Anexos de este documento.

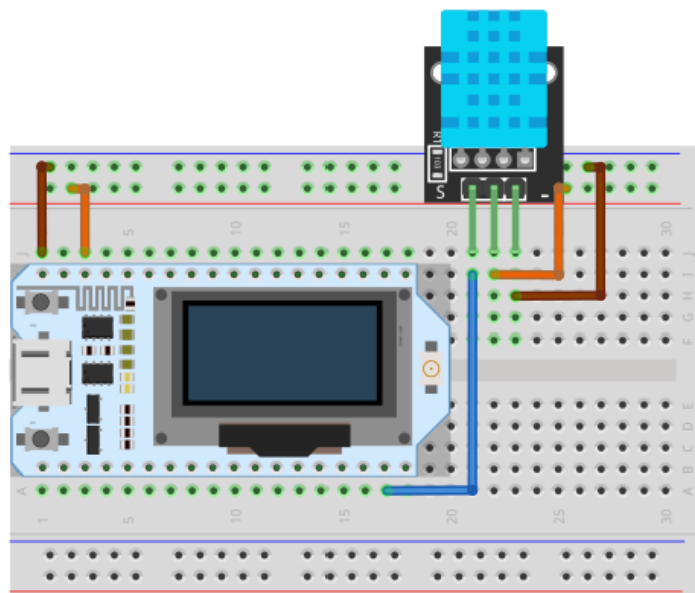


Figura 14: Diagrama en protoboard del Nodo LoRaWAN

Fuente: *Elaboración Propia*



Capítulo 4: Pruebas y Resultados

Capítulo 4: Pruebas y Resultados




Esta sección explica cómo es que se efectuaron las pruebas al “Mobile LoRaWAN Gateway”. Estas pruebas consisten en comparar cada dispositivo Gateway de LoRa trabajando en la misma red de TheThingsNetwork y comunicándose con el mismo nodo de ejemplo.

Para esto primero es necesario entender los conceptos básicos de cómo es posible medir la intensidad y calidad de una señal inalámbrica haciendo uso de parámetros como RSSI, esto está explicado en la sección de “Marco teórico” del capítulo 1.

Los paquetes empleados por The Things Network contienen embebido en sus metadatos el valor de RSSI, la imagen a continuación muestra el ejemplo de uno de los paquetes recibidos por el “Mobile LoRaWAN Gateway” donde se puede ver subrayado el valor del RSSI de dicho paquete.

Para poder determinar el desempeño del “Mobile LoRaWAN Gateway” es necesario hacer pruebas donde se pueda comparar la comunicación del Gateway.

Para esto la primera prueba consiste en comparar tres Gateways diferentes conectados al mismo nodo y a la misma red en The Things Network. Para esto se utilizarán, además del “Mobile LoRaWAN Gateway”, el Gateway LG01-P de la marca Dragino y el Gateway Kona Micro de Tektelic. Para esta primera prueba el “Mobile LoRaWAN Gateway” no se encontrará en movimiento, y se realizarán las medidas de RSSI entre el nodo y cada Gateway tomando cuatro diferentes distancias entre el nodo. Sin embargo, debido a las limitaciones que presenta el Gateway LG01-P de Dragino, que, aunque se puede ver correctamente configurado y en línea en The Things Network, este no recibe ningún paquete, lo cual se debe a que este dispositivo no cumple con las especificaciones del protocolo LoRaWAN lo cual resulta en problemas de configuración con la red en The Things Network. A continuación, una comparación entre los tres dispositivos:

Dragino LG01-P	Tektelic Kona Micro	Mobile LoRaWAN Gateway
		
Canales: 1 Soporta LoRaWAN: No CPU: 400MHz RAM: 64 MB OS: OpenWrt Interfaces: Ethernet Bateria: No	Canales: 8 Soporta LoRaWAN: Si CPU: 120MHz RAM: 256 KB OS: FreeRTOS Interfaces: Ethernet Bateria: No	Canales: 8 Soporta LoRaWAN: Si CPU: 1.4GHz 64-bit RAM: 1 GB OS: Linux Raspbian Interfaces: Ethernet, WiFi, 2G Bateria: Si

Cuadro 8: Comparación entre distintos Gateways LoRa

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados de la prueba se encuentran en el siguiente cuadro, nótese que no se incluye el Gateway “Dragino LG01-P” debido a que no fue posible configurarlo correctamente. Estos resultados consisten en una serie de mediciones hechas con cada dispositivo a distintas distancias entre el nodo y el Gateway correspondiente. Por cada dispositivo se realizaron 5 mediciones del RSSI entre el nodo y el Gateway en cuestión:

Distancia (m)	Tektelic Kona Micro Mini	Mobile LoRaWAN Gateway
5	- 38 dBm	- 42 dBm
20	- 72 dBm	- 69 dBm
50	-93 dBm	- 102 dBm
100	- 105 dBm	- 121 dBm

Cuadro 9: Resultados de calidad en señal a diferentes distancias

Fuente: Elaboración Propia

De los resultados obtenidos por la prueba, podemos concluir que, aunque las especificaciones del “Mobile LoRaWAN Gateway” superan a los otros dispositivos en cuanto a su desempeño y calidad de transmisión se obtuvieron resultados similares en ambos Gateways.



Conclusiones

Conclusiones

El objetivo general se cumplió perfectamente ya que se logró desarrollar el primer prototipo funcional del dispositivo “Mobile LoRaWAN Gateway” el cual fue desplegado en el campo en conjunto con una red LoRaWAN en TheThingsNetwork y en conjunto con otros dos dispositivos Gateway de LoRaWAN.

En cuanto a los objetivos específicos; la Raspberry Pi resulto ser una muy buena elección para desarrollar el sistema gracias a su gran poder de procesamiento, su sistema operativo basado en Linux (Raspbian) y sus periféricos. Gracias al sistema operativo Raspbian de la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi fue posible desplegar fácil y eficientemente el software conocido como “Packet Forwarder” encargado de gestionar los paquetes del mini LoRa Gateway HT-M01 y la red LoRaWAN configurada en TheThingsNetwork. Gracias a esto se dieron muy buenos resultados en la integración entre el mini Gateway de LoRa HT-M01 y la tarjeta de desarrollo.

Se logro una buena integración del sistema con los módulos de batería y de acceso a internet, esto se evalúa mediante la funcionalidad final del proyecto físico. Para la batería se demostró que empleando una batería de Li-Ion de 3.7V y 4000MAh fue suficiente para lograr que el sistema se mantuviera en funcionamiento por aproximadamente ~5 horas seguidas sin ningún problema. Para el acceso a internet fue suficiente empleando un chip de telefonía Telcel en la ranura GPRS del módulo SIM800L y la banda GSM de telefonía dio el desempeño esperado sin ningún problema de conexión.

Una vez integrado el sistema completo fue posible desplegarlo en movimiento para la realización de sus pruebas de desempeño, en dichas pruebas también se comprobó su correcta comunicación con un nodo dedicado en la red LoRaWAN desplegada en TheThingsNetwork. Como comentario adicional, se considera como una mejora muy importante cambiar la antena para lograr un mayor alcance y realizar las pruebas al exterior.



Referencias

Referencias

- [7] A. Iqbal et al., "Low-Power Wide Area Network Technologies for Internet-of-Things: A Comparative Review" in IEEE Internet of Things Journal, vol. 6, no. 2, pp. 2225-2240, April 2019.
DOI: [10.1109/JIOT.2018.2883728](https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2883728)
- [3] A. Nordrum "Popular Internet of Things Forecast of 50 billion Devices by 2020 Is Outdated" IEEE Spectrum's general technology blog, Aug. 2016. Sitio web:
<https://spectrum.ieee.org/tech-talk/telecom/internet/popular-internet-of-things-forecast-of-50-billion-devices-by-2020-is-outdated>
- [1] A. Petrariu, A. Lavric, E. Coca. "LoRaWAN Gateway: Design, Implementation and Testing in Real Environment" 2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME).
DOI: [10.1109/SIITME47687.2019.8990791](https://doi.org/10.1109/SIITME47687.2019.8990791)
- [12] Argo's Systems "Argos, Connected, Protected", Sitio Web:
<https://www.argos-system.org/>
- [14] Ciclo de proceso de desarrollo de sistemas embebidos INFOTEC. Sitio web:
https://www.infotec.mx/es_mx/Infotec/LabSE/
- [16] Código fuente para nodo WiFiLoRa32 de Heltec (Repositorio - OneDrive), Sitio web:
<https://1drv.ms/u/s!AkAvuT0ahiBngpQZS1-rz7Bv54JCBQ?e=zMh3mV>
- [15] Especificaciones de módulo de modem SIM800L. Sitio web:
https://moam.info/hardware-design-narobocom_5a0dcd081723dd4f3ab09936.html
- [13] I. Castro Liera, M Cortés Laminaga. "Robotica y Computacion, Retos y Perspectivas" mayo 2018. Sitio web: <http://posgrado.lapaz.tecnm.mx/circ2021/CIRC2018.pdf>
- [5] Lora Alliance home page. Sitio web:
<https://lora-alliance.org/>
- [10] Mohammad A. Al-Khedher "Hybrid GPS-GSM Localization of Automobile Tracking System" International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT) Vol 3, No 6, Dec 2011.
DOI: [10.5121/ijcsit.2011.3606](https://doi.org/10.5121/ijcsit.2011.3606)
- [9] N. L. Ismail, M. Kassim, M. Ismail, and R. Mohamad, "A review of low power wide area technology in licensed and unlicensed spectrum for IoT use cases," Bull. Electr. Eng. Informatics, 2018.
DOI: [10.11591/eei.v7i2.1174](https://doi.org/10.11591/eei.v7i2.1174)

- [2] N. Petkov, K. Kirov, P. Gregorios, "Development of Multichannel LoRaWAN Gateway for Educational Applications in Low-Power Wireless Communications" Proc. XXVIII International Scientific Conference Electronics - ET2019, September 12 - 14, 2019, Sozopol, Bulgaria.
DOI: [10.1109/ET.2019.8878492](https://doi.org/10.1109/ET.2019.8878492)
- [11] Nimble Wireless "Monitor Asset's Location, Temperature and Humidity" Sitio web: <https://nimblewireless.com/>
- [6] S. Gaddam and M. Rai, "A comparative study on various LPWAN and cellular communication technologies for IoT based smart applications," in 2018 International Conference on Emerging Trends and Innovations in Engineering and Technological Research, ICETIETR 2018.
DOI: [10.1109/ICETIETR.2018.8529060](https://doi.org/10.1109/ICETIETR.2018.8529060)
- [4] T. Petric, M. Goessens, L. Nuaymi "Measurement's performance and analysis of LoRa FABIAN a real-world implementation of LPWAN" IEEE 27th Annual International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, pp. 1-7, 2016
DOI: [10.1109/ICC.2017.7996384](https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7996384)
- [8] Y. Kabalcı and M. Ali, "Emerging LPWAN Technologies for Smart Environments: An Outlook," 2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Nevsehir, Turkey, 2019, pp. 24-29.
DOI: [10.1109/GPECOM.2019.8778626](https://doi.org/10.1109/GPECOM.2019.8778626)



Anexos

Anexo 1

Configuración de The Things Network.

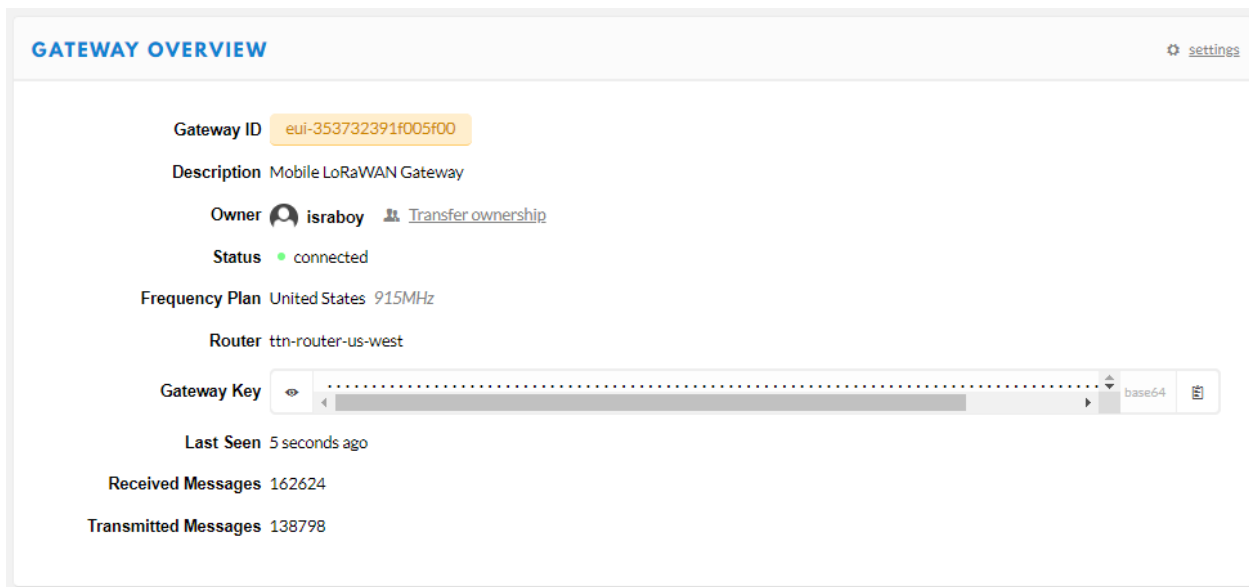


Figura 15: The Things Network (Mobile LoRaWAN Gateway)

Fuente: Elaboración Propia

Es necesario tener previamente configurada una cuenta en el sitio, una vez hecho esto el usuario tiene acceso a la red y es capaz de agregar Gateways, Nodos y aplicaciones. Lo primero indispensable es agregar y configurar el “Mobile LoRaWAN Gateway” propiamente en TTN. La imagen anterior muestra como el Gateway ha sido agregado y se encuentra conectado a la red.

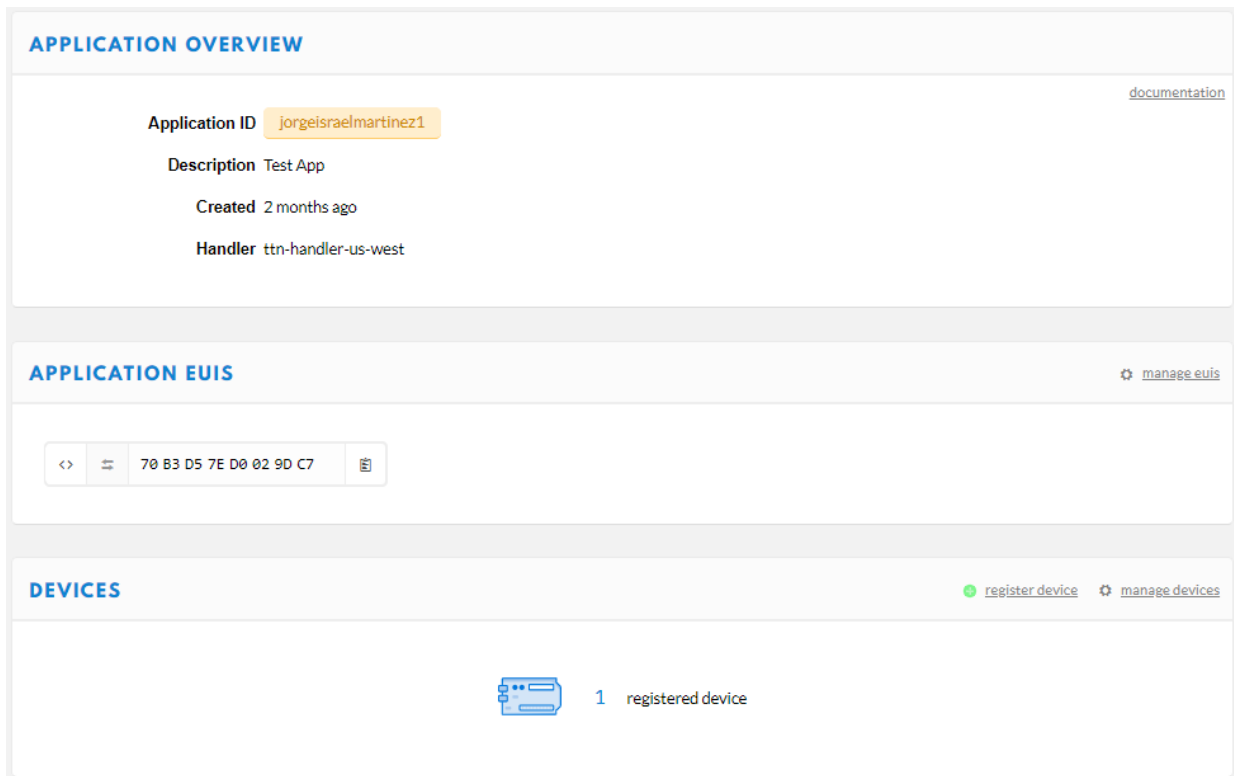


Figura 16: The Things Network (Aplicacion)

Fuente: Elaboración Propia

En el protocolo LoRaWAN los dispositivos se pueden comunicar con las aplicaciones a los cuales estos han sido registrados previamente. Para registrar un nodo, es necesario agregar una aplicación primero, ya que la configuración del nodo depende directamente de las llaves de acceso y la EUI de la aplicación.

Ya que se ha configurado el Gateway y la aplicación es posible agregar el nodo a la red LoRaWAN de The Things Network. La imagen a continuación muestra como se ve en la plataforma el nodo en línea y transmitiendo:

DEVICE OVERVIEW

Application ID jorgeisraelmartinez1

Device ID node1

Activation Method OTAA

Device EUI <> DF DF DF DF DF DF DF DF

Application EUI <> 70 B3 D5 7E D0 02 9D C7

App Key <>

Device Address <> 26 02 28 E5

Network Session Key <>

App Session Key <>

Status ● 2 minutes ago

Frames up 0 [reset frame counters](#)

Frames down 0

Figura 17: The Things Network (Nodo)

Fuente: Elaboración Propia

APPLICATION DATA

|| pause ■ clear

Filters uplink downlink activation ack error

time	counter	port	dev addr:	app eui:	dev eui:
⚡ 20:23:16			26 02 28 41	70 B3 D5 7E D0 02 9D C7	DF DF DF DF DF DF DF DF
⚡ 20:22:39			26 02 29 DA	70 B3 D5 7E D0 02 9D C7	DF DF DF DF DF DF DF DF
⚡ 20:22:02			26 02 2D AD	70 B3 D5 7E D0 02 9D C7	DF DF DF DF DF DF DF DF
⚡ 20:21:25			26 02 2A 88	70 B3 D5 7E D0 02 9D C7	DF DF DF DF DF DF DF DF
⚡ 20:20:47			26 02 29 E4	70 B3 D5 7E D0 02 9D C7	DF DF DF DF DF DF DF DF
⚡ 20:20:10			26 02 22 89	70 B3 D5 7E D0 02 9D C7	DF DF DF DF DF DF DF DF
⚡ 20:19:33			26 02 2F 34	70 B3 D5 7E D0 02 9D C7	DF DF DF DF DF DF DF DF

Figura 18: The Things Network (Datos de Nodo)

Fuente: Elaboración Propia

La imagen superior muestra los datos del nodo que están siendo recibidos por la aplicación que se configuró.

Y a continuación se muestran los datos tanto que están siendo recibidos por el “Mobile LoRaWAN Gateway” y transmitidos a The Things Network.

time	frequency	mod.	CR	data rate	airtime (ms)	cnt
20:32:36	903.1	4/5	SF 10 BW 125	370.7		app eui: 70 B3 D5 7E D0 02 9DC7 dev eui: DFDFDFDFDFDFDF
20:32:31	903.1	4/5	SF 10 BW 125	370.7		app eui: 70 B3 D5 7E D0 02 9DC7 dev eui: DFDFDFDFDFDFDF
20:31:59	902.3	4/5	SF 10 BW 125	370.7		app eui: 70 B3 D5 7E D0 02 9DC7 dev eui: DFDFDFDFDFDFDF
20:31:54	902.3	4/5	SF 10 BW 125	370.7		app eui: 70 B3 D5 7E D0 02 9DC7 dev eui: DFDFDFDFDFDFDF
20:31:17	903.5	4/5	SF 10 BW 125	370.7		app eui: 70 B3 D5 7E D0 02 9DC7 dev eui: DFDFDFDFDFDFDF
20:30:40	902.5	4/5	SF 10 BW 125	370.7		app eui: 70 B3 D5 7E D0 02 9DC7 dev eui: DFDFDFDFDFDFDF
20:30:40	902.5	4/5	SF 10 BW 125	370.7		app eui: 70 B3 D5 7E D0 02 9DC7 dev eui: DFDFDFDFDFDFDF
20:30:03	902.5	4/5	SF 10 BW 125	370.7		app eui: 70 B3 D5 7E D0 02 9DC7 dev eui: DFDFDFDFDFDFDF
20:29:31	903.1	4/5	SF 10 BW 125	370.7		app eui: 70 B3 D5 7E D0 02 9DC7 dev eui: DFDFDFDFDFDFDF
20:29:26	903.1	4/5	SF 10 BW 125	370.7		app eui: 70 B3 D5 7E D0 02 9DC7 dev eui: DFDFDFDFDFDFDF
20:28:54	902.9	4/5	SF 10 BW 125	370.7		app eui: 70 B3 D5 7E D0 02 9DC7 dev eui: DFDFDFDFDFDFDF
20:28:49	902.9	4/5	SF 10 BW 125	370.7		app eui: 70 B3 D5 7E D0 02 9DC7 dev eui: DFDFDFDFDFDFDF
20:28:17	903.3	4/5	SF 10 BW 125	370.7		app eui: 70 B3 D5 7E D0 02 9DC7 dev eui: DFDFDFDFDFDFDF
20:28:12	903.3	4/5	SF 10 BW 125	370.7		app eui: 70 B3 D5 7E D0 02 9DC7 dev eui: DFDFDFDFDFDFDF
20:27:40	903.3	4/5	SF 10 BW 125	370.7		app eui: 70 B3 D5 7E D0 02 9DC7 dev eui: DFDFDFDFDFDFDF
20:27:35	903.3	4/5	SF 10 BW 125	370.7		app eui: 70 B3 D5 7E D0 02 9DC7 dev eui: DFDFDFDFDFDFDF
20:25:48	923.9	4/5	SF 10 BW 500	82.4		

Figura 19: The Things Network (Datos del Gateway)

Fuente: Elaboración Propia