



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**DESARROLLO DE PROTOTIPO DE RED LORA
PARA TELEMETRÍA**

Autor

Saider Antonio Lagares Ballesta

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Departamento de electrónica

Medellin, Colombia

2019



Tabla de contenido

1. Aviso de confidencialidad
2. Resumen
3. Introducción
4. Objetivos
 - 4.1. Objetivo general
 - 4.2. Objetivos específicos
5. Marco teórico
 - 5.1. Modulación de espectro expandido
 - 5.2. Técnica de ensanchamiento Chirp
 - 5.3. Modulación LoRa
 - 5.4. Definiciones generales
 - 5.5. Parámetros de configuración para LoRa
 - 5.6. Análisis modulación LoRa
6. Metodología
7. Resultados y análisis
 - 7.1. Vigilancia tecnológica y selección de equipos
 - 7.2. Estudio preliminar de mercado
 - 7.3. Alcance inicial del proyecto
 - 7.4. Planos de montaje
 - 7.5. Desarrollo de Firmware
 - 7.6. Pruebas y montajes iniciales
 - 7.7. Pruebas con variación de parámetros
 - 7.8. Pruebas específicas
 - 7.9. Fiabilidad de los datos
 - 7.10. Costos de ampliación
8. Conclusiones
9. Bibliografía
10. Anexos



1. Aviso de confidencialidad

Por políticas de confidencialidad y protección de datos de la empresa RPM Ingenieros S.A.S en este informe no se incluyen datos explícitos y/o desarrollos intelectuales propiedad de la misma.

2. Resumen

Este documento recopila información contextual acerca de la tecnología de acceso de baja potencia LoRaWAN, que permite entender sus fundamentos, parámetros y consideraciones relevantes, necesarias a la hora de hacer implementaciones prácticas, basadas en esta tecnología de transmisión. Este trabajo sugiere topologías de montaje para optimizar los enlaces, esto encaminado a la instalación en áreas abiertas y ambientes confinados. Se llevó a cabo un breve estudio de la necesidad de comunicación inalámbrica de este tipo en la industria, para dar por sentada la pertinencia de los estudios y desarrollos sobre esta plataforma. Se sugieren prototipos de nodos y consideraciones de montaje de estos; también se incluyen resultados de pruebas genéricas de transmisiones, estas fueron realizadas en el departamento de Antioquia, Colombia; orientadas a seleccionar la mejor configuración en Software y Hardware para lograr el óptimo funcionamiento de una red de telemetría a gran escala. Finalmente se incluyen resultados de pruebas específicas, que serán la base para desarrollos comerciales de mayor complejidad y alcance.

3. Introducción

RPM Ingenieros S.A.S es una empresa dedicada al diagnóstico y reparación de equipos electrónicos del área industrial, además proporciona soluciones electrónicas para sus clientes; muchas de estas implican sistemas de comunicación de largo alcance en entornos ruidosos, por lo que es de gran importancia para la compañía llevar a cabo investigación e inversión para innovar en lo concerniente a redes de baja potencia y largo alcance. Es de particular interés el protocolo de red LoRaWAN por ser de código abierto y operar bajo frecuencias libres (ISM). LoRaWAN es un protocolo de acceso de redes, que emplean modulación LoRa para transmisión de datos [1]. Este protocolo fue diseñado con fines militares y posteriormente se empezó a emplear en IoT, por tanto, cumple con muchos de los requerimientos básicos para una red de telemetría de largo alcance, como son: bajo consumo energético de los nodos y amplios rangos de cobertura de los Gateway.

Se llevará a cabo el montaje de un prototipo básico, donde se probará el funcionamiento del Gateway, de los nodos estáticos y de los nodos móviles; que permitirá determinar la capacidad máxima, en un entorno real, para la captura y envío de datos a un servidor, donde puedan ser procesados y distribuidos a sistemas

de monitoreo o a usuarios finales. Los resultados de estas pruebas preliminares se analizarán con el fin de determinar los aspectos importantes al llevar el modelo a una escala de mayor cobertura. Es de especial interés para RPM Ingenieros S.A.S. los costos de montaje, la escalabilidad del sistema, la estabilidad de transmisión y la seguridad de red.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general:

Desarrollar un prototipo de red LoRaWAN para determinar los requerimientos y viabilidad del montaje de una red para telemetría en el área metropolitana de Medellín.

4.2. Objetivos específicos:

- ❖ Realizar una vigilancia tecnológica acerca del protocolo LoRaWAN para seleccionar los dispositivos a emplear en el montaje de red.
- ❖ Diseñar un prototipo de red según los alcances que requiere la empresa.
- ❖ Implementar el prototipo y hacer las calibraciones y ajustes necesarios.
- ❖ Evaluar el desempeño de la red con respecto a un conjunto de métricas comunes en este tipo de red y determinar los costos de montaje y mantenimiento del prototipo de red.

5. Marco Teórico

5.1. Modulación de espectro expandido

Estas modulaciones (Spread Spectrum, SS) fueron desarrolladas durante la segunda guerra mundial (1939-1945), en respuesta a las necesidades de sistemas de comunicación inalámbricos de largo alcance, fuertes ante el ruido, y complejos de interceptar. Por la tecnología de la época eran costosas y voluminosas, gracias a los avances en la fabricación de circuitos integrados y procesamiento digital de señales se han reducido costos y tamaño, por lo que muchas compañías las han adoptado en las últimas décadas [2].

5.2. Técnica de ensanchamiento Chirp

Se emplea para lograr una modulación de espectro expandido (Chirp spread Spectrum, CSS). En esta se transmiten pulsos con un periodo fijo, en cada pulso se modula la frecuencia de la portadora, haciendo que esta se ensanche en función de la moduladora, este ensanchamiento en frecuencia está determinado por un patrón de ensanchado, generalmente lineal con pendiente negativa o positiva [3].

5.3. Modulación LoRa

LoRa (Long Range Modulation) es un tipo de modulación digital de espectro expandido basada en el método Chirp; la comunicación se da mediante la transmisión de "paquetes" llamados chips, presenta especial interés para IoT por sus prestaciones en cuanto a consumo de potencia, alcance, fortaleza ante el ruido y bajo costo. Las patentes de LoRa fueron adquiridas por Semtech Corporation en 2012, quien sería cofundador de la LoRa Alliance en 2015, este último es quien define actualmente los estándares de funcionamiento, producción de dispositivos embebidos y requerimientos para usar algunos servidores WEB. Según el área del planeta donde se use, se definen frecuencias de transmisión y demás regulaciones legales internacionales. Para América las bandas de frecuencia están entre 902-928 MHz [4] [5].

5.4. Definiciones generales

Se requiere conocer cierta terminología y definiciones previas para entender correctamente los parámetros de configuración y el análisis de variables de esta modulación, para ello se definen dichos conceptos a continuación.

Chip: Es la unidad básica de datos en una modulación del tipo CSS, es diferente a un bit o símbolo ya que se requieren varios chips para representar alguno de estos dos [6].

Chirp: Al igual que en QPSK o BPSK y otras modulaciones digitales que emplean señales sinusoidales para representar los símbolos, en las modulaciones CSS se usan segmentos de barridos en frecuencia lineales de subida o bajada para representar dichos símbolos [7].

Símbolo: Un símbolo es la representación de uno o más bits en una transmisión digital.

Bit: Es la unidad de información más pequeña en el ámbito digital, solo puede tomar el valor de 1 o 0, alto o bajo.

Valores por defecto: Todos los parámetros de configuración de los transceiver LoRa se pueden definir explícitamente, de no ser así, son llevados a un valor por defecto por el constructor de la clase "LoRaClass", definida en las librerías distribuidas por el MIT para LoRa [8].

Nodo: En este documento se considera nodo a un módulo que es capaz de transmitir y recibir información del Gateway, es un dispositivo final de comunicación, no retransmitirá los datos que reciba del Gateway.

5.5. Parámetros de configuración para LoRa

Los transceiver LoRa solo permiten gestionar la capa física de la comunicación, para lo cual no son autónomos y deben ser configurados mediante un microcontrolador; en un firmware se pueden definir valores estáticos o dinámicos para los siguientes parámetros relevantes.

Spreading Factor (SF): Define la cantidad de chips que se emplearán para representar un símbolo y la cantidad de bits que este contiene, es decir, cada símbolo requerirá N chips y estará compuesto por SF bits. SF impacta directamente sobre varias características de la comunicación, por cada aumento de una unidad en SF se requiere cerca de 2.5dB menos de ganancia en el receptor, se duplica el tiempo requerido para transmisión, aumenta el consumo de potencia en el transmisor y receptor, la inmunidad al ruido aumenta y la relación señal a ruido (SNR) mejora. SF puede tomar valores enteros de 6-12, el valor por defecto es 7 [9].

La expresión 1 representa la cantidad de chips requeridos para representar un símbolo.

$$N = 2^{SF} \quad (1)$$

La expresión 3 permite concluir que un símbolo está compuesto por 1 o más bits y estos a su vez están representados por 1 o más chips, como se mencionó al principio [7].

Bandwidth (Ancho de Banda): Permite escoger los límites en los que puede variar el barrido en frecuencia, alrededor de la frecuencia central de transmisión, al igual que en otras modulaciones, al aumentar el BW (Ancho de banda) se reduce el tiempo de símbolo por lo que aumenta la velocidad de transmisión, sin embargo, al aumentar el BW también aumenta el consumo de potencia. El BW puede tomar los siguientes valores discretos: 7.8, 10.4, 15.6, 20.8, 31.25, 41.7, 62.5, 125, 250 y 500, unidades en KHz, estos valores son estándares, pero varía la cantidad de los mismos que pueda manejar un transceiver según el fabricante [10] [11].

Coding Rate (CR): Este parámetro está relacionado con el proceso de corrección de errores en el receptor, mediante FEC (Forward error correction), de la cantidad de bits definida por SF para ser transmitidos en cada símbolo, CR controla que porcentaje de dichos bits será transmitido para datos (payload) y para corrección de errores. Aumentar CR implica una reducción en la tasa de transferencia, mayor consumo de potencia, mayor inmunidad al ruido y a la congestión en el canal. CR puede tomar los valores enteros 1-4 para cálculos teóricos, y de 5-8 para configuración por Firmware [10].

A partir de las definiciones anteriores es posible plantear las expresiones para el cálculo de las tasas de bit, símbolo y chip, que se emplearán más adelante para el análisis de las variables de interés

$$R_b = SF \cdot \frac{4 \cdot BW}{2^{SF}(4+CR)} \quad R_s = \frac{BW}{2^{SF}} \quad R_c = \frac{R_b}{SF} \cdot 2^{SF} \quad (2)$$

Si hacemos tender a cero SF se puede demostrar que

$$R_c > R_b > R_s \quad (3)$$

Preamble Length (PL): Este parámetro establece la cantidad de símbolos (este símbolo es un barrido completo en frecuencia), que se enviarán al principio de una transmisión, para indicar al receptor que inicia un tren de datos coherente, además de los CR símbolos al inicio, esta preestablecido que se enviarán 2 barridos adicionales y otros 2.4 barridos invertidos, este parámetro puede tomar los valores enteros 6-65535 siendo 8 el valor por defecto.

CRC (cyclic redundancy check): Este parámetro toma valor true o false, se emplea para habilitar la verificación de errores por chequeo de redundancia cíclica en el receptor.

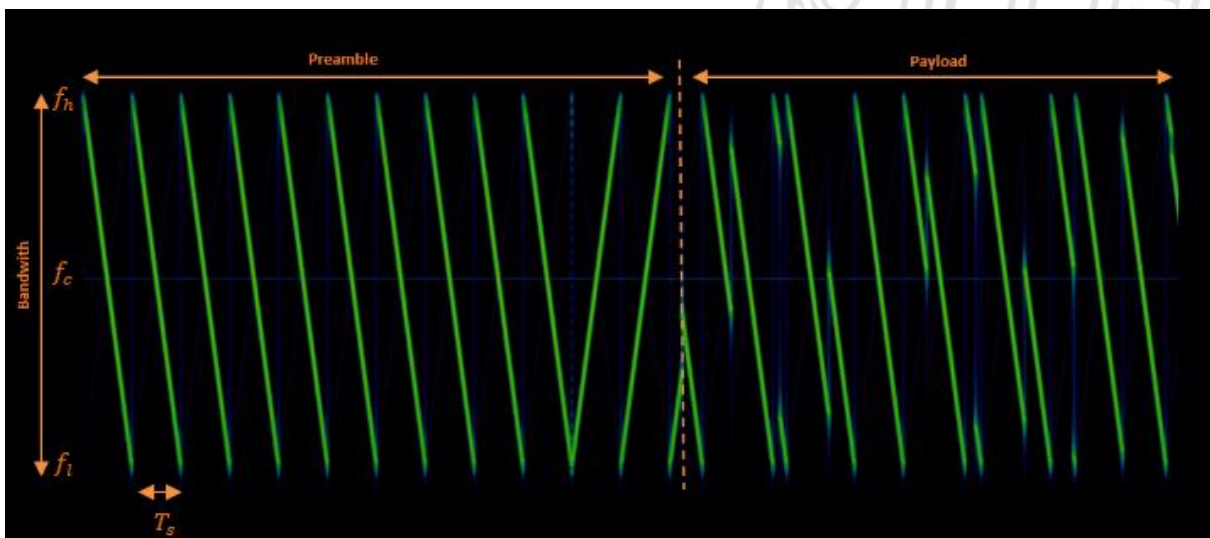


Figura 1. Espectrograma LoRa

La figura 1 muestra un espectrograma del inicio de una transmisión modulada con LoRa, donde se muestran las características de estructura del mensaje, tiempo de símbolo y ancho de banda.

5.6. Análisis modulación LoRa

Para analizar el desempeño de la comunicación, empleando este tipo de modulación, nos interesa medir y/o calcular el valor de las siguientes variables:

Time on Air (ToA): Es el tiempo que tarda todo el mensaje (desde el primer símbolo hasta el último) en alcanzar la antena del receptor, desde que sale de la antena del transmisor, un mayor ToA implica mayor consumo de potencia. ToA está relacionado con muchos parámetros de configuración de LoRa, como lo muestra la expresión 5.

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload} \quad (4)$$

$$T_{packet} = [(n_{preamble} + 4.25)T_s] + \left[8 + \max \left(\text{ceil} \left(\frac{8PL - 4SF + 28 + 16 - 20H}{4(SF - 2DE)} \right) (CR + 4), 0 \right) \right] \quad (5)$$

Las funciones "max(a,b)" toman el valor máximo de los parámetro para evitar valores negativos y "ceil(a)" toma el máximo valor entero de la variable. Por otra parte, las variables adicionales son:

PL: número de bits del mensaje útil (payload).

DE: Toma el valor de 1, si la optimización de baja velocidad de datos está activada, aplica para BW mayores a 125KHz. De lo contrario es 0

H: Si se especifica un encabezado acerca del contenido útil de la transmisión, H tomara el valor 0.

RSSI (Received Signal Strength Indicator): El indicador de intensidad de señal recibida es una medida estimada de que tan bien puede detectar el receptor una señal entrante, este indicador no da fe de lo bien que estén los datos para demodular, solo indica que se está capturando con mayor o menos fiabilidad una señal reconocible, para LoRa el rango aproximado están entre -30dBm a -120dBm, y se considera que mientras mayor sea este valor (más cercano a -30dBm) mejor será la intensidad de la señal [12].

SNR (Signal to Noise Ratio): La relación señal a ruido es la relación entre la potencia de la señal de entrada y la potencia de ruido del canal, los valores mínimos para establecer comunicación bajo modulación LoRa están entre -7.5 y -20 mientras más alejado de este rango este la SNR de una transmisión más probable es que se pierdan datos o se requiera retransmisión.

5.7. Clases de nodos LoRa

En las estructuras de red LoRa se definen tres modos de operación básica de un nodo, según el consumo de potencia, la latencia de comunicación y el nivel de control que se requiera sobre el nodo. Las clases o modos de operación definen la forma en que un nodo llevara a cabo el proceso de comunicación con el Gateway.

Nodo clase A: Este se caracteriza por tener el menor consumo de potencia, es especial para nodos que operan con baterías, la comunicación está controlada en su totalidad por el nodo. El nodo permanece en standby hasta que él requiera

transmitir a la puerta de enlace, solo entonces el Gateway podrá transmitir hacia el nodo, ya que este estará en modo de escucha durante una ventana de tiempo.

Nodo clase B: Este tipo de configuración le permite al nodo operar como uno clase A, pero adicional a esto el Gateway se sincronizará con él para solicitar información o dar instrucciones cada cierto tiempo, por tanto el nodo debe abrir ventanas de escucha continuamente, lo que genera un consumo medio de potencia, se emplea en procesos de media prioridad o que requieran monitoreo en horarios definidos.

Nodos clase C: Este último modo de operación requiere que el nodo este escuchando todo el tiempo, solo detiene la recepción cuando está transmitiendo, por obvias razones este es el modo que requiere mayor potencia, se emplea para procesos muy rápidos o con prioridad alta [13].

5.8. Zonas de Fresnel

En comunicaciones por radiofrecuencia, tener clara línea de vista entre los terminales Tx y Rx no asegura un enlace de buena calidad, es decir, las señales no alcanzarán al receptor en las mejores condiciones. Esto se debe al hecho de que una antena, ya sea parabólica u omnidireccional, no dirige toda la intensidad de señal en línea recta hacia el mismo punto, en cambio se distribuye la onda en línea recta en muchas direcciones, de forma que cuando alguna de estas choca con un obstáculo y se refleja, alcanzará al receptor con un retardo y un desfase adicional, comparada con una onda que viaja en línea recta hacia el receptor. Esta situación genera interferencia destructiva o constructiva en la onda que capta el receptor según la zona de Fresnel donde se dé la reflexión.

Fresnel definió las zonas en las que los efectos de la interferencia, mencionada previamente, hacen que el receptor capte la mejor intensidad de onda posible, estas zonas son elipsoides alargados, ver figura 2.

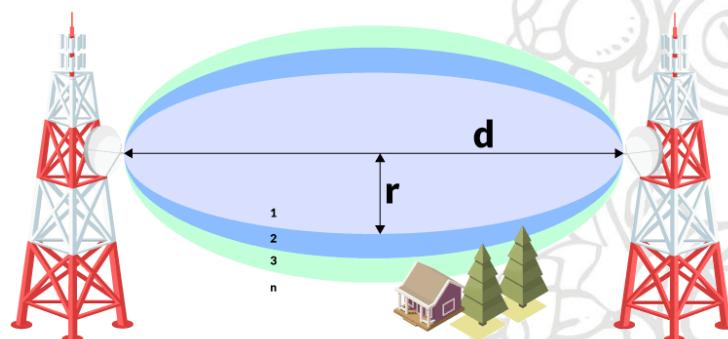


Figura 2. Zonas de Fresnel

Para nosotros es de especial importancia el cálculo de r , ver figura 2, dado que este será el valor aproximado de la altura de nuestras antenas.

$$r_1 = 8,657 \sqrt{c \cdot d / f} \quad (6)$$

Donde

r_1 : radio de la primera zona de Fresnel [m]

d : distancia entre las antenas [Km]

f : frecuencia de transmisión [GHz]

c : porcentaje de zona clara

El porcentaje de zona clara es la parte de la primera zona de Fresnel que no está bloqueada por obstáculos o la tierra. Se considera que si este valor es mínimo de 60% se tendrá un enlace aceptable.

Se deben considerar los efectos de la curvatura de la tierra, para ello se calcula la tolerancia o altura de la curvatura de la tierra H , esta debe ser sumada al valor de r , para tener un mejor aproximado de la altura de la antena, la expresión (7) permite obtener el valor de H .

$$H = R - \left(R \cdot \cos \left(d \cdot \frac{360}{2\pi R} \right) \right) \quad (7)$$

Donde

R : radio de la tierra 6371 [Km]

d[Km]	C=100%, f=0.915MHz			C=60%, f=0.915MHz		
	H[m]	r[m]	r+H[m]	H[m]	r[m]	r+H[m]
0.5	0.0001	6.40	6.40	0.0001	4.96	4.96
1	0.0003	9.05	9.05	0.0003	7.01	7.01
3	0.0023	15.68	15.68	0.0023	12.14	12.14
5	0.0064	20.24	20.24	0.0064	15.68	15.68
10	0.0257	28.62	28.64	0.0257	22.17	22.19

Tabla 1. Altura aproximada de la antena

La tabla 1 relaciona varios cálculos de alturas de antenas. Es de notar que si reducimos la exigencia de línea de vista al mínimo (60%), se requiere menos altura para lograr un enlace estable.

6. Metodología

Se seguirá una metodología basada en actividades dirigidas a alcanzar cada objetivo de la siguiente manera:

Objetivo 1:

- Seleccionar los fabricantes de tarjetas de desarrollo.
- Investigar soporte de software y compatibilidad de equipos
- Adquirir tarjetas de desarrollo, sensores y herramientas.

Objetivo 2:

- Analizar posibles mercados donde incursionar con el proyecto.
- Definir los alcances del proyecto a nivel estructural y de software.
- Estudiar zonas donde se pueda realizar el montaje de red.
- Diseñar el diagrama de montaje según geografía y ruido ambiental.
- Diseñar primeras versiones de software.

Objetivo 3:

- Montar los Gateway y ensamblar nodos.
- Actualizar y depurar software.
- Calibrar sensores
- Ajustar potencia de los nodos y sensibilidad de los Gateway.

Objetivo 4:

- Hacer pruebas de distancia de enlace.
- Evaluar máximas tasas de transferencia.
- Probar seguridad y fiabilidad en los datos transmitidos.
- Determinar costos de prototipo y costos de escalabilidad.

En las etapas iniciales se llevó a cabo un estudio acerca de las plataformas de desarrollo dedicadas a telemetría que emplean modulación LoRa, esto con el fin de seleccionar tarjetas de desarrollo estables y comerciales en la actualidad, seguido a esto se procedió a adquirir dicho equipo, además de herramientas para monitoreo de red con proveedores nacionales o internacionales.

En la siguiente etapa se investigaron y discutieron posibles mercados o enfoques adicionales a abordar con los desarrollos que se lograron. Se definió el alcance del proyecto y basados en esto se dio inicio al proceso de diseño estructural y de software. Finalmente se analizaron factores de ruido electromagnético, climático y geográfico para determinar el lugar de montaje.

El proceso de montaje y ajuste de equipos se realizó en paralelo con el desarrollo de software, con el fin de hacer pruebas de funcionamiento todo el tiempo y lograr un

ajuste perfecto entre las dos partes. Fue necesario calibrar los sensores y ajustar las potencias de trabajo antes de pasar al proceso de captura y manipulación de datos.

Después de tener una infraestructura estable, se procedió a la recopilación de datos y medidas, esta información permitió evaluar el rendimiento del prototipo y es el punto de partida para iniciar el diseño de cualquier proceso de ampliación del proyecto.


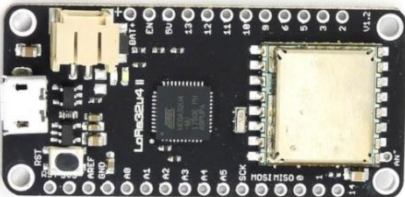
Por último, se debió organizar la información adquirida para completar el manual, informes de costos, entre otros; estos conforman documentación de especial importancia para la empresa RPM Ingenieros S.A.S.

7. Resultados y análisis

En este Informe se describen los resultados y el análisis en orden cronológico, dado que hubo eventos que se dieron al mismo tiempo, las secciones describen una o varias tareas definidas en la metodología.

7.1. Vigilancia tecnológica y selección de equipos

Inicialmente se hizo una búsqueda de proveedores y fabricantes de equipos para comunicación LoRa, se tuvo en cuenta costo del equipo, costo de importación, prestaciones, soporte de software, compatibilidad con otras plataformas.

Dispositivos físicos	Características principales
	<p>RAK5205 (Shenzhen Rakwireless Technology Co) STM32L1 microcontroller Transceiver chip SX1276 GPS, Bosch BME680 Sensor, LIS3DH 3-axis Accelerometer Dim.: 60mm x 30mm Precio: \$49.50 USD</p>
	<p>LoRa32u4 II (BSFrance) ATmega32u4 microcontroller Transceiver chip SX1276 Dim.: 51mm x 23mm Precio: \$14,48 USD</p>

	<p>WiFi LoRa 32 (Heltec Automation) ESP32 microcontroller Transceiver chip SX1276 Wi-Fi, Bluetooth Dim.: 50.2mm x 25.5mm Precio: \$18.80 USD</p>
	<p>Dragino LG02 (Dragino Technology Co) OpenWrt OS(Linux project) ATmega328P microcontroller Transceiver chip SX1276 x2 USB, LAN, WiFi, 3G or 4G Precio: \$ 109.99 USD</p>
	<p>Antena LoRa Dim.: 165mm completo Frecuencia: 915 MHz Impedancia:50 Ohm Ganancia: 3 dBi Precio: \$10.99 USD</p>
	<p>HT-M02 (Heltec Automation) 4.14 Kernel, Debian Stretch 9.8 Cortex-A8 32-Bit Transceiver chip SX1301 LAN (RJ45 IP67 waterproofing) Precio: \$499.00 USD</p>
	<p>RAK7258 (Shenzhen Rakwireless Technology Co) OpenWrt OS (Linux project) LAN, WiFi Precio: \$149 USD</p>
	<p>Batería Litio-Polímero 3.7V 500mAh Distribuidor Local Precio: \$4.21 USD</p>

Tabla 2. Investigación Módulos y Equipos LoRa

En la investigación acerca de todos estos fabricantes se encontró que los equipos de la empresa Shenzhen Rakwireless Technology Co, no poseen un soporte de software

y hardware estable, por ejemplo, algunos módulos de programación esenciales para hacer desarrollo están discontinuados, aun así, se siguen distribuyendo el resto de los módulos dependientes de estos. Adicionalmente, no son ampliamente usados sus transceivers, por lo cual en la web no se encuentra mucha información de solución de fallos, pruebas en campo o mejoras para los mismos. A pesar de desarrollar bajo plataformas como STMicroelectronics y operar bajo sistemas Linux, no generan suficiente confianza para trabajar a largo plazo, ya que son poco conocidos, costosos y parecen no tener soporte a largo plazo.

Por otro lado, la empresa BSFrance distribuye módulos básicos, constan de un microcontrolador y el transceiver LoRa. Desarrollan sus módulos bajo microcontroladores de STMicroelectronics y Microchip Technology, operan bajo librerías del MIT sin modificaciones, sus módulos presentan fallas bien conocidas, sobre todo los basados en componentes de Microchip Technology, son ampliamente usados, de bajo costo y con buen soporte de software al operar bajo librerías de Arduino. Por las características mencionadas se decide adquirir estos módulos, en particular el relacionado en la tabla 2, como LoRa32u4 II.

Finalmente se analizó la propuesta de la empresa Heltec Automation, este opera con microcontroladores del Fabricante Espressif Systems, plataforma de desarrollo Arduino y librerías del MIT sin modificar. Sus módulos son ampliamente usados, presentan problemas conocidos de rendimiento, además son muy versátiles por incluir muchas características como conexión WI-Fi, displays y otras en un solo dispositivo. Su soporte de hardware y software es bueno. Se decide adquirir equipos de esta compañía por sus prestaciones, bajo costo y facilidad para el desarrollo de software.

Se decide no adquirir ningún Gateway por su elevado costo y ya que su operación está basada en los mismos transceivers de los módulos simples, por lo cual al evaluar el desempeño de estos se tendrá un aproximado del funcionamiento y alcance de un Gateway, esto permitirá seleccionar uno a la medida de las necesidades.

Todos los módulos por adquirir, operan con el transceiver LoRa SX1276 a una frecuencia de 915MHz.

Los costos de adquisición de los equipos, Módulos y dispositivos requeridos se relacionan en la tabla 3, todos los costos en USD.

Equipo	Costo	Unid.	Total	Impuestos	Envió	Total
WiFi LoRa 32	18.8	3	56.4	19.74	10	86.14
LoRa32u4 II	14.48	2	28.96	10.13	10	49.096
Antena	10.99	5	54.95	19.23	10	84.1825
Batería	4.21	5	21.05	3.99	0	25.0495
Gran Total						244.468

Tabla 3. Costo de equipos adquiridos

7.2. Estudio preliminar de mercado

Una vez se llevó a cabo la compra de los módulos, se debía esperar la llegada de estos (entre 15 días y 4 meses), ya que la mayoría de los dispositivos se adquirieron con proveedores de la empresa por lo que requerían de importación desde Estados Unidos y China.

En el mencionado periodo de tiempo se procedió a hacer un sondeo en algunas empresas del sector de floricultura en Antioquia, de la industria de aceros en Antioquia, de la industria ganadera en Neiva y de la piscicultura también en Neiva, donde se solicitó a los encargados de áreas asociadas al monitoreo y control, manual o remoto, de variables de proceso en cada industria responder a las siguientes preguntas:

- ¿Dentro de sus labores esta monitorear o medir variables de procesos, temperatura, humedad, presión, etc.?
- ¿El monitoreo o medida de dicha variable es directa o remota?
- ¿De ser posible, podría indicar que variables debe medir y con qué frecuencia?
- ¿Cree usted que en su entorno de trabajo sea útil hacer todas las medidas mencionadas de forma inalámbrica?
- ¿Dentro de sus labores esta controlar dispositivos o mecanismos que afectan los procesos, válvulas, aspersores, motores, etc.?
- ¿El control de estos dispositivos o mecanismos se hace de forma directa o remota?
- ¿De ser posible, podría indicar que mecanismo debe controlar y con qué frecuencia?
- ¿Cree usted que en su entorno de trabajo sea útil hacer todas las activaciones o controles mencionados de forma inalámbrica?

Gracias a esta breve encuesta se pudo obtener la siguiente información estadística inicial. Alrededor del 70% de los funcionarios de estas empresas coinciden en que variables como la humedad, temperatura, nivel, por ser de variación lenta, se pierden de vista en el tiempo lo que genera accidentes a menudo. La presión por variar tan

rápido genera problemas a la hora de tomar acciones para estabilizar los procesos, cuando estos son controlados por operarios, entonces se debe tener una visualización clara de estas variables. A esto se suma la dificultad, en algunos casos, de acceder al sitio de medida, ya que los sensores deben estar ubicados en lugares estratégicos. En cuanto al control de mecanismos, cerca del 60% de los trabajadores afirma que sería bueno hacerlo de forma inalámbrica, sin embargo, la forma tradicional no resulta riesgosa para el proceso o el operario, por tanto, no es de vital importancia hacer tal mejora.

Pocos de los encuestados, manifestaron que el operario debía recorrer un gran trayecto para llevar a cabo la puesta en funcionamiento de los mecanismos, por ende, era de gran interés el poder hacer estas activaciones de forma remota. Otro pequeño grupo de encuestados afirma que era vital ubicar múltiples sensores en plataformas móviles a gran altura y descargar todo a una base de datos estática, segura ante fraude y desconectada de la red de Internet.

Por otro lado, cerca del 20% de los funcionarios afirman que se requieren las mejoras, pero sus empresas no estarían interesadas en llevarlas a cabo en este momento.

Por último, cerca del 10% afirma que en su empresa todas las actividades en cuestión están automatizadas.

De esta forma se concluyó que este tipo de tecnología representa una potencial fuente de ingresos, ya que un gran porcentaje de las empresas colombianas tienen necesidades asociadas a comunicación inalámbrica donde se podría incursionar. Ver copia del formato original en el anexo 1.

7.3. Alcance inicial del proyecto

Con la información obtenida en la encuesta, que brindaba una idea de lo que se requiere en la industria, se plantean los alcances preliminares del proyecto de cara a iniciar las pruebas que se describen más adelante.

- A nivel estructural se debe lograr comunicación estable a una distancia mínima de 2Km.
- A nivel de software se requiere desarrollar mínimo un Firmware transmisor que permita verificar datos transmitidos y otro receptor, que permita validar la integridad de los datos recibidos.
- Adicionalmente se debe lograr comunicar los 2 módulos de distintos fabricantes.

7.4. Planos de montaje

Para desarrollar los primeros planos estructurales, se debió estudiar varios escenarios posibles para un montaje, dada la naturaleza del canal, se requiere que la ubicación geográfica de instalación de las antenas sea libre de obstáculos, en el mejor de los casos. Sin embargo, esto en la práctica no es posible, por lo general se presentan dos situaciones muy comunes que son montajes en áreas abiertas y montajes en áreas confinadas.

Se considera que el montaje se establecerá en un área abierta si la señal solo colisiona con el piso, con paredes, con árboles o vehículos. En estas situaciones se optará por ubicar el Gateway o concentrador en la parte más alta posible, para lograr un porcentaje de zona clara elevado; estas áreas no presentan limitaciones de distancia, por tanto, la antena se debe posicionar según los valores de $C=60\%$ definidos en la tabla 1, donde la máxima elevación requerida será de aproximadamente 20m. Ubicar la antena del concentrador a gran altura, permite ubicar las antenas de los nodos a alturas de 1m como mínimo, esto es importante porque facilita las tareas de mantenimiento, ya que estos terminales estarán funcionando con baterías, a diferencia del concentrador, que tendrá acceso a una fuente de voltaje asociada a la red pública.

Por las distancias en estas estructuras de red en áreas abiertas, los nodos estarán sujetos a funcionar con baterías y serán pocos, entonces deben operar configurados en clase A, con SF alto (12), CR medio (7) y BW alto (500KHz).

Por otro lado, las áreas cerradas se presentan dentro de un edificio, donde la señal chocará con múltiples muros estructurales (constituidos por hormigón y acero), motores, gabinetes y demás estructuras metálicas que presentan índices de reflexión altos ante ondas electromagnéticas. En estas áreas la ubicación del Gateway no requiere altura para lograr mayor porcentaje de zona clara, sino centralización para alcanzar todos los nodos, una estrategia para su ubicación es trazar líneas rectas desde el Gateway hasta cada nodo, como si se tratara de un enlace laser evitando la mayor cantidad de obstáculos con cada línea. Para este tipo estructuras de red las distancias son menores a 1Km y el número de nodos es grande, esto permite que los nodos operen con BW medio (125KHz), CR bajo (5) y SF cualquiera; se recomienda separar los nodos por grupos configurando cada grupo a SF distintos, esto fortalece la estructura de red ante el ruido e interferencia.

Los resultados de este informe pueden no ser útiles para enlaces donde estén involucrados grandes cuerpos de agua (extensión mayor a 100m), acceso a excavaciones y/o túneles; ya que en estos lugares se presentan índices de reflexión diferentes que pueden afectar mucho más las señales.

7.5. Desarrollo de Firmware

El desarrollo de software se llevó a cabo bajo la plataforma de Arduino, con ayuda de los programas Sublime tex3 y Notepad++ para la edición de código. Fue necesario acudir al soporte del fabricante para adquirir librerías, además adecuar el entorno de desarrollo de Arduino, mediante la instalación de librerías y drivers para las Board de desarrollo.

Además de las configuraciones básicas iniciales se estudió en foros, informes, videos, tutoriales y demás recursos web acerca de problemas, bugs, mejoras, y errores asociados a los módulos adquiridos, esto último dio resultado, sin embargo, se presentaron algunos fallos a los que esta investigación no dio solución, pero se pudieron corregir en la marcha del proyecto.

Luego de tener una configuración estable y algunos conocimientos acerca de los módulos, se procedió a probar ejemplos de firmware distribuidos por los fabricantes; dichas pruebas permitieron un acercamiento inicial al trabajo con los módulos, además se probaron varios tipos de antenas, resultando en que las antenas LoRa adquiridas específicamente para este proyecto eran las que mejor funcionaban.

Las primeras versiones de firmware estuvieron encaminadas a lograr enlaces entre todos los módulos (de todos los fabricantes) e identificar fallas, bugs o cambios al combinar distintos fabricantes y sensores, en este punto aún se mantenían las configuraciones por defecto de todos los parámetros a excepción de la frecuencia central de transmisión y el baud rate para la conexión con el computador.

7.6. Pruebas y montajes iniciales.

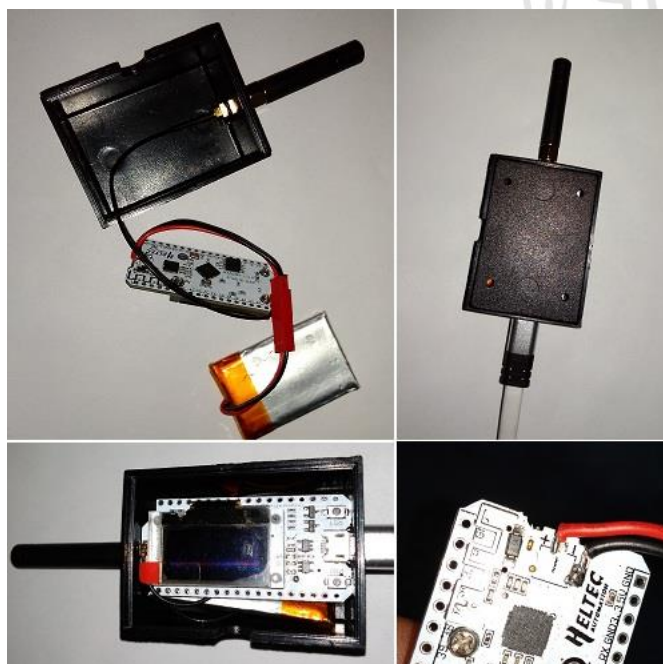


Figura 3. Nodo para exteriores terminado

Como se mencionó previamente no se adquirió ningún Gateway, en cambio se emplearon módulos convencionales para llevar a cabo enlaces punto a punto y determinar el rendimiento del transceiver, que es el mismo que se emplea en la mayoría de los Gateway

En este punto se llevó a cabo el ensamble de los nodos para operar de forma autónoma y a la intemperie, para ello se montaron las antenas en cajas plásticas, estas cajas contienen la board, baterías y cableado. También se intervinieron las board para retirar los conectores de baterías y poner extensiones para las mismas, esto para facilitar la extracción del módulo de la caja. Finalmente se soldaron cables a los puertos que se emplearían y se perforó la base de la caja para fijarla a los puntos de montaje, en la figura 3 se muestra uno de los módulos terminado.

Los módulos se ubicaron a varias alturas de entre 1.2m y 15m aproximadamente, los montajes se llevaron a cabo en zonas urbanas con y sin línea de vista para las pruebas de rendimiento en áreas abiertas y en edificios residenciales, para las pruebas de rendimiento en áreas cerradas.

7.7. Pruebas con variación de parámetros

Se hizo una última puesta a punto del firmware y se iniciaron las pruebas de barridos de parámetros, estas consistieron en mantener de forma explícita en código todos los parámetros en su valor por defecto y variar SF, CR o BW en todos sus rangos de valores.

En todos los casos se graficaron los valores de RSSI, SNR y Tiempo captados en el receptor, los datos para las gráficas de tiempo se tomaron de los tiempos de salida y entrada del dato registrados en cada computador, es decir, este tiempo no es exactamente ToA sino todo el tiempo que tarda el dato en ir de un transceiver al otro, pasando por el computador receptor.

En la leyenda de cada figura se especifica la variable graficada, y el número que sigue a esta es la distancia en metros entre las antenas para ese trazo en cuestión. Las distancias que se emplearon en estas pruebas fueron de 0.2m y 130m en áreas abiertas con y sin línea de vista respectivamente, 3.5m y 7m en áreas cerradas con y sin línea de vista respectivamente.

Primero se analizarán las gráficas de RSSI en los tres casos

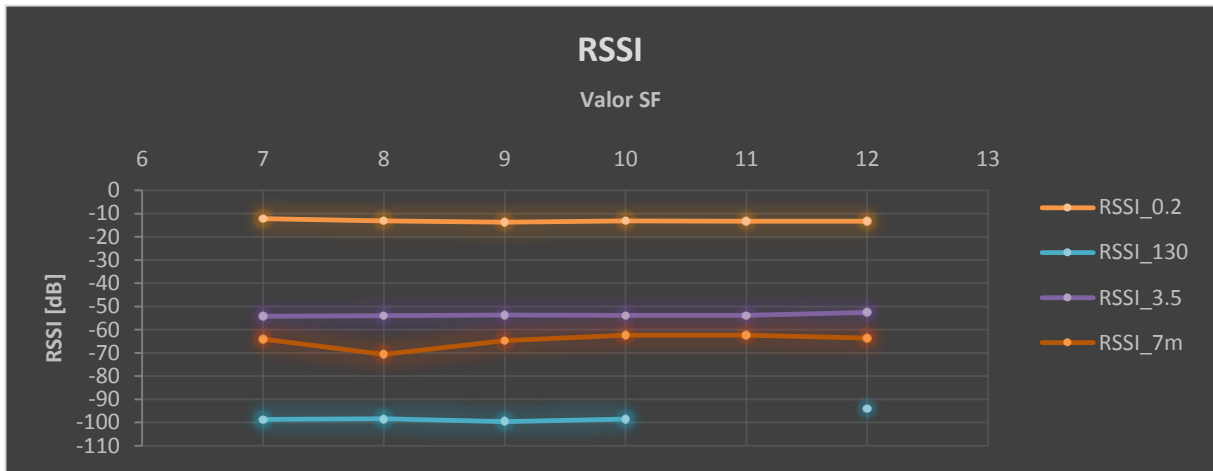


Figura 4. RSSI para barrido de SF

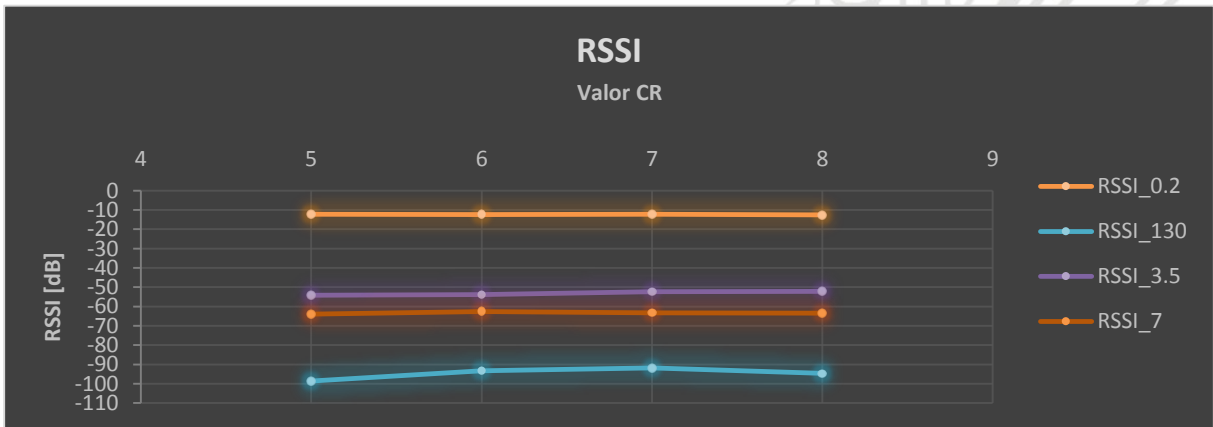


Figura 5. RSSI para barrido de CR

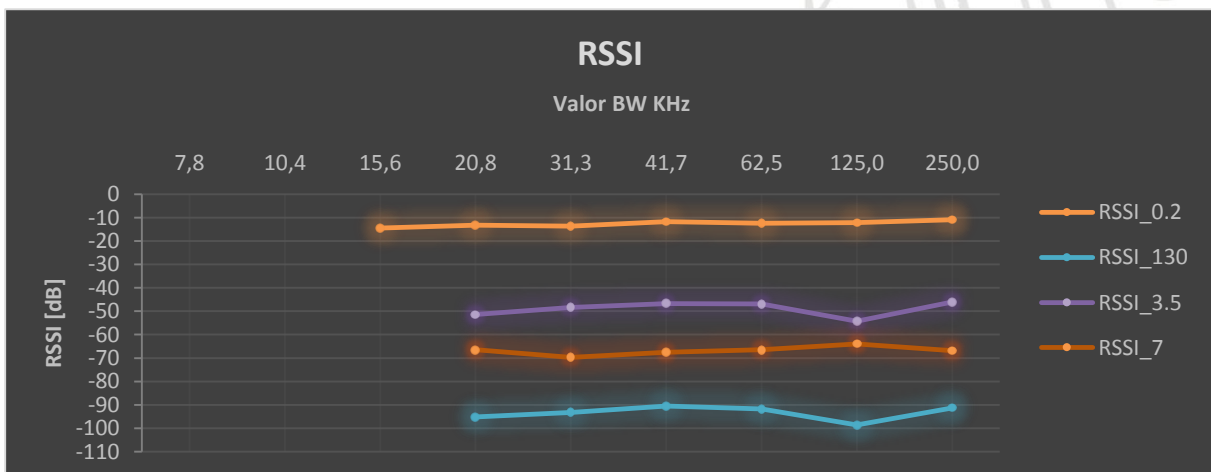


Figura 6. RSSI para barrido de BW

Como era de esperarse para esta variable, la intensidad de la señal no varía considerablemente al variar SF, CR. Solo es inversamente proporcional a la distancia y mejora un poco al aumentar BW.

Analicemos ahora las gráficas para SNR.

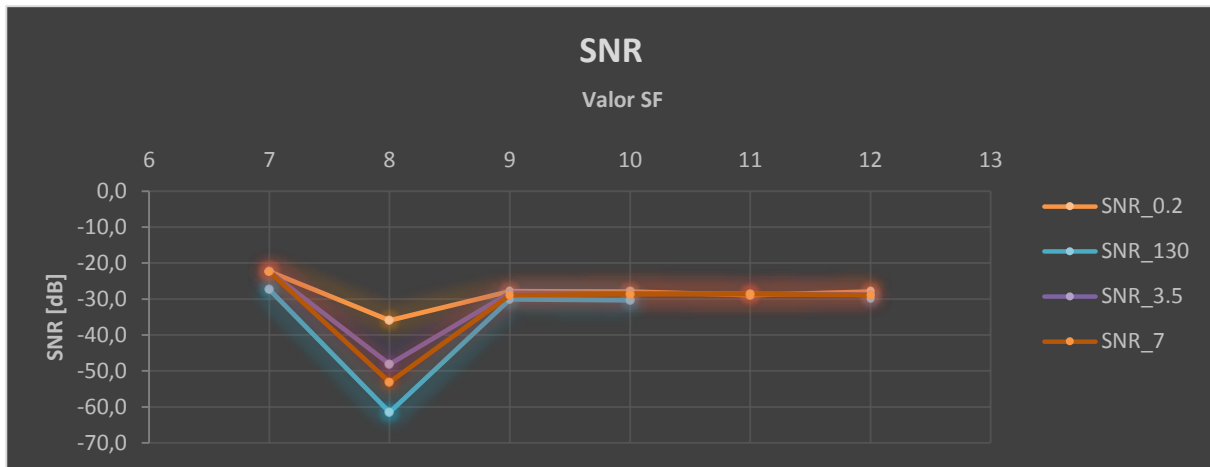


Figura 7. SNR para barrido de SF

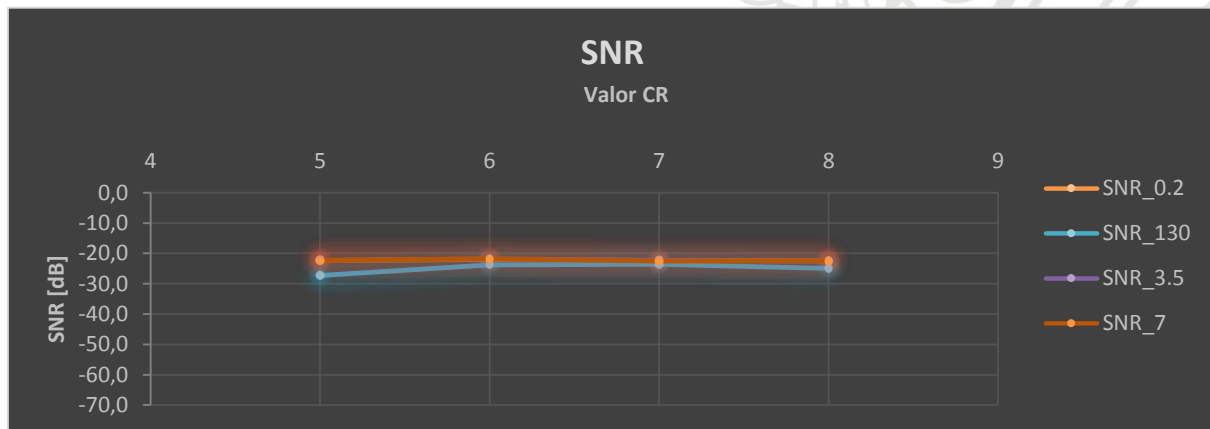


Figura 8. SNR para barrido de CR

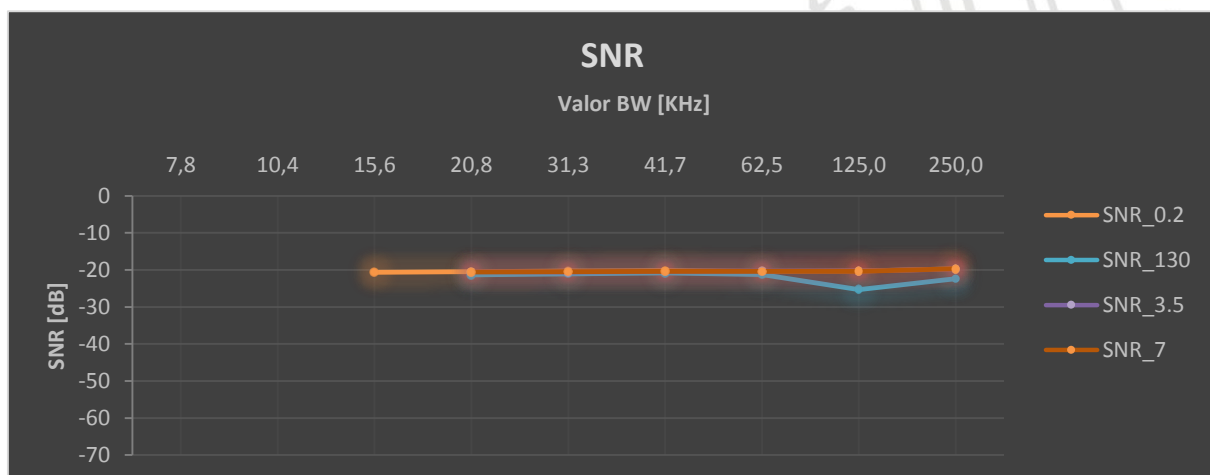


Figura 9. SNR para barrido de BW

Esta variable es afectada por todos los parámetros, el CR en 6 o 7 parece ser la mejor alternativa para enlaces largos. Se debe tener especial cuidado con los valores de SF según la distancia pues este afecta en gran medida la SNR, los mejores resultados

se obtuvieron con SF=12 y SF=7 para medias distancias, por último, al aumentar BW mejora la SNR pero no es demasiado.

Finalmente analicemos los tiempos de transmisión

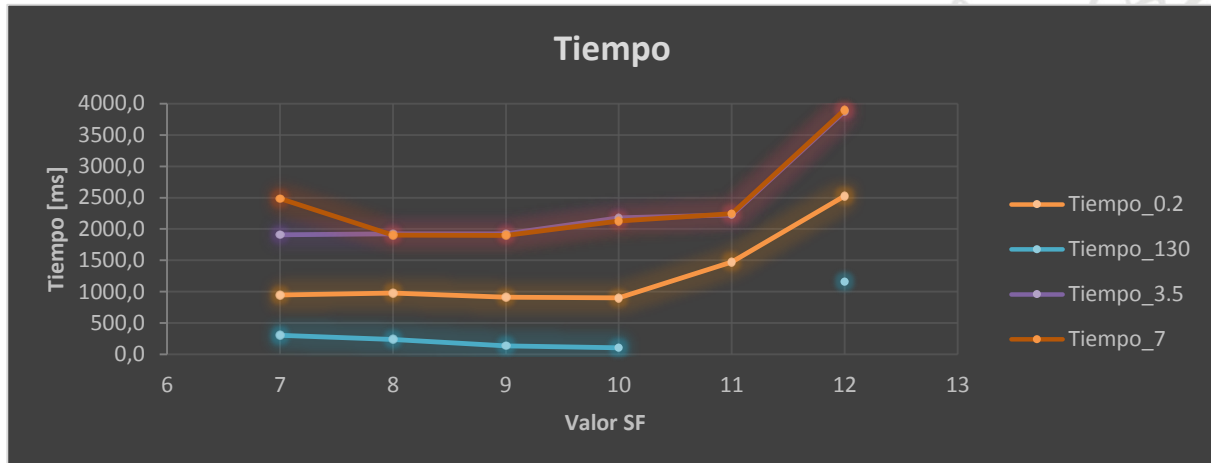


Figura 10. Tiempo para barrido de SF



Figura 11. Tiempo para barrido de CR

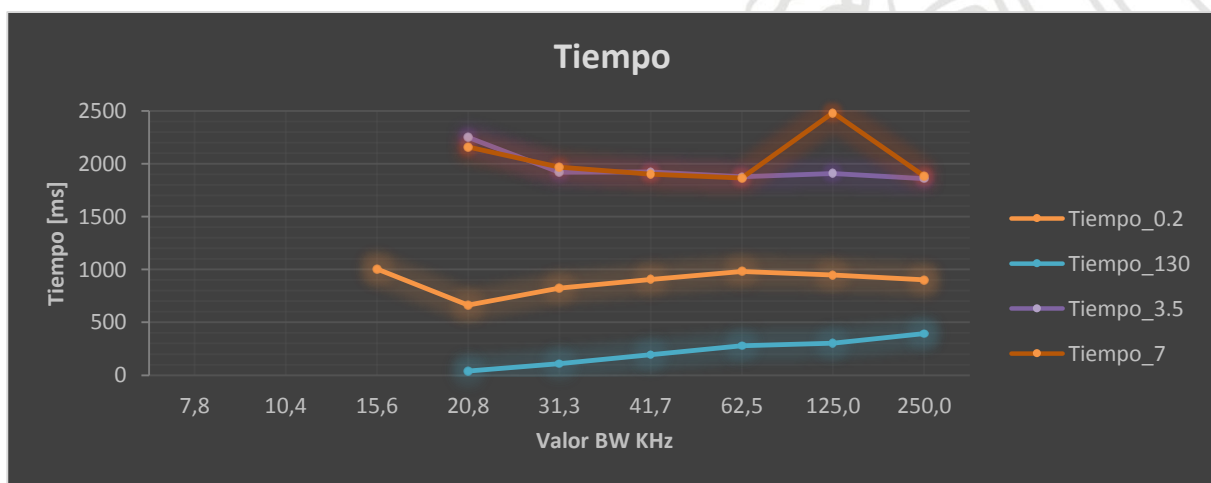


Figura 12. Tiempo para barrido de BW

En las gráficas de las figuras 10,11 y 12 es de notar que las transmisiones para 130m resultaron ser más rápidas que el resto de los casos, esto se debe a que en áreas confinadas hay más corrección de errores, además se dificultó la captura de la señal entrante por causa de la interferencia; en cuanto a la conexión a 0,2m se realizaron pruebas extra y se encontró que las conexiones a menos de 1.8m aproximadamente son estables pero lentas.

7.8. Pruebas específicas

Las pruebas de variación de parámetros permitieron sentar un precedente, con el cual estimar las mejores configuraciones para distintos entornos, entonces se procedió a hacer las pruebas de propósito específico, que se describen a continuación.

En todas las transmisiones se empleó CRC, la potencia fue de 18dB, el CR fue de 6, BW fue de 250MHz y SF fue de 12.

Prueba 1: Transmisión en sector urbano, línea de vista baja. Ruido ambiental de almacenes, antenas y vehículos.

Prueba 2: Transmisión en sector urbano sin línea de vista. Ruido ambiental de casas, antenas y vehículos.

Prueba 3: Transmisión en sector urbano, línea de vista baja. Ruido ambiental de casas, fabricas, antenas, edificios y vehículos.

Prueba 4: Transmisión en sector urbano, línea de vista media. Ruido ambiental de casas, antenas, edificios y vehículos.

Los resultados se relacionan en la tabla 4.

Prueba	d[m]	hTx[m]	hRx[m]	Ht[m]	zc[%]	RSSI[dB]	SNR[dB]	err[%]
1	2720	9.5	9	10.52	36.3	-114	-25.66	2
2	446	15	5	4.34	0	-105.3	-23.62	10
3	1150	6	3.5	6.86	13	-120.18	-35.59	20
4	650	1.2	1.5	5.16	4.2	-121.4	-33.02	10

Tabla 4. Resultado pruebas específicas

Donde se tienen los datos:

d: distancia aproximada entre antenas

hTx, hRx, ht: alturas aproximadas de antenas Tx, Rx y teórica respectivamente

zc: porcentaje aproximado de zona clara

err: porcentaje de error basado en 30 transmisiones

7.9. Fiabilidad de los datos

Si bien LoRa es una modulación fuerte ante el ruido, este sí la afecta en gran medida en transmisiones sin línea de vista. En las pruebas de variación de parámetros se presentaron fallos por pérdidas de datos, pero estas no se tuvieron en cuenta pues no era el objetivo principal del análisis. En general esta modulación tiene pocas pérdidas de datos, los módulos solo cuentan con corrección de errores por CRC, por lo cual es necesario desarrollar métodos más fuertes, como banderas para retransmisión. Otro detalle que pone en riesgo la fiabilidad de los datos, es que los módulos no son estables a largo plazo porque se saturan con el paso del tiempo, tal como las memorias de un computador, se van llenando de datos erróneos y generan un bloqueo del transceiver, resetearlos periódicamente fue la única solución.

Finalmente, si bien los datos están en una modulación supremamente compleja de interceptar, se deben emplear métodos de validación para enlaces punto a punto, como validación de direcciones de transmisión en el receptor.

En enlaces a los servidores en la nube ya está estandarizado un sistema de generación de claves, esto permite el acceso seguro a la misma y facilita el tema de seguridad de red.

7.10. Costos de ampliación

Las proyecciones de escalado del proyecto muestran que los costos para llevar a cabo una ampliación, por ejemplo, de una red interna con un Gateway 10 o menos nodos, no es muy elevado, siempre y cuando se tengan las facilidades de importación, herramientas, y buenas guías de desarrollo. Si no se cuenta con lo anterior se incurrirá en gastos considerables, por tiempos de importación, desarrollo de firmware, daños electrónicos en board o montajes inadecuados. Se debe tener amplio conocimiento sobre el tema (modulación LoRa) para implementar una red estable, y desarrollar los firmwares a la medida de las necesidades.

8. Conclusiones

Culminada esta investigación y los desarrollos respectivos se puede concluir los siguiente:

- Las variables RSSI y SNR son medidas difusas a la hora de analizar la fortaleza de los enlaces, puesto que no hay un valor limite exacto donde se pueda afirmar que no se dará el enlace.
- Las zonas de Fresnel se deben tener en cuenta en las implementaciones, si bien esta modulación no se acoge estrictamente a la predicción de operación de Fresnel, si se ve afectada por las mismas cuando los enlaces son de largas distancias.
- Las comunicaciones en áreas cerradas se deben separar por SF, esto es, cuando dos nodos están a distintos SF estos son invisibles para el otro, se debe aprovechar este hecho para separar las transmisiones y evitar interferencias.
- Todos los módulos probados se saturan, cuando están recibiendo hay un punto de saturación, no es muy aleatorio, pero bloquea el modulo y le impide capturar más datos, se soluciona reiniciando el dispositivo.
- La antena debe estar en forma vertical, esto le permite radiar en todas las direcciones y captar igual, es muy sensible a la inclinación, aun a la misma altura inclinarla 90° causa variaciones en RSSI.
- Los enlaces son fuertes después de alcanzados, cuando se logra recibir un mensaje es realmente poco probable que esté corrupto, en toda la investigación se corrompieron cerca de 2 o 3 mensajes de alrededor de 3000.
- La industria requiere desarrollos en LoRa, puesto que hoy se cuenta con Digi Xbee que es costoso, y poco embebido.
- Los módulos de desarrollo son versátiles porque incluyen un microcontrolador, suficiente para hacer cualquier desarrollo de control y monitoreo.
- Los módulos se calientan, al ser tan embebidos los componentes alcanzan temperaturas altas, el registro más alto fue de 172°F aprox. a temperatura ambiente.
- Los tiempos de transmisión son largos, para llegar de un PLC a un actuador por ejemplo, se debe configurar una latencia de no menos una transmisión cada 2 min, suponiendo SF=12, solo en broadcast, si requiere hacer validaciones necesita más tiempo.

9. Bibliografía

- [1] «What is LoRa®?,» Semtech, [En línea]. Available: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>. [Último acceso: 9 2019].
- [2] S. Edgar, «Modulación LoRa: Long Range Modulation,» Medium Corporation, [En línea]. Available: <https://medium.com/pruebas-de-laboratorio-de-la-modulaci%C3%B3n-lora/modulaci%C3%B3n-lora-4ad74cabd59e>. [Último acceso: 9 2019].
- [3] «LoRa,» Readtherdocs, [En línea]. Available: <https://lora.readthedocs.io/en/latest/>. [Último acceso: 9 2019].
- [4] P. Pickering, «Desarrollar con LoRa para aplicaciones IoT de baja tasa y largo alcance,» Digi-Key Electronics, [En línea]. Available: <https://www.digikey.com/es/articles/techzone/2017/jun/develop-lora-for-low-rate-long-range-iot-applications>. [Último acceso: 9 2019].
- [5] «LoRa Alliance,» Semtech, [En línea]. Available: <https://www.semtech.com/lora/ecosystem/lora-alliance>. [Último acceso: 9 2019].
- [6] SEMTECH, «LoRa Modulation Basics,» 02 05 2015. [En línea]. Available: <https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>. [Último acceso: 09 2019].
- [7] «Understanding the relationship between LoRa chips, chirps, symbols and bits,» StackExchange, [En línea]. Available: <https://electronics.stackexchange.com/questions/278192/understanding-the-relationship-between-lora-chips-chirps-symbols-and-bits>. [Último acceso: 09 2019].
- [8] S. Mistry, «LoRa,» [En línea]. Available: <https://www.arduino-libraries.info/libraries/lo-ra>. [Último acceso: 09 2019].
- [9] R. Lie, «MOBILEFISH,» [En línea]. Available: https://www.mobilefish.com/download/lora/lora_part13.pdf. [Último acceso: 09 2019].
- [10] J. Matondang, «Spreading Factor, Bandwidth, Coding Rate and Bit Rate in LoRa (English),» 14 08 2018. [En línea]. Available: <https://josefmt.com/2018/08/14/spreading-factor-bandwidth-coding-rate-and-bit-rate-in-lora-english/>. [Último acceso: 09 2019].
- [11] M. Zachmann, «Long Range Embedded Systems — Part 2,» Medium Corporation, 13 07 2018. [En línea]. Available: <https://medium.com/home-wireless/long-range-embedded-systems-part-2-dc37a920961b>. [Último acceso: 09 2019].

- [12] «RSSI,» Speedcheck, [En línea]. Available: <https://www.speedcheck.org/es/wiki/rssi/>. [Último acceso: 09 2019].
- [13] G. Reynaga, «Clases de Dispositivos LORAWAN,» 05 05 2019. [En línea]. Available: <http://www.gustavoreynaga.com/front/001/?p=86>. [Último acceso: 09 2019].
- [14] S. Corporation, «Designer'sGuide,» 7 2013. [En línea]. Available: https://www.semtech.com/uploads/documents/LoraDesignGuide_STD.pdf. [Último acceso: 9 2019].



10. Anexos

Esta encuesta está dirigida a operarios y jefes de área operativa, con el objetivo de determinar la pertinencia de las comunicaciones inalámbricas en la industria, para el control y monitoreo de variables.

Esta encuesta es anónima, no debe especificar datos personales y/o corporativos, consta de 8 preguntas, si lo desea puede aportar notas en cada pregunta.

1. ¿Dentro de sus labores esta monitorear o medir variables de procesos, temperatura, humedad, presión, etc.?
Si No
Nota:

2. ¿El monitoreo o medida de dicha variable es directa o remota?
Directo Remoto
Nota:

3. ¿De ser posible, podría indicar que variables debe medir y con qué frecuencia?

4. ¿Cree usted que en su entorno de trabajo sea útil hacer todas las medidas mencionadas de forma inalámbrica?
Si No
Nota:

5. ¿Dentro de sus labores esta controlar dispositivos o mecanismos que afectan los procesos, válvulas, aspersores, motores, etc.?
Si No
Nota:

6. ¿El control de estos dispositivos o mecanismos se hace de forma directa o remota?
Directo Remoto
Nota:

7. ¿De ser posible, podría indicar que mecanismo debe controlar y con qué frecuencia?

8. ¿Cree usted que en su entorno de trabajo sea útil hacer todas las activaciones o controles mencionados de forma inalámbrica?
Si No
Nota:

