



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y  
CIENCIAS APLICADAS

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA  
DE COMUNICACIÓN BASADO EN  
LPWAN PARA EL CONTROL DEL  
ALINEAMIENTO LÁSER

ALBERTO VÍCTOR DOMÍNGUEZ PINTO

TRABAJO DE TITULACIÓN DE TIPO PRODUCTO PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

PROFESOR GUÍA: JAIME ANGUITA GARCÍA

SANTIAGO, OCTUBRE DE 2023

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y  
CIENCIAS APLICADAS

## AGRADECIMIENTOS

*Primero agradezco a mi abuelo Víctor Pinto por darme el ejemplo de esfuerzo y perseverancia de que todo se puede lograr en la vida, además de su apoyo monetario para llevar a cabo mis estudios, ya que gracias a Él pude estudiar en un buen colegio y en una universidad prestigiosa.*

*A mi pareja, Gabriela Vigneaux, por siempre estar en los buenos y malos momentos. Por acompañarme en gran parte de mi vida universitaria. Sin su constante apoyo y motivación nada de esto hubiera sido posible.*

*A mi amigo Jaime Fernández por su apoyo en el ámbito de programación de bajo nivel y su colaboración con el diseño y pruebas del producto.*

*A mi profesor guía Jaime Anguita por darme la oportunidad de participar en su proyecto de investigación durante estos años.*

*Al instituto Milenio de Investigación en Óptica MIRO por financiar mi ayudantía de investigación y los equipos utilizados en el proyecto.*

*A mi familia, mis gatos y mis amigos de la vida por siempre estar ahí para apoyarme en todo momento. Además de todos aquellos que conocí durante mi vida universitaria. Gracias a ellos he llegado hasta donde estoy.*

*A mí por nunca rendirme durante este largo camino universitario.*

*“Si tú lo deseas puedes volar, solo tienes que confiar mucho en ti y seguir”*

## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN .....</b>	<b>VII</b>
<b>1. PROBLEMÁTICA .....</b>	<b>1</b>
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.....	2
1.2 ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA .....	3
1.3 SOLUCIÓN PLANTEADA.....	5
<b>2. DISEÑO DEL PRODUCTO.....</b>	<b>8</b>
2.1 ACCESORIOS COMPLEMENTARIOS .....	8
2.1.1 Cálculos de consumos .....	9
2.2 DISEÑO Y FUNCIONALIDAD .....	11
2.3 PROGRAMACIÓN.....	12
2.3.1 Comunicación Raspberry Pi y controlador.....	13
2.4 PUESTA EN MARCHA.....	14
<b>3. RESULTADOS OBTENIDOS Y POSIBLES MEJORAS .....</b>	<b>16</b>
3.1 COBERTURA DE LA COMUNICACIÓN .....	16
3.2 PRODUCTO EN EL PROYECTO.....	19
3.3 POSIBLES MEJORAS .....	20
3.3.1 Comunicación vía RS-485.....	20
3.3.2 Antenas de mayor ganancia.....	21
3.3.3 Mejoras en la programación .....	21
3.3.4 Medición sistemática .....	22
3.4 COMENTARIOS FINALES .....	22
<b>4. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>22</b>
<b>5. ANEXOS .....</b>	<b>24</b>
ANEXO 1. COMANDOS DE LA MONTURA .....	24
ANEXO 2. MODULACIÓN DE ESPECTRO EXPANDIDO .....	26
ANEXO 3. COMUNICACIÓN EN RF .....	28
ANEXO 4. CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO WI-FI LoRA 32 V2.....	29

ANEXO 5. REGULACIÓN CHILENA SOBRE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS .....	32
ANEXO 6. MANUAL DEL USUARIO EN LA RECEPCIÓN.....	33
ANEXO 7. MANUAL DEL USUARIO EN LA TRANSMISIÓN.....	34
ANEXO 8. HOJA DE ESPECIFICACIONES LORA.....	35

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA N°1 CONSUMOS MÓDULO WI-FI LORA 32 V2.....	9
TABLA N°2 PARÁMETROS DE LA COMUNICACIÓN .....	16
TABLA N°3 COBERTURA DE LA COMUNICACIÓN SIN ANTENAS.....	17
TABLA N°4 COBERTURA DE LA COMUNICACIÓN CON UNA ANTENA .....	17
TABLA N°5 COBERTURA DE LA COMUNICACIÓN CON AMBAS ANTENAS.....	18
TABLA N°6 COMANDOS PRINCIPALES .....	25
TABLA N°7 PARÁMETROS DEL MÓDULO .....	29
TABLA N°8 ESTADOS DEL CHIP SX1276 .....	30
TABLA N°9 REGULACIÓN CHILENA DE REDES INALÁMBRICAS .....	32

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN N°1 MONTURA GIMBAL JUNTO AL SISTEMA DE COMUNICACIÓN ZIGBEE .....	1
ILUSTRACIÓN N°2 SISTEMA DE COMUNICACIÓN ACTUAL .....	3
ILUSTRACIÓN N°3 ESTÁNDARES DE REDES DE COMUNICACIÓN .....	6
ILUSTRACIÓN N°4 MÓDULO TRANSCEPTOR WI-FI LORA 32 V2 .....	7
ILUSTRACIÓN N°5 ANTENA UHF DE 915 MHZ .....	8
ILUSTRACIÓN N°6 PRODUCTO FINAL .....	11
ILUSTRACIÓN N°7 SISTEMA DE COMUNICACIÓN IMPLEMENTADO .....	14
ILUSTRACIÓN N°8 SISTEMA DE RECEPCIÓN CON REDES LPWAN .....	15
ILUSTRACIÓN N°9 TERMINAL DE RASPBERRY PI CON LOS CÓDIGOS EJECUTADOS .....	15
ILUSTRACIÓN N°10 DIAGRAMA DE COMUNICACIÓN CON PROTOCOLO RS-485 .....	20
ILUSTRACIÓN N°11 MONTURA GIMBAL (IZQUIERDA) Y SU CONTROLADOR (DERECHA) .....	24
ILUSTRACIÓN N°12 MODULACIÓN DE ESPECTRO EXPANDIDO .....	26
ILUSTRACIÓN N°13 ESQUEMA DE MODULACIÓN DE ESPECTRO EXPANDIDO... ..	27
ILUSTRACIÓN N°14 EJEMPLO DE PRESUPUESTO DE ENLACE .....	28
ILUSTRACIÓN N°15 PINES DEL MÓDULO .....	31
ILUSTRACIÓN N°16 PRIMERA PÁGINA DE HOJA DE ESPECIFICACIONES LORA	35

## **RESUMEN**

En el proyecto de investigación del Dr. Jaime Anguita se requiere alinear un haz de luz entre dos puntos distantes. Para lograr este objetivo, se utiliza una estructura mecánica conocida como montura Gimbal, la cual tiene la capacidad de ajustar el ángulo del haz. Esta montura se opera de forma remota a través de un sistema de comunicación inalámbrico basado en redes ZigBee. Sin embargo, se ha evidenciado que en ciertas circunstancias, el sistema inalámbrico resulta ser poco confiable e ineficiente, llegando a impedir su funcionamiento, perjudicando así el proceso de alineación.

Por esta razón se diseñó e implementó un nuevo sistema independiente de comunicación inalámbrica por radio frecuencia (RF) basado en redes LPWAN para el control del alineamiento láser. Esto se llevó a cabo mediante la programación de microcontroladores ESP32 con tecnología LoRa, perteneciente a las redes LPWAN.

Tras llevar a cabo pruebas de comunicación a distancia y de conectividad entre los componentes, se logró establecer exitosamente un nuevo sistema de comunicación inalámbrico que garantiza una comunicación eficiente y confiable entre dos puntos lejanos, el cual resulta ser más económico y compacto en comparación con el sistema previamente empleado de redes ZigBee.



## 1. PROBLEMÁTICA

Dentro del proyecto de investigación del Dr. Anguita, se emite un láser desde su oficina hasta el edificio El Reloj, ambos lugares ubicados en la Universidad de los Andes. El haz abarca una distancia de 500 metros (también se considera el caso de 3 km) y para propósitos de la investigación, es necesario redirigirlo de vuelta, para lo cual se ha instalado un espejo en el edificio El Reloj para reflejarlo.

El espejo se encuentra montado en una estructura mecánica controlable, conocida como montura Gimbal que permite ajustar su ángulo para alinear el haz reflejado. Esta era controlada desde la oficina del Dr. Anguita mediante un sistema de comunicación inalámbrico por RF basado en redes ZigBee<sup>1</sup>, tal como se muestra en la Ilustración N°1. La montura está equipada con dos espejos, ya que en ciertas situaciones se emiten dos haces dirigidos hacia el edificio El Reloj. La caja que la cubre se encarga de oscurecer la zona donde incide el haz, facilitando así su observación.



Ilustración N°1: Montura Gimbal junto al sistema de comunicación ZigBee.

Fuente: Elaboración propia.

---

<sup>1</sup> Conjunto de protocolos de comunicación inalámbrica para la creación de redes de área personal.

El sistema de comunicación ZigBee permitió monitorear la montura de forma remota para controlar el sistema de propagación láser. Sin embargo, presentó ciertas deficiencias que lo convierte en un sistema poco confiable e ineficiente, que, en ocasiones, impide llevar a cabo el proceso de alineación de forma inalámbrica.

## 1.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

En la investigación de Anguita (2023), es fundamental realizar ajustes precisos en el ángulo del espejo, tanto en el eje horizontal como en el vertical con el fin de alinear de manera óptima el haz de luz. Para lograr este nivel de precisión, se emplea la montura Gimbal, un dispositivo mecánico que permite la rotación de un objeto en cualquier dirección. En este proceso, el espejo se fija a la montura y esta, mediante un ordenador o, manualmente, permite realizar rotaciones en ambos ejes garantizando así que se logre la alineación precisa del haz.

Para el monitoreo y control de la montura, fue necesario la implementación de un sistema de comunicación inalámbrico ZigBee. Esto se debe a que la distancia, el tiempo y la exactitud son factores de gran importancia, por lo que resulta poco conveniente depender de ajustes manuales poco precisos en el espejo, la utilización de un cable físico que conecte ambos puntos para el monitoreo de la montura, o incluso la necesidad de contar con una persona en cada extremo para llevar a cabo la alineación.

No obstante, el sistema de comunicación ZigBee presenta varias deficiencias que impactan negativamente en el proceso de alineación. En primer lugar, la elección de usar redes ZigBee, que operan a 2,4 GHz, no es óptima debido a su limitada cobertura debido a su alta frecuencia. Esto obliga a utilizar tres transceptores para cubrir la distancia requerida, lo que aumenta la compacidad y el costo del sistema.

En segundo lugar, el sistema de comunicación inalámbrico depende tanto de un ordenador personal para enviar comandos<sup>2</sup> como de una constante conexión a la corriente, lo que lo hace un sistema dependiente. Asimismo, las Raspberry Pi utilizadas en este sistema experimentan problemas de arranque y bloqueo, lo que puede retrasar la alineación o incluso impedir la comunicación inalámbrica en casos extremos.

En resumen, se tienen dos puntos lejanos, los cuales deben comunicarse entre sí de manera eficiente y confiable, y todo ello de manera más económica y compacta que el sistema de comunicación actual, por lo que el trabajo consistirá en diseñar e implementar un nuevo sistema que cumpla con estos requisitos.

## 1.2 ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA

El sistema de comunicación de redes ZigBee está compuesto por un ordenador Lenovo, dos Raspberry Pi y tres módulos de RF Xbee, junto con un teclado y una pantalla, como se muestra en el diagrama de conexión de la Ilustración N°2, donde el origen es la oficina del Dr. Anguita en el edificio de Ingeniería y el destino, el edificio El Reloj.

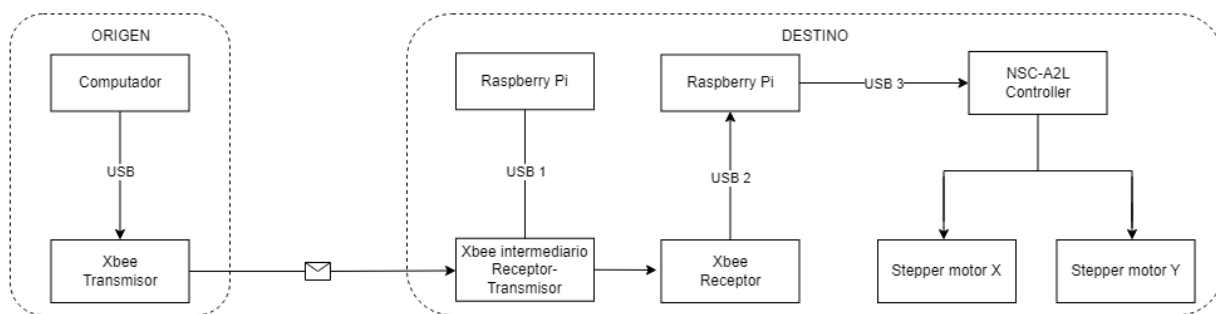


Ilustración N°2: Sistema de comunicación actual.

Fuente: Elaboración propia.

<sup>2</sup> Anexo 1.

Para poner la comunicación en marcha, se debe realizar un trabajo previo, el cual consiste en conectar y encender los dispositivos ubicados en el origen y en el destino, junto con ejecutar los códigos de cada Xbee. La ejecución de estos comienza en el destino, donde cada Raspberry Pi está configurada con un código específico para su respectivo módulo Xbee. Por lo tanto, el usuario deberá conectar la pantalla y el teclado en cada Raspberry Pi para poder ejecutar los comandos necesarios en la terminal. Por otro lado, en el punto de origen se encuentra el Xbee transmisor, el cual debe estar conectado al ordenador. En este último, se debe ejecutar el código correspondiente en Python. Al completar estos pasos, la consola indicará que el sistema de comunicación está encendido y listo para operar.

Una vez encendidos los dispositivos y ejecutados los códigos, se da inicio al envío de comandos. El proceso consiste en que primero, en el punto de origen, se escribe un comando de instrucción en el terminal de Python del ordenador. Luego, mediante conexión USB, este envía la instrucción hacia el primer Xbee. Posteriormente, el módulo Xbee envía los datos por red ZigBee hacia un segundo Xbee intermediario, ubicado en el lugar de destino, es decir, el edificio El Reloj.

Una vez que el segundo Xbee intermediario recibe los datos, éste vuelve a enviarlos por red ZigBee a un tercer Xbee receptor. Por último, éste envía el mensaje a la montura por medio de su Raspberry Pi respectiva, la cual ejecutará el movimiento mecánico en sus respectivos ejes.

Esta es la teoría de funcionamiento detrás del sistema de comunicación basado en redes ZigBee. No obstante, en la práctica, se ha evidenciado que este sistema de comunicación opera de forma ineficiente y con un bajo índice de confiabilidad, lo que exige la búsqueda y aplicación de una solución adecuada.

### 1.3 SOLUCIÓN PLANTEADA

Es fundamental que el sistema de alineación conserve su infraestructura electrónica actual debido a la precisión requerida para alinear el haz. Lograr movimientos a nivel micrométrico resulta una tarea compleja cuando se realiza manualmente, además de que demanda más tiempo. Otro aspecto a conservar es el monitoreo de la montura por RF, dado que proporciona la capacidad de ajustar la alineación y su seguimiento de manera precisa y eficiente. Esto no solo aumenta la comodidad, sino que también ofrece una mayor flexibilidad y accesibilidad en la gestión de la montura.

Dado este contexto, se propone la implementación de un nuevo sistema electrónico de comunicación que utilice redes LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) en lugar de redes ZigBee. Las redes LPWAN son ampliamente utilizadas en aplicaciones de Internet de las cosas<sup>3</sup> (IoT), debido a su capacidad para transmitir información a largas distancias con un consumo de energía reducido y a un bajo costo económico. Al reemplazar las redes ZigBee por LPWAN, se ampliará significativamente la cobertura, aunque con una disminución en la tasa de transmisión de datos, lo cual no representa un problema para el proyecto, ya que la cantidad de información transmitida es mínima con los comandos enviados ocupando solo unos pocos bytes.

La Ilustración N°3 compara ambos tipos de redes, junto a otros estándares según sus anchos de banda y coberturas.

---

<sup>3</sup> *Internet of things*: Interconexión de objetos cotidianos a través de Internet, permitiéndoles recopilar y compartir datos para automatizar tareas y tomar decisiones inteligentes.

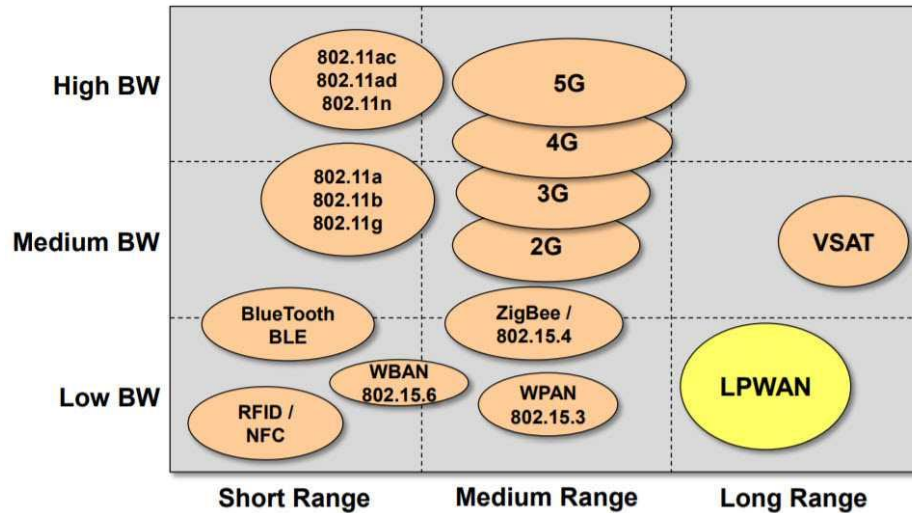


Ilustración N°3: Estándares de redes de comunicación.

Fuente: (Arduino, 2023).

Otra particularidad de las redes LPWAN es su uso de técnicas de modulación de baja potencia y velocidad de transmisión reducida, lo que posibilita que los dispositivos conectados operen con baterías durante períodos prolongados. Esta ventaja resulta especialmente beneficiosa en aplicaciones de IoT, en las que los dispositivos pueden estar ubicados en áreas remotas o de difícil acceso.

Dadas las ventajas ofrecidas por las redes LPWAN, la solución planteada consiste en la implementación de dos módulos transceptores de RF que hagan uso de estas redes. Para lograrlo, se propone el uso de dos microcontroladores ESP32 equipados con un chip LoRa (*Long Range*). El uso de microcontroladores ESP32 es bastante conveniente dada su potencia y rendimiento, estos son ampliamente utilizados en aplicaciones IoT, además de que presentan un bajo consumo de energía. Por otro lado, la inclusión de un chip LoRa es esencial debido a que estos dispositivos utilizan el protocolo LoRaWAN, el cual forma parte del conjunto de tecnologías LPWAN mencionado anteriormente, lo que lo hace óptimo y altamente compatible con los objetivos del proyecto.

La tecnología LoRa, desarrollada por Semtech, utiliza la modulación LoRa que se basa en la modulación de espectro expandido<sup>4</sup> para brindar una alta inmunidad a interferencias. Todos los chips emplean esta modulación, sin embargo, el que más se adapta al objetivo del proyecto es el chip SX1276 dadas sus características. Este tiene la capacidad de operar en bandas desde muy alta frecuencia (VHF) hasta ultra alta frecuencia (UHF) entre 137 y 1.020 MHz, el chip SX1276 ofrece una alta sensibilidad, permite la utilización de un alto SF y garantiza un presupuesto de enlace<sup>5</sup> elevado.

Por las razones mencionadas, se decidió optar por el uso del transceptor Wi-Fi LoRa 32 V2 de Heltec, el cual se muestra en la Ilustración N°4. Esta placa de desarrollo se destaca como la elección ideal para alcanzar los objetivos del proyecto gracias a su versatilidad y sus características<sup>6</sup>. Básicamente, se trata de un microcontrolador ESP32 con un chip SX1276 LoRa integrado. En cuanto a sus opciones de lenguaje de programación, la placa es compatible con varios entornos de desarrollo, incluyendo C/C++, microPython y Arduino.

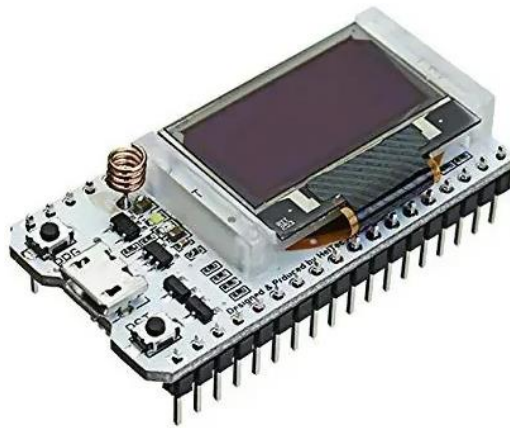


Ilustración N°4: Módulo transceptor Wi-Fi LoRa 32 V2.

Fuente: (Heltec, 2023).

---

<sup>4</sup> Anexo 2.

<sup>5</sup> Anexo 3.

<sup>6</sup> Anexo 4.

## 2. DISEÑO DEL PRODUCTO

### 2.1 ACCESORIOS COMPLEMENTARIOS

El producto no se limita únicamente a los microcontroladores. Para aprovechar las ventajas de la comunicación LoRa, fue esencial la incorporación de una antena UHF de 915 MHz con una ganancia de 2 dBi en cada dispositivo, la cual se muestra en la Ilustración N°5.



Ilustración N°5: Antena UHF de 915 MHz.

Fuente: (Heltec, 2023).

La elección de operar en la frecuencia de 915 MHz, dentro de la banda de 902-928 MHz, se fundamenta en la conformidad con la normativa chilena<sup>7</sup> para dispositivos LoRaWAN, además de ser la frecuencia más utilizada en América Latina y América del Norte para aplicaciones IoT. Asimismo, se optó por una ganancia de 2 dBi para cada antena, ya que esta proporciona un alcance significativo, aunque es importante destacar que esta distancia puede variar considerablemente según el entorno, ya sea por obstáculos físicos o por el tipo de terreno.

---

<sup>7</sup> Anexo 5.



De acuerdo con estas regulaciones, la potencia máxima permitida por dispositivo es de 500 mW. La ganancia total de un solo módulo, considerando tanto el dispositivo como la antena, suma un máximo de 22 decibeles, equivalente a 159 mW. Esta potencia está considerablemente por debajo del límite máximo permitido, por lo que su uso está en total cumplimiento con las regulaciones vigentes.

Otro componente esencial que se incorporó a cada dispositivo fue una batería, que permitió convertirlos en sistemas independientes. Para esta tarea, se optó por la batería recargable de 1.000 mAh y 3.7 V LiPo de Heltec. En cuanto al consumo de energía, es importante destacar que el uso de cada dispositivo es mínimo, ya que las transmisiones y recepciones de datos son instantáneas y, la mayor parte del tiempo, los módulos RF permanecen en modo inactivo (modo IDLE), consumiendo un nivel de corriente considerablemente bajo. La información precisa sobre los consumos del módulo Wi-Fi LoRa 32 V2 se encuentra detallada en la Tabla N°1.

Tabla N°1: Consumos Módulo Wi-Fi LoRa 32 V2.

Consumos	Valores
Dispositivo en reposo (IDLE) 240 MHz	30-68 mA
Transmisión de datos 20 dB	130 mA
Recepción de datos	10,8-12 mA
Regulador de voltaje	1-10 $\mu$ A
Pantalla OLED	430-780 $\mu$ A

Fuente: (Heltec, s.f.).

### 2.1.1 Cálculos de consumos

Para que la montura efectúe movimientos, se envían paquetes de 30 bytes, lo que equivale a 240 bits por transmisión. Para aprovechar al máximo la cobertura del dispositivo RF, se utiliza el SF más alto disponible, cuyo valor es 12. Esto, junto con un ancho de banda de 125 kHz, resulta en una velocidad de transmisión de 293 bps. A partir de estos parámetros, se puede calcular el tiempo que demora el dispositivo en transmitir los 240 bits.

$$\text{Tiempo de transmisión} = \frac{240 \text{ bits}}{293 \text{ bps}} = 0,82 \text{ s} \quad \text{ec. 1}$$

Con estos datos, se puede calcular el consumo por cada transmisión realizada:

$$\text{Consumo por transmisión} = 130 \text{ mA} \cdot 0,82 \text{ s} = 106,5 \text{ mAs} = 0,03 \text{ mAh} \quad \text{ec. 2}$$

En un día corriente, una alineación puede tomar hasta 20 minutos. Suponiendo que se realicen 300 transmisiones, el consumo total por cada alineación se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Consumo total} = 300 \cdot 0,03 \text{ mAh} = 8,9 \text{ mAh} \quad \text{ec. 3}$$

Esto significa que, durante los 20 minutos, el dispositivo estará transmitiendo durante solo 4,1 minutos, consumiendo un total de 8,9 mAh. El resto del tiempo permanecerá en modo inactivo, consumiendo lo siguiente:

$$\text{Consumo reposo} = 68 \text{ mA} \cdot 15,9 \text{ min.} = 1.081 \text{ mA} \cdot \text{min} = 18,02 \text{ mAh} \quad \text{ec. 4}$$

En el caso del receptor, al utilizar la misma velocidad de datos, el consumo por cada recepción es el siguiente:

$$\text{Consumo} = 12 \text{ mA} \cdot 0,82 \text{ s} = 9,84 \text{ mAs} = 0,0027 \text{ mAh} \quad \text{ec. 5}$$

$$\text{Consumo total} = 300 \cdot 0,0027 \text{ mAh} = 0,82 \text{ mAh} \quad \text{ec. 6}$$

Finalmente, considerando los consumos de transmisión, recepción y reposo, se puede concluir que, para cada alineación, el transmisor consume 26,92 mAh y el receptor 18,02 mAh. Esto implica que ambas baterías de 1.000 mAh pueden durar un poco más de un mes de alineaciones antes de requerir una recarga.

## 2.2 DISEÑO Y FUNCIONALIDAD

Para alojar de manera segura, tanto el microcontrolador como sus accesorios, se ideó y fabricó una caja protectora mediante impresión en 3D, utilizando el software de diseño *Fusion 360*, tal como se aprecia en la Ilustración N°6.



Ilustración N°6: Producto final.

Fuente: Elaboración propia.

Este diseño se concibió cuidadosamente para cumplir múltiples funciones esenciales:

- a) Acceso a los Pines: Se diseñó de manera que los pines del microcontrolador quedaran accesibles para su uso sin restricciones físicas.
- b) Exhibición de la Pantalla OLED: La caja está configurada de manera que la pantalla OLED sea visible y funcional sin necesidad de abrir la caja.

- c) Ubicación Antena: La antena se encuentra fija y al descubierto para garantizar su óptimo rendimiento de comunicación.
- d) Botón de Reinicio: Incorpora un botón dedicado para reiniciar la placa de manera conveniente.
- e) Gestión de Cables: Se ha tenido en cuenta que los cables de la batería puedan conectarse sin obstáculos al conector ubicado debajo de la placa.
- f) Conexión USB: Se incluye un orificio al costado de la caja para permitir la conexión por USB sin necesidad de retirar la cubierta.

Las dimensiones de la caja son de 7 x 6 x 1,8 cm. y su peso total, con todos los componentes instalados, es de 51,3 gramos. Este diseño integral no solo protege los componentes, sino que también facilita la accesibilidad y el mantenimiento de los mismos, lo que contribuye a la eficacia y comodidad en su uso. Además, de que es fácil de transportar dado que presenta la ventaja de ser pequeño y ligero.

## 2.3 PROGRAMACIÓN

Para establecer la comunicación por RF entre las dos placas, fue necesario programar ambas utilizando el entorno de desarrollo Arduino (la elección de este lenguaje se basó en su simplicidad y flexibilidad). En cada uno de los códigos, se definieron parámetros esenciales como la frecuencia, el SF, la ganancia, el ancho de banda, entre otros. Además, se importaron las librerías necesarias, incluyendo las estándar de Arduino, las específicas para la comunicación RF y las relacionadas con la interfaz gráfica de la pantalla OLED.

En cuanto a las funciones clave, en el transmisor, la función void loop se encarga de gestionar el envío de paquetes, mientras que, en el receptor, la función OnRxDone se encarga de recibir los mensajes y entregarlos al controlador y, su función void loop, se encarga de leer el mensaje de respuesta proveniente de la montura.

Posteriormente, se procedió a conectar el receptor con el controlador de la montura. En esta etapa, se presentaron dos opciones de comunicación: a través del puerto USB o mediante el protocolo RS-485<sup>8</sup>. Se optó por la conexión USB debido a la falta de disponibilidad del cable necesario para la otra alternativa. Para establecer la conexión USB, fue necesario utilizar los códigos en C/C++ proporcionados por el fabricante de la montura, Newmark Systems y adaptarlos al proyecto<sup>9</sup>. Sin embargo, ejecutar estos códigos directamente en el receptor resulta ser una tarea compleja, especialmente dado que el receptor no cuenta con un puerto USB de entrada. Por lo tanto, se tomó la decisión de implementar una Raspberry Pi como intermediario entre el receptor y la montura, con el fin de superar estas limitaciones.

Es importante destacar que se llevó a cabo el formateo de ambas Raspberry Pi utilizadas en el sistema de comunicación anterior. El cambio en sus sistemas operativos solucionó los problemas de mensajes de error, demoras y bloqueos, lo que facilitó su uso de manera más cómoda y eficiente.

### 2.3.1 Comunicación Raspberry Pi y controlador

La tarea más desafiante en la creación del producto consistió en establecer una comunicación efectiva entre la Raspberry Pi y el controlador de la montura. Para lograr esto, se implementaron los códigos proporcionados por Newmark Systems, los cuales incluyen una librería compilada en forma de DLL<sup>10</sup> que interactúa con el módulo *Performax*<sup>11</sup> mediante llamadas a funciones de la API. Es importante destacar que tanto los códigos de las placas como los del controlador se programaron en el lenguaje C/C++. Sin embargo, se optó por utilizar Python para la comunicación serial entre la Raspberry Pi y el controlador debido a su facilidad de programación. Para lograr la integración entre Python y C/C++, se utilizó *Swig*<sup>12</sup>, una herramienta que enlaza ambos lenguajes.

---

<sup>8</sup> Estándar de comunicación serial que se utiliza para transmitir datos en forma diferencial.

<sup>9</sup> Se modificaron los códigos `test.c` y `test_ro.c` para el reconocimiento entre el controlador y el receptor.

<sup>10</sup> *Dynamic Link Library*: Librería de enlace dinámico que proporciona una interfaz de comunicación.

<sup>11</sup> Interfaz de software para sistemas de control y motorización (códigos del fabricante).

<sup>12</sup> *Simplified Wrapper and Interface Generator* es una herramienta que genera interfaces entre códigos de forma automática.

En la Ilustración N°7 se muestra un diagrama de bloques que representa el nuevo sistema de comunicación basado en redes LPWAN, utilizando módulos Wi-Fi LoRa 32 V2.

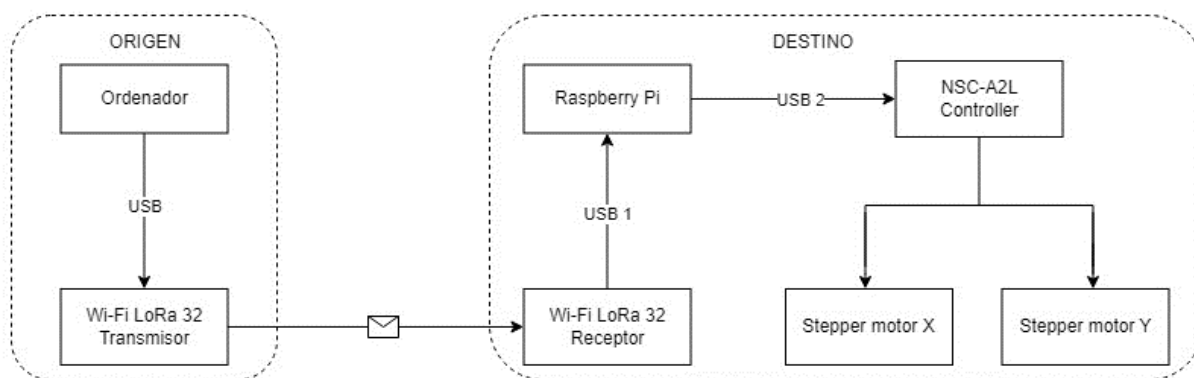


Ilustración N°7: Sistema de comunicación implementado.

Fuente: Elaboración propia.

## 2.4 PUESTA EN MARCHA

La conexión de los dispositivos y el envío de comandos es muy similar al visto anteriormente en la Ilustración N°2, pero de manera más simplificada. La Ilustración N°8 muestra la conexión del sistema de recepción instalado en el edificio El Reloj, siguiendo una serie de pasos<sup>13</sup> que comprenden la conexión de los componentes, la activación de dispositivos y la ejecución de los códigos.

<sup>13</sup> Anexo 6



Ilustración N°8: Sistema de recepción con redes LPWAN.

Fuente: Elaboración propia.

La Ilustración N°9 muestra el mensaje de la montura después de ejecutar los códigos correspondientes en el lugar de la recepción de comandos.

```

optica@raspberrypi: ~
Archivo  Editar  Pestañas  Ayuda
optica@raspberrypi:~ $ sudo chmod 777 /dev/ttyUSB0
optica@raspberrypi:~ $ sudo chmod -R 777 /dev/bus/usb/
optica@raspberrypi:~ $ python3 /home/optica/Desktop/Reloj/Arcus_Performax/main.py
dwNumDevice: 0
dwNumDevice: 0
Arcus Product: Performax-2ED-SA
Device Number: 2ED00

```

Ilustración N°9: Terminal de Raspberry Pi con los códigos ejecutados.

Fuente: Elaboración propia.

Luego de realizar los pasos de encendido en el lugar de recepción, se debe dar inicio al envío de comandos desde la zona de transmisión. En esta, también se debe cumplir con una secuencia de pasos<sup>14</sup> para llevar a cabo su uso.

---

<sup>14</sup> Anexo 7

### 3. RESULTADOS OBTENIDOS Y POSIBLES MEJORAS

#### 3.1 Cobertura de la comunicación

Antes de emplear el producto en el proyecto de investigación, se realizaron pruebas de distancia entre los dos módulos de RF para determinar la máxima cobertura de comunicación posible. La tabla N°2 muestra los parámetros utilizados en cada módulo durante la comunicación por RF, seguidos por los resultados correspondientes.

Tabla N°2: Parámetros de la comunicación.

Parámetro	Valor
Frecuencia de operación	915 MHz
Potencia de transmisión/recepción	20 dBm + 2dBi
Ancho de banda	125 kHz
SF	12
Tamaño del paquete	30 bytes
Velocidad de datos	293 bps

Fuente: Elaboración propia.

Luego de configurar cada placa, se procedió a comunicar ambos dispositivos mediante el envío de paquetes de 30 bytes por cada cierta distancia específica. El transmisor se instaló en una ubicación fija, mientras que el receptor fue alejado de este para medir múltiples muestras. Se llevaron a cabo tres pruebas diferentes: la primera, en la universidad, sin hacer uso de antenas, la segunda, también en la universidad, utilizando únicamente una antena en el transmisor y la tercera, en un parque, con ambas antenas. Los resultados se presentan a continuación en las tablas N°3, N°4 y N°5.



Tabla N°3: Cobertura de la comunicación sin antenas.

<b>Comunicación</b>	<b>Distancia aproximada</b>	<b>Lugar de la Universidad</b>
Existe	0 cm	Cafetería ingeniería
	10 cm	Cafetería ingeniería
	1 m	Cafetería ingeniería
	5 m	Cafetería ingeniería
	10 m	Cafetería ingeniería
No existe	15 m	Cafetería ingeniería

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N°4: Cobertura de la comunicación con una antena.

<b>Comunicación</b>	<b>Distancia aproximada</b>	<b>Lugar de la Universidad</b>
Existe	0 cm	Cafetería ingeniería
	10 cm	Cafetería ingeniería
	1 m	Cafetería ingeniería
	5 m	Cafetería ingeniería
	10 m	Cafetería ingeniería
	30 m	Escalera terraza ing.
	100 m	Quincho
	130 m	Camino entre cráter y quincho
No existe	170 m	Cráter

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N°5: Cobertura de la comunicación con ambas antenas.

Comunicación	Distancia aproximada	Coordenadas
Existe	0 m	-33.39462, -70.60115
	250 m	-33.39679, -70.60176
	450 m	-33.39855, -70.60236
	600 m	-33.39986, -70.60253
	750 m	-33.40133, -70.60216
	880 m	-33.40246, -70.60218
	960 m	-33.40324, -70.60208
	1,02 km	-33.40373, -70.60219
	1,1 km	-33.40450, -70.60228
	1,22 km	-33.40547, -70.60275
	1,36 km	-33.40677, -70.60303
	1,41 km	-33.40724, -70.60161
	1,5 km	-33.40807, -70.60086
No existe	1,54 km	-33.40841, -70.60141

Fuente: Elaboración propia.

El tercer escenario se llevó a cabo en el Parque Bicentenario de Vitacura, debido a la gran distancia que abarcan ambos módulos con sus respectivas antenas. Este lugar se caracteriza por su extensión y por ser un ambiente relativamente despejado en comparación con los entornos urbanos típicos, lo que lo convierte en un lugar favorable para la transmisión de señales.

No obstante, aun así, la señal se vio atenuada por la presencia de una gran cantidad de personas y varios árboles que podrían haber causado interferencias. A medida que se propaga, su intensidad disminuye debido a la dispersión de la energía, lo que significa que a medida que el receptor se aleja de la fuente de la señal, recibe una menor cantidad de energía.

A pesar de las condiciones adversas, los resultados superaron las expectativas, ya que la comunicación logró abarcar una distancia de 1,5 kilómetros, aunque no se pudo extender hasta los 3 kilómetros deseados.

### 3.2 PRODUCTO EN EL PROYECTO

Tras llevar a cabo diversas pruebas de conexión, programación y comunicación del producto con la montura Gimbal de prueba en el laboratorio de Óptica, se logró completar con éxito el nuevo sistema comunicación para el control y monitoreo de la montura. Este sistema se instaló tanto en la oficina del Dr. Anguita como en el techo del edificio El Reloj, donde se encuentra la montura con el espejo. En pruebas realizadas por el investigador, los comandos enviados entre los terminales del producto lograban operar correctamente los motores de la montura, lo que demostró que el nuevo sistema resultó ser altamente eficiente al lograr la alineación del haz de manera rápida y efectiva, con una tasa de error de 1 comando fallido cada 100 comandos exitosos (tasa de error aproximada de un 1%), superando ampliamente el rendimiento del sistema de comunicación anterior.

En vista de esto, se puede concluir que es perfectamente viable llevar a cabo una comunicación eficiente y económica mediante el uso de redes LPWAN con tecnología LoRa en el control de la operación inalámbrica de la montura Gimbal para el alineamiento láser, cumpliendo con las regulaciones legales en Chile sobre las comunicaciones.

El producto final ha sido todo un éxito debido a sus ventajosos resultados, entre los que se destaca el bajo costo económico en comparación con otros módulos de RF disponibles en el mercado. Además, se simplificaron significativamente los dispositivos, pasando de tres módulos a solo dos (un transmisor y un receptor), y se redujo la cantidad de Raspberries de dos a una, lo que también implicó una disminución en el uso de cableado y en los costos del sistema.

Este sistema, al igual que su predecesor, presenta la ventaja de no requerir la presencia de una persona en el edificio El Reloj para ajustar el espejo de forma manual, lo que reduce de manera significativa la posibilidad de errores humanos en el proceso.

### 3.3 POSIBLES MEJORAS

#### 3.3.1 Comunicación vía RS-485

Una mejora potencial implica hacer uso de la segunda opción de comunicación que ofrece el controlador de la montura: la comunicación a través del protocolo RS-485. Este método resulta más sencillo en comparación con la comunicación USB, ya que utiliza el protocolo ASCII<sup>15</sup>, lo que significa que el controlador solo necesita recibir cadenas de caracteres para realizar los movimientos necesarios. Esta simplicidad reduce significativamente la necesidad de programación en comparación con la conexión USB, eliminando la necesidad de utilizar una Raspberry Pi como intermediario y cualquier código adicional proporcionado por el fabricante, lo que hace que el sistema sea más simple y económico. Sin embargo, se requerirá un convertidor UART-RS485 para permitir la conexión entre el receptor y el controlador. Teniendo esto en cuenta, el sistema final de comunicación se asemejará a la Ilustración N°11.

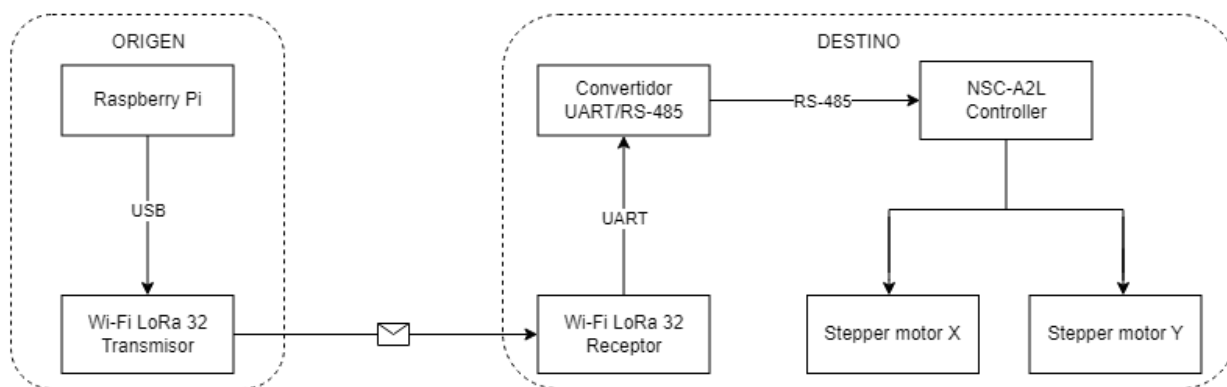


Ilustración N°10: Diagrama de comunicación con protocolo RS-485.

Fuente: Elaboración propia.

<sup>15</sup> Estándar de código de caracteres que asigna valores numéricos a letras, números y símbolos. Este se basa en el envío de cadenas de texto.

### 3.3.2 Antenas de mayor ganancia

En el proyecto, a pesar de que ambos dispositivos aumentaron su ganancia de forma significativa al utilizar antenas de 2 dBi, estos no lograron alcanzar el objetivo de 3 km. Este problema se puede abordar ampliando el presupuesto de enlace mediante el uso de antenas de mayor ganancia que cumplan con las regulaciones chilenas. Con esto, también aumentaría la tasa de éxito en el envío de comandos.

### 3.3.3 Mejoras en la programación

#### a) Respuesta de la montura:

Dado que la montura envía una respuesta de confirmación, como un "OK", después de recibir una instrucción, sería útil enviar esta respuesta de vuelta al remitente para verificar la correcta entrega del mensaje.

#### b) Nuevos comandos:

La comunicación por ASCII admite comandos adicionales que no están presentes en la comunicación por USB. Se sugiere integrar estos comandos en los códigos proporcionados por Newmark Systems para aprovechar su funcionalidad, incluyendo ajustes de velocidad y aceleración, establecimiento de una posición de referencia, que la montura entregue su posición en relación con la posición de referencia, entre otros.

#### c) Uso de coordenadas:

Se propone utilizar las coordenadas GPS del transmisor en el punto de origen, donde se emite el haz, para automatizar el direccionamiento de la montura hacia dichas coordenadas mediante las proporcionadas por el receptor. Esto permitiría que el proceso de alineación se realice con mayor rapidez.

### 3.3.4 Medición sistemática

Otra posible mejora consiste en llevar a cabo una campaña de medición exhaustiva en su lugar de operación habitual, con el fin de contabilizar tanto los eventos de éxito como los fallidos. Esto permitirá obtener conclusiones bien fundadas sobre el rendimiento del producto.

## 3.4 COMENTARIOS FINALES

La implementación del nuevo sistema de comunicación ha logrado establecer una comunicación eficiente y confiable entre dos puntos distantes, y lo ha hecho de manera más económica y compacta que su predecesor. Además, dado el éxito del producto en la alineación láser, se vislumbran múltiples aplicaciones potenciales en campos como la minería, la agricultura, la ciberseguridad, la industria, las casas inteligentes, la logística y otros sectores.

## 4. BIBLIOGRAFÍA

Arduino, 2023. *Arduino*. [En línea]

Available at: <https://docs.arduino.cc/learn/communication/low-power-wide-area-networks-101>  
[Último acceso: 15 Junio 2023].

Chile, B. d. C. N. d., 1985. *bcn*. [En línea]

Available at: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1109333&idParte=>  
[Último acceso: 2022].

Chile, B. d. C. N. d., 1985. *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. [En línea]

Available at: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1109333&f=2021-07-27>  
[Último acceso: 15 Junio 2023].

Figuroa, J. A., 2021. *Memoria de Título, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, 2021, Red de Control y Monitoreo de Drivers LED basada en LPWAN*, Santiago: s.n.

Hagen, J. B., 2009. *Radio-Frequency Electronics*. 2 ed. New York: Cambridge.

Heltec, 2023. *Heltec Automation*. [En línea]

Available at: <https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>

[Último acceso: 15 Junio 2023].

Heltec, s.f. *Heltec WiFi LoRa 32 V2*. [En línea]

Available at: <https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>

Lie, R., 2019. *LoRa/LoRaWAN tutorial 8: Link Budget and Link Margin*, Amsterdam: s.n

.

Price, H. E., 1995. *Digital Communications*. [En línea]

Available at: <https://www.qsl.net/n9zia/ss.qexss.html>

[Último acceso: 15 Junio 2023].

Semtech, 2016. *Semtech*. [En línea]

Available at: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276#documentation>

[Último acceso: 15 Junio 2023].

SUBTEL, 2007. *Estudio Relativo al Uso de Equipos de Radiocomunicaciones de baja Potencia y a la Compatibilidad de Uso de las bandas de Frecuencias 865 - 869,2 MHz; 902 - 928 MHz; 1.910 - 1.930 MHz y 3.600 - 3.700 MHz*, Santiago: s.n.

Systems, N., 2023. *Newmarksystems*. [En línea]

Available at: <https://www.newmarksystems.com/gimbal-mounts/gm-6-gimbal/>

## 5. ANEXOS

### Anexo 1. Comandos de la Montura

Para efectuar el movimiento de la montura, se deben enviar comandos específicos. El manual del controlador proporciona una lista de diversos comandos, cada uno con funciones distintas. La Tabla N°5 presenta unos pocos, no obstante, en el contexto de este proyecto, únicamente los comandos X[Valor] e Y[Valor] son pertinentes, ya que estos inducen el desplazamiento de la montura en los planos horizontal y vertical, respectivamente. La escala es de 400 *step*/grado para ambos ejes, por lo que, si se envía, por ejemplo, el comando X1000, la montura realizará 1.000 pasos o *steps*, ejecutando una rotación de 2,5 grados o 0,436 rad. hacia la derecha. La montura responderá con un "OK" para confirmar que la instrucción ha sido ejecutada con éxito.

A continuación, en la Ilustración N°12, se muestra la montura Gimbal, modelo GM-6, utilizada en el proyecto, junto con su respectivo controlador, modelo NSC-A2L.



Ilustración N°11: Montura Gimbal (izquierda) y su controlador (derecha).

Fuente: (Systems, 2023).



Tabla N°6: Comandos principales.

<b>Comando</b>	<b>Acción</b>	<b>Respuesta</b>
DN	Devuelve el número del dispositivo.	2EDXX
STORE	Guarda configuraciones en la memoria flash.	OK
INC	Se activa el modo incremental	OK
MM	Devuelve el modo de movimiento en el que se encuentra actualmente el controlador.	0 – Modo ABS 1 – Modo INC
EX EY	Devuelve la posición actual del encoder.	Posición de 28 bits
EX=[Valor] EY=[Valor]	Se establece la posición actual del encoder.	OK
PX PY	Devuelve la posición actual del pulso.	Número de 28 bits
PX=[Valor] PY=[Valor]	Se establece la posición actual del pulso.	OK
X[Valor]	Comando de movimiento individual. Modo ABS: Mover en el Valor de la posición. Modo INC: incrementar la posición en el Valor.	OK
Y[Valor]	Comando de movimiento individual. Modo ABS: Mover en el Valor de la posición. Modo INC: incrementar la posición en el Valor.	OK

Fuente: (Systems, 2023).

## Anexo 2. Modulación de Espectro Expandido

La modulación de espectro expandido o ensanchado (*Spread modulation*) es un método que se basa en el uso de la dispersión de señales en un espectro ensanchado, lo que significa que la señal se extiende por un ancho de banda mayor del necesario y se reduce en amplitud por debajo del nivel de ruido, como se muestra en la Ilustración N°13. Esta técnica no solo hace que las señales sean difíciles de detectar, sino que también impide su demodulación sin conocer la palabra de código larga utilizada en el proceso de propagación. Como resultado, este enfoque garantiza una comunicación robusta y una alta inmunidad a interferencias.

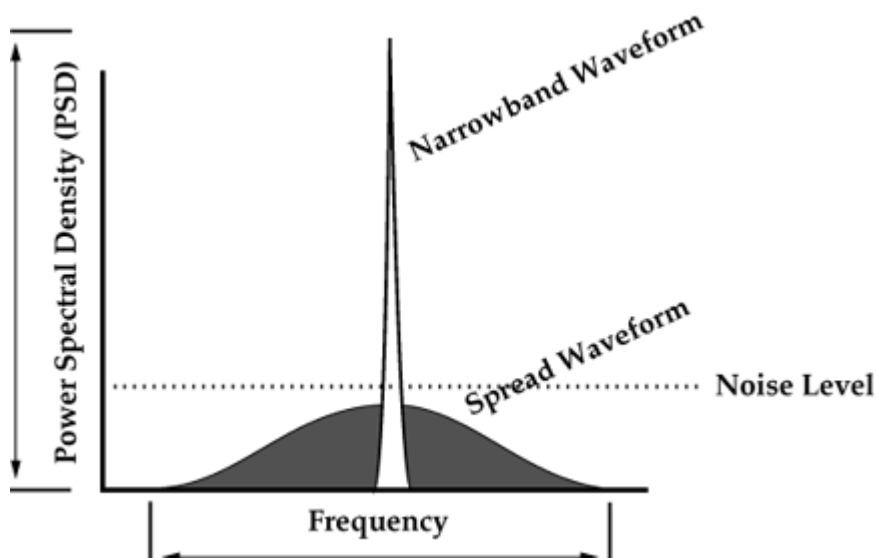


Ilustración N°12: Modulación de espectro expandido.

Fuente: (Price, 1995).

Este tipo de modulación da origen a la técnica de acceso múltiple, que permite a varios usuarios compartir un mismo ancho de banda sin generar interferencias mutuas. Además, utiliza un parámetro conocido como *Spread Factor* o factor de ensanchado (SF) que determina cuánto del ancho de banda se emplea al transmitir un bit. Mientras mayor sea su valor, más se expandirá la señal, lo que resulta en un aumento del ancho de banda y de la sensibilidad, un alcance extendido y una mayor inmunidad al ruido e interferencias. Sin embargo, este aumento en SF conlleva a una reducción en la velocidad de transmisión de datos y un aumento en el tiempo de transmisión. La Ilustración N°14 expone la teoría de la modulación de espectro expandido.

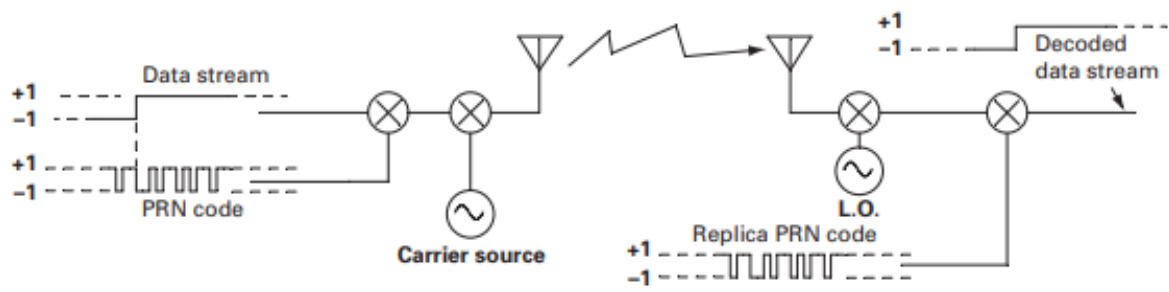


Ilustración N°13: Esquema de modulación de espectro expandido.

Fuente: (Hagen, 2009).

### Anexo 3. Comunicación en RF

En la Ilustración N°15, se presenta un ejemplo de un presupuesto de enlace para un sistema de comunicación en RF, que establece la relación entre la ganancia de la señal y la distancia que recorre entre el transmisor y el receptor. A partir de esta representación, se derivan tres conceptos fundamentales:

En primer lugar, se tiene el presupuesto de enlace o *link budget*, que representa la suma de las ganancias y pérdidas de potencia desde el transmisor hasta el receptor. Su objetivo es determinar si la señal transmitida será lo suficientemente fuerte en el receptor para garantizar una comunicación confiable. Seguidamente, el RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), es una medida que evalúa la potencia recibida por el receptor y cuantifica el rendimiento del enlace, es decir, indica cuán intensa es la señal entre ambos dispositivos. Por último, el tercer concepto clave es la sensibilidad de recepción del dispositivo, que representa el nivel mínimo de potencia necesario para que el receptor pueda recibir o demodular una señal.

A partir de estos conceptos, se calcula el margen de enlace o *link margin*, que corresponde a la cantidad adicional de potencia disponible en la comunicación y se calcula como la diferencia entre el RSSI y la sensibilidad del receptor. Es ideal que su valor sea elevado para mantener una comunicación fiable y eficiente.

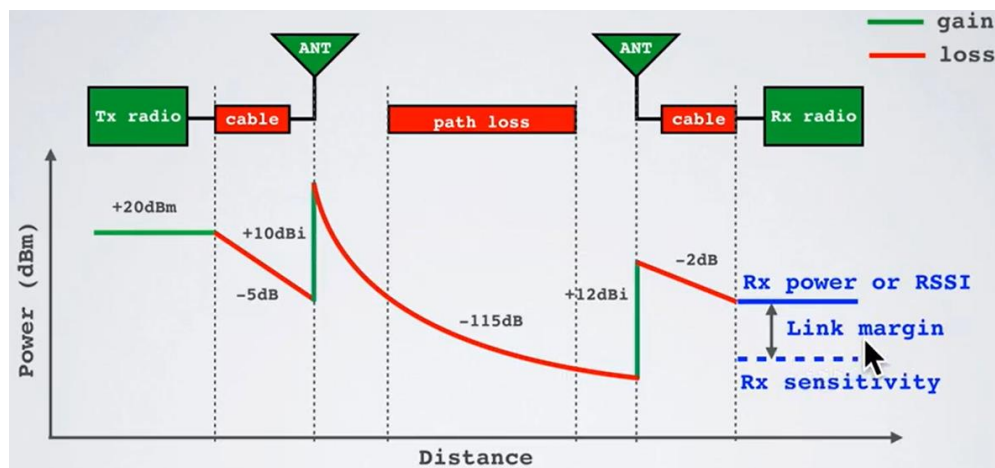


Ilustración N°14: Ejemplo de presupuesto de enlace.

Fuente: (Lie, 2019).

#### **Anexo 4. Características del Módulo Wi-Fi LoRa 32 V2**

El módulo cuenta con un potente chip maestro a 240MHz (Tensilica LX6 de doble núcleo + 1 ULP, 600 DMIPS), un chip LoRa SX1276 para comunicaciones en RF, conectividad USB a Serial mediante CP2102, soporte para Wi-Fi 802.11 b/g/n y Bluetooth. Además, incluye antenas para Wi-Fi y Bluetooth, junto con un conector IPEX para antena LoRa, 36 pines de conexión, una pantalla OLED de 0,96'', alimentación a través de USB micro B, botones que facilitan la programación y el reinicio de la placa, un conector de batería JST de 1,25 mm y la capacidad de modulación en varios formatos, como FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa y OOK. También, admite comunicación UART y ofrece una interfaz SPI.

En la Tabla N°6 se detallan los valores de los parámetros principales del módulo, mientras que en la Tabla N°7 se exhiben los diversos estados posibles del chip LoRa SX1276. La información de cada pin del módulo se presenta en la Ilustración N°16.

Tabla N°7: Parámetros del módulo.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Velocidad de transmisión	0,018 a 37,5	kbps
Sensibilidad	-111 a -148	dBm
Potencia de transmisión	19±1	dBm
Presupuesto de enlace máximo	168	dB
SF	6 a 12	-
Voltaje de operación	3,3	V
Memoria SPI FLASH	8	Mb
SRAM	520	kb
Temperatura de operación	-20 a 70	°C

Fuente: (Heltec, s.f.).

Tabla N°8: Estados del chip SX1276.

<b>Modo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Consumo</b>
Sleep mode	Modo suspensión de ahorro de energía	0,2 $\mu$ A
IDLE mode	Modo inactivo. Estado de bajo consumo en el que no se realiza ninguna tarea. Está listo para enviar o recibir paquetes	1,5 $\mu$ A
Standby mode	Modo de espera. Parcialmente encendido, listo para enviar o recibir datos	1,6 mA
Synthesizer mode	Generación de señales	5,8 mA
Receive mode	Recibir paquetes	10,8-12 mA
Transmit mode	Transmitir paquetes	20-120 mA

Fuente: (Semtech, 2016).

## WIFI LoRa 32(V2) Pinout Diagram

### Notes:

- Vext: External power supply (3.3V), control the switch of Vext through GPIO(LOW-ON,HIGH-OFF)
- ADC preamplifier GPIOs are 3.3V tolerant only

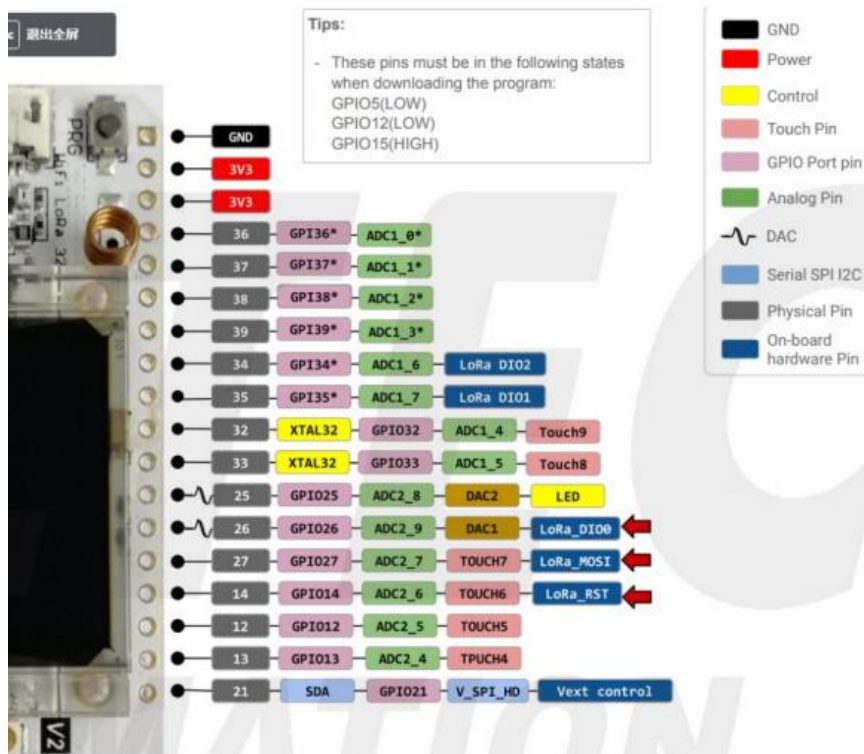
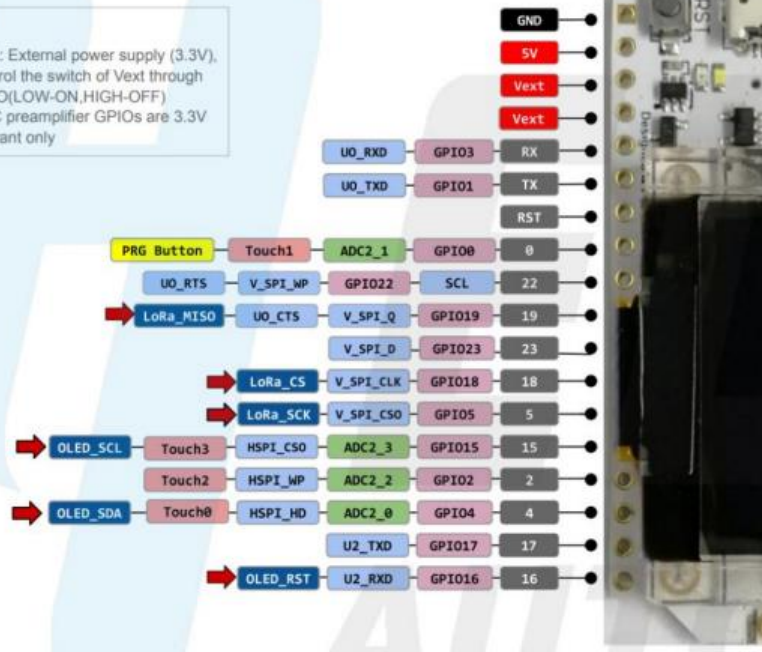


Ilustración N°15: Pines del módulo.

Fuente: (Heltec, 2023).

## **Anexo 5. Regulación Chilena sobre Comunicaciones Inalámbricas**

Las regulaciones y restricciones de frecuencia, potencia y ancho de banda para dispositivos LoRaWAN en Chile son dictadas por la Subsecretaría de Telecomunicaciones (SUBTEL), la agencia reguladora de telecomunicaciones de Chile. Esta, junto al Ministerio de Transporte, establecen la norma: “fija norma técnica de equipos de alcance reducido” de la resolución 1985 exenta, cuyo artículo 1-k indica la regulación en relación con las bandas de frecuencia y límites de potencia sobre comunicación inalámbrica entre dispositivos de la siguiente forma:

a) Ministerio de transportes y telecomunicaciones; SUBTEL sobre dispositivos IOT

Internet de las Cosas (IoT): Dispositivos que empleen una o más de las siguientes bandas de frecuencias y límites de potencia, en la comunicación de sensores, actuadores, nodos y otros equipamientos de comunicaciones entre dispositivos del ámbito IoT. Dichos dispositivos deberán emplear mecanismos de compartición de frecuencias y no tendrán protección contra interferencias mutuas ni las provenientes de terceros autorizados.

Tabla N°9: Regulación Chilena de redes inalámbricas.

<b>Bandas de Frecuencias (MHz)</b>	<b>Potencia Máxima Radiada</b>
433,05 - 434,79	10 mW
868,175 - 868,375	25 mW
915 – 928	500 mW
2.400 - 2.483,5	1 W
5.250 - 5.350	1 W
5.470 - 5.725	1 W
5.725 - 5.850	1 W

Fuente: (Chile, 1985).



## **Anexo 6. Manual del Usuario en la Recepción**

A continuación, se detalla la serie de pasos necesarios que se deben realizar como trabajo preliminar en el lugar de destino para operar la montura de forma remota, donde se encuentran el receptor, la Raspberry Pi y la montura:

- a) Conectar el controlador y la Raspberry Pi a la fuente de alimentación.
- b) Conectar el teclado, el receptor y el controlador a la Raspberry Pi mediante USB.
- c) Conectar la pantalla a la Raspberry Pi a través de HDMI y alimentarla desde la misma Raspberry Pi mediante USB.
- d) Encender Raspberry Pi, el teclado y la pantalla.
- e) Abrir la terminal de la Raspberry Pi.
- f) Ingresar los siguientes comandos en orden:
  - `ls /dev/tty/USB*` (permite visualizar el puerto serie que está utilizando el receptor; debería mostrar “USB0”).
  - `sudo chmod 777 /dev/ttyUSB0` (otorga permisos de acceso al puerto USB0).
  - `sudo chmod -R 777 /dev/bus/usb/` (establece permisos recursivos en dispositivos USB).
  - `python3 /home/optica/Desktop/Reloj/Arcus_Performax/main.py` (ejecución del código principal).
- g) Una vez ejecutado el código correctamente, la consola debería imprimir la siguiente información:
  - Arcus Product: Performax-2ED-SA.
  - Device Number: 2ED00.

Lo anterior indica que la montura está lista para recibir comandos.

## **Anexo 7. Manual del Usuario en la Transmisión**

Después de completar la tarea de conectar los componentes y ejecutar los códigos respectivos en el receptor, es el momento de enviar los comandos desde la ubicación de origen, donde se encuentran el ordenador y el transmisor. En esta etapa, se deben seguir los siguientes pasos:

- a) Conectar y encender el ordenador.
- b) Abrir el programa Arduino.
- c) Conectar el transmisor al ordenador mediante USB.
- d) En la pestaña ‘Herramientas’:
  - Seleccionar el puerto utilizado por el transmisor.
  - En ‘Placa/ESP32 Arduino’, seleccionar WiFi LoRa 32(V2).
  - En ‘Upload Speed’, seleccionar 115.200 baudios.
  - En ‘LoRaWan Region’, seleccionar REGION\_AU915.
- e) Abrir Monitor Serie (ícono de lupa).
- f) Ajustar la velocidad de baudios a 115.200.
- g) Ingresar los comandos a través del Monitor Serie.

## Anexo 8. Hoja de especificaciones LoRa

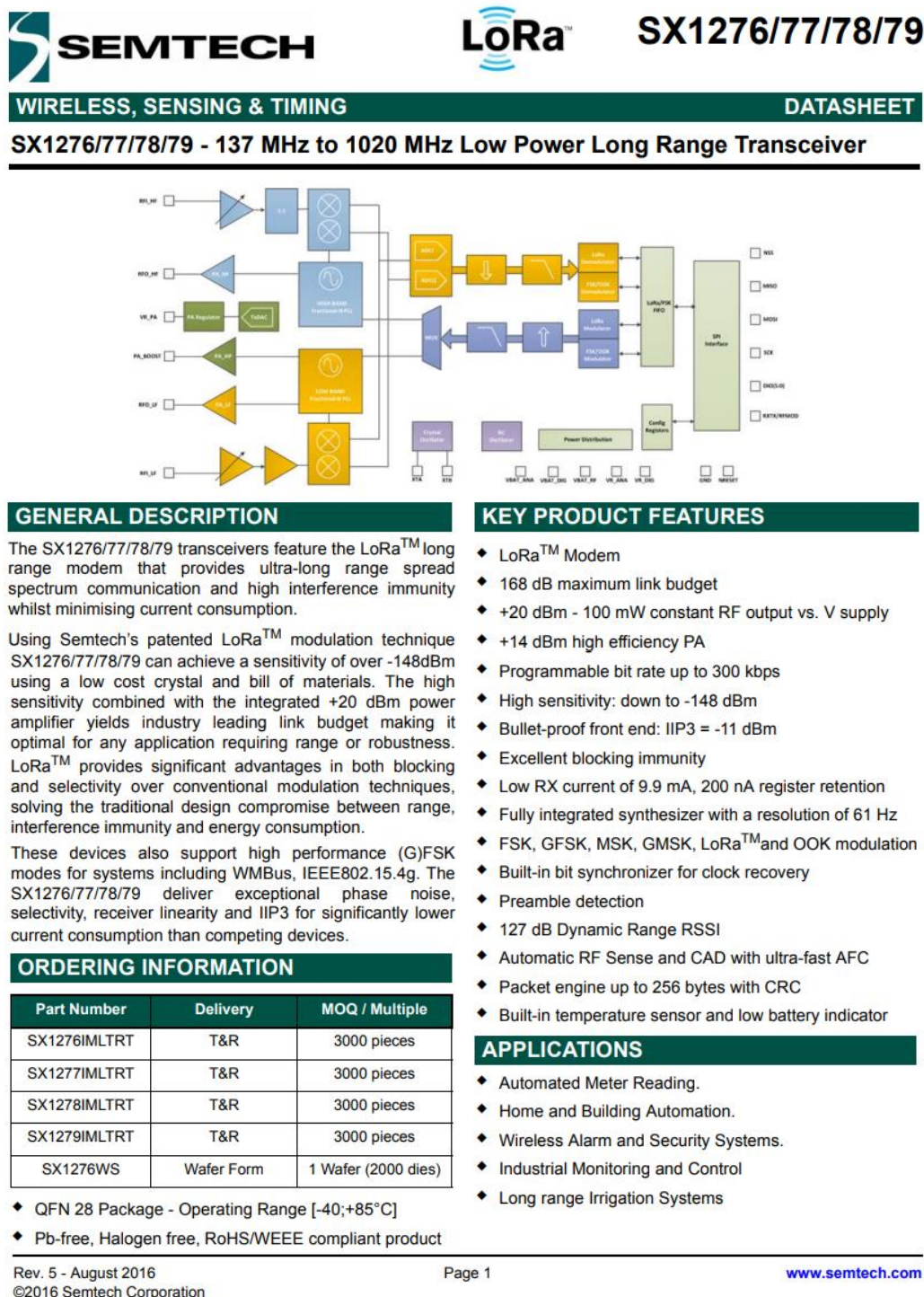


Ilustración N°16: Primera página de hoja de especificaciones LoRa.

Fuente: (Semtech, 2016).