ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

PROTOTIPO DE SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICO PARA SENSORES SÍSMICOS APLICADO AL MONITOREO DE VOLCANES ACTIVOS PARA EL INSTITUTO GEOFÍSICO

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

JOSÉ LUIS VERA CALDERÓN

joseluiavera@live.com

DIRECTOR: MSc. MARCO ESTEBAN YACELGA PINTO

marco.yacelgap@epn.edu.ec

CODIRECTOR: MSc. WILSON LEONEL ENRÍQUEZ LÓPEZ

wenriquez@igepn.edu.ec

Quito, agosto 2019

AVAL

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por José Luis Vera Calderón, bajo nuestra supervisión.

_____

MARCO ESTEBAN YACELGA PINTO
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

_____

WILSON LEONEL ENRÍQUEZ LÓPEZ
CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, José Luis Vera Calderón, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

_____

JOSÉ LUIS VERA CALDERÓN

DEDICATORIA

A mi madre, por su gran amor y esfuerzo. Todas sus enseñanzas y valores me transmitieron serenidad en aquellos momentos en los que el mundo parecía desmoronarse. Así aprendí a levantarme y continuar, siempre adelante, sin perder el Norte.

Es para mí un privilegio ser hijo de tan maravilloso ser.

AGRADECIMIENTO

Estas líneas las escribo para las personas que son el vapor de la locomotora, y a los obreros que construyeron junto a mí los rieles de este viaje. A mis padres por la vida, por sus enseñanzas y consejos, a mis colegas del área técnica del IG por el aliento diario para continuar, a Wilson Enríquez por ser el *alma máter* de la idea. A mis amigos, por tejer conmigo innumerables historias incontables. Al viento, al sol y al mar, a la montaña y a la playa, al *dark side of the moon*, y a cada nube que inspiró un pensamiento sobre electrónica. Finalmente, a la interfaz aire por ser parte de mis pulmones y ser el velo de novia de este proyecto.

A la princesa de Alcatraz, al portero de la puerta azul, al artillero de sonetos del titiritero, pero en particular, a ti, persona especial que lee estas hojas que espero perduren en lo efímero del tiempo. Te agradezco en particular, porque ahora eres parte de mi vida y en donde quiera que estés de seguro tendremos recuerdos en común que no olvidamos, espero que sean buenos, espero también, que algunos otros sean mejores. Gracias por tomarte el tiempo de encontrarte en este fragmento de papel. Por último, prepárate para la aventura, porque a lo largo de la rivera de esta playa que son las hojas de esta tesis, te contaré sobre un proyecto que hace de mi sueño algo real.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA II
DEDICATORIA III
AGRADECIMIENTO IV
ÍNDICE DE CONTENIDO V
RESUMEN IX
ABSTRACT X
1. INTRODUCCIÓN 1
1.1. Objetivos 3
1.2. Situación Actual 3
1.3. Alcance 5
1.4. Marco Teórico 6
1.4.1. Conversión de señales 6
1.4.1.1. Conversión Analógica – Digital 7
1.4.1.1.1. Muestreo 7
1.4.1.1.2. Cuantificación 11
1.4.1.1.3. Codificación 12
1.4.2. Conversión Digital – Analógica 12
1.4.3. Hardware 14
1.4.3.1. Arduino Uno 14
1.4.3.2. Geófono 15
1.4.3.3. Sistema Solar Fotovoltaico 15
1.4.3.3.1. Panel Solar Fotovoltaico 15
1.4.3.3.2. Controlador de carga 16
1.4.3.4. Batería 16
1.4.3.5. Conversor DC - DC 17
1.4.3.6. Regulador de voltaje 18
1.4.4. Protocolos de Comunicación 18
1.4.4.1. *Inter – Integrated – Circuit* (I2C) 18
1.4.4.2. *Serial Peripheral Interface* (SPI) 19
1.4.4.3. *Universal Asynchronous Receiver – Transmitter* (UART) 22

1.4.4.4. *Enhanced ShockBurst* (ESB) 23
1.4.4.4.1. FIFOs en ESB (*First Input First Output*) 24
1.4.4.4.2. TX_FIFO 25
1.4.4.4.3. RX_FIFO 25
1.4.4.4.4. Transacción de paquetes en ESB 25
1.4.4.4.5. Formato de trama ESB 26
2. METODOLOGÍA 28
2.1. Selección de dispositivos 29
2.1.1. Geófono L4C Sercel 29
2.1.2. Sistema Fotovoltaico 31
2.1.2.1. Controlador de carga SunSaver SS-10L-12V 31
2.1.3. Módulo LM2596 Conversor de Voltaje 32
2.1.4. Módulo XL6009 Conversor de Voltaje 33
2.1.5. Regulador de Voltaje AMS1117 34
2.1.5.1. AMS1117 5 V 34
2.1.5.1. AMS1117 3.3V 35
2.1.6. Conversión Analógica – Digital ADS1115 35
2.1.7. Conversión Digital – Analógica MCP4725 37
2.1.8. Módulo de Radio NRFL2401+ 38
2.1.9. Pantalla OLED 0.96” 40
3. DISEÑO 41
3.1. Etapas de Diseño 41
3.2. Transmisor 43
3.2.1. Componentes del Sistema TX 43
3.2.1.1. Módulo ADS1115 43
3.2.1.2. Módulo NRF24L01+ 44
3.2.1.3. Elementos adicionales 45
3.2.1.4. Interconexión entre elementos 45
3.2.2. Software del Transmisor 46
3.2.2.1. Declaración de librerías 47
3.2.2.2. Configuración inicial del *script* 49
3.2.2.3. Datos procesados del ADS1115 50
3.2.2.4. Procesamiento de Datos y Transmisión 51
3.3. Receptor 51

3.3.1. Componentes del Sistema RX 51
3.3.1.1. Módulo NRF24L01+ 51
3.3.1.2. Módulo MCP4725 51
3.3.1.3. Módulo OLED 0.96” 52
3.3.1.4. Elementos adicionales 52
3.3.1.5. Interconexión entre elementos 52
3.3.2. Software del Receptor 53
3.3.2.1. Recepción de datos 54
3.3.2.2. Gráfica de la señal en el Display 55
3.3.2.3. Salida de datos por DAC MCP4725 56
3.3.2.4. Salida Serial de Datos 56
3.4. PCB (*Printed Circuit Board*) 58
3.4.1. Primera versión 58
3.4.2. Segunda versión 60
3.4.3. Tercera versión 63
3.5. Sistema de Alimentación 65
3.5.1. Cálculo de paneles solares y baterías 66
3.6. Alternativa Energética 70
3.7. Configuración de los dos sistemas punto a punto 72
3.8. Montaje Final del Prototipo 73
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 77
4.1. Resultados planificados 77
4.2. Resultados obtenidos 77
4.2.1. Consumo energético 79
4.2.2. Alcance 81
4.2.2.1. Ambiente Urbano 81
4.2.2.2. Ambiente Rural 84
4.2.3. Pruebas adicionales 87
4.2.3.1.1. Vegetación 87
4.2.3.1.2. Lluvia 89
4.2.4. Resumen 90
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 93
5.1. CONCLUSIONES 93
5.2. RECOMENDACIONES 94

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 96
ANEXOS 105

RESUMEN

El Instituto Geofísico de la EPN emplea cables de cobre para la adquisición de datos desde los sensores sísmicos, sin embargo se asocian varios problemas a esta actividad. En particular, los cables sufren deterioro por causas como el paso del tiempo, factores climáticos y/o animales silvestres como roedores u otros. También, surgen otros inconvenientes, tales como: dificultad para el cambio de topología en la red de adquisición, mayores tiempos de movilización vinculados al transporte del cable, así como un incremento en el riesgo de lesiones en el personal a causa del peso de los cables ($35\ kg$ aproximadamente).

Dicho lo anterior, el presente proyecto se enfoca en el desarrollo e implementación de un prototipo de comunicación inalámbrico entre un sensor sísmico y una estación de adquisición de datos intermedia. Por lo tanto, se seleccionarán minuciosamente elementos electrónicos, los cuales permitirán que la estación intermedia y el geófono (sensor sísmico) puedan separarse una distancia entre 100 y $200\ m$. Como resultado, al minimizar el uso de cables de cobre, también se reducen las dificultades asociadas a la instalación de estaciones sísmicas en terrenos de difícil acceso.

Finalmente, la ventaja de este proyecto consiste en ayudar al personal técnico del Instituto Geofísico de la EPN en el montaje y mantenimiento de estaciones de monitoreo sísmico mediante un sistema de comunicación inalámbrico, el cual sea de fácil instalación y que además se enfoque en volcanes que presenten alto riesgo eruptivo.

PALABRAS CLAVE: inalámbrico, monitoreo, volcán, sensor

ABSTRACT

Geophysics Institute of the EPN uses cooper wires for the acquisition of seismic data, but there are many problems associated about the use of these elements. First, these cables suffer damage due to the pass of time, weather conditions, and/or wild animals (mainly rodents). Second, the difficulty associated about change the transmission topology and the increment in the time required to move this element (cable) to the work site. Besides, the technical staff are more feasible to suffer injuries by transporting these heavy cables (approximately $35\ kg$).

The present project is focused on the development and implementation of a wireless communication prototype between a seismic sensor and an intermediate data acquisition station. Later, electronic elements will be carefully selected and it could allow that the intermediate station and the geophone (seismic sensor) could be separated a distance between 100 to $200\ m$. As a result, at the same time the copper wiring is reduced, and the difficulties for installing seismic sensors in harsh terrain with not feasible access are reduced too.

The main advantage of this project consist of providing to the technical staff of the Geophysical Institute of the EPN a wireless communication system which is easy to install. It will help the technical staff with the assembly and maintenance of seismic monitoring stations in volcanoes that presents a high risk of eruption.

KEYWORDS: wireless, monitoring, vulcano, sensor

1. INTRODUCCIÓN

El Cinturón de Fuego del Pacífico es un escenario de alta actividad sísmica y volcánica, que concentra la mitad de los volcanes activos del mundo [1]. En particular, Ecuador se encuentra ubicado sobre esta zona y de acuerdo a la información del *Global Volcanism Program de la Smithsonian Institution* (GVP-SI), Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG) y el mapa de la Secretaría de Riesgos, se concluye que en el país existen 98 volcanes, de los cuales 31 presentan actividad (volcanes potencialmente activos, activos y en erupción) [2], tal como se aprecia en la Figura 1.1.

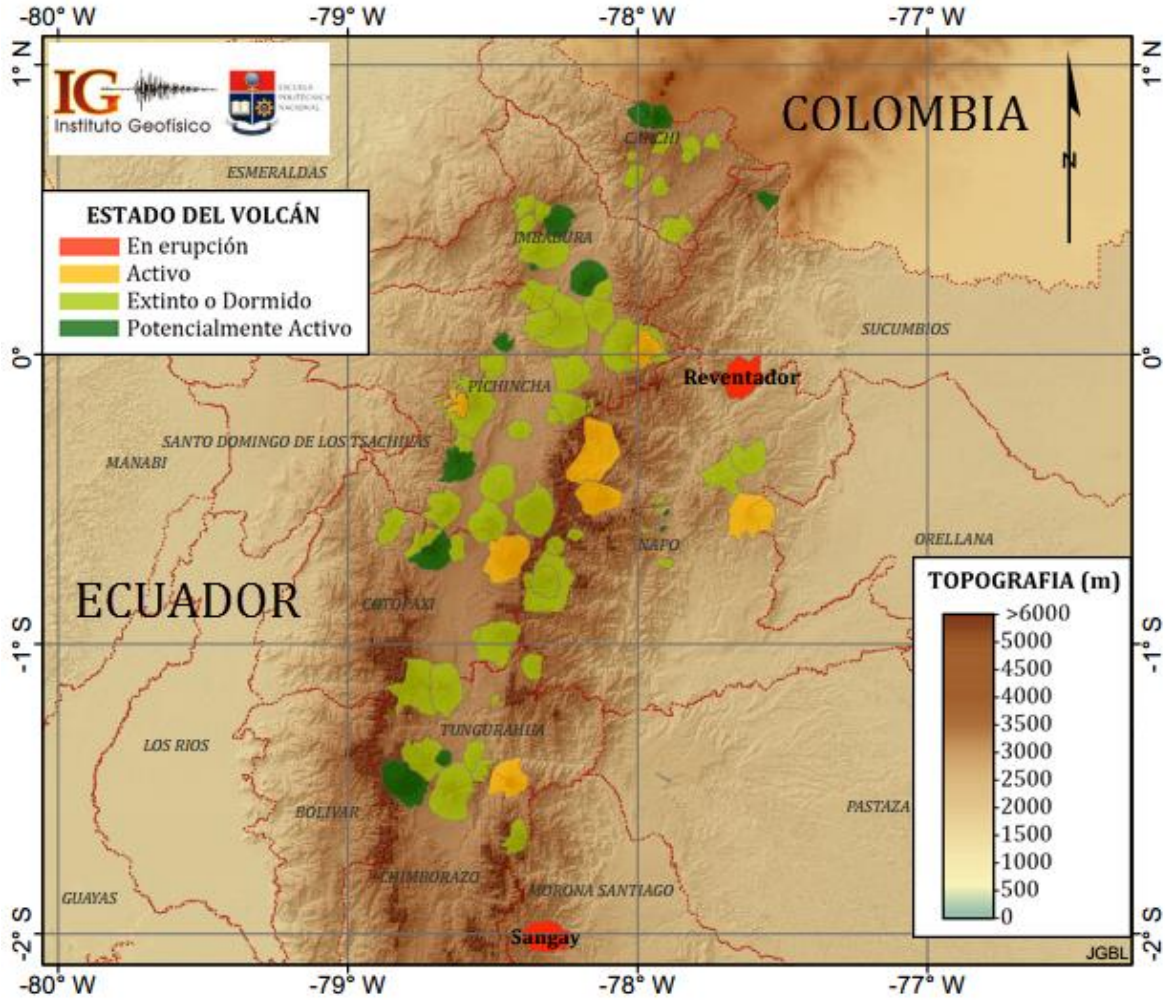


Figura 1.1. Mapa de volcanes en Ecuador (Datos extraídos el 16 de mayo de 2019)

La actividad en los volcanes puede medirse a través de diferentes métodos de monitoreo, los cuales son complementarios entre sí e incluyen la medición de gases, inclinación, GPS (*Global Positioning System*), deformación, gravimetría, sismicidad entre otros [3]. De los mencionados, el método de sismicidad es uno de los principales para determinar

fenómenos volcánicos y consecuentemente, si existe un incremento en la actividad geodinámica del volcán significará que es posible la ocurrencia de una erupción [4].

Además, para seguir de cerca la actividad sísmica del volcán, se colocan múltiples sensores que se comunican con la estación de adquisición de datos a través de cable de cobre (multifilar #18 de 24 o 26 hilos). Posteriormente, la información es enviada hasta las instalaciones del IG en Quito, a través de la robusta infraestructura de redes de transmisión (radio frecuencia, microondas, satelitales) que el IG posee actualmente [5].

Sin embargo, la utilización de medios físicos, como el cobre, para la recopilación de datos registrados por los sensores sísmicos, presenta varias desventajas, las cuales se mencionan a continuación:

- El deterioro del cable debido a condiciones climáticas adversas.
- Elevados tiempos de instalación de la infraestructura de comunicación.
- Dificultad de transporte y manejo de los cables, debido al peso y tamaño.
- Restricciones cuando se desea un cambio en la topología de adquisición de datos.
- Daños ocasionados por animales silvestres.
- Alta complejidad para la colocación del medio físico en sitios de difícil acceso.

Una alternativa para contrarrestar estos inconvenientes consiste en el uso de tarjetas de programación de bajo costo, que sean fiables y posibiliten una comunicación inalámbrica de alcance medio (aprox. 100 a 200 m). Como resultado, se presenta una manera fácil de acceso a la información en el área de cobertura de la red.

Para aportar al monitoreo de la actividad volcánica, se requiere de varias estaciones que recopilen señales sísmicas de forma simultánea. Por tal razón, el presente proyecto está orientado a la investigación de diseño y construcción de un prototipo inalámbrico de bajo costo, el cual permita la adquisición de las señales y las transmita a una estación receptora intermedia.

Al utilizar tecnologías inalámbricas para el manejo de los datos, además de otorgarle movilidad al sistema, se reducen considerablemente los tiempos requeridos para la instalación del mismo. Un análisis posterior a este estudio, permitirá el cambio de topología en la red inalámbrica (anillo, malla, estrella, etc.), siendo ésta una de las principales ventajas en comparación a los medios físicos [6].

Adicionalmente, para la elaboración del prototipo se utilizará la placa Arduino Uno, debido a que presenta condiciones de consumo energético menores a los requeridos por otras placas, como: Raspberry Pi 3, Intel Galileo Gen 2 y Zolertia [7][8][9][10]. Debido a la naturaleza versátil del lenguaje de programación, éste servirá como base para futuros proyectos de similares características dentro y fuera del IG.

Por último, el sistema busca la optimización de recursos en el IG, tanto económicos como de personal. En consecuencia, la instalación del mismo demandará menos personal en comparación con el requerido para la implementación de la infraestructura cableada de comunicación.

1.1. Objetivos

El presente proyecto consiste en desarrollar un prototipo de sistema de comunicación inalámbrico para sensores sísmicos aplicado al monitoreo de volcanes activos para el Instituto Geofísico. Los objetivos específicos son:

- Desarrollar el prototipo de sistema de comunicación inalámbrico para sensores sísmicos aplicado al monitoreo de volcanes activos para el Instituto Geofísico.
- Determinar los requerimientos necesarios para la implementación del sistema, mediante el uso de Arduino Uno y software libre.
- Configurar Arduino Uno para la adquisición de las lecturas provistas de los diferentes sensores.
- Diseñar el Prototipo en base a las condiciones climáticas que existen en un volcán.
- Conseguir enlaces inalámbricos de medio alcance, entre los puntos de recopilación de datos y la estación de adquisición.
- Realizar pruebas en campo, del funcionamiento del prototipo en base a los requerimientos del IG.

1.2. Situación Actual

Una configuración típica para la recopilación de datos sísmicos, requiere al menos un cable que transporte la señal entre el sensor y el digitalizador o el respectivo equipo transmisor. Asimismo, en casos complejos se instalan arreglos de sensores, como se mencionó antes, cada uno de estos debe comunicarse con un equipo de captación de información. También, obviando el alto costo por cobertura que supone el uso de cable multifilar de cobre, el problema principal consiste en el transporte de los rollos de cable. Además, considerando las irregularidades del terreno, no es posible el uso de maquinaria o animales de carga

para facilitar el traslado de los materiales, por otro lado, los rollos de cable tienen un peso considerable y en ocasiones pueden lesionar al personal técnico.

Cabe mencionar que, el 7 de noviembre de 2018, CELEC.EP (Corporación Eléctrica del Ecuador) realizó la apertura de las compuertas de la Hidroeléctrica Agoyán con el objetivo de evacuar sedimentos. Aprovechando este evento, personal del Área de Instrumentación efectuó pruebas con un equipo desarrollado en el IG enfocado en el estudio de avalanchas que contienen sedimentos volcánicos y agua (lahares). Para lo cual, se colocaron 10 geófonos (sensor sísmico, ver definición en capítulo 2 sección 2.1.1), cerca del cauce del río para detección de las señales generadas por el paso del caudal. Para terminar, en la Figura 1.2 se aprecia parte del trabajo realizado, donde el peso aproximado del rollo fue de 35 kg.

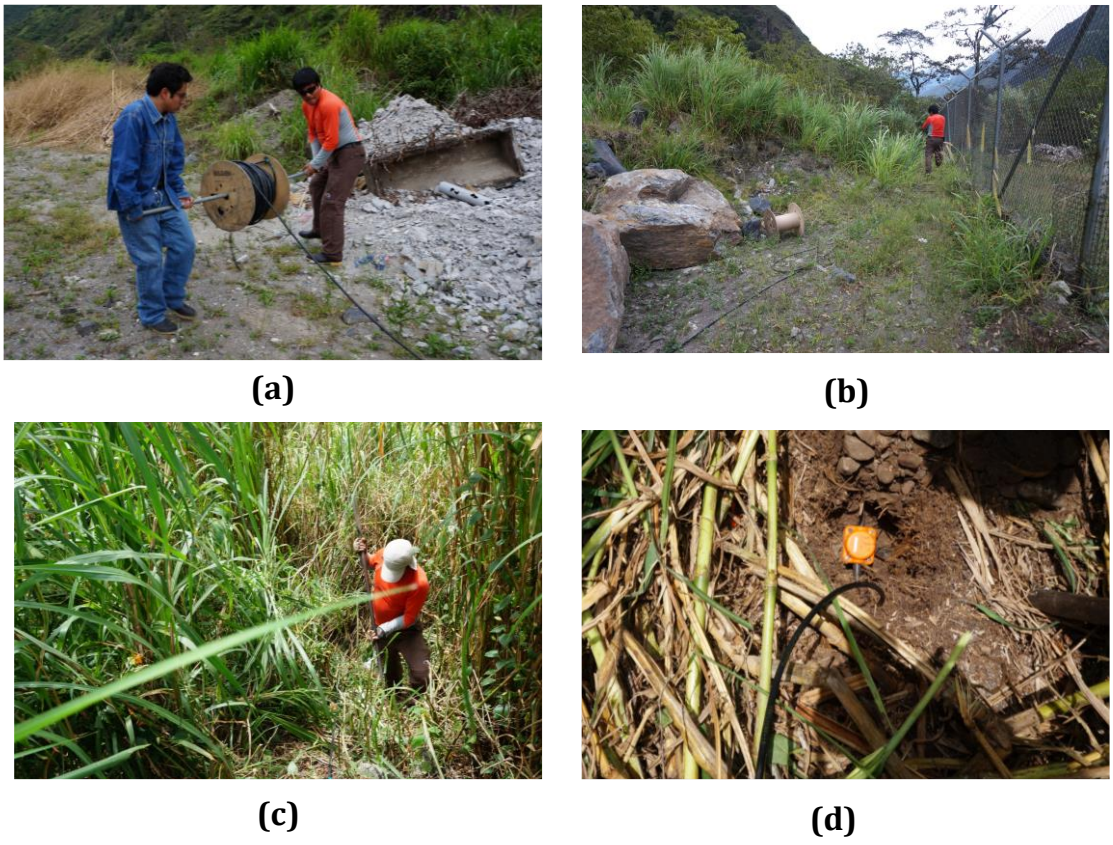


Figura 1.2. Tendido de cable para prueba de comunicación alámbrica:
(a) Transporte del rollo de cable;
(b) Transporte del cable a través de sitios de difícil acceso;
(c) Desobstrucción de obstáculos; (d) Geófono

1.3. Alcance

El prototipo recolectará simultáneamente los datos de un lugar de monitoreo, donde, se realizará la adquisición de dos señales sísmicas, a través de 4 tarjetas Arduino Uno. De hecho, dos tarjetas serán utilizadas para los transmisores que estarán enlazados a un dispositivo que convierte el movimiento de tierra (velocidad) en voltaje, utilizado para conocer señales sísmicas; estos dispositivos se los conoce como geófonos [11] y las dos tarjetas restantes serán los receptores que enviarán la información recibida a la estación intermedia de adquisición, según se aprecia en la Figura 1.3.

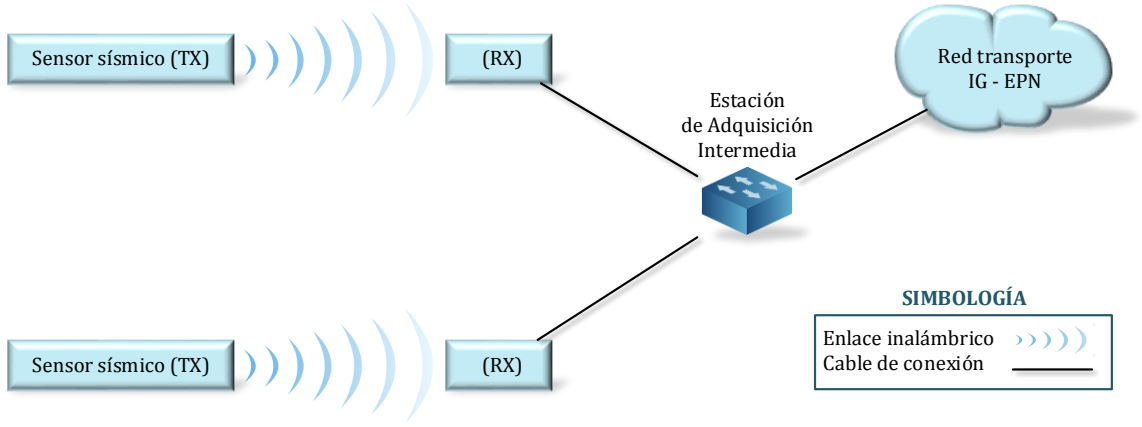


Figura 1.3. Esquema de muestreo de datos del prototipo

Para el suministro de energía eléctrica se utilizará baterías recargables, reguladores de carga, y paneles solares, debido a que es conveniente adaptar el prototipo a las fuentes de energía existentes en las estaciones de monitoreo del IG.

Además, la topología utilizada entre transmisor y receptor requerirá una configuración punto a punto, pues ésto facilita la adición de futuros puntos de monitoreo en el sistema.

También, el enlace inalámbrico punto a punto, será de alcance medio (aprox. 100 a 200 m) para garantizar la integridad de la información debido a las condiciones climáticas adversas. Cabe mencionar que el cable de conexión entre el receptor y la estación de adquisición intermedia será físicamente corto.

Debido a que se tienen dos sensores y la recopilación de datos será simultánea, los receptores buscarán un método para identificar de forma adecuada el sensor del cual provienen las señales.

Para concluir, los datos recopilados en los receptores, se enviarán hacia la estación intermedia, la cual será conectada con la red de transporte de información del IG.

1.4. Marco Teórico

Para minimizar el impacto causado por una eventual erupción se realizan monitoreos continuos, los cuales permiten conocer el grado de dinamismo del volcán. Manifestaciones como deformación del suelo, emanación de gases, cambios en la composición del agua o incremento en la sismicidad, son sinónimos de una evolución en la actividad del mismo.

El presente proyecto está enfocado en la detección de actividad de naturaleza sísmica, mediante el adecuado análisis de los datos recolectados. Los expertos pueden pronosticar el estado de actividad y además elaborar diagnósticos de riesgo, debido a que en los volcanes los sismos están relacionados con el ascenso de magma o gases, y también con el fracturamiento de rocas en el interior.

Con el propósito de comprender con mayor facilidad el funcionamiento del prototipo, es conveniente el análisis de los conceptos asociados con los elementos relacionados al desarrollo del presente proyecto.

1.4.1. Conversión de señales

Los circuitos integrados han estimulado el desarrollo de hardware digital, más rápido, más potente, de menor tamaño y costo reducido. Por consiguiente, se posibilita el diseño y construcción de sofisticados sistemas digitales que tienen la capacidad de realizar funciones de tratamiento de señales, que en general serían bastante complejos y costosos de implementarse mediante circuitos analógicos.

Una ventaja de los sistemas digitales es la versatilidad, debido a que un mismo hardware permite realizar varias operaciones sobre diversas señales, en contraste un sistema analógico requiere un hardware específico para cada tipo de operación o transformación que se desee aplicar a la señal.

La mayor parte de las señales que son de interés práctico en los distintos campos de la ingeniería y de la ciencia (tales como: señales biológicas, señales de comunicación como video y audio, señales sísmicas), son analógicas. Estas señales se procesan directamente mediante sistemas analógicos para obtener información deseada o cambiar las características, pero una alternativa de procesamiento es a través del tratamiento digital de señales. Para efectuar el tratamiento digital, es necesario un conversor analógico-digital, el cual es una interfaz entre la señal analógica y el procesador digital. En particular, el procesador digital puede ser una computadora o un pequeño microprocesador que realizará las tareas deseadas sobre la señal que ingresa. Si la señal digital proveniente del procesador es requerida en formato analógico, se debe implementar un conversor digital-

analógico, el cual será un interfaz entre el formato digital y el analógico. El proceso de manipulación de la señal analógica se aprecia en la Figura 1.4.

Figura 1.4. Diagrama de bloques de un sistema digital de señales [12]

1.4.1.1. Conversión Analógica – Digital [12]

Si se requiere procesar a través de medios digitales las señales analógicas, es necesario transformarlas a un formato digital, es decir, a secuencias de números de precisión finita, para lo cual se requiere un muestreo, cuantización y codificación. Las etapas requeridas para la conversión analógico-digital se muestran en la Figura 1.5.

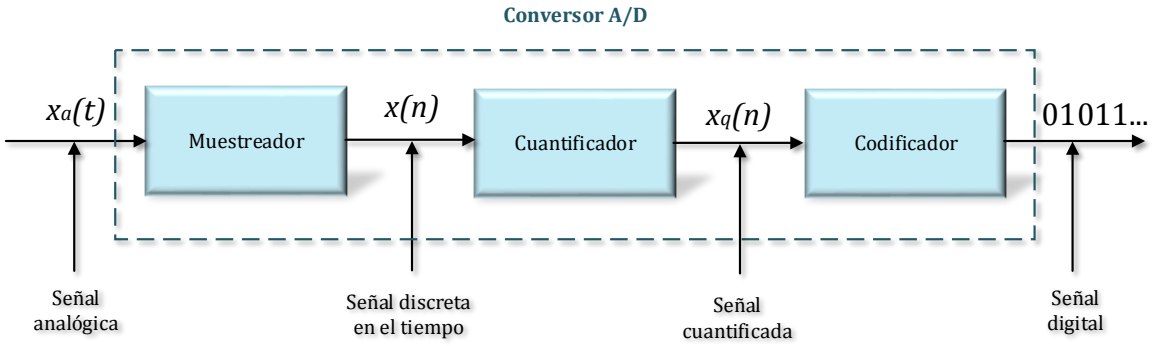


Figura 1.5. Etapas de conversión analógica-digital [12]

1.4.1.1.1. Muestreo

En esta etapa se realiza la discretización en tiempo de una señal continúa mediante la adquisición de muestras. Aunque existen varias formas de muestreo de señales analógicas, se enfocará el análisis al muestreo periódico o uniforme (Ecuación 1.1), ya que es el más utilizado en la práctica.

$x(n) = x_a(nT), \quad -\infty < n < \infty$ **Ecuación 1.1.** Ecuación de muestreo periódico [12]

Dónde $x(n)$ es la señal obtenida luego de adquirir muestras de la señal analógica $x_a(t)$ cada T segundos [12] y ésta conversión se aprecia en la Figura 1.6.

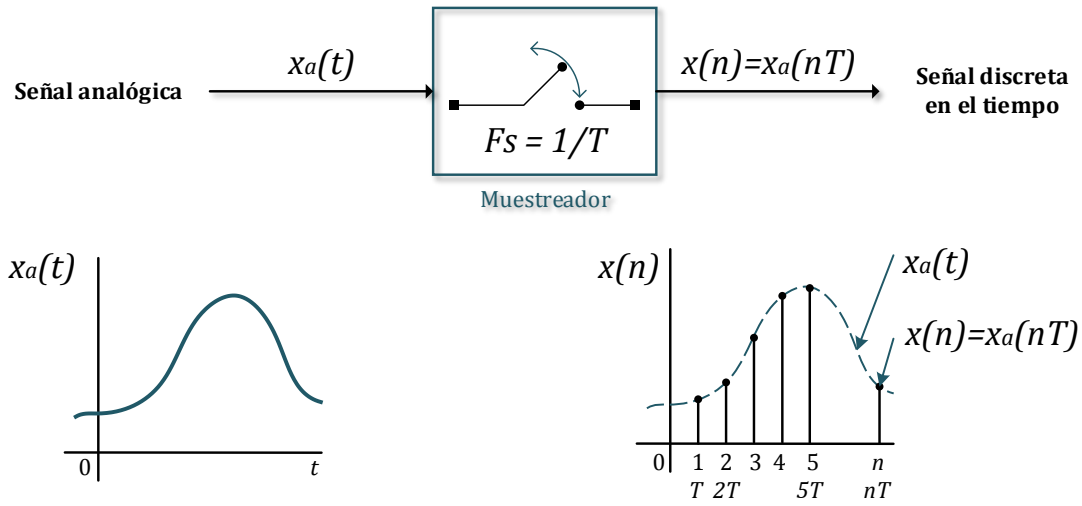


Figura 1.6. Muestreo periódico de una señal analógica [12]

El intervalo de muestreo, es el lapso de tiempo T entre muestras consecutivas y su equitativo $1/T = Fs$ es la tasa de muestreo (medida en s.p.s *samples per second* - muestras por segundo) o frecuencia de muestreo (medida en hercios), mientras que, la frecuencia fundamental de $p(t)$ es $\omega_s = 2\pi/T$.

Lo anteriormente descrito, se modela matemáticamente como la convolución entre un tren de impulsos periódicos $p(t)$ (Ecuación 1.2) y la función $x_a(t)$ que representa la señal analógica. A continuación, lo mencionado se muestra en la Ecuación 1.3.

$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT)$ **Ecuación 1.2.** Tren de impulsos periódicos

$x_p(t) = x_a(t)p(t)$ **Ecuación 1.3.** Muestreo periódico con tren de pulsos

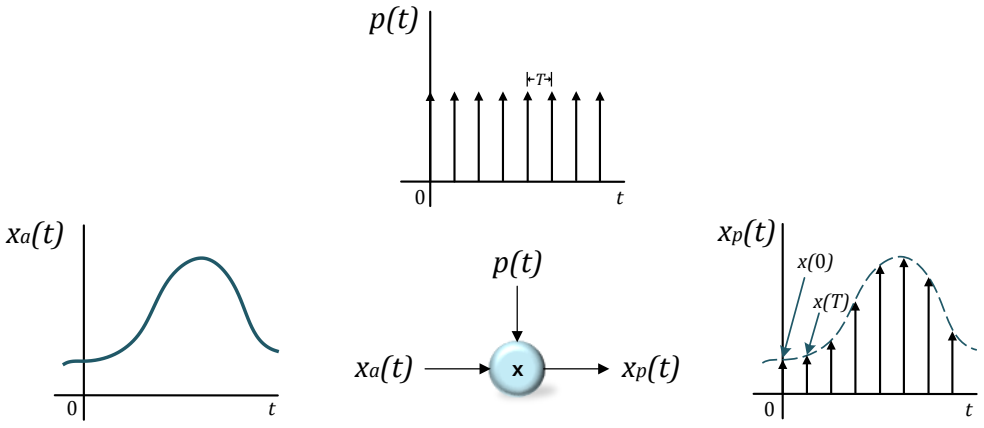


Figura 1.7. Muestreo con tren de impulsos

De esta manera, como se observa en la Figura 1.7, la amplitud del tren de impulsos de la señal resultante $x_p(t)$, es igual a la amplitud de la muestra de $x_a(t)$ en los puntos donde se localizan los impulsos separados por el intervalo T; es decir,

$$x_p(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(nT)\delta(t - nT)$$

Adicionalmente, debido a las propiedades de convolución, lo mencionado se puede expresar como

$$X_p(j\omega) = \frac{1}{2\pi}[X(j\omega) * P(j\omega)]$$

Donde,

$$P(j\omega) = \frac{2\pi}{T} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(\omega - k\omega_s)$$

Debido a que la convolución realiza únicamente un desplazamiento de la señal, $[X(j\omega) * \delta(\omega - \omega_o) = X(j(\omega - \omega_o))]$ se puede exponer la siguiente expresión,

$$X_p(j\omega) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} X(j(\omega - k\omega_s))$$

En consecuencia, la función del espectro de la señal muestreada $X_p(j\omega)$, es una función periódica de la frecuencia (ω) que constituye una superposición de réplicas de $X(j\omega)$ escaladas y desplazadas por $1/T$, tal como se muestra en la Figura 1.8.

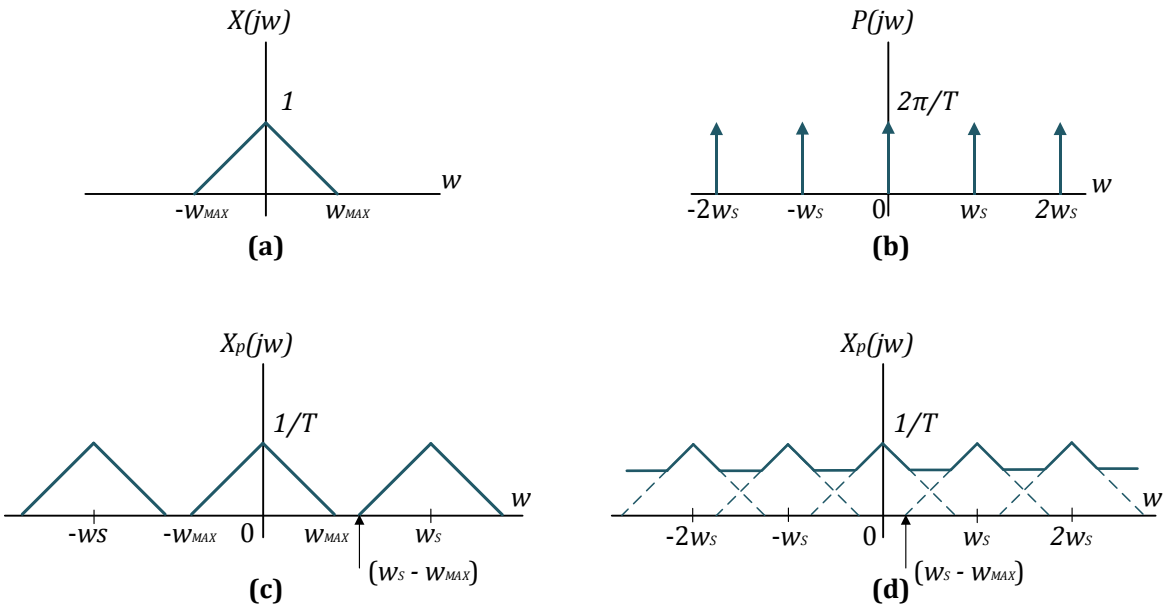


Figura 1.8. Efecto del muestreo en el dominio de la frecuencia: (a) Espectro de la señal original; (b) Espectro de la función de muestreo; (c) Espectro de la señal con un muestreo $\omega_S > 2\omega_{MAX}$; (d) Espectro de la señal con un muestreo $\omega_S < 2\omega_{MAX}$

En la Figura 1.8 (c) se observa que no hay traslape en los duplicados de $X(j\omega)$ cuando $\omega_{MAX} < (\omega_S - \omega_{MAX})$ o expresado de otra forma, cuando $\omega_S > 2\omega_{MAX}$ (donde ω_S es la frecuencia de muestreo). Sin embargo, como se muestra en la parte (d) de la misma figura, existe traslape cuando la frecuencia de muestreo es inferior a dos veces la frecuencia máxima de la señal $\omega_S < 2\omega_{MAX}$.

Por lo tanto, si $\omega_S > 2\omega_{MAX}$, la señal original $x_a(t)$ puede ser recuperada a partir de $x_p(t)$ por medio de un filtro pasabajo con ganancia de T y una frecuencia de corte ω_c situado entre ω_{MAX} y $\omega_S - \omega_{MAX}$ como se aprecia en la Figura 1.9.

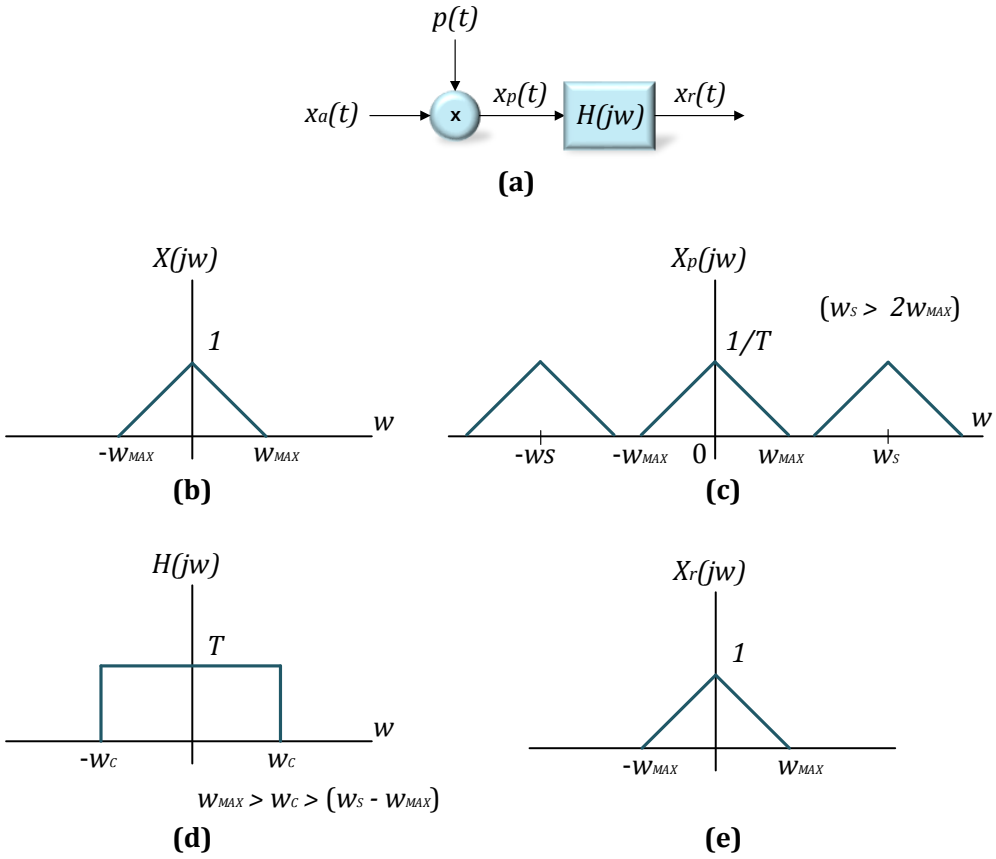


Figura 1.9. Recuperación de una señal continua a partir de sus muestras con el uso de un filtro pasabajos: (a) Sistema de muestreo y reconstrucción; (b) Espectro de $X(t)$; (c) Espectro de $x_p(t)$; (d) Filtro pasabajos ideal para recuperar $X(j\omega)$ a partir de $X_p(j\omega)$ (e); Espectro de la señal recuperada $X_r(j\omega)$

En conclusión, para reconstruir fielmente una señal analógica, “La frecuencia de muestreo debe ser al menos dos veces la frecuencia más alta contenida en la señal” [13]. Lo mencionado anteriormente, se conoce como teorema de Nyquist, que en términos matemáticos se muestra en la Ecuación 1.4.

$\omega_S \geq 2\,\omega_{MAX}$ **Ecuación 1.4.** Teorema de muestreo de Nyquist

1.4.1.1.2. Cuantificación

Cuando se realiza el muestreo se obtienen valores continuos en instantes finitos, así también, en la cuantificación se realiza la discretización de la amplitud de aquellas muestras. La discretización se logra cambiando el valor de la amplitud original, por una amplitud finita seleccionada entre un conjunto de valores posibles, conocidos como niveles de cuantización.

$Q[x(n)]$ representa la operación de cuantización de las muestras $x(n)$, y $x_q(n)$ y señala la secuencia de muestras cuantizadas a la salida del cuantizador, tal como se señala en la Ecuación 1.5.

$x_q(n) = Q[x(n)]$ **Ecuación 1.5.** Cuantización de una señal

La diferencia obtenida entre la amplitud de la muestra cuantificada $x_q(n)$ y la amplitud de la muestra original $x(n)$ se la conoce como ruido de cuantización o error de cuantificación y se lo representa con $e_q(n)$, tal como se aprecia en la Ecuación 1.6.

$e_q(n) = x_q(n) - x(n)$ **Ecuación 1.6.** Error de cuantización

Consecuentemente, la señal $x(n)$ discreta en tiempo es el resultado de la adquisición de datos de señal $x_a(t)$ a una frecuencia de muestreo $F_s = 1Hz$ (Ver Figura 1.10).

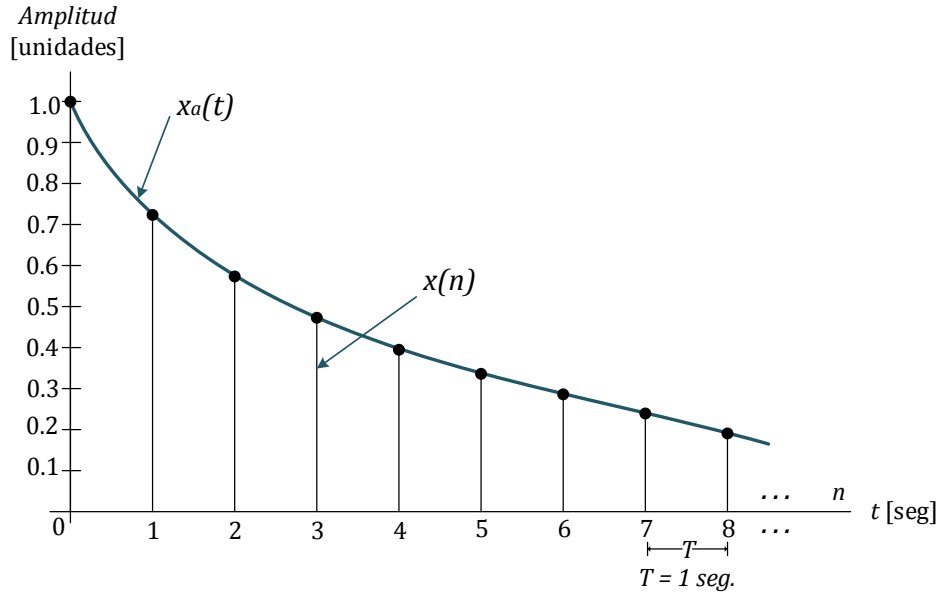


Figura 1.10. Muestreo de señal analógica con frecuencia de $1Hz$

En la Figura 1.11, como resultado de la cuantización se aprecia un error de cuantificación en la señal $x_q(n)$.

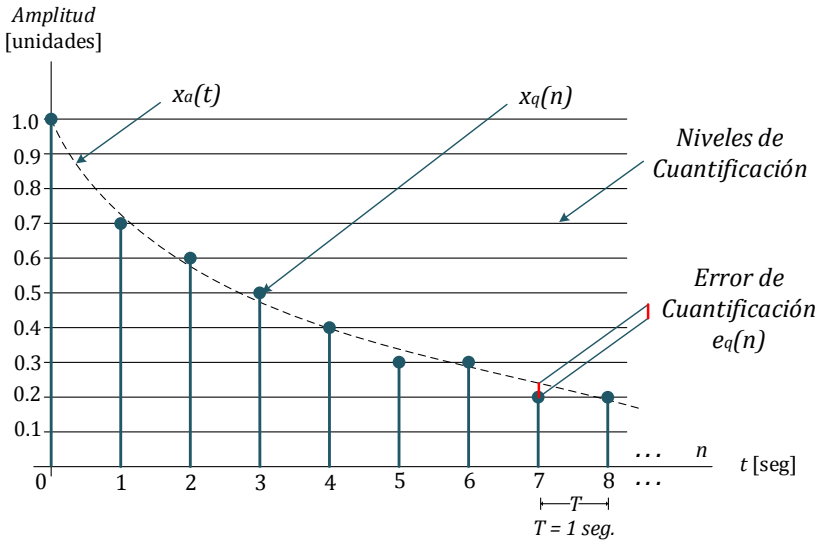


Figura 1.11. Cuantificación de señal analógica

1.4.1.1.3. Codificación

En esta parte del proceso de digitalización, a cada nivel de cuantificación se le asigna un único valor binario, Es decir que, si se cuenta con una señal de L niveles, se requiere por lo menos L distintos números binarios. De esta manera se asigna una secuencia binaria de b bits a cada valor discreto de la señal cuantizada $x_q(n)$.

Con b bits se crean hasta 2^b números binarios distintos y si se requiere de L números distintos, donde matemáticamente se expresa que $2^b \geq L$. En otras palabras, el número de bits que necesita el codificador es un valor entero mayor o igual que $log_2(L)$, y lo mencionado se expresa en la Ecuación 1.7.

$b \geq log_2 L$ **Ecuación 1.7.** Número de bits necesarios para codificar L niveles

Por ejemplo, si se tienen 3 niveles, se requieren de al menos $2\ bits$ para que todos los niveles tengan una secuencia binaria única.

1.4.2. Conversión Digital – Analógica

En general, en la etapa final de la digitalización se reconstruye la señal original a partir de las muestras digitales, en otras palabras, una conversión digital – analógica. La tarea básica del conversor digital - análogo es la interpolación, en la cual se interconectan las muestras mediante segmentos de línea recta (Ver Figura 1.12), sin embargo, este tipo de conversión es complejo y poco práctico.

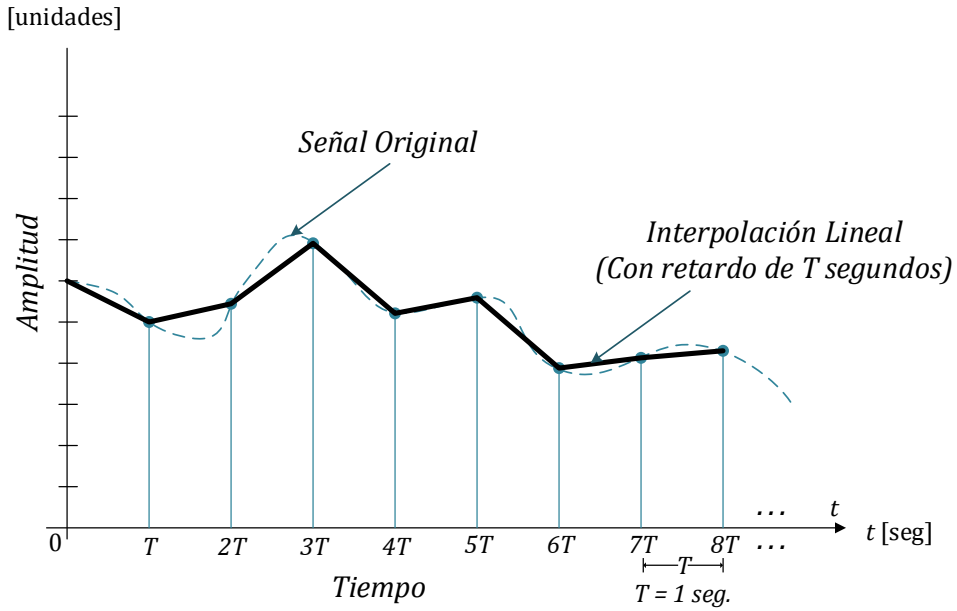


Figura 1.12. Conector lineal de puntos (con un retardo de T segundos)

El convertidor digital – análogo más sencillo es el retenedor de orden cero conocido también como aproximación por escalones. Su principio de funcionamiento consiste en conservar el valor de una muestra hasta que la siguiente muestra se reciba (Ver Figura 1.13).

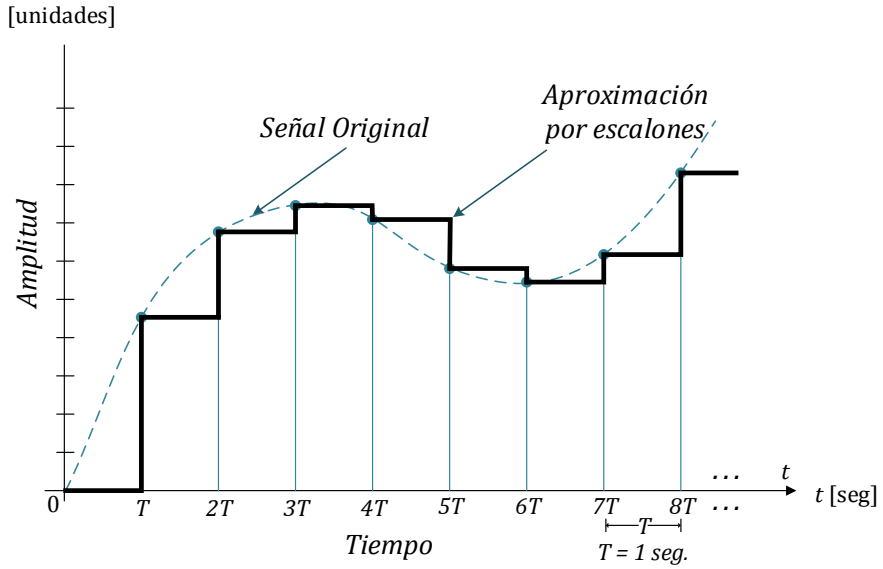


Figura 1.13. Conversión digital-analógica (D/A) con retención de orden cero

1.4.3. Hardware

En esta sección se exponen los componentes elementales para el desarrollo del proyecto, considerando propiedades y características de funcionamiento que permitan un apropiado desempeño.

1.4.3.1. Arduino Uno

Es una tarjeta electrónica de hardware libre basada en el chip microcontrolador ATmega328P [7]. Además, es ideal para el desarrollo de software, debido a la simplicidad del lenguaje de programación. Cumple también con los estándares de compatibilidad electromagnética establecidos por la FCC [14]. Las características más relevantes se encuentran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Especificaciones Técnicas de Arduino Uno Rev3 [7]

Especificaciones Arduino Uno Rev3	
Microcontrolador	ATmega328P
Tensión de funcionamiento	5 V
Voltaje de entrada (límite)	6-20 V
Pines de E / S digitales	14
Pines de E / S digitales de PWM	6
Clavijas de entrada analógica	6
Corriente DC por Pin E / S	20 mA
Corriente DC para 3.3V Pin	50 mA
Memoria flash	32 kB (ATmega328P)
SRAM	2 kB (ATmega328P)
EEPROM	1 kB (ATmega328P)
Velocidad de reloj	16 MHz
Longitud	68.6 mm
Anchura	53.4 mm
Peso	25 g

El Arduino IDE es el software utilizado para la programación, donde el entorno está escrito en Java y se basa en *Processing,* así como otro software de código abierto. Adicionalmente, el lenguaje puede ampliarse mediante el uso de bibliotecas C++ lo que permite añadir código AVR-C directamente al código de Arduino [15]. Por último, una ventaja que presenta el software de Arduino sobre la mayoría de los sistemas de otros microcontroladores, es que no está limitado a Windows sino que también se puede ejecutar en sistemas operativos como Macintosh OS X, y Linux [16].

1.4.3.2. Geófono [17]

Es un dispositivo transductor de velocidad en voltaje que posee un voltaje de referencia cuando está en equilibrio. Sin embargo, en una respuesta sísmica se genera una variación de voltaje, donde el diferencial entre el voltaje generado y el de referencia se emplea posteriormente para análisis de fenómenos telúricos [18].

El geófono más simple y de uso extendido es el geófono electromagnético debido a su diseño sencillo, puesto que, se encuentra constituido por una bobina y un imán. La bobina suele estar fijada rígidamente junto a la carcasa del geófono, la cual mantiene contacto con el suelo, de tal modo que se moverá con la superficie de la tierra en respuesta de movimientos sísmicos. Por otro lado, el imán cuelga sujetado por resortes y cualquier movimiento entre la bobina y el imán genera un voltaje proporcional a la velocidad del movimiento entre los terminales de la bobina.

En particular, un factor clave es la frecuencia de resonancia, la cual debe ser un valor bajo para medir señales de baja frecuencia. Por otra parte, el geófono debe poseer un gran ancho de banda para posibilitar la medición de señales de alta frecuencia, donde los resortes mecánicos suelen reducir el rendimiento.

1.4.3.3. Sistema Solar Fotovoltaico

En esta sección se describen elementos para energizar el circuito, considerando las condiciones en las cuales se desarrollará el proyecto.

1.4.3.3.1. Panel Solar Fotovoltaico

Un módulo fotovoltaico o panel fotovoltaico (Figura 1.14), es un dispositivo eléctrico conformado por un conjunto de celdas montadas sobre un marco o estructura de soporte. Las muestras se conectan eléctricamente en serie o paralelo con el objetivo de producir un determinado valor de voltaje y de corriente eléctrica continua (DC) [19].

Por otro lado, la conversión de energía de radiación solar en eléctrica, se basa en la propiedad intrínseca que poseen ciertos materiales para producir corriente (liberación de electrones) cuando existe un efecto lumínico sobre ellos; esta propiedad se conoce como efecto fotovoltaico [20]. En general, las celdas fotovoltaicas están constituidas por silicio y en promedio son capaces de generar $0.5\ V$ y $250\ mA$. En condiciones óptimas de radiación, un panel típico constituido por 36 celdas generaría aproximadamente $18\ V$ y $5\ A$ [21].

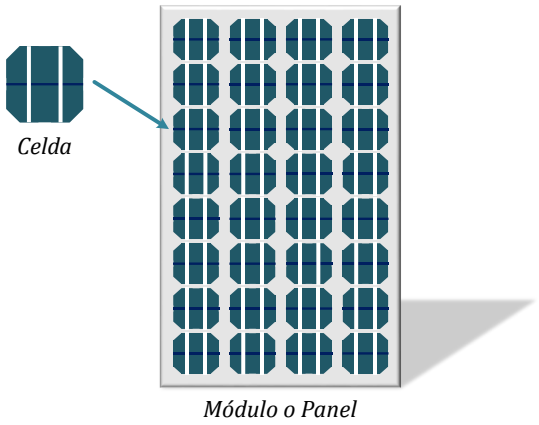


Figura 1.14. Esquema de una celda y panel fotovoltaico [22]

1.4.3.3.2. Controlador de carga

La capacidad de carga de las baterías es limitada, por tanto, se debe evitar que el suministro de energía exceda el umbral de carga recomendado por los fabricantes. De igual manera, es importante evitar la descarga profunda para prolongar la vida útil del instrumento.

Debido a que voltajes y ciclos de carga y descarga son diferentes en cada tipo de batería, se requiere de un dispositivo de control. El instrumento encargado de ejecutar lo mencionado es el regulador y las conexiones se aprecian en la Figura 1.15.

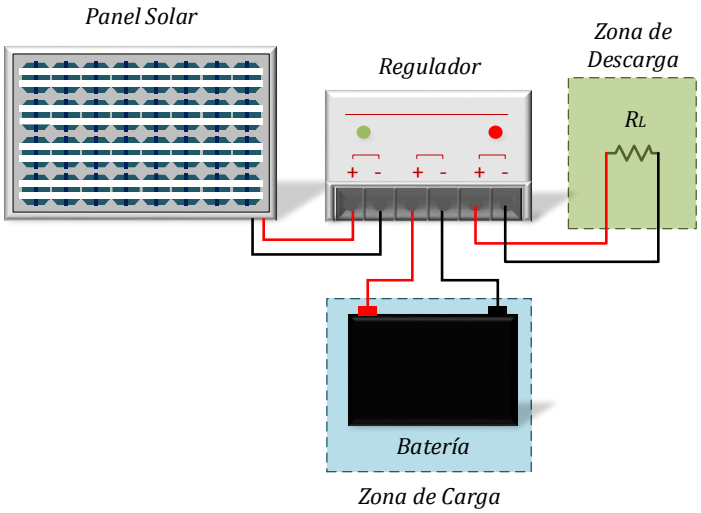


Figura 1.15. Conexión del controlador de carga

1.4.3.4. Batería

Dispositivo que transforma energía química en energía eléctrica, con el objetivo de suministrar voltaje y corriente [23]. El rendimiento de la batería depende de los productos químicos internos, los mismos que limitan capacidad y rapidez con la que se puede obtener corriente.

Se las puede dividir en dos grupos generales: las baterías secundarias o recargables y las baterías primarias conocidas como desechables debido a que son de un solo uso; pues los materiales de los electrodos cambian irreversiblemente durante la descarga (un ejemplo son las pilas alcalinas)

Las baterías secundarias se cargan empleando una corriente apropiada, debido a que la composición de los electrodos tiene la capacidad de ser restaurada [24]. En el mencionado tipo de baterías, se pueden encontrar baterías de ácido-plomo con válvula regulada VRLA (*Valve-Regulated lead-acid***)**, en las cuales siempre que los niveles de presión de la batería se encuentren entre valores seguros, se almacenan los gases generados al interior de la misma con el objetivo de que se recombinen, y a veces con la ayuda de algún catalizador. Por otro lado, cuando los niveles de presión exceden un nivel seguro, la válvula se abre automáticamente permitiendo así una regulación automática, y de ahí proviene su nombre "válvula regulada".

Entre las baterías VRLA se pueden encontrar dos tipos, las AGM y las *Gel Cell*. En las baterías AGM (*Absorbed Glass Mat*) el electrolito se localiza principalmente en los separadores de fibra de vidrio microporoso; aprovechando de esta manera al máximo los volúmenes de las celdas, pero debido a que el electrolito es aún líquido, se procura no almacenarlas en inclinación por una eventual fuga de ácido en la apertura automática de la válvula.

Las *Gel Cell*, conocidas también como baterías de gel o de electrolito gelificado, son baterías en las cuales se adiciona al electrolito sílice pirógena, que en combinación con el ácido sulfúrico resulta una masa similar a un gel. Esta composición es muy resistente frente a vibraciones y se las puede almacenar en cualquier posición. De hecho, los diseños de baterías de gel tienen una resistencia superior a la descarga profunda y esta es la principal diferencia con las AGM, que además por ser un gel reduce la evaporación del electrolito.

1.4.3.5. Conversor DC - DC

Ciertos elementos de los circuitos integrados y otros componentes electrónicos, presentan rangos de voltaje de operación. En particular, si no se considera este rango recomendado por los fabricantes y se suministra un voltaje superior, como resultado se obtiene una degradación en las características de funcionamiento, o un daño irreversible en el equipo [25].

En este sentido, un dispositivo conversor DC – DC, permite el cambio de un determinado voltaje continuo de entrada V_{in}, a un voltaje continuo en la salida V_{out} y algunas veces con limitación de corriente [26]. Además, se tienen dos tipos de conversores los *buck converter* y los *boost converter.*

Los *buck converter* o *step down converter* se utilizan cuando se requiere que el voltaje de salida sea menor que el de entrada $V_{in} > V_{out}$. En contraste, los *boost converter* o *step up converter* se implementan cuando se requiere que el voltaje de salida sea mayor que el de entrada $V_{out} > V_{in}$ [27].

1.4.3.6. Regulador de voltaje

La mayoría de circuitos electrónicos son diseñados para operar bajo un voltaje determinado que en general es del tipo DC. De hecho, un regulador de voltaje mantiene un voltaje continuo, sin fluctuaciones ni ruido para el óptimo funcionamiento del circuito principal. Además, en ocasiones se regula la corriente según lo requerido por la carga.

1.4.4. Protocolos de Comunicación

A continuación, se describen brevemente los protocolos que emplean los componentes electrónicos para su intercomunicación y los necesarios para procesar los datos.

1.4.4.1. *Inter – Integrated – Circuit* (I2C) [28]

Conocido como “Inter C” IIC o I^2C, es un protocolo de conexión síncrona bidireccional entre un maestro (controlador) y cualquier número de esclavos, donde se emplean estados lógicos altos o bajos para la comunicación.

Además, utiliza una línea de comunicación para una señal de reloj (SCL) y la otra línea se ocupa para la transferencia de datos en serie (SDA). Los datos pueden ejecutarse desde el maestro al esclavo (escritura), o desde el esclavo al maestro (lectura), del mismo modo, si no se ocupan las líneas SDA y SCL permanecen en un estado lógico alto [29].

Por otro lado, dependiendo de si transmite o recibe información, un dispositivo se considera maestro o esclavo. Por ejemplo, un LCD (*Liquid crystal display* - pantalla de cristal líquido [30]) siempre será esclavo, pues únicamente recibe información, mientras que, una memoria puede actuar como maestro o esclavo.

Adicionalmente, a un dispositivo se lo considera maestro, cuando inicia la transferencia de datos; en ese momento genera una señal de reloj y el resto de los dispositivos enlazados serán esclavos.

El dato que el maestro (M) envíe a través de la línea SDA tiene una longitud de 1 $byte$ y el número de bytes que se pueden transmitir no está restringido. Sin embargo, cada byte posee un bit correspondiente a un acuse de recibo (ACK) que envía el esclavo (S), tal como se observa en la Figura 1.16.

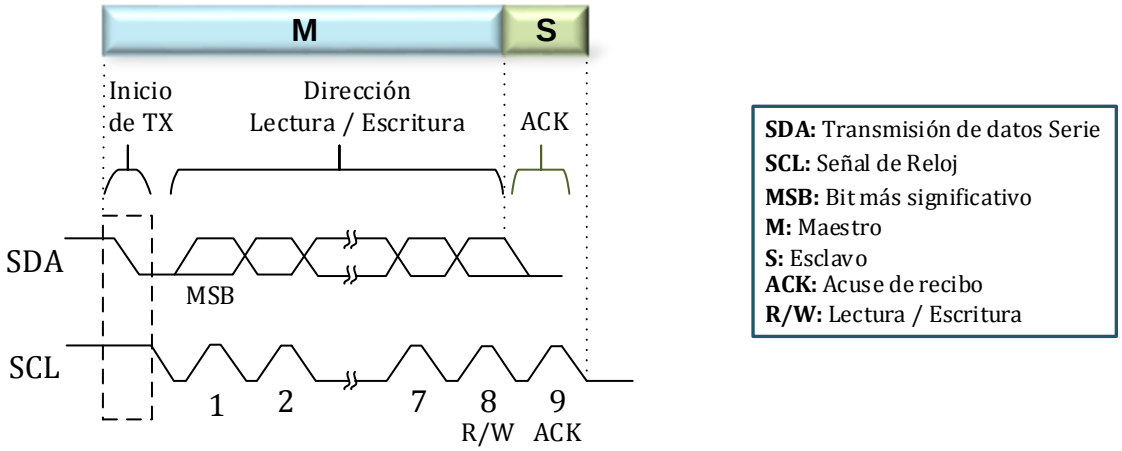


Figura 1.16. Transferencia de datos en I2C [31]

Cabe recalcar que, un esclavo no puede recibir o transmitir otro byte completo de datos hasta que haya terminado de procesar alguna otra función. Por ejemplo, atender una interrupción interna, donde el esclavo mantiene la línea de reloj SCL en estado bajo, para forzar al maestro a un estado de espera. La transferencia de datos continúa cuando el esclavo está listo para otro byte de datos y libera la línea de reloj SCL (dejándola en su estado original alto).

Por último, los datos se pueden transferir a velocidades de $100\ kbps$ en el modo estándar (*standard-mode*), $400\ kbps$ en el modo rápido (*Fast-mode*) o $3.4\ Mbps$ en el modo de alta velocidad (*Highspeed-mode*) [32].

1.4.4.2. *Serial Peripheral Interface* (SPI) [33]

Constituye un protocolo de datos síncrono en modo bus, el cual es ejecutado por microcontroladores para comunicaciones a gran velocidad con uno o con varios dispositivos periféricos en distancias cortas.

En una conexión SPI siempre existe un dispositivo maestro, el cual controla a los dispositivos periféricos, conocidos como esclavos y ocupa en general 4 líneas de comunicación. La señal SCK (*Clock*) corresponde a la señal de reloj, la cual señala al receptor exactamente cuándo debe muestrear los bits en la línea de datos, donde el que genera el reloj se llama maestro, y el otro lado se lo llama esclavo [34]. Cuando el receptor detecta el flanco adecuado, inmediatamente observará la línea de datos para la lectura del

siguiente bit (Figura 1.17). Aunque los dispositivos tienen una velocidad de operación recomendada por los fabricantes, especificar la velocidad de transmisión no es importante, debido a que la señal de reloj se envía junto con los datos.

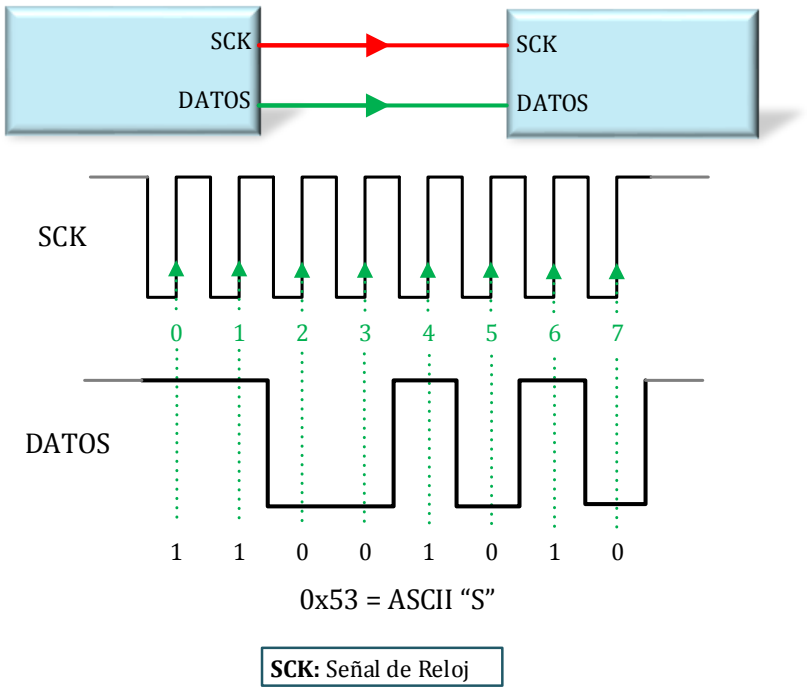


Figura 1.17. Señal SCK y señal de Datos en SPI [34]

Cuando los datos se envían desde el maestro al esclavo, se realiza a través de la línea de datos MOSI (*Master Output Slave Input*), que en otras palabras sería "Salida maestro / entrada esclavo". Por otro lado, si el esclavo necesita enviar una respuesta al maestro, el maestro continuará generando la señal SCK, y el esclavo colocará los datos en una tercera línea de datos, MISO (*Master Input Slave Output*), es decir "Entrada maestro / salida esclavo".

Como se mencionó anteriormente, el maestro genera la señal de reloj, y conocerá siempre el instante cuando un esclavo devolverá datos, así como también la longitud de los mismos.

Generalmente SPI es utilizado para la comunicación con sensores que poseen una estructura de datos específica. Por ejemplo, si el maestro le envía el comando de lectura de datos a un sensor, siempre esperará que el esclavo le responda con una longitud fija de datos [35]. En el supuesto caso, que el sensor requiera transmitir datos con una longitud mayor a la que espera el maestro, se empleará la longitud fija predeterminada de comunicación. Como resultado, se advierte un envío de cadena de datos en varias tramas y después el maestro se encargará de agrupar la información recibida.

Por otro lado, SPI se considera como una comunicación "*full dúplex*", es decir, se reciben y transmiten datos simultáneamente. En determinadas situaciones mientras el maestro aún recopila la información recibida, solicita una nueva lectura al esclavo (sensor) (Figura 1.18).

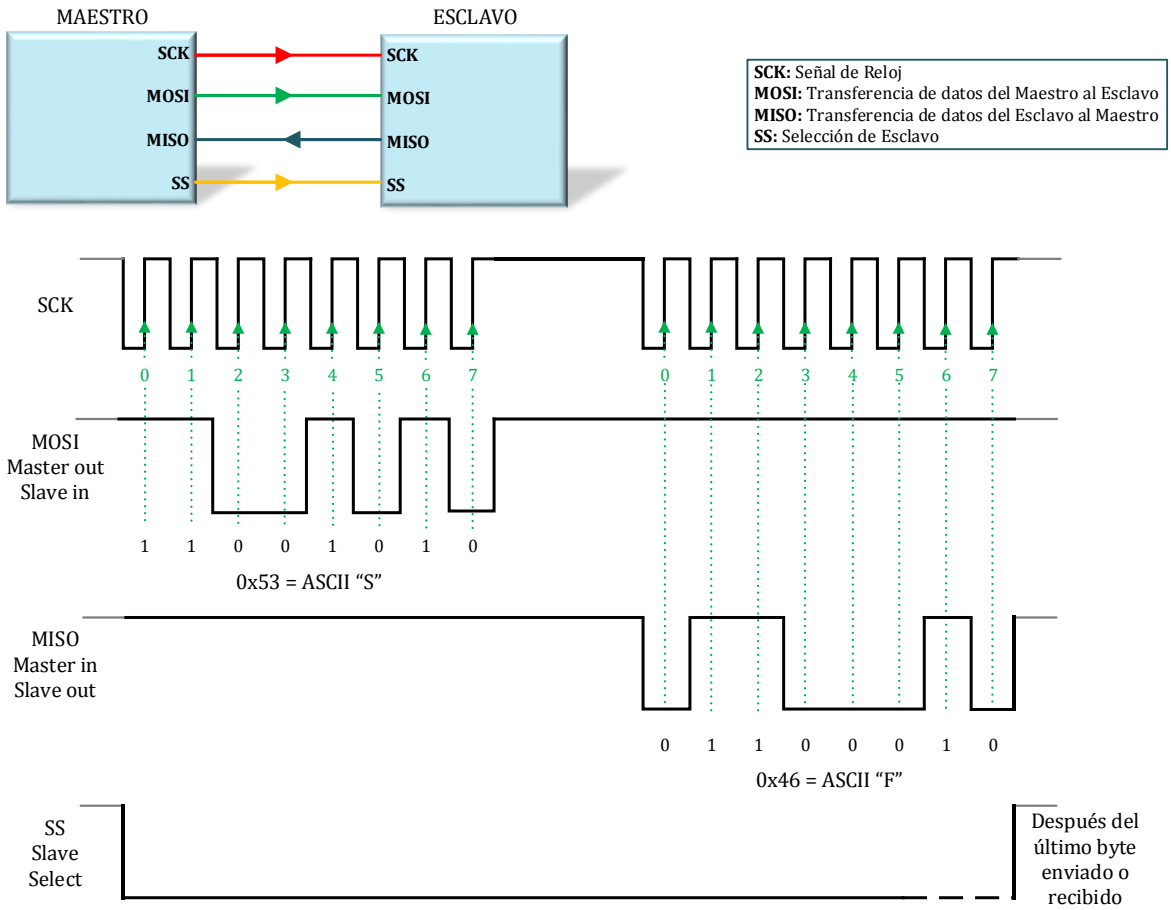


Figura 1.18. Señales MISO MOSI en SPI [35]

Además de las señales mencionadas, el maestro puede habilitar o deshabilitar dispositivos específicos por medio de la señal SS (*Slave Select*)

Normalmente, la línea SS permanece en un estado lógico alto, el cual desconecta al esclavo del bus de comunicación SPI (este tipo de lógica se conoce como activo bajo). Justo antes de que se envíen los datos al esclavo, el maestro envía una instrucción que cambia el estado lógico de la línea SS de alto a bajo, lo cual activará al esclavo.

Cuando el maestro termina la comunicación con el esclavo, la línea vuelve a tener un estado lógico activo alto [36]. Estos cambios en los estados lógicos de la línea SS le permiten al maestro mantener comunicación con dispositivos que soporten comunicación SPI, compartiendo así las mismas líneas de comunicación MISO, MOSI y el reloj SCK, tal como se aprecia en la Figura 1.19.

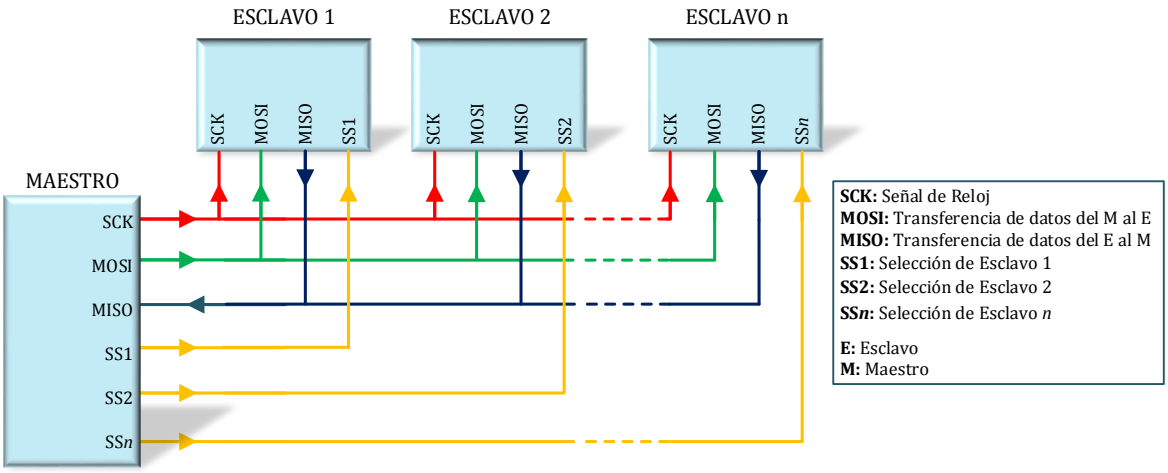


Figura 1.19. Múltiples Esclavos conectados a un Maestro [36]

1.4.4.3. *Universal Asynchronous Receiver - Transmitter*(UART)[37]

Es un protocolo de comunicación asíncrona, que a diferencia de los protocolos I2C y SPI, no requiere de una señal de reloj.

Como se aprecia en la Figura 1.20, no existe una señal de reloj para la comunicación entre dispositivos. En particular, cada conexión posee un reloj preciso y estable que controla la forma en la cual se generan los niveles lógicos en el TX que interpretará el RX.

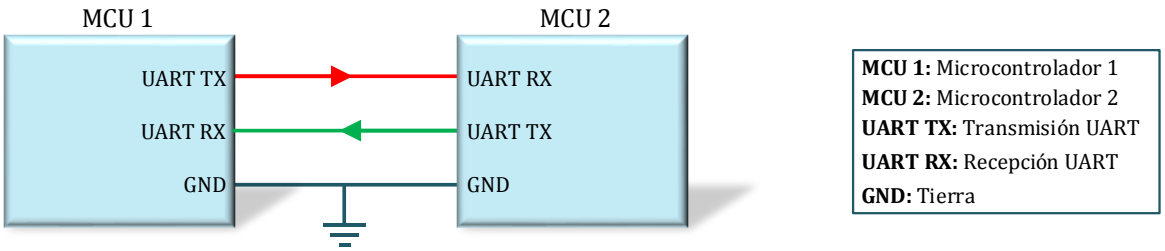


Figura 1.20. Comunicación UART entre dos dispositivos [38]

La señal de datos es un voltaje que cambia entre lógica positiva y lógica negativa, por lo tanto, únicamente si el RX conoce el tiempo de muestreo, convertirá correctamente los estados lógicos en una señal de datos digitales.

Consecuentemente, el transmisor generará un flujo de bits basado en su señal del reloj. Luego, el receptor empleará su propia señal de reloj interna para el muestreo de datos en mitad del periodo de bit, donde, no es esencial que el muestreo se produzca en la mitad del periodo. Sin embargo, cuando se realiza el muestreo al inicio o al final del periodo, el sistema es menos robusto debido a las diferencias de señales de reloj que pudieran existir entre transmisor y el receptor. Por otro lado, si el reloj interno del receptor no es igual al del transmisor se pueden producir errores, como los que se aprecian en la Figura 1.21.

Por este motivo, para asegurar que el muestreo en el receptor se produzca cerca de la mitad del período de bits, la frecuencia de la velocidad del reloj (medida en baudios) que el transmisor envía al receptor es más alta que la velocidad de transmisión real (varía en un factor de 8, 16 o incluso 32) [39].

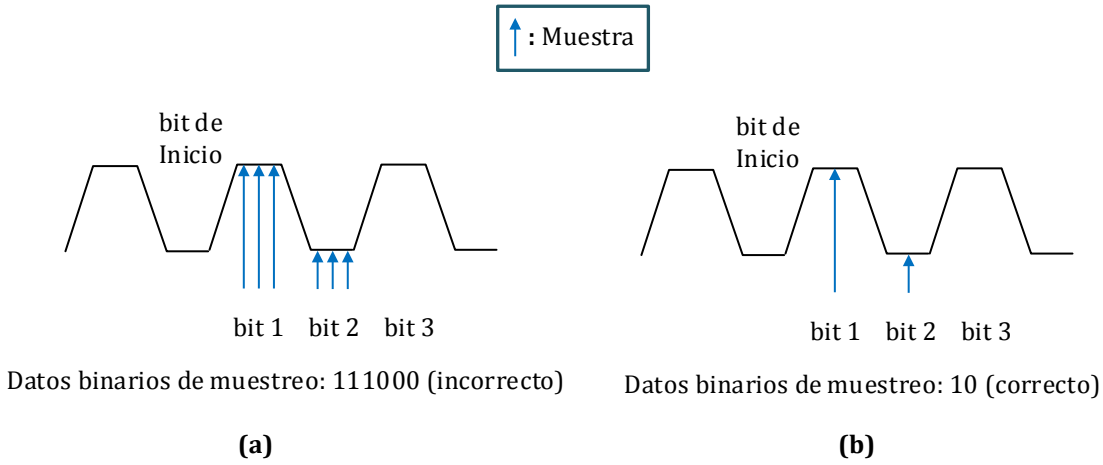


Figura 1.21. Frecuencia de muestreo en un receptor UART: (a) Muestreo incorrecto; (b) Muestreo correcto [39]

En una transmisión UART, el primer bit indica que la línea de comunicación deja su estado de inactividad que suele ser alto lógico. Por esta razón, el bit de inicio o bit de sincronismo es bajo lógico [40], mientras que el bit de parada por su parte tiene el mismo nivel lógico del canal, es decir alto lógico (Ver Figura 1.22).

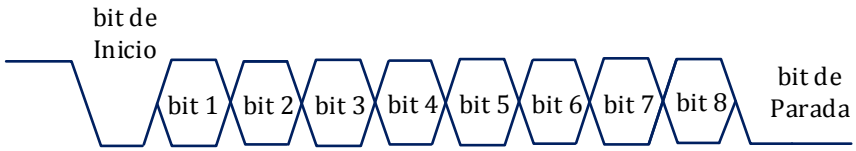


Figura 1.22. Bit de inicio y parada en una transmisión UART [40]

1.4.4.4. *Enhanced ShockBurst* (ESB)

ESB es un protocolo de capa de enlace, que proporciona ensamblaje automático de paquetes (preámbulo, dirección y CRC), detección y validación automática de paquete recibido, longitud dinámica de paquete (entre 1 y 32 $bytes$), ACK automático (confirmación de llegada) y retransmisión automática de paquetes perdidos [41]. En topología estrella alcanza hasta 6 canales simultáneos (*pipes*) entre transmisores primarios (PTX – *Primary Transmitter*) y un receptor primario (PRX – *Primary Receiver*), tal como se grafica en la Figura 1.23.

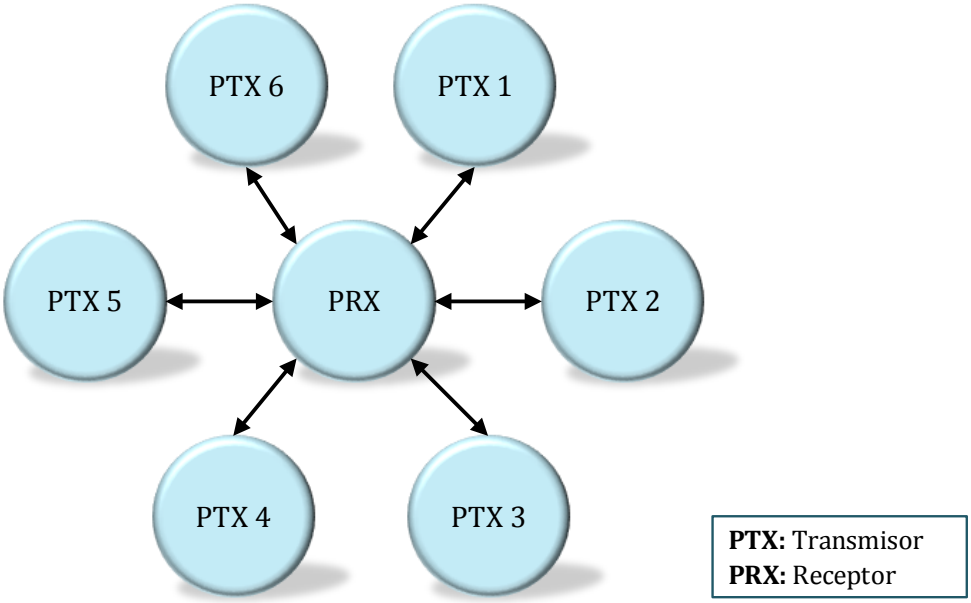


Figura 1.23. Topología estrella en ESB [42]

Estas características permiten la implementación de comunicaciones de ultra bajo consumo y alto rendimiento, traduciéndose como una significativa mejora de eficiencia energética requerida para comunicaciones unidireccionales y bidireccionales, sin agregar complejidad en el lado del host controlador.

En la recepción, se mantiene una búsqueda constante de una dirección válida en la señal demodulada. De hecho, cuando se encuentra una dirección válida, se procesa el resto del paquete y se valida mediante CRC (*Cyclic Redundancy Check*). Si el paquete es válido, el *payload* se carga en una ranura disponible en la RX_FIFO, donde toda la manipulación de bits de alta velocidad y temporización son controladas por el protocolo. *Enhanced ShockBurst* posee un campo de dirección, facilitando así la implementación de un enlace de datos bidireccional fiable para la transacción de paquetes en forma automática [43].

En adelante, el transmisor primario (PTX) será únicamente transmisor (TX) y el receptor primario (PRX) será receptor (RX).

1.4.4.4.1. FIFOs en ESB (*First Input First Output*)

En cada enlace (entre TX y RX) está disponible una cola de espera FIFO, tanto para recepción como para transmisión. En particular, los sistemas FIFO son compartidos por todos los canales y un campo en la librería del módulo NRF24L01 (`nrf_esb_payload_t::pipe`) identifica de que canal proviene una trama de información. De este modo, para los paquetes recibidos, este campo especifica de qué canal provino el paquete, mientras que, para los paquetes transmitidos, se especifica a través de qué canal se enviará el paquete [43].

1.4.4.4.2. TX_FIFO

Cuando ESB está habilitado en modo TX (transmisión), cualquier paquete que se cargue en un FIFO de TX (TX_FIFO), será transmitido en la siguiente transacción.

De esta forma, cuando se recibe con éxito un ACK (acuse de recibo) de un receptor (RX), el transmisor asume que la carga útil se recibió con éxito. Si eso sucede, el paquete transmitido con éxito se elimina del TX_FIFO (recepción), de modo que se transmite el siguiente paquete (con una información diferente) en el FIFO [43].

1.4.4.4.3. RX_FIFO

Cuando ESB está habilitado en el modo RX (recepción), todos los canales habilitados (direcciones) se monitorean de forma simultánea, para recibir los paquetes entrantes.

De esta manera, si se recibe un nuevo paquete que no fue notificado previamente al receptor y el campo RX_FIFO tiene espacio disponible, el paquete es recibido y se envía un ACK al transmisor [43].

1.4.4.4.4. Transacción de paquetes en ESB [42]

Una transacción de paquetes *Enhanced ShockBurst* es un intercambio de paquetes entre dos transceptores, donde un transceptor actúa como el receptor principal (RX) y el otro como el transmisor primario (TX). Una transacción de paquete siempre es iniciada por una transmisión de paquetes desde el TX y la transacción se completa cuando el TX ha recibido un paquete de confirmación (paquete ACK) de la RX.

El RX puede adjuntar datos de usuario al paquete ACK, habilitando así un enlace de datos bidireccional, donde el RX añade información al TX_FIFO.

Cuando se inicia la comunicación y se envía el primer paquete de información desde TX hacia RX, ESB configura automáticamente a TX en modo de recepción para esperar el paquete ACK proveniente desde el RX.

Si el paquete se recibe correctamente en el RX, el protocolo ESB ensambla automáticamente una respuesta ACK y después de enviado el ACK regresa a modo de recepción [44].

Cuando el TX no recibe el paquete ACK, retransmite el paquete de datos original y después de un retardo de transmisión (lapso programable entre la transmisión del paquete y el inicio de la retransmisión) fija nuevamente a TX en modo de recepción para esperar el paquete ACK (El número de reenvíos también es programable).

Si el ACK se pierde, pero el paquete inicial y los paquetes posteriores son recibidos con éxito en el RX, se descartarán los paquetes repetidos. Como resultado, se evita que la aplicación recepte duplicados, sin embargo, el RX enviará un ACK por cada paquete duplicado recibido.

Por último, el TX puede seleccionar individualmente los paquetes que se transmitirán a la RX sin necesidad de un ACK para ser enviados hacia RX. Esta decisión la decide la aplicación cuando carga un paquete TX_FIFO [44].

1.4.4.4.5. Formato de trama ESB [42]

La trama está constituida por un preámbulo, un campo de dirección, un campo de control de paquetes (principal diferencia con el *ShockBurst* tradicional), campo de carga útil (*payload*) y un campo de redundancia cíclica CRC. En la Figura 1.24 se representa de manera gráfica el formato de la trama.

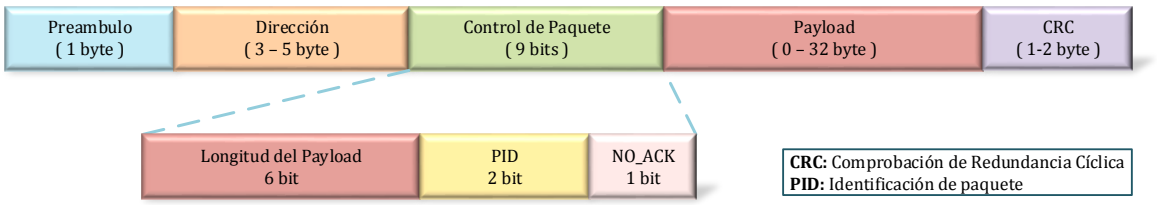


Figura 1.24. Trama del *Enhanced ShockBurst* [42]

El preámbulo, es un byte que se utiliza para la sincronización de la trama entrante, el cual puede iniciar con 0 o 1 dependiendo del inicio del bit de la dirección y se intercalan los valores binarios 1 y 0 hasta completar el byte [45]. En otras palabras, si el primer bit de la dirección es 0, el preámbulo se establece como 01010101 y si el bit de la dirección es un 1; entonces el preámbulo se fijará automáticamente como 10101010. El objetivo de estas transiciones entre 0 y 1 consiste en asegurar estabilidad en recepción y también evitar ambigüedad cuando se decodifique la trama [46].

La dirección que tiene una longitud de entre 3 a 5 $bytes$ se define en el receptor, por lo tanto, se asegura una detección correcta del paquete. Las direcciones que solo tienen una alternancia (por ejemplo, $FFF0000000$) a menudo se detectan como ruido, consecuentemente se produce una elevada tasa de error, mientras que, si se tiene una alta alternancia de bits en la dirección, la tasa de error disminuye.

El control de paquete, se subdivide a su vez en 3 campos, como se apreciar en la Figura 1.24. En el campo de longitud de *payload* se especifica en 6 bits la longitud que puede variar entre 0 y 32 $bytes$. En caso de paquetes de confirmación ACK vacíos, se emplea 000000.

El campo PID (*Packet identification*) de $2\ bits$ se dispone para identificar si un paquete recibido es nuevo o ha sido retransmitido. Para cumplir esta funcionalidad, se incrementa el valor del CRC en TX con cada paquete recibido a través del SPI. Cuando varios paquetes de datos se pierden en el enlace, los campos PID pueden ser iguales al último PID recibido. En este caso, si se detecta una duplicidad en los PID, se compara las sumas correspondientes a la redundancia cíclica CRC de ambos paquetes, donde, si el valor también coincide, entonces el último paquete recibido se considera una copia del paquete anterior y se descarta [46].

Por otro lado, el indicador de un bit NO_ACK es utilizado en la función de auto ACK, donde el bit es 1 para indicar al receptor que el paquete recibido no debe tener un ACK automático.

En el *payload* se encuentra el contenido útil del paquete ("datos reales") y puede tener una longitud entre 0 y $32\ bytes$.

Además, el protocolo ESB ofrece dos alternativas para manejar la longitud de la carga útil, estática y dinámica.

Por defecto se tiene un valor de *payload* estático, donde, los paquetes enviados tienen la misma longitud tanto en el TRX como en el RX, y el valor de carga se establece de forma predeterminada dependiendo de los bytes fijados en la velocidad de reloj en TX_FIFO.

DPL (*Dinamic Payload Lenght*) es otra alternativa para el manejo de carga útil y le permite al TRX enviar paquetes con longitud de carga variable. Para un sistema que maneje diferentes longitudes de datos, se puede reducir el tamaño de la trama de envío optimizando el uso del canal de comunicación.

El *cyclic redundancy check* es uno de los principales métodos de detección de errores para comunicaciones digitales, y es conocido también como comprobación de suma de código polinomial. Cabe mencionar que, en caso de que el CRC falle, no se aceptará el paquete y se descartará [47].

2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente proyecto se utilizará la plataforma Arduino Uno y software libre, por lo que se recurrirá a la recolección de información de fuentes bibliográficas, tales como artículos, revistas científicas, tesis, entre otras fuentes de información confiables, en los cuales se trabajó con aplicaciones, metodologías y elementos similares a los que plantea este proyecto.

De esta manera se podrá generar una lista con los requerimientos necesarios y posterior análisis de los dispositivos electrónicos de bajo costo, los cuales son aptos para el desarrollo y desempeño del prototipo en el presente proyecto.

Una vez definido los elementos a utilizar, se implementará el programa que brindará el control del sistema, mediante el uso del lenguaje de programación de Arduino. El lenguaje de programación es una herramienta muy poderosa, versátil y gratuita, lo que facilitará el uso y configuración de las entradas y salidas de las señales de cada uno de los puertos de la placa Arduino, permitiendo así la interacción con las señales obtenidas de los sensores.

Para la obtención de las señales sísmicas del volcán se utilizará el geófono L4C Sercel (disponible en el IG), el cual registra el movimiento del suelo mediante un transductor de velocidad y entrega señales eléctricas en forma analógica [48].

Posterior a la adquisición de la señal del sensor, se tendrá una etapa de procesamiento, en la cual la señal proveniente del sensor será conectada a un conversor A/D y una vez digitalizada a una resolución de $16\ bits$, la señal ingresará al Arduino donde se le otorgará el tratamiento necesario, además, se elegirá un tipo de variable adecuado para los de datos y de esta forma enviar la información hacia el receptor.

En el receptor estará ubicada la central intermedia de adquisición, donde se configurará la tarjeta Arduino Uno para que procese las señales recibidas provenientes del transmisor y luego de ello se realizará el envío de la información hasta las instalaciones del IG. Consecuentemente, los datos obtenidos permitirán al personal del IG analizar, estudiar e investigar los fenómenos asociados con los eventos sísmico-volcánicos.

Para las pruebas de funcionamiento del prototipo se realizará un reconocimiento de la ubicación y condiciones del lugar donde se deseen realizar las pruebas, según lo requerido por el IG mediante salidas de campo. Finalmente, se desarrollarán múltiples pruebas que permitirán encontrar fallas y realizar mejoras con la finalidad de que el prototipo sea robusto.

2.1. Selección de dispositivos

De acuerdo a los objetivos requeridos en el proyecto se analizaron las características de los dispositivos y elementos electrónicos a ser utilizados, considerando un apropiado funcionamiento en un ambiente de condiciones ambientales adversas como las existentes cerca de un volcán.

2.1.1. Geófono L4C Sercel [48]

Es un instrumento de medición sísmica que produce un voltaje proporcional a la velocidad entre una masa suspendida mediante resortes y un punto inercial de referencia $(x - x_g)$ medido en $(\mu m/s)$.

Internamente, el geófono L4C posee una masa de $1\ kg$ de peso suspendida por medio de resortes blandos, la frecuencia de resonancia del sistema es de $1\ Hz$. Una fotografía del sensor y un esquema del instrumento se aprecian en la Figura 2.1.

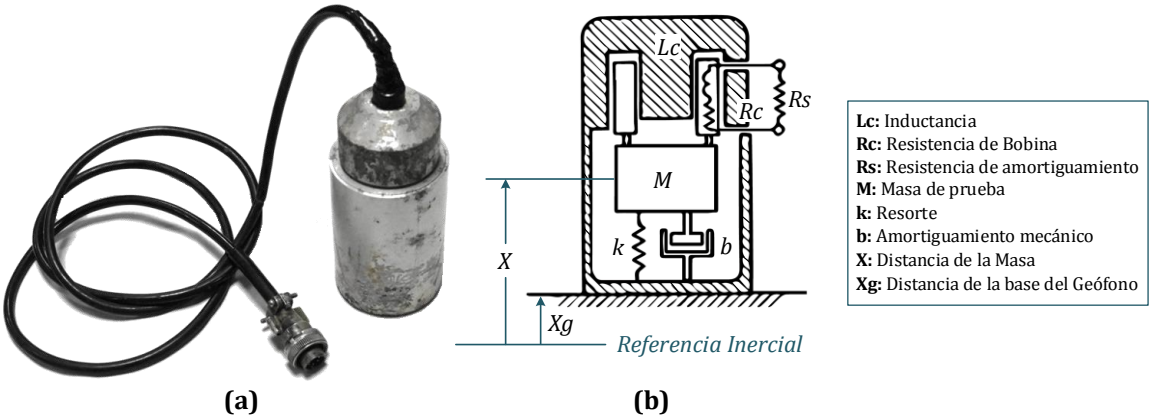


Figura 2.1. Geófono L4C Sercel: (a) Fotografía del instrumento; (b) Esquema de geófono electromecánico [48]

En el esquema ubicado en la parte b de la Figura 2.1, se tiene:

M: Masa de prueba, medida en (kg),

k: resorte, cuya constante de deformación elástica se mide en (N/m),

b: amortiguamiento mecánico, medido en $(N/(m/s))$.

R_s: resistencia de amortiguamiento.

Además, la bobina de detección de movimiento se encuentra montada sobre la masa de prueba M y se la representa por la inductancia L_c en serie con resistencia de la bobina R_c.

En resumen, el sistema actúa como un oscilador mecánico amortiguado que se encuentra acoplado electromagnéticamente a la salida por el campo móvil de un imán permanente

unido a la carcasa. En particular, el voltaje se genera por el movimiento entre la bobina enrollada y el imán.

Para movimientos de tierra por encima de la resonancia mecánica, la señal de salida sigue la velocidad de tierra x_g medida en $(\mu m/s)$. Y cuando la frecuencia del movimiento tiene un valor menor al de la resonancia, el voltaje disminuye a medida que el movimiento masivo de prueba comienza a seguir el movimiento del suelo.

También, cuando la resonancia del suelo es de alrededor de $1\ Hz$ (resonancia de operación del geófono), el sensor no cuenta con un estado de fase de cambio, por este motivo, para amortiguar esta resonancia, es habitual conectar la salida del geófono a una resistencia de amortiguación R_s.

Cabe recalcar que, este dispositivo fue seleccionado debido a que no necesita una fuente de alimentación externa para generar el voltaje de la señal análoga sobre la cual se realizará el proceso de digitalización. Además, genera una señal sísmica de una componente única vertical.

Tomando como referencia la respuesta en frecuencia del sensor sísmico L4C que se aprecia en la Figura 2.2, se tiene una respuesta lineal para oscilaciones entre 5 y $1000\ Hz$. Por otro lado, las señales sísmicas típicamente tienen frecuencias que se ubican entre 1 y $100\ Hz$.

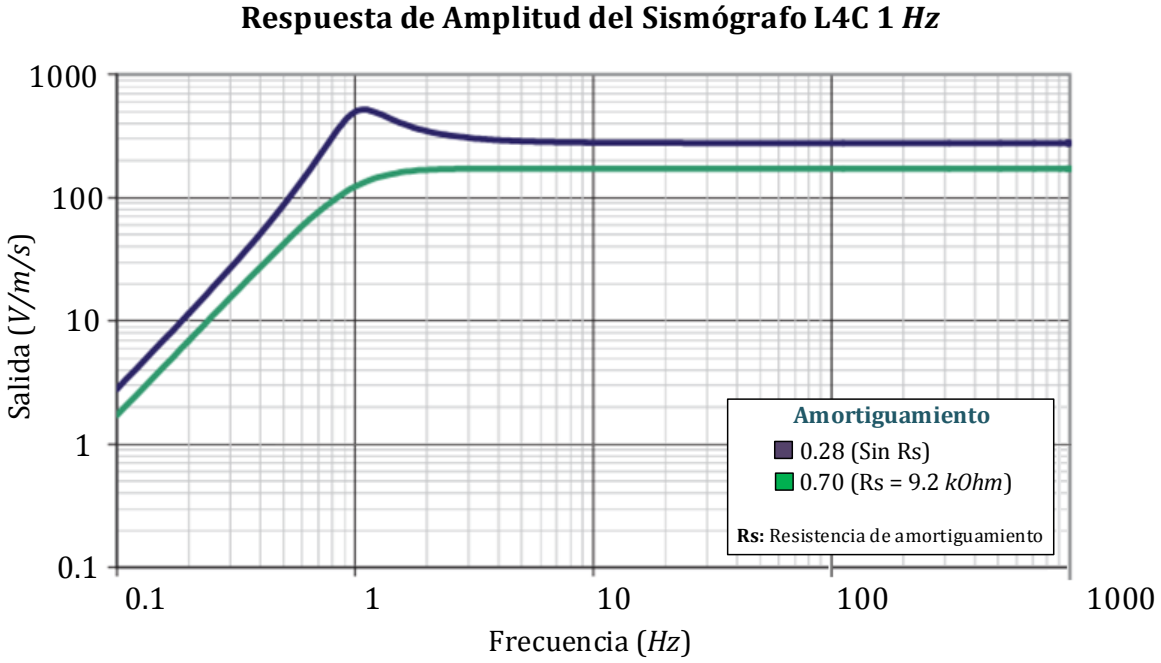


Figura 2.2. Respuesta en frecuencia del geófono L4C [49]

Las especificaciones técnicas del geófono L4C se encuentran el Anexo A [49].

2.1.2. Sistema Fotovoltaico

Debido a que el sitio en el cual se instalará el prototipo, no cuenta con la cobertura de la red eléctrica, se emplea un sistema fotovoltaico para energizar los elementos electrónicos.

De hecho, los paneles solares comerciales, están en la capacidad de entregar potencias entre 50 a $400\ W$ [50] dependiendo del área del panel y de la capacidad de conversión de las celdas fotovoltaicas. En el IG existe disponibilidad de paneles solares de $10, 50, 80, 100\ W$ de marca *Zytech Solar* y *Vega Solar,* los cuales han demostrado una gran eficiencia en su desempeño. En particular, para el desarrollo del presente proyecto se selecciona el panel *Vega Solar* modelo Vega 12-10 ($10\ W$), ya que, además del rendimiento del sistema, posee un tamaño ($340\ x\ 340\ x\ 22\ mm$) y peso ($1.6\ kg$) [51]. Como resultado, se facilita al personal el transporte del dispositivo, debido a que se debe atravesar chaquiñanes y caminos de difícil acceso para arribar al sitio de instalación.

Para mayor información sobre las características técnicas del panel se puede observar el Anexo B.

Adicionalmente, las baterías empleadas en la mayoría de estaciones son de marca *bless power* y *wadkin* con capacidad de almacenamiento de $10, 55, 80\ y\ 100\ Ah$. (Ver características técnicas en el Anexo C).

Por último, el número de paneles solares, baterías a ser instalados, y la capacidad seleccionada, dependerá de los requerimientos energéticos del prototipo, que será calculado en la sección de Diseño.

2.1.2.1. Controlador de carga SunSaver SS-10L-12V

Debido a que las condiciones energéticas en los sitios de las estaciones de monitoreo son críticas, el personal del IG está en constante búsqueda de implementos electrónicos que optimicen la distribución de la energía. En este sentido, esta marca de controlador de carga se ha utilizado por más de una década debido a las excelentes prestaciones que ofrece. Entre las características que se puede mencionar, se tiene: adecuada señalización mediante leds que permiten conocer el estado de carga de una batería, regulación interna que se adapta al tipo de batería y un algoritmo propietario de *Morningstar* que optimiza la carga [52]. El modelo en específico que se implementará en este proyecto es el *SS-10L-12V* (Figura 2.3) debido a que posee las características necesarias para el sistema de energía requerido, como son voltaje de operación $12\ V$, $10\ A$ de corriente máxima de funcionamiento y soporta condiciones de temperaturas extremas. Las especificaciones técnicas, como dimensiones y características de operación se encuentran en el Anexo D.

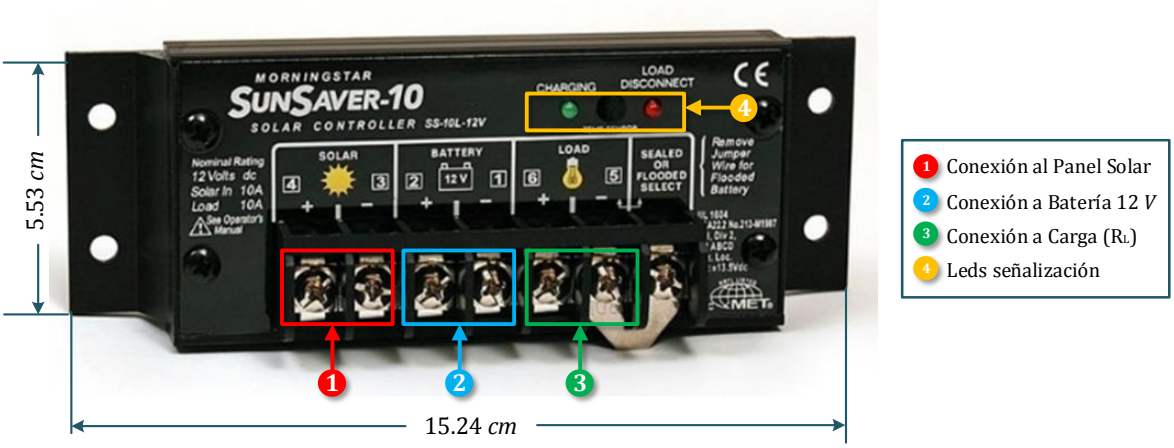


Figura 2.3. Controlador de Carga Morningstar SunSaver SS-10L-12V [53].

2.1.3. Módulo LM2596 Conversor de Voltaje [54]

El LM2596 (Figura 2.4) es un integrado que permite una conversión de voltaje del tipo *Step-Down* es decir es del tipo *buck converter,* el cual obtiene un voltaje de salida menor al de entrada. Este modelo en particular, proporciona una conversión de un voltaje de entrada entre 3.2 y $40\ V$ en un voltaje más pequeño de salida entre 1.25 y $35\ V$, y soporta una carga de hasta $3\ A$. En un rango de voltaje amplio se considera que el voltaje de entrada debe ser al menos $1{,}5\ V$ más amplio que en voltaje que se requiere a la salida.

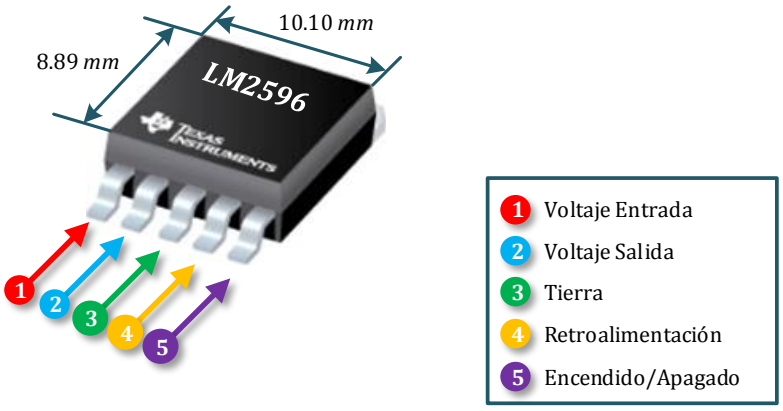


Figura 2.4. Integrado LM2596 de Texas Instruments [55]

Existen varios tipos de integrados LM2596, donde algunos solo proporcionan un voltaje fijo de salida que puede ser 3.3 o $5\ V$. La versión seleccionada, permite un ajuste en el voltaje de salida dependiendo de los requerimientos de alimentación del sistema.

Comercialmente se puede encontrar en un PCB (*Printed Circuit Board*) (Ver Figura 2.5) el cual, posee un potenciómetro de precisión para el ajuste del voltaje y una protección interna de límite de corriente en caso de cortocircuitos. En particular, el consumo de corriente es mínimo, (alrededor de $80\ \mu A$) y una eficiencia de 92% (Ver Anexo E).

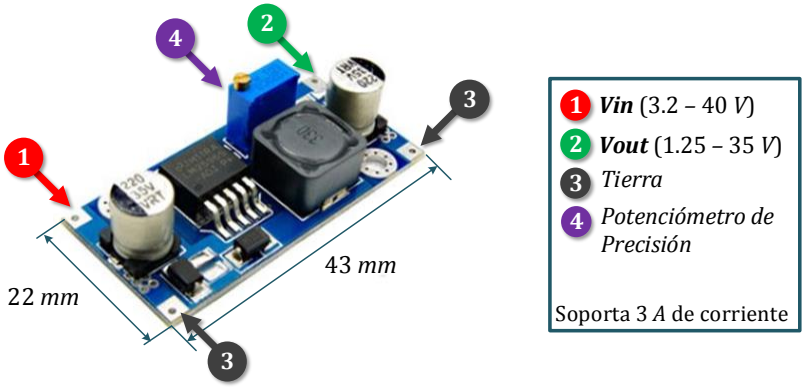


Figura 2.5. Módulo LM2596 ajustable [56]

2.1.4. Módulo XL6009 Conversor de Voltaje [57]

El XL6009 (Ver Figura 2.6) es un integrado que permite una conversión de voltaje del tipo *Step-Up* es decir es del tipo *boost converter*, el cual obtiene un voltaje de salida mayor al de entrada. Este modelo en particular, proporciona una conversión de un voltaje de entrada entre 3,8 y 32 V en un voltaje mayor de salida entre 5 y 35 V, y soporta una carga de hasta 2.5 A. También, se puede encontrar comercialmente en forma de PCB, el cual posee un potenciómetro de precisión (Ver Figura 2.7), que permite ajustar el V_{out} deseado. Por otra parte, las características técnicas se muestran en el Anexo F.

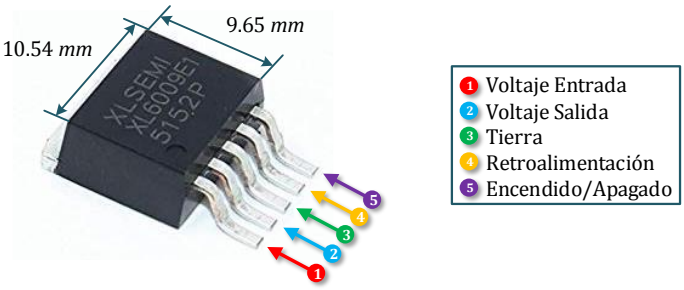


Figura 2.6. Integrado XL6009 [57]

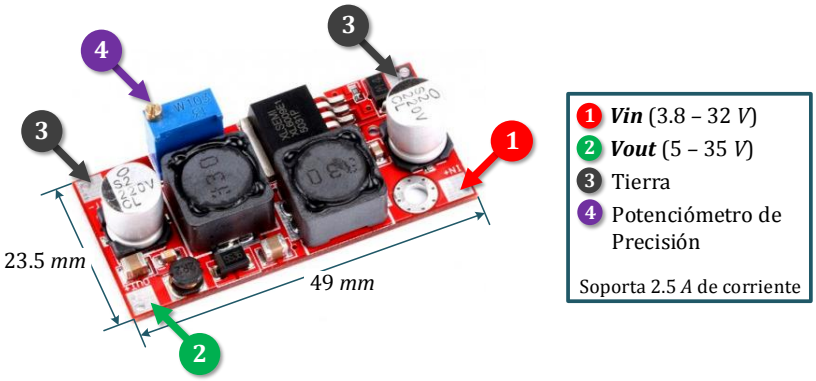


Figura 2.7. Módulo XL6009 ajustable [58]

2.1.5. Regulador de Voltaje AMS1117 [59]

La salida de voltaje del módulo LM2596 depende de la regulación producida mediante el potenciómetro de precisión, el cual posee un rango de voltaje de salida entre 6 y $8\,V$, dependiendo de la tensión de entrada, proporcionada por el controlador de carga *SunSaver SS-10L-12V,* que oscila entre 11.5 y $14.1\,V$ [60]. Esta variación de voltaje del controlador de carga se debe a la irradiación solar recibida por los paneles solares y al estado de carga de las baterías.

2.1.5.1. AMS1117 5 V

Por este motivo, con el objetivo de extender la vida útil del Arduino y asegurar una alimentación regulada de $5\,V$ (Figura 2.8) se elige el integrado AMS1117 SOT-223 5V, el cual se aprecia en la Figura 2.9.

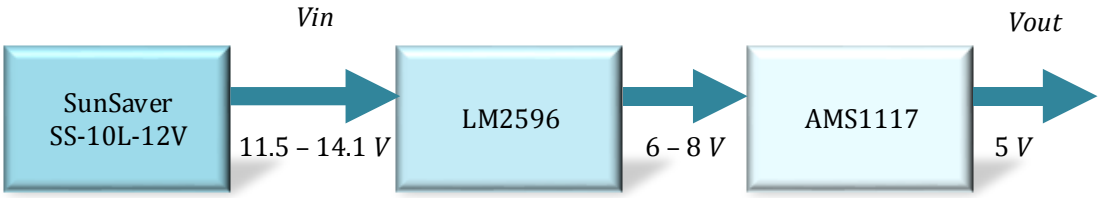


Figura 2.8. Esquema en bloques para el sistema de alimentación

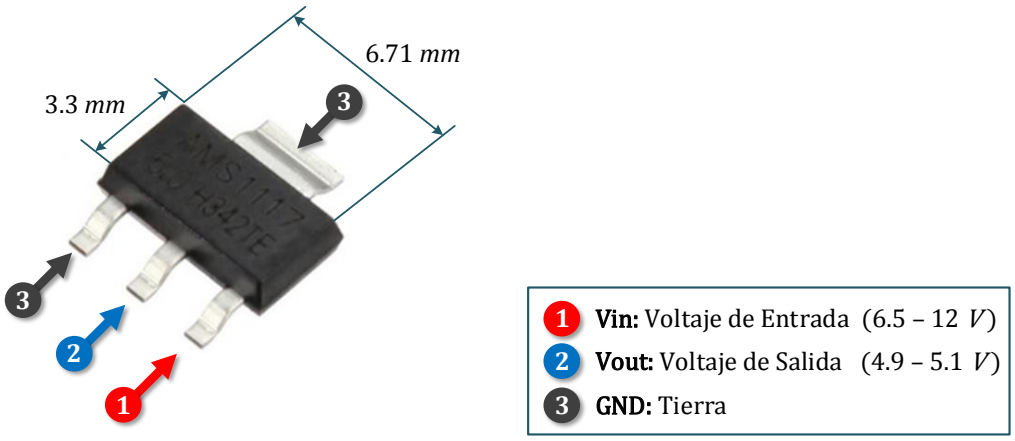


Figura 2.9. Integrado AMS1117 SOT-223 5 V [61]

El integrado ofrece una salida regulada de $5\,V$ con una variación de 0.15% mientras que la entrada soporta un voltaje máximo de $12\,V$, motivo por el cual la variación presente a la salida del LM2596 no constituye un problema, donde la corriente de salida soportada es de $1\,A$ [62].

Este integrado se lo puede encontrar en forma de PCB, tal como se muestra en la Figura 2.10.

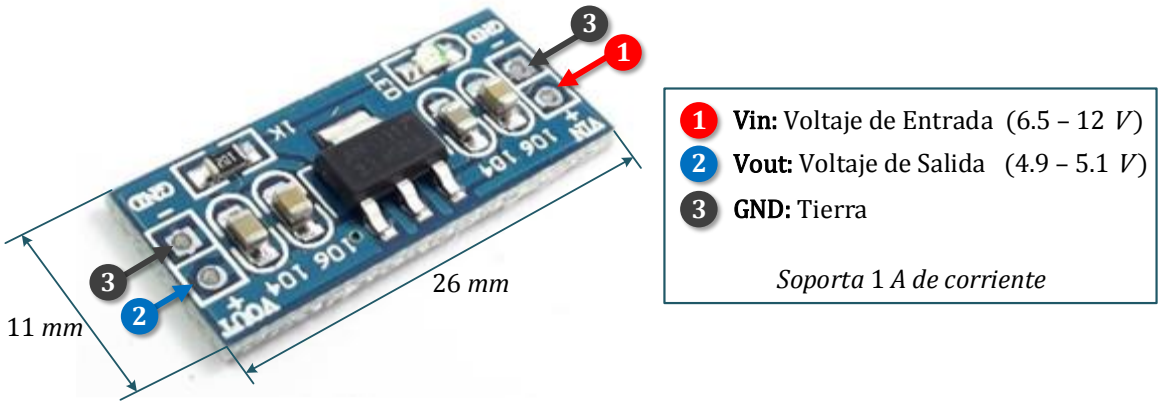


Figura 2.10. Módulo AMS1117 5V [63]

2.1.5.1. AMS1117 3.3V

De igual manera, que el integrado AMS1117 5V, existe una versión que permite regular el voltaje a 3.3 V (Ver Figura 2.11), donde el voltaje de entrada puede variar entre 4.8 y 10.3 V. Igualmente, la corriente máxima que soporta el módulo es 800 mA [62]. Cabe mencionar que, en Anexo G, se encuentran especificaciones técnicas de los módulos mencionados (AMS1117 5V y AMS1117 3.3V).

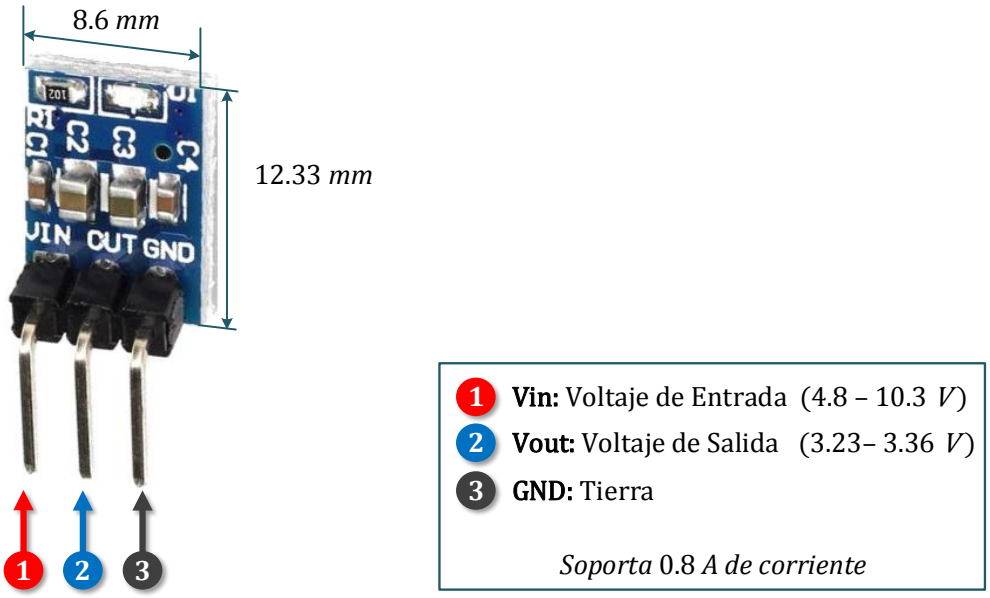


Figura 2.11. Módulo AMS1117 3.3 V [64]

2.1.6. Conversión Analógica – Digital ADS1115

La frecuencia de muestreo a ser considerada para el diseño del prototipo debe ser de al menos 200 Hz, ya que se utiliza la frecuencia de 100 Hz (frecuencia típica más alta en sismos) y la ecuación de Muestreo de Nyquist ($f_S \geq 2\, f_{MAX}$, donde f_S es la frecuencia de muestreo).

Por otro lado, para una adecuada conversión Analógica – Digital se considera la resolución de la cuantización, la cual dependerá del número de bits del conversor. El Arduino posee una conversión de $10\ bits$, pero es insuficiente para la aplicación a ser desarrollada. Sin embargo, existen conversores sofisticados que permiten una conversión con una resolución de $24\ bits$, que requieren un gran espacio de almacenamiento y el tiempo de procesamiento de datos se incrementa.

Consecuentemente, se selecciona el integrado ADS1115 (Figura 2.12), ya que es configurable para diferentes frecuencias de muestreo ($8, 16, 32, 64, 128, 250, 475, 860\ Hz$) y posee un bajo consumo de energía $150\ \mu A$ [65]. Además, cuenta con un PGA (*power gain amplifier*), que admite rangos de señal de entrada entre $\pm 256\ mV$ a $\pm 6.144\ V$ [66], permitiendo mediciones precisas de señales grandes y pequeñas. Por otro lado, los 16 bits de resolución permiten obtener 65536 niveles de cuantización (Ecuación 1.7) que son suficientes para recuperar posteriormente la señal original.

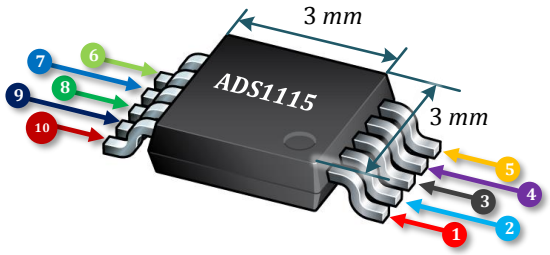


Figura 2.12. Integrado ADS1115 Texas Instruments [66]

Comercialmente se lo encuentra en forma de PCB, tal como se observa en la Figura 2.13.

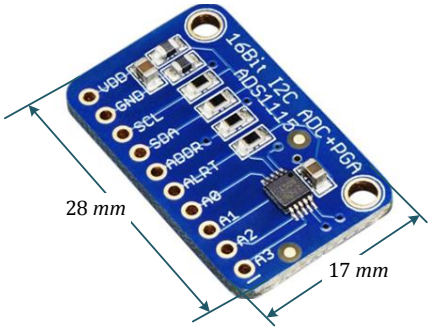


Figura 2.13. Módulo ADS1115 [67]

El módulo ADS1115, utiliza comunicación I2C y permite la conexión de hasta dos sensores en modo diferencial, tal como se indica en la Figura 2.14.

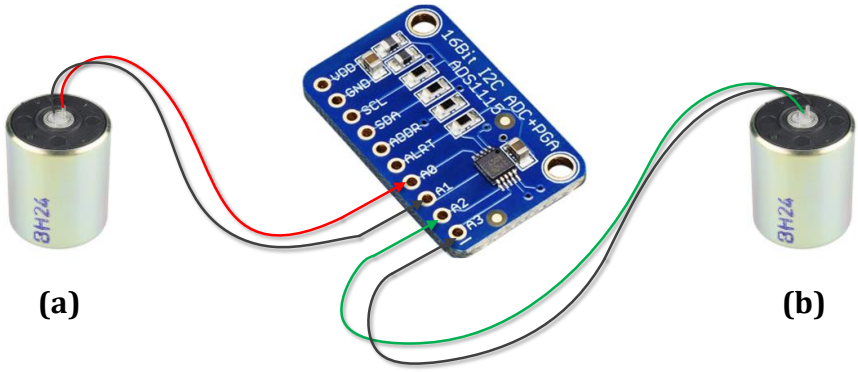


Figura 2.14. ADS1115 en modo diferencial: (a) Sensor conectado en modo diferencial (A0 y A1); (b) Sensor conectado en modo diferencial (A2 y A3) [68]

Por último, las especificaciones técnicas del integrado se encuentran en el Anexo H.

2.1.7. Conversión Digital – Analógica MCP4725

Los 16 bits obtenidos a partir del integrado ADS1115 se puede representar nuevamente la señal analógica original, sin embargo, dichos chips no se encuentran disponibles en el país y aún en el exterior tienen un costo elevado. Por tal motivo, se utiliza como alternativa el integrado MCP4725 (Figura 2.15), el cual posee una resolución de 12 *bits* (4096 niveles) [69]. A pesar de la perdida de la información (de 16 a 12 *bits*), los resultados son aceptables para la aplicación a ser ejecutada.

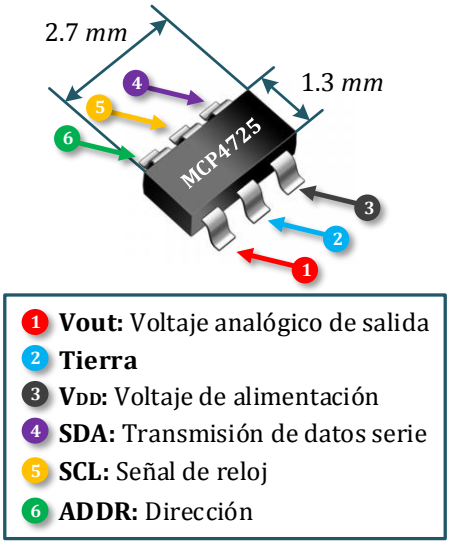


Figura 2.15. Integrado MCP4725 [70]

El integrado MCP4725 que utiliza comunicación I2C se lo puede encontrar comercialmente en forma de PCB, tal como muestra en la Figura 2.16.

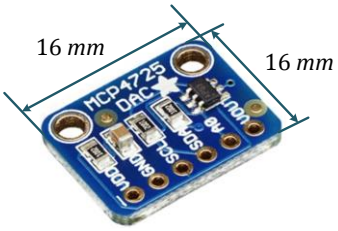


Figura 2.16. Módulo MCP4725 [71]

Por otro lado, la corriente de consumo del integrado es mínima ($25\ mV$) y el nivel de salida de la señal analógica ($5\ V$) [72] es compatible con el módulo de entrada de Voltaje de la Serie C NI-9239 que utiliza voltajes entre $\pm\ 10\ V$ [73]. Además, la tarjeta mencionada es utilizada por sistemas de adquisición de datos, disponibles en el IG.

Las especificaciones técnicas se las encuentra en el Anexo I.

2.1.8. Módulo de Radio NRFL2401+

El NRFL2401+ (Ver Figura 2.17) es un transceptor de un chip de $2.4\ GHz$ con un protocolo de banda base incorporado (*Enhanced ShockBurst*) basado en la comunicación de paquetes. Adicionalmente, es adecuado para aplicaciones inalámbricas de ultra baja potencia ($100\ mW$).

En particular, está diseñado para funcionar en la banda ancha de frecuencias ISM *(Industrial, Scientific and Medical*) a $2.400 - 2.4835\ GHz$ [74], donde el uso de este integrado es extendido, ya que para diseñar un sistema de radio se requiere de un microcontrolador y varios componentes pasivos externos. De hecho, las configuraciones de los parámetros se efectúan por medio de SPI, donde se puede seleccionar el canal de frecuencia (hasta 125), la potencia de salida (0, -6, -12 o -18 dBm) y la velocidad de transmisión de datos [75].

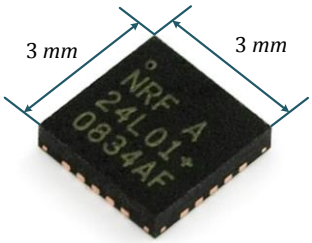


Figura 2.17. Integrado NRF24L01+ [76]

Por otro lado, el NRF24L01+ admite una velocidad de datos de $250\ kbps$, $1\ Mbps$ y $2\ Mbps$ [75], sin embargo se debe considerar la distancia existente entre los módulos TX y RX. En la Tabla 2.1, se aprecia la relación distancia y velocidad de datos teórica del módulo, en una zona abierta sin interferencias y la sensibilidad en recepción.

Tabla 2.1. Relación entre la Distancia, Velocidad de Transmisión y Sensibilidad para el NRF24L01+ [77] [78]

Distancia (*m*)	Velocidad (*kbps*)	Sensibilidad (*dBm*)
520	2000	-82
750	1000	-85
1000	250	-94

Cabe recalcar, que una de las ventajas en comunicaciones punto a punto es la posibilidad de 125 enlaces simultáneos sin interferencias, donde el consumo energético es mínimo, ($11.3\ mA$ para TX y $13.5\ mA$ en RX). Por otro lado, en modo de espera consume $26\ \mu A$ y se alimenta con $3.3\ V$ [78]. Dichas especificaciones técnicas se encuentran en el Anexo J.

Comercialmente se lo encuentra en forma de PCB, tal como se observa en la Figura 2.18. Además, posee una antena que ofrece una ganancia de $2\ dB$ y una circuitería que considera, tanto preamplificacion como un amplificador de bajo ruido (*low - noise amplifier)* [77]. También, la función de ejecuta cada uno de los pines se detalla en el capítulo 3, en la sección Componentes del Sistema TX. Finalmente, en el Anexo S se muestra un ejemplo de cálculo de presupuesto de enlace.

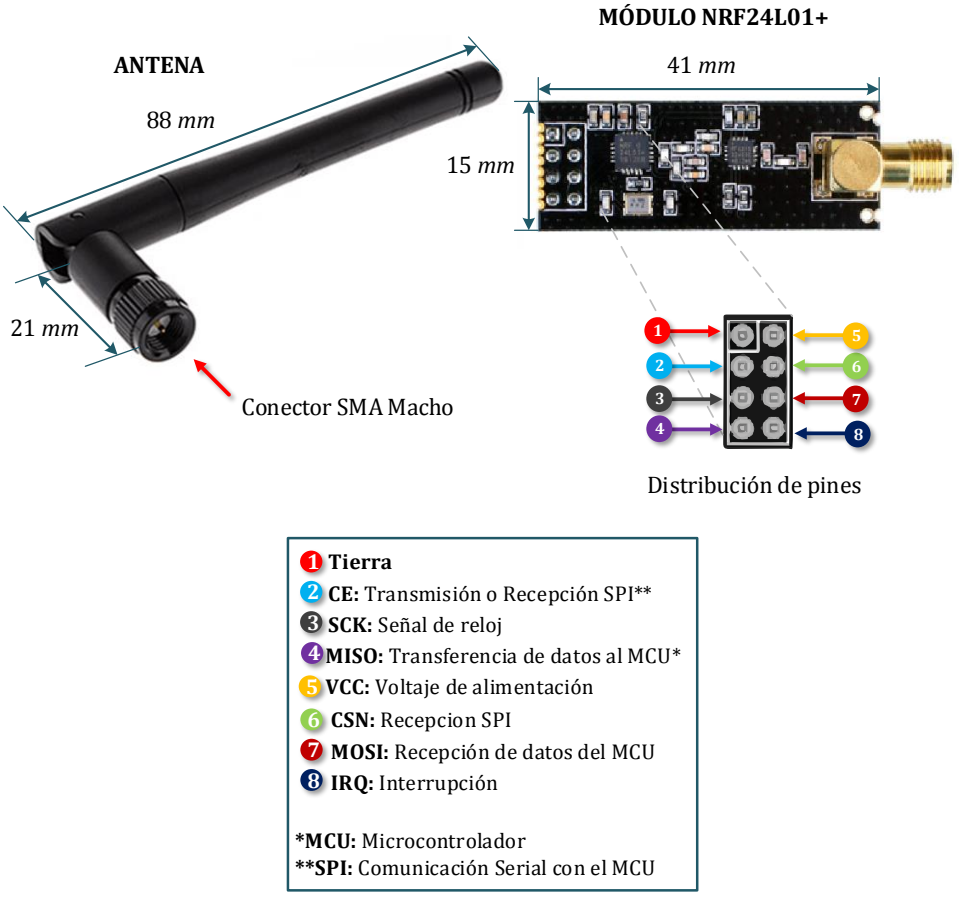


Figura 2.18. Módulo NRFL2401+ con antena [79]

2.1.9. Pantalla OLED 0.96”

La pantalla grafica (Figura 2.19) es un dispositivo de salida que posee una matriz de $128\,x\,64$ diodos led cátodo común que consumen $15\,mA$ cuando todos los leds se encuentran encendidos [80].

Dicho dispositivo posee control de contraste, memoria RAM y oscilador, el cual utiliza comandos que se envían desde el microcontrolador mediante comunicación I2C o SPI. Además, se le puede suministrar 3.3 o $5\,V$, sin embargo se recomienda alimentar el módulo con $3.3\,V$ [81]. Las características técnicas se las encuentra en el Anexo K.

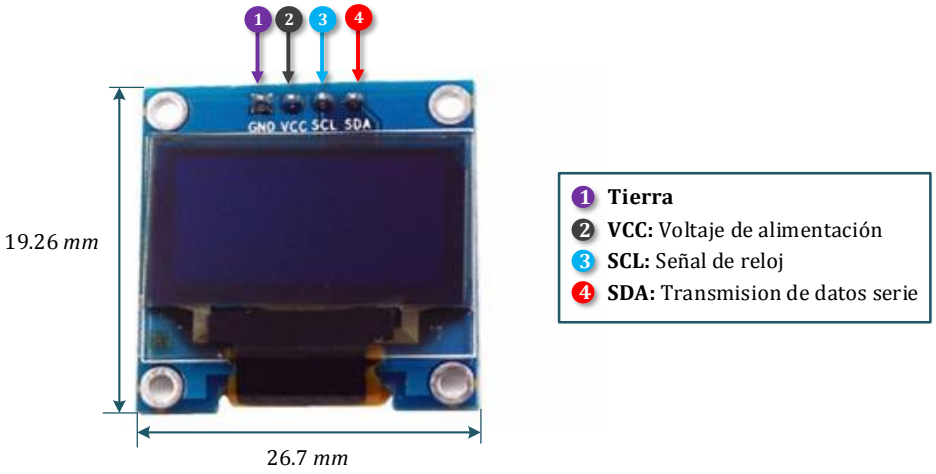


Figura 2.19. Pantalla OLED 0.96” [82]

3. DISEÑO

En esta sección se expondrán las conexiones de los elementos electrónicos que cumplen con los requerimientos del prototipo, así como también, los criterios de programación para elaborar los códigos del sistema.

Los parámetros analizados, tanto en software como en hardware, buscan satisfacer el óptimo funcionamiento del proyecto.

3.1. Etapas de Diseño

Para obtener el *script* final del prototipo se requirió la implementación de las funciones de forma secuencial. Primero, se estableció un enlace inalámbrico de comunicación entre los módulos NRF24L01+. Luego, se implementó un pulsador en el TX (ver Figura 3.3), con el objetivo de transmitir una señal que encienda un led en RX.

El tipo de variable transmitida en primera instancia fue `int`, después se analizó la conveniencia del envió de una variable tipo `float`, debido al gran rango de valores asignables y porque es recomendada para trabajar con valores analógicos. Sin embargo, se presentaron inconvenientes en la recepción de datos al intercambiar el tipo de las variables de `int` a `float`.

Además, se trabajó con cada módulo de forma independiente para el análisis del funcionamiento, tanto físico como de programación. Posteriormente, se añadió cada avance exitoso al *script*.

Inicialmente, en lugar de emplear el geófono, la señal analógica se obtiene a partir de una fuente de voltaje, la cual se conecta en modo diferencial a los pines $A0$ y $A1$ del ADS1115. Posteriormente, se realiza la digitalización de los datos y los resultados se visualizaron en el monitor serial de Arduino IDE.

Por otro lado, cuando los trabajadores del IG efectúan trabajos de campo, transportan gran cantidad de implementos, donde la visualización de datos en una laptop no sería conveniente en un escenario real. Para observar los datos que el TX envíe; se busca implementar la pantalla OLED 0.96", donde se analiza la posibilidad de presentación de imágenes monocromáticas con el objetivo de explorar el consumo energético y las prestaciones del display.

Posteriormente, se trabaja en el despliegue de datos a través del display, el cual está constituido por una matriz de leds, donde a cada uno se los representa mediante una coordenada. A continuación, se realiza un gráfico en el cual cada muestra se simboliza a

través del encendido de un led en el display. Después, se interconectan los puntos con líneas para representación de la señal analógica y mejorar así la percepción de los datos.

Luego de implementar el gráfico, se presentan varios problemas de estabilidad en el enlace inalámbrico. Los datos enviados de forma exitosa fueron menores, es decir, se tenía un alto BER, sin embargo, los inconvenientes se atribuyen a hardware, donde la comunicación SPI entre elementos requiere de estabilidad eléctrica. Para contrarrestar el problema, se elabora un primer par de placas PCB tanto para TX como para RX (ver Figura 3.27 y Figura 3.28 respectivamente)

A pesar de observar una notable mejoría, los inconvenientes se mantienen y se analiza la evolución de los códigos programados, donde se concluye que el problema es producto del gráfico en el display OLED. Por otro lado, el tiempo empleado por el procesador del microcontrolador para graficar las muestras en la pantalla, genera un retardo considerable que no permite atender el arribo de datos, lo cual ocasiona la perdida de los mismos.

Particularmente, el led de señalización no diferencia entre perdida de dato o de enlace, donde la percepción que otorgaba el encendido del led rojo, era un enlace inestable. Además, se suprime esa sección del *script* y se retorna al despliegue de datos por medio de coordenadas, donde se añade un contador interno para disminuir el número de f.p.s. (*frames per second*) en pantalla.

Otra alternativa que surge para mantener la idea original de gráfico dinámico, consiste en programar un *script* que almacene un determinado número de muestras y las grafique después de un tiempo. Consecuentemente, la frecuencia de actualización del gráfico disminuiría, sin embargo, al no ser una prioridad del prototipo y debido al tiempo disponible para finalizar el proyecto, se plantea la presente solución como una posterior mejora.

Cabe recalcar, que se postergó hasta el final el análisis del MCP4725, ya que, no se encontraba en las tiendas electrónicas, por lo que se realizó la importación del mismo. En comparación con la señal filtrada PWM que se obtiene desde Arduino, la señal análoga a la salida es similar a la original y con mejor continuidad, sin embargo, se observa un ligero ruido. No obstante, el principal inconveniente es el rango de voltaje de la señal del MCP4725, la cual varía entre 0 y $5\,V$.

Cada función que cumplen los elementos seleccionados, se describen en detalle a continuación.

3.2. Transmisor

3.2.1. Componentes del Sistema TX

3.2.1.1. Módulo ADS1115

El módulo ADS1115 se utiliza para digitalizar la señal analógica proveniente del sensor sísmico y forma parte fundamental en el sistema de TX.

Debido a que el geófono genera voltajes positivos y negativos, se configura el módulo conversor análogo - digital en modo diferencial. Para permitir el ingreso de las dos señales soportadas por el módulo, se emplean dos borneras, una de ellas conectada a los pines $A0$ y $A1$ y la otra a los pines $A2$ y $A3$.

Con la instalación de las borneras, se puede procesar dos señales analógicas, sin embargo, el prototipo empleará únicamente una entrada, en la cual se conectará posteriormente el geófono L4C Sercel.

Para la transmisión de los datos digitalizados por el ADS1115, se conectan respectivamente los pines SCL y SDA del módulo, con los pines $A5$ y $A4$ del Arduino. Por otro lado, para energizar, el pin VDD se alimenta con $5V$ provenientes del Arduino y GND se conecta a tierra.

Cabe mencionar que, el pin $ADDR$ (pin de dirección del módulo ADS1115, asignada físicamente) se conecta a tierra para configurar al módulo con una dirección por defecto ($0x48$). Las conexiones para la generación de direcciones que pueden asignarse al ADS1115, se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Direcciones para el ADS1115 [83]

Pin ADDR	Dirección	
	Binaria	Hexadecimal
GND	1001000	0x48
VDD	1001001	0x49
SDA	1001010	0x4A
SCL	1001011	0x4B

El pin $ALRT$ se emplea para la comparación de un voltaje de entrada con un nivel de umbral, es decir si el nivel de umbral es superado, se generará una señal de alerta [84].

Además, el pin $ALRT$ permanecerá desconectado, debido a que no existe la necesidad de comparación entre la señal sísmica y una señal de referencia.

Todas las conexiones necesarias para el funcionamiento del módulo, se muestran en la Figura 3.1.

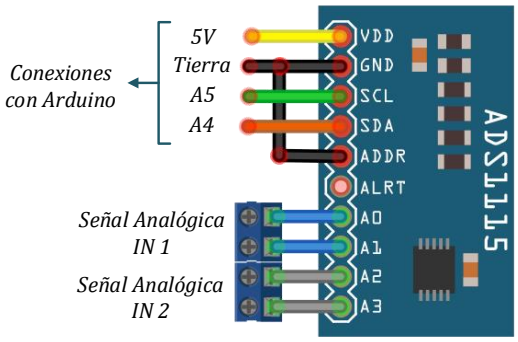


Figura 3.1. Conexiones del Módulo ADS1115 [68]

3.2.1.2. Módulo NRF24L01+

El objetivo principal del módulo consiste en una comunicación inalámbrica a través del enlace generado entre ambos transductores del TX y RX, donde se enviará la señal digitalizada por el módulo ADS1115.

En particular, el protocolo de comunicación entre el módulo y el microcontrolador del Arduino es SPI. Para mantener la comunicación SPI, la librería del módulo configura por defecto los pines digitales, $D12$ para $MISO$ para, $D11$ para $MISO$, mientras que $D13$ para la señal de reloj SCK. Los pines del módulo CSN y CE que habilitan la comunicación SPI, se conectan a los pines digitales del Arduino $D10$ y $D9$ respectivamente. El NRF24L01+ se polariza con $3.3\ V$ y el Arduino posee un pin que suministra ese voltaje ventajosamente.

También, el pin IRQ (*Interrupt* [85]) es un pin de interrupciones que trabaja en capa de enlace del NRF24L01, el cual informa al microcontrolador sobre un evento importante. Por ejemplo, se establecen interrupciones con la combinación de los siguientes eventos: datos transmitidos, datos recibidos, número máximo de intentos de transmisión alcanzados.

Por otro lado, debido a que no es necesario el uso de interrupciones, el pin IRQ permanecerá desconectado.

En la Figura 3.2 se aprecian las conexiones que se realizaron en el módulo de radio.

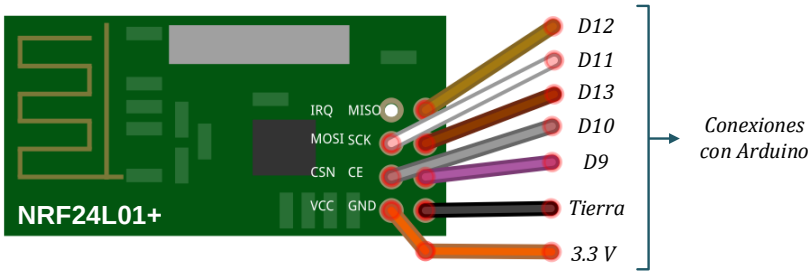


Figura 3.2. Conexiones del Módulo NRF24L01+ [79]

3.2.1.3. Elementos adicionales

Para efectos de señalización se conecta un diodo led bicolor (cátodo común) a los pines Digitales $D6$ y $D7$ del Arduino; junto a resistencias de $100\ \Omega$ en cada ánodo respectivo de alimentación del led. Por otro lado, se conecta un interruptor en el cátodo para interrumpir el flujo de corriente al led en caso de requerirse y minimizar de esta manera el consumo energético.

3.2.1.4. Interconexión entre elementos

A continuación, la Figura 3.3 muestra el esquema de conexiones para el funcionamiento del prototipo de trasmisión:

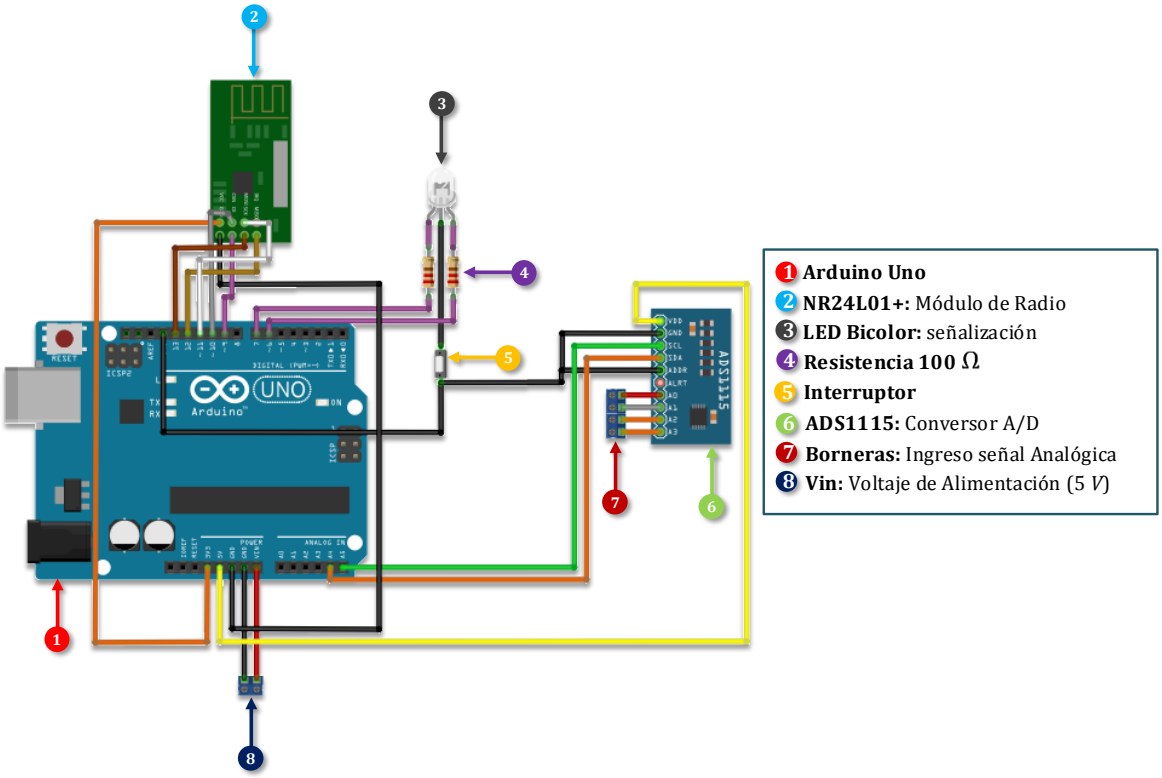


Figura 3.3. Esquema de conexiones para el Transmisor

Por otro lado, se realizó una prueba del consumo de corriente y se obtuvo el valor de $81\ mA$, tal como se observa en la Figura 3.4.

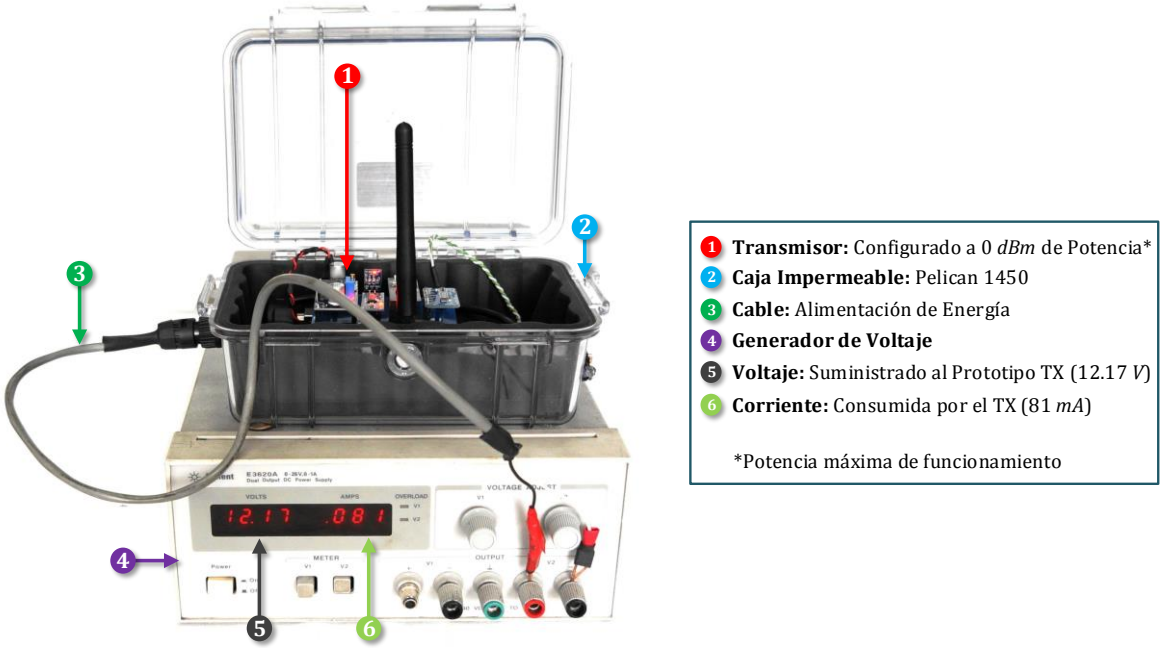


Figura 3.4. Consumo de corriente del Transmisor

Finalmente, los resultados de consumo de corriente configurados para los diferentes niveles de operación del transmisor, se muestran en el capítulo 4 (Resultados y discusión).

3.2.2. Software del Transmisor

El programa inicia con la declaración de las librerías para el adecuado funcionamiento de los módulos empleados por el TX (NRF24L01 y ADS1115) y con parámetros de inicialización, tales como: declaración del canal de transmisión, variables a ser empleadas, velocidad de transmisión, tasa de muestreo, tipo de variables.

Después, como se muestra en la Figura 3.5, no tiene un final, ya que, el Arduino repetirá las sentencias programadas en `void loop()` (procesamiento de los datos obtenidos del ADS1115). Además, si existe disponibilidad de enlace entre TX y RX se enviarán los datos digitalizados de la señal proveniente del geófono y mostrará por puerto serial el valor enviado, caso contrario, se desplegará por puerto serial el mensaje “Error no TX”.

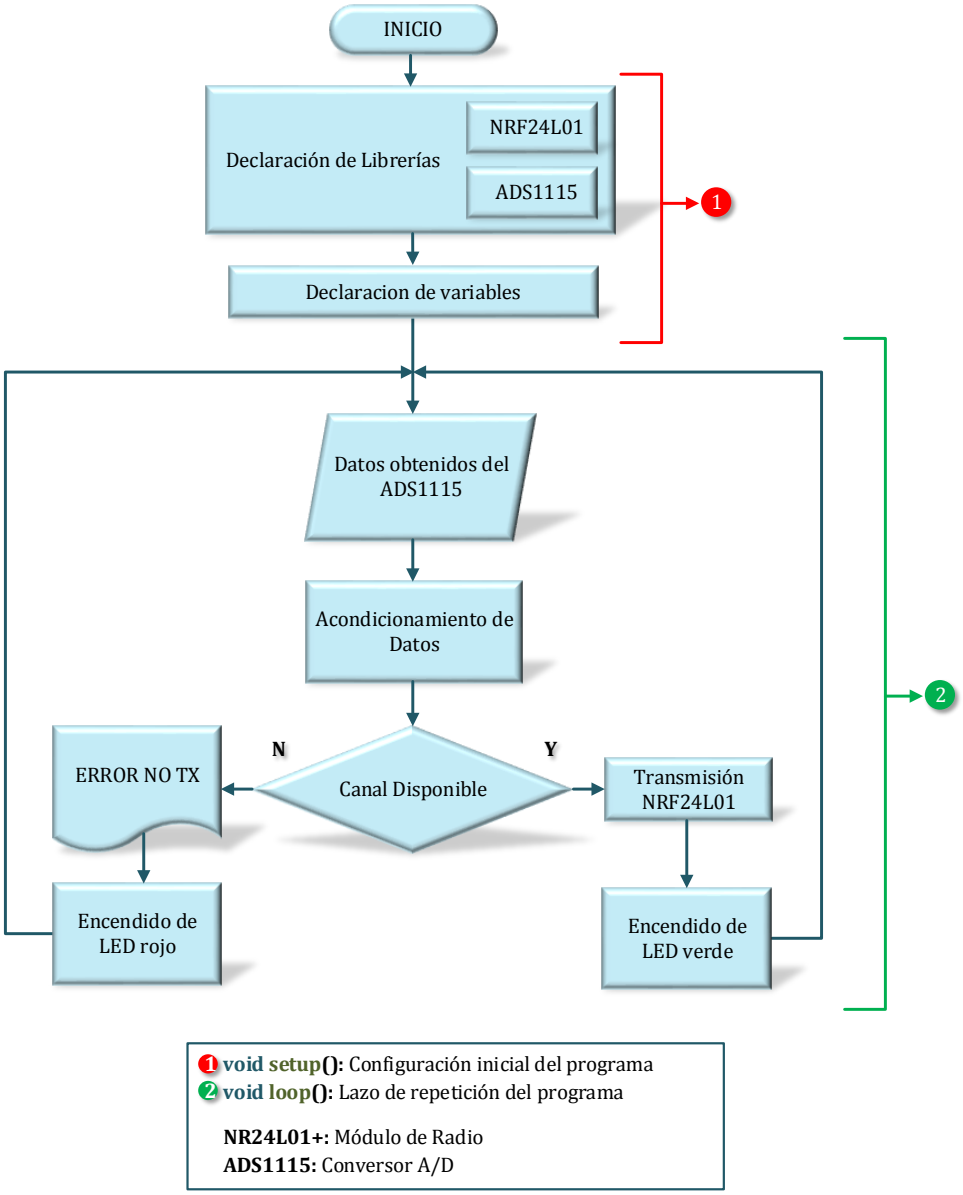


Figura 3.5. Diagrama de flujo del programa del transmisor

3.2.2.1. Declaración de librerías [86]

Ya que cada módulo requiere su propia configuración, los fabricantes respectivos diseñan librerías necesarias para obtener un óptimo desempeño.

Por este motivo, las librerías requieren ser instaladas en el entorno de programación Arduino IDE y en caso de no encontrarse instalada la librería correspondiente, el programa no compilará. Como resultado no se implementará el *script* (código de programación) en la placa Arduino para su ejecución.

Cabe recalcar que para instalar una librería, se ingresa al gestor de código Arduino IDE y a continuación se realizan los siguientes pasos: Programa / Incluir librería / Gestionar librerías (Ver Figura 3.6).

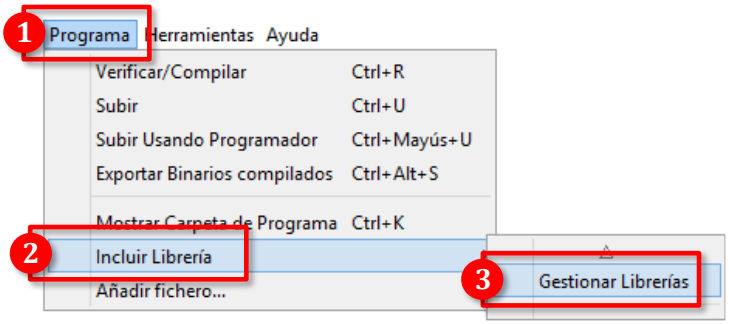


Figura 3.6. Gestor de Librerías de Arduino IDE [86]

Durante este proceso, se despliega una ventana, donde se realiza la búsqueda de la librería requerida. Una vez localizada la librería correspondiente al módulo deseado, se selecciona Instalar. Por último, una vez instalada la librería, se selecciona Cerrar, para salir del Gestor de Descargas (Ver Figura 3.7).

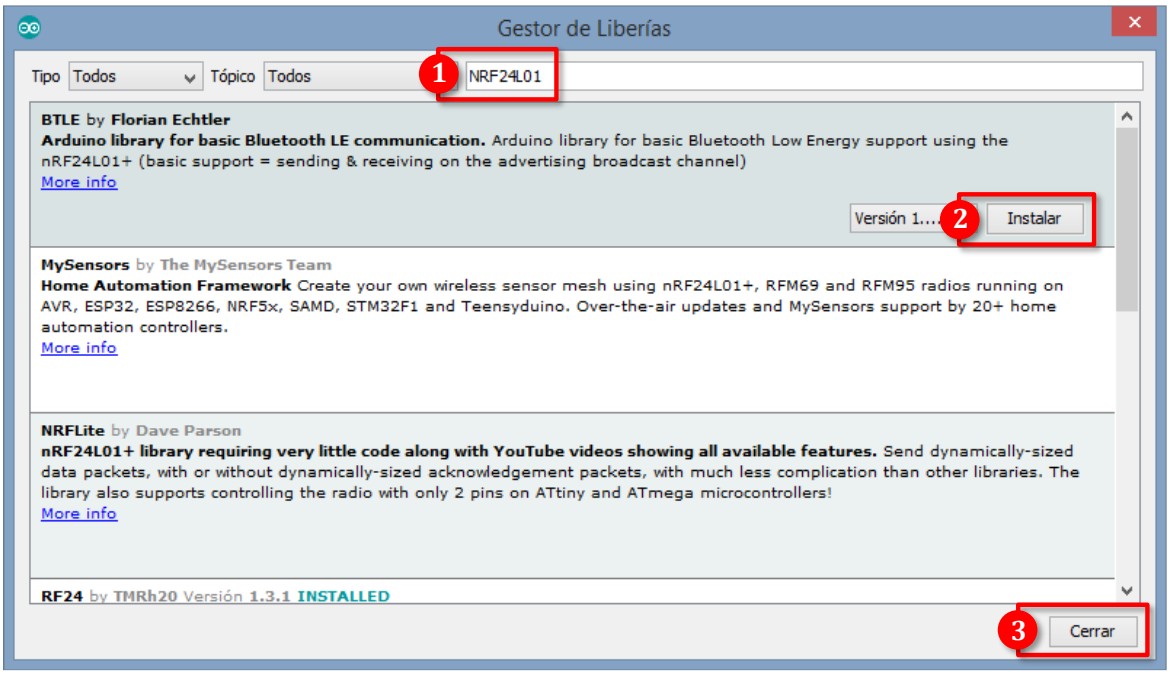


Figura 3.7. Instalación de una librería en el Gestor de Librerías [86]

A continuación, existen varios métodos de instalación de librerías, sin embargo, se recomienda seguir el método antes descrito, pues si existe una actualización de algún parámetro en alguna librería, Arduino IDE realizará una descarga automática de la misma.

Para incluir una librería en el *script*, se emplea el comando: `#include <nombre de la librería>`. Un ejemplo de lo mencionado, se aprecia en la Figura 3.8, donde se muestra la agregación de las librerías para el módulo NRF24L01+ y el ADS1115.

```
#include <SPI.h>      //Libreria para el NRF24L01
#include <nRF24L01.h> //Libreria para el NRF24L01
#include <RF24.h>     //Libreria para el NRF24L01
#define  CE_PIN 9                          //Pin CE
#define  CSN_PIN 10                        //Pin CSN
RF24 radio(CE_PIN, CSN_PIN);               //Objeto radio NRF2
byte direccion[5] ={'c','a','n','a','l'};  //Variable con la d

//CONVERSOR AD
#include <Wire.h>                 //Libreria para el ADS1015
#include <Adafruit_ADS1015.h>     //Libreria para el ADS1015
```

Figura 3.8. Declaración de librerías en el *script* del transmisor

3.2.2.2. Configuración inicial del *script*

La declaración de las variables con un formato apropiado es importante, ya que existen variables de tipo entero, flotante, entre otras. Para el transmisor se emplea variables de tipo `byte` (transforma un valor a un tipo de dato de bytes) [83] y la variable `float,` es decir, de tipo flotante.

Al poseer gran resolución (número máximo $3.4028235\,x\,10^{38}$ y mínimo $-\,3.4028235\,x\,10^{38}$), las variables `float` se emplean para aproximar valores analógicos y continuos, donde se almacenan $32\ bits$ ($4\ bytes$) de información [87].

A continuación, un ejemplo de declaración de variables (Ver Figura 3.9).

```
#define  CSN_PIN 10                        //Pin CSN
RF24 radio(CE_PIN, CSN_PIN);               //Objeto radio NRF24L01
byte direccion[5] ={'c','a','n','a','l'};  //Variable con la dirección del canal de TX

//CONVERSOR AD
#include <Wire.h>                 //Libreria para el ADS1015
#include <Adafruit_ADS1015.h>     //Libreria para el ADS1015
Adafruit_ADS1115 ads;             //Libreria para el ADS1015
const float multiplier = 0.1875F; //Constante de multiplicación para el ADS1015

float datos[4]; //Vector con los datos a ser enviados en tipo flotante
```

Figura 3.9. Declaración de variables `byte` y `float` en Arduino IDE

Luego de declarar variables, se especifican los parámetros de inicialización en la sección `void setup ()`. Primero, los parámetros en mención sirven para inicializar variables, modos de pin (entrada o salida), ejecución de bibliotecas, etc. Esta sección solo se ejecuta una vez, después de cada encendido o reinicio de la placa Arduino [88].

Los parámetros de inicialización se emplean para que las variables, pines digitales, configuración de aspectos de funcionamiento en librerías, entre otros, se encuentren listos para su ejecución en el `void loop ()`.

Particularmente, `void setup ()` se ejecuta una sola vez al arrancar el programa y únicamente vuelve a ejecutarse en un reinicio, o cuando se produce un fallo en el suministro de energía en la placa Arduino.

También, el valor mínimo a seleccionarse para la tasa de muestreo seria $200\ Hz$ pues, como se mencionó la frecuencia típica más alta en señales sísmicas de periodo corto suele ser $100\ Hz$. De hecho, en el módulo digitalizador ADS1115, las opciones de muestreo en modo diferencial son: $8, 16, 32, 64, 128, 475$ y 850 *s.p.s.* (*samples per second* – muestras por segundo), por consiguiente, se selecciona 475 *s.p.s.* mediante el comando `#define ADS1015_REG_CONFIG_DR_2400SPS(0x00A0)`. Por otro lado, en el módulo NRF24L01 el parámetro a ser considerado es la velocidad de transmisión. Entre las opciones disponibles (ver Tabla 2.1) , se selecciona 250 *kbps* debido a que transmitiendo 450 *s.p.s.* con una longitud de 16 *bits* por muestra, se requeriría un mínimo de $(450 \times 16)\ 7200$ *bps* en la transmisión, de donde resulta que 250 *kbps* al ser el valor mínimo posible de configuración en el módulo, es suficiente para cumplir con el objetivo de transmisión de datos.

En la Figura 3.10 se aprecia parte del `void setup()` del transmisor, en el cual se configuran parámetros la inicialización del módulo de radio NRF24L01 y del ADS1115. También, la inicialización del puerto serial, para observar los datos en un monitor. Además, se asigna la dirección al canal de transmisión para el enlace entre los dispositivos en configuración punto a punto.

```
void setup()
{
radio.begin();                    //Inicicia
ads.begin();                      //Inicicia
Serial.begin(9600);               //Inicicia
radio.openWritingPipe(direccion); //Apertura

pinMode(7, OUTPUT);               // Declara
pinMode(6, OUTPUT);               // Declara
}
```

Figura 3.10. Inicialización del Transmisor

3.2.2.3. Datos procesados del ADS1115

Debido a que el módulo conversor es empleado en modo diferencial, el valor registrado a través de ADS1115 se almacena en `int16_t`, la cual es una variable de tipo entero con una longitud de 16 *bits*. La línea de comando para realizar esta operación entre los pines $A0$ y $A1$ es [68]: `int16_t results0 = ads.readADC_Differential_0_1()`. En la variable `int16_t`, 15 bits corresponderán a valores muestreados y un bit será de signo.

3.2.2.4. Procesamiento de Datos y Transmisión

En esta sección se realiza cualquier proceso de acondicionamiento que requieran los datos. Además, se analiza el tratamiento de datos a través de una variable tipo `bool` (verdadero, falso). De esta manera, si los datos generados por el ADS1115 se procesan exitosamente, la variable será *verdadero*, caso contrario será *falso* [89]. Únicamente si `bool` es *verdadero*, se empleará el canal de comunicación.

Si el canal es empleado, se muestra por puerto serial un mensaje con los valores enviados. Si no existe uso del canal de comunicación, el mensaje observado por puerto serial es "`ERROR NO TX`". En términos de hardware, se puede visualizar lo antes mencionado a través del led bicolor, donde un envío exitoso encenderá el color verde, caso contrario se encenderá el rojo.

Además, en el lazo `void loop ()` se encuentran las líneas de código desde la obtención de datos con el ADS1115, así como también el procesamiento y transmisión de datos. Consecuentemente, el Arduino repetirá este proceso de manera cíclica, a menos que se efectúe un reinicio o se corte el suministro energético [90]. Finalmente, el *script* completo del transmisor se encuentra en el Anexo L.

3.3. Receptor

3.3.1. Componentes del Sistema RX

3.3.1.1. Módulo NRF24L01+

De manera análoga a la TX, se tiene un módulo NRF24L01+ por medio del cual llegarán los datos. El esquema de conexiones se mantiene, tal como se muestra en la Figura 3.2.

3.3.1.2. Módulo MCP4725

Una vez que los datos han sido recibidos, el conversor MCP4725 recupera la señal analógica original y se la obtiene en los pines $A0$ y $Vout$. Además, este módulo necesita $5\,V$ para energizarse y la comunicación SPI se mantiene a través de los pines SCL, SCA. Por otro lado, se implementa una bornera para apreciar la señal analógica de salida (Ver Figura 3.11).

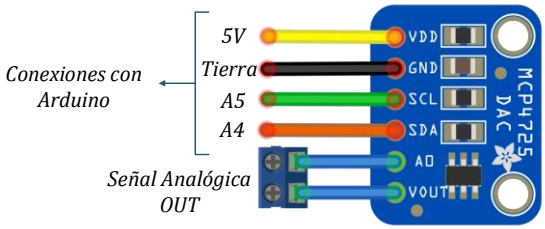


Figura 3.11. Conexiones del módulo MCP4725

3.3.1.3. Módulo OLED 0.96”

Con el propósito de observar los datos receptados, se conecta la pantalla OLED 0.96” (0.96 *pulgadas* – 2.44 *cm*) (Ver Figura 3.12). En esta pantalla se muestran los valores en recepción, y también se puede configurar el *script* para apreciar la señal sísmica.

Es importante recordar, que el suministro energético para encender el módulo es $3.3\ V$.

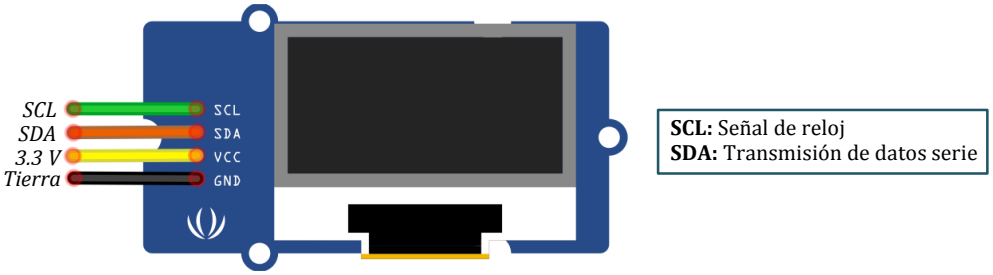


Figura 3.12. Conexiones del Display OLED 0.96"

3.3.1.4. Elementos adicionales

Igualmente, se conecta un led bicolor para señalización de procesos en los pines digitales *D7* y *D6* del Arduino.

3.3.1.5. Interconexión entre elementos

Adicionalmente, la Figura 3.13. muestra el esquema de conexiones para el funcionamiento del prototipo de recepción:

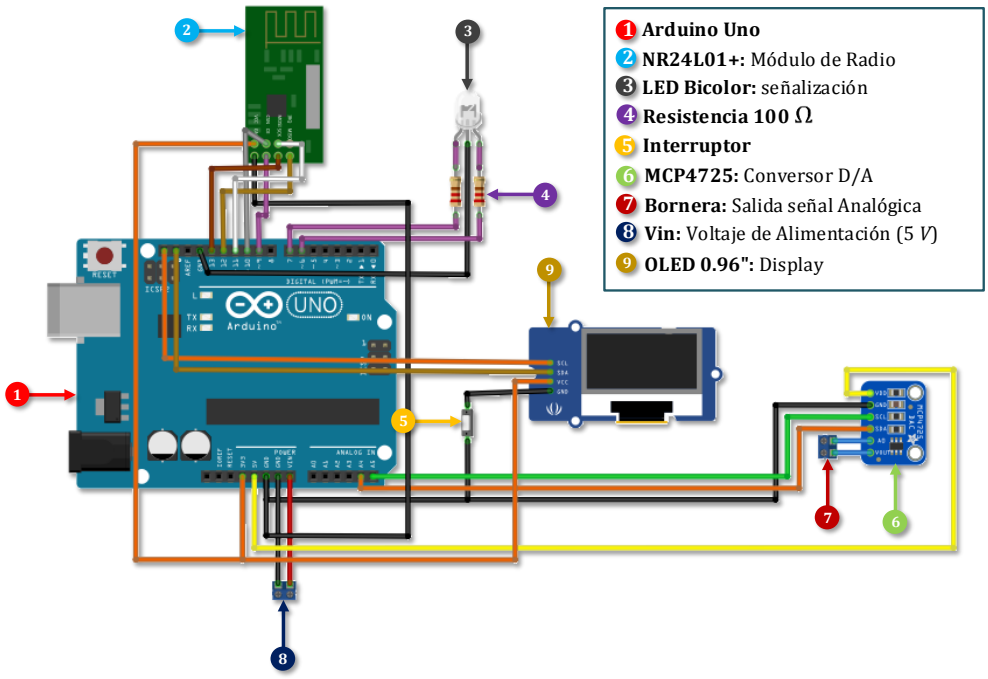


Figura 3.13. Esquema de conexiones para el Receptor

Además, se realizó una prueba del consumo de corriente, alcanzando un valor de $46\ mA$, tal como se aprecia en la Figura 3.14.

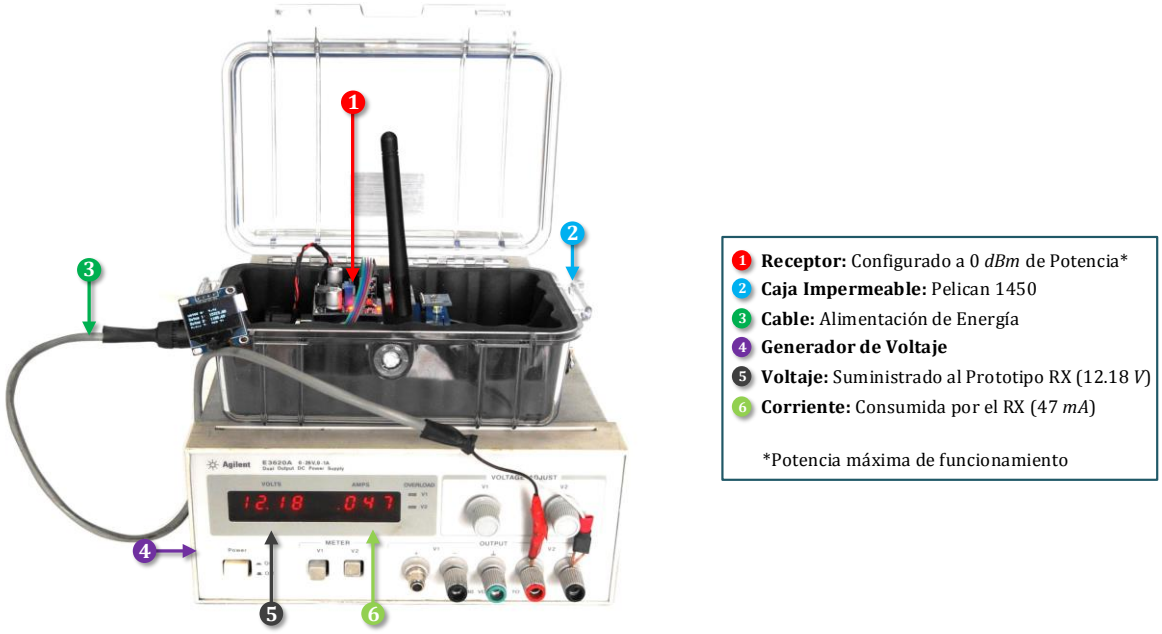


Figura 3.14. Consumo de corriente del Receptor

Finalmente, los resultados de consumo de corriente configurados para los diferentes niveles de operación del receptor, se muestran en el capítulo 4 (Resultados y discusión).

3.3.2. Software del Receptor

La secuencia del funcionamiento del script Receptor, se muestra en la Figura 3.15. También, de forma análoga con el script del TX, el programa inicia con la declaración de librerías para el adecuado funcionamiento de los módulos empleados por el RX (NRF24L01, MCP4725 y Display OLED 0.96") y con parámetros de inicialización, tales como: declaración del canal de transmisión, variables a ser empleadas, y configuración del tamaño de letra en el display. Después, como se muestra en la Figura 3.15, no tiene un final, ya que, el Arduino repite el contenido del void loop (recepción de datos).

Además, si existe recepción de datos provenientes del TX, se mostrará en el display el valor del voltaje generado por el geófono y de igual manera por puerto serial el valor enviado. Por otro lado, se enciende el led verde si el enlace es estable (entre TX y RX) y rojo en el caso contrario. Cabe recalcar que, si se pierde el enlace o si el transmisor se encuentra fuera del área de conexión, se despliega un mensaje en el *display*.

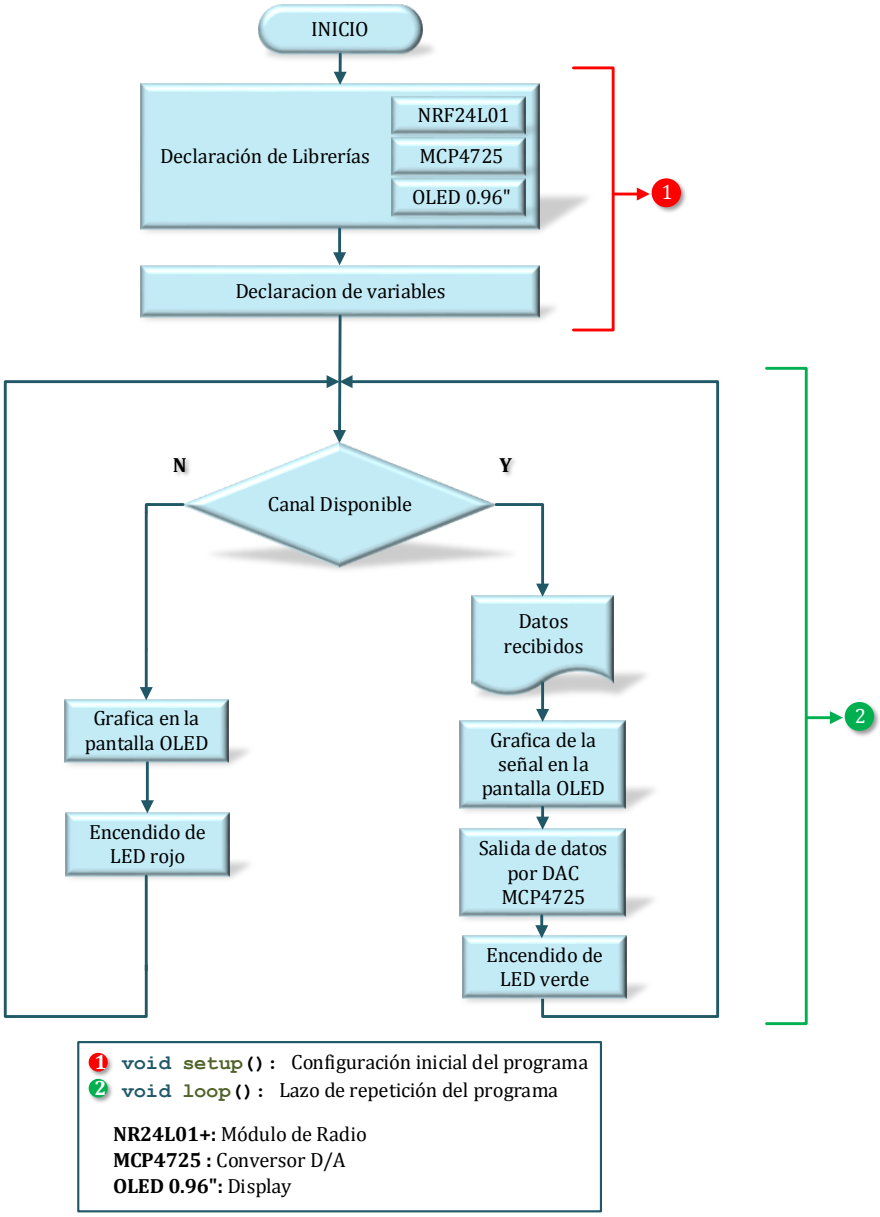


Figura 3.15. Diagrama de flujo del programa del receptor

3.3.2.1. Recepción de datos

La recepción de datos dependerá de la estabilidad en el canal de comunicación, donde pueden existir inconvenientes como interferencias, o una eventual desconexión entre el transmisor y el receptor.

Si el canal de comunicación permanece estable, los datos serán recibidos con éxito (*dato* n) en cada repetición del `void loop` y en caso de un fallo se tendrá como referencia el ultimo valor recibido con éxito (es decir *dato* $n-1$).

Esto se realiza con el objetivo de que exista disponibilidad de datos para el procesamiento y de esta manera graficar la señal en la pantalla OLED y visualizar los datos por medio de puerto serial.

3.3.2.2. Gráfica de la señal en el Display

Como se mencionó en el capítulo 2, sección 2.1.9, la pantalla OLED es una matriz de 128x64 diodos, en la cual se dibuja una línea de referencia que corresponde al voltaje de referencia del geófono. Para graficar el mencionado elemento, se emplea el comando: `display.drawLine(0, 32, 128, 32, WHITE)`, el cual graficará una línea horizontal en la mitad de la pantalla, donde los cuatro valores escritos corresponden a $x1$, $y1$ (punto inicial), y $x2$, $y2$ (punto final).

Además, con el objetivo de mantener compatibilidad con pantallas disponibles en el mercado, que tienen la capacidad de realizar gráficos a colores, se escribe *White* para el color de la línea.

Asimismo, el análisis de los puntos necesarios para graficar la línea horizontal se efectúa a partir de conocer que el punto (0,0) se ubica en la parte superior izquierda de la pantalla. En contraste, (64,128) está ubicado en la esquina opuesta (Ver Figura 3.16).

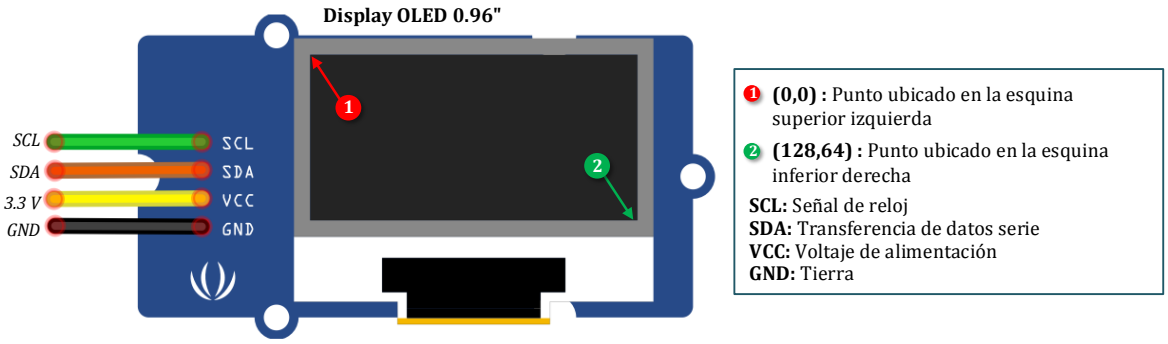


Figura 3.16. Coordenadas para la pantalla OLED 0,96”

Adicionalmente, se tiene una línea de referencia, donde el punto (0,32) se ubica a inicio de la mitad izquierda de la pantalla, mientras que el punto (128,32) es el punto ubicado en la mitad derecha del final de la pantalla (Ver Figura 3.17).

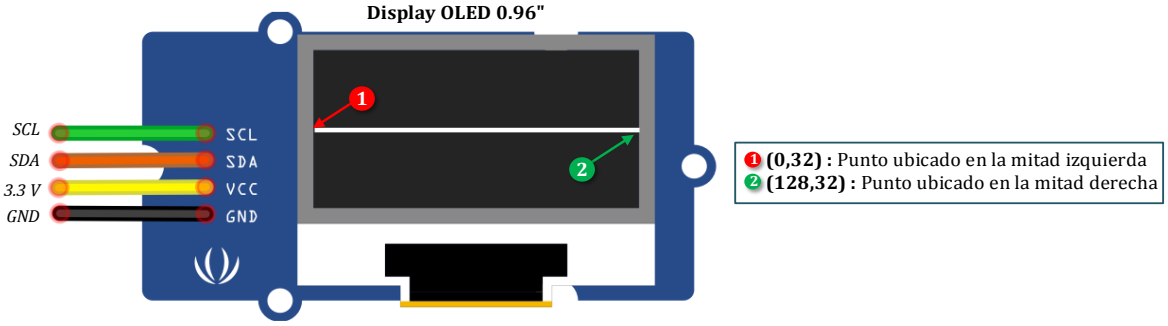


Figura 3.17. Línea de referencia en el Display OLED 0.96”

Para graficar los datos recibidos, las abscisas (eje X), implementan un contador que avanzará desde 0 hasta un valor máximo de 128 (por ser el punto más a la derecha de la pantalla), incrementando 1 en cada repetición del lazo `void loop`. Además, una vez concluido este conteo se reinicia el lazo.

igualmente, para las ordenadas (eje Y), entre los valores receptados, se selecciona el valor máximo y mínimo de las muestras (enviadas por el TX y generadas el geófono), donde, la diferencia entre la muestra máxima y mínima, generará un factor de multiplicación (para asignar la coordenada 0 al valor mínimo y 64 al valor máximo). En consecuencia, se aprovecha al máximo la representación gráfica de las muestras.

3.3.2.3. Salida de datos por DAC MCP4725

Para la salida de la señal analógica de 12 bits se utiliza el comando: `dac.setVoltage()`, donde los datos recibidos se traducen como un voltaje a través del módulo conversor DAC MCP4725.

Según las especificaciones del fabricante, la salida de datos corresponde únicamente tensiones entre 0 y $5\ V$. En la Figura 3.18 se observa una senoidal analógica (graficada en un osciloscopio) obtenida a través del módulo MCP4725.

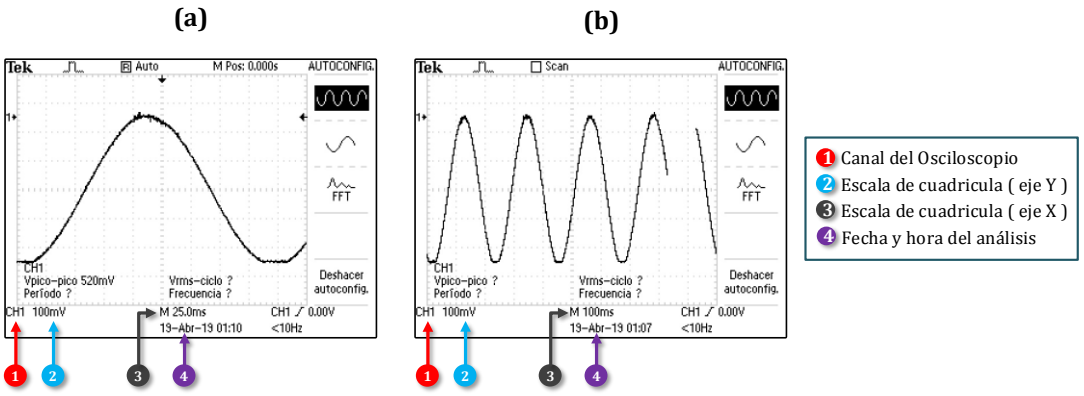


Figura 3.18. Señal analógica obtenida del MCP4725:
(a) Escala de cuadricula en Y de $25\ ms$; (b) Escala de cuadricula en Y de $100\ ms$

Como resultado, el *script* completo del receptor se encuentra en el Anexo M.

3.3.2.4. Salida Serial de Datos

Para observar los datos digitalizados se emplea comunicación serial entre el Arduino y el computador. Además, se diseña un programa en MatLab para visualizar dinámicamente la información (Ver Figura 3.19).

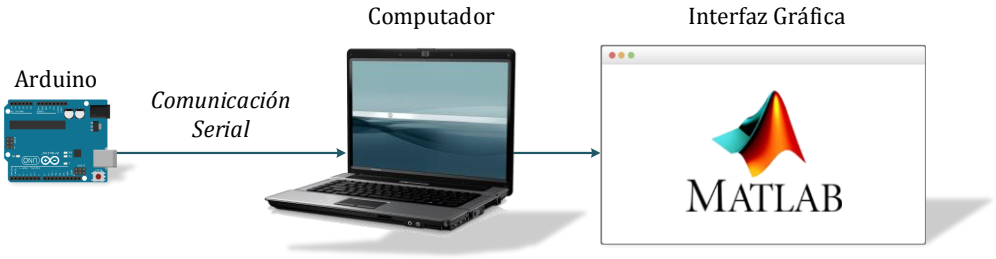
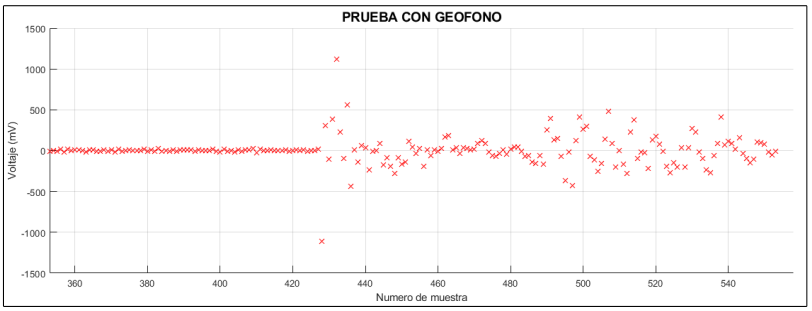


Figura 3.19. Esquema de conexión serial para visualización de datos en MatLab

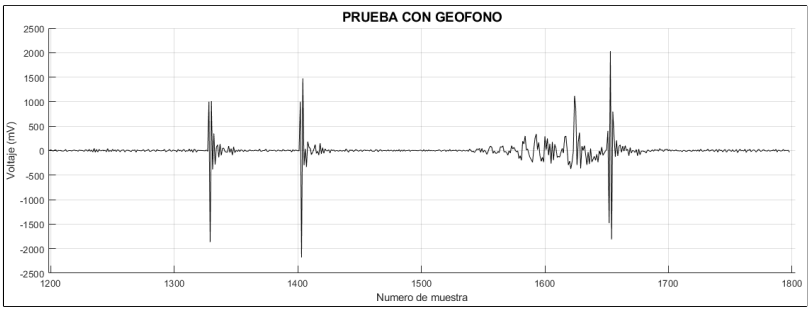
Los parámetros fundamentales a ser considerados son: el número de puerto empleado para la comunicación serial y la velocidad de intercambio de información.

Los datos que provienen del geófono, localizado en transmisión, representan un punto que puede ser positivo o negativo y se grafican dinámicamente en un sistema de coordenadas, el cual representa voltaje (mV) en las abscisas y número de muestra en las ordenadas.

Sin embargo, el despliegue de los datos en forma de puntos era ambigua y no permitía una correcta apreciación de la información. Afortunadamente, la versión 2018 de MatLab incorpora el comando `animatedline`, el cual facilita el despliegue del grafico animado, a través de una línea continua que se crea a partir de la recepción de nuevas muestras. El comando `addpoints` es el encargado de añadir cada una de las muestras al gráfico, lo cual produce la percepción de movimiento. La diferencia entre el gráfico con puntos y el gráfico que emplea `animatedline` se aprecia en la Figura 3.20.



(a)



(b)

Figura 3.20. Gráfico en MatLab: (a) Representación de señal mediante puntos; (b) Representación de señal mediante líneas

Con el objetivo de reducir el procesamiento en MatLab, se emplea el comando `limitrate`, el mismo que restringe el número de f.p.s. (*frames per second*) a 20 [91]. De esta forma, se consigue que el gráfico no muestre un retraso respecto a las muestras recibidas. Finalmente, se adjunta el script de Matlab en el Anexo M.

3.4. PCB (*Printed Circuit Board*)

Además, se diseñó un PCB (TX y RX) con el objetivo de conectar eléctricamente los módulos seleccionados (con el uso de soldadura de estaño) y el Arduino. De esta forma, se reduce el uso de cables y se organiza los elementos, de forma que, sin variar ninguna de las funciones en el prototipo, se ocupe el menor espacio posible.

3.4.1. Primera versión

El diseño del circuito impreso del TX cuenta con dos interruptores para activar o desactivar el flujo de corriente, donde un interruptor desactiva el suministro de energía del circuito y el otro desactiva la conexión del cátodo común del led de señalización. En particular, se añaden *jumpers* (puentes) para que la placa sea de un solo lado, los cuales se muestran en la Figura 3.21.

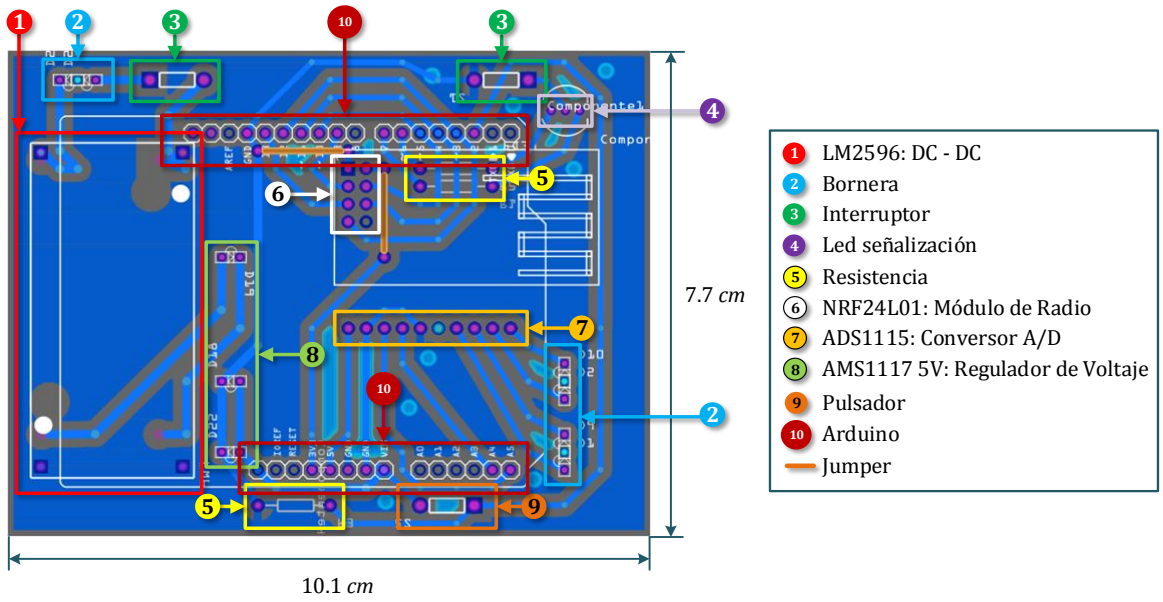


Figura 3.21. Primera Versión PCB TX

También, el diseño del circuito impreso del RX posee dos interruptores para activar o desactivar el flujo de corriente, donde un interruptor desactiva el suministro de energía del circuito y el otro desactiva la conexión del cátodo común del led de señalización y la tierra del display OLED 0.96". A continuación, se muestran los jumpers para que la placa sea de un solo lado (Figura 3.22).

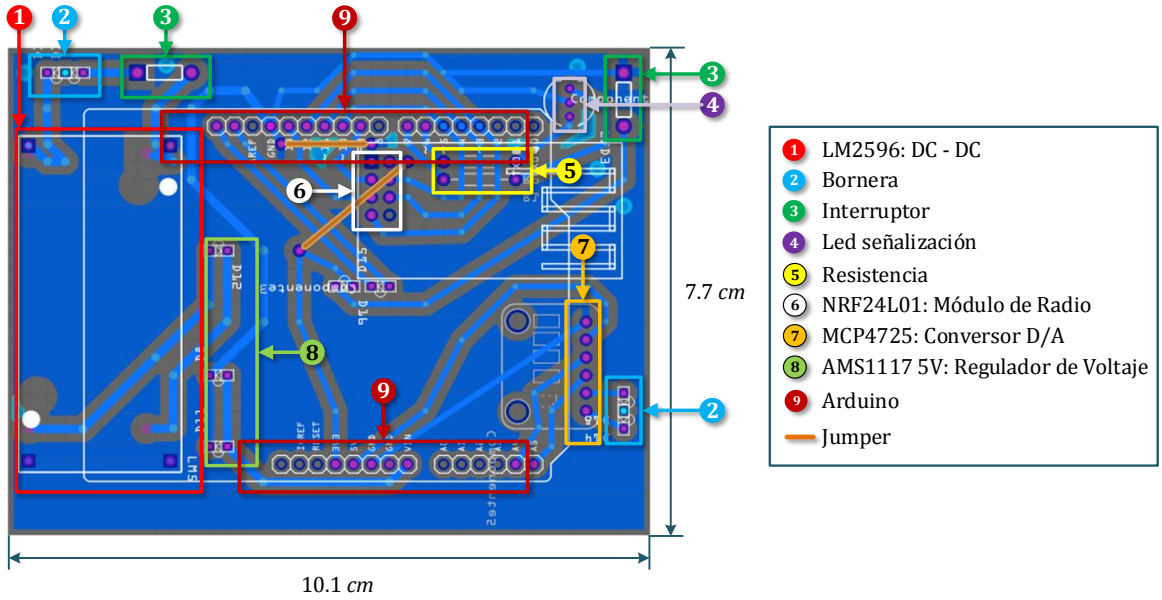


Figura 3.22. Primera Versión del diseño PCB RX

Posteriormente, se implementa los diseños en placas de cobre, y se añade un pulsador en el transmisor para facilitar el desarrollo del *script* final de funcionamiento (Ver Figura 3.23).

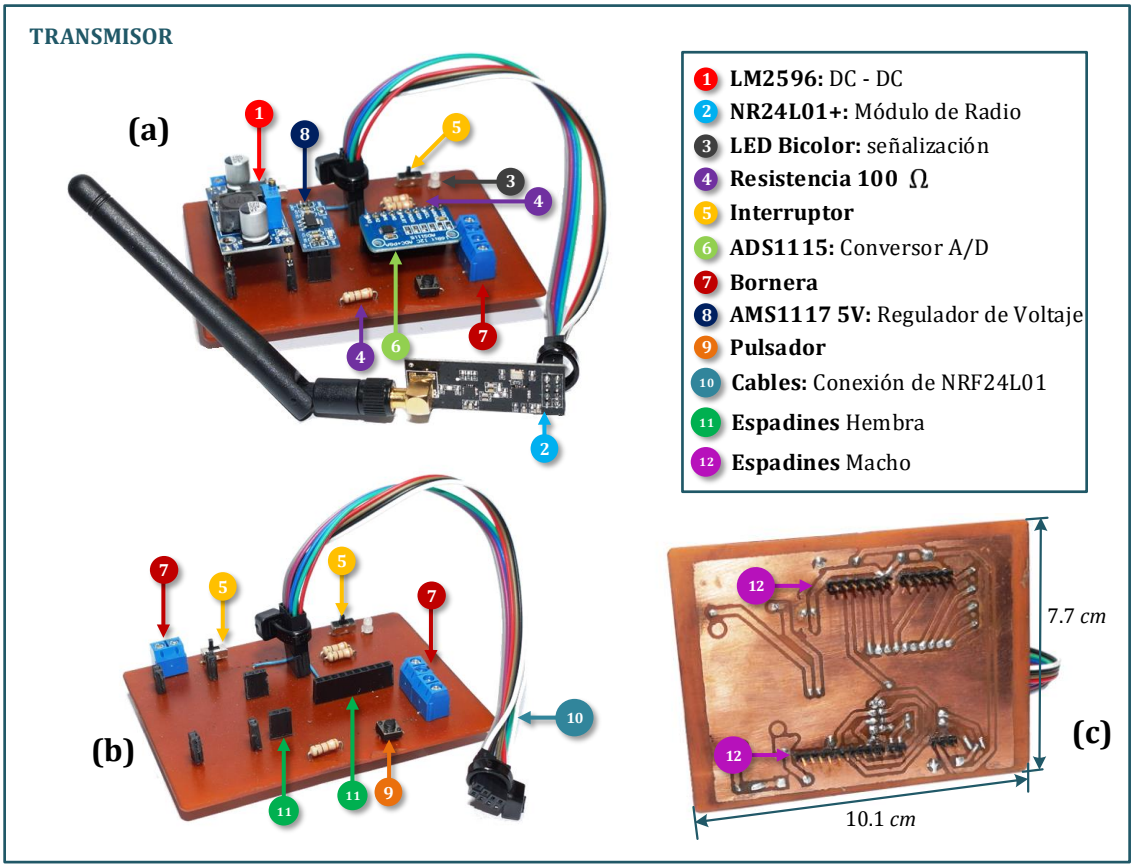


Figura 3.23. Implementación Primera Versión de Transmisor: (a) PCB TX con módulos electrónicos; (b) Vista superior de PCB TX; (c) Vista inferior de PCB TX

Por último, se muestra la implementación del diseño del receptor en la Figura 3.24.

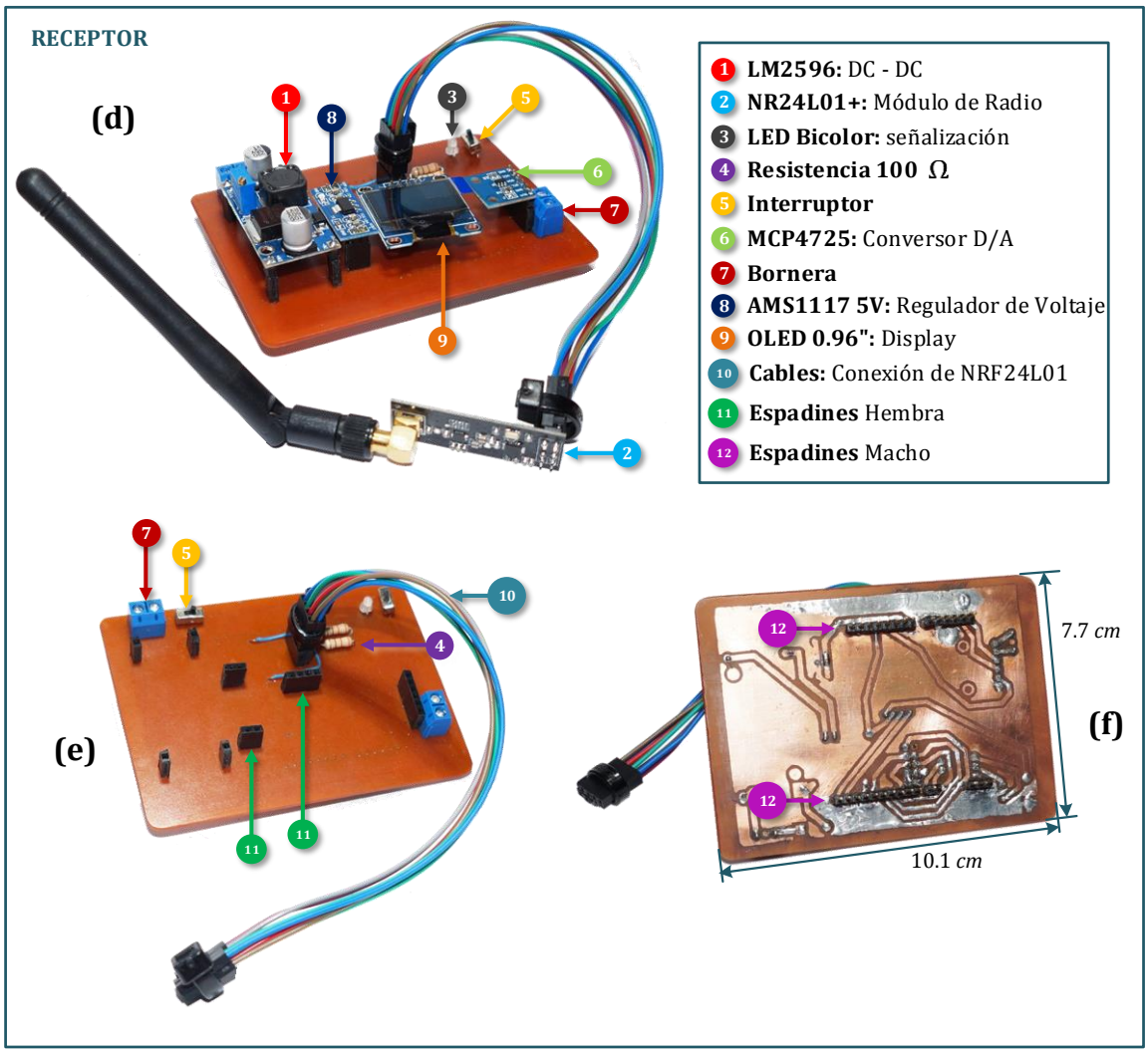


Figura 3.24. Implementación Primera Versión de Receptor: (a) PCB RX con módulos electrónicos; (b) Vista superior de PCB RX; (c) Vista inferior de PCB RX

3.4.2. Segunda versión

Después, se rediseña la placa PCB (primera versión) con el objetivo de disminuir el tamaño, a un valor de $7.1 \times 5.5\ cm$ ($10.1 \times 7.7\ cm$, primera versión), lo cual representa una reducción del 48.15% del área del tamaño original.

Finalmente, se agregan detalles de identificación y logo del Instituto Geofísico para el PCB transmisor y receptor, tal como se muestra en la Figura 3.25.

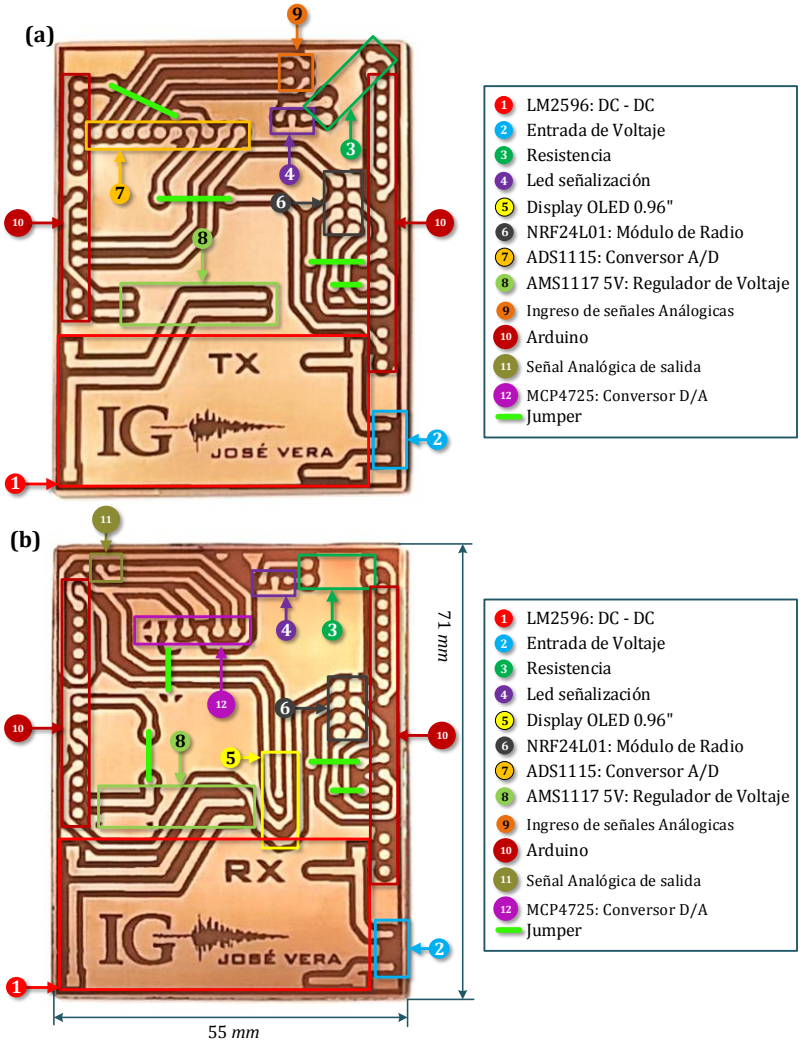


Figura 3.25. Segunda versión de PCB: (a) Transmisor; (b) Receptor

A continuación, las diferencias entre la primera versión y la segunda versión se resumen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Diferencias entre Primera y Segunda versión de PCB

Elemento	Descripción	TX		RX	
		Primera Versión	Segunda Versión	Primera Versión	Segunda Versión
LM2596	DC – DC	X	X	X	X
AMS1117 5 *V*	Regulador de Voltaje	X	X	X	X
AMS1117 3.3 *V*	Regulador de Voltaje				
NRF24L01	Radio	X	X	X	X
ADS1115	Conversor A/D	X	X		
MCP4825	Conversor D/A			X	X
OLED 0.96"	Display			X	X
Bornera	Conector	X		X	
Interruptor	Elemento pasivo	X		X	
Pulsador	Elemento pasivo	X		X	

Para finalizar, se cambian las borneras por espadines macho, los cuales cumplen con la misma función, pero permiten optimizar el espacio de disposición de los módulos en los PCB (Ver Figura 3.26).

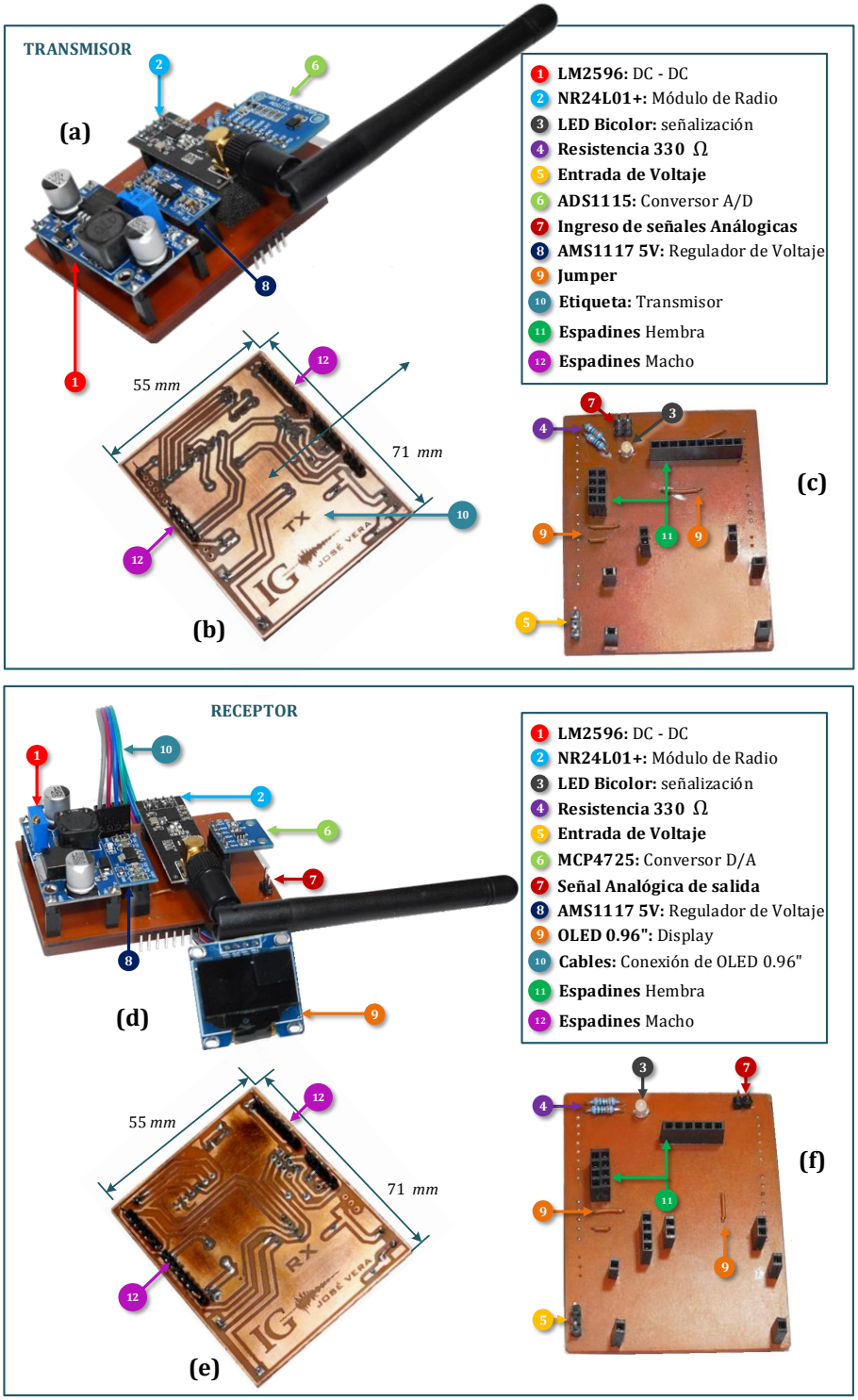


Figura 3.26. Implementación Segunda Versión: (a) PCB TX con módulos electrónicos; (b) Vista inferior de PCB TX; (c) Vista superior de PCB TX; (d) PCB RX con módulos electrónicos; (e) Vista inferior de PCB RX; (f) Vista superior de PCB RX

3.4.3. Tercera versión

Luego de realizar la segunda versión del PCB se efectuaron pruebas de desempeño del prototipo, donde el módulo NRF24L01 se polarizaba a través del puerto 3.3 del Arduino (Ver Figura 3.3), sin embargo, el inconveniente corresponde a la cantidad de corriente que proporciona el mencionado puerto, teniendo en cuenta, que posee una limitación de $40\ mA$. Por otro lado, al programar en el *script* el cambio de nivel de potencia del módulo NRF24L01 (de -18 dBm a una potencia superior), la corriente que requiere para su funcionamiento es mayor. En consecuencia, la limitación de corriente del puerto produce que el módulo de radio no disponga el suministro energético necesario para su funcionamiento y por ende el enlace entre TX y RX no se establece.

Sin embargo, este inconveniente se contrarresta con un módulo LM1117, el cual es un regulador de voltaje de $3.3\ V$ (voltaje necesario para la polarización del NRF24L01), que además, suministra una corriente superior (máximo $800\ mA$) a la proporcionada por el pin 3.3 de Arduino. Como resultado, el problema de los requerimientos energéticos del módulo de radio (NRF24L01), se solucionan y posibilitan de esta manera el cambio del nivel de potencia a través del *script* de programación.

Cabe recalcar que, la tercera versión posee todos los elementos y parámetros necesarios para el correcto funcionamiento del prototipo en todas las configuraciones de potencia, tal como muestra la Tabla 3.3. Por otra parte, los diseños de los PCB para TX y RX que poseen el mismo tamaño de la segunda versión (7.1 x $5.5\ cm$), se muestran en la Figura 3.27 y Figura 3.28 respectivamente, en la cual se señalan los pines donde se conectará el regulador de $3.3\ V$.

Tabla 3.3. Diferencias entre Segunda y Tercera versión de PCB

Elemento	Descripción	TX		RX	
		Segunda Versión	Tercera Versión	Segunda Versión	Tercera Versión
LM2596	DC - DC	X	X	X	X
AMS1117 5 *V*	Regulador de Voltaje	X	X	X	X
AMS1117 3.3 *V*	Regulador de Voltaje		X		X
NRF24L01	Radio	X	X	X	X
ADS1115	Conversor A/D	X	X		
MCP4825	Conversor D/A			X	X
OLED 0.96"	Display			X	X
Potencia -18 *dBm*	Nivel de potencia	X	X	X	X
Potencia -12 *dBm*	Nivel de potencia		X		X
Potencia -6 *dBm*	Nivel de potencia		X		X
Potencia 0 *dBm*	Nivel de potencia		X		X

En particular, para la interconexión entre la placa PCB y el Arduino se emplean espadines macho – macho. Sin embargo, para conectar los módulos con la placa se utilizan espadines hembra – macho, como se señala en las Figura 3.27. para el TX.

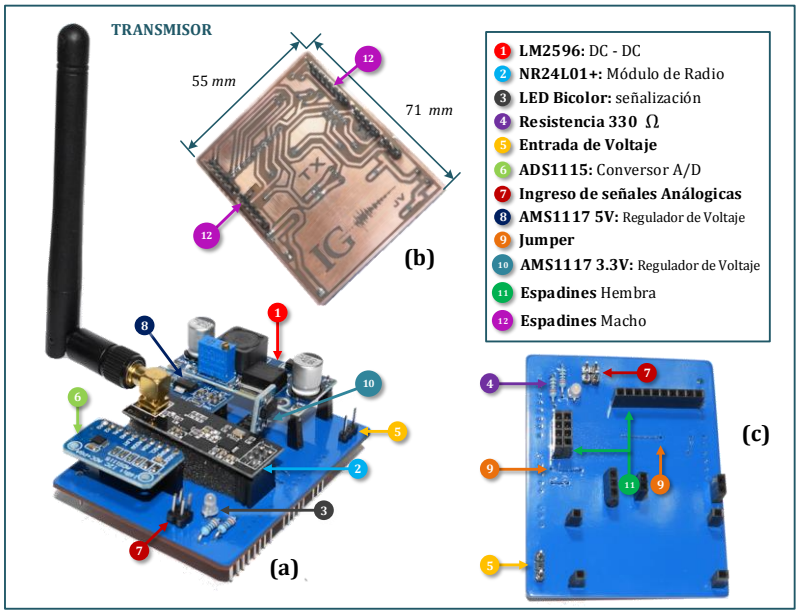


Figura 3.27. Implementación Tercera Versión: (a) PCB TX con módulos electrónicos; (b) Vista inferior de PCB TX; (c) Vista superior de PCB TX

Similar a lo realizado con el Transmisor, se utilizan espadines para asegurar el adecuado acoplamiento de todos los elementos (Ver Figura 3.28).

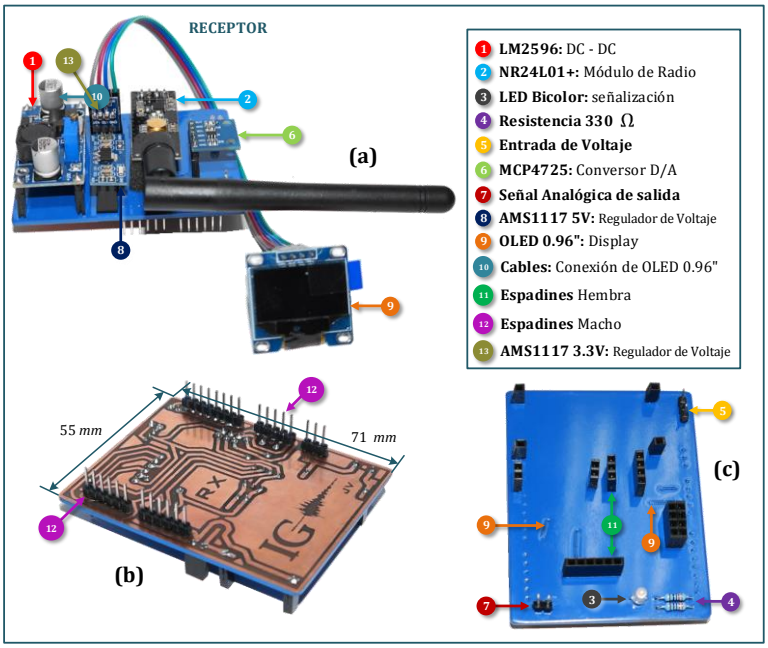


Figura 3.28. Implementación Tercera Versión: (a) PCB RX con módulos electrónicos; (b) Vista inferior de PCB TX; (c) Vista superior de PCB TX

Finalmente, en la Figura 3.29 se muestran las tres versiones PCB desarrolladas.

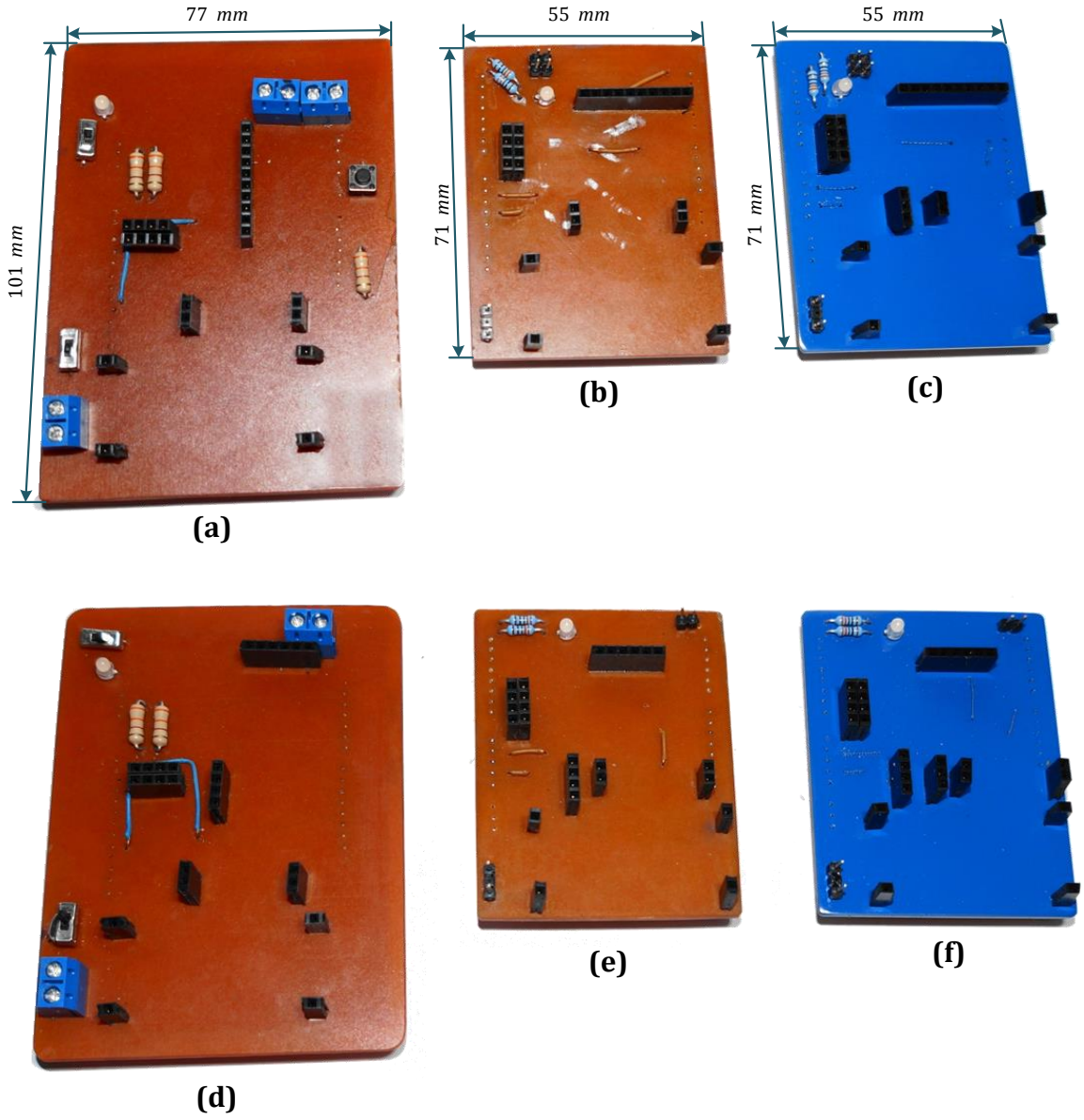


Figura 3.29. PCBs desarrollados:
(a) TX Primera Versión; (b) TX Segunda Versión; (c) TX Tercera Versión;
(d) RX Primera Versión; (e) RX Segunda Versión; (f) RX Tercera Versión

Por último, los diseños y archivos necesarios para replicar las placas de la tercera versión se muestran en el Anexo N.

3.5. Sistema de Alimentación

El sistema de alimentación es igual, tanto para transmisión, como para recepción. De esta manera, considerando la Figura 1.15 y la Figura 2.8, se conectan los paneles solares y las baterías al controlador de carga. Por otro lado, en la zona de descarga estarán conectados el conversor DC – DC y el regulador de voltaje de $5\,V$, lo cual se aprecia en la Figura 3.30.

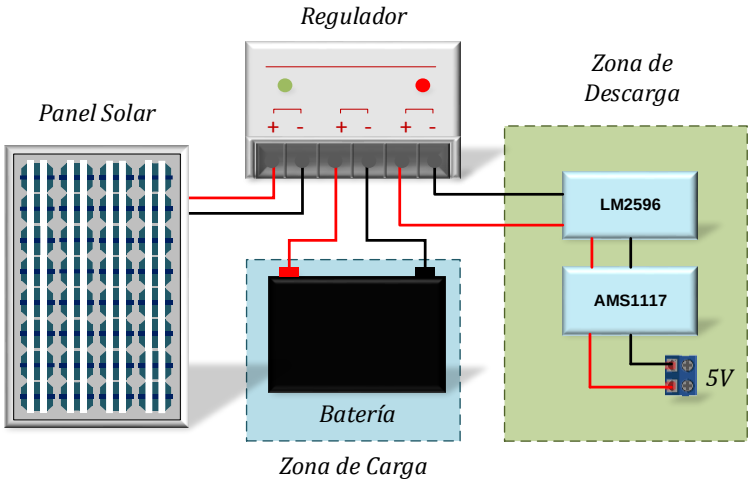


Figura 3.30. Esquema del sistema de alimentación

En la zona de descarga, los $5\,V$ regulados energizarán al Arduino a través del puerto Vin y GND, tal como se indica en la Figura 3.31.

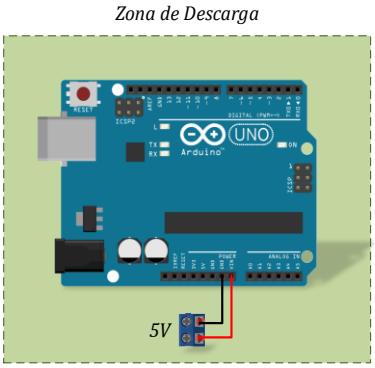


Figura 3.31. Esquema de alimentación de Arduino

Considerando el consumo energético, en transmisión se observa un valor de $81\,mA$ y $47\,mA$ en recepción (el detalle de estos valores se muestran en el capítulo 4). Particularmente, se considera $81\,mA$ como el valor más alto de corriente, para dimensionar el número de paneles solares y de baterías requeridos.

3.5.1. Cálculo de paneles solares y baterías

En el Área de Instrumentación del IG se emplea el software *Censol 5* para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos. En el mencionado programa se ingresan los parámetros necesarios del sistema y posteriormente efectúa el cálculo, el número de paneles solares y baterías necesarios.

En la Figura 3.32 se muestra la pantalla de bienvenida del programa y para iniciar el diseño, se selecciona la opción *Solar Fotovoltaica*.

Figura 3.32. Software Censol 5

Luego, se despliega una pantalla donde se configuran los valores correspondientes a la batería, así como los días de autonomía energética del circuito (Figura 3.33) .

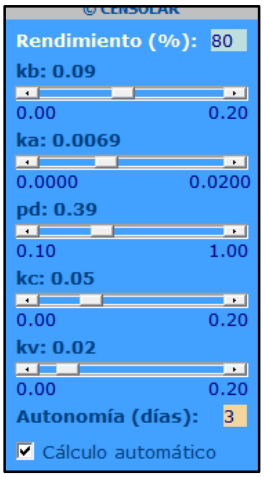


Figura 3.33. Configuración de la batería

Además, en la sección Panel FV (panel fotovoltaico), se configura los parámetros del panel solar, tales como: potencia y tensión nominal (con carga). En la sección correspondiente al elemento acumulador se configuran las características de la batería, como tensión nominal, capacidad y temperatura de operación. Por último, en el área circuito C.C, requiere ingresar el voltaje de funcionamiento del prototipo (Ver Figura 3.34).

Figura 3.34. Parámetros del Panel Solar, Batería y Circuito

Una sección importante, corresponde a la información referente al número corregido de horas pico, ya que, estos valores son específicos de cada región del globo terráqueo y corresponden a niveles de radiación. En el mismo software, se encuentra disponible esta información, que se localiza en el menú inicio. Además, se debe seleccionar: *Base de datos de radiación* (Ver Figura 3.32), para desplegar posteriormente una ventana donde se selecciona el país y región que se requiere la instalación del sistema fotovoltaico. En particular, para el presente proyecto se selecciona como ubicación el Cotopaxi, lo cual se muestra en la Figura 3.35.

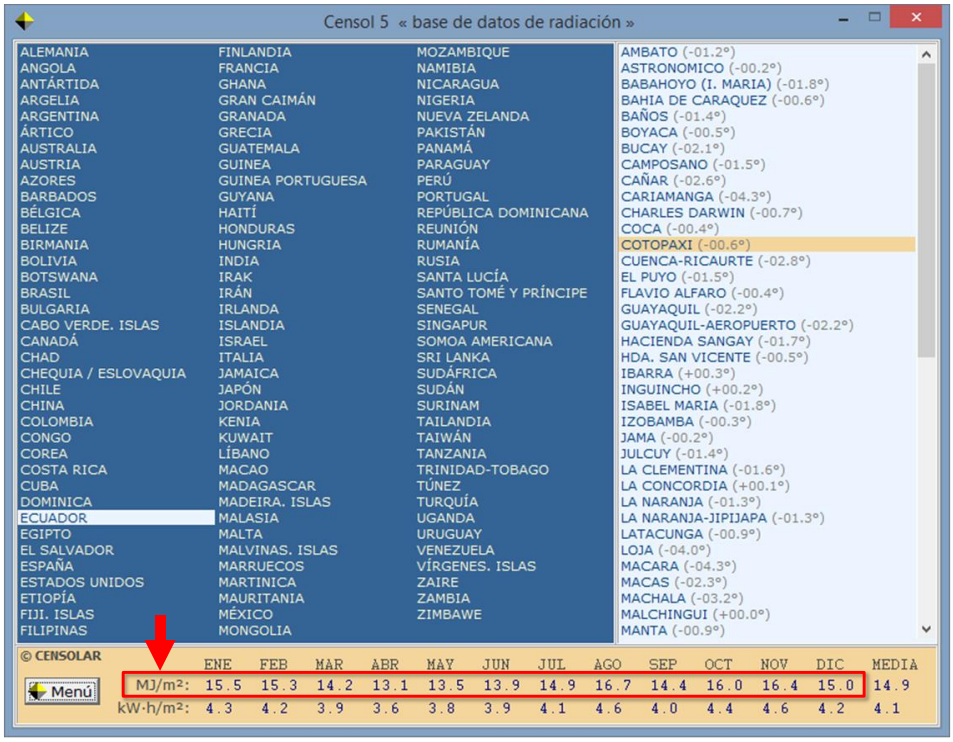


Figura 3.35. Valores de radiación solar en el Cotopaxi

Los datos que se utilizan para llenar los valores corregido de horas de sol pico (lo cual en siglas es H.S.P [92]) de la Figura 3.36, son los datos medidos en MJ/m^2 que se encuentran en la base de datos de radiación (Figura 3.35). A continuación, se muestran en la Figura 3.36 los campos ingresados de forma correcta.

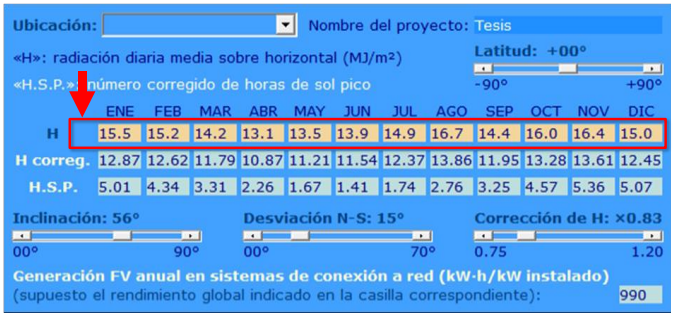


Figura 3.36. Número corregido de horas de sol pico (H.S.P)

El último paso, consiste en calcular el requerimiento energético diario del prototipo medido en Wh. Esta operación se efectúa seleccionando: *Consumo diario* (ver Figura 3.39), la cual despliega una ventana, donde se ingresa el consumo en W y las horas de funcionamiento del dispositivo en un día. Por ejemplo, el prototipo consume $0.972\,W$ $(0.081\,A * 12\,V)$ durante $24\,h$ y luego de ingresar los valores se selecciona el botón *Aceptar* (Ver Figura 3.37).

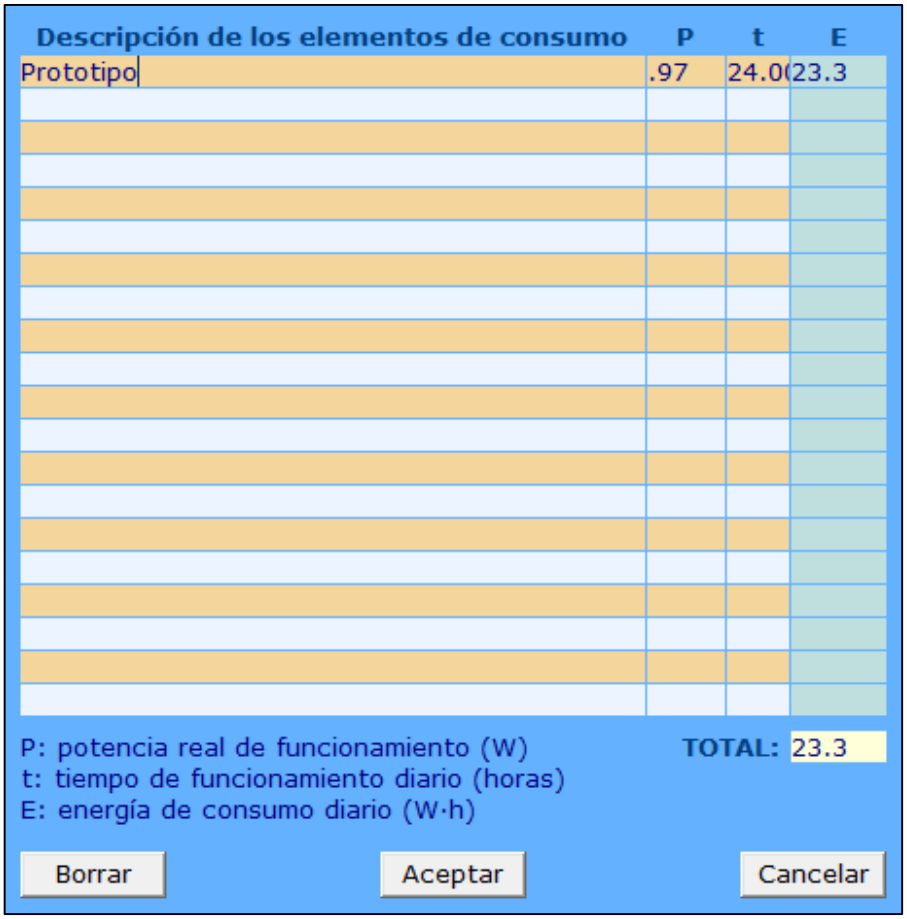


Figura 3.37. Cálculo de energía de consumo

Con los datos ingresados en *Consumo diario* (ver Figura 3.39), se muestran los resultados en la Figura 3.38. En resumen, se requiere de un panel de $10\ W$, dos baterías de $10\ Ah$ conectadas en serie, o en su defecto una batería de $20\ Ah$, y consecuentemente se obtiene una autonomía de funcionamiento de 3 días en caso de ausencia total de energía solar.

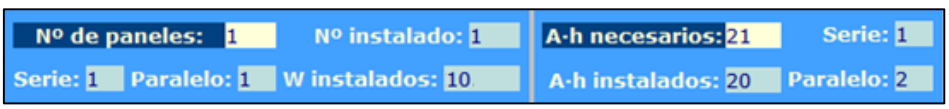


Figura 3.38. Resultados de cálculo

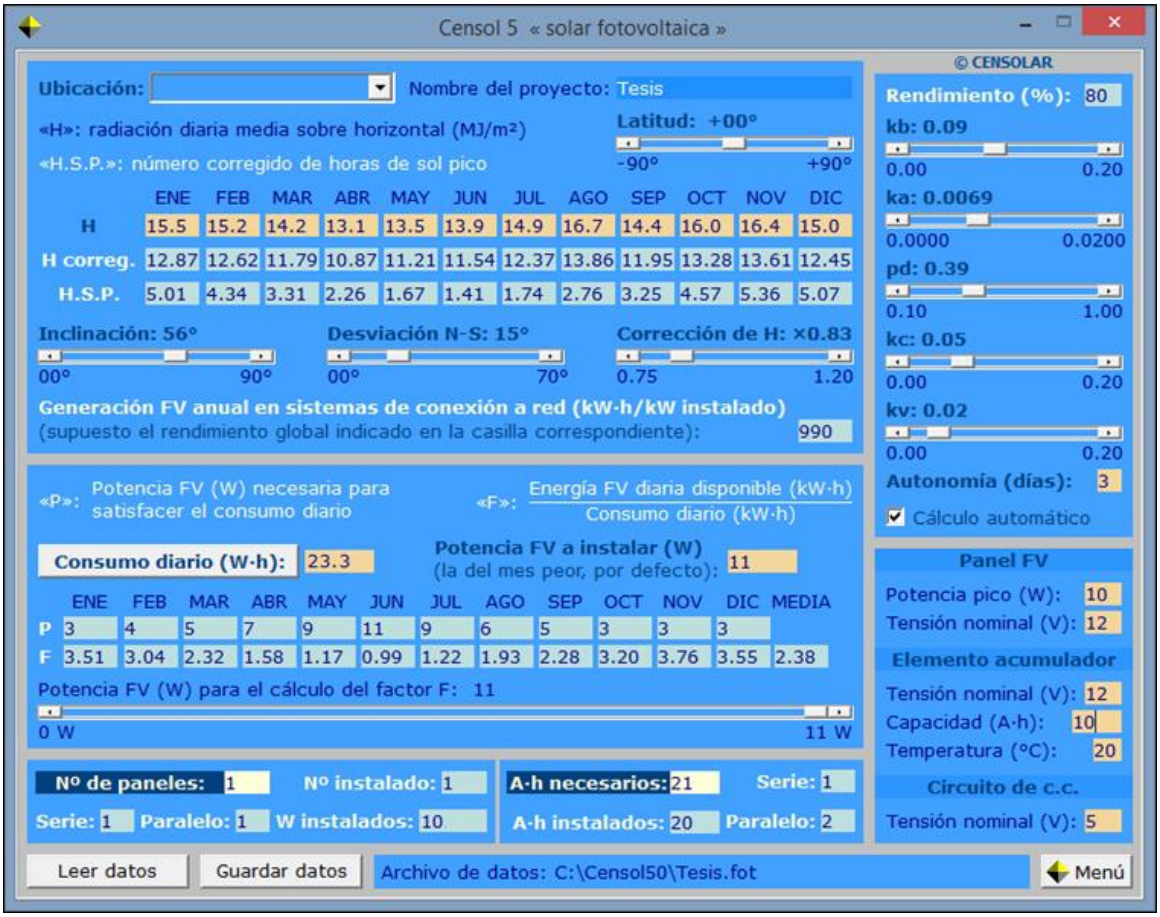


Figura 3.39. Pantalla de cálculo del sistema solar fotovoltaico

Por otro lado, se podría prescindir la instalación del panel solar, debido a la ventaja del bajo consumo energético del prototipo. Sin embargo, el uso de una batería de $100\ Ah$ proveería una autonomía aproximada de funcionamiento del sistema durante $51\ días$ ($100\ Ah\ /\ 81\ mA\ =\ 1234\ h$).

Por último, esta alternativa no es conveniente en un escenario de campo, pues se dificultaría la movilidad del prototipo debido al peso de la batería ($32\ Kg\ aprox.$).

3.6. Alternativa Energética

Debido al bajo consumo energético del circuito, se puede recurrir a un *powerbank* (cargador portátil). En general este tipo de dispositivos proporcionan $5\ V$ y $1\ A$, y considerando que el prototipo se diseñó para funcionar con una diferencia de potencial de $12\ V$ (suministrado por baterías disponibles en las estaciones de monitoreo), se requiere emplear un módulo elevador de voltaje de 5 a $12\ V$.

De esta forma, entre el conector de alimentación del circuito y un cable que posee un conector macho tipo A, se coloca el módulo *step up* XL6009 elevador de voltaje (Ver Figura 3.40).

Figura 3.40. Implementación de Alternativa Energética

Además, para asegurar la impermeabilidad del sistema, se instalan los mencionados elementos en una caja Pelican 1060, donde el transmisor incluye un par de conectores para la comunicación de la señal sísmica entre el sensor y el prototipo, tal como se muestra en la Figura 3.41.

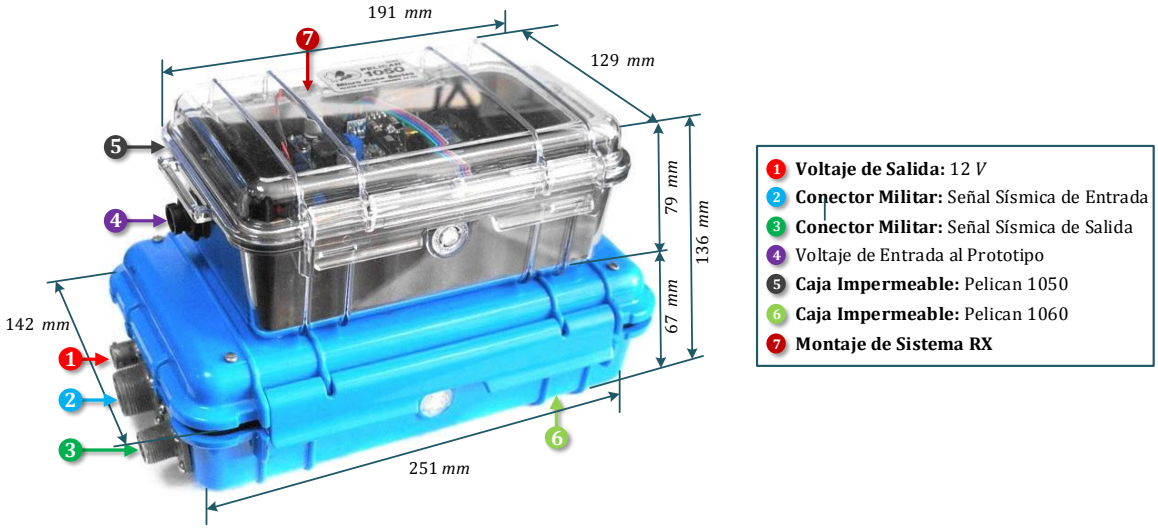


Figura 3.41. Montaje de Prototipo TX y alternativa Energética

La principal diferencia con el primer sistema de alimentación, consiste en la recarga (mediante paneles solares) de las baterías. También, al suprimir el panel solar del sistema y la batería de gel, se reduce el tamaño y el peso del sistema.

En conclusión, el sistema propuesto es útil en fases de pruebas (tanto sísmicas como lahares). Así mismo, la autonomía de funcionamiento del circuito seria de aproximadamente 7 días, empleando un *powerbank* de 8000 mAh.

3.7. Configuración de los dos sistemas punto a punto

Se denominará sistema, a la comunicación inalámbrica de topología punto a punto entre transmisor y receptor. También, en el presente proyecto se propone dos sistemas sin interferencias entre sí y con información independiente que proviene de geófonos distintos. En síntesis, cada receptor deberá recibir únicamente la información del transmisor correspondiente.

Para cumplir este objetivo, en la programación de los *script*s se asigna a cada sistema un canal y dirección únicos, tal como se muestra en la Figura 3.42 y Figura 3.43 para el sistema uno y dos respectivamente. No necesariamente deben ser 0 y 1 las direcciones de los sistemas, de hecho, se recomienda emplear cualquier digito del 0 – 9 y así mismo, el canal puede ser cualquier número entre 0 – 125. Es importante considerar, que tanto el transmisor como el receptor del sistema, deben configurarse bajo los mismos parámetros de canal y dirección y de esta forma se establecerá exitosamente el enlace inalámbrico. Cabe recalcar que, no fue necesaria la adición de etiquetas a los datos transmitidos (de cada uno de los dos emisores), debido a que cada módulo NRF24L01 maneja un campo de dirección y una dirección de canal unívocas para cada enlace inalámbrico.

```
Adafruit_ADS1115 ads;              // Libreria para el ADS1015
const float multiplier = 0.1875F; // Constante de multiplicación para el ADS1015

float datos[4];                    // Vector con datosTX (flotanet)
byte addresses[][6] = {"0"};       // Dirección para el enlace

//:::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::   SETUP  ::::::::::::::::::::::::::::
void setup()
{
Serial.begin(115200);             // Velocidad de transferencia 115200 baudios
delay(100);                       // Retraso de 100 milisegundos

//MODULO NRF24L01+
 radio.begin();                              // Inicicialización del NRF24L01
 radio.setChannel(100);                      // Canal configurable hasta 126
```

Figura 3.42. Configuración de canal y dirección de enlace en Sistema 1

```
Adafruit_ADS1115 ads;              // Libreria para el ADS1015
const float multiplier = 0.1875F; // Constante de multiplicación para el ADS1015

float datos[4];                    // Vector con datosTX (flotanet)
byte addresses[][6] = {"1"};       // Dirección para el enlace

//:::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::   SETUP  ::::::::::::::::::::::::::::
void setup()
{
Serial.begin(115200);             // Velocidad de transferencia 115200 baudios
delay(100);                       // Retraso de 100 milisegundos

//MODULO NRF24L01+
 radio.begin();                              // Inicicialización del NRF24L01
 radio.setChannel(101);                      // Canal configurable hasta 126
```

Figura 3.43. Configuración de canal y dirección de enlace en Sistema 2

3.8. Montaje Final del Prototipo

Por otro lado, se asegura la impermeabilidad del sistema a través de cajas Pelican Modelo 1050, las cuales son: resistentes a golpes (ocasionados por caídas), a prueba de polvo y agua, pero sobre todo han sido empleadas en anteriores proyectos desarrollados en el IG, y han demostrado un excelente desempeño en condiciones de intemperie.

De igual manera, se implementan conectores, los cuales se utilizan para energizar el circuito, así como para la comunicación del prototipo con los instrumentos de adquisición de señal análoga en el transmisor y de almacenamiento de la señal digital resultante en el receptor. En la Figura 3.44 se aprecia el montaje del circuito transmisor en la caja Pelican mientras que la Figura 3.45 muestra el montaje del receptor.

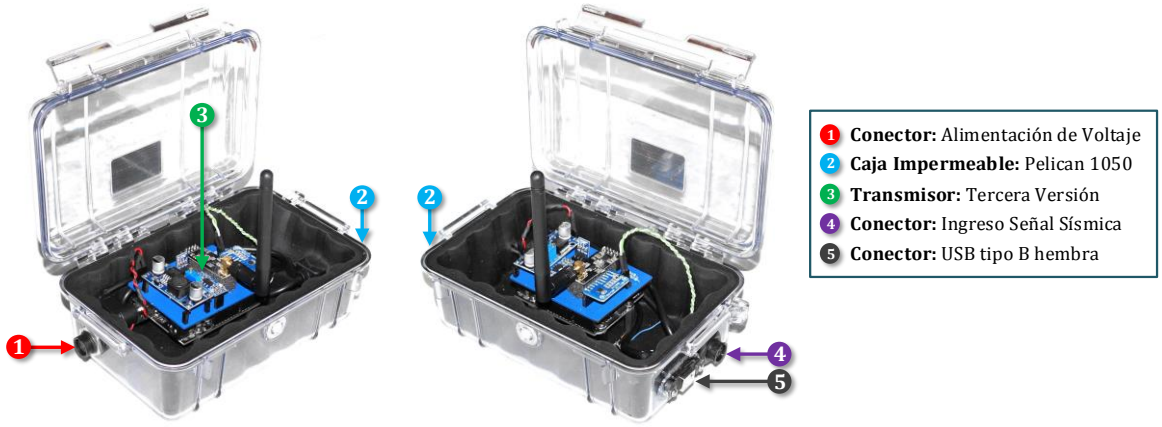


Figura 3.44. Montaje del sistema transmisor

Figura 3.45. Montaje del sistema receptor

Además, para la propuesta de montaje del sistema de alimentación energética (Ver Figura 3.46) se utiliza una caja Pelican Modelo 1450 de mayor tamaño, para el esquema de

alimentación descrito anteriormente en la Figura 3.30, en conjunto con el panel solar, el regulador de carga y la batería.

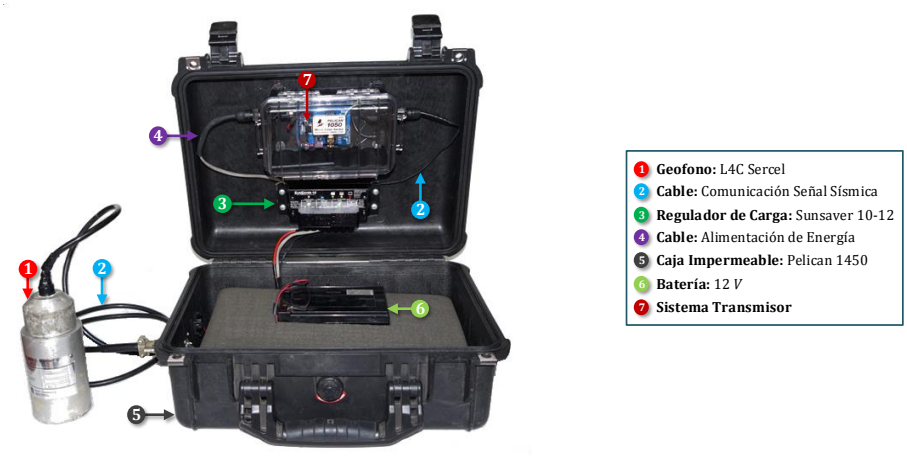


Figura 3.46. Montaje del sistema de alimentación de energía

Adicionalmente, en la Figura 3.47 se observa la instalación final del sistema de transmisión, el cual incluye el sistema de alimentación de energía y el geófono L4C Sercel.

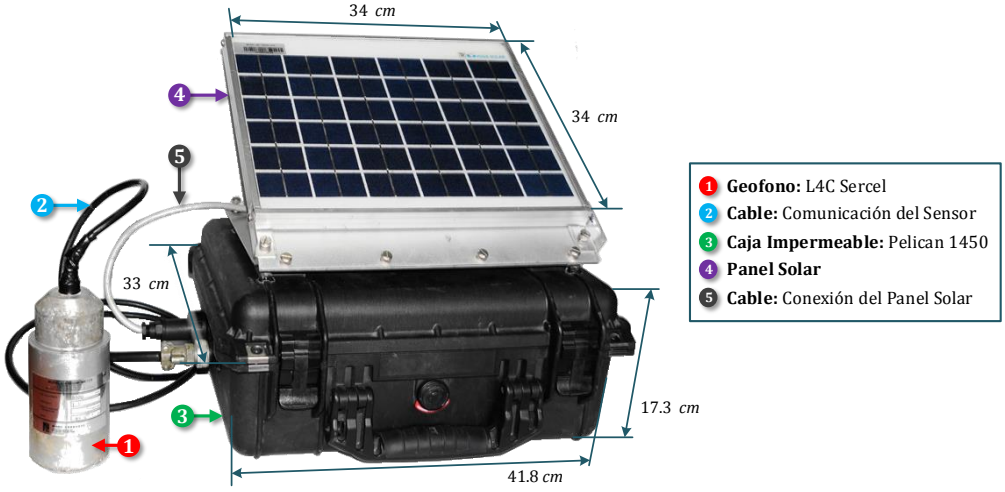


Figura 3.47. Montaje final del sistema de transmisión

Por otro lado, en el receptor no se implementa el sistema de alimentación energética a través de la caja Pelican 1400, ya que se asume la instalación en una estación de adquisición intermedia (Ver Figura 1.3), la cual posee un suministro energético propio. Por este motivo se conecta una batería de 10 *Ah,* (similar a la empleada para el transmisor), para pruebas.

En la Figura 3.48 se observa el receptor alimentado por la batería y conectado mediante un cable DB9 con un equipo de almacenamiento de datos desarrollado en el IG.

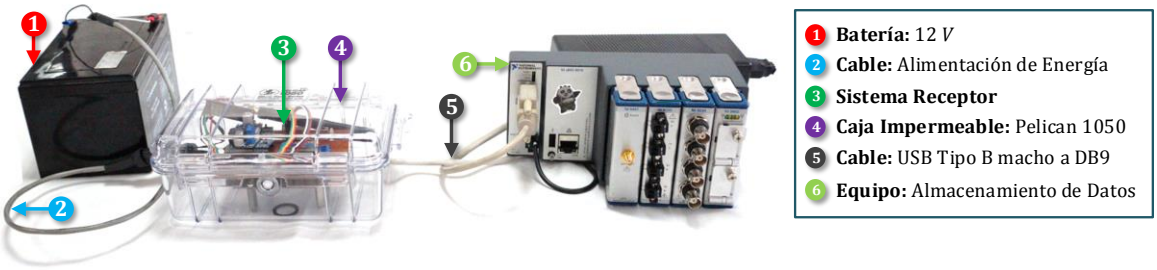


Figura 3.48. Montaje final del sistema de recepción

Por último, se conecta un computador portátil al puerto ethernet del equipo de almacenamiento de datos desarrollado en el IG (Ver Figura 3.49) para la visualización de la información. Además, en caso de que el equipo no se encuentre disponible, se puede desplegar la información en un computador que haya instalado la versión 2018 de MatLab y así ejecutar el programa desarrollado para el receptor (Ver sección 3.3.2.4.), y a continuación se muestra también, la conexión del osciloscopio en el transmisor para visualizar la señal sísmica enviada Figura 3.50.

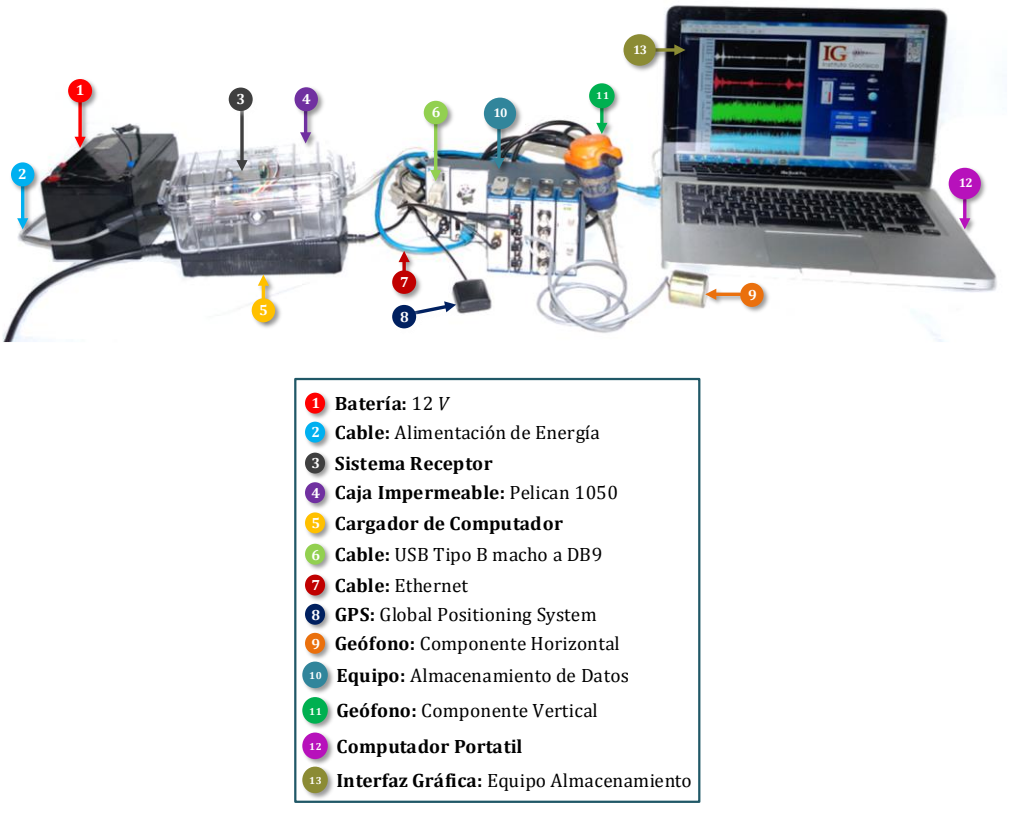


Figura 3.49. Esquema de conexión para visualización de datos en el receptor

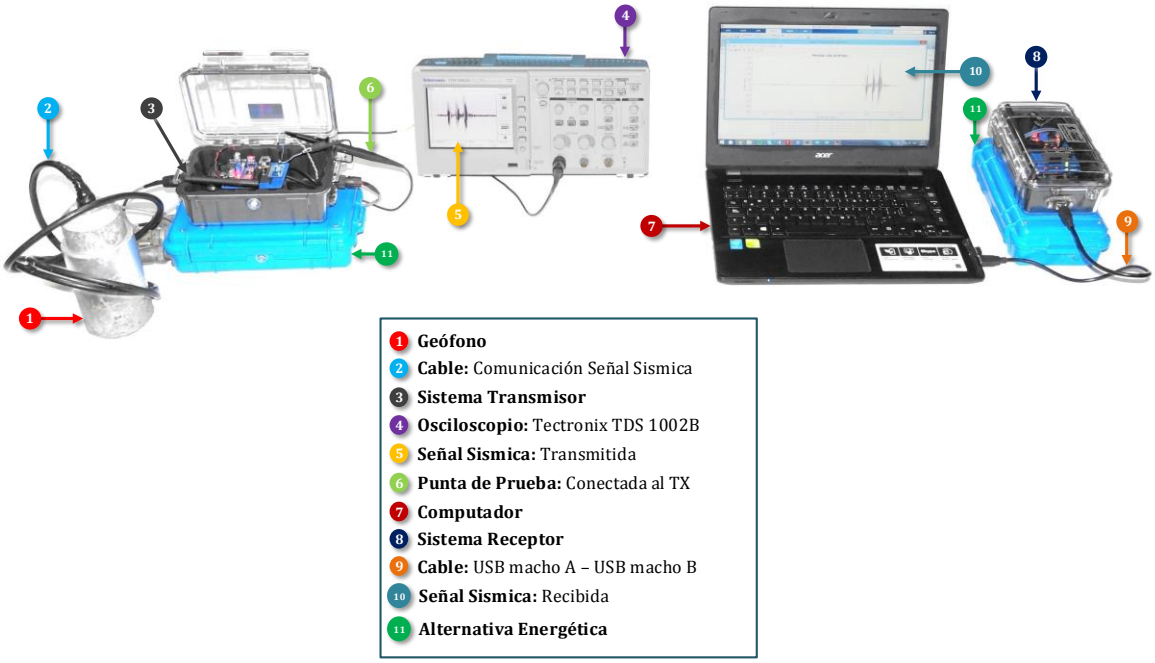


Figura 3.50. Esquema de conexión para visualización de datos en el receptor

Para finalizar, un ejemplo de señal transmitida y recibida se muestra en el capítulo 4 (Resultados y discusión).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por otra parte, una vez finalizada la fase de diseño e implementación (del sistema transmisor y receptor), se inician las pruebas para evaluar el desempeño del prototipo. A continuación, se muestran los resultados planificados y los obtenidos.

4.1. Resultados planificados

Acorde con los objetivos específicos del presente proyecto, la expectativa consiste en obtener un enlace inalámbrico de alcance medio (entre 100 y 200 m) mediante el uso de la tarjeta de desarrollo Arduino Uno y elementos electrónicos de bajo costo. Por otro lado, el objetivo principal es la transmisión de señales de origen sismo – volcánico, las cuales deben generarse mediante geófonos (sensores sísmicos). Además, a lo largo del proyecto se propone que el prototipo debe ser de bajo consumo energético (alrededor de los 100 mA).

Por otra parte, el prototipo debe implementarse de tal manera que, soporte condiciones adversas, como: polvo (además, ceniza volcánica), lluvia, entre otros. También, el prototipo debe adaptarse al sistema energético disponible en las estaciones de monitoreo que está constituido por paneles solares y baterías de 12 V.

4.2. Resultados obtenidos

Considerando que, la información de la señal sísmica debe permanecer íntegra, la primera prueba realizada consistió en comparar la señal transmitida con la receptada.

Para realizar este procedimiento, se conecta una punta de prueba de osciloscopio a la entrada de la señal analógica (señal del geófono) del sistema transmisor (ver Figura 4.1), con el objetivo de visualizar la señal sísmica transmitida.

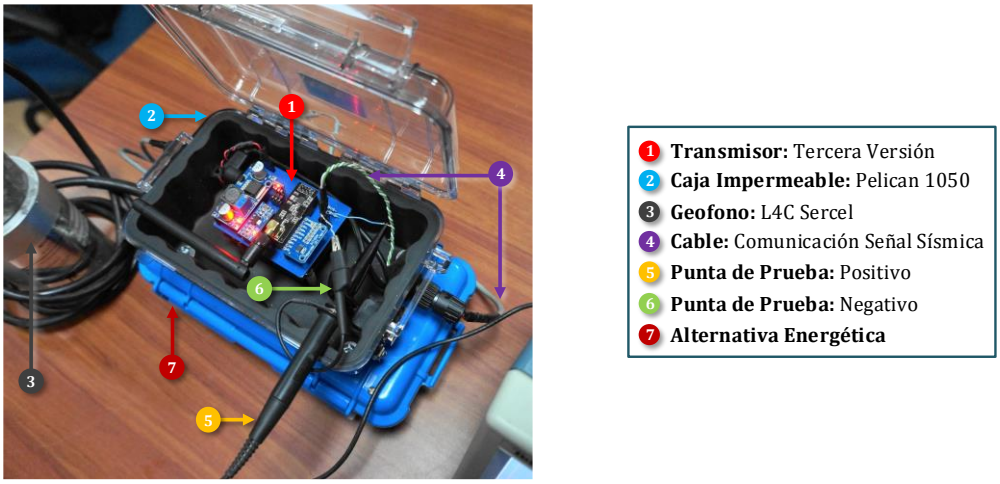
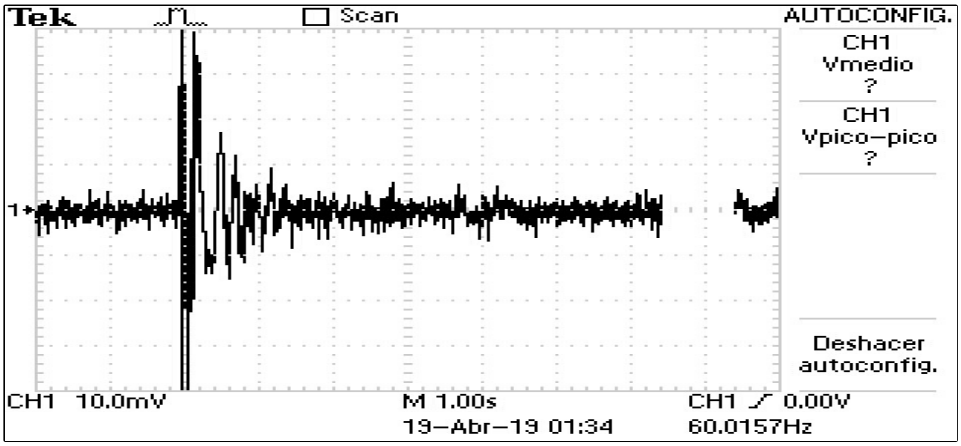


Figura 4.1. Conexión de Punta de prueba en el sistema Transmisor

Después, se conecta el receptor con el computador a través de un cable USB (Ver Figura 3.50). Finalmente, se almacena digitalmente la imagen desplegada en la pantalla del osciloscopio (correspondiente al transmisor) y adicionalmente, se captura la pantalla de la interfaz gráfica desarrollada en MatLab para el sistema receptor. Posteriormente, se observa que la señal recibida muestra alta fidelidad respecto a la señal transmitida, tal como se muestra en la Figura 4.2.



(a)

(b)

Figura 4.2. Señal Sísmica: (a) Visualización de la señal en el Osciloscopio (Transmisor); (b) Visualización de la señal en la Interfaz de MatLab (Receptor)

En conclusión, la configuración de 475 muestras por segundo referente a la tasa de muestreo realizada en el módulo digitalizador ADS1115 en modo diferencial, fue la adecuada (Ver 3.2.2.Software del Transmisor)

4.2.1. Consumo energético

Considerando que, en el módulo NRF24L01 se pueden configurar 4 niveles de potencia (Ver 2.1.8.Módulo de Radio NRFL2401+), se procede a medir el consumo energético en el transmisor y receptor, mediante una fuente generadora de voltaje DC (Ver Figura 3.14). Antes de realizar las mediciones, se considera que el consumo de corriente cambiará, si existe un enlace inalámbrico entre el TX y el RX (transferencia de datos) o si existe perdida de enlace entre los dispositivos (sin transferencia de datos).

Como resultado, en la Tabla 4.1 se muestran los datos de consumo energético tanto para el transmisor como para el receptor.

Tabla 4.1. Consumo energético del Prototipo

		Con transferencia de datos		**Sin transferencia de datos**	
		TX	**RX**	**TX**	**RX**
Potencia 1 *- 18 dBm*	Voltaje (*V*)	12.30	12.18	12.30	12.18
	Corriente (*A*)	0.040	0.047	0.071	0.045
Potencia 2 *- 12 dBm*	Voltaje (*V*)	12.30	12.18	12.29	12.18
	Corriente (*A*)	0.040	0.047	0.072	0.045
Potencia 3 *- 6 dBm*	Voltaje (*V*)	12.18	12.18	12.17	12.18
	Corriente (*A*)	0.040	0.047	0.072	0.045
Potencia 4 *0 dBm*	Voltaje (*V*)	12.18	12.18	12.17	12.18
	Corriente (*A*)	0.042	0.047	0.081	0.045

En definitiva, se observa en el transmisor, que el consumo de corriente tiende a incrementarse a medida que se configura una potencia de funcionamiento mayor. Sin embargo, se aprecia que el consumo energético disminuye cuando existe transferencia de datos (enlace establecido), en cambio, cuando no existe transferencia de datos se tiene los mayores niveles de requerimientos energéticos (Ver Figura 4.3).

Ahora bien, en el receptor se observa que el consumo de corriente es constante (independientemente del nivel de potencia) cuando existe transferencia de datos y cuando no existe transferencia de datos. Por otro lado, cuando existe transferencia de datos se tiene los mayores niveles de requerimientos energéticos (contrario a lo sucedido con el transmisor), tal como se muestra en la Figura 4.4.

Para finalizar, se planteó como hipótesis, que el consumo de corriente en un módulo (transmisor o receptor) dependería del nivel de potencia configurado en el otro módulo. En otras palabras, como cada módulo posee 4 niveles diferentes de potencia, las pruebas

fueron realizadas intercambiando los niveles de potencia entre los módulos (transmisor con nivel de potencia 2 enlazado con un receptor de nivel de potencia 3, después, el transmisor con nivel de potencia 2 enlazado con un receptor de nivel de potencia 4, y así sucesivamente).

Sin embargo, se observa que los niveles de consumo energético no cambian cuando se realizan los cambios mencionados. En conclusión, el consumo de un módulo es independiente del nivel de potencia configurado en el otro modulo.

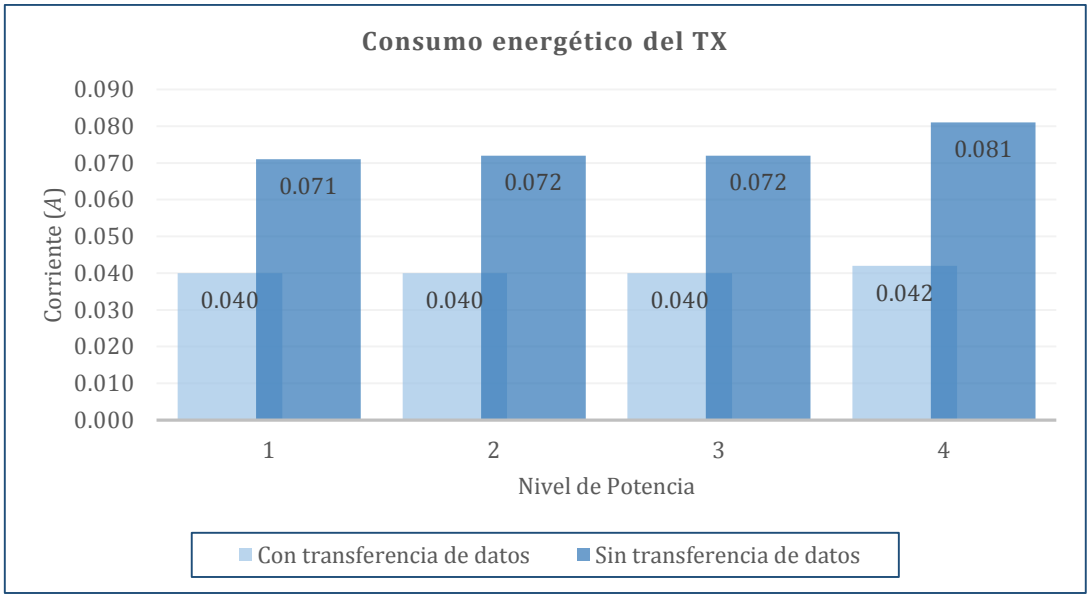


Figura 4.3. Gráfico de barras del consumo energético del Transmisor

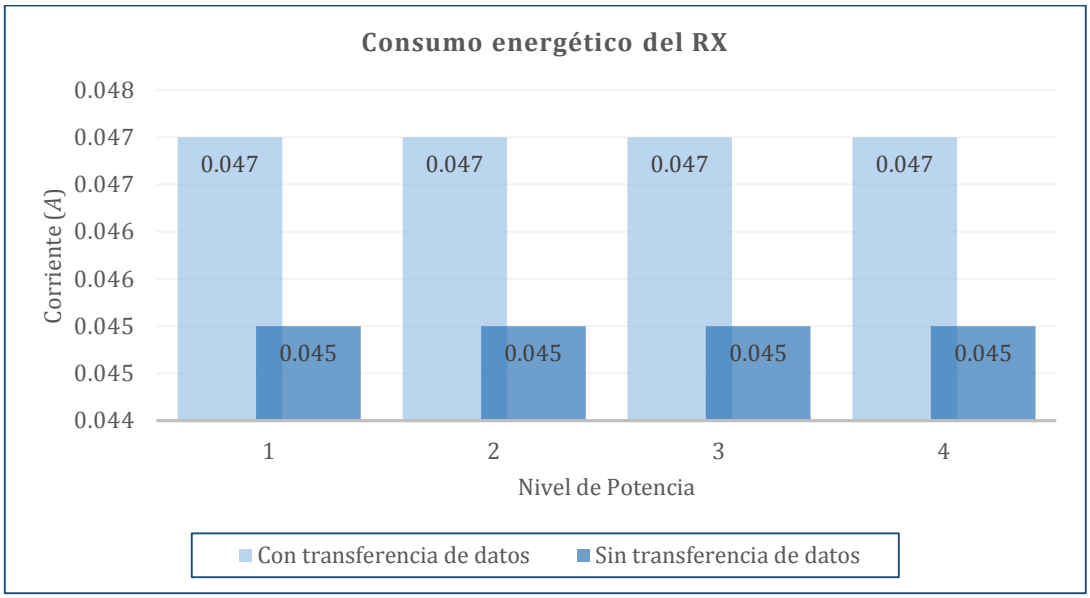


Figura 4.4. Gráfico de barras del consumo energético del Receptor

4.2.2. Alcance

Se realizaron múltiples pruebas en diferentes escenarios (urbano, rural) y condiciones climáticas adversas, con el objetivo de evaluar el desempeño del prototipo. Además, para determinar el alcance, se empleó el GPS *60CSx,* con el cual se marcaron los puntos de prueba en coordenadas geográficas y con un margen de error de $\pm 3\ m$. A continuación, se describen con mayor detalle las pruebas, en las cuales el principal objetivo consiste en, relacionar el alcance con el nivel de potencia configurado en los módulos. Cabe mencionar que, en adelante se empleará P1 para la potencia mínima (-18 dBm), P1 para la potencia baja (-12 dBm), P3 para la potencia alta (-6 dBm) y P4 para la máxima potencia (0 dBm),

4.2.2.1. Ambiente Urbano

La prueba se efectuó en el parque bicentenario (Quito - Ecuador), debido a que cuenta con línea de vista (sin obstrucciones) en un día soleado. Además, por encontrarse en una zona residencial y dado que, la frecuencia de operación del prototipo es 2.4 GHz (frecuencia libre en la cual funcionan: redes Wi-Fi, bluetooth, microondas [93]), se evaluaría el desempeño en zonas con interferencia (interferencia co-canal).

A continuación, en la Tabla 4.2 se muestran detalles de los puntos GPS registrados, en coordenadas geográficas y en coordenadas UTM (*Universal Trasversa Mercator* [94]). Así también, se incluye la altura registrada por el GPS *60CSx* y la hora en la que se guardó la referencia.

Tabla 4.2. Puntos GPS de la Prueba en Ambiente Urbano (04/04/2019)

Marca	GPS (Latitud Longitud)	Coordenadas UTM	Hora	Altura (*m*)
Aer1*	0°08'50.6"S 78°29'13.8"W	-0.147389, -78.487167	11:25:56	2803
Aer5	0°08'45.5"S 78°29'14.8"W	-0.145972, -78.487444	12:28:25	2818
Aer5.1	0°08'43.8"S 78°29'15.2"W	-0.145500, -78.487556	12:37:07	2818
Aer4	0°08'42.9"S 78°29'15.6"W	-0.145250, -78.487667	12:52:25	2818
Aer4.1	0°08'42.1"S 78°29'15.5"W	-0.145028, -78.487639	01:24:54	2820
Aer3	0°08'34.1"S 78°29'17.2"W	-0.142806, -78.488111	13:18:18	2827
Aer3.1	0°08'33.4"S 78°29'17.5"W	-0.142611, -78.488194	11:55:11	2823
Aer 2	0°08'25.1"S 78°29'18.7"W	-0.140305, -78.488527	11:41:07	2825
Aer2.1	0°08'24.1"S 78°29'19.0"W	-0.140028, -78.488611	11:43:10	2825

* La marca **Aer1** corresponde a la ubicación del Receptor

También, en la Tabla 4.3, se muestran los resultados de los alcances que se obtuvieron en la prueba.

Tabla 4.3. Alcance de Pruebas efectuadas en Ambiente Urbano

Ubicación TX	Potencia TX	Ubicación RX	Potencia RX	Alcance (*m*)
Aer5	P1	Aer1	P1	**160.53**
Aer5.1	P1	Aer1	P4	**214.44**
Aer4	P2	Aer1	P1	**244.25**
Aer4.1	P2	Aer1	P4	**267.74**
Aer3	P3	Aer1	P1	**520.35**
Aer3.1	P3	Aer1	P4	**543.42**
Aer 2	P4	Aer1	P1	**802.04**
Aer2.1	P4	Aer1	P4	**834.13**

A continuación, se muestra la Figura 4.5 para visualizar la relación entre alcance y nivel de potencia entre el TX y el RX.

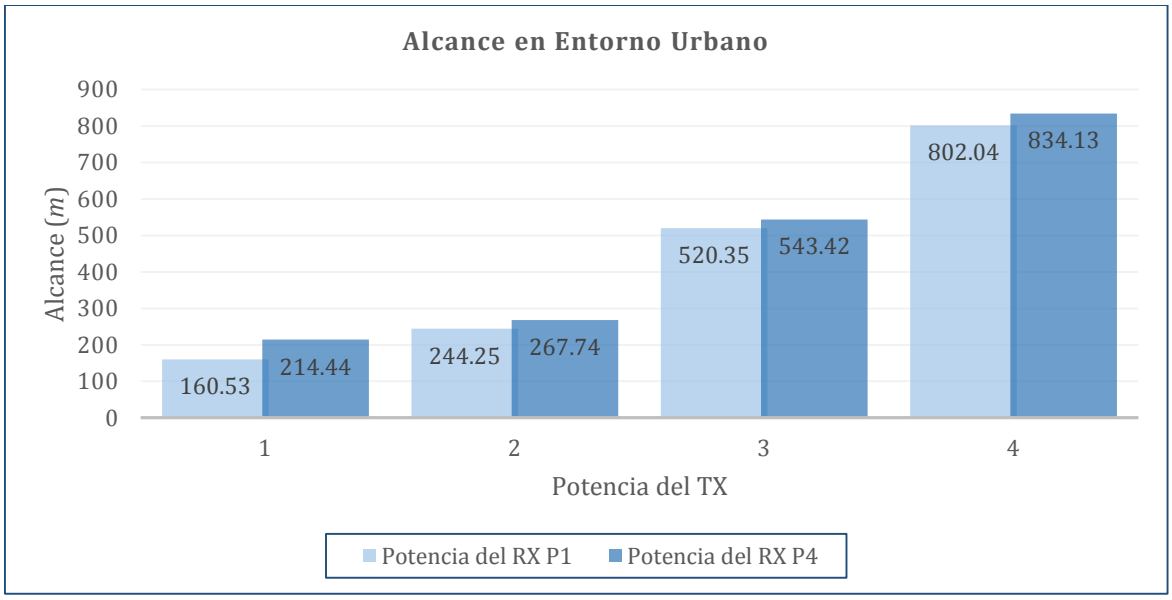
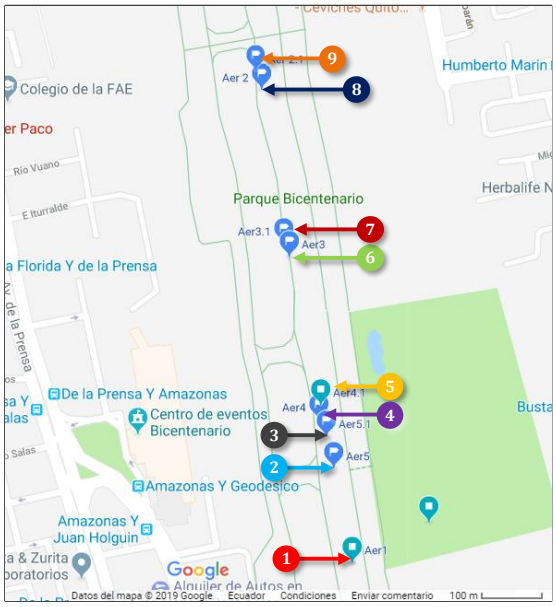


Figura 4.5. Gráfico de Barras del Alcance del Prototipo en Entorno Urbano

Luego, en la Figura 4.6 se muestra la ubicación de los puntos GPS, donde existen dos puntos de referencia para cada potencia del TX (P1, P2, P3 y P4), debido a que las pruebas se realizaron con el nivel mínimo y máximo de potencia en el RX (P1 y P4).



(a)

(b)

1. **Aer1:** Ubicación del RX
2. **Aer5** : Transmisor con P1 (160.53 m respecto a Aer1)
3. **Aer5.1:** Transmisor con P1 (214.44 m respecto a Aer1)
4. **Aer4** : Transmisor con P2 (244.25 m respecto a Aer1)
5. **Aer4.1:** Transmisor con P2 (267.74 m respecto a Aer1)
6. **Aer3** : Transmisor con P3 (520.35 m respecto a Aer1)
7. **Aer3.1:** Transmisor con P3 (543.42 m respecto a Aer1)
8. **Aer2** : Transmisor con P4 (802.04 m respecto a Aer1)
9. **Aer2.1:** Transmisor con P4 (834.13 m respecto a Aer1)

Figura 4.6. Ubicación de puntos GPS (Pruebas realizadas en entorno Urbano): (a) Mapa Normal; (b) Mapa Satelital

Como se observa, el alcance del prototipo se relaciona directamente con el nivel de potencia configurado tanto en el transmisor como en el receptor.

De esta manera, se obtiene el menor alcance (160.53 m) cuando ambos dispositivos se configuran con el menor nivel de potencia (P1 correspondiente a -18 dBm). En cambio, cuando ambos dispositivos se les configura con la máxima potencia (P4 correspondiente a 0 dBm), se obtiene el mayor alcance (834.13 m).

4.2.2.2. Ambiente Rural

Para las pruebas en ambiente rural, se consideró un escenario real volcánico. De esta manera, el lugar seleccionado fue el volcán Cotopaxi (Ver Figura 4.7), ubicado en la provincia Cotopaxi (Ecuador). Particularmente, el Cotopaxi es uno de los volcanes más peligrosos del globo terráqueo, por las siguientes razones: la frecuencia de sus erupciones, su estilo eruptivo, su relieve, su cobertura glaciar y por la cantidad de poblaciones expuestas a las mencionadas amenazas (aprox. 300000 personas habitan zonas cercanas al volcán). En efecto, la peligrosidad radica en la presencia de glaciar, ya que sus erupciones podrían formar enormes lahares (flujos de lodo y escombros) que fluirían por medio de drenajes naturales a zonas con alta densidad poblacional. Además, el mencionado volcán (5897 de altura) se encuentra actualmente (Mayo, 2019) en estado activo, y cabe mencionar que, la fase eruptiva se reactivó en el año 2015 [95].

Figura 4.7. Volcán Cotopaxi (5897 $msnm$)

En primer lugar, el desarrollo de las pruebas se dificultó debido a las irregularidades del terreno, y en particular, existía perdida de la línea de vista. Por este motivo, no se realizaron múltiples pruebas, como en el ambiente urbano, y cabe mencionar, que el día era soleado cuando se iniciaron los ensayos. A continuación, se resumen los puntos GPS importantes en la Tabla 4.4 (Sin lluvia).

Tabla 4.4. Puntos GPS de la Prueba en Ambiente Rural (16/04/2019)

Marca	GPS (Latitud Longitud)	Coordenadas UTM	Hora	Altura (*m*)
Cot1	0°39'27.7"S 78°26'17.9"W	-0.657694, -78.438306	12:44:56	4514
Cot2	0°39'38.0"S 78°26'19.0"W	-0.660556, -78.438611	13:19:01	4716
Cot3	0°39'42.5"S 78°26'19.0"W	-0.661806, -78.438611	13:35:48	4782
Cot4	0°39'49.6"S 78°26'18.2"W	-0.663778, -78.438389	14:22:05	4874
Cot5	0°39'50.1"S 78°26'20.7"W	-0.663917, -78.439083	15:12:00	4881
Cot6	0°39'50.5"S 78°26'19.9"W	-0.664028, -78.438861	15:24:47	4873
Cot7	0°39'23.7"S 78°26'19.4"W	-0.656583, -78.438722	16:22:50	4641

Luego, las pruebas inician con el receptor configurado en la máxima potencia (P4, $0\ dBm$) y ubicado en *Cot1*, después, se establece enlace exitoso con el transmisor configurado en la P2 ($-12\ dBm$) y ubicado en *Cot2*, con un alcance de $319.95\ m$. Después, existe perdida de línea de vista debido a una curva en el sendero y un desnivel en el relieve. A continuación, se cambian la potencia del receptor de máxima (P4) a mínima (P1), y se realiza una prueba desde *Cot3* hasta la base del refugio (*Cot4*), lugar donde se encuentra el transmisor configurado también con la mínima potencia P1 ($-18\ dBm$), para conseguir un alcance de $220.68\ m$.

Enseguida, en el refugio se decide omitir el desarrollo de la prueba con el receptor en potencia P3, debido a que las condiciones climáticas empiezan a ser desfavorables (tormenta de nieve). Por este motivo, con el transmisor ubicado en *Cot5* (cercano al refugio del volcán) configurado en máxima potencia, se espera (1h10m) mientras un grupo desciende al borde del parqueadero del volcán (*Cot7*). Después, ya ubicados en *Cot7*, y con el transmisor en la mínima potencia, se logra un alcance de $816.41\ m$. En último lugar, debido a que el enlace fue establecido exitosamente, se comunica al grupo portador del transmisor que incremente la distancia (alejándose del receptor). De esta manera, arriban a *Cot6*, lográndose un alcance de $827.93\ m$, y en el mencionado lugar, el enlace se torna intermitente debido a las condiciones climáticas mencionadas para posteriormente finalizar las pruebas. Por último, las pruebas mencionadas, se resumen en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Alcance de Pruebas efectuadas en Ambiente Rural

Ubicación TX	Potencia TX	Ubicación RX	Potencia RX	Alcance (*m*)
Cot3	P1	Cot4	P1	**220.68**
Cot1	P2	Cot2	P4	**319.95**
N/A	P3	N/A	P1	**N/A**
Cot6	P4	Cot7	P1	**827.93**

Además, con el objetivo principal de visualizar de mejor forma la relación entre alcance y nivel de potencia entre el TX y el RX, a continuación, se muestra la Figura 4.8.

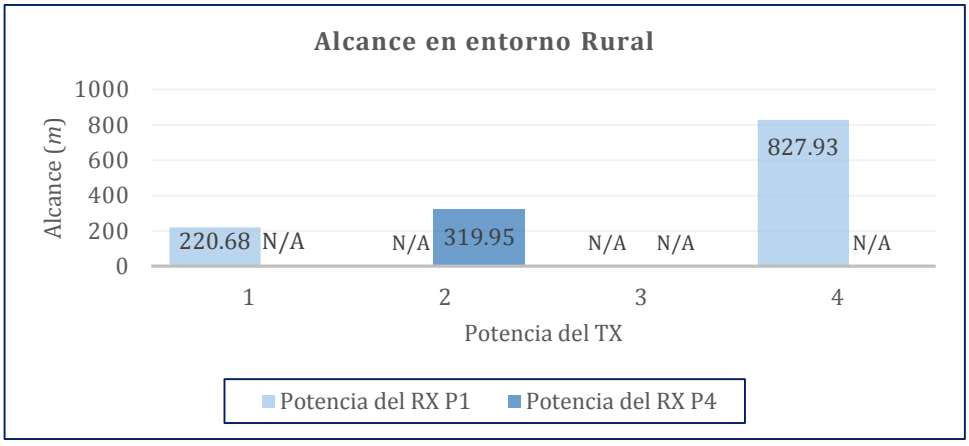
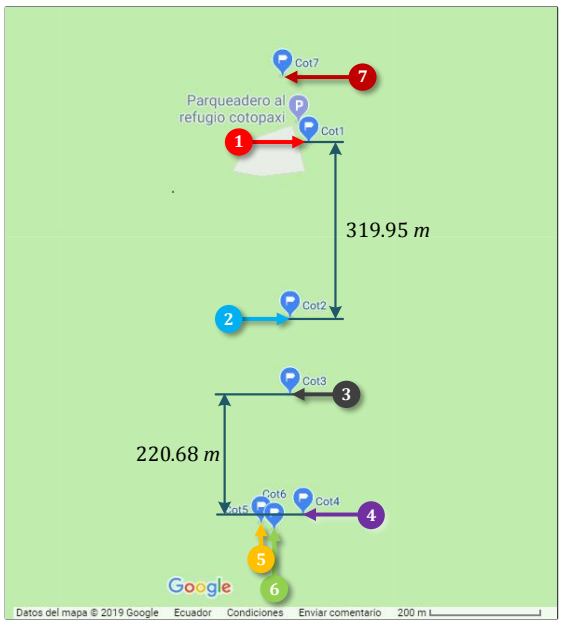
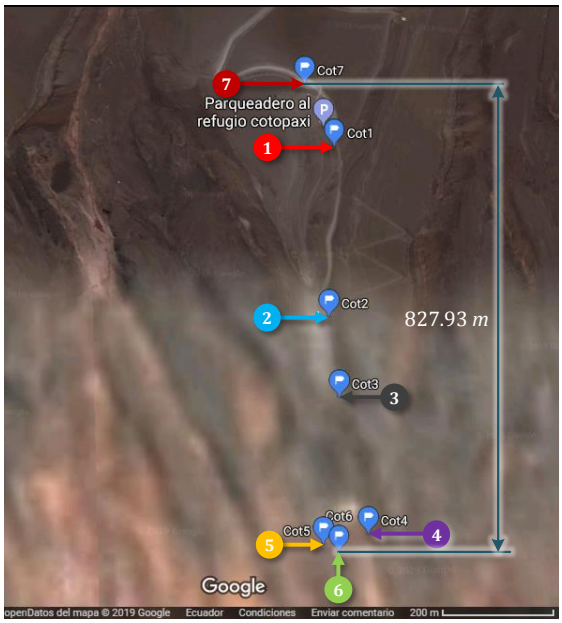


Figura 4.8. Gráfico de Barras del Alcance del Prototipo en Entorno Rural

Por otro lado, en la Figura 4.9 se muestra la ubicación de los puntos GPS, donde también se observa la distancia en las pruebas de alcance realizadas.



(a)



(b)

1 **Cot1:** Ubicación del TX (P2)
2 **Cot2:** Ubicación del RX (P4)
3 **Cot3:** Ubicación del TX (P1)
4 **Cot4:** Ubicación del RX (P1)
5 **Cot5:** Ubicación del TX (P4)
6 **Cot6:** Ubicación del TX (P4)
7 **Cot7:** Ubicación del RX (P1)

Figura 4.9. Ubicación de puntos GPS (Pruebas realizadas en entorno Rural): (a) Mapa Normal; (b) Mapa Satelital

Finalmente, se comprueba que se cumple con el objetivo principal del proyecto al establecer un enlace inalámbrico entre 100 a 200 m con los módulos configurados en la menor de las potencias de operación (-18 dBm). Por tal motivo, se decide finalizar satisfactoriamente la fase de pruebas en ambiente rural.

A continuación, en la Figura 4.10, se compara el desempeño del prototipo en ambiente urbano y en ambiente rural, donde el receptor se encuentra configurado con la mínima potencia y el transmisor se configura primero, en la mínima y posteriormente en la máxima potencia de funcionamiento.

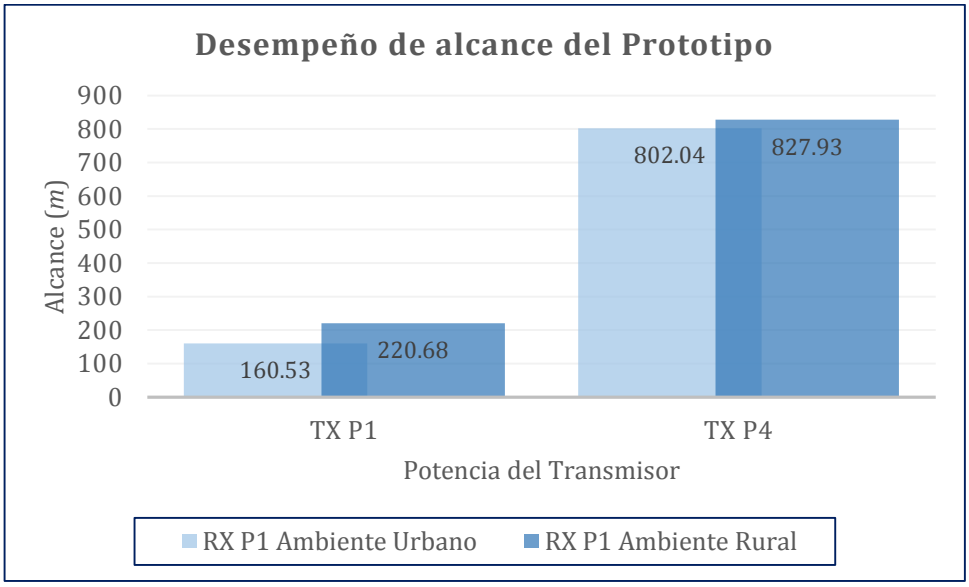


Figura 4.10. Alcance del Prototipo en Ambiente Urbano y Rural

Después, se observa que el alcance del prototipo es mayor en ambiente rural, con un porcentaje mayor de 37% con el transmisor configurado en potencia P1 y 4% cuando se configura con potencia P4.

Es así que, debido a que las pruebas en ambiente urbano y rural tuvieron la misma condición meteorológica (día soleado despejado), se infiere que, la diferencia en el desempeño (mejor en ambiente rural) radica en la ausencia de instrumentos electrónicos que operan en la misma banda de frecuencia de funcionamiento del prototipo ($2.4\ GHz$), la cual constituye la principal desigualdad entre ambos ambientes.

4.2.3. Pruebas adicionales

Dado que, no siempre se tendrán las condiciones ideales para el desempeño óptimo del prototipo (día soleado y línea de vista), se evalúa el funcionamiento del mismo, en escenarios que responden a condiciones típicas de las estaciones del IG.

4.2.3.1.1. Vegetación

A continuación, se efectúan pruebas en el Parque Arqueológico Rumipamba (Quito - Ecuador), ya que el IG cuenta en la actualidad (mayo, 2019) con una estación repetidora de señal. Adicionalmente, en el sitio existe exuberante vegetación, motivos por los cuales fue seleccionado.

Dicho lo anterior, en la Tabla 4.6 se muestran los puntos GPS considerados para el análisis de alcance del prototipo.

Tabla 4.6. Puntos GPS de la Prueba con Vegetación (24/04/2019)

Marca	GPS (Latitud Longitud)	Coordenadas UTM	Hora	Altura (*m*)
Rum1	0°10'38.0"S 78°30'02.9"W	-0.177222, -78.500806	11:25:21	2774
Rum2	0°10'40.7"S 78°30'03.2"W	-0.177972, -78.500889	11:31:59	2769
Rum3	0°10'40.8"S 78°30'03.5"W	-0.178000, -78.500972	12:03:17	2769
Rum4	0°10'39.9"S 78°30'03.2"W	-0.177750, -78.500889	12:05:49	2771
Rum5	0°10'44.3"S 78°30'04.0"W	-0.178972, -78.501111	12:12:40	2771

Dado que, el alcance es mayor cuando el RX posee la máxima potencia (P4), se realizan las pruebas considerando está configuración.

De esta manera, se ubica al receptor en el punto *Rum1*, y con el transmisor configurado también en máxima potencia se avanza hasta *Rum2*, donde se pierde el enlace, alcanzando $83.91\ m$ de distancia.

Enseguida, se coloca al TX en *Rum3* (configurado en P1) y se avanza con el receptor hasta *Rum4*, alcanzando una distancia entre los dispositivos de $29.30\ m$. Finalmente, se cambia la potencia del transmisor a la máxima (P4) y se avanza hasta *Rum5*, alcanzando una distancia respecto al receptor (*Rum4* y configurado con P4) de $138.13\ m$.

Cabe recalcar que, la diferencia en el alcance entre la primera (*Rum1* y *Rum2*) y la segunda prueba (*Rum4* y *Rum5*) corresponde a un cambio en la densidad de vegetación.

En definitiva, debido a que entre los puntos de la primera prueba la densidad de vegetación fue mayor (presencia predomínate de árboles de aproximadamente $10\ m$ de altura), el alcance es menor, respecto a la segunda prueba (construida por arbustos y árboles de hasta $3\ m$ de altura).

En resumen, se presentan las pruebas mencionadas anteriormente, a través de la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. Alcance de Pruebas efectuadas con Vegetación

Ubicación TX	Potencia TX	Ubicación RX	Potencia RX	Alcance (*m*)
Rum1	P4	Rum2	P4	**83.91**
Rum3	P1	Rum4	P4	**29.30**
Rum5	P4	Rum4	P4	**138.13**

Además, la Figura 4.11 muestra la relación entre alcance y nivel de potencia en el transmisor, en un ambiente con vegetación. Igualmente, para el alcance correspondiente a la máxima potencia del transmisor (P4), se realizó un promedio de los dos resultados obtenidos.

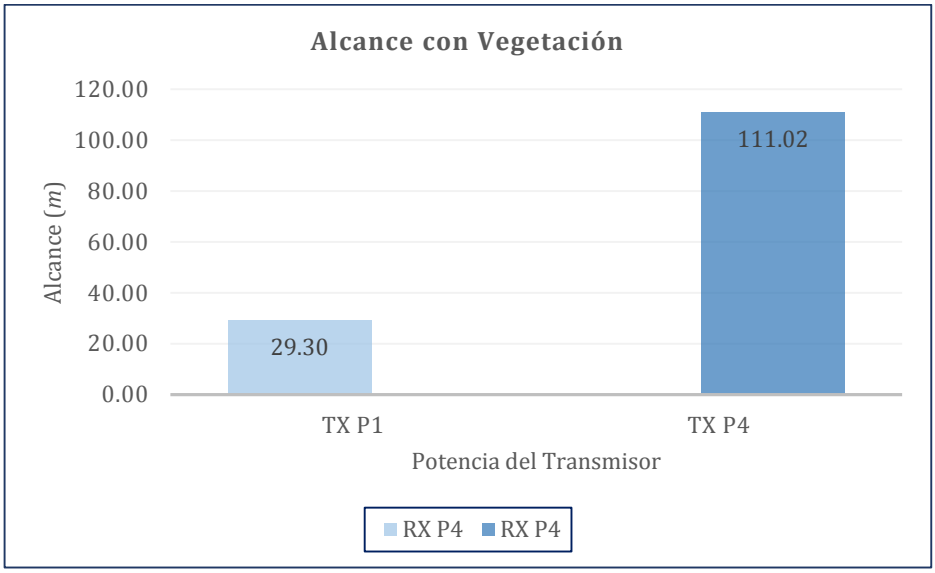


Figura 4.11. Alcance del Prototipo con Vegetación

4.2.3.1.2. Lluvia

Por otro lado, dado que el prototipo deberá funcionar también bajo lluvia (la atenuación de este fenómeno es de $0.01\ dB/km$ en comunicaciones inalámbricas [96]), se decide evaluar el desempeño del prototipo bajo este escenario.

Después, se realiza la prueba en el estadio de la Escuela Politécnica Nacional (Quito - Ecuador), donde se recalca que existía línea de vista entre los dispositivos. Por otra parte, el transmisor estuvo configurado en mínima potencia (P1) y el receptor en máxima potencia (P4), alcanzando los $119.23\ m$.

A continuación, en la Tabla 4.8 se muestran los puntos GPS considerados en esta prueba.

Tabla 4.8. Alcance de Pruebas efectuadas con Lluvia (04/04/2019)

Marca	GPS (Latitud Longitud)	Coordenadas UTM	Hora	Altura (*m*)
Llu1	0°12'40.3"S 78°29'19.8"W	-0.211194, -78.488833	19:04:01	2805
Llu2	0°12'42.6"S 78°29'22.9"W	-0.211833, -78.489694	19:13:08	2803

Distancia entre los puntos **119.23** *m*

Por otra parte, se realiza la prueba con el transmisor y receptor configurados a la máxima potencia (P4) y contando también con línea de vista, en una carretera rural ubicada en el sector de Conocoto (Quito - Ecuador), como resultado, se obtienen $649.97\ m$ de alcance.

A continuación, en la Tabla 4.9.se muestran los puntos GPS considerados para esta prueba.

Tabla 4.9. Alcance de Pruebas efectuadas con Lluvia (03/04/2019)

Marca	GPS (Latitud Longitud)	Coordenadas UTM	Hora	Altura (*m*)
Pum1	0°17'04.2"S 78°30'30.2"W	-0.284500, -78.508389	13:10:01	3007
Pum2	0°16'46.2"S 78°30'19.3"W	-0.279500, -78.505361	13:15:03	3008

Distancia entre los puntos **649.97** *m*

Para terminar, en la Figura 4.12 se muestran los alcances logrados en las pruebas del prototipo bajo lluvia. Cabe recalcar que, según información recolectada del INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – Ecuador), el volumen de precipitación (lluvia) es normalmente de $145.9\ mm$ [97] (Ver Anexo O).

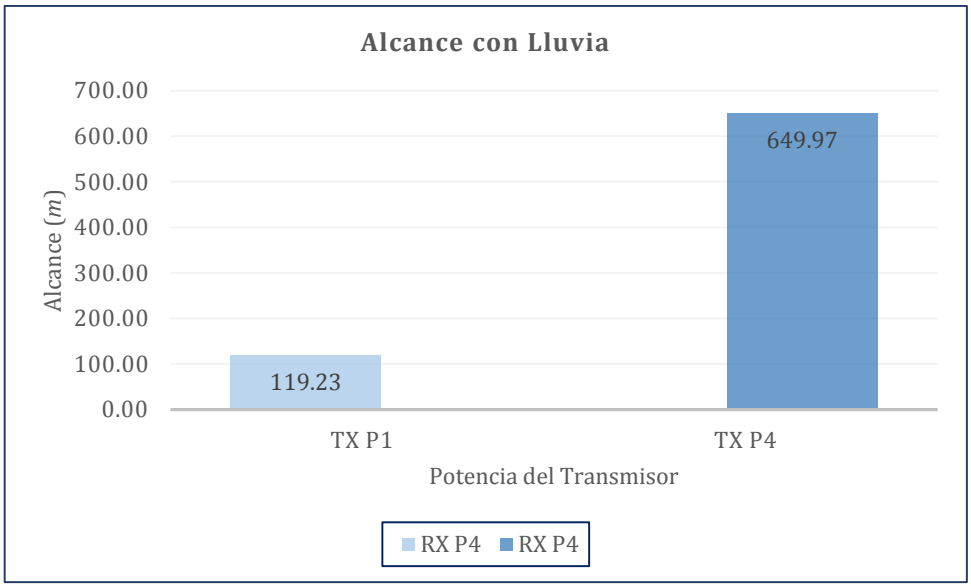


Figura 4.12. Alcance del Prototipo con Lluvia

4.2.4. Resumen

Con el objetivo de visualizar los resultados de mejor forma, se muestra en la Figura 4.13 una compilación de los alcances (de menor a mayor) del funcionamiento del prototipo.

Además, se detallan en la Tabla 4.10, las condiciones bajo las cuales (potencia, línea de vista, vegetación), se obtuvo cada uno de los resultados.

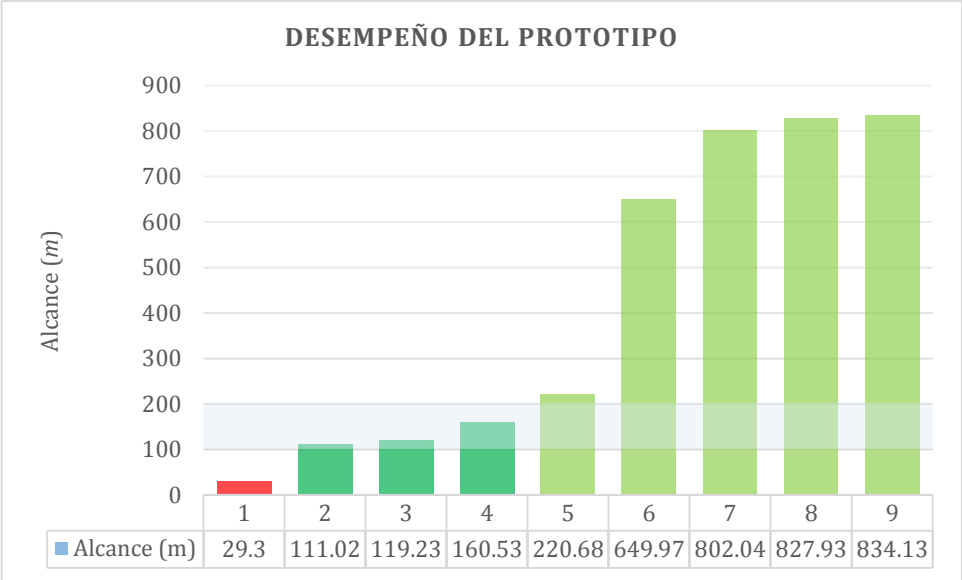


Figura 4.13. Gráfico de Barras de compilación de Alcances del Prototipo

Tabla 4.10. Detalles de Alcance de Prototipo

Análisis	Alcance (*m*)	Potencia TX	Potencia RX	Ambiente
1	29.3	P1	P4	Vegetación
2	111.02	P4	P4	Vegetación
3	119.23	P1	P4	Lluvia
4	160.53	P1	P1	Urbano
5	220.68	P1	P1	Rural
6	649.97	P4	P4	Lluvia
7	802.04	P4	P1	Urbano
8	827.93	P4	P1	Rural
9	834.13	P4	P4	Urbano

Después, el único alcance que no satisface una comunicación de alcance medio, es el correspondiente al primer análisis (vegetación exuberante y dispositivos configurados en mínima potencia).

En definitiva, el objetivo del proyecto (alcance de 100 a 200 m) se cumple en el análisis 2-4 (Tabla 4.10), las cuales responden a las necesidades reales de las estaciones de monitoreo sísmico del IG.

En todos los análisis restantes, es decir 5-9 (Tabla 4.10), se muestran alcances que triplican y hasta cuadruplican el objetivo original (alcance máximo de 834.13 m) motivo por el cual, debido al gran desempeño del prototipo y la versatilidad modular, se deja apertura a un posterior análisis, implementación y mejora del presente proyecto, para enfocarlo a otros

objetivos que aporten alternativas de bajo costo para facilitar de esta forma, el monitoreo sísmico y volcánico del país.

Para finalizar, en la Figura 4.14 se muestra al sistema transmisor conectado al sistema de alimentación convencional empleado en estaciones sísmicas (paneles solares y bancos de baterías $12\ V$). En particular, la estación está localizada cerca del volcán Cotopaxi, en una estación llamada Barrancas (00°46'56.9"S 78°28'35.5"W).

Dicho lo anterior, se concluye que el prototipo cumple con el objetivo específico de funcionamiento en exteriores y además compatibilidad con el sistema energético de las estaciones del IG.

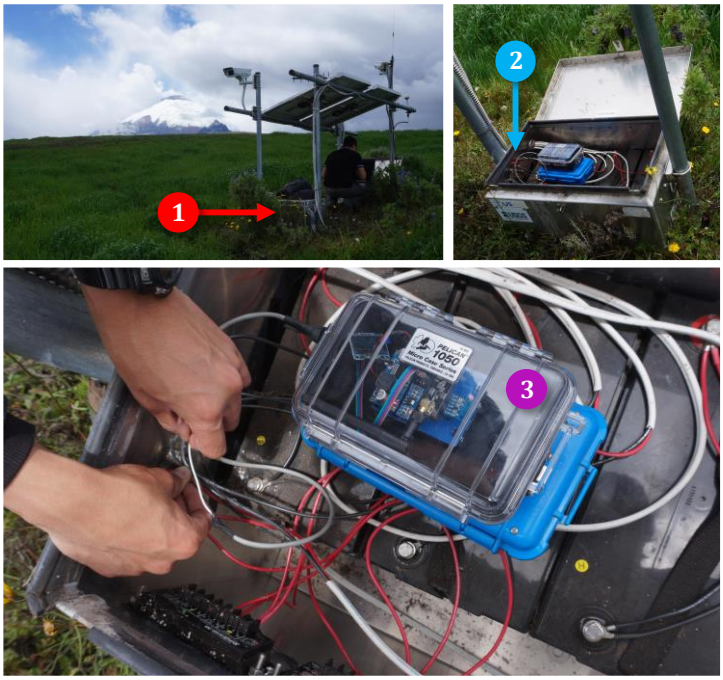


Figura 4.14. Sistema Transmisor en una estación de Monitoreo del IG

Las fotografías de las pruebas realizadas se adjuntan en el Anexo P. También, las librerías empleadas para el correcto funcionamiento del *script* de programación del prototipo se adjuntan en el Anexo Q. Además, se incluye un manual de usuario el cual se encuentra en el Anexo R.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- El presente proyecto muestra el desarrollo de un prototipo de sistema de comunicación inalámbrico, en el cual, el correcto acoplamiento de los elementos electrónicos con los sensores sísmicos, se obtuvo al emplear conectores militares, los cuales soportan condiciones ambientales extremas y golpes ocasionados por caídas. También, se obtuvieron distancias que superan los $200\ m$ de alcance cuando el transmisor y el receptor se configuraron con máxima potencia y se ubicaron en sitios con línea de vista.

- El peso del prototipo ($3\ kg$ en total incluyendo transmisor y receptor) es 91.42% más ligero que el medio tradicional (cable). Ya que, para el prototipo se implementa en cajas impermeables, las cuales, incluyendo el peso de los componentes electrónicos, que pesan en total $1.5\ kg$. Además, poseen un tamaño portable ($251\text{x}136\text{x}142\ mm$), el cual optimiza la adición de nuevos puntos de monitoreo.

- El tiempo de instalación de un cable de $300\ m$ (medio tradicional de adquisición de señales sísmicas) es de aproximadamente 3 horas, sin embargo, con el prototipo el tiempo de instalación es de casi 10 minutos, lo cual corresponde una optimización del 94.44% en tiempo. Cabe mencionar que, los 10 minutos incluyen: el encendido de los dispositivos (transmisor y receptor), la conexión del geófono y que los dispositivos cuenten con línea de vista.

- La autonomía de funcionamiento y la capacidad de almacenamiento de energía la batería, son directamente proporcionales. Se debe agregar que, instalar una batería con capacidad de $10\ Ah$ provee una autonomía de funcionamiento de $5\ días$, esto se debe al bajo consumo energético del prototipo ($81\ mA$).

- La elaboración de una placa PCB (*Printed Circuit Board*), optimiza la comunicación SPI (*Serial Peripheral Interface*), entre dispositivos maestro y esclavo, pues se suprime el riesgo de pérdida de la comunicación por la eventual desconexión de cables. Así también, facilita la distribución y conexión de los módulos electrónicos en las cajas impermeables, y finalmente, otorga versatilidad al momento de sustituir módulos electrónicos defectuosos o quemados.

- En el sistema transmisor, el uso de dos cajas ajustadas entre sí mediante tornillos, facilitó el intercambio entre sistemas (un transmisor defectuoso por un transmisor probado en laboratorio). Así, se minimiza el riesgo de que la parte electrónica sufra daño por estática o por lluvia. Y principalmente, la incorporación de conectores y elementos

de fácil sujeción, añade al sistema la característica de ser fácilmente instalable (*plug and play*).

- Una de las ventajas de la plataforma de programación Arduino IDE es su naturaleza *open source*, lo cual permite el cambio de parámetros en las librerías. De esta manera, se modificaron ciertas características de operación de los módulos, que en el caso del ADS1115 fue la tasa de muestreo, y para el NRF24L01 fue la velocidad de transmisión y el nivel de potencia. De esta forma, se viabiliza el ajuste de características de funcionamiento en los módulos electrónicos que conforman el prototipo.

- En particular, un parámetro importante en la configuración de la librería del NRF24L01+, es el cambio de topología del sistema de transmisión punto – punto (empleada en el presente del proyecto), a una topología punto – multipunto (en la cual un receptor recibiría la información proveniente de 6 transmisores). Cabe señalar que esta configuración aportaría a un crecimiento en la densidad de puntos de monitoreo.

- El desempeño del dispositivo es mejor en ambiente rural, dado que existen menos señales de interferencia en la frecuencia de operación (banda libre de $2.4\ GHz$) del módulo NRF24L01. Adicionalmente, en ambiente urbano se incrementa la interferencia a causa de tecnologías comunes en este ambiente como: señales Wi-Fi, Bluetooth, microondas, entre otras, que operan en la misma banda de frecuencia. Y como resultado se disminuye su alcance en un 3.12%.

- El mejor desempeño se obtiene cuando el transmisor y el receptor están configurados con la máxima potencia de funcionamiento ($0\ dBm$), donde se obtuvo un alcance de $834.13\ m$ en ambiente urbano. Por otro lado, el mencionado alcance varía en función de las características climáticas de la región, así como también de la vegetación. Es decir, si existe mayor índice de lluvias y la vegetación es densa, el alcance será menor. De hecho, la vegetación causó la mayor atenuación a la señal, disminuyendo el alcance en un 86.69%.

5.2. RECOMENDACIONES

- En cuanto a la ampliación de cobertura de monitoreo sismo – volcánico, se recomienda la implementación de topologías de red como, *token ring*, o varios repetidores en configuración punto – multipunto enfocadas a aplicaciones sísmicas. En particular, en la configuración punto – multipunto se podría analizar la implementación de una topología de árbol, en la cual, una subred tendría un máximo de 36 transmisores (dependiendo de la aplicación), los cuales mantendrían enlace inalámbrico con 6 transductores, que posteriormente se conecten en un solo receptor.

- Por otra parte, si se requiere un mayor alcance, se recomienda el uso de una antena Yagi – Uda (alta ganancia y directividad) que trabaje a una frecuencia de $2.4\ GHz$. Además, la implementación de la antena en el prototipo no debería incrementar su consumo energético, o en su defecto, que el incremento no supere el 5%.

- El tiempo de arribo de los datos y la distancia entre los dispositivos transmisor y receptor, son directamente proporcionales, motivo por el cual, para mayores distancias de funcionamiento, se sugiere incluir en el sistema una señal GPS. De esta forma, no existiría un desfase en los eventos sismo-volcánicos, ya que, conocer el tiempo en el cual sucede un acontecimiento es indispensable al momento de efectuar un análisis.

- En vista de que, el prototipo funcionará en condiciones climáticas extremas, como las presentes en un volcán (caída de ceniza, lluvia), es conveniente el análisis de un sistema de puesta a tierra, con el objetivo de proteger los implementos electrónicos de una eventual tormenta eléctrica.

- Por otro lado, el *script* de programación de los dispositivos (tanto transmisor y receptor) requiere de bibliotecas específicas para su correcto funcionamiento. Por lo tanto, se recomienda, efectuar la actualización por medio del gestor de descargas de bibliotecas de Arduino IDE (software para la programación de Arduino). Cabe mencionar que, sin las mencionadas bibliotecas el *script* no compilará, motivo por el cual no se instalará el programa en el Arduino Uno. Es conveniente también, revisar si existe un cambio en las características de cada versión de la biblioteca.

- Se recomienda, modificar el *script* de programación para que la transmisión no sea continua, de esta manera, el transmisor se enlazará con el receptor únicamente cuando se produzca un evento sismo – volcánico, es decir, en ausencia del fenómeno, el receptor se encontrará en *stand by* (estado de espera). Por lo tanto, se debe analizar las características de funcionamiento del módulo NRF24L0 en la configuración mencionada (*stand by*), con el fin de, mantener un bajo consumo energético en el prototipo. Así también, para que no exista perdida de información relevante, y con el objetivo de visualizar la parte previa de estabilidad de la señal sismo volcánica, el transmisor debe almacenar la señal al menos un segundo antes del evento.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Radio Programas del Perú, «Terremoto en Ecuador: ¿Qué es el Cinturón de Fuego del Pacífico?», *RPP Noticias*, 2018. [En línea]. Disponible en: http://rpp.pe/mundo/latinoamerica/terremoto-en-ecuador-que-es-el-cinturon-de-fuego-del-pacifico-noticia-954929. [Accedido: 15-ago-2018].

[2] G. Quiroz y G. Guerra, «Ecuador está entre los 15 países con más volcanes en el planeta», *El Comercio*, 2015. [En línea]. Disponible en: https://especiales.elcomercio.com/2015/09/mapa-volcanes/. [Accedido: 15-ago-2018].

[3] INGEMMET, «Monitoreo volcánico – Observatorio Vulcanológico del INGEMMET», *Observatorio Vulcanológico del INGEMMET*, 2018. [En línea]. Disponible en: http://ovi.ingemmet.gob.pe/?page_id=26. [Accedido: 15-ago-2018].

[4] Instituto Geofísico EPN, «Volcanes», *igepn.edu.ec*, 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.igepn.edu.ec/content/41-volcanes. [Accedido: 15-ago-2018].

[5] Instituto Geofísico EPN, «Redes de Transmisión», *igepn.edu.ec*, 2018. [En línea]. Disponible en: www.igepn.edu.ec/redes-de-transmision. [Accedido: 15-ago-2018].

[6] W. Stallings, *Wireless communications and networks*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall PTR, 2001.

[7] Arduino, «Arduino Uno Rev3», *Arduino.cc*, 2018. [En línea]. Disponible en: https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3. [Accedido: 15-ago-2018].

[8] Raspberry Pi Foundation, «Raspberry Pi 3», 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-case/. [Accedido: 15-ago-2018].

[9] Zolertia, «Z1 Datasheet», 2010. [En línea]. Disponible en: http://zolertia.sourceforge.net/wiki/images/e/e8/Z1_RevC_Datasheet.pdf. [Accedido: 13-nov-2018].

[10] Intel, «Especificaciones de producto de Intel® Galileo Gen 2 Board», *Intel® ARK (Product Specs)*, 2018. [En línea]. Disponible en: https://ark.intel.com/es/products/83137/Intel-Galileo-Gen-2-Board. [Accedido: 15-ago-2018].

[11] J. M. Reynolds, «An introduction to applied and environmental geophysics», *Igarss*

2014, n.º 1, p. 799, 1997.

[12] J. Proakis y D. Manolakis, *Tratamiento Digital de Señales*, vol. 53, n.º 9. Boston: Prentice Hall PTR, 2011.

[13] E. Martinez, «Teoria del muestreo de Nyquist», *Eveliux*, 2007. [En línea]. Disponible en: http://www.eveliux.com/mx/curso/nyquist.html. [Accedido: 16-oct-2018].

[14] Arduino, «Arduino - Warranty», *Arduino.cc*, 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.arduino.cc/en/Main/warranty. [Accedido: 15-ago-2018].

[15] Arduino, «Arduino - Introduction», *Arduino.cc*, 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction. [Accedido: 15-ago-2018].

[16] Arduino, «Arduino - Software», *Arduino.cc*, 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.arduino.cc/en/Main/Software. [Accedido: 15-ago-2018].

[17] J. Vermeiren, «What is Geophone?», *AzoSensors*, 2013. [En línea]. Disponible en: https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=217. [Accedido: 16-nov-2018].

[18] E. Onajite, «Seismic data analysis techniques in hydrocarbon exploration», *Elsevier*, pp. 33-62, 2014.

[19] R. Jacobo, «Análisis del funcionamiento de paneles fotovoltaicos y su utilización en las regiones de la costa y sierra del Ecuador», 2015.

[20] T. D. Corcobado, «Componentes de una instalación solar fotovoltaica», en *Instalaciones solares fotovoltaicas*, Madrid: McGrawHill, 2010.

[21] G. Arencibia, «La importancia del uso de paneles solares en la generación de energía eléctrica», 2016.

[22] Uzquiano Camilo, Sullivan Mike, y S. Ximena, *Capacitación e instalación de Sistemas Fotovoltaicos en las comunidades de Carmen del Emero y Yolosani*. 2015.

[23] T. Crompton, «Battery Reference Book», 2000. [En línea]. Disponible en: https://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0101/Nelson-0101.html. [Accedido: 04-dic-2018].

[24] B. Schumm, «Battery», *Encyclopedia Britannica*, 2018. .

[25] R. W. Erickson, «DC - DC Power Converters», *Wiley Encycl. Electr. Electron. Eng.*

DC-DC, 2007.

[26] M. Wens y M. Steyaert, *Design and Implementation of Fully-Integrated Inductive DC- DC Converters in Standard CMOS*. 2011.

[27] S. Roberts, «DC / DC Book of Knowledge», *Recom*, n.º 2nd, p. 15, 2014.

[28] Philips Semiconductors, «The I2C-Bus Specification», *Philips Semicond.*, n.º January, pp. 1-46, 2000.

[29] Sprut, «Basics I2C-Interface», *Sprut.de*, 2010. [En línea]. Disponible en: http://www.sprut.de/electronic/pic/grund/i2c.htm. [Accedido: 14-nov-2018].

[30] Encyclopedia Britannica, «Liquid crystal display», 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.britannica.com/technology/liquid-crystal-display. [Accedido: 03-abr-2019].

[31] D. Comino, «Creación de un Reloj-Calendario con el I2C PCF8583P», 2012. [En línea]. Disponible en: https://davidcominotoca1992.wordpress.com/2012/01/07/creacion-de-un-reloj-calendario-con-el-i2c-pcf8583p/. [Accedido: 14-nov-2018].

[32] ArduBasic, «Comunicación I2C», 2018. [En línea]. Disponible en: https://ardubasic.wordpress.com/2014/07/28/comunicacion-i^{2}c/. [Accedido: 14-nov-2018].

[33] Arduino, «Arduino - SPI», 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.arduino.cc/en/Reference/SPI. [Accedido: 16-nov-2018].

[34] Sparkfun, «SPI A Synchronous Solution», *Serial Peripheral Interface (SPI)*, 2018. [En línea]. Disponible en: https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-peripheral-interface-spi/all. [Accedido: 16-nov-2018].

[35] Sparkfun, «SPI Receiving Data», *Serial Peripheral Interface (SPI)*, 2018. [En línea]. Disponible en: https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-peripheral-interface-spi/all. [Accedido: 16-nov-2018].

[36] Sparkfun, «SPI Slave Select (SS)», *Serial Peripheral Interface (SPI)*, 2018. [En línea]. Disponible en: https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-peripheral-interface-spi/slave-select-ss. [Accedido: 16-nov-2018].

[37] Texas Instruments, «KeyStone Architecture Universal Asynchronous Receiver / Transmitter (UART) User Guide», n.º November, 2010.

[38] R. Keim, «UART Capabilities and Characteristics», *Back to Basics: The Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART)*, 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/back-to-basics-the-universal-asynchronous-receiver-transmitter-uart/. [Accedido: 16-nov-2018].

[39] R. Keim, «UART Synchronizing and Sampling», *Back to Basics: The Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART)*, 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/back-to-basics-the-universal-asynchronous-receiver-transmitter-uart/. [Accedido: 16-nov-2018].

[40] R. Keim, «Back to Basics Key Terms», *Back to Basics: The Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART)*, 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/back-to-basics-the-universal-asynchronous-receiver-transmitter-uart/. [Accedido: 16-nov-2018].

[41] «El transceptor NRF24L01», 2008. [En línea]. Disponible en: http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12159/fichero/3.pdf.

[42] Nordic Semiconductor Support, «Enhanced ShockBurst User Guide», *Nordic Semiconductor Infocenter*, 2016. [En línea]. Disponible en: https://infocenter.nordicsemi.com/index.jsp?topic=%2Fcom.nordic.infocenter.sdk5.v11.0.0%2Fesb_users_guide.html. [Accedido: 12-nov-2018].

[43] D. Veilleux, «Intro to Enhanced ShockBurst», *Nordic Semiconductor DevZone*, 2015. [En línea]. Disponible en: https://devzone.nordicsemi.com/b/blog/posts/intro-to-shockburstenhanced-shockburst. [Accedido: 12-nov-2018].

[44] Nordic Semiconductor, «NRF240x ShockBurst™ technology», vol. 7, n.º February, 2003.

[45] Nordic Semiconductor, «NRF24L01 Product Specification», 2015. [En línea]. Disponible en: https://studfiles.net/preview/1625824/page:11/. [Accedido: 13-nov-2018].

[46] T. Schroeder y M. Moser, «Modern Wireless Devices», 2015. [En línea]. Disponible en: http://www.remote-exploit.org/content/keykeriki_v2_cansec_v1.1.pdf. [Accedido: 13-nov-2018].

[47] B. McDaniel, «An Algorithm for Error Correcting Cyclic Redundance Checks», 2003. [En línea]. Disponible en: http://www.drdobbs.com/an-algorithm-for-error-correcting-cyclic/184401662. [Accedido: 23-nov-2018].

[48] G. B. Bowden, «Calibration of Geophone Microseismic Sensors», n.º October, pp. 1-9, 2003.

[49] Sercel, «Geophones Specifications», n.º 1, pp. 1-7, 1850.

[50] S. Octavio, «Paneles solares fotovoltaicos», *Todo sobre los paneles Solares*, 2018. [En línea]. Disponible en: https://panelessolaresfotovoltaicos.org/paneles-solares-fotovoltaicos/dimensiones-de-los-paneles-solares/paneles-solares-medidas-y-capacidad/. [Accedido: 28-nov-2018].

[51] Vega Solar Energy Pvt. Ltd., «VEGA - 12V0810», 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/3608. [Accedido: 06-abr-2019].

[52] Morningstar Corporation, «SunSaver SS-10L-12V Charge Controller», 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.wholesalesolar.com/3610102/morningstar-corporation/charge-controllers/morningstar-corporation-sunsaver-ss-10l-12v-charge-controller. [Accedido: 23-nov-2018].

[53] WeboSolar, «Controlador de Carga Morningstar SunSaver SS-10L-12V», 2018. [En línea]. Disponible en: https://webosolar.com/store/es/controladores-pmw/665-controlador-carga-morningstar-sunsaver-ss-10l-12v-lvd.html. [Accedido: 21-nov-2018].

[54] National Semiconductors, «LM2596 SIMPLE SWITCHER Power Converter Step-Down Voltage Regulator», n.º July, pp. 1-20, 2003.

[55] Texas Instruments, «LM2596 Simple Switcher Low Component Count Step-Down Regulator», 2018. [En línea]. Disponible en: http://www.ti.com/product/LM2596/toolssoftware. [Accedido: 29-nov-2018].

[56] Mini Kits, «LM2596 DC-DC Adjustable PSU Module», *Minikits*, 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.minikits.com.au/LM2596-PSU-01. [Accedido: 29-nov-2018].

[57] XLSEMI, «400KHz 60V 4A Switching Current Boost / Buck-Boost / Inverting DC / DC Converter 400KHz 60V 4A Switching Current Boost / Buck-Boost / Inverting DC / DC Converter», pp. 1-8.

[58] Micro JPM, «XL6009 Boost DC-DC Adjustable Step Up Converter», 2019. [En línea]. Disponible en: http://m.microjpm.com/products/xl6009-boost-buck-dc-dc-adjustable-step-up-down-converter/. [Accedido: 11-abr-2019].

[59] Advanced Monolithic Systems, «AMS1117 - 1A Low Dropout Voltage Regulator», n.º 925, 2013.

[60] SunSaver, «SunSaver SS-10L-12V Technical Specifications», vol. m, 2018.

[61] Nerokas, «AMS1117-5V 1A Voltage Regulator SOT-223», 2018. [En línea]. Disponible en: https://store.nerokas.co.ke/index.php?route=product/product&product_id=1780. [Accedido: 29-nov-2018].

[62] AMS-Semitech, «AMS1117», pp. 1-9, 2012.

[63] Naylamp Mechatronics, «Módulo Regulador AMS1117», 2018. [En línea]. Disponible en: https://naylampmechatronics.com/fuentes-y-reguladores/166-modulo-regulador-ams1117-33v.html. [Accedido: 29-nov-2018].

[64] Kuongshun Electronic Shop, «AMS1117-3.3 LDO 800MA DC Step-Down Power Supply», 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.kuongshun-ks.com/uno/uno-board-shield/ams1117-3-3-ldo-800ma-dc-5v-to-3-3v-step-down-powe.html. [Accedido: 11-abr-2019].

[65] Adafruit Industries, «ADS1115 16-Bit ADC - 4 Channel with Programmable Gain Amplifier», 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.adafruit.com/product/1085. [Accedido: 30-nov-2018].

[66] Texas Instruments, «ADS1115», 2018. [En línea]. Disponible en: http://www.ti.com/product/ADS1115. [Accedido: 30-nov-2018].

[67] Distrelec Export, «1085 Gain Amplifier ADS1115 16-Bit ADC board Adafruit», 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.distrelec.biz/en/ads1115-16-bit-adc-board-adafruit-1085-gain-amplifier/p/30091131. [Accedido: 30-nov-2018].

[68] L. Llamas, «Entrada Analógica de 16 Bits con Arduino y ADS1115», 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.luisllamas.es/entrada-analogica-adc-de-16-bits-con-arduino-y-ads1115/. [Accedido: 30-nov-2018].

[69] L. Llamas, «Salida Analógica Real con Arduino de 12bits MCP4725», 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.luisllamas.es/salida-analogica-real-con-arduino-y-dac-de-12bits-mcp4725/. [Accedido: 30-nov-2018].

[70] MicroChip, «MCP4725», 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.microchip.com/wwwproducts/en/en532229. [Accedido: 30-nov-2018].

[71] Electrónica Embajadores, «Convertidor Digital Analogico DAC 12bit I2C - MCP4725», 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.electronicaembajadores.com/es/Productos/Detalle/LCINDA1/modulos-electronicos/modulos-instrumentacion/convertidor-digital-analogico-dac-12bit-i2c-mcp4725. [Accedido: 30-nov-2018].

[72] Adafruit Industries, «MCP4725 Breakout Board - 12-Bit DAC w/I2C Interface», 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.adafruit.com/product/935. [Accedido: 30-nov-2018].

[73] National Instruments, «NI-9239 - National Instruments», 2018. [En línea]. Disponible en: http://www.ni.com/es-cr/support/model.ni-9239.html. [Accedido: 30-nov-2018].

[74] Nordic, «NRF24L01+ Single Chip 2.4GHz Transceiver Product Specification v1.0», *Build. Res.*, n.º 1, p. 78, 2008.

[75] Minute engineers, «In-Depth: How nRF24L01 Wireless Module Works & Interface with Arduino», 2019. [En línea]. Disponible en: https://lastminuteengineers.com/nrf24l01-arduino-wireless-communication/. [Accedido: 30-abr-2019].

[76] Sparkfun, «2.4GHz Transceiver IC - NRF24L01+», 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.sparkfun.com/products/690. [Accedido: 03-dic-2018].

[77] ElectroniLab, «Módulo Transceptor RF NRF24L01+ 2.4 Ghz con Antena SMA, LNA y PA», 2018. [En línea]. Disponible en: https://electronilab.co/tienda/modulo-transceptor-rf-nrf24l01-2-4-ghz-antena-sma-lna-y-pa/. [Accedido: 03-dic-2018].

[78] Nordic Semiconductor, «nRF24L01+ Datasheet», *Nord. Semicond.*, n.º March, p. 75, 2008.

[79] L. Llamas, «Comunicación Inalámbrica A 2.4ghz con Arduino y NRF24L01», 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.luisllamas.es/comunicacion-inalambrica-a-2-4ghz-con-arduino-y-nrf24l01/. [Accedido: 03-dic-2018].

[80] Solomon Systech, «Advance Information 128», p. 65, 2008.

[81] Vishay, «Vishay 128 x 64 Graphic OLED», pp. 1-25, 2016.

[82] Makerfabs, «0.96" I2C OLED 128x64», 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.makerfabs.com/0.96-I2C-OLED-128x64-Blue.html. [Accedido: 03-dic-

2018].

[83] B. Earl, «Overview | Adafruit 4-Channel ADC Breakouts | Adafruit Learning System», 2018. [En línea]. Disponible en: https://learn.adafruit.com/adafruit-4-channel-adc-breakouts?view=all. [Accedido: 04-dic-2018].

[84] B. Earl, «Adafruit 4-Channel ADC Breakouts Assembly and Wiring Assembly : Wiring : Python & CircuitPython Python Computer Wiring CircuitPython Installation of ADS1x15Library Python Installation of ADS1x15 Library CircuitPython & Python Usage Schematic (Identical F», 2018.

[85] Nordic Semiconductor, «Ultra-low Power Wireless System On-Chip Solution», n.º August, 2010.

[86] Geek Factory, «Como instalar una librería de Arduino», 2014. [En línea]. Disponible en: https://www.geekfactory.mx/tutoriales/tutoriales-arduino/como-instalar-una-libreria-de-arduino/. [Accedido: 13-dic-2018].

[87] Arduino, «float», 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.arduino.cc/reference/en/language/variables/data-types/float/. [Accedido: 13-dic-2018].

[88] Arduino, «setup», 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.arduino.cc/reference/en/language/structure/sketch/setup/. [Accedido: 13-dic-2018].

[89] Arduino, «bool», 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.arduino.cc/reference/en/language/variables/data-types/bool/. [Accedido: 13-dic-2018].

[90] G. Antony, «El setup y el loop en Arduino», 2015. [En línea]. Disponible en: http://panamahitek.com/el-setup-y-el-loop-en-arduino/. [Accedido: 13-dic-2018].

[91] Mathworks, «Update figures and process callbacks», 2018. [En línea]. Disponible en: http://www.citethisforme.com/es/cite/sources/websiteautociteeval. [Accedido: 23-ene-2019].

[92] Energema, «Hora Solar Pico (HSP)», pp. 1-8, 2014.

[93] S. Robert, «How can the frequency of Bluetooth, Wi-Fi 2.4 GHz, and microwave ovens be the same, but have different effects?», 2015. [En línea]. Disponible en: https://www.quora.com/How-can-the-frequency-of-Bluetooth-Wi-Fi-2-4-GHz-and-

microwave-ovens-be-the-same-but-have-different-effects. [Accedido: 30-abr-2019].

[94] EducarChile, «Las coordenadas geográficas y la proyección UTM», 2008.

[95] Instituto Geofísico EPN, «Cotopaxi», *igepn.edu.ec*, 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.igepn.edu.ec/cotopaxi. [Accedido: 03-may-2019].

[96] U. Rafael y B. Chacín, «Pronóstico de la atenuación por lluvia en las comunicaciones satelitales mediante métodos de regresión», 2010.

[97] INAMHI, «Boletín Climatológico Mensual Marzo», 2019.

[98] Morningstar Corporation, «Controladores de Carga Manual del Operador SS-10L-12V», p. 2, 2018.

[99] ON Semiconductor, «LM2596 3.0A Step-Down Switching Regulator Datasheet», pp. 1-25, 2008.

[100] Texas Instruments, «ADS111x Ultra-Small Low-Power», 2016.

[101] MicroChip, «12-Bit Digital-to-Analog Converter with EEPROM Memory in SOT-23-6», *Microchip Technol. Inc*, pp. 1-42, 2007.

ANEXOS

Anexo A Especificaciones Técnicas del Geófono L4C Sercel
Anexo B Especificaciones Técnicas del Panel Solar Vega Solar 20-10
Anexo C Especificaciones Técnicas de la Batería
Anexo D Especificaciones Técnicas del Controlador de carga SunSaver SS-10L-12V
Anexo E Especificaciones Técnicas del LM2596
Anexo F Especificaciones Técnicas del XL6009
Anexo G Especificaciones Técnicas del AMS1117
Anexo H Especificaciones Técnicas del ADS1115
Anexo I Especificaciones Técnicas del MCP4725
Anexo J Especificaciones Técnicas del NRF24L01+
Anexo K Especificaciones Técnicas del Display OLED 0.96”
Anexo L Código del Transmisor
Anexo M Código del Receptor
Anexo N Diseños de los PCB tercera versión
Anexo O Reporte meteorológico del INAMHI
Anexo P Fotografías de las Pruebas Realizadas
Anexo Q Bibliotecas para los *script* del Prototipo
Anexo R Manual de Usuario
Anexo S Presupuesto de Enlace

Anexo A

Especificaciones Técnicas del Geófono L4C Sercel [49]

(El contenido de este documento se presenta en el CD adjunto de forma Digital)

Anexo B

Especificaciones Técnicas del Panel Solar Vega Solar 20-10 [51]

(El contenido de este documento se presenta en el CD adjunto de forma Digital)

Anexo C

Especificaciones Técnicas de la Batería

(El contenido de este documento se presenta en el CD adjunto de forma Digital)

Anexo D

Especificaciones Técnicas del Controlador de carga SunSaver SS-10L-12V [98]

(El contenido de este documento se presenta en el CD adjunto de forma Digital)

Anexo E

Especificaciones Técnicas del LM2596 [99]

(El contenido de este documento se presenta en el CD adjunto de forma Digital)

Anexo F

Especificaciones Técnicas del XL6009 [57]

(El contenido de este documento se presenta en el CD adjunto de forma Digital)

Anexo G

Especificaciones Técnicas del AMS1117 [59][62]

(El contenido de este documento se presenta en el CD adjunto de forma Digital)

Anexo H

Especificaciones Técnicas del ADS1115 [100]

(El contenido de este documento se presenta en el CD adjunto de forma Digital)

Anexo I

Especificaciones Técnicas del MCP4725 [101]

(El contenido de este documento se presenta en el CD adjunto de forma Digital)

Anexo J

Especificaciones Técnicas del NRF24L01+[74]

(El contenido de este documento se presenta en el CD adjunto de forma Digital)

Anexo K

Especificaciones Técnicas del Display OLED 0.96” [81]

(El contenido de este documento se presenta en el CD adjunto de forma Digital)

Anexo L

Código del Transmisor

(El contenido de este documento se presenta en el CD adjunto de forma Digital)

Anexo M

Código del Receptor

(El contenido de este documento se presenta en el CD adjunto de forma Digital)

Anexo N

Diseños de los PCB tercera versión

(El contenido de este documento se presenta en el CD adjunto de forma Digital)

Anexo O

Reporte meteorológico del INAMHI

(El contenido de este documento se presenta en el CD adjunto de forma Digital)

Anexo P

Fotografías de las Pruebas Realizadas

(El contenido de este documento se presenta en el CD adjunto de forma Digital)

Anexo Q

Bibliotecas para los *script* del Prototipo

(El contenido de este documento se presenta en el CD adjunto de forma Digital)

Anexo R

Manual de Usuario

(El contenido de este documento se presenta en el CD adjunto de forma Digital)

Anexo S

Presupuesto de Enlace

+Potencia del TX (*dBm*) - Pérdidas en el cable TX (*dB*)
– Perdidas conector TX (*dB*) + Ganancia Antena TX (*dBi*)
–Pérdidas en la trayectoria en el espacio libre (*dB*) **=** Umbral (*dB*) – Sensibilidad del RX (*dBm*)
+Ganancia de Antena RX (*dBi*) – Pérdidas en el cable RX (*dB*)
– Perdidas conector RX (*dB*)

En el siguiente ejemplo, se realizará el cálculo del presupuesto de enlace para una distancia de 200 *m*. Además, al configurar la velocidad de TX a una tasa de 250 *kbps* en transmisión, la sensibilidad teórica en recepción es -94 *dBm*. También, se asume una pérdida por circuitería (cables, conectores, etc) de 0.25 dB tanto en transmisión como en recepción. Cabe mencionar que, la frecuencia de funcionamiento del dispositivo es de 2.4 *GHz*.

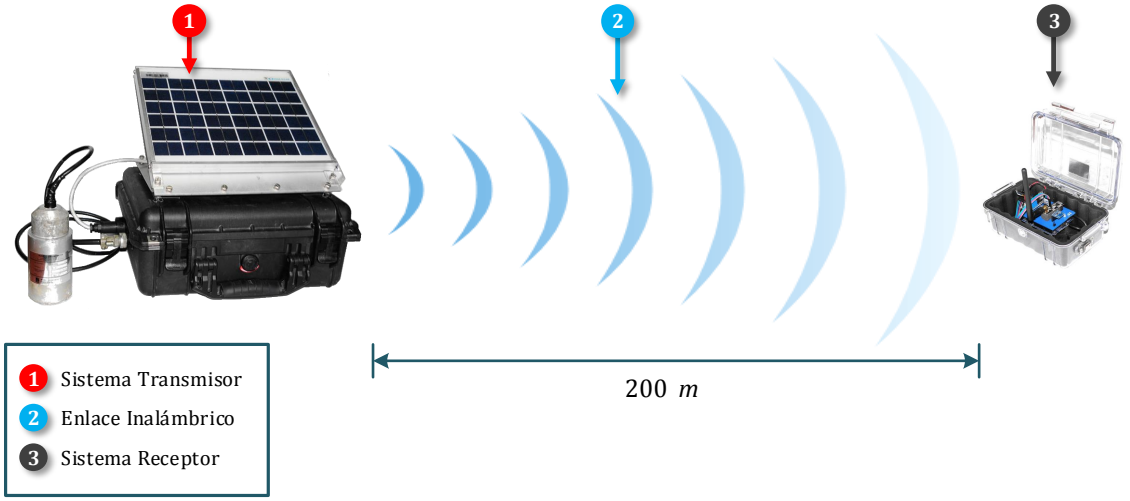
Pérdidas en el espacio libre

L = 32.4 + 20log(**d**) + 20log(**f**)

Donde,
d: distancia en *km*
f: frecuencia de operación en *MHz*

L = 32.4 + 20log(0,2) + 20log(2400)
L = 100 *dB*

Datos	Elementos	Valores
Distancia= 0.2 *km*	Potencia del TX	0 *dBm*
	Cables y conectores	0.5 *dB*
	Ganancia Antena TX	5.15 *dBi*
Frecuencia = 2400 *MHz*	Pérdidas en Espacio Libre (L)	-100 *dB*
	Ganancia Antena RX	5.15 *dBi*
	Umbral	10 *dB*
	Total: Sensibilidad del Receptor	**-80.2 *dBm***



Finalmente, como la sensibilidad calculada (-80.2 *dBm*) es mayor que la sensibilidad señalada por el fabricante del módulo NRF24L01 (-94 *dBm*), se concluye que, es posible establecer el enlace inalámbrico entre los sistemas transmisor y receptor del prototipo.

ORDEN DE EMPASTADO

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
Campus Politécnico "J. Rubén Orellana R."

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
DECANATO

ORDEN DE EMPASTADO

De conformidad al Artículo 101 del **REGLAMENTO DE RÉGIMEN ACADÉMICO DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL** aprobado por Consejo Politécnico en Octubre de 2017 y al **INSTRUCTIVO PARA EL PROCEDIMIENTO DE TRABAJOS DE TITULACIÓN DE LAS CARRERAS DE PRE-GRADO Y PROGRAMAS DE POSGRADO DE LA FIEE,** aprobado por Consejo de Facultad el 24 de enero de 2019 que establece que "*El Decano de la FIEE, remitirá los informes de calificación al Director del Trabajo de Titulación y le solicitará un informe de conformidad en relación a las observaciones planteadas, este informe será presentado al Decano en un plazo no mayor a diez días, quien a su vez emitirá la autorización de impresión y encuadernación final del Trabajo de Titulación o Tesis de Grado.*", una vez verificado el cumplimiento del formato de presentación establecido, autorizo la impresión y encuadernación final del Trabajo de Titulación presentado por el señor:

JOSÉ LUIS VERA CALDERÓN

Fecha de autorización: 31 de julio de 2019

M.Sc. Fabio González
Decano

Paola P.