

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

SISTEMA DE TELEMETRÍA DE BAJO CONSUMO ENERGÉTICO

Trabajo de Titulación para optar al Título de
Ingeniero de Ejecución en CONTROL E
INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

Alumno:

Franco Gonzalo Ignacio Alarcón Paredes.

Profesor Guía:

Mag. Víctor Cárdenas Schweiger.

2025

RESUMEN

KEYWORDS: ESP32, LoRa, Xbee, NRF24, Arduino, telemetría.

La creciente dependencia de las redes tradicionales de comunicación enfrenta serios desafíos en situaciones de emergencia, desastres naturales o en áreas remotas sin cobertura. Estas limitaciones, combinadas con el colapso de la infraestructura convencional, evidencian la necesidad de alternativas resilientes y eficientes. El proyecto aborda esta problemática desarrollando un sistema de telemetría basado en dispositivos de bajo consumo energético como el ESP32 y módulos LoRa SX1278, capaces de establecer comunicación en condiciones adversas y sin la necesidad de infraestructuras complejas.

El proyecto se enmarca en la comparación de tecnologías como LoRa, Xbee y NRF24, destacando la capacidad de LoRa para formar redes robustas y de largo alcance con bajo consumo de energía. La solución propuesta incluye distintos tipos de pruebas y análisis para abordar con la mayor seriedad posible la problemática.

El sistema también aborda la alimentación eficiente de los dispositivos, utilizando un ESP32 alimentado con 5 [V] DC y distribuyendo esta misma energía a los sensores y al módulo de comunicación desde el esp32, gracias al regulador 3,3 [V] DC incorporado. Este diseño permite mantener un consumo aproximado de unos 400 [mA], crucial para prolongar la autonomía en escenarios donde el acceso a energía es limitado. La flexibilidad y adaptabilidad del sistema lo posicionan como una alternativa viable para entornos rurales, industriales y urbanos en situaciones de crisis, destacando la importancia de implementar redes alternativas en el contexto actual de conectividad global.

En este trabajo se buscará no solo desarrollar una solución funcional, sino también optimizar parámetros como el alcance de comunicación, la estabilidad de red y el consumo energético, asegurando que el sistema sea escalable y adaptable a diferentes necesidades y escenarios futuros.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES	2
1 ANTECEDENTES GENERALES	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1.1 Definición del problema	3
1.1.2 Importancia de resolverlo	4
1.1.3 Involucrados	5
1.2 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	5
1.2.1 Requerimientos	5
1.2.2 Alternativas de solución	6
1.2.2.1 Alternativa 1	6
1.2.2.2 Alternativa 2	7
1.2.2.3 Alternativa 3	8
1.2.2.4 Alternativa 4	9
1.2.3 Evaluación de las alternativas	11
1.2.4 Alternativa seleccionada	13
1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO	14
1.3.1 Objetivo general	14
1.3.2 Objetivos específicos	14
CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN	15
2 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN	16
2.1 SISTEMA DE TELEMETRÍA	16
2.2 SOLUCIÓN POR IMPLEMENTAR	17
2.3 DISPOSITIVOS	17
2.3.1 Microcontrolador	17
2.3.1.1 Esp32	18

2.3.2	Dispositivos de comunicación	18
2.3.2.1	Módulo LoRa sx1278	19
2.3.2.2	Módulo Xbee S2C	19
2.3.2.3	Módulo NRF24L01 + PA + LNA	20
2.3.3	Antena	21
2.3.3.1	Antena diamond SRH805S	21
2.3.4	Sensores	22
2.3.4.1	Mq2	22
2.3.4.2	Mq7	23
2.3.4.3	DS18B20	24
2.4	CONEXIONADO	25
2.4.1	Asignación y definición de pines	25
2.4.1.1	Asignación de pines en microcontrolador con módulo LoRa	25
2.4.1.2	Asignación de pines en microcontrolador con módulo Xbee	26
2.4.1.3	Asignación de pines en microcontrolador con módulo NRF24L01	26
2.4.2	Diagrama de conexionado	27
2.4.2.1	Esp32 con módulo LoRa	27
2.4.2.2	Esp32 con módulo Xbee	28
2.4.2.3	Esp32 con módulo nrf24l01	28
2.4.3	Medición de corriente	29
2.4.4	Mediciones previas	30
2.4.4.1	LoRa	30
2.4.4.2	Xbee	31
2.4.4.3	Nrf24l01	31
2.5	FUNCIONAMIENTO	32
2.5.1	Diagramas de flujo	32
2.5.1.1	Emisor	32
2.5.1.2	Receptor	34
2.5.2	Código de programación	35

2.6	SOFTWARE DE PROGRAMACIÓN	35
2.7	MONITOREO DE TELEMETRÍA	35
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE RESULTADO		38
3	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	39
3.1	PRUEBAS DE RENDIMIENTO	39
3.1.1	Puntos geográficos y muestras	39
3.1.1.1	Xbee.....	39
3.1.1.2	Nrf24l01.....	40
3.1.1.3	LoRa	41
3.1.2	Análisis comparativo de tecnologías.....	43
3.2	MEJORAS CONTINUAS.....	44
3.2.1	Mantenimiento de código	44
3.2.1.1	Mejorar código	45
3.2.1.2	Personalizar ppm de los sensores	45
3.2.1.3	Implementar rutinas de sleep	45
3.2.1.4	Cifrar transmisión	46
3.2.2	Expansión de la red	46
3.2.2.1	Topología estrella	46
3.2.2.2	Topología malla (mesh)	47
3.3	REDUCCIÓN DE CONSUMOS	47
3.3.1	Configuración esp32.....	48
3.3.2	Cambio de dispositivos.....	48
3.4	EVALUACIÓN DE COSTOS	52
3.4.1	Personal requerido	52
3.4.1.1	Ingeniero en control e instrumentación industrial	53
3.4.1.2	Técnico en automatización o carrera a fin.....	53
3.4.1.3	Programador	53
3.4.2	Costos de los dispositivos y materiales electrónicos.	54

3.4.3	Costos de mejoras.	55
3.4.4	Análisis de costos.	55
3.4.4.1	Análisis de costos por componentes.....	55
3.4.4.2	Evaluación de factores adicionales.	56
3.4.4.3	Análisis de costo total del proyecto.	56
3.4.4.4	Análisis de costos con retrasos.	57
3.4.5	Conclusiones basadas en los análisis.	58
3.5	IMPLEMENTACIÓN FÍSICA	59
3.5.1	Incorporación de batería.....	59
3.5.1.1	Cálculos para batería sin mejoras	60
3.5.1.2	Cálculos para batería con mejoras.....	63
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	65
	BIBLIOGRAFÍA	67
	ANEXO A – DIAGRAMA ISHIKAWA	68
	ANEXO B – MUESTRAS LORA	69
	ANEXO C – MUESTRAS XBEE.....	70
	ANEXO D – MUESTRAS NRF24L01	71
	ANEXO E – MUESTRAS XBEE LARGA DISTANCIA	72
	ANEXO F – MUESTRAS NRF24L01 LARGA DISTANCIA	73
	ANEXO G – MUESTRAS LORA LARGA DISTANCIA	74
	ANEXO H – PROGRAMACIÓN LORA EMISOR.....	76
	ANEXO I – PROGRAMACIÓN LORA RECEPTOR	78
	ANEXO J – PROGRAMACIÓN XBEE EMISOR.....	80
	ANEXO K – PROGRAMACIÓN XBEE RECEPTOR.....	81
	ANEXO M – PROGRAMACIÓN NRF24L01 RECEPTOR	82

ANEXO L – PROGRAMACIÓN NRF24L01 EMISOR.....	83
ANEXO N – ENLACES DE COMPRA DE DISPOSITIVOS.....	85
ANEXO O – DIAGRAMA DE CONEXIONADO LORA.....	87
ANEXO P – OTROS ENLACES	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: esquema de solución.....	10
Figura 2-1: sistema de telemetría representativo.....	16
Figura 2-2: esp32 mcu.	18
Figura 2-3: módulo lora sx1278.....	19
Figura 2-4: módulo xbee s2c.	20
Figura 2-5: módulo nrf24l01 + pa + lna.	20
Figura 2-6: antena diamond.	21
Figura 2-7: sensor mq2.....	22
Figura 2-8: sensor mq7.....	23
Figura 2-9: sensor ds18b20.	24
Figura 2-10: conexionado emisor del esp32 con su módulo lora.	27
Figura 2-11: conexionado emisor del esp32 con su módulo xbee s2c.....	28
Figura 2-12: conexionado emisor del esp32 con su módulo nrf24l01.....	29
Figura 2-13: diagrama de flujo emisor.	33
Figura 2-14: diagrama de flujo receptor.	34
Figura 2-15: logo arduino ide.	35
Figura 2-16: logo arduino cloud.	36
Figura 2-17: dashboard online vía computador.	36
Figura 2-18: dashboard online vía teléfono móvil.	37
Figura 3-2: pruebas xbee larga distancia.....	40
Figura 3-3: pruebas nrf24l01 larga distancia.....	41

Figura 3-1: pruebas lora larga distancia.	42
Figura 3-4: topología estrella.....	46
Figura 3-5: topología mesh.....	47
Figura 3-6: configuración de frecuencia.....	48
Figura 3-7: sensor spg30.....	49
Figura 3-8: sensor mp2.	49
Figura 3-9: sensor zp13.	50
Figura 3-10: esp32 super mini.	50
Figura 3-11: seeeduino.	51
Figura 3-12: módulo rylr998.....	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: escala de calificación de alternativas.	12
Tabla 1-2: grilla de evaluación de criterios.....	13
Tabla 2-1: asignación de pines en esp32 con lora.....	25
Tabla 2-2: asignación de pines en esp32 con xbee.	26
Tabla 2-3: asignación de pines en esp32 con nrf24l01.	26
Tabla 2-4: medición cero lora.....	30
Tabla 2-5: medición cero xbee	31
Tabla 2-6: medición cero nrf24l01.	31
Tabla 3-2: medición a larga distancia xbee.	40
Tabla 3-3: medición a larga distancia nrf24l01.	41
Tabla 3-1: medición a larga distancia lora.....	42
Tabla 3-4: alcance de las tecnologías.	43
Tabla 3-5: consumos de tecnologías.	43
Tabla 3-6: características principales sensor spg30.	49
Tabla 3-7: características principales sensor mp-2.	50
Tabla 3-8: características principales sensor spg30.	50
Tabla 3-9: valor mensual y valor hora para profesionales.	52
Tabla 3-10: costos nacionales.....	54
Tabla 3-11: costos internacionales.....	54
Tabla 3-12: costos de mejoras aplicadas.....	55
Tabla 3-13: resumen de costos totales.	57

Tabla 3-14: resumen total con retrasos estimados.....	57
Tabla 3-15: valores de corriente para cálculos mejorados.	63

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS:

4G	: Cuarta generación de tecnologías de telefonía móvil.
5G	: Quinta generación de tecnologías de telefonía móvil.
ADC	: Analog to digital – conversor análogo-digital.
AES	: Advanced encryption standard – Estandar avanzado de encriptación.
CBC	: Cipher block chaining – Cifrado de bloques.
CE	: Chip enable – Chip activo.
CLP	: Peso Chileno.
CO	: Monóxido de carbono.
CSN	: Chip select not – Seleccionador de chip.
cto	: Abreviación de circuito.
CTR	: Counter mode – Modo contador.
DC	: Direct current – corriente continua.
DI/DO	: Digital Input/Output – Entrada/Salida digital.
GND	: Ground – Conexión a tierra.
GPIO	: General Purpose Input/Output – pin programable como entrada o salida.
LNA	: Amplificador de bajo ruido.
IoT	: Internet of things – Internet de las cosas.
LoRa	: Long Range – Largo alcance.
LPWAN	: Low Power Wide Area Network – tecnología inalámbrica de bajo consumo.
MCU	: Unidad de microcontrolador.
MISO	: Master input slave output – entrada del maestro desde el esclavo.
MOSI	: Master output slave input – salida del maestro hacia el esclavo.
PA	: Amplificador de potencia.
ppm	: Partes por millón.
RX	: Recepción.
SCK	: Serial clock – reloj serial.

SMA	: Sub-miniature version A – conector roscado miniatura versión A.
SPI	: Serial Peripheral Interface – interfaz periférica en serie.
SS/NSS	: Slave select – selección de esclavo.
TX	: Transmisión.
UART	: Universal Asynchronous Receiver-Transmitter - Transmisor-Receptor Asíncrono Universal.
UF	: Unidad de fomento.
UHF	: Ultra high frequency – frecuencia ultra alta.
VCC	: Voltaje de corriente continua.
VHF	: Very high frequency – frecuencia muy alta.
Wi-Fi	: Wireless Fidelity – Fidelidad inalámbrica.

B. SIMBOLOGÍA:

°	: Coordenada geografica, grados.
'	: Coordenada geografica, minutos.
"	: Coordenada geografica, segundos.
μA	: MicroAmper.
°C	: Grados celsius.
Ah	: Amper-hora.
cm	: Centímetro.
dBi	: Decibel isotrópico.
dBm	: Decibelios-milivatios.
GHz	: Gigahercios.
Kbps	: Kilobits por segundo.
Km	: Kilometro.
m	: Metro.
mA	: MiliAmperios.
mAh	: MiliAmperios-hora.
Mbps	: Megabits por segundo.
MHz	: Megahercios.
mW	: MiliWatts.
RSSI	: Indicador de intensidad de la señal recibida.
S	: Coordenada geografica, South – (Del ingles sur).
SNR	: Relación señal-ruido.
v	: Voltaje.
W	: Watts.
W	: Coordenada geografica, West – (Del ingles oeste).
W/m ²	: Watts por metro cuadrado.

INTRODUCCIÓN

En un contexto donde las redes tradicionales (Wi-Fi, 4G y 5G, entre otras) colapsan o simplemente no es posible contar con la cobertura de ellas, es necesario disponer de redes de comunicación de bajo consumo energético, que permitan la transmisión de datos críticos. Se buscará determinar qué tecnología podría ser más eficiente y confiable ante situaciones de emergencia o en entornos remotos, donde no es posible establecer algún tipo de comunicación.

Este trabajo se centra en explorar y evaluar alternativas tecnológicas que puedan proporcionar comunicación eficiente y confiable en escenarios donde las redes convencionales no están disponibles. El objetivo principal es determinar cuál de estas tecnologías es más idónea para establecer sistemas de telemetría capaces de operar de manera autónoma y sostenible, incluso en condiciones adversas.

Para ello, se analizarán tecnologías como LoRa y XBee, ambas reconocidas por su bajo consumo energético y su capacidad para transmitir datos a largas distancias. Además, se diseñará e implementará un sistema prototipo basado en ESP32, equipado con sensores como MQ2, MQ7 y DS18B20, para simular la captura y transmisión de datos en tiempo real. Este sistema será evaluado bajo diferentes escenarios, priorizando la estabilidad de la red, el alcance de comunicación y la eficiencia energética.

El presente estudio busca no solo proporcionar una solución técnica a esta problemática, sino también sentar las bases para el desarrollo de redes alternativas que puedan ser implementadas en el futuro, contribuyendo a la resiliencia y la sostenibilidad de los sistemas de comunicación en entornos críticos.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES

1 ANTECEDENTES GENERALES

En plena era de la transformación digital, el término Internet of Things (IoT) o en español, Internet de las cosas, ha tomado gran posicionamiento, siendo un pilar fundamental para la modernización de diversos sectores y grandes mejoras a nivel global. Chile no es la excepción, el país ha logrado consolidarse como uno de los líderes en la adopción de tecnologías propias de la industria 4.0. Klaus Schwab, fundador del World Economic Forum, define el término de cuarta revolución industrial como una fusión de tecnologías a la vanguardia con sistemas inteligentes, donde el IoT juega un papel crucial, integrando el mundo físico con el digital.

Dicha fusión, permite a los dispositivos capturar datos de un entorno y transmitirlos a otros sistemas conectados a una red, facilitando la toma de decisiones en tiempo real y optimizando los procesos. Sin embargo, ante situaciones complejas, desastres naturales, crisis humanitarias o el simple hecho de fallos en la red de comunicaciones convencionales, se hace evidente la necesidad de soluciones alternativas de un consumo energético reducido, a modo de complementar las existentes.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema es la falta de cobertura de redes tradicionales y su posible colapso, lo cual representa un obstáculo importante para la recolección y transmisión de datos en tiempo real. Esto afecta la capacidad de toma de decisiones y gestión en emergencias.

1.1.1 Definición del problema

A continuación, se presenta un análisis mediante el uso de un diagrama de Ishikawa añadido en Anexo A, permitiendo identificar las causas y consecuencias principales de la falta de comunicación en situaciones críticas. Este enfoque facilita el reconocimiento estructurado de los

factores involucrados, contribuyendo a encontrar soluciones efectivas que minimicen riesgos y garanticen la continuidad del sistema.

- Identificación del problema: Colapso o la no cobertura de redes tradicionales.
- Consecuencia: Pérdida de datos críticos, retrasos en toma de decisiones, fallo en gestión de recursos.
- Causas: Falla o saturación de las redes, limitaciones de infraestructura, falta de tecnologías de respaldo, desastres naturales.

1.1.2 Importancia de resolverlo

En un escenario donde un desastre natural golpea sin previo aviso, toda la infraestructura que brinda soporte a las comunicaciones como antenas, redes móviles, internet, colapsan. En un instante, toda la transmisión de información se detiene, líneas saturadas, personas aisladas o incomunicadas en el peor momento para estarlo. La falta de comunicación efectiva puede llegar a tener consecuencias irremediables o incluso fatales.

Resolver este dilema es crucial para asegurar una comunicación constante y eficiente ante situaciones adversas, sabiendo que las comunicaciones son un pilar fundamental en gestión de emergencias o complementarlas en áreas remotas donde las redes tradicionales no cuentan con la cobertura necesaria. La implementación de un sistema de telemetría de bajo consumo energético independiente permitiría, entre muchas aplicaciones, un monitoreo continuo de variables críticas, continuidad de operaciones de gran valor, en lugares donde la infraestructura tradicional y cobertura no llega, protegiendo así vidas humanas, minimizando daños materiales y recursos naturales invaluable.

Es aquí donde sistemas de telemetría descentralizados se convierten en piezas con gran valor para garantizar una resiliencia en las comunicaciones, redefiniendo la forma en que se está preparado para lo inesperado.

No se trata únicamente de tener una solución de respaldo, sino de contar con un enfoque proactivo para garantizar que, incluso en los momentos más complejos, existe una red capaz de brindar esos datos críticos, facilitando las gestiones y salvaguardando vidas.

1.1.3 Involucrados

Si bien este dilema impacta directamente, y en gran parte a la sociedad, las entidades a continuación debiesen jugar un rol importantísimo. Los principales involucrados son:

- Comunidades locales en áreas remotas: afectados directamente por la falta de cobertura de redes tradicionales.
- Entidades gubernamentales y organizaciones no gubernamentales: Requieren infraestructura alternativa para garantizar la seguridad de zonas vulnerables.
- Investigadores y desarrolladores: Interesados en mejorar las tecnologías de telemetría y comunicaciones.

1.2 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Para resolver el problema de la falta de comunicación en situaciones donde las redes tradicionales no se encuentran disponibles, se proponen varias soluciones basadas en tecnologías de bajo consumo energético y redes de telemetría.

1.2.1 Requerimientos

- Ser capaz de operar con un consumo de energía reducido.
- Ofrecer una cobertura adecuada para entornos rurales y de difícil acceso.
- Ser robusto y confiable en condiciones ambientales adversas.
- Utilizar tecnología capaz de transmitir datos y de un microcontrolador capaz de interpretarlos.

- Contar con protocolos de comunicación eficientes que optimicen la transmisión de datos y minimicen el consumo energético.

1.2.2 Alternativas de solución

Con el propósito de dar una solución a la problemática anteriormente identificada, se han planteado 4 alternativas, cada una de ellas será sometida a rigurosas evaluaciones basadas en criterios técnicos, económicos y de viabilidad. Esta evaluación considerará aspectos clave como la implementación tecnológica, los costos asociados y el impacto en los recursos. El análisis comparativo entre las opciones permitirá determinar cuáles cumplen con los estándares de factibilidad tanto técnica como financiera, con el fin de seleccionar la opción óptima, que maximice los beneficios y minimice los riesgos. De este modo, se garantiza que la alternativa a escoger sea la más eficiente y adecuada, que cumpla con los criterios planteados.

1.2.2.1 Alternativa 1

Como primera alternativa, sería mejorar el sistema ya existente, añadiendo repetidores y más antenas, ampliando así la infraestructura de las redes tradicionales, con el objetivo de mejorar la cobertura en áreas remotas o de difícil acceso. Esta solución podría extender el alcance de las redes existentes y reducir su vulnerabilidad en determinadas áreas geográficas.

Ventajas:

- Mejorar la cobertura en áreas específicas donde se encuentren debilidades.
- La infraestructura que se va a utilizar está basada en tecnologías ya probadas.
- Facilidad para integrar con los sistemas actuales sin necesidad de desarrollar una solución completamente nueva.

Desventajas:

- Se requiere una inversión considerable en infraestructura, puesto que se necesitaría instalar nuevas antenas y repetidores en varias ubicaciones estratégicas.
- Aún con las mejoras instaladas, el sistema podría ser vulnerable a fallos masivos en caso de colapso total de la red.
- Demanda de un consumo energético considerable, ya que cada antena y repetidor requiere de energía para su uso efectivo.
- Es una solución costosa de mantener a largo plazo, especialmente en zonas donde la infraestructura eléctrica es escasa o prácticamente nula.

Conclusión:

Aunque sería un proyecto de gran escala y ambicioso, mejorando la cobertura en varias áreas, no se resuelve del todo el problema de las dependencias de las redes tradicionales. Además, los costos asociados y el alto consumo energético dificultarán que sea sostenible esta solución en el tiempo.

1.2.2.2 Alternativa 2

En esta alternativa se habla de mantener el mismo estado, no se realizará ninguna intervención o alguna mejora en la infraestructura de comunicación actual. La decisión de no tomar cartas en el asunto significa seguir dependiendo de las redes tradicionales, aceptando las limitaciones actuales, asumiendo los riesgos asociados, siendo aún vulnerables a fallos, entre otros.

Ventajas:

- No requiere de capital, ni de inversiones, ni cambios en la infraestructura existente.
- Se mantienen los procesos y sistemas actuales, por ende, no se requiere de capacitaciones adicionales.

Desventajas:

- En caso de desastres naturales o fallas en la red, no hay una segunda alternativa para asegurar la comunicación y transmisión de datos críticos.
- Riesgo de pérdidas económicas y vidas humanas debido a la falta de monitoreo adecuado en zonas rurales.
- Falta de resiliencia en áreas sin cobertura de red o en condiciones adversas.

Conclusión:

Esta alternativa solo mantiene el statu quo, aplica como punto de comparación con las demás alternativas, por lo tanto, no contribuye en mejorar las comunicaciones en situaciones donde las redes colapsan o fallan. Mantener el estado actual puede tener consecuencias graves en términos de seguridad y capacidad de respuesta.

1.2.2.3 Alternativa 3

La tercera alternativa consiste en utilizar la tecnología Sigfox para desarrollar un sistema de telemetría de bajo consumo energético. Sigfox es una red de amplio rango y de bajo consumo energético (LPWAN, por sus siglas en inglés) que se diseñó en especial para la conexión de dispositivos que necesitan la transmisión de pequeñas cantidades de datos y a largas distancias, con un consumo controlado de energía. Al aprovechar la infraestructura global de Sigfox, es posible establecer una solución de telemetría que no dependa de redes tradicionales como internet o telefonía móvil.

Ventajas:

- El consumo energético es extremadamente bajo, los dispositivos conectados a Sigfox pueden funcionar durante años con una única batería debido a su eficiencia energética.

- Posee una cobertura global, en muchas regiones del país, orientada a zonas urbanas y rurales donde las redes comúnmente no llegan, lo que permite transmitir datos a largas distancias sin depender de una infraestructura adicional.
- Simplicidad de implementarla, Sigfox utiliza una red que ya existe, lo que significa que no es necesario de nuevas antenas o repetidores, reduciendo considerablemente los costos de implementarla.
- Es una red escalable y gestionada, al ser una red gestionada por Sigfox, no es necesario preocuparse por un mantenimiento de infraestructura de comunicación, reduciendo con creces la complejidad del sistema.

Desventajas:

- Sigfox cuenta con un costo de suscripción, al ser un servicio operado por un tercero, aumentando los costos a largo plazo.
- Red limitada en volumen de datos, Sigfox está pensada para el envío de pequeños paquetes de datos (solo hasta 12 bytes por mensajes) limitando la información que puede ser enviada.
- Dependencia de la cobertura de Sigfox, aunque las coberturas de Sigfox son bastante prometedoras, no cubre el 100% del territorio, generando nuevamente una dependencia de la cobertura.

Conclusión:

Sigfox representa una alternativa muy atractiva, pero sus limitaciones y su suscripción hacen que la solución no sea la más adecuada.

1.2.2.4 Alternativa 4

Esta alternativa consiste en diseñar e implementar un sistema de telemetría de bajo consumo energético utilizando módulos adecuados para la transmisión de datos (figura 1-1), asumiendo la integración de estos datos mediante un controlador, permitiendo establecer una

comunicación independiente de las redes tradicionales. Este sistema será capaz de transmitir datos a largas distancias con un consumo mínimo de energía, garantizando la comunicación en entornos sin cobertura o durante fallos de la red.



Fuente: Elaboración propia basada en las necesidades del sistema.

Figura 1-1: Esquema de solución.

Ventajas:

- Bajo consumo energético, si establecemos una red basada en tecnología LoRa, diseñada para optimizar el uso de energía, permitiendo que los dispositivos operen durante largos periodos.
- Gran alcance de cobertura al trabajar con módulos LoRa, esto lo hace perfecto para cubrir zonas rurales o de difícil acceso.
- Independencia de las redes tradicionales, al trabajar con LoRa, la transmisión de los datos no depende de internet ni de redes móviles, garantizando la operación en situaciones complejas.
- El sistema puede ampliarse fácilmente añadiendo más dispositivos o nodos a la red, permitiendo adaptarlo a cada necesidad.
- Los costos son relativamente bajos en comparación con otras tecnologías, tanto LoRa como un microcontrolador ESP32 son soluciones económicas, reduciendo los costos de implementación.

Desventajas:

- Limitaciones en el ancho de banda, aunque LoRa es eficiente en la transmisión de datos pequeños, no es adecuado para grandes volúmenes de datos o de transmisión en tiempo real con alta resolución.
- Requiere un desarrollo personalizado, la implementación de este sistema requiere del desarrollo de protocolos personalizados, configurar adecuadamente los dispositivos, implicando tiempo y conocimiento técnico.
- Posibilidad de interferencia en áreas congestionadas, en zonas con demasiadas redes de comunicación, existe la posibilidad de que haya interferencias que afecten la calidad de la señal.

Conclusión:

Esta solución es eficiente y de bajo consumo energético para establecer la comunicación en entornos donde las redes tradicionales no están disponibles. Su capacidad de operar de manera autónoma, a largo plazo se convierte en una opción sólida y viable para el monitoreo en áreas remotas.

1.2.3 Evaluación de las alternativas

A continuación, se realizará un análisis comparativo (tabla 1-2) de las alternativas presentadas como solución, donde se utilizarán criterios que permitan evaluar su viabilidad. Cada criterio se evaluará en una escala del uno (1) a cinco (5), donde uno representa “Muy deficiente” y cinco representa “óptimo”. Este proceso se detalla a continuación en la tabla 1-1, que muestra la escala de calificación a utilizar. La ponderación de los puntajes otorgados en cada criterio proporcionará un puntaje total para cada alternativa presentada, siendo seleccionada para su implementación la opción con mayor puntaje.

Tabla 1-1: Escala de calificación de alternativas.

Muy deficiente	Deficiente	Aceptable	Bueno	Óptimo
1	2	3	4	5

Fuente: Elaboración propia basada en escala de evaluación.

Se han identificado cinco criterios clave para guiar la toma de decisiones:

- **Innovación:** Evalúa el grado de aportación de nuevas ideas, tecnologías y enfoques que introduce cada alternativa.
- **Relación costo-beneficio:** Analiza el balance entre la inversión necesaria para implementar la solución y el retorno esperado en términos de beneficios económicos o funcionales.
- **Factibilidad técnica:** Considera la complejidad técnica del desarrollo requerido para implementar cada alternativa, asignando mayor puntuación a aquellas soluciones que presenten menor dificultad en términos de ejecución técnica.
- **Tiempo de implementación:** Estima el plazo necesario para poner en marcha la solución, donde se otorga mayor ponderación a la que logre implementarse en el menor tiempo posible.
- **Escalabilidad:** Mide el potencial de crecimiento y expansión de la solución, así como su aplicabilidad en diferentes áreas o sectores.

Tabla 1-2: Grilla de evaluación de criterios.

		20%	30%	15%	25%	10%	
CRITERIOS ALTERNATIVAS	INNOVACIÓN	COSTO-BENEFICIO	FACTIBILIDAD TÉCNICA	TIEMPO DE IMPLEMENTACIÓN	ESCALABILIDAD	PONDERACIÓN FINAL	
	ALTERNATIVA 1	2	1	2	3	4	2,15
	ALTERNATIVA 2	1	1	5	5	1	2,6
	ALTERNATIVA 3	2	3	2	2	5	2,6
	ALTERNATIVA 4	5	5	4	4	5	4,6

Fuente: Elaboración propia basada en comparación de opciones presentadas.

1.2.4 Alternativa seleccionada

Tras realizar la evaluación de las distintas opciones en la tabla 1-2, para abordar la problemática presentada, se ha optado por escoger la opción número cuatro (4), sistema de telemetría de bajo consumo energético. Este enfoque fue seleccionado por su capacidad para proporcionar conectividad y transmisión de datos en áreas remotas, donde las redes como 4G, 5G, Wi-Fi suelen fallar o colapsar.

1.3 **OBJETIVOS DEL PROYECTO**

Los objetivos del proyecto definen el rumbo y los alcances que se pretenden lograr, permitiendo estructurar el desarrollo de manera coherente y orientada hacia resultados concretos. El objetivo general establece la finalidad principal del sistema, mientras que los objetivos específicos detallan las acciones requeridas para alcanzar dicha meta. Estos objetivos proporcionan un marco claro para guiar el proceso de diseño, implementación, comparación y optimización del sistema propuesto.

1.3.1 **Objetivo general**

Desarrollar un sistema de telemetría de bajo consumo energético utilizando tecnologías alternativas.

1.3.2 **Objetivos específicos**

- Obtener y analizar resultados experimentales del sistema de telemetría desarrollado.
- Analizar y comparar tecnologías en términos de consumo energético y alcance de comunicación, garantizando su adecuado funcionamiento.
- Implementar prototipos funcionales del sistema de telemetría, asegurando su operatividad en entornos reales (zonas urbanas y/o rurales).
- Evaluar el rendimiento de las tecnologías empleadas mediante la medición de su consumo energético.
- Proponer mejoras continuas para optimizar el consumo energético, el alcance y la estabilidad de la comunicación en el sistema.

CAPÍTULO 2: DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

2.2 SOLUCIÓN POR IMPLEMENTAR

En este apartado, se describe la solución propuesta en el capítulo 1: sistema de telemetría de bajo consumo energético. Se evaluarán y compararán tecnologías y configuraciones para identificar la alternativa más eficiente en términos de cobertura y consumo energético. Esta comparación incluirá aspectos claves como el alcance y consumo de los dispositivos.

Con base en los resultados, se seleccionará la configuración óptima para garantizar una transmisión confiable de datos. Este enfoque garantizará que la solución propuesta cumpla con los requisitos establecidos para una telemetría de bajo consumo en entornos con limitaciones de cobertura.

2.3 DISPOSITIVOS

A continuación, se definen los dispositivos requeridos para implementar el sistema de telemetría de bajo consumo energético.

2.3.1 Microcontrolador

Una unidad de microcontrolador (MCU), esencialmente es una computadora pequeña en un solo chip. Está diseñado para administrar tareas específicas dentro de un sistema integrado sin requerir un sistema operativo complejo. Se utilizará el siguiente modelo.

2.3.1.1 Esp32

ESP32-WROOM-32 figura 2-2, es un potente módulo MCU Wi-Fi genérico que tiene un gran conjunto de periféricos. Es una opción ideal para una amplia variedad de escenarios de aplicaciones relacionados con Internet de cosas (IoT), como sistemas integrados, hogares inteligentes, electrónica portátil, etc.

Características:

- Voltaje de alimentación: 5 [V] DC.
- Voltaje de entradas/salidas: 3,3 [V] DC.
- 25 pines digitales (GPIO 34, 35, 36 y 39 solo como entrada).
- 15 pines analógicos (3,3 [V], 12 bit de resolución).



Fuente: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf

Figura 2-2: ESP32 MCU.

2.3.2 Dispositivos de comunicación

Los dispositivos de comunicación son piezas de hardware o en algunos casos de software, que permiten enviar, recibir o transmitir información. A continuación, se mencionarán los módulos que se utilizarán, logrando establecer una comparación entre tecnologías.

2.3.2.1 Módulo LoRa sx1278

Los transceptores SX1278 figura 2-3, cuentan con el módem de largo alcance LoRa™ que proporciona una comunicación de espectro de rango ultra-largo y una alta inmunidad a la interferencia, al tiempo que minimiza el consumo de corriente.

Características:

- Voltaje de alimentación: 3,3 [V] DC.
- Frecuencia de trabajo: 433 [MHz] (banda libre, no requiere licencia para transmitir).
- Interfaz de comunicación: SPI (Half duplex).
- Sensibilidad: hasta -141 [dBm].



Fuente: https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3179/sx1276_77_78_79.pdf

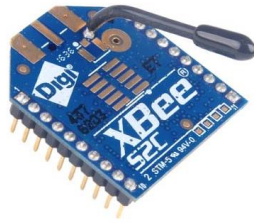
Figura 2-3: Módulo LoRa sx1278.

2.3.2.2 Módulo Xbee S2C

Xbee S2C figura 2-4, es un módulo de bajo costo que permite realizar conexiones inalámbricas entre dispositivos electrónicos. Trabaja a una frecuencia de 2.4 [GHz].

Características:

- Voltaje de alimentación: 2,7 a 3,6 [V] DC.
- Frecuencia de trabajo: 2,4 [GHz].
- Interfaz de comunicación: UART.
- Sensibilidad: -101 [dBm].
- Distancia operativa según fabricante: entre 60 a 1200 [m].



Fuente: <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90002002.pdf>

Figura 2-4: Módulo Xbee S2C.

2.3.2.3 Módulo NRF24L01 + PA + LNA

Transceptor inalámbrico de bajo consumo NRF24L01 figura 2-5, con preamplificador y filtro de bajo ruido (2,4 [GHz]) con antena externa de 2 [dBi].

Características:

- Voltaje de alimentación: 1,9 a 3,6 [v] DC.
- Frecuencia de trabajo: 2,4 [GHz].
- Interfaz de comunicación: SPI.
- Sensibilidad: -82 [dBm] a 2 [Mbps] / -94 [dBm] a 250 [Kbps].
- Distancia operativa según fabricante: hasta 1100 [m].



Fuente: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Plus Preliminary Product Specification v1.0.pdf>

Figura 2-5: Módulo nrf24l01 + pa + lna.

2.3.3 Antena

Una antena es un dispositivo que emite o recibe ondas electromagnéticas, y que se utiliza en telecomunicaciones para permitir la conexión sin cables entre dispositivos a distancia. A continuación, se mencionará la antena a utilizar.

2.3.3.1 Antena diamond SRH805S

Antena de doble banda VHF/UHF representada en figura 2-6.

Características:

- Ganancia : 3.0 [dBi].
- Potencia máxima: 10 [W].
- Frecuencia: 144 / 430 / 1200 [MHz].
- Largo : 5 [cm].
- Conector: SMA Male.



Fuente: <https://www.diamondantenna.net/srh805.html>

Figura 2-6: Antena diamond.

2.3.4 Sensores

Dispositivo que detecta y responde a cambios en el entorno físico, transformando una magnitud física en una señal eléctrica u óptica. Los sensores se pueden clasificar según las características que detectan. A continuación, se mencionarán los sensores a utilizar.

2.3.4.1 Mq2

Este es un sensor de detección de gas natural, sencillo de usar, con una alta sensibilidad y rápida respuesta en tiempo, caracterizándose por sus dimensiones tan prácticas. El MQ-2 figura 2-7 es normalmente usado para la detección de concentraciones de gas natural de 300 ppm a 10.000 ppm, según su hoja característica.

Características:

- Voltaje: 5 [V] DC.
- Corriente: 160 [mA].
- Potencia de consumo: 800 [mW].
- Posee una salida análoga.
- Detección de partes por millón 300ppm~10.000ppm: Gas combustible.
- Gas, butano, propano, metano, alcohol, hidrógeno y humo.



Fuente: <https://www.mouser.com/datasheet/2/321/605-00008-MQ-2-Datasheet-370464.pdf>

Figura 2-7: Sensor MQ2.

2.3.4.2 Mq7

Este es un sensor fácil de usar para detección de Monóxido de Carbono (CO), ideal para detectar concentraciones de CO en el aire. El MQ-7 figura 2-8, puede detectar concentraciones en el rango de 20 a 2.000 ppm, según su hoja características.

Características

- Voltaje: 5 [V] DC.
- Corriente: 140 [mA].
- Potencia de consumo: 700 [mW].
- Posee una salida análoga.
- Detección de partes por millón 100ppm~300ppm: monóxido de carbono. Después de 48 horas energizado cambia la curva de detección entre 20ppm~2.000ppm de monóxido de carbono.
- Monóxido de carbono, hidrógeno, gas, metano, alcohol y aire.



Fuente: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-7.pdf>

Figura 2-8: Sensor MQ7.

2.3.4.3 DS18B20

El DS18B20 figura 2-9, es un sensor de temperatura fabricado por Dallas Semiconductor (adquirido por Maxim Integrated). Debido a que es un dispositivo de un cable, solo necesita un pin digital para comunicarse con el microcontrolador. El sensor está típicamente disponible en dos factores de forma. Uno viene en un paquete TO-92, que se asemeja a un simple transistor. El otro viene en forma de una sonda impermeable, que es más útil cuando se mide algo lejos, bajo el agua o debajo del suelo.

Características

- Voltaje: 3 a 5 [V] DC.
- Rango de temperatura: -50 a 125 [°C].
- Resolución entre 9 y 12 bits (seleccionable).



Fuente: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temp/DS18B20.pdf>

Figura 2-9: Sensor DS18B20.

2.4 CONEXIONADO

En esta sección, se detallará la configuración inicial del ESP32, abarcando el esquema de conexionado eléctrico y la configuración de pines necesarios para su correcto funcionamiento.

2.4.1 Asignación y definición de pines

En el siguiente apartado se asignarán y definirán los pines a utilizar en los microcontroladores, resumido en tablas 2-1, 2-2 y 2-3.

2.4.1.1 Asignación de pines en microcontrolador con módulo LoRa

Asignación de pines para los módulos, tanto emisor como receptor en tabla 2-1.

Tabla 2-1: Asignación de pines en ESP32 con LoRa.

N°	PIN ESP32	Función	Definición
1	VCC	VCC	Terminal de alimentación positiva.
2	GND	GND	Terminal de conexión a tierra.
3	GPIO 5	SS / NSS	Habilita la comunicación con un esclavo específico.
4	GPIO 12	DO	Conectado un led de identificación de señal.
6	GPIO 18	SCK	Proporciona la señal de reloj generada por el maestro (ESP32) para sincronizar la transferencia de datos entre los dispositivos.
7	GPIO 19	MISO	Recibe datos del esclavo hacia el maestro (ESP32).
5	GPIO 21	RESET	Conectado al reset del dispositivo LoRa.
8	GPIO 22	DIO	Conectado al pin digital DIO0 del dispositivo LoRa.
9	GPIO 23	MOSI	Envía datos del maestro (ESP32) al esclavo (como el módulo LoRa).
10	GPIO 32	ADC1	Configurado como entrada análoga (lectura análoga DS18B20).
11	GPIO 34	ADC1	Configurado como entrada análoga (lectura análoga MQ2).
12	GPIO 35	ADC1	Configurado como entrada análoga (lectura análoga MQ7).

Fuente: Según requerimientos de asignación.

2.4.1.2 Asignación de pines en microcontrolador con módulo Xbee

Asignación de pines para los módulos, tanto emisor como receptor en tabla 2-2.

Tabla 2-2: Asignación de pines en ESP32 con XBee.

N°	PIN ESP32	Función	Definición
1	VCC	VCC	Terminal de alimentación positiva.
2	GND	GND	Terminal de conexión a tierra.
3	GPIO 1	TX	Pin de transmisión de datos (conectado a Xbee RX).
4	GPIO 3	RX	Pin de recepción de datos (conectado a Xbee TX).
5	GPIO 12	DO	Conectado un led de identificación de señal.
6	GPIO 32	ADC1	Configurado como entrada análoga (lectura análoga DS18B20).
7	GPIO 34	ADC1	Configurado como entrada análoga (lectura análoga MQ2).
8	GPIO 35	ADC1	Configurado como entrada análoga (lectura análoga MQ7).

Fuente: Según requerimientos de asignación.

2.4.1.3 Asignación de pines en microcontrolador con módulo NRF24L01

Asignación de pines para los módulos , tanto emisor como receptor en tabla 2-3.

Tabla 2-3: Asignación de pines en ESP32 con NRF24L01.

N°	PIN ESP32	Función	Definición
1	VCC	VCC	Terminal de alimentación positiva
2	GND	GND	Terminal de conexión a tierra
3	GPIO 2	DO	Conectado un led de alerta.
4	GPIO 12	DO	Conectado un led de identificación de señal.
5	GPIO 18	SCK	Proporciona la señal de reloj generada por el maestro (ESP32) para sincronizar la transferencia de datos entre los dispositivos.
6	GPIO 19	MISO	Recibe datos del esclavo hacia el maestro (ESP32).
7	GPIO 21	CSN	Pin activo-bajo, cuando este pin baja, el nrf comienza a escuchar los datos en su puerto SPI.
8	GPIO 22	CE	Pin activo-alto, cuando se habilita el nrf transmite o recibe.
9	GPIO 23	MOSI	Envía datos del maestro (ESP32) al esclavo (como el módulo LoRa).
10	GPIO 32	ADC1	Configurado como entrada análoga (lectura análoga DS18B20).
11	GPIO 34	ADC1	Configurado como entrada análoga (lectura análoga MQ2).
12	GPIO 35	ADC1	Configurado como entrada análoga (lectura análoga MQ7).

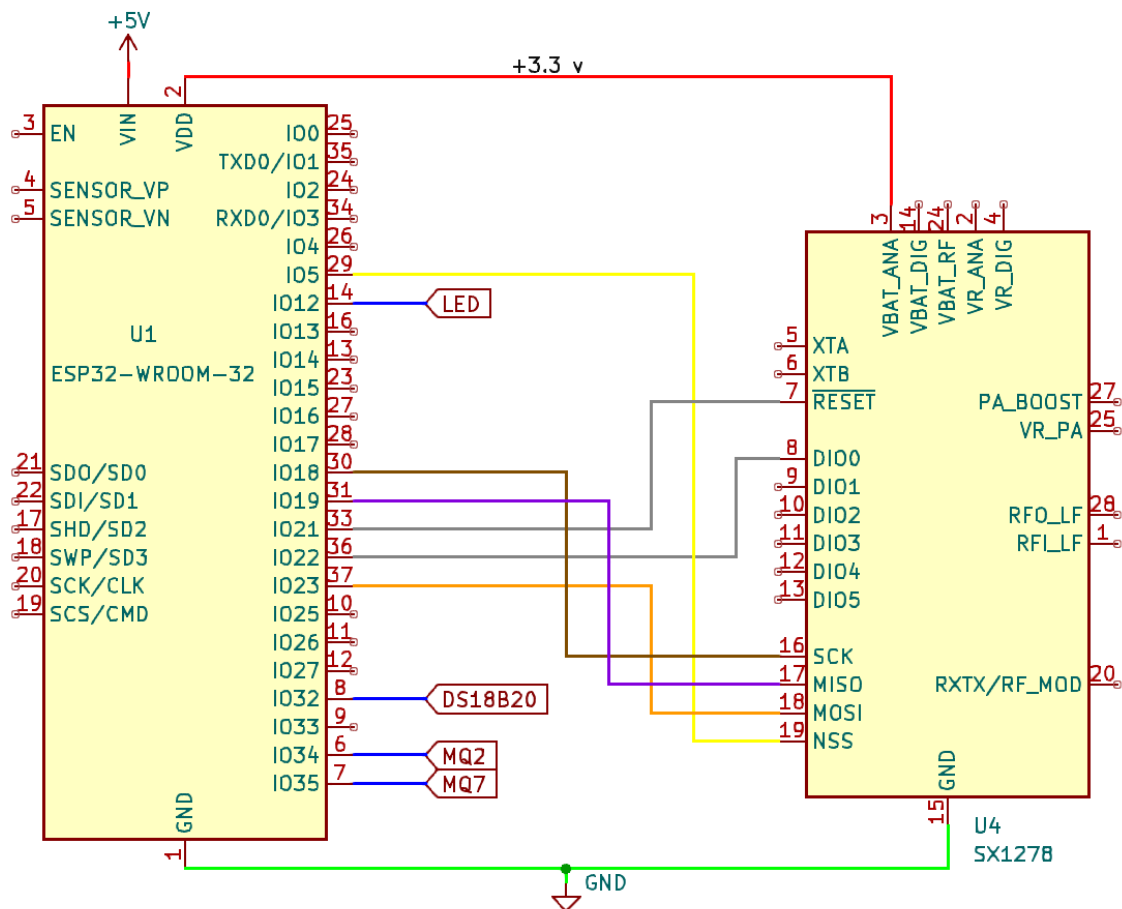
Fuente: Según requerimientos de asignación.

2.4.2 Diagrama de conexionado

Representación gráfica que muestra cómo se interconectan los distintos componentes de un sistema electrónico o eléctrico. Estos diagramas son esenciales para comprender la disposición de los dispositivos, facilitar la instalación y asegurar un correcto funcionamiento del sistema.

2.4.2.1 Esp32 con módulo LoRa

Conexión representativa figura 2-10, para dispositivo emisor, entre ESP32 y módulo LoRa sx1278. Para el dispositivo receptor no se cuenta con los sensores conectados y se añade un led emisor de luz como identificación de señal. En anexo O diagrama completo.

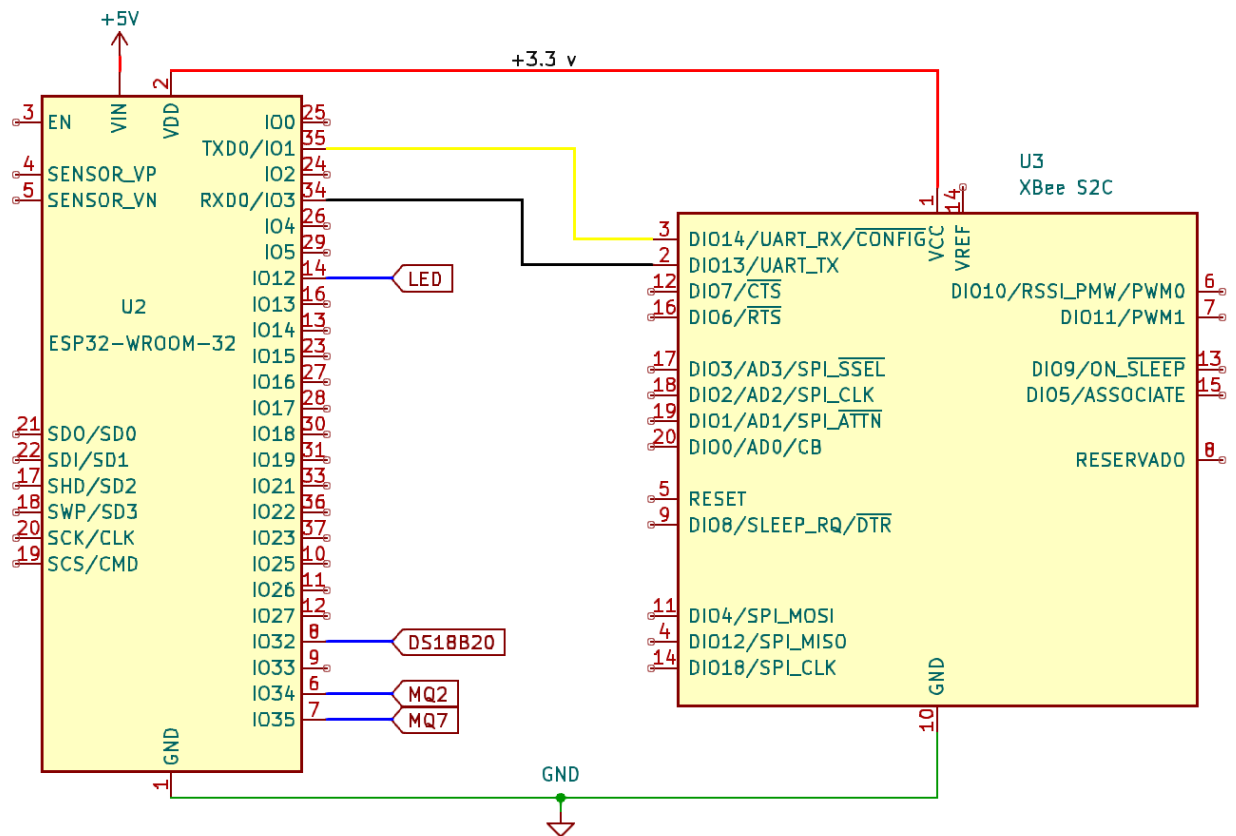


Fuente: Elaboración propia con software KiCad.

Figura 2-10: Conexionado emisor del ESP32 con su módulo LoRa.

2.4.2.2 Esp32 con módulo Xbee

Conexión representativa figura 2-11, para dispositivo emisor, entre ESP32 y módulo XBee. Dispositivo receptor no se cuenta con los sensores conectados y se añade un led emisor de luz como identificación de señal.

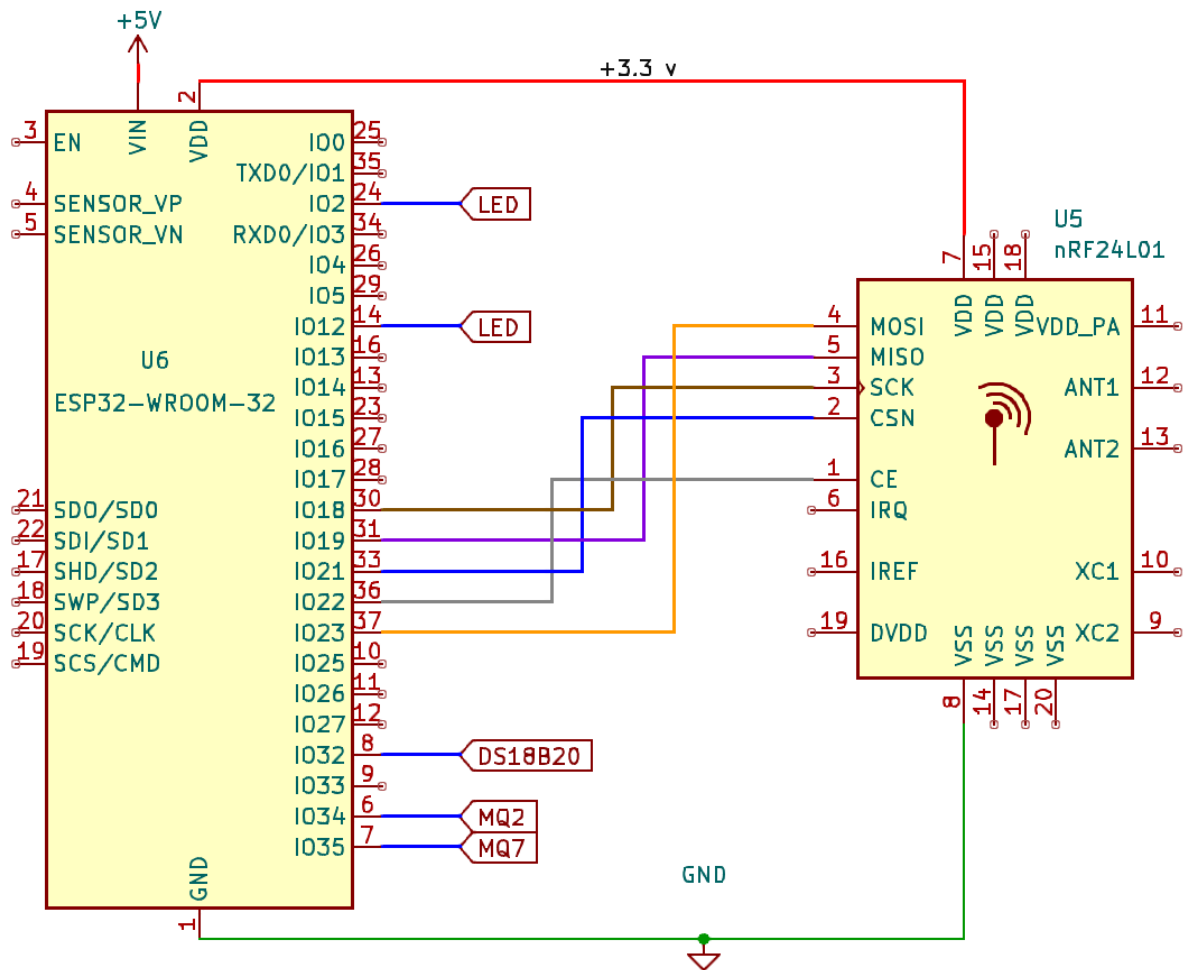


Fuente: Elaboración propia con software KiCad.

Figura 2-11: Conexionado emisor del ESP32 con su módulo Xbee S2C.

2.4.2.3 Esp32 con módulo nrf24l01

Conexión representativa figura 2-12, para dispositivo emisor, entre ESP32 y módulo NRF24L01. Dispositivo receptor no cuenta con los sensores conectados y se añade un led emisor de luz como identificación de señal y de alerta.



Fuente: Elaboración propia con software KiCad.

Figura 2-12: Conexión emisor del ESP32 con su módulo NRF24L01.

2.4.3 Medición de corriente

Para lograr establecer patrones, es necesario llevar mediciones, la más crucial para efectos prácticos y teóricos, sería la corriente, para ello se utilizará un multímetro Mastech MY60, que llevará a cabo todas las mediciones necesarias para satisfacer cálculos pertinentes.

2.4.4 Mediciones previas

Se realizaron pruebas previas para asegurar el correcto funcionamiento de las tres tecnologías a comparar.

2.4.4.1 LoRa

En este caso, como se menciona en el punto anterior, las pruebas realizadas desde un punto cero, midiendo la corriente máxima alcanzada por cada ciclo de medición de los sensores, obteniendo los siguientes resultados presentados en tabla 2-4 (En anexo B se añade la muestra completa).

Tabla 2-4: Medición cero LoRa.

	Corriente máxima	Corriente LoRa	Potencia cto. [W]	RSSI	SNR
Promedio	330,19 [mA]	27,72 [mA]	1,65	-8,83	9,33

Rango de potencia LoRa	49,5 [mW] a 193,38 [mW]
-----------------------------------	-----------------------------------

Fuente: Elaboración propia.

2.4.4.2 Xbee

Para estos módulos se obtuvo sus mediciones del mismo punto cero y en las mismas circunstancias, obteniendo el siguiente resultado promediado en tabla 2-5 (anexo C se añade la muestra completa).

Tabla 2-5: Medición cero Xbee

	Corriente máxima	Corriente Xbee	Potencia [W]
Promedio	356 [mA]	46 [mA]	1,78

Rango de potencia Xbee 132 [mW] a 198 [mW]

Fuente: Elaboración propia.

2.4.4.3 Nrf24l01

Para esta última tecnología en comparación y así mismo como las dos anteriores, bajo las mismas características se realizaron pruebas para obtener el siguiente promedio en la tabla 2-6 (En anexo D se añade la muestra completa).

Tabla 2-6: Medición cero NRF24L01.

	Corriente máxima	Potencia NRF24L01	Potencia cto. [W]
Promedio	336 [mA]	26,00 [mA]	1,68

Rango de potencia Nrf24l01 33 [mW] a 99 [mW]

Fuente: Elaboración propia.

2.5 FUNCIONAMIENTO

Para garantizar la correcta comprensión del funcionamiento, se presentará un diagrama de flujo, herramienta visual, que utiliza símbolos estandarizados para representar las distintas etapas, decisiones y los procesos involucrados en el sistema. Este diagrama no solo sirve como guía para entender como los dispositivos interactúan entre sí, sino, destacar los procesos esenciales, que son cruciales para el correcto funcionamiento.

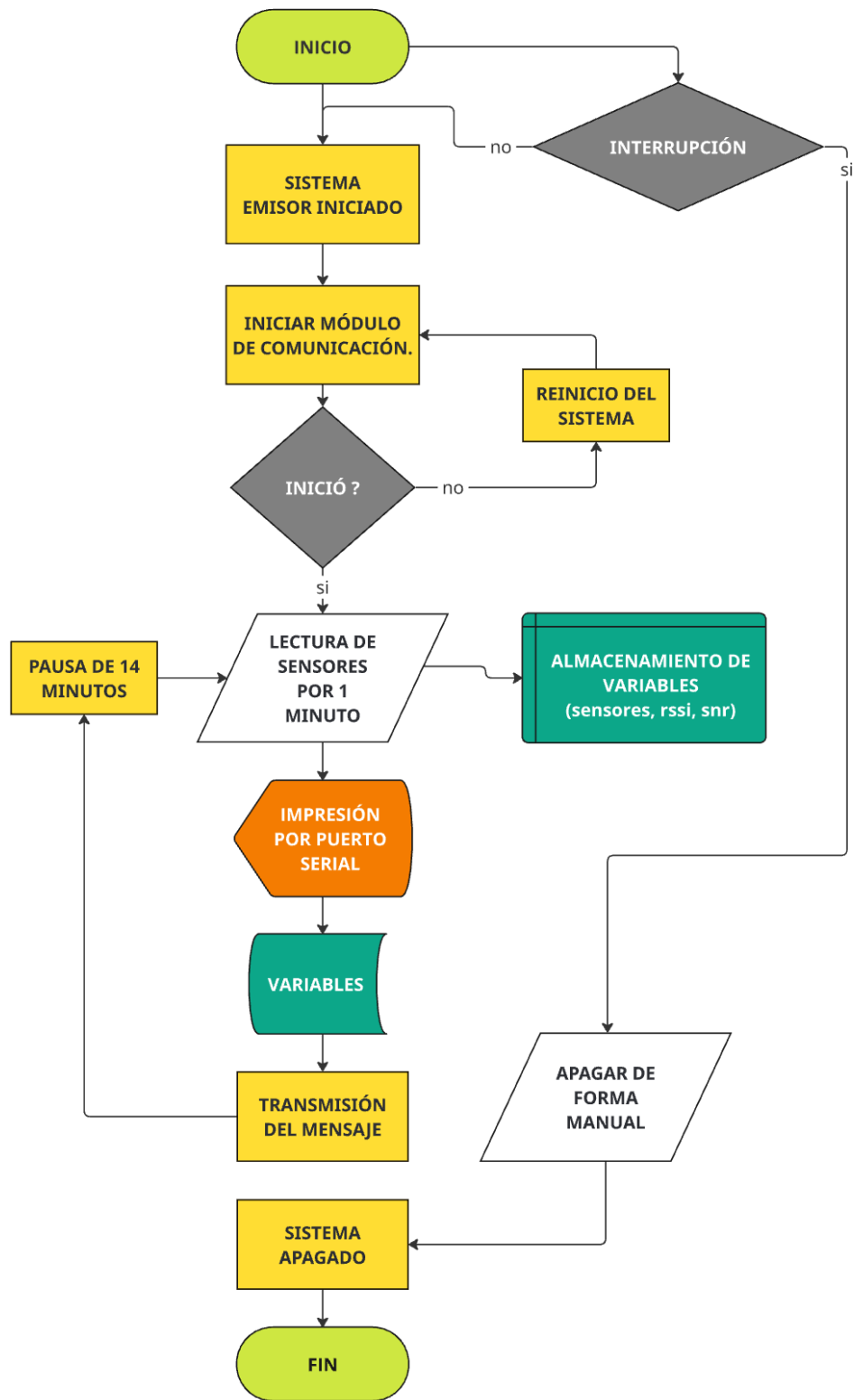
En el área de la programación, este recurso es crucial para comprender de manera clara la estructura lógica detrás del código, ayudando a su diseño y a la comprensión de éste.

2.5.1 Diagramas de flujo

A continuación, se presentarán dos diagramas de flujo representativos a la idea de funcionamiento del sistema por implementar, se detalla el concepto por separado, tanto para emisor y receptor.

2.5.1.1 Emisor

Cómo se observa en la figura 2-13, el sistema inicia energizando el controlador y los sensores, seguido de la inicialización de los módulos de comunicación. Una vez preparados, procede a realizar la lectura de los sensores, almacena los datos obtenidos y los transmite al receptor encargado de analizar los valores analógicos registrados. Tras completar la transmisión, el sistema entra en un período de espera por un tiempo “n” (definido como el intervalo entre mediciones) antes de repetir el proceso de lectura y transmisión. Este ciclo se mantiene en funcionamiento continuo hasta que el sistema sea apagado manualmente.

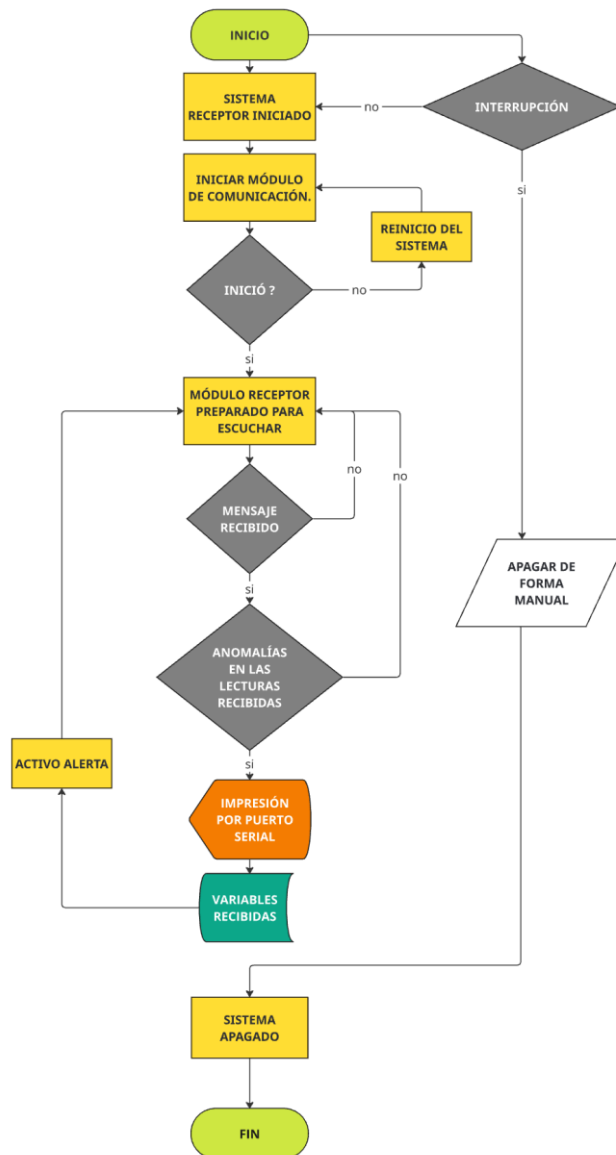


Fuente: Elaboración propia vía online.

Figura 2-13: Diagrama de flujo emisor.

2.5.1.2 Receptor

Como se muestra en la figura 2-14 y de manera similar al emisor, el sistema comienza energizando el controlador y luego inicializa el módulo de comunicación. Una vez listo, entra en modo de escucha para recibir mensajes. Si se detecta un mensaje, éste es analizado y, en función de rangos predefinidos, decide si debe activar una alarma por “x” tiempo, o, este ciclo se mantiene en funcionamiento continuo hasta que el sistema sea apagado manualmente.



Fuente: Elaboración propia vía online.

Figura 2-14: Diagrama de flujo receptor.

2.5.2 Código de programación

Toda codificación aplicada en este proyecto, será añadida desde anexo H hasta anexo M.

2.6 SOFTWARE DE PROGRAMACIÓN

Para realizar las configuraciones del microcontrolador, es necesario contar con el programa Arduino IDE, logo en la figura 2-15, utilizado para escribir y cargar el programa en la placa seleccionada (punto [2.3.1](#)).



Fuente: <https://www.arduino.cc/>

Figura 2-15: Logo Arduino IDE.

2.7 MONITOREO DE TELEMETRÍA

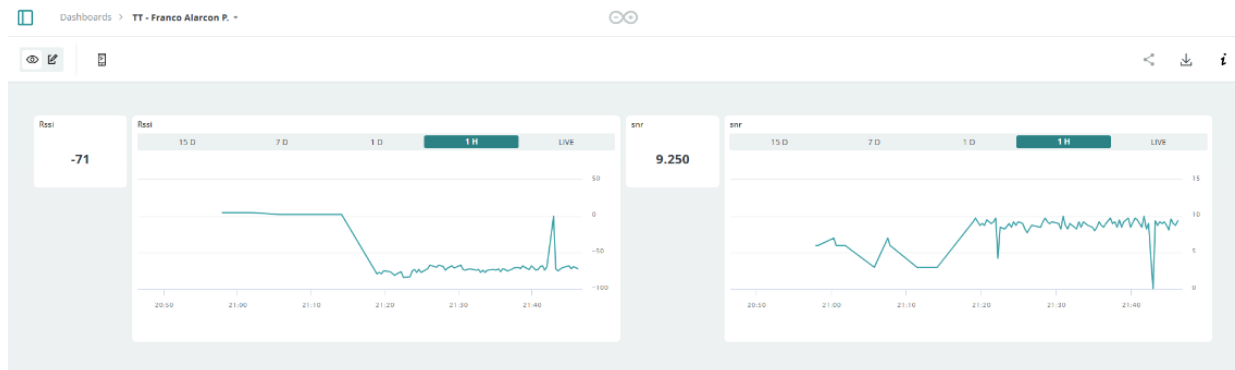
Para visualizar un sistema de telemetría es vital poder acceder a los datos sin necesidad de estar presente y observarlos. Es por esto que se optará por realizar el seguimiento a través de otra aplicación, Arduino Cloud, logo en la figura 2-16, Cloud es una plataforma de aplicación de Internet of Things fácil de usar. Hace que sea muy sencillo para cualquiera desarrollar y gestionar aplicaciones de IoT.



Fuente: <https://cloud.arduino.cc/>

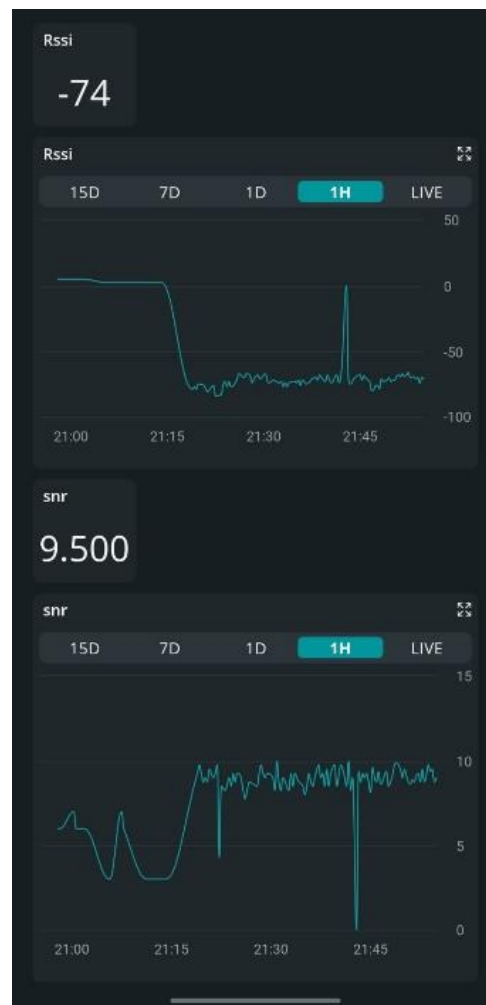
Figura 2-16: Logo Arduino cloud.

Una vez cargado el programa y habilitado para utilizar la plataforma, es necesario desarrollar un dashboard como la figura 2-17, así se logra apreciar la telemetría desde cualquier punto, inclusive desde un teléfono móvil figura 2-18. Cabe señalar que en caso de una catástrofe a una escala mayor, debido a que dependemos de internet, no sería capaz de ser visualizadas las variables pertinentes, el sistema seguirá funcionando, junto con sus alertas pertinentes.



Fuente: Elaboración propia vía online con Arduino cloud.

Figura 2-17: Dashboard online vía computador.



Fuente: Elaboración propia vía online con Arduino cloud.

Figura 2-18: Dashboard online vía teléfono móvil.

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE RESULTADO

3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presentan los análisis comparativos necesarios entre las tecnologías implementadas en el proyecto, para determinar cuál es la tecnología más adecuada para la materialización final del sistema. También se incluye la evaluación económica relacionados con la compra de los dispositivos, materiales electrónicos y del personal requerido para una puesta en marcha y posterior continuidad del proyecto.

3.1 PRUEBAS DE RENDIMIENTO

En este apartado, se presentarán las pruebas de rendimiento del sistema, específicamente centradas en la medición de la corriente. Todas las pruebas, se desarrollaron bajo criterios similares, para mantener lo más parejo los resultados entre tecnologías.

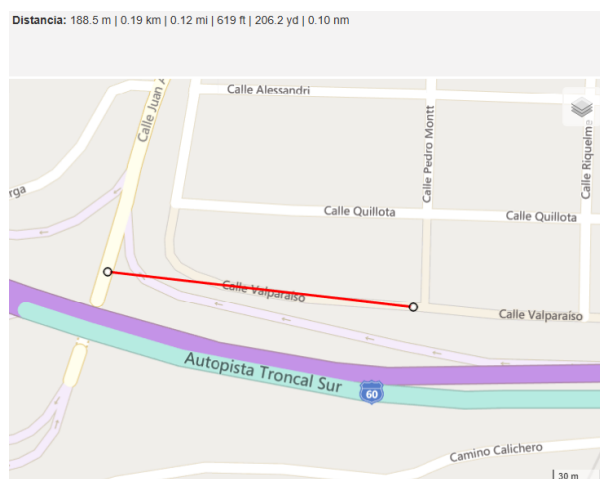
3.1.1 Puntos geográficos y muestras

A continuación, se presentan los puntos donde se realizaron las pruebas con sus figuras pertinentes, su georreferenciación y tabla representativa al promedio de las muestras.

3.1.1.1 Xbee

Figura 3-2, presenta la distancia máxima obtenida en las pruebas, se mencionan los puntos geográficos y alcance máximo logrado en pruebas.

- 33°03'46.0"S 71°27'04.1"W
- 33°3'45.414"S 71°27'10.965"W
- Distancia: 0.19 [Km].



Fuente: <https://www.calcmaps.com/es/map-distance/spsaxf/>

Figura 3-2: Pruebas Xbee larga distancia.

La muestra completa se encuentra en anexo E. A continuación, en tabla 3-2 el promedio efectivo de la muestra.

Tabla 3-2: Medición a larga distancia Xbee.

	Corriente máxima	Corriente Xbee	Potencia [W]
Promedio	356,67 [mA]	46,67 [mA]	1,78

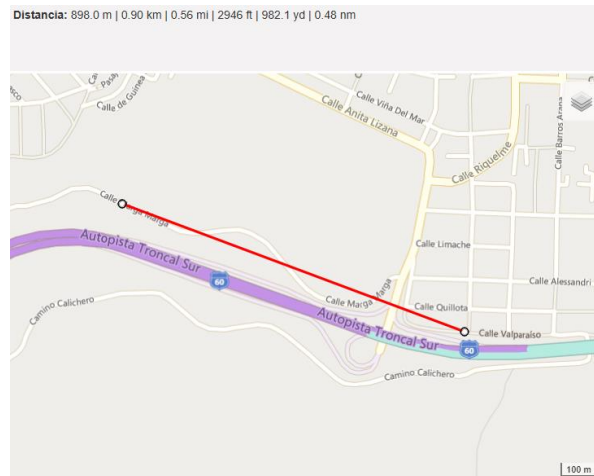
Rango de potencia Xbee	132 [mW] a 198 [mW]
------------------------	-------------------------

Fuente: Elaboración propia.

3.1.1.2 Nrf24l01

La figura 3-3, presenta la distancia máxima obtenida en las pruebas, se mencionan los puntos geográficos y alcance máximo logrado en pruebas.

- 33°03'46.0"S 71°27'04.1"W
- 33°3'35.730"S 71°27'36.541"W
- Distancia: 0.9 [Km].



Fuente: <https://www.calcmaps.com/es/map-distance/spsbjb/>

Figura 3-3: Pruebas NRF24L01 larga distancia.

La muestra completa se encuentra en anexo F. A continuación, en tabla 3-3 el promedio efectivo de la muestra.

Tabla 3-3: Medición a larga distancia NRF24L01.

	Corriente máxima	Potencia NRF24L01	Potencia cto. [W]
Promedio	399,33 [mA]	89,33 [mA]	2,00

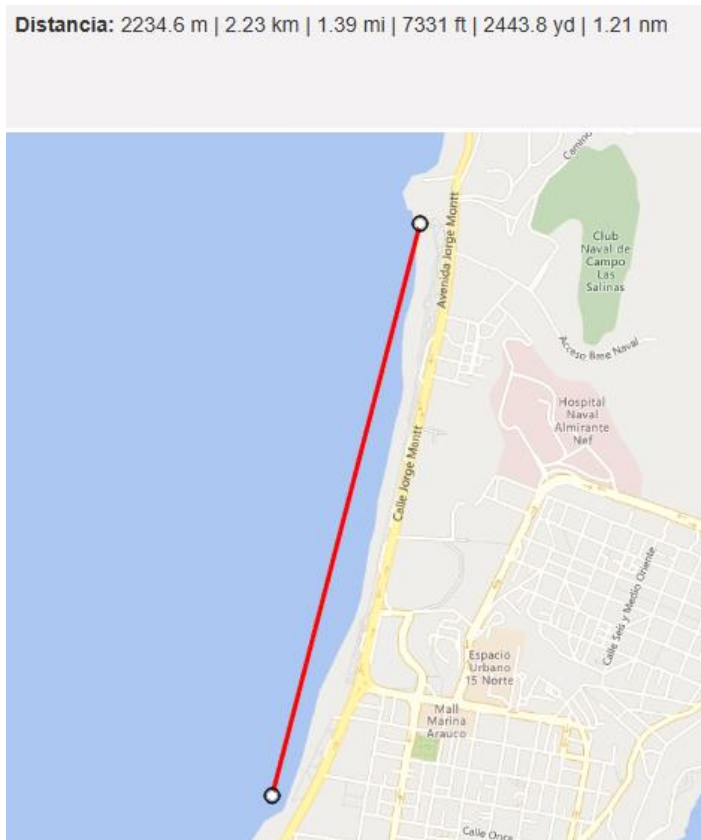
Rango de potencia Nrf24l01	231 [mW]	a 330 [mW]
-------------------------------	------------	--------------

Fuente: Elaboración propia.

3.1.1.3 LoRa

Figura 3-1, presenta la distancia máxima obtenida en las pruebas, se mencionan los puntos geográficos y alcance máximo logrado en pruebas.

- 33°00'41.0"S 71°33'16.3"W
- 32°59'31.4"S 71°32'53.4"W
- Distancia: 2,23 [Km].



Fuente: <https://www.calcmaps.com/es/map-distance/ssa6k0/>

Figura 3-1: Pruebas LoRa larga distancia.

La muestra completa se encuentra en anexo G. A continuación, en tabla 3-1 el promedio efectivo de la muestra.

Tabla 3-1: Medición a larga distancia LoRa.

	Corriente máxima	Corriente LoRa	Potencia cto. [W]	RSSI	SNR
Promedio	334,02 [mA]	31,58 [mA]	1,67	-82,41	7

Rango de potencia LoRa 47,52 [mW] a 166,65 [mW]
--

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Análisis comparativo de tecnologías

La comunicación inalámbrica es una tecnología clave en el desarrollo de sistemas IoT (Internet de las Cosas) y proyectos de telemetría. Entre las opciones disponibles, destacan los módulos presentados en el capítulo 2, cada uno con características únicas en términos de alcance, consumo energético, frecuencia operativa y capacidad de red. Este análisis comparativo, presentado a continuación, en las tablas 3-4 y 3-5, busca identificar las ventajas y limitaciones de cada tecnología, considerando las aplicaciones prácticas realizadas.

Tabla 3-4: Alcance de las tecnologías.

Tecnología	Alcance Máximo (Línea de Vista)	Observaciones
SX1278 (LoRa)	2234 [m]	Buen equilibrio entre alcance y consumo, ideal para aplicaciones IoT.
XBee S2C	180 [m]	Limitado para distancias largas, aunque ofrece alta estabilidad y redes en malla (DigiMesh).
NRF24L01+PA+LNA	900 [m]	Excelente alcance, especialmente en ambientes de baja interferencia. Depende de antenas externas para mejorar la cobertura.

Fuente: Elaboración propia basada en muestras tomadas.

Tabla 3-5: Consumos de tecnologías.

Tecnología	Consumo Promedio	Observaciones
SX1278 (LoRa)	31,58 [mA]	Moderado en transmisión.
XBee S2C	46,67 [mA]	Alto consumo comparado con otras tecnologías. Sin embargo, es adecuado para redes constantes y fiables.
NRF24L01+PA+LNA	89,33 [mA]	La más alta corriente. Notablemente más alto en comparación con las otras tecnologías.

Fuente: Elaboración propia basada en muestras tomadas.

Teniendo en cuenta todas las pruebas realizadas, de cada una de las tecnologías analizadas (sx1278 LoRa, Xbee s2c y nrf24l01), estas presentan características que las hacen más adecuadas para diferentes tipos de aplicaciones.

LoRa destacó por su gran alcance superior y un consumo moderado, siendo especialmente útil en las aplicaciones IoT que requieren comunicación a larga distancia con eficiencia energética. Por otro lado, se observa un alcance algo limitado en el caso de Xbee y muy sorprendido con el desempeño de los módulos nrf24l01, obteniendo un alcance intermedio, pero con mayor consumo energético.

Sin duda alguna, la elección de tecnologías debe basarse en estos tipos de análisis, detallando los requisitos del proyecto, considerando factores como la distancia, el consumo energético y el costo-beneficio que se obtiene.

3.2 MEJORAS CONTINUAS

Proceso sistemático para optimizar procesos, productos, servicios y resultados del proyecto, a lo largo de todo su ciclo de vida. Este enfoque se centra en realizar ajustes incrementales o innovaciones significativas para alcanzar los objetivos del proyecto de manera más eficiente, efectiva y alineada con las necesidades de los Stakeholders.

3.2.1 Mantenimiento de código

Cuando se habla de mantenimiento de código, se hace referencia a las actividades para mantener un software funcional, eficiente, seguro y adaptable a nuevas necesidades a lo largo del tiempo. Es fundamental para el ciclo de vida en términos del desarrollo del software, ya que ningún sistema debe permanecer estático, debido a que los requerimientos cambian, surgen nuevos desafíos técnicos y es evidente que las tecnologías evolucionan.

3.2.1.1 Mejorar código

Al pasar tiempo con los dispositivos funcionando, se logra percibir algunos errores en la entrega de paquetes, o congelamiento de los dispositivos. Es por ello, y de manera imperativa, seguir con el desarrollo de mejores técnicas de programación, mejorar la estructura del código sin cambiar obviamente la identidad de funcionamiento, salvo en un punto que permitiría un ahorro significativo, y sería orientado al dispositivo montado en terreno, aquel que posee los sensores, que no transmita a no ser que sea una potencial amenaza detectada, lo que contribuiría a reducir la congestión de la red y solo existirá un canal fluido al momento de un real acontecimiento. Se proyecta también que esté la posibilidad de solicitar el estado de los esclavos conectados a la red en un futuro.

3.2.1.2 Personalizar ppm de los sensores

Al estar utilizando los sensores MQ2 y MQ7 es posible orientarlos a gases específicos, es por ello, en caso de ser necesario la identificación más exacta de los gases requeridos o tener de manera más exacta la calidad del aire, se podría implementar las ecuaciones pertinentes para la identificación de los PPM.

3.2.1.3 Implementar rutinas de sleep

En términos de consumo energético, y para seguir reduciendo un porcentaje considerable de energía, entra en juego las rutinas sleep. Modo de bajo consumo que apaga casi por completo el ESP32, en este modo, consume solo unos cuantos micro Amper [μA] informados en su hoja de datos. Esto proporciona una reducción importante para implementar una batería de ser necesario.

3.2.1.4 Cifrar transmisión

Uno de los puntos de seguridad claves, para mantener la privacidad de transmisión, sería la de implementar un algoritmo de cifrado. AES, del inglés, Advanced Encryption Standard, es la opción más común para sistemas implementados en ESP32 con LoRa. Usualmente se utilizaría en modo CTR (counter mode) o CBC (cipher block chaining) para manejar datos en bloques.

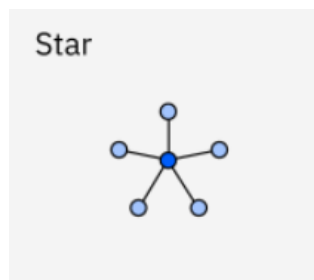
Existen otros métodos más ligeros como chacha20, pero AES es ampliamente soportado y seguro.

3.2.2 Expansión de la red

De ser necesario abarcar más espacio o más puntos de control, está la obligación de expandir la red, desde este punto la implementación de una topología confiable y consistente sería lo ideal para ello.

3.2.2.1 Topología estrella

Todos los esclavos se comunicarían directamente con una antena maestra como muestra en la figura 3-4, por consecuencia tendríamos una baja latencia en la comunicación con el nodo central, fácil de implementar y gestionar, y lo más importante siendo consecuente con parte de los objetivos, el consumo energético reducido, ya que solo precisa comunicarse con la antena central.



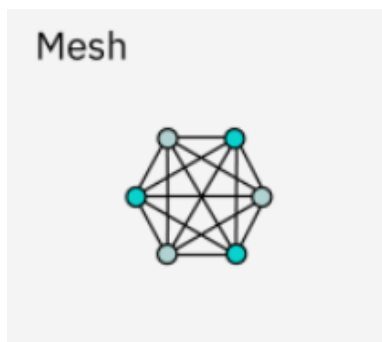
Fuente: <https://www.ibm.com/es-es/topics/network-topology>

Figura 3-4: topología estrella.

3.2.2.2 Topología malla (mesh)

Todos los nodos se pueden comunicar entre sí, con rutas dinámicas hacia el destino como se señala en la figura 3-5. Es una propuesta interesante a desarrollar un sistema con esta topología, con una altísima resiliencia ante fallas, donde se podría enrutar los mensajes y proveer una extensión dinámica del rango de comunicación.

Pero, debido a que los nodos estarían más activos, por consecuencia, un mayor consumo energético, haciéndolo que sea una idea ligeramente aplicable pero no descartable, debido a que en redes críticas donde la redundancia y robustez es prioridad, esta topología es idónea.



Fuente: <https://www.ibm.com/es-es/topics/network-topology>

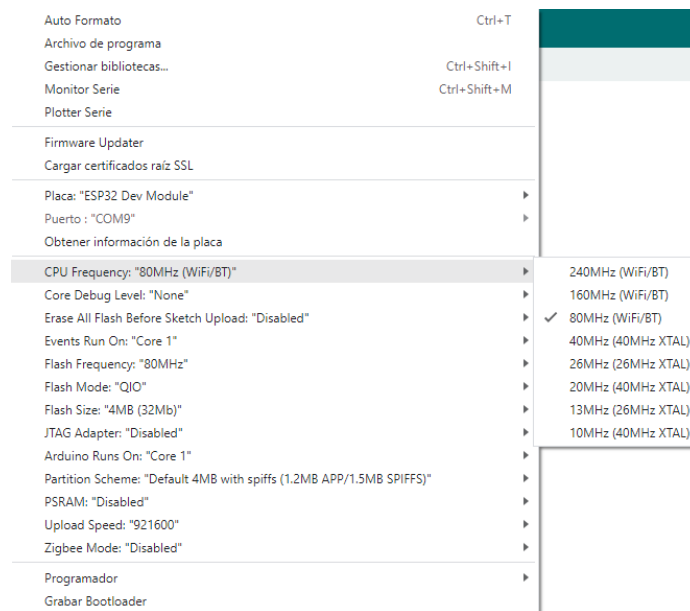
Figura 3-5: Topología mesh.

3.3 REDUCCIÓN DE CONSUMOS

Es posible seguir reduciendo los consumos, esto quiere decir que, ante algunas configuraciones extras y cambio de elementos podríamos reducir aún mas la corriente significativamente.

3.3.1 Configuración esp32

Establecer dentro del código frecuencias más bajas del procesador, reduciendo el consumo energético, que por consecuencia podría afectar el rendimiento del dispositivo. Un balance entre rendimiento y eficiencia energética es crucial en proyectos de bajo consumo. Esto sería capaz de dos maneras, la primera, sería programar el ESP32 con una frecuencia predeterminada, indicado en la figura 3-6 y la segunda sería dentro de la misma programación gracias al siguiente comando: `setCpuFrequencyMhz("frecuencia")`, haciendo cambios más dinámicos y adaptándose a futuros cambios.



Fuente: Imagen obtenida del programador Arduino IDE.

Figura 3-6: Configuración de frecuencia.

3.3.2 Cambio de dispositivos

En el caso de cambios de los sensores, se investigó nuevos dispositivos capaces de implementarlos conjunto con el ESP32, se indica específicamente del sensor SPG30 mostrado en la figura 3-7, sensor de gas digital, con tolerancias hacia el etanol, hidrógeno, una amplia gama de compuestos orgánicos, y hasta niveles equivalentes de dióxido de carbono, entre otros.

Lo que destaca es su bajo consumo comparado con los ya presentados en el documento, llegando a unos considerables 48,2 [mA] al momento de medición, en tabla 3-8 sus principales características.



Fuente: <https://www.mouser.cl/pdfdocs/adafruit-sgp30-gas-tvoc-eco2-mox-sensor.pdf>

Figura 3-7: Sensor SPG30.

Tabla 3-6: Características principales sensor SPG30.

Características sensor spg30

Alimentación	5	[v] DC.
Rango de detección	0 a 60.000	ppm.
Corriente	50	[mA].
Potencia	250	[mW].

Fuente: <https://www.mouser.cl/pdfdocs/adafruit-sgp30-gas-tvoc-eco2-mox-sensor.pdf>

Otras opciones de bajo consumo para ampliar más la gama de gases serian el módulo MP-2 y ZP13, figuras 3-8 y 3-9 respectivamente. Dos sensores más como opción, para reducir el consumo energético entregado, sus características principales en tablas 3-9 y 3-10.



Fuente : https://www.winsen-sensor.com/d/files/mp-2-manual-v1_4.pdf

Figura 3-8: Sensor MP2.

Tabla 3-7: Características principales sensor MP-2.

Características sensor mp2

Alimentación	5	[v] DC.
Rango de detección	200 a 10000	ppm.
Corriente	48	[mA].
Potencia	240	[mW].

Fuente: https://www.winsen-sensor.com/d/files/mp-2-manual-v1_4.pdfFuente: <https://www.winsen-sensor.com/d/files/manual/zp13.pdf>

Figura 3-9: Sensor ZP13.

Tabla 3-8: Características principales sensor SPG30.

Características sensor spg30

Alimentación	5	[v] DC.
Rango de detección	0 a 60000	ppm.
Corriente	50	[mA].
Potencia	250	[mW].

Fuente: <https://www.winsen-sensor.com/d/files/manual/zp13.pdf>

En otro aspecto, si se quisiera reducir el espacio, la placa ESP32 si bien no es grande, hay opciones que lograrían adaptarse de una excelente manera y reduciendo su tamaño considerablemente y a su vez, también mejora su consumo energético. Se habla de implementar un ESP32 c3 super mini, figura 3-10 o un Seeeduino basado también en un ESP32 c3 super mini, figura 3-11.

Fuente: <https://www.amazon.in/OceanLabz-ESP32-C3-Super-Development-Bluetooth/dp/B0D2DM322M>

Figura 3-10: ESP32 super mini.



Fuente: <https://wiki.seeedstudio.com>

Figura 3-11: Seeeduino.

Y, por último, si se quisiera implementar una mejora en las comunicaciones, dando mejores resultados a nivel de distancia, se podría implementar el módulo RYLR998, figura 3-12, módulo basado en tecnología LoRa de semtech. Sus características principales son:

- Frecuencia de operación: 868/915 [MHz].
- Alimentación: 2,3 a 3,6 [v] DC (típicamente 3,3 [v] DC).
- Antena: integrada.
- Potencia de transmisión: hasta 22 [dBm] (configurable).
- Sensibilidad: -129 [dBm].
- Interfaz de comunicación: UART.



Fuente: https://reyax.com/upload/products_download/download_file/RYLR998_EN.pdf

Figura 3-12: Módulo RYLR998.

3.4 EVALUACIÓN DE COSTOS

La evaluación de costos es un proceso esencial en la gestión de adquisiciones, ya que permite analizar, comparar y optimizar los recursos financieros destinados a la compra de bienes y servicios. Este análisis adquiere una relevancia particular al considerar tanto el ámbito nacional como el internacional, donde factores como las diferencias en precios, normativas e impuestos pueden influir significativamente en los costos finales.

Los valores se expresan en CLP, pesos chilenos y estandarizados en unidad de fomento [UF], valorizada al día 14 de enero del 2025, con un valor de 38.426,57 pesos chilenos.

3.4.1 Personal requerido

Para realizar el sistema de telemetría será necesario contar con personal capacitado, profesionales aptos para ejecutar labores que contribuyan al desarrollo e implementación física. Se presupuesta contar con un Ingeniero en control e instrumentación industrial, de un técnico en automatización o carrera a fin y para el desarrollo continuo del sistema, un programador.

Al contar con dichos profesionales, se establece sueldos líquidos en tabla 3-9 a pagar por un mes laboral con una jornada de 40 horas semanales, 22 días efectivos de trabajos por mes (calculados en base al año 2025) y con una jornada de 8 horas por día para efectos de cálculos, toda la fuente de los sueldos será añadida en anexo P.

Tabla 3-9: Valor mensual y valor hora para profesionales.

Profesional	CLP	UF	Valor hora [UF]	Tiempo estimado 6 semanas [UF]
Ingeniero	\$1.515.226	\$ 39,43	\$ 0,22	\$ 57,36
Técnico	\$1.111.775	\$ 28,93	\$ 0,16	\$ 42,08
Programador	\$1.235.218	\$ 32,14	\$ 0,18	\$ 46,76
Total UF		\$ 100,51	\$ 0,57	\$ 146,20

Fuente: Elaboración en base a requerimientos para el proyecto.

Se considera trabajos para 6 semanas, dentro de las cuatro primeras semanas se llevará a cabo todo el desarrollo del sistema de telemetría contando con sus pruebas pertinentes y 2 semanas para posibles errores, atrasos, reprogramación, etc. Dándonos un valor final de 146,2 UF.

Ya identificados los profesionales requeridos, se detallarán las responsabilidades.

3.4.1.1 Ingeniero en control e instrumentación industrial

- Encargado del diseño y supervisión del sistema de control y adquisición de datos.
- Selección de sensores, microcontroladores, dispositivos de comunicación y entre otros.
- Integración de hardware y validación de señales de telemetría
- Garantizar el cumplimiento de normativas técnicas y estándares de seguridad.

3.4.1.2 Técnico en automatización o carrera a fin.

- Instalación física de los componentes del sistema.
- Soporte en pruebas de rendimiento.
- Colaboración directa con el ingeniero en resolución de problemas técnicos.

3.4.1.3 Programador

- Desarrollo del software de telemetría.
- Implementación de algoritmos para el análisis en tiempo real.
- Configuración para el almacenamiento de la información.
- Optimización de código y corrección de errores durante pruebas de rendimiento.

3.4.2 Costos de los dispositivos y materiales electrónicos.

El costo de cada dispositivo se detalla en tabla 3-10 y tabla 3-11, realizando posteriormente una comparación entre una compra nacional y una compra desde el extranjero.

Tabla 3-10: Costos nacionales.

Descripción	cantidad	CLP	precio unitario UF	Costo total
ESP32 (38 pines)	2	\$ 11.990	\$ 0,31	\$ 0,62
LoRa sx1278	2	\$ 8.447	\$ 0,22	\$ 0,44
Mq2	1	\$ 2.300	\$ 0,06	\$ 0,06
Mq7	1	\$ 3.400	\$ 0,09	\$ 0,09
Ds18b20	1	\$ 2.000	\$ 0,05	\$ 0,05
Cables dupont	1	\$ 2.590	\$ 0,07	\$ 0,07
Protoboard	1	\$ 3.990	\$ 0,10	\$ 0,10
diodo led	2	\$ 97	\$ 0,01	\$ 0,02
Antena srh805s	2	\$ 5.540	\$ 0,14	\$ 0,29
			TOTAL UF	\$ 1,74

Fuente: Elaboración en base a requerimientos para el proyecto.

Tabla 3-11: Costos internacionales.

Descripción	cantidad	CLP	precio unitario UF	Costo total
ESP32 (38 pines)	2	\$ 2.981	\$ 0,08	\$ 0,16
LoRa sx1278	2	\$ 7.427	\$ 0,19	\$ 0,39
Mq2	1	\$ 1.032	\$ 0,03	\$ 0,03
Mq7	1	\$ 1.502	\$ 0,04	\$ 0,04
Ds18b20	1	\$ 1.762	\$ 0,05	\$ 0,05
Cables dupont	1	\$ 1.700	\$ 0,04	\$ 0,04
Protoboard	1	\$ 1.866	\$ 0,05	\$ 0,05
Diodo led	2	\$ 97	\$ 0,003	\$ 0,01
Antena srh805s	2	\$ 2.597	\$ 0,07	\$ 0,14
			TOTAL UF	\$ 0,89

Fuente: Elaboración en base a requerimientos para el proyecto.

3.4.3 Costos de mejoras.

En tabla 3-12 se añaden los costos de las mejoras que se pueden aplicar para reducir los gastos energéticos.

Tabla 3-12: Costos de mejoras aplicadas.

Descripción	cantidad	CLP	precio unitario UF	Costo total
Seeeduino	2	\$ 4.552	\$ 0,12	\$ 0,24
Rylr 915 (2 unidades)	1	\$ 24.694	\$ 0,64	\$ 0,64
mp2	1	\$ 2.003	\$ 0,05	\$ 0,05
spg30	1	\$ 2.963	\$ 0,08	\$ 0,08
dupont	1	\$ 1.700	\$ 0,04	\$ 0,04
Protoboard	1	\$ 1.866	\$ 0,05	\$ 0,05
Panel solar	1	\$ 2.842	\$ 0,07	\$ 0,07
Batería	1	\$ 14.098	\$ 0,37	\$ 0,37
Diodo led	2	\$ 97	\$ 0,003	\$ 0,01
TOTAL				\$ 1,55

Fuente: Elaboración en base a requerimientos para el proyecto.

Estos costos representan una compra internacional, debido a la escases de alternativas de bajo consumo en el mercado nacional, esta tendencia aplica en gran parte a todos los dispositivos de relevancia, como lo es el módulo de comunicación y sus sensores.

3.4.4 Análisis de costos.

A continuación se realizará un análisis de costos, proceso de examinación y evaluación de los costos asociados al proyecto, con el fin de justificar y tomar decisiones informadas.

3.4.4.1 Análisis de costos por componentes.

Como se observan en las tablas 3-10 y 3-11, se aprecia gran diferencia de costos totales, siendo un 49% más atractiva la compra internacional. Ahora, los dispositivos con mayor diferencia y siendo una compra internacional más inteligente son:

- ESP32 con un valor 75,04% más económico.
- Elementos como los diodos led, prácticamente un 68% más económicos.
- MQ2 Y MQ7 con valores económicos cercanos al 55% menos.
- Protoboard y antena siendo un 53% más económicos.
- Cables dupont llegando a unos 34,36% más baratos.

3.4.4.2 Evaluación de factores adicionales.

- Costos asociados:

Nacional: Puede incluir impuestos internos, márgenes de ganancia del distribuidor, y mayor estabilidad en plazos de entrega.

Internacional: Considerar impuestos de importación si así lo amerita, gastos de envío o aranceles. Evaluar si el tiempo de espera es compatible con el proyecto.

- Calidad y garantías:

Nacional: Es más probable que exista garantías locales o devoluciones más simple.

Internacional: Aunque sea la opción más económica, puede implicar una dificultad en casos de devoluciones.

3.4.4.3 Análisis de costo total del proyecto.

En tabla 3-13 se detalla los costos totales asociados al proyecto incluyendo la mano de obra, todos los dispositivos y materiales electrónicos requeridos, así también se añade el 50% más respecto al valor de los materiales, en caso de fallas, estropeos, etc.

Tabla 3-13: Resumen de costos totales.

Descripción	Costo total en CLP	Costo total en UF
Mano de obra	\$ 3.862.219	\$ 100,51
Dispositivos y materiales electrónicos (compra nacional)	\$ 66.832	\$ 1,74
Dispositivos y materiales electrónicos (compra internacional)	\$ 34.065	\$ 0,89
Dispositivos y materiales electrónicos (mejoras)	\$ 59.463	\$ 1,55
Materiales electrónicos extra nacional (50%)	\$ 33.416	\$ 0,87
Materiales electrónicos extra internacional (50%)	\$ 17.033	\$ 0,44
Materiales electrónicos extra para mejoras (50%)	\$ 29.732	\$ 0,77

Total nacional - sin atrasos	\$ 3.962.467	\$ 103,12
Total internacional - sin atrasos	\$ 3.913.317	\$ 101,84
Total mejoras - sin atrasos	\$ 3.951.414	\$ 102,83

Fuente: Elaboración en base a requerimientos para el proyecto.

3.4.4.4 Análisis de costos con retrasos.

Se estima retrasos de entre una a dos semanas, los gastos asociados a estos tiempos serán representados en tabla 3-14.

Tabla 3-14: Resumen total con retrasos estimados.

Descripción	Costo total en CLP	Costo total en UF
Total nacional - 1 semana de atraso	\$ 4.840.244	\$ 125,96
Total internacional - 1 semana de atraso	\$ 4.791.094	\$ 124,68
Total mejoras - 1 semana de atraso	\$ 4.829.191	\$ 125,67
Total nacional - 2 semana de atraso	\$ 5.718.021	\$ 148,80
Total internacional - 2 semana de atraso	\$ 5.668.871	\$ 147,52
Total mejoras - 2 semana de atraso	\$ 5.706.968	\$ 148,52

Fuente: Elaboración en base a requerimientos para el proyecto.

3.4.5 Conclusiones basadas en los análisis.

La presente conclusión de los costos para el desarrollo e implementación del sistema de telemetría permite evaluar de manera cualitativa y cuantitativamente las diferentes variables financieras asociadas al proyecto, considerando la adquisición de recursos materiales como los costos de mano de obra especializada. A continuación, se sintetizan los hallazgos más relevantes.

- La evaluación de los costos de los componentes electrónicos revela una diferencia significativa entre la compra en el mercado nacional y la importación desde proveedores internacionales, siendo un 49% más económica. No obstante, esta ventaja debe ponderarse frente a factores como posibles cargos adicionales (transporte y aduanas) y fluctuaciones en el tiempo, disponibilidad, plazos de entrega y las garantías entregadas.
- El desglose financiero del proyecto evidencia que la mano de obra representa al 98,3% del costo total (100,51 UF de 101,84 UF en la opción internacional), lo que subraya la importancia de una gestión eficiente del tiempo.
- El presupuesto incluye un 50% adicional en los dispositivos y materiales electrónicos para cubrir fallas o reposiciones, lo cual es un enfoque conservador y recomendable, sin embargo, un atraso de 2 semanas equivale aproximadamente al 45% de sobrecoste, reforzando la necesidad de planificar hitos críticos, priorizar proveedores con plazos de entrega y tener en cuenta la variabilidad en costos internacionales.

En base a lo anterior se recomienda adoptar la compra internacional de los componentes, previa verificación de costos logísticos finales, existencia de distribuidores locales alternativos para componentes críticos que permitan reducir los tiempos de respuesta ante fallos y sin duda alguna que implementar las mejoras de eficiencia energética, dado a su bajo impacto presupuestario y beneficios en sostenibilidad y autonomía del sistema.

Finalmente, este análisis confirma que la opción internacional es más atractiva, pero en términos financieros y costos totales no se refleja una cuantiosa diferencia, siendo de solo 1% de diferencia entre los aspectos de compra nacional, compra internacional y una compra de las mejoras, y esta última, establece una inversión justificada y alineada con las tendencias de IoT sostenible. En otro aspecto, dado el peso dominante de la mano de obra en el presupuesto, las estrategias de reducción de costos deben enfocarse en optimización de los recursos humanos más que la minimización de los precios del hardware.

3.5 IMPLEMENTACIÓN FÍSICA

Actualmente, el proyecto no pasa más allá de un prototipo funcional, lo primordial sería montar todos los dispositivos en una placa base, soldando los componentes para su mejor robustez, y, en presencia de conexiones más estables, reduciría el riesgo de fallos eléctricos debido a contactos flojos, reduciendo el ruido eléctrico de los sensores y aportando profesionalismo al trabajo presentado. Se lograría una primera impresión de total agrado ante una eventual presentación ante potenciales clientes o inversionistas. A su vez, el tamaño se reduciría considerablemente, siendo capaz de introducir estos componentes en una caja estanca u otros para su posible aplicación. Esto aportaría mayor seguridad para montar en el campo, ya configurado en su entorno de trabajo real.

En otro aspecto, la escalabilidad que tomará, al implementar conectores con un cabezal de apilamiento permitiría una rápida mantención y personalización, y sin mencionar el cambio de elementos estropeados, la reposición de ellos sería prácticamente instantánea.

3.5.1 Incorporación de batería

Debido a que una parte del sistema requiere estar montando en terreno, depende de dos factores para su uso, el primero, de una batería capaz de alimentar el circuito y el segundo, la incorporación de un panel solar, y es con la dualidad de estos dos factores que toma fuerza el sistema.

3.5.1.1 Cálculos para batería sin mejoras

Con los datos aportados en tabla 3-4, promedios obtenidos en la prueba de larga distancia con el dispositivo LoRa se realiza los siguientes cálculos:

- Corriente en modo lectura: $I_1 = 334,02$ [mA].
- Corriente en modo Reposo: $I_2 = 316,44$ [mA].
- Duración de cada modo por día.
Se establece por programación que la duración por cada ciclo es de 15 minutos, donde 1 minuto será para la lectura de los sensores (modo 1) y 14 minutos para un tiempo de reposo (modo 2). Por ende, cada día se realizan 96 ciclos de 15 minutos.
- Tiempo diario de cada modo por día.

*Tiempo = cantidad de ciclos * minutos de operación*

$$Tiempo_1 = 96 * 1 \text{ [minutos]}$$

$$Tiempo_1 = 96 \text{ [minutos]} = 1,6 \text{ [Horas]}$$

$$Tiempo_2 = 96 * 14 \text{ [minutos]}$$

$$Tiempo_2 = 1.344 \text{ [minutos]} = 22,4 \text{ [Horas]}$$

$$Tiempo_{total} = 96 \text{ [minutos]} + 1344 \text{ [minutos]}$$

$$Tiempo_{total} = 1.440 \text{ [minutos]} = 24 \text{ [Horas]}$$

- Consumo de cada modo por día en [mAh].

$$\text{Consumo} = \text{Corriente} * \text{Tiempo}$$

$$\text{Consumo}_{\text{Modo } 1} = 334,02 \text{ [mA]} * 1,6 \text{ [Horas]}$$

$$\text{Consumo}_{\text{Modo } 1} = 534,43 \text{ [mAh]}$$

$$\text{Consumo}_{\text{Modo } 2} = 316,44 \text{ [mA]} * 22,4 \text{ [Horas]}$$

$$\text{Consumo}_{\text{Modo } 2} = 7.088,26 \text{ [mAh]}$$

$$\text{Consumo}_{\text{Total}} = 534,43 \text{ [mAh]} + 7.088,26 \text{ [mAh]}$$

$$\text{Consumo}_{\text{Total}} = 7.622,69 \text{ [mAh]}$$

- Potencia de cada modo.

$$\text{Potencia} = V * I$$

$$\text{Potencia}_1 = 5 \text{ [V]} * 334,02 \text{ [mA]}$$

$$\text{Potencia}_1 = 1,67 \text{ [W]}$$

$$\text{Potencia}_2 = 5 \text{ [V]} * 316,44 \text{ [mA]}$$

$$\text{Potencia}_2 = 1,58 \text{ [W]}$$

- Energía diaria.

$$\text{Energía} = \text{Potencia} * \text{Tiempo}$$

$$\text{Energía}_{\text{Modo } 1} = 1,67 \text{ [W]} * 1,6 \text{ [Horas]}$$

$$\text{Energía}_{\text{Modo } 1} = 2,67 \text{ [Wh]}$$

$$\text{Energía}_{\text{Modo } 2} = 1,58 \text{ [W]} * 22,4 \text{ [Horas]}$$

$$\text{Energía}_{\text{Modo } 2} = 35,44 \text{ [Wh]}$$

$$\text{Energía}_{\text{Total}} = 2,67 \text{ [Wh]} + 35,44 \text{ [Wh]}$$

$$\text{Energía}_{\text{Total}} = 38,11 \text{ [Wh]}$$

- Autonomía de la batería de 9.800 [mAh].

$$\text{Autonomía batería} = \frac{\text{Capacidad de batería}}{\text{Consumo diario}}$$

$$\text{Autonomía batería} = \frac{9.800 \text{ [mAh]}}{7.622,69 \text{ [mAh]}}$$

$$\text{Autonomía batería} = 1,29 \text{ [días]} = 30,9 \text{ [Horas]}$$

- Impacto del panel solar.

Si se añade un panel solar con las características: 5 [v] DC a 5 [W], con un área de 100 [cm²]. Se estima que por día son 5 horas efectivas de luz solar. La irradiancia solar por unidad de área normalmente es de 1.000 W/m².

$$Potencia\ de\ entrada = irradiancia * \acute{a}rea\ del\ panel\ [m^2]$$

$$Potencia\ de\ entrada = 1000\ [W/m^2] * 0,01\ [m^2]$$

$$Potencia\ de\ entrada = 10\ [W]$$

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ de\ salida}{Potencia\ de\ entrada} * 100\%$$

$$Eficiencia = \frac{5\ [W]}{10\ [W]} * 100\%$$

$$Eficiencia = 50\%$$

$$Energía\ diaria\ del\ panel = Potencia\ del\ panel * horas\ solares * eficiencia$$

$$Energía\ diaria\ del\ panel = 5\ [W] * 5\ [Horas] * 0,5$$

$$Energía\ diaria\ del\ panel = 12,5\ [Wh] = 2.500\ [mAh]$$

- Balance energético.

Con la incorporación del panel solar, es posible aportar energía al sistema obteniendo una nueva autonomía de la batería.

$$Balance\ energetico = Energía\ consumida - Energía\ del\ panel\ solar$$

$$Balance\ energético = 38,11\ [Wh] - 12,5\ [Wh]$$

$$Balance\ energético = 25,61\ [Wh] = 5122,69\ [mAh]$$

$$Autonomía\ batería = \frac{9.800\ [mAh]}{5122,69\ [mAh]}$$

$$Autonomía\ batería = 1,91\ [días] = 45,9\ [Horas]$$

Sin duda que se logra aportar un salto, pero al cabo de 2 días aproximadamente, la batería estará totalmente descargada. Es por ello que se aplicarán las mejoras mencionadas.

3.5.1.2 Cálculos para batería con mejoras

Bajo las mismas condiciones de trabajo, donde el modo lectura será de 1 minuto y el de reposo será de 14 minutos. Recordar, que los cálculos fueron pensados cambiando todos los dispositivos, tanto como los sensores, el microcontrolador y el módulo de comunicación, obteniendo la tabla 3-15 de los valores de la corriente, en base a su modo de uso.

Tabla 3-15: Valores de corriente para cálculos mejorados.

	Modo transmisión Consumo en [mA]	Modo reposo Consumo en [mA]
Seeduino	28	18
RYLR	140	15
Sensor humo	48	48
Sensor temperatura	1,5	1,5
Total	217,5	82,5

Fuente: Elaboración propia basados en hoja de datos.

- Corriente en modo lectura: $I_1 = 217,5$ [mA].
- Corriente en modo Reposo: $I_2 = 82,5$ [mA].
- Consumo de cada modo por día en [mAh].

$$\text{Consumo} = \text{Corriente} * \text{Tiempo}$$

$$\text{Consumo}_{\text{Modo 1}} = 217,5 \text{ [mA]} * 1,6 \text{ [Horas]}$$

$$\text{Consumo}_{\text{Modo 1}} = 348 \text{ [mAh]}$$

$$\text{Consumo}_{\text{Modo 2}} = 82,5 \text{ [mA]} * 22,4 \text{ [Horas]}$$

$$\text{Consumo}_{\text{Modo 2}} = 1848 \text{ [mAh]}$$

$$\text{Consumo}_{\text{Total}} = 348 \text{ [mAh]} + 1848 \text{ [mAh]}$$

$$\text{Consumo}_{\text{Total}} = 2.196 \text{ [mAh]}$$

- Potencia de cada modo.

$$Potencia = V * I$$

$$Potencia_{Modo\ 1} = 5 [V] * 217,5 [mA]$$

$$Potencia_{Modo\ 1} = 1,09 [W]$$

$$Potencia_{Modo\ 2} = 5 [V] * 82,5 [mA]$$

$$Potencia_{Modo\ 2} = 0,41 [W]$$

- Energía diaria.

$$Energía = Potencia * Tiempo$$

$$Energía_{Modo\ 1} = 1,09 [W] * 1,6 [Horas]$$

$$Energía_{Modo\ 1} = 1,74 [Wh]$$

$$Energía_{Modo\ 2} = 0,4125 [W] * 22,4 [Horas]$$

$$Energía_{Modo\ 2} = 9,24 [Wh]$$

$$Energía_{Total} = 1,74 [Wh] + 9,24 [Wh]$$

$$Energía_{Total} = 10,98 [Wh]$$

- Autonomía de la batería de 9.800 [mAh].

$$Autonomía\ batería = \frac{Capacidad\ de\ batería}{Consumo\ diario}$$

$$Autonomía\ batería = \frac{9.800 [mAh]}{2.196 [mAh]}$$

$$Autonomía\ batería = 4,46 [días] = 107,1 [Horas]$$

- Impacto del panel solar.

Incorporando el mismo panel anteriormente calculado, se obtendría los 12,5 [Wh], siendo mayor el valor entregado por el panel solar que el consumo total diario de unos 10,98 [Wh], por ende, se transforma en un sistema autónomo, con mas de 100 horas de funcionamiento en caso que no sea alimentado por el panel solar.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Uno de los pioneros más visionarios y prominentes, enfatizaba en la electricidad y en las telecomunicaciones como el desarrollo humano, dando la siguiente interpretación moderna. “*EL PROGRESO DEL HOMBRE ESTÁ ÍNTIMAMENTE LIGADO AL DESARROLLO DE NUEVAS FORMAS DE COMUNICACIÓN*” *Nikola Tesla*. Bajo esta premisa, la idea de redes resilientes y de bajo consumo energético no es solo desafíos técnicos, sino que es de una importancia garantizar la continua comunicación de nuestra sociedad.

En esa línea de ideas y de manera satisfactoria, los objetivos planteados inicialmente fueron desarrollados y culminados de manera exitosa. La implementación de un sistema de telemetría de bajo consumo energético utilizando el microcontrolador ESP32 y las tecnologías de comunicación, demuestra gran potencial en escenarios donde las redes tradicionales son inaccesibles o colapsan. Los resultados hablan por sí mismos, obteniendo un buen índice de eficiencia energética versus, la distancia alcanzada, que si bien es un buen punto de partida, como medio de alternativa y mejor aún con las mejoras presentada, se reconoce limitaciones en el estado actual del sistema. Aunque se logra cubrir áreas urbanas, no sería capaz de enlazar grandes extensiones geográficas sin la incorporación de nodos. Este gran desafío resalta la necesidad de integrar las mejoras presentadas, aumentando con creces las capacidades del sistema, como el uso de topologías de red más avanzadas o el cambio de módulos de comunicación.

Cada tecnología puesta en escena demostró tener fortalezas, con esta idea, se subraya la importancia de una selección estratégica basada en las necesidades específicas del entorno de aplicación, siendo la capacidad analítica y creativa de los desarrolladores, un papel fundamental. La mente pensante, con sus habilidades y visión, es quien puede combinar las ventajas de cada una de las tecnologías y diseñar soluciones robustas, flexibles y escalables en el tiempo. Este enfoque permite no solo superar los límites, si no que camina hacia el futuro.

Finalmente, esta tendencia es ambiciosa, hacia sistemas de telemetría sostenibles y de bajo consumo energético. Su capacidad de adaptación y mejoras continuas lo posiciona como una solución no solo viable, sino que también innovadora en un área donde no muchos ponen atención. El desafío radica en seguir perfeccionando la propuesta, con miras de escalarla y

diversificarla para responder a un espectro más grande de necesidades. Así, no solo se fortalecerá la conectividad en entornos críticos, sino que también contribuye al desarrollo de tecnologías más inteligentes y accesibles para el futuro.

BIBLIOGRAFÍA

AIRSPAYCE, librería RADIOHEAD [en línea]. 2025 [consulta en enero del 2025]. Disponible en: https://www.airspayce.com/mikem/arduino/RadioHead/classRH_RF95.html

GITHUB, Librería NRF24L01, [en línea]. 2025 [consulta en enero 2025]. Disponible en: <https://nrf24.github.io/RF24/>, <https://github.com/nRF24/RF24/>.

SEMTECH, Calculadora LoRa, [en línea]. 2025 [consulta en enero 2025]. Disponible en: <https://www.semtech.com/design-support/lora-calculator>

LASTMINUTEENGINEERS, Pinout ESP32, [en línea]. 2025 [consulta en enero 2025]. Disponible en: <https://lastminuteengineers.com/esp32-pinout-reference/>

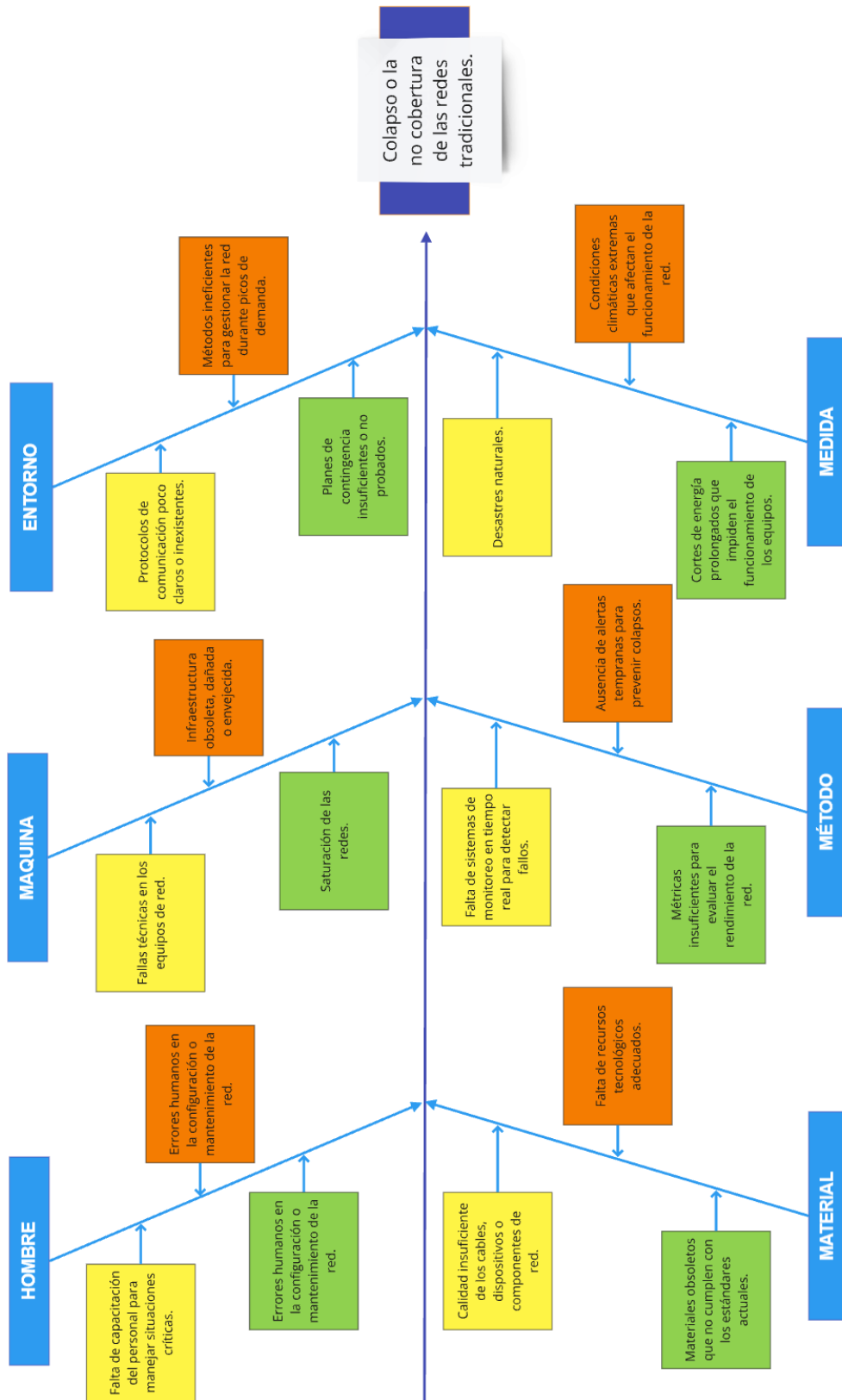
OPIA, Innovación agraria, [en línea]. 2025 [consulta en enero 2025]. Disponible en: <https://opia.fia.cl/601/w3-article-120184.html>

MCIELECTRONICS, Modos sleep, [en línea]. 2025 [consulta en enero 2025]. Disponible en: <https://cursos.mcielectronics.cl/2025/08/05/guia-sobre-los-modos-de-sueno-del-esp32-y-su-consumo-de-energia/>

REDDIT, Foro alcance sx1278, [en línea]. 2025 [consulta en enero 2025]. Disponible en: https://www.reddit.com/r/Lora/comments/1dj1zdi/sx1278_range_issues/?rdt=44035

THE THINGS NETWORK, Lora world record, [en línea]. 2025 [consulta en enero 2025]. Disponible en: <https://www.thethingsnetwork.org/article/lorawan-world-record-broken-twice-in-single-experiment-1>

ANEXO A – DIAGRAMA ISHIKAWA



ANEXO B – MUESTRAS LORA

n° de muestra	Corriente máxima	Corriente LoRa	Potencia cto. [W]	RSSI	SNR
1	329 [mA]	29 [mA]	1,645	-15	9
2	332 [mA]	25 [mA]	1,66	-10	9
3	324,5 [mA]	22,5 [mA]	1,6225	-9	10
4	325,4 [mA]	20,4 [mA]	1,627	-9	10
5	316,5 [mA]	18,5 [mA]	1,5825	-9	10
6	317 [mA]	17 [mA]	1,585	-9	9
7	315,8 [mA]	15,8 [mA]	1,579	-10	9
8	315 [mA]	15 [mA]	1,575	-9	9
9	324,2 [mA]	24,2 [mA]	1,621	-9	9
10	316,7 [mA]	16,7 [mA]	1,5835	-10	9
11	315,6 [mA]	15,6 [mA]	1,578	-9	9
12	335,6 [mA]	24,6 [mA]	1,678	-9	9
13	324,9 [mA]	23,9 [mA]	1,6245	-9	10
14	338,4 [mA]	23,4 [mA]	1,692	-9	9
15	319 [mA]	23 [mA]	1,595	-8	11
16	332,5 [mA]	22,5 [mA]	1,6625	-8	9
17	334,5 [mA]	32,5 [mA]	1,6725	-9	9
18	332,3 [mA]	32,3 [mA]	1,6615	-8	9
19	322,4 [mA]	22,4 [mA]	1,612	-8	9
20	334,5 [mA]	34,5 [mA]	1,6725	-8	9
21	322,6 [mA]	22,6 [mA]	1,613	-8	10
22	322,8 [mA]	22,8 [mA]	1,614	-8	10
23	323,3 [mA]	23,3 [mA]	1,6165	-8	10
24	328,2 [mA]	28,2 [mA]	1,641	-9	9
25	336,7 [mA]	36,7 [mA]	1,6835	-8	9
26	339,7 [mA]	36,7 [mA]	1,6985	-8	9
27	350 [mA]	46 [mA]	1,75	-9	9
28	358,6 [mA]	53,6 [mA]	1,793	-8	9
29	365,6 [mA]	58,6 [mA]	1,828	-8	10
30	352,4 [mA]	44,4 [mA]	1,762	-8	9

ANEXO C – MUESTRAS XBEE

n° de muestra	Corriente máxima		Corriente Xbee		Potencia [W]
1	360	[mA]	50	[mA]	1,8
2	360	[mA]	50	[mA]	1,8
3	360	[mA]	50	[mA]	1,8
4	360	[mA]	50	[mA]	1,8
5	360	[mA]	50	[mA]	1,8
6	350	[mA]	40	[mA]	1,75
7	360	[mA]	50	[mA]	1,8
8	350	[mA]	40	[mA]	1,75
9	350	[mA]	40	[mA]	1,75
10	350	[mA]	40	[mA]	1,75
11	360	[mA]	50	[mA]	1,8
12	370	[mA]	60	[mA]	1,85
13	350	[mA]	40	[mA]	1,75
14	350	[mA]	40	[mA]	1,75
15	350	[mA]	40	[mA]	1,75
16	350	[mA]	40	[mA]	1,75
17	350	[mA]	40	[mA]	1,75
18	360	[mA]	50	[mA]	1,8
19	360	[mA]	50	[mA]	1,8
20	350	[mA]	40	[mA]	1,75
21	350	[mA]	40	[mA]	1,75
22	360	[mA]	50	[mA]	1,8
23	360	[mA]	50	[mA]	1,8
24	350	[mA]	40	[mA]	1,75
25	360	[mA]	50	[mA]	1,8
26	360	[mA]	50	[mA]	1,8
27	350	[mA]	40	[mA]	1,75
28	360	[mA]	50	[mA]	1,8
29	360	[mA]	50	[mA]	1,8
30	360	[mA]	50	[mA]	1,8

ANEXO D – MUESTRAS NRF24L01

n° de muestra	Corriente máxima		Potencia NRF24L01		Potencia cto. [W]
1	340	[mA]	30	[mA]	1,7
2	340	[mA]	30	[mA]	1,7
3	340	[mA]	30	[mA]	1,7
4	330	[mA]	20	[mA]	1,65
5	340	[mA]	30	[mA]	1,7
6	330	[mA]	20	[mA]	1,65
7	330	[mA]	20	[mA]	1,65
8	340	[mA]	30	[mA]	1,7
9	320	[mA]	10	[mA]	1,6
10	330	[mA]	20	[mA]	1,65
11	340	[mA]	30	[mA]	1,7
12	340	[mA]	30	[mA]	1,7
13	340	[mA]	30	[mA]	1,7
14	340	[mA]	30	[mA]	1,7
15	340	[mA]	30	[mA]	1,7
16	340	[mA]	30	[mA]	1,7
17	340	[mA]	30	[mA]	1,7
18	330	[mA]	20	[mA]	1,65
19	340	[mA]	30	[mA]	1,7
20	340	[mA]	30	[mA]	1,7
21	330	[mA]	20	[mA]	1,65
22	320	[mA]	10	[mA]	1,6
23	340	[mA]	30	[mA]	1,7
24	340	[mA]	30	[mA]	1,7
25	340	[mA]	30	[mA]	1,7
26	330	[mA]	20	[mA]	1,65
27	330	[mA]	20	[mA]	1,65
28	340	[mA]	30	[mA]	1,7
29	340	[mA]	30	[mA]	1,7
30	340	[mA]	30	[mA]	1,7

ANEXO E – MUESTRAS XBEE LARGA DISTANCIA

n° de muestra	Corriente máxima		Corriente Xbee		Potencia [W]
1	360	[mA]	50	[mA]	1,8
2	360	[mA]	50	[mA]	1,8
3	350	[mA]	40	[mA]	1,75
4	350	[mA]	40	[mA]	1,75
5	350	[mA]	40	[mA]	1,75
6	350	[mA]	40	[mA]	1,75
7	360	[mA]	50	[mA]	1,8
8	360	[mA]	50	[mA]	1,8
9	360	[mA]	50	[mA]	1,8
10	350	[mA]	40	[mA]	1,75
11	360	[mA]	50	[mA]	1,8
12	360	[mA]	50	[mA]	1,8
13	360	[mA]	50	[mA]	1,8
14	360	[mA]	50	[mA]	1,8
15	360	[mA]	50	[mA]	1,8
16	360	[mA]	50	[mA]	1,8
17	360	[mA]	50	[mA]	1,8
18	350	[mA]	40	[mA]	1,75
19	350	[mA]	40	[mA]	1,75
20	360	[mA]	50	[mA]	1,8
21	360	[mA]	50	[mA]	1,8
22	360	[mA]	50	[mA]	1,8
23	360	[mA]	50	[mA]	1,8
24	360	[mA]	50	[mA]	1,8
25	350	[mA]	40	[mA]	1,75
26	370	[mA]	60	[mA]	1,85
27	360	[mA]	50	[mA]	1,8
28	350	[mA]	40	[mA]	1,75
29	350	[mA]	40	[mA]	1,75
30	350	[mA]	40	[mA]	1,75

ANEXO F – MUESTRAS NRF24L01 LARGA DISTANCIA

n° de muestra	Corriente máxima		Potencia NRF24L01		Potencia cto. [W]
1	400	[mA]	90	[mA]	2
2	410	[mA]	100	[mA]	2,05
3	402	[mA]	92	[mA]	2,01
4	390	[mA]	80	[mA]	1,95
5	395	[mA]	85	[mA]	1,975
6	400	[mA]	90	[mA]	2
7	380	[mA]	70	[mA]	1,9
8	390	[mA]	80	[mA]	1,95
9	392	[mA]	82	[mA]	1,96
10	400	[mA]	90	[mA]	2
11	400	[mA]	90	[mA]	2
12	400	[mA]	90	[mA]	2
13	400	[mA]	90	[mA]	2
14	410	[mA]	100	[mA]	2,05
15	408	[mA]	98	[mA]	2,04
16	402	[mA]	92	[mA]	2,01
17	400	[mA]	90	[mA]	2
18	401	[mA]	91	[mA]	2,005
19	400	[mA]	90	[mA]	2
20	410	[mA]	100	[mA]	2,05
21	400	[mA]	90	[mA]	2
22	400	[mA]	90	[mA]	2
23	390	[mA]	80	[mA]	1,95
24	392	[mA]	82	[mA]	1,96
25	398	[mA]	88	[mA]	1,99
26	392	[mA]	82	[mA]	1,96
27	398	[mA]	88	[mA]	1,99
28	400	[mA]	90	[mA]	2
29	410	[mA]	100	[mA]	2,05
30	410	[mA]	100	[mA]	2,05

ANEXO G – MUESTRAS LORA LARGA DISTANCIA

n° de muestra	Corriente máxima	Corriente LoRa	Potencia cto. [W]	RSSI	SNR
1	345,4 [mA]	45,4 [mA]	1,727	-27	10
2	354,7 [mA]	47,7 [mA]	1,7735	-34	9
3	330,5 [mA]	28,5 [mA]	1,6525	-41	9
4	332,2 [mA]	27,2 [mA]	1,661	-44	10
5	347,5 [mA]	49,5 [mA]	1,7375	-47	10
6	317,6 [mA]	17,6 [mA]	1,588	-49	10
7	316,8 [mA]	16,8 [mA]	1,584	-53	9
8	325,9 [mA]	25,9 [mA]	1,6295	-55	9
9	330,1 [mA]	30,1 [mA]	1,6505	-58	8
10	346,8 [mA]	46,8 [mA]	1,734	-60	9
11	318,7 [mA]	18,7 [mA]	1,5935	-72	10
12	361,1 [mA]	50,1 [mA]	1,8055	-80	8
13	315,4 [mA]	14,4 [mA]	1,577	-81	8
14	360,5 [mA]	45,5 [mA]	1,8025	-82	7
15	327,7 [mA]	31,7 [mA]	1,6385	-81	8
16	332,1 [mA]	22,1 [mA]	1,6605	-89	9
17	349,3 [mA]	47,3 [mA]	1,7465	-92	6
18	323,1 [mA]	23,1 [mA]	1,6155	-110	4
19	318,8 [mA]	18,8 [mA]	1,594	-107	8
20	322,6 [mA]	22,6 [mA]	1,613	-88	7
21	317,1 [mA]	17,1 [mA]	1,5855	-89	6
22	350,5 [mA]	50,5 [mA]	1,7525	-95	7
23	322,9 [mA]	22,9 [mA]	1,6145	-95	8
24	317,2 [mA]	17,2 [mA]	1,586	-94	6
25	332,1 [mA]	32,1 [mA]	1,6605	-96	6
26	351,1 [mA]	48,1 [mA]	1,7555	-96	5
27	322,9 [mA]	18,9 [mA]	1,6145	-97	6
28	341,5 [mA]	36,5 [mA]	1,7075	-110	4
29	353,2 [mA]	46,2 [mA]	1,766	-108	7
30	324,8 [mA]	16,8 [mA]	1,624	-110	5
31	329,9 [mA]	25,9 [mA]	1,6495	-112	4
32	355,4 [mA]	50,4 [mA]	1,777	-112	3
33	327,7 [mA]	27,7 [mA]	1,6385	-112	2
34	333,6 [mA]	33,6 [mA]	1,668	-126	1

ANEXO H – PROGRAMACIÓN LORA EMISOR

```

#include <RH_RF95.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

#define RFM95_CS 5
#define RFM95_RST 21
#define RFM95_INT 22

#define LED1 12
#define RF95_FREQ 430.0

#define MQ2_PIN 34
#define MQ7_PIN 35
#define ONE_WIRE_BUS 4 // Pin del DS18B20

RH_RF95 rf95(RFM95_CS, RFM95_INT);
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

void setup() {
  pinMode(LED1, OUTPUT);
  pinMode(MQ2_PIN, INPUT);
  pinMode(MQ7_PIN, INPUT);

  digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);
  Serial.begin(115200);
  sensors.begin();

  digitalWrite(RFM95_RST, LOW);
  delay(10);
  digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);
  delay(10);

  if (!rf95.init()) {
    Serial.println("LoRa radio init failed");
    while (1);
  }

  if (!rf95.setFrequency(RF95_FREQ)) {
    Serial.println("setFrequency failed");
    while (1);
  }
}

```

```

    rf95.setTxPower(20, false);
    Serial.println("LoRa radio init OK!");
}

void loop() {
    digitalWrite(LED1, HIGH);

    int mq2_value = analogRead(MQ2_PIN);
    int mq7_value = analogRead(MQ7_PIN);

    delay(60000); // tiempo de espera de 1 minuto.

    sensors.requestTemperatures();
    float temperature = sensors.getTempCByIndex(0);

    char message[50];
    snprintf(message, sizeof(message), "MQ2:%d MQ7:%d T:%.2f", mq2_value,
mq7_value, temperature);

    Serial.print("Enviando: ");
    Serial.println(message);

    rf95.send((uint8_t *)message, strlen(message) + 1);
    rf95.waitPacketSent();

    if (rf95.waitAvailableTimeout(1000)) {
        uint8_t buf[RH_RF95_MAX_MESSAGE_LEN];
        uint8_t len = sizeof(buf);

        if (rf95.recv(buf, &len)) {
            Serial.println("Respuesta recibida: " + String((char *)buf));
        }
    } else {
        Serial.println("No se recibió respuesta.");
    }

    digitalWrite(LED1, LOW);
    delay(840000); // tiempo de espera de 14 minutos.
}

```

ANEXO I – PROGRAMACIÓN LORA RECEPTOR

```

#include <RH_RF95.h>

#define RFM95_CS 5
#define RFM95_RST 21
#define RFM95_INT 22

#define LED1 12
#define RF95_FREQ 430.0

RH_RF95 rf95(RFM95_CS, RFM95_INT);

const int maxMessages = 10;

float rssiValues[maxMessages];
float snrValues[maxMessages];
int mq2Values[maxMessages];
int mq7Values[maxMessages];
float temperatureValues[maxMessages];

int messageCount = 0;

void setup() {
  pinMode(LED1, OUTPUT);
  digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);
  Serial.begin(115200);

  digitalWrite(RFM95_RST, LOW);
  delay(10);
  digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);
  delay(10);

  if (!rf95.init()) {
    Serial.println("LoRa radio init failed");
    while (1);
  }

  if (!rf95.setFrequency(RF95_FREQ)) {
    Serial.println("setFrequency failed");
    while (1);
  }

  rf95.setTxPower(20, false);

```

```

    Serial.println("LoRa radio init OK!");
}

void loop() {
    if (rf95.available()) {
        uint8_t buf[RH_RF95_MAX_MESSAGE_LEN];
        uint8_t len = sizeof(buf);

        if (rf95.recv(buf, &len)) {
            String receivedMessage = String((char *)buf);
            sscanf(receivedMessage.c_str(), "MQ2:%d MQ7:%d T:%f",
                &mq2Values[messageCount], &mq7Values[messageCount],
                &temperatureValues[messageCount]);

            rssiValues[messageCount] = rf95.lastRssi();
            snrValues[messageCount] = rf95.lastSNR();

            Serial.print("Mensaje recibido: ");
            Serial.println(receivedMessage);

            messageCount++;

            if (messageCount == maxMessages) {
                Serial.println("----- Datos almacenados -----");
                for (int i = 0; i < maxMessages; i++) {
                    Serial.printf("Msg %d: MQ2=%d, MQ7=%d, Temp=%.2f°C, RSSI=%.2f,
                        SNR=%.2f\n",
                            i + 1, mq2Values[i], mq7Values[i],
                            temperatureValues[i], rssiValues[i], snrValues[i]);
                }
                messageCount = 0;
            }

            digitalWrite(LED1, HIGH);
            uint8_t response[] = "OK";
            rf95.send(response, sizeof(response));
            rf95.waitPacketSent();
            delay(1000);
            digitalWrite(LED1, LOW);
        }
    }
}

```

ANEXO J – PROGRAMACIÓN XBEE EMISOR

```

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

HardwareSerial SerialUART(1); // Usaremos UART1

// Pines de los sensores
#define MQ2_PIN 34
#define MQ7_PIN 35
#define DS18B20_PIN 4

// Configuración para el DS18B20
OneWire oneWire(DS18B20_PIN);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

void setup() {
  Serial.begin(115200); // Comunicación USB
  sensors.begin(); // Inicializa el sensor DS18B20

  pinMode(MQ2_PIN, INPUT);
  pinMode(MQ7_PIN, INPUT);

  Serial.println("ESP32 A listo para enviar lecturas...");
}

void loop() {
  // Lecturas de sensores
  int mq2 = analogRead(MQ2_PIN); // MQ2 lectura analógica
  int mq7 = analogRead(MQ7_PIN); // MQ7 lectura analógica

  delay(60000); // tiempo de espera de 1 minuto.

  sensors.requestTemperatures(); // Solicita temperatura al DS18B20
  float temp = sensors.getTempCByIndex(0); // Obtiene temperatura en °C

  // Formatear los datos en un string
  String data = "MQ2:" + String(mq2) + ",MQ7:" + String(mq7) + ",Temp:" +
String(temp, 2);

  // Enviar datos por UART
  Serial.println(data);
  Serial.println("Datos enviados: " + data);
  delay(840000); // Enviar cada 14 minutos.
}

```

ANEXO K – PROGRAMACIÓN XBEE RECEPTOR

```

#define LED_PIN 12 // Define el pin del LED

void setup() {
    Serial.begin(115200); // Comunicación USB

    Serial.println("ESP32 B listo para recibir datos...");

    pinMode(LED_PIN, OUTPUT); // Configura el pin del LED como salida
    digitalWrite(LED_PIN, LOW); // Asegúrate de que el LED esté apagado al
    inicio
}

void loop() {
    if (Serial.available()) { // Verifica si hay datos disponibles.

        digitalWrite(LED_PIN, HIGH); // Enciende el LED para indicar recepción
        de datos

        String receivedData = Serial.readStringUntil('\n'); // Lee los datos
        Serial.println("Datos recibidos: " + receivedData);
        int mq2 = receivedData.substring(receivedData.indexOf("MQ2:") + 4,
        receivedData.indexOf(",MQ7:")).toInt();
        int mq7 = receivedData.substring(receivedData.indexOf("MQ7:") + 4,
        receivedData.indexOf(",Temp:")).toInt();
        float temp = receivedData.substring(receivedData.indexOf("Temp:") +
        5).toFloat();

        Serial.println("MQ2: " + String(mq2));
        Serial.println("MQ7: " + String(mq7));
        Serial.println("Temp: " + String(temp, 2) + " °C");

        digitalWrite(LED_PIN, LOW); // Apaga el LED después de procesar los
        datos
    }
}

```

ANEXO M – PROGRAMACIÓN NRF24L01 RECEPTOR

```

#include <SPI.h>

#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>

// NRF24L01 Configuración
#define CE_PIN 22          // Pin CE del NRF24L01
#define CSN_PIN 21        // Pin CSN del NRF24L01

RF24 radio(CE_PIN, CSN_PIN);
const byte address[6] = "00010";

void setup() {

    Serial.begin(115200);

    // Inicializar NRF24L01
    if (!radio.begin()) {
        Serial.println("NRF24L01 no encontrado!");
        while (1);
    } else {
        Serial.println("NRF24L01 iniciado correctamente.");
    }
    radio.openReadingPipe(0, address);
    radio.setPALevel(RF24_PA_LOW);
    radio.setChannel(108);
    radio.startListening();

    Serial.println("Receptor listo.");
}

void loop() {
    if (radio.available()) {
        char text[32] = "";
        radio.read(&text, sizeof(text));
        Serial.print("Recibido: ");
        Serial.println(text);
    }
}

```

ANEXO L – PROGRAMACIÓN NRF24L01 EMISOR

```

#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// Pines y objetos
RF24 radio(22, 21); // Pines CE y CSN
const byte address[6] = "00001";

// Pines de sensores y led
const int pinMQ2 = 34;
const int pinMQ7 = 35;
const int pinDS18B20 = 4;

// Configuración del sensor DS18B20
OneWire oneWire(pinDS18B20);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

void setup() {
  Serial.begin(115200);

  if (!radio.begin()) {
    Serial.println("Error: NRF24L01 no detectado.");
    while (1);
  }
  radio.openWritingPipe(address);
  radio.setPALevel(RF24_PA_HIGH);
  radio.setChannel(100);
  radio.setDataRate(RF24_250KBPS);
  radio.stopListening();

  // Iniciar sensor de temperatura
  sensors.begin();
}

void loop() {
  // Leer sensores
  int mq2 = analogRead(pinMQ2);
  Serial.println(mq2);
  int mq7 = analogRead(pinMQ7);
  Serial.println(mq7);
}

```

```

    sensors.requestTemperatures(); // Solicitar lectura del sensor de
temperatura
    float temperature = sensors.getTempCByIndex(0);
    Serial.println(temperature);

    delay(60000); // tiempo de espera de 1 minuto.

    // Crear paquete de datos
    struct Data {
        int mq2;
        int mq7;
        float temperature;
    } sensorData;

    sensorData.mq2 = mq2;
    sensorData.mq7 = mq7;
    sensorData.temperature = temperature;

    // Enviar datos
    if (radio.write(&sensorData, sizeof(sensorData))) {
        Serial.print("Datos enviados: MQ2=");
        Serial.print(sensorData.mq2);
        Serial.print(", MQ7=");
        Serial.print(sensorData.mq7);
        Serial.print(", Temp=");
        Serial.println(sensorData.temperature);

    } else {
        //Serial.println("Error al enviar datos.");
    }
    delay(840000); // Intervalo entre envíos de 14 minutos.
}

```

ANEXO N – ENLACES DE COMPRA DE DISPOSITIVOS

MCIELECTRONIC, ESP32 [en línea]. 2025 [consulta en enero del 2025]. Disponible en:

<https://mcielectronics.cl/shop/product/tarjeta-de-desarrollo-de-esp-32-esp32-29541/>

ALIEXPRESS, ESP32 [en línea]. 2025 [consulta en enero del 2025]. Disponible en:

https://es.aliexpress.com/item/1005008079697087.html?spm=a2g0o.productlist.main.1.1.37d32ee8mmwUwc&algo_pvid=bbb1cc07-c702-416e-8e96-1ea50e9154c3&utparam-url=scene%3Asearch%7Cquery_from%3A

RAMBAL, LORA SX1278 [en línea]. 2025 [consulta en enero del 2025]. Disponible en:

<https://rambal.com/radiofrec-cont-remoto/2042-modulo-lora-sx1278-ra-02.html>

ALIEXPRESS, LORA SX1278 [en línea]. 2025 [consulta en enero del 2025]. Disponible en:

https://es.aliexpress.com/item/1005004991920495.html?spm=a2g0o.productlist.main.1.99af2518XwsNXq&algo_pvid=e7567bcd-8a72-4bf6-ae96-1ab3c06ad62a&utparam-url=scene%3Asearch%7Cquery_from%3A

MARCADOLIBRE, ANTENA SRH805S [en línea]. 2025 [consulta en enero del 2025].

Disponible en: <https://www.tecnoe.cl/MLC-912604693-antena-stubby-diamond-srh805s-sma-f-baofeng-kenwood-5cm- JM>

ALIEXPRESS, ANTENA SRH805S [en línea]. 2025 [consulta en enero del 2025]. Disponible

en: https://es.aliexpress.com/item/1005005162411360.html?spm=a2g0o.productlist.main.2.4cd5585fWDoXYL&algo_pvid=a5f2fd03-74fd-4813-b9fc-4e1fc422218c&pdp_ext_f=%7B%22order%22%3A%2277%22%2C%22eval%22%3A%221%22%7D&utparam-url=scene%3Asearch%7Cquery_from%3A#nav-store

AFEL, MQ2 [en línea]. 2025 [consulta en enero del 2025]. Disponible en:

<https://afel.cl/products/sensor-de-gas-mq2>

ALIEXPRESS MQ2 [en línea]. 2025 [consulta en enero del 2025]. Disponible en:

<https://es.aliexpress.com/item/32328262269.html?spm=a2g0o.productlist.main.1.424c>

[41dcl7gR2a&algo_pvid=dd7bddaa-27c7-481a-bde2-d8a50f23e1dd&utparam-url=scene%3Asearch%7Cquery_from%3A](https://afel.cl/products/sensor-monoxido-de-carbono-mq7)

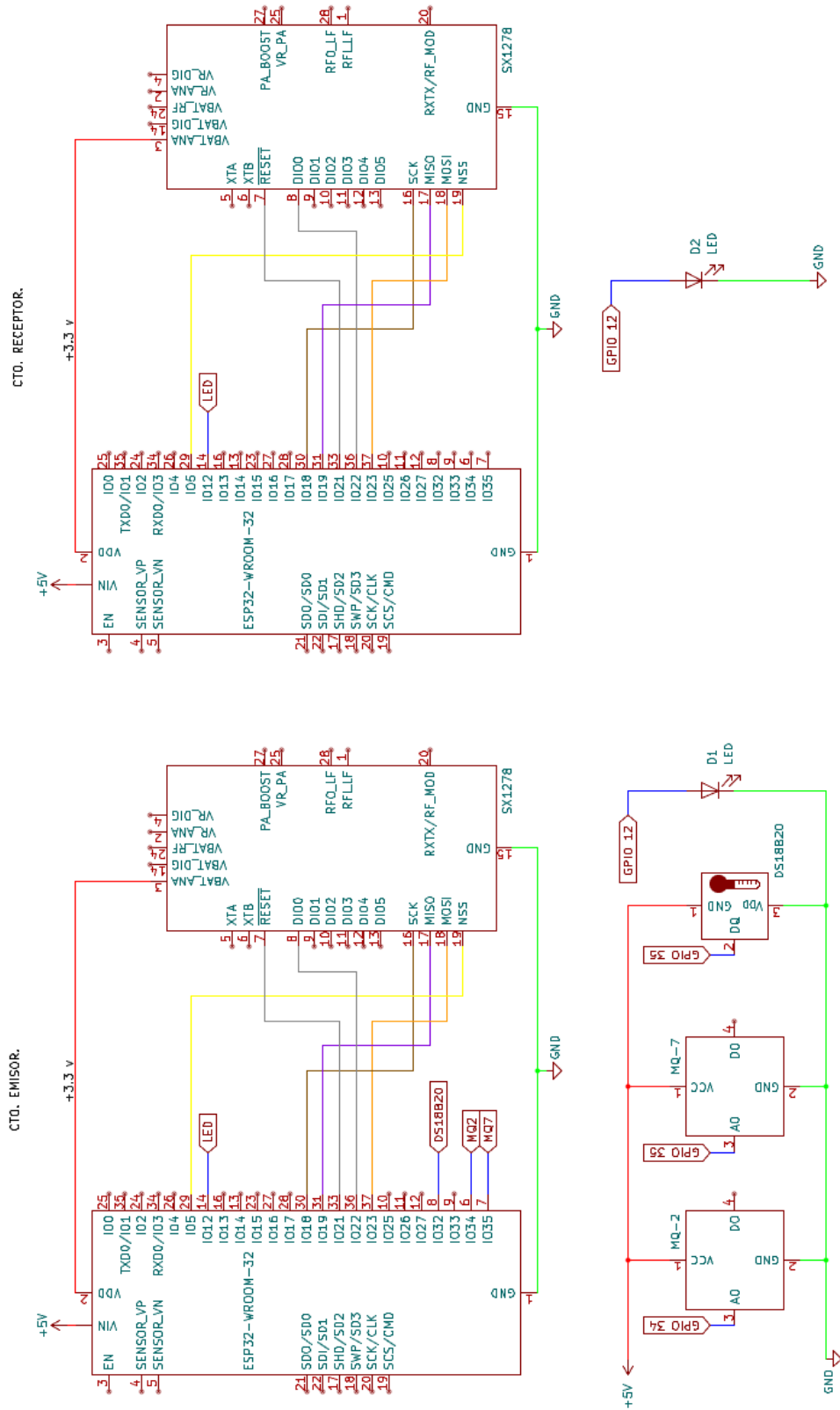
AFEL, MQ7 [en línea]. 2025 [consulta en enero del 2025]. Disponible en:
<https://afel.cl/products/sensor-monoxido-de-carbono-mq7>

ALIEXPRESS MQ7 [en línea]. 2025 [consulta en enero del 2025]. Disponible en:
https://es.aliexpress.com/item/32328181912.html?spm=a2g0o.productlist.main.3.66f96dcaJOQ0fs&algo_pvid=e5be4dfe-47f3-4e10-96d5-ba2d9df5b73f&utparam-url=scene%3Asearch%7Cquery_from%3A

AFEL, DS18B20 [en línea]. 2025 [consulta en enero del 2025]. Disponible en:
<https://afel.cl/products/sensor-temperatura-ds18b20-1-metro>

ALIEXPRESS, DS18B20 [en línea]. 2025 [consulta en enero del 2025]. Disponible en:
https://es.aliexpress.com/item/1005005025125877.html?spm=a2g0o.productlist.main.15.48aa1a0e9tOQ1n&algo_pvid=de05f278-e8c1-4497-9731-58fd9261239d&aem_p4p_detail=202501170033461708615149313660001082603&utparamurl=scene%3Asearch%7Cquery_from%3A&search_p4p_id=202501170033461708615149313660001082603_8

ANEXO O – DIAGRAMA DE CONEXIONADO LORA



ANEXO P – OTROS ENLACES

CHILEVISION, SUELDOS DE CARRERAS [en línea]. 2025 [consulta en enero del 2025].

Disponible en:

<https://www.chilevision.cl/noticias/te-ayuda/revelan-carreras-tecnicas-mejores-pagadas-en-chile-sueldos-pueden>

BIOBIOCHILE, SUELDOS DE CARRERAS [en línea]. 2025 [consulta en enero del 2025].

Disponible en:

<https://www.biobiochile.cl/noticias/servicios/toma-nota/2025/01/06/todas-las-carreras-con-mas-y-menos-empleabilidad-en-chile-y-cual-es-su-sueldo-promedio.shtml>

IPP, SUELDOS DE CARRERAS [en línea]. 2025 [consulta en enero del 2025]. Disponible en:

<https://ipp.cl/general/cuanto-gana-un-programador-en-chile/#:~:text=Cu%C3%A1nto%20cobra%20un%20programador%20por,y%20la%20demanda%20del%20mercado.>

