UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAVELICA

(Creada por ley Nº 25265)

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA-SISTEMAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TESIS

Prototipo de Monitoreo Remoto para el Control del Sistema de Retorno de Agua de Infiltración de Relave del Sumidero en la Unidad Minera San Rafael

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

PRESENTADO POR:

Ronald CASAVILCA ROJAS

Roger ANTONIO CHÁVEZ

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

HUANCAVELICA, PERÚ

2024

Acta de sustentación

UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAVELICA
(Creada por Ley N ° 25265)
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA – SISTEMAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Jr. La Mar N° 755 Pampas – Tayacaja, Celular N° 967-084-062

"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho".

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En el Auditórium de la Facultad de Ingeniería Electrónica - Sistemas, a los 26 días del mes de JUNIO, a horas 11:00 AM. del año 2024, se reunieron los miembros del Jurado Evaluador, designados con Resolución de Consejo de Facultad N° 001-2024-FIES-UNH de fecha 03 de ENERO de 2024, conformado de la siguiente manera:

1. PRESIDENTE : M.Sc. Javier Alfredo HERRERA MORALES
   ORCID 0000-0003-4818-5326
   DNI N° 10198612

2. SECRETARIO : M.Sc. Esteban Edgar DE LA CRUZ VILCHEZ
   ORCID 0000-0003-3302-1249
   DNI N° 23983065

3. VOCAL : Ing. Paul Jean ESQUIVIAS BARRAGAN
   ORCID 0000-0001-8897-9759
   DNI N° 20089778

Con la finalidad de llevar a cabo el acto académico de sustentación de tesis, titulado: " PROTOTIPO DE MONITOREO REMOTO PARA EL CONTROL DEL SISTEMA DE RETORNO DE AGUA DE INFILTRACIÓN DE RELAVE DEL SUMIDERO EN LA UNIDAD MINERA SAN RAFAEL "
Aprobado mediante Resolución de Consejo de Facultad N° 153-2024-FIES-UNH, de fecha 29 de MAYO de 2024, donde fija la hora y fecha para el mencionado acto.

SUSTENTANTE (s):
Nombres y Apellidos : Ronald CASAVILCA ROJAS
D.N.I. N° : 43014132

Nombres y Apellidos : Roger ANTONIO CHAVEZ
D.N.I. N° : 47798023

ASESOR (a):
Nombres y Apellidos : Dr. Javier Cagilo PORTA PALACIOS
ORCID : 0000-0002-8527-809X
D.N.I. N° : 07072546

Luego de haber absuelto las preguntas que fueron formuladas por los Miembros del Jurado, se procede con la deliberación con el resultado de:

Nombres y Apellidos del Autor : Ronald CASAVILCA ROJAS

APROBADO [X] DESAPROBADO [ ] POR MAYORÍA

Nombres y Apellidos del Autor : Roger ANTONIO CHAVEZ

APROBADO [X] DESAPROBADO [ ] POR MAYORÍA

Para constancia se expide la presente acta, en la ciudad de Pampas a los 26 días del mes de JUNIO del año 2024.

PRESIDENTE

SECRETARIO

VOCAL

Certificado de similitud

UNH | Vicerrectorado de Investigación | Dirección de Innovación y Transferencia tecnológica | Unidad de Promoción, Difusión y Repositorio

turnitin

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Por medio del presente y de acuerdo al siguiente detalle:

- Trabajo de investigación, titulado:
  "PROTOTIPO DE MONITOREO REMOTO PARA EL CONTROL DEL SISTEMA DE RETORNO DE AGUA DE INFILTRACIÓN DE RELAVE DEL SUMIDERO EN LA UNIDAD MINERA SAN RAFAEL"
- Presentado por:
  CASAVILCA ROJAS, RONALD
- Docente asesor (a):
  POMA PALACIOS, JAVIER CAMILO
- Para obtener:
  El TÍTULO PROFESIONAL: **INGENIERO(A) ELECTRÓNICO**

La Unidad de Promoción, Difusión y Repositorio, **certifica que es un trabajo de investigación original,** se encuentra dentro del porcentaje permitido de coincidencia por la Universidad Nacional de Huancavelica.
Por tanto, en cumplimiento del Art.4° del Reglamento del Software Anti plagio de la Universidad Nacional de Huancavelica, se dictamina que el trabajo de investigación fue analizado por el software anti plagio **TURNITIN** (realizado por el docente Asesor), se expide el presente.

ORIGINALIDAD	SIMILITUD
77%	23%

El Certificado se expide el 05 de septiembre de 2024.

Verificar la autenticidad del presente documento en el siguiente QR.

TP: 00123 - 2024

UNH | Vicerrectorado de Investigación | Dirección de Innovación y Transferencia tecnológica | Unidad de Promoción, Difusión y Repositorio

turnitin

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Por medio del presente y de acuerdo al siguiente detalle:

- Trabajo de investigación, titulado:
  "PROTOTIPO DE MONITOREO REMOTO PARA EL CONTROL DEL SISTEMA DE RETORNO DE AGUA DE INFILTRACIÓN DE RELAVE DEL SUMIDERO EN LA UNIDAD MINERA SAN RAFAEL"
- Presentado por:
  ANTONIO CHAVEZ, ROGER
- Docente asesor (a):
  POMA PALACIOS, JAVIER CAMILO
- Para obtener:
  El TÍTULO PROFESIONAL: **INGENIERO(A) ELECTRÓNICO**

La Unidad de Promoción, Difusión y Repositorio, **certifica que es un trabajo de investigación original,** se encuentra dentro del porcentaje permitido de coincidencia por la Universidad Nacional de Huancavelica.
Por tanto, en cumplimiento del Art.4° del Reglamento del Software Anti plagio de la Universidad Nacional de Huancavelica, se dictamina que el trabajo de investigación fue analizado por el software anti plagio **TURNITIN** (realizado por el docente Asesor), se expide el presente.

ORIGINALIDAD	SIMILITUD
77%	23%

El Certificado se expide el 04 de octubre de 2024.

Verificar la autenticidad del presente documento en el siguiente QR.

TP: 00125 - 2024

Título

Prototipo de Monitoreo Remoto para el Control del Sistema de Retorno de Agua de Infiltración de Relave del Sumidero en la Unidad Minera San Rafael

Autores

Ronald CASAVILCA ROJAS

DNI N° 43014132

Roger ANTONIO CHÁVEZ

DNI N° 41798023

Asesor

Dr. Javier Camilo POMA PALACIOS

ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-8527-809X

DNI Nº 07072546

Dedicatoria

El presente trabajo está dedicado a Dios por acompañarme a lo largo de mi carrera profesional, permitiendo alcanzar cada una de las metas que me propuse.

A mis padres por haberme brindado su infinito apoyo incondicional para lograr que mi sueño se haga realidad de ser profesional; a todos mis maestros que dieron lo mejor para formarnos como profesionales de éxito. Con mi admiración y gratitud para todos ustedes.

Ronald Casavilca Rojas

Le dedico el resultado de este trabajo a toda mi familia. Principalmente, a mis padres que me apoyaron y contuvieron los momentos malos y en los menos malos. Gracias por enseñarme a afrontar las dificultades sin perder nunca la cabeza ni morir en el intento.

Me han enseñado a ser la persona que soy hoy, mis principios, mis valores, mi perseverancia y mi empeño. Todo esto con una enorme dosis de amor y sin pedir nada a cambio.

Roger Antonio Chávez

Agradecimiento

Agradezco a Dios, por darme la vida, sabiduría y fuerza para poder persistir y hacer logros en este mundo.

A todos los catedráticos de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la UNH, por impartir una formación humana científica y tecnológica durante los cinco años académicos.

Ronald Casavilca Rojas

Agradezco a Dios, por darme la vida, sabiduría y fuerza para poder persistir y hacer logros en este mundo.

Gracias a mi universidad, gracias por haberme permitido y en ella, gracias a todas las personas que fueron participes de este proceso y a mis compañeros que día a día se convirtieron en mis amigos incondicionales que marcaron una huella en mi vida.

Roger Antonio Chávez

Tabla de contenidos

Acta de sustentación ii
Certificado de similitud iii
Título iv
Autores v
Asesor vi
Dedicatoria vii
Agradecimiento viii
Tabla de contenidos ix
Tabla de contenido de cuadros xii
Tabla de contenido de figuras xiii
Resumen xvi
Abstract xvii
Introducción xviii
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 19
1.1 Descripción del problema 19
1.2 Formulación del problema 24
1.2.1 Problema general 24
1.2.2 Problemas específicos 24
1.3 Objetivos 25
1.3.1 Objetivo general 25
1.3.2 Objetivos específicos 25
1.4 Justificación 26
1.5 Limitaciones 27
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO 29
2.1 Antecedentes 29
2.1.1 Internacional 29
2.1.2 Nacional 33
2.2 Bases teóricas 35
2.2.1 Relave minero 35
2.2.2 Sistemas de bombeo de agua de mina 38

2.2.3 Tecnologías de comunicación inalámbrica 42
2.2.4 Arduino Nano 53
2.2.5 Sensor de nivel ultrasónico JSN-SR04T 56
2.2.6 Sensor de corriente SCT-013-030 60
2.2.7 Programas para el tratamiento de datos 61
2.3 Definición de términos 66
2.4 Variables 69
2.5 Operacionalización de variables 70
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS 71
3.1 Ámbito temporal y espacial 71
3.2 Tipo de investigación 71
3.3 Nivel de investigación 72
3.4 Métodos de investigación 72
3.4.1 Módulo controlado 74
3.4.2 Módulo de monitoreo 81
3.5 Diseño de investigación 83
3.6 Población, muestra y muestreo 83
3.7 Técnicas e instrumento de recolección de datos 84
3.8 Técnicas de procesamiento y análisis de datos 91
CAPÍTULO IV DISCUSIÓN DE RESULTADOS 96
4.1 Análisis de información 96
4.1.1 Pruebas por partes 96
4.1.2 Pruebas de integración 114
4.1.3 Pruebas al prototipo completo con ProgMoni 119
4.2 Resultados 120
4.3 Discusión de resultados 130
CONCLUSIONES 135
RECOMENDACIONES 137
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA 138
APÉNDICE 145
Apéndice A. Fotografías 145

Apéndice B. Datos adquiridos con Arduino IDE 150
Apéndice C. Datos adquiridos para ProgMoni 159
Apéndice D. Programa Arduino nano módulo Controlado y Monitoreo. 163
Apéndice E. Matriz de consistencia 173

Tabla de contenido de cuadros

Tabla 1 *Comparación de las características de las tecnologías LPWAN* 44
Tabla 2 *Características de la tarjeta LoRa Ra-02* 51
Tabla 3 *Especificaciones técnicas de Arduino Nano* 54
Tabla 4 *Definición operativa de variables* 70
Tabla 5 *Muestra los valores que toma Z y E* 84
Tabla 6 *Formato de la trama de datos transmitido* 90
Tabla 7 *Formato de la trama de datos que ingresa a ProgMoni* 91
Tabla 8 *Tabla generada por el programa ProgMoni* 95
Tabla 9 *Pruebas al prototipo por partes* 97
Tabla 10 *Medidas de nivel de agua en el tanque* 100
Tabla 11 *Intensidad de corriente de cada electrobomba* 102
Tabla 12 *Intensidad de corriente en simultaneo de dos electrobombas* 104
Tabla 13 *Intensidades de corriente de M1, M2 y M3 simultaneo* 106
Tabla 14 *Valores configurados en tarjetas LoRa Ra-02* 107
Tabla 15 *Valores máximos y mínimos para la distancia de 500 m* 108
Tabla 16 *Valores máximos y mínimos para la distancia de 1.0 km* 108
Tabla 17 *Valores máximos y mínimos para la distancia de 2.01 km* 108
Tabla 18 *Pruebas que validan la integración del prototipo* 115
Tabla 19 *Registro de datos con el programa ProgMoni en LabVIEW* 125

Tabla de contenido de figuras

Figura 1 *Sistema de retorno de agua de infiltración existente* 21
Figura 2 *Sistema de retorno de agua de infiltración en el dique B3* 22
Figura 3 *Publicación sobre posible contaminación por agua de relave* 24
Figura 4 *Vista aérea de la unidad minera San Rafael* 27
Figura 5 *Ubicación de relave B2 y B3 en UM San Rafael* 36
Figura 6 *Sistema de retorno de agua de infiltración* 37
Figura 7 *Tablero de control eléctrico y sus partes* 40
Figura 8 *Aspecto de una electrobomba* 42
Figura 9 *Principales tecnologías inalámbricas* 43
Figura 10 *Regiones según la Unión Internacional de Telecomunicaciones* 46
Figura 11 *Diagrama de bloques con características de SX1278.* 47
Figura 12 *Ancho de banda y alcance de LoRa* 48
Figura 13 *Tarjeta LoRa Ra-02 (SX1278) con antena SMA* 51
Figura 14 *Enlace punto a punto* 52
Figura 15 *Enlace punto a multipunto* 53
Figura 16 *Módulo Arduino Nano V3.0.* 55
Figura 17 *Principio de funcionamiento de un sensor de ultrasonido* 57
Figura 18 *Diagrama de un sistema de medida por ultrasonido* 60
Figura 19 *Sensor de corriente no invasivo* 60
Figura 20 *Interface de programación de Arduino IDE* 62
Figura 21 *Interface de programación de LabVIEW* 64
Figura 22 *Esquema general de la metodología de investigación* 73
Figura 23 *Módulo controlado completo* 75
Figura 24 *Diagrama de bloques del módulo controlado completo* 77
Figura 25 *Esquema del circuito eléctrico de potencia* 78
Figura 26 *Esquema del circuito eléctrico de control* 79
Figura 27 *Esquema del circuito electrónico de recepción* 80
Figura 28 *Módulo de monitoreo completo* 81
Figura 29 *Esquema del circuito electrónico de la unidad de monitoreo* 82

Figura 30 *Diagrama general del sistema electrónico implementado* 85
Figura 31 *Módulo controlado implementado* 86
Figura 32 *Módulo de monitoreo implementado* 87
Figura 33 *Diagrama de flujo del algoritmo de lectura de datos: sensor de nivel* 88
Figura 34 *Diagrama de flujo del algoritmo de lectura: sensores de corriente* 89
Figura 35 D*iagrama de flujo del algoritmo del sistema de adquisición, procesamiento y comunicación de datos* 89
Figura 36 *Panel frontal del programa ProgMoni* 93
Figura 37 *Diagrama de bloques del programa ProgMoni* 94
Figura 38 *Posición del sensor de nivel ultrasónico JSN-SR04T* 97
Figura 39 *Conexión del circuito de adaptación del sensor JSN-SR04T* 98
Figura 40 *Medidas de nivel de agua con flexómetro para 80.0 cm* 98
Figura 41 *Medidas de nivel de agua con flexómetro para 57.2 cm* 99
Figura 42 *Medidas de nivel de agua con flexómetro para 32.0 cm* 99
Figura 43 *Sensores de corriente en tablero y electrobombas* 101
Figura 44 *Medición de la corriente en funcionamiento individual* 102
Figura 45 *Adquisición de corriente eléctrica que consume M1* 103
Figura 46 *Medición de corriente en funcionamiento simultaneo de M1-M2* 103
Figura 47 *Adquisición de corriente que consumen M1-M2* 104
Figura 48 *Medición de corriente en funcionamiento simultaneo* 105
Figura 49 *Adquisición de corriente en funcionamiento de M1, M2 y M3* 105
Figura 50 *Medición de corriente de M1, M2 y M3 en simultaneo* 106
Figura 51 *Distancia entre el centro de monitoreo y la sala de bombas* 110
Figura 52 *Puntos de enlace de comunicación para 500 m* 111
Figura 53 *Puntos de enlace de comunicación para 1.0 km* 112
Figura 54 *Puntos de enlace de comunicación para 2.01 km* 113
Figura 55 *Instalación del transceptor LoRa Ra-02* 114
Figura 56 *Prueba de integración, módulo: (a) controlado (b) de monitoreo* 115
Figura 57 *Adquisición y registro de datos con Arduino IDE* 117
Figura 58 *Gráfico de nivel de agua con datos registrados* 118
Figura 59 *Gráfico de consumo de corriente con datos registrados* 118

Figura 60 *Gráfico de consumo de corriente con datos registrados* 119
Figura 61 *Prototipo final implementado ubicado en campo* 121
Figura 62 *Panel frontal del programa ProgMoni* 124
Figura 63 *Gráfico de nivel de agua con datos registrados en ProgMoni* 126
Figura 64 *Gráfico de consumo de corriente en ProgMoni* 127
Figura 65 *Gráfico de RSSI con datos registrados en ProgMoni* 128
Figura 66 *Gráfico de SNR con datos registrados en ProgMoni* 129

Resumen

La investigación se realizó debido a que en la unidad minera San Rafael, durante la temporada de invierno en los Andes, las lluvias aumentan, elevando el caudal de infiltración de agua del dique B3. Se gestiona esto, con dos bombas centrífugas, funcionando en alternancia según el nivel del sumidero, los cuales retornan el agua a la relavera B3; cuando una bomba falla causaría desbordamiento. Así mismo durante los cambios de turno, el operario se ausenta por lo menos 3 horas, teniéndose latente el rebose del reservorio de emergencia. Los operarios monitorean el nivel del sumidero las 24 horas y arrancan la tercera bomba manualmente cuando la sirena de emergencia se activa; debido a esto se planteó el problema siguiente: ¿Cómo implementar un prototipo a escala de monitoreo remoto que controla el retorno de agua de infiltración de relave del sumidero en la unidad minera San Rafael? El prototipo a escala implementado, está conformado por el módulo controlado y el módulo de monitoreo. El módulo controlado, conformado por: tanques de agua de polietileno, bombas centrifugas, tablero de control eléctrico, sensores de corriente, transceptor LoRa Ra-02, tarjeta Arduino Nano, sensor de nivel de agua y Laptop; se encargaron del control on/off de las tres electrobombas y alarma, según el nivel de agua del tanque; tiempo de muestreo para el nivel de agua de infiltración y corriente de consumo. Cuenta con el circuito electrónico para adquirir y trasmitir los datos o recibir datos de control. El módulo de monitoreo, conformado por: Laptop, transceptor LoRa Ra-02 y tarjeta Arduino Nano; monitorea remotamente las variables, que serán mostrados gráficamente y numéricamente en el programa ProgMoni. El tipo de investigación es tecnológica; utiliza el método cuasiexperimental, en el monitoreo de nivel de agua de infiltración, consumo de corriente de las electrobombas, su estado de funcionamiento, estado de la alarma y los niveles de RSSI y SNR. Se realizaron 8640 pruebas experimentales durante 3 días, las 24 horas, registrando los datos cada 30 segundos. El sistema de monitoreo remoto a escala presenta una efectividad mayor al 99% y el diagnóstico de operatividad del sistema implementado a escala fue mejorado en 50%.

Palabras clave: Agua de mina, monitoreo remoto, transceptor LoRa, RSSI.

Los autores.

Abstract

The research was conducted because in the San Rafael mining unit, during the winter season in the Andes, rainfall increases, raising the water infiltration flow of dam B3. This is managed with two centrifugal pumps, operating in alternation according to the level of the sump, which return the water to the B3 tailings dam; when one pump fails it would cause overflow. Also, during shift changes, the operator is absent for at least 3 hours, which could cause the emergency reservoir to overflow. The operators monitor the sump level 24 hours a day and start the third pump manually when the emergency siren is activated; because of this the following problem was posed: How to implement a scaled prototype of remote monitoring that controls the return of tailings seepage water from the sump at the San Rafael mining unit?

The implemented scaled prototype consists of the controlled module and the monitoring module. The controlled module, consisting of: polyethylene water tanks, centrifugal pumps, electrical control board, current sensors, LoRa Ra-02 transceiver, Arduino Nano board, water level sensor and laptop, was responsible for the on/off control of the three electric pumps and alarm, according to the water level in the tank; sampling time for the infiltration water level and consumption current. It has the electronic circuit to acquire and transmit data or receive control data. The monitoring module, consisting of: Laptop, LoRa Ra-02 transceiver and Arduino Nano board; remotely monitors the variables, which will be displayed graphically and numerically in the ProgMoni program.

The type of research is technological; it uses the quasi-experimental method, monitoring the infiltration water level, current consumption of the electric pumps, their operating status, alarm status and RSSI and SNR levels.

A total of 8640 experimental tests were conducted over 3 days, 24 hours a day, recording data every 30 seconds. The remote monitoring system at scale presents an effectiveness greater than 99% and the operability diagnosis of the system implemented at scale was improved by 50%.

Keywords: Mine water, remote monitoring, LoRa transceiver, RSSI.

Authors.

Introducción

La minería se distingue por la considerable generación de residuos, entre los cuales se encuentran aquellos con el potencial de ser tóxicos y peligrosos tanto para la población como para los ecosistemas. El avance de la tecnología en diferentes campos de la automatización y control permiten crear nuevas aplicaciones para controlar y monitorear las variables del sistema, permitiendo la utilización de datos con el fin de tomar medidas pertinentes en situaciones de emergencia o imprevistos.

El agua captada por infiltración del dique B3 contiene contaminantes como xantatos, ditiofosfatos, mercaptanos, espumantes, ácido sulfúrico o hidróxido de sodio, además de azufre, arsénico y otros metales disueltos. Estas sustancias, presentes en el agua, son nocivas para la actividad biológica y contaminan los cauces de ríos y riachuelos cuando se descargan directamente. Esto puede tener efectos adversos en la salud, ya que se utilizan para consumo humano, riego o como bebedero para animales.

La investigación se llevó a cabo en 4 etapas. En primer lugar, se recopiló información de libros y principalmente de páginas web. En la segunda etapa, se realizó el estudio y análisis de la información recopilada, concentrada principalmente en los capítulos 1, 2 y 3, así como en el anexo. En la tercera etapa se procedió el diseño, rediseño y simulación a nivel hardware y software de los esquemas de los circuitos electrónicos del módulo controlado y del módulo de monitoreo, utilizando el CAD electrónico Proteus Design Suite 8.14 y Arduino IDE. En la cuarta etapa, se optimizó los programas para las tarjetas de Arduino nano, se desarrolló el aplicativo ProgMoni y se realizó la toma de datos utilizando el módulo controlado y el módulo de monitoreo.

En el proceso de investigación, se detalló el desarrollo de un prototipo a escala para el monitoreo remoto del sistema de retorno de agua de infiltración de relave del sumidero en la mina San Rafael. Además, se expuso el conjunto de elementos de hardware y software que resultaron necesarios para monitorizar, automatizar y acceder a los datos necesarios de forma remota, empleando el entorno LabVIEW y la tecnología LoRa.

Los autores.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

En todos los proyectos mineros (Espín, Jarrín, & Escobar, 2017), ya sean de mediana o gran escala, se observa la presencia de depósitos de relaves que acumulan materiales sólidos finos desechados como resultado de las operaciones de separación y obtención de concentrados minerales. Estos relaves mineros generan diversos problemas, entre los que se incluyen la contaminación de la flora y fauna, del medio ambiente y del agua de los ríos. Este último es utilizado para riego en la agricultura, consumo humano, bebedero de animales y otras actividades cotidianas.

El marco legal peruano aborda esta problemática y la previene en el Decreto Ley 17752, en su capítulo II, artículo 22, que establece de manera explícita: "Está prohibido verter o emitir cualquier residuo, ya sea sólido, líquido o gaseoso, que pueda contaminar las aguas, causando daños o poniendo en peligro la salud humana, así como el desarrollo normal de la flora y fauna, comprometiendo su uso para otras finalidades" (Congreso del Perú, 1991).

San Rafael (MINSUR, 2016) es una mina subterránea; Minsur S.A. es la propietaria e inició operaciones en octubre de 1977, en la actualidad produce el

12% de estaño del mundo. Asimismo, genera el mayor ingreso para la región Puno y es el principal motor de su desarrollo económico. Trata minerales de casiterita (SNO_2) a razón de 2830 TM/día, con leyes promedio de cabeza de 2.65% Sn y recuperaciones de 89%. Utiliza dos métodos de concentración: gravimétrica con una flotación inversa y flotación directa.

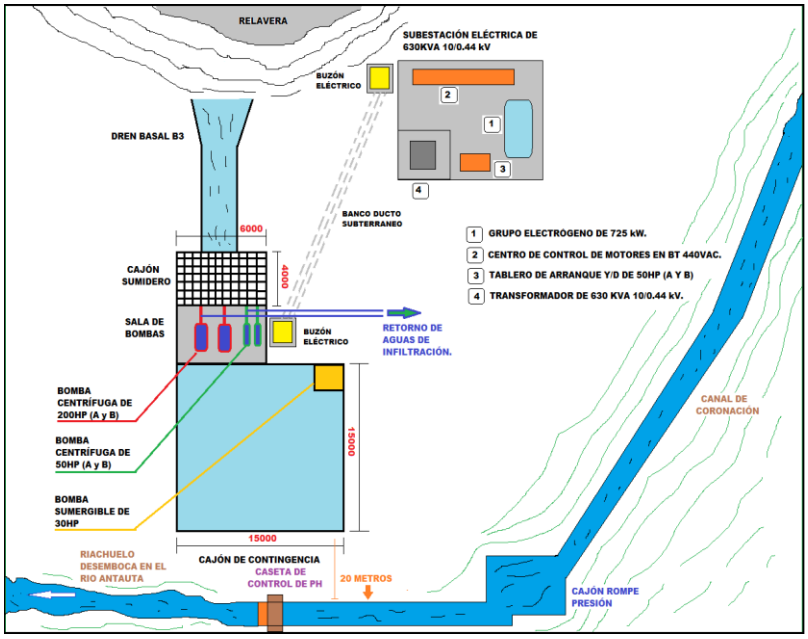
La unidad minera San Rafael utiliza grandes cantidades de agua captada de diversas fuentes para los distintos procesos que se llevan a cabo en su planta, así como para otras actividades. Así mismo, la proporción de agua (Oldecop, Zabala, Rodríguez Pacheco, & Lucas, 2008) en relación a los sólidos es mayor de 3:1 en volumen. Eso significa que la propia operación de vertido de los relaves dentro del depósito, implica un aporte muy significativo en volumen de agua.

El sistema de retorno de infiltración de agua de la relavera B3 es crucial para mantener la estabilidad y seguridad ante un desborde de agua contaminada. El sumidero recoge el agua infiltrada, canalizándola hacia la sala de bombas, donde se gestionan los procesos de bombeo necesarios. En caso de rebose, la poza de contingencia ofrece una reserva para contener el agua. La subestación eléctrica proporciona la energía necesaria para el funcionamiento del sistema de bombeo, asegurando su operatividad constante y eficiente. Este conjunto de elementos garantiza un control integral local del agua infiltrada, minimizando los riesgos ambientales y operativos (MINSUR, 2016).

El sumidero tiene las dimensiones de 4x6x2 metros, con capacidad de almacenamiento 46000 litros de agua. La sala de bombas consta de los siguientes equipos: dos bombas centrifugas de la marca hidrostal de 200HP, 440VAC, con línea de descarga 400 m de 14”; dos bombas centrifugas de la marca hidrostal de 50HP, 440VAC con línea de descarga de 6” de diámetro. La poza de contingencia es de concreto con capacidad de almacenar 450000 litros de agua y cuenta con una bomba sumergible de 30HP 440VAC (ver figura 1).

Figura 1

Sistema de retorno de agua de infiltración existente



La subestación consta de los siguientes equipos: Transformador de distribución de 630kVA, 10/0.48kV, grupo electrógeno insonorizado de 1000kVA, 480VAC, tablero de transferencia automática, dos arrancadores de 200HP mediante variador de frecuencia, dos tableros arrancadores estrella triangulo de 50HP, trasformador tipo seco de 25kVA 0.46/0.22 kV trifásico, transformador de instrumentación de 10kVA 220/120V monofásico y un tablero de distribución de servicios auxiliares en 220VAC.

El sistema de infiltración del dique B3 tiene un caudal máximo de 100 l/s, el cual se almacena en el sumidero. El sistema de retorno de infiltración bombea las aguas a la relavera B3 y otro sistema de bombeo desde la relavera B3 retorna el agua a tanques de gran dimensión para su reúso en la planta concentradora y de relleno. La estación de bombeo emplea dos bombas centrifugas, cada uno con capacidad de bombeo 75 l/s con una carga de 104m, una de las bombas se denomina bomba primaria y la otra, bomba secundaria. La operación de bombeo es controlada automáticamente mediante unos interruptores del tipo flotador ubicados en el sumidero. El interruptor tipo

flotador de la bomba secundaria solo se enciende cuando el flujo de ingreso exceda la capacidad de la bomba primaria al igual que la bomba de 50HP que esta de contingencia ante una emergencia y es accionado localmente de forma manual. Las bombas primaria y secundaria son accionados por motores eléctricos de 200HP. En caso de ocurrir una emergencia debido a la perdida de energía, mal funcionamiento o mantenimiento de las bombas, el agua se almacena en la poza de contingencia de 450 000 litros. El llenado de esta poza requiere 75 minutos con un caudal máximo estimado de 100 l/s. cuando la poza de contingencia empieza a llenarse, se enciende en forma automática la bomba sumergible y retorna el agua hacia el sumidero, y cuando el nivel de agua llega al 90% del sumidero, se activa una sirena estroboscópica alertando al operador para que accione la bomba de 50HP. Los arrancadores de las bombas primaria y secundaria están implementados en modo manual y automático y de la bomba de contingencia en modo manual y remoto. Todas las bombas trabajan en las posiciones on/off. El sistema de bombeo de agua de infiltración es monitoreado por operadores de turno las 24 horas con ausencia en los horarios de cambio de guardia de 5:00 pm a 8:00 pm y de 6:00 am a 8:00 am (MINSUR, 2016).

Figura 2

Sistema de retorno de agua de infiltración en el dique B3

Fuente: (MINSUR, 2016)

En los meses de diciembre hasta marzo, las lluvias en los andes aumenta, motivo por el cual en los alrededores de la unidad minera San Rafael crecen las precipitaciones, aumentando el caudal de infiltración de agua en el dique B3. Este aumento de caudal ocasiona el constante llenado del sumidero.

La responsabilidad del personal de mantenimiento y medio ambiente de la unidad minera San Rafael es prevenir el desbordamiento de agua infiltrada hacia el riachuelo, situado a 20 metros de la poza de emergencia. En numerosas ocasiones, debido a cortes de energía, fallos en la bomba o ausencia de operadores, se ha observado el llenado de la poza de emergencia, lo que expone el potencial rebose de agua hacia el riachuelo. Este rebose podría tener un impacto ambiental negativo, lo que podría acarrear sanciones severas por parte del Ministerio de Energía y Minas (MEM) a la empresa.

El distrito de Antauta cuenta con 22,667 habitantes, cuyas principales actividades económicas son la minería, la agricultura y la ganadería. En caso de producirse un desbordamiento de las aguas infiltradas hacia el riachuelo que desemboca en el rio Antauta, que se ubica a 20 metros de la poza de contingencia del sistema de retorno de aguas de infiltración, afectaría todos los elementos que se encuentran aguas abajo del riachuelo como: río Antauta y sus afluentes, así como las infraestructuras asociadas, los abrevaderos de ganado, las piscigranjas de truchas, la agricultura y otros. La contaminación resultante afectaría a toda la población de manera directa o indirectamente.

La problemática en el sistema de retorno de aguas de infiltración en el dique B3 de la unidad minera San Rafael es latente durante la estación de invierno, cuando las precipitaciones aumentan significativamente, por ausencia de energía, avería de una de las bombas. Esto incrementa la probabilidad de desbordamiento, dado que el sistema de retorno de agua de infiltración de la relavera B3 fue construido con un sistema de control muy elemental. Como se evidenció el 13 de mayo de 2020; que se observa en la Figura 3, el cual fue puesto en evidencia por el diario La República (La Republica, 2020).

Figura 3

Publicación sobre posible contaminación por agua de relave

La República

ELECCIONES 2021 POLÍTICA ECONOMÍA SOCIEDAD MUNDO DEPORTES ESPECTÁCULOS REDE

SOCIEDAD

Puno: Piden investigar aparición de truchas muertas en río de Antauta

13 May 2020 | 22:12 h
Actualizado el 13 de Mayo 2020 | 22:16 h

Puno. Extraño caso preocupa cada vez más a pobladores y autoridades.

Preocupación entre los comuneros por aparición de peces. Sospechas apuntan a minera, pero la Autoridad Nacional del Agua ya tendría algunos estudios.

Fuente: (La Republica, 2020)

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cómo implementar un prototipo a escala de monitoreo remoto que controla el retorno de agua de infiltración de relave del sumidero en la unidad minera San Rafael?

1.2.2 Problemas específicos

a. ¿Cómo implementar un prototipo de monitoreo remoto que controla el nivel de agua de infiltración de relave del sumidero, en la unidad minera San Rafael?

b. ¿Cómo implementar un prototipo de monitoreo remoto que verifica el funcionamiento de las electrobombas de drenaje de agua de infiltración de relave del sumidero en la unidad minera San Rafael?

c. ¿Cómo implementar un prototipo de monitoreo remoto que active la alarma señalando el mal funcionamiento del sistema de retorno de agua de infiltración de relave del sumidero en la unidad minera San Rafael?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Implementar un prototipo a escala de monitoreo remoto que controla el retorno de agua de infiltración de relave del sumidero en la unidad minera San Rafael.

1.3.2 Objetivos específicos

a. Implementar un prototipo de monitoreo remoto que controla el nivel de agua de infiltración de relave del sumidero en la unidad minera San Rafael.

b. Implementar un prototipo de monitoreo remoto que verifica el funcionamiento de las electrobombas de drenaje de agua de infiltración de relave del sumidero en la unidad minera San Rafael.

c. Implementar un prototipo de monitoreo remoto que activa la alarma sonora y luminosa que señala el mal funcionamiento del sistema de retorno de agua de infiltración de relave del sumidero en la unidad minera San Rafael.

1.4 Justificación

Hoy en día el avance de la tecnología brinda varias herramientas para utilizar y tener el mayor provecho, como los dispositivos de enlace inalámbrico LoRa, en aplicaciones de tipo industrial. Con la aplicación de la tecnología en el campo industrial, se suman una gran variedad de dispositivos compatibles; es posible crear y desarrollar un sistema versátil de monitoreo, automatización y control adaptable a diversos procesos industriales.

En la actualidad la gestión sostenible e integrada de los recursos hídricos es uno de los problemas más complicados. El crecimiento poblacional está creando una gran demanda y fuerte presión sobre el recurso hídrico e infraestructura de suministro; lo que ha ocasionado que asegurar un suministro de agua seguro, suficiente y asequible es casi imposible; sobre todo donde se encuentra la minería, donde el agua de manantiales, lagunas, de ríos o riachuelos son utilizados para el consumo humano, para bebedero de animales, riego de plantaciones, pastizales y otros; pero debido a la cercanía de la población a los centros de explotación minero; el agua puede ser contaminado con agua de infiltración del relave, a pesar que la empresa minera cuenta con diversos sistemas para que no ocurra esta situación. La contaminación del agua, podría llevar a la gradual desaparición de los habitantes, animales y plantas.

En nuestros días la tecnología avanza con rapidez, surgen muchas necesidades que requieren soluciones innovadoras, rápidas y precisas. En el mercado existen productos que solventan estas necesidades; sin embargo, los elevados precios a los que se encuentran disponibles, limitan enormemente el acceso a los mismos. Por tanto, el presente proyecto satisface parte de las necesidades, a un costo reducido, como un inicio para resolver la problemática latente.

Este proyecto integra una amplia gama de conocimientos y habilidades adquiridas durante la carrera, lo que permite a los estudiantes desarrollar una

herramienta con características iguales o superiores a las descritas en este proyecto. Además, servirá como referencia a los estudiantes de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica, para futuras investigaciones sobre monitoreo, control y automatismos de procesos industriales en altitudes superiores a los 4500 metros sobre el nivel del mar.

1.5 Limitaciones

La investigación se realizó en la unidad minera San Rafael (ver Figura 4), se encuentra ubicada (MINSUR, 2021) en el departamento de Puno, provincia de Melgar, distrito de Antauta, en el nevado de Quenamari de la Cordillera de Carabaya, siendo este un segmento de la cordillera Oriental de los Andes, ubicado en 14.232729° S y 70.32074° O a una altura entre 4500 m.s.n.m. a 5200 m.s.n.m.; aproximadamente a 1200 km al sureste de Lima. En el minado se aplica el método de explotación "Sub Level Stoping" con la variante Large Blast Hole (LBH), en bancos con subniveles de 12 a 20 metros de altura que conforman los niveles de perforación y voladura.

Figura 4

Vista aérea de la unidad minera San Rafael

Fuente: Google Earth

El mineral extraído pasa por un proceso de reducción de tamaño en tres etapas; se inicia la concentración gravimétrica en jigs Gekko y Bendelari, donde se recupera el 50% del estaño, el material remanente es molido a un grado de mayor finura, tratado en la concentradora y remolido a malla, se recupera otro porcentaje. El material sobrante va hacia un depósito espesador en el que se separa el agua del relave; el agua es tratada para su reutilización y el relave va hacia la relavera.

El clima característico del área correspondiente a la mina San Rafael es frio de alta montaña de acuerdo a la posición geográfica por encontrarse en la falda del nevado Quenamari en la cordillera Carabaya. Para las condiciones ambientales inclementes que existe en esta mina, se implemento un prototipo de monitoreo remoto que controla el sistema de retorno de agua de infiltración de relave del sumidero. Este prototipo a escala, controla el nivel de agua de infiltración, verifica el funcionamiento de las electrobombas de drenaje de agua de infiltración, y activa la alarma sonora y luminosa que señala el mal funcionamiento del sistema de retorno de agua de infiltración de relave del sumidero en la unidad minera San Rafael, evitando el rebose de la poza de contingencia, lo cual impide la contaminación del rio Antauta través del riachuelo, que es afluente.

El prototipo implementado a escala presenta una limitación fundamental: su tamaño reducido. Esta elección se debió a los elevados costos asociados con la implementación, el traslado y la instalación de un prototipo a tamaño real. Además, durante las pruebas experimentales realizadas en las inmediaciones de la mina San Rafael, un entorno caracterizado por condiciones climáticas adversas y agreste, surgió otra limitación; no fue posible llevar a cabo las pruebas directamente en las instalaciones de la mina debido a la estricta política de la empresa, que prohíbe cualquier interferencia en sus operaciones diarias de explotación minera, lo cual complicó la evaluación del prototipo en condiciones reales de funcionamiento en las instalaciones de la mina.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Existen varios antecedentes que tratan el tema de la monitorización, automatización y transmisión de datos a distancia, tanto de agua de relave, agua potable como para cualquier otro ámbito. En algunos solo se monitoriza y automatiza, en otros se actúa, en otros se monitoriza y se transmiten datos y no se actúa de forma programada, etc.

2.1.1 Internacional

Trabajo de titulación para optar al título profesional de ingeniero de ejecución en control e instrumentación industrial: **“Diseño de un sistema de monitoreo remoto para minera El Peñón”**. Universidad Técnica Federico Santa María, Chile - 2023 (Sánchez González, 2023).

Esa tesis se centra en la implementación de un sistema de telemetría en una empresa minera utilizando la tecnología LoRa como base de la red. Se busca medir variables críticas como el consumo de energía eléctrica, el consumo hídrico y la temperatura ambiente.

La problemática se presenta detalladamente, describiendo el problema y su importancia. También se mencionan los involucrados en el proyecto. Se propone una solución al problema y se establecen los requerimientos necesarios. En los antecedentes generales, se describen la minera El Peñón y el concepto de Internet de las cosas (IOT) industrial, así como su funcionamiento y aplicaciones.

Se realizó el diseño de la solución para el sistema de monitoreo, proporcionando el fundamento teórico de la tecnología LoRa, incluyendo Lora WAN, la modulación Lora y los parámetros principales. Se explican las topologías de red, los medios de transmisión y los componentes principales de una red LoRa. También se abordan las bandas de frecuencia utilizadas, la interferencia, la seguridad y los métodos de activación.

Se detalla la selección de hardware y software, incluyendo la elección de la puerta de enlace, los sensores de flujo, el medidor de energía eléctrica y el sensor de temperatura. Se selecciona una plataforma web para el sistema y se describen las ubicaciones de los componentes de la red.

De esta investigación se utiliza lo referente a la instalación eléctricas. La simulación referente a la instalación y las pruebas de enlace punto a punto, simulación de paquetes recibidos con los módulos Lora de un sistema de monitoreo remoto para minera El Peñón.

Trabajo de fin de master: **“Diseño de un sistema de monitorización remota de un depósito de agua mediante LoRa”**. Universidad Oberta de Catalunya, España - 2019 (De la Cámara, 2019).

En este trabajo se implementa un sistema que permite monitorizar y transmitir datos de un depósito de agua para consumo humano, típico de pequeñas poblaciones; se monitorea los parámetros como el nivel del

depósito, pH del agua, temperatura y humedad relativa (con el sensor DHT11). Utiliza el entorno Arduino como sistema de monitorización, para transmisión (enlace de RF) emplea la tecnología LoRa para tener acceso a los datos de forma remota. Utiliza los módulos TTGO LORA32 V2.1_1.6, ya que presentan la ventaja de la pantalla OLED, que permite la visualización de la información directamente.

De esta investigación se utiliza lo referente a la instalación y las pruebas de enlace punto a punto de paquetes recibidos con los módulos Lora.

Tesis para obtener título de ingeniero en mecatrónica: **"Unidad de adquisición y transferencia de variables remotas para el monitoreo en tanques de almacenamiento de agua potable"**. Universidad Técnica del Norte, Ecuador - 2018 (Salazar Vilañez, 2018).

La investigación detalla la construcción de una unidad de adquisición y transferencia de variables (sensor de ultrasonido de la marca SICK UM30-215113 con grado de protección IP67) remotas para monitorear tanques de almacenamiento de agua potable. Utiliza PLC DVP16ES2 conjuntamente con su tablero de control para los motores de las bombas y pantalla HMI DELTA DOP-B3211 para visualizar los parámetros.

De esta investigación se utiliza lo referente a la instalación eléctricas de electrobombas, tableros de control y sensor de ultrasonido. La simulación de enlace punto a punto utilizando el programa radio móvil, para el monitoreo de tanques en una planta de tratamiento de agua potable.

Trabajo de fin de master: **"Dispositivo LoRa de comunicación a largo alcance y bajo consumo energético para aplicaciones del ámbito del desarrollo"**. Universidad Politécnica de Madrid -

Universidad Complutense de Madrid, España - 2016 (Rodríguez Munca, 2016).

En esta investigación se propuso el desarrollo de un controlador (programa) para dispositivos LoRa SX127X, llevando a cabo pruebas de alcance y consumo energético. Además, se documentó la librería sobre el uso y control de los dispositivos en condiciones reales, tanto en ambientes interiores (con obstáculos como infraestructuras y muros) como en ambientes exteriores (con obstáculos como vegetación: arboles, matorrales, etc.). Se emplearon las tarjetas de desarrollo Arduino Uno, DUE y SDIN (plataforma de adquisición de datos con microcontrolador ARM de 32 bits) utilizando herramientas de software libre como el IDE Eclipse. Se consideraron de forma transversal las posibles aplicaciones de la tecnología explorada en áreas como el agua, el saneamiento, la energía y la salud, en relación con Big Data, Internet de las cosas (IoT) y los principios del desarrollo digital.

De este trabajo se utiliza lo referente a las pruebas de alcance del enlace RF, consumo energético y control de los dispositivos en condiciones reales como espacio Outdoor (obstáculos como vegetación, cerro, colina y loma).

Tesis para obtener título de ingeniero Electromecánico: **“Diseño de la automatización de las estaciones de bombeo y tanques de reserva del sistema de agua potable de la ciudad de Loja”**. Universidad Nacional de Loja, Ecuador - 2011 (Mejía Torres, 2011).

La investigación se centra en desarrollar un sistema de automatización para las estaciones de bombeo y los tanques de reserva del sistema de agua potable de Loja. Se examinan detalladamente los aspectos de diseño y las especificaciones de los equipos e instalaciones en cada nivel del sistema de instrumentación y control, garantizando su cumplimiento con los estándares internacionales y los criterios técnicos

establecidos. Además de definir el algoritmo de control de la planta, se llevará a cabo una simulación exhaustiva de todo el proceso utilizando LabVIEW. Esta simulación incluirá una demostración en tiempo real mediante un prototipo que engloba el grupo de bombeo, el tanque de almacenamiento y todos los instrumentos necesarios para el funcionamiento del sistema, y el enfoque integral permitió validar su eficiencia y efectividad.

De esta investigación se utiliza lo referente a la instalación eléctricas de electrobombas, tableros de control y sensor de ultrasonido. La simulación de enlace punto a punto utilizando el programa radio móvil, para el monitoreo de tanques en una planta de tratamiento de agua potable.

2.1.2 Nacional

Tesis para obtener el título de ingeniero electrónico: **"Automatización de un sistema de recuperación de agua de relave"**. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú - 2017 (Cutipa Gonzales, 2017).

Se desarrolla la descripción y la estrategia de control para la automatización del sistema de recuperación de agua de relave, se presenta los dispositivos y equipos seleccionados y sus características, se presenta la programación de los PLCs para la automatización, se define la red y protocolo de comunicación industrial para la integración de los dispositivos que componen la automatización como: sensor de flujo, sensor de presión, sensor de nivel, sensor de turbidez, motor eléctrico, bombas de agua, PLC.

De esta investigación se utiliza lo referente a la instalación eléctricas de electrobombas, tableros de control, diversos sensores para la automatización del sistema de recuperación de agua de relave.

Tesis para obtener el título de ingeniero electrónico: **“Un sistema de control remoto basado en una estrategia de control on/off y tecnología gsm es la manera más adecuada para evitar el rebose del sistema de bombeo de agua en el reservorio de la municipalidad de Ascope”**. Universidad Privada Antenor Orrego, Perú – 2016 (Medrano Herrera & Trujillo Huamán, 2016).

La investigación se centra en realizar un sistema de control remoto basado en una estrategia de control on/off y tecnología gsm para evitar el rebose del sistema de bombeo de agua en el reservorio de la municipalidad de Ascope.

Se aborda la problemática que ocasiona el rebose del reservorio de agua potable de la municipalidad de Ascope. Se expone los objetivos y la importancia de dar una solución debido a estar causando tiempos perdidos y malestar en la población.

Se realizó un sistema de control remoto basado en una estrategia de control on/off y tecnología GSM de comunicación inalámbrica para monitorear el nivel alto del reservorio de agua potable. Se elige la tecnología gsm por su simplicidad, accesibilidad y costo; utilizándose el modem Enfora GSM1208, para la transmisión datos por SMS. Se eligió la estrategia de control on/off ya que el llenado del Reservorio es un proceso tipo Batch y solo se necesita alcanzar un nivel alto para terminar dicho proceso.

De esta investigación se utiliza lo referente a la implementación del control on/off a través de un tablero eléctrico de control para las electrobombas.

Tesis para obtener el título de ingeniero electrónico: **“Diseño de un sistema de automatización industrial para el sistema de bombeo**

de aguas acidas”. Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú - 2012 (Ojeda Chinchayán, 2012).

Se desarrolla de la ingeniería de detalle del sistema de bombeo de aguas ácidas desde la poza de almacenamiento sur, hasta la poza de almacenamiento y control norte. Identifica las variables del proceso, desarrollando la ingeniería básica del proyecto, luego se desarrolla la ingeniería de detalle del sistema de bombeo. Por último, se elabora los cálculos necesarios para la selección de los instrumentos tanto de campo como de control.

De esta investigación se utiliza lo referente a la instalación eléctricas de electrobombas, tableros de control y sensores para las diversas pozas según el control discreto a realizar.

2.2 Bases teóricas

Para el desarrollo de esta investigación se consideran: las características de la relavera B3 que utiliza la minera, el sistema de retorno de agua de infiltración, redes de área amplia de baja potencia (con LoRa), y la tecnología de los sistemas de adquisición de datos, monitoreo y control remoto, teniendo como referencia principal las instalaciones existentes de todo el sistema de bombeo de agua (sistema de arranque de bombas, control de nivel del sumidero y el reservorio de emergencia), el sistema de control de los motores de las bambas que se utiliza en el sumidero y reservorio de emergencia.

2.2.1 Relave minero

Los relaves (Union IndustriALL Global, 2018) son los desechos de la minería. El relave minero se refiere al conjunto de desechos sólidos, líquidos o en forma de lodo generado como subproducto de los procesos de extracción de minerales o metales valiosos de la roca. Estos desechos, compuestos por partículas finamente molidas de roca (se usan procesos

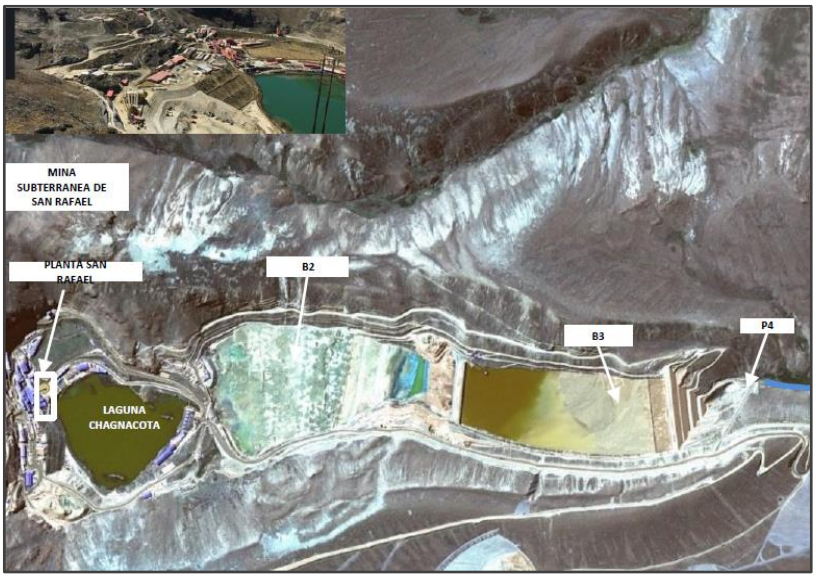
mecánicos y químicos para triturar las rocas), productos químicos, minerales y agua, son considerados residuos irreversibles y sin valor económico. Muchos relaves contienen sustancias tóxicas, como cianuro, mercurio y arsénico, que pueden representar riesgos ambientales y para la salud si no se gestionan adecuadamente.

Las represas de relave almacenan agua y desechos mineros, con al menos 3500 en todo el mundo, pero probablemente hay más debido a las 30000 minas. Son enormes, comparables a lagos y pueden llegar a 300 metros de altura. En el proceso, el lodo se asienta y el agua se recicla para la extracción minera.

Relave B3 unidad minera San Rafael: En la Figura 5, se presenta el diseño y el monitoreo de cada estructura utilizada para la contención de relaves y botaderos, según (MINSUR S.A., Minsur Reporte de Sostenibilidad 2019, 2019). La vigilancia de los riesgos inherentes es constante y cualquier riesgo detectado se evalúa y se comunica directamente a la Alta Dirección, que asume la responsabilidad.

Figura 5

Ubicación de relave B2 y B3 en UM San Rafael



Fuente: (MINSUR S.A., Las 3R en la operación minera de San Rafael, 2020)

Para el año 2019, en la UM San Rafael se dispuso de 752 mil toneladas en la relavera B3. Así también, los relaves de alto contenido mineral serán reusados por el proyecto B2. La UM contempla la construcción de la nueva relavera B4, a la que se derivarán los relaves después del nuevo procesamiento.

En la UM San Rafael, se invirtió en el monitoreo de aguas de acuerdo al programa de vigilancia del IGA y los puntos de control interno. Cabe añadir que en San Rafael se reutilizó y recicló 7838.55 m^3 de agua de relave, lo que representa un 46% en esta UM.

El sistema de retorno de infiltración (MINSUR S.A., Las 3R en la operación minera de San Rafael, 2020) está conformado como se observa en la Figura 6, que fue descrito anteriormente.

Figura 6

Sistema de retorno de agua de infiltración

Las sustancias contaminantes del agua captada por infiltración (Apaza Quinta, 2018) son principalmente los reactivos que se utilizan en el circuito de flotación en la unidad minera San Rafael, los cuales son:

Colectores: Los colectores son reactivos que se utilizan para adherirse selectivamente a la superficie de los minerales de estaño y hacerlos flotar. Entre los colectores utilizados para la flotación de estaño se encuentran los xantatos, los ditiofosfatos y los mercaptanos. Estos compuestos químicos pueden ser tóxicos para los organismos acuáticos y otros seres vivos si se liberan en el medio ambiente en concentraciones suficientemente altas. Es importante minimizar la descarga de estos compuestos en cuerpos de agua cercanos a las operaciones mineras.

Espumantes: Los espumantes se añaden al circuito de flotación para ayudar a estabilizar la espuma y mejorar la recuperación del mineral flotado. Estos reactivos reducen la tensión superficial del agua y promueven la formación de una espuma estable que atrapa los minerales de estaño durante el proceso de flotación.

Modificadores de pH: Modificadores de pH como el ácido sulfúrico o el hidróxido de sodio se utilizan para ajustar el pH de la pulpa de mineral a un nivel óptimo para la flotación del estaño.

Así, tenemos, que el agua captada por infiltración contiene los contaminantes: xantatos, ditiofosfatos, mercaptanos, de los espumantes, ácido sulfúrico o el hidróxido de sodio; además de azufre y arsénico, los cuales son evacuados en el relave minero hacia la Relavera B3.

La descarga directa de estos compuestos en cuerpos de agua puede tener efectos adversos en los ecosistemas acuáticos, incluyendo la alteración de la calidad del agua y la salud de los organismos acuáticos.

2.2.2 Sistemas de bombeo de agua de mina

Un sistema de bombeo (Rafael Barzola, 2019) consiste en un conjunto de elementos que permiten el transporte a través de tuberías y el almacenamiento temporal del fluido, de forma que se cumplan las

especificaciones de caudal y presión necesarias en los diferentes sistemas y procesos; nos limitamos al transporte de fluidos newtonianos incompresibles, y más concretamente de líquidos.

Los sistemas de bombeo son dispositivos para elevar y extraer agua de un punto bajo a uno elevado, de agua superficial, subterránea o de depósitos a sistemas de distribución. Este tipo de bombas pueden ser impulsadas por varias fuentes de energía (electricidad, solar, combustibles, eólica y animal). Este tipo de tecnología requiere de conocimientos técnicos para definir el tipo de instalación, operación y mantenimiento, así como de recursos económicos.

Un sistema de bombeo mecanizado consta de una bomba y un motor que operan en conjunto. La selección del sistema implica tanto el tipo de bomba como la fuente de energía disponible.

Tablero de control: un tablero eléctrico (Tun, 2013) como se observa en la Figura 7, es una caja o gabinete que contiene los dispositivos de conexión, maniobra, comando, medición, protección, alarma y señalización, con sus cubiertas y soportes correspondientes, para cumplir una función específica dentro de un sistema eléctrico. Los equipos de protección y control, junto con los instrumentos de medición, suelen instalarse en tableros eléctricos, teniendo una referencia de conexión, como el diagrama unifilar y el diagrama de control.

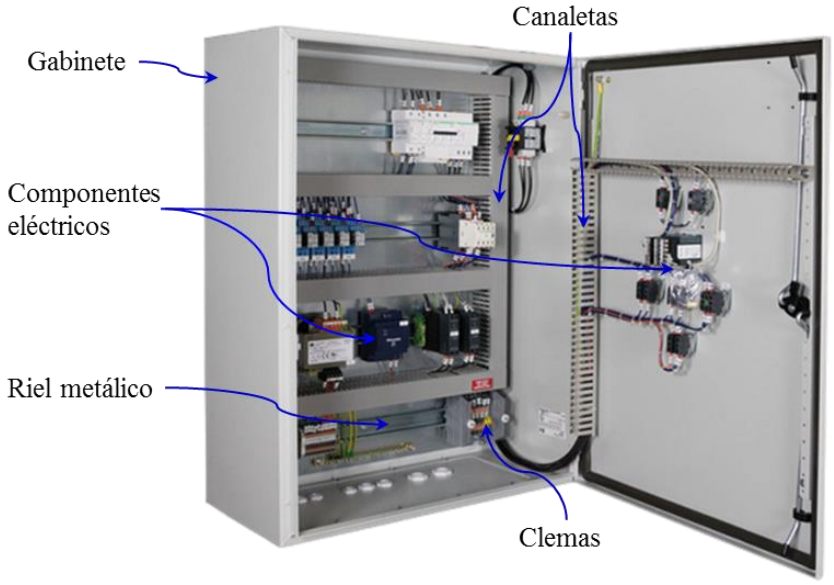
Esquema o diagrama unifilar: Es una representación gráfica de una instalación eléctrica o de parte de ella, donde los conductores de un circuito se muestran mediante una sola línea, independientemente de su cantidad. Este esquema suele tener una estructura de árbol.

Diagrama de control: Se compone generalmente de dos partes principales: el circuito de potencia y el circuito de control. El circuito de potencia muestra la interconexión de componentes que manejan la

energía eléctrica, como interruptores, contactores, relés, motores y luces. En el circuito de control se representan elementos que gestionan la operación del sistema, como sensores, botones, relés temporizados y PLCs. Este diagrama facilita la visualización clara y ordenada de cómo se relacionan y operan estos componentes, lo que ayuda en el diseño, instalación, operación y mantenimiento del sistema eléctrico.

Figura 7

Tablero de control eléctrico y sus partes



Fuente: adaptado de (Suministro de Materiales Electricos Ltda., 2022)

Electrobomba: Una bomba (Tameco Mecanica Industrial, 2018) es un dispositivo utilizado para producir el movimiento o desplazamiento de un fluido en contra de la presión a través de tuberías o mangueras. Las hay desde complejas y potentes bombas centrífugas utilizadas en industria, para mover grandes o pequeños caudales, principalmente de agua. En la industria el correcto funcionamiento y mantenimiento de una bomba es fundamental para el rendimiento y productividad de todo el sistema. Teniendo la información de los datos de placa de la bomba, se deben consultar los catálogos o información técnica del fabricante para obtener las curvas características de la bomba centrífuga; dichas curvas

son aquellas que relacionan las variables que intervienen en el funcionamiento de la misma.

Todas las bombas centrífugas son rotativas y transforman energía mecánica a energía cinética (movimiento circular del fluido). Para iniciar el movimiento del líquido, se requiere de una energía generada por un motor que se dirige hacia el impulsor de la bomba. Cuando la bomba funciona con un motor eléctrico, se le denomina electrobomba.

Las electrobombas generalmente tienen una mayor vida útil. Al igual que en cualquier bomba centrífuga, su funcionamiento se basa en la entrada del fluido por el centro del rodete o impulsor. A medida que gira, se genera una fuerza centrífuga que hace que el fluido pase al cuerpo de la bomba, donde la energía cinética se transforma en presión. Finalmente, desde el cuerpo de la bomba, el agua o líquido se dirige hacia donde se pretende trasladar a través de tuberías o mangueras. Al elegir una electrobomba, es importante considerar la presión de trabajo y el caudal, que forman lo que se llama la curva de rendimiento de la electrobomba. Todas las electrobombas tienen valores mínimos y máximos de presión de trabajo. Asimismo, tienen un caudal mínimo y un caudal máximo, que representan la cantidad (volumen) mínima y máxima de fluido que se moverá por unidad de tiempo.

Se utilizó la electrobomba de agua es del tipo periférica de la marca Welker cuya placa que se muestra en la Figura 8, de aplicación en elevación de agua y presurización de cañerías. el motor es monofásico, de capacitor permanente, con protección térmica. Luego del armado de cada bomba se efectúan las pruebas de funcionamiento y les procede de forma cuidadosa al embalaje. La electrobomba es apta para bombear agua limpia, sin sólidos abrasivos en suspensión, sin materiales abrasivos en suspensión. Evitar el funcionamiento en seco de la bomba.

Figura 8

Aspecto de una electrobomba

Fuente: (WelkerPeru, 2021)

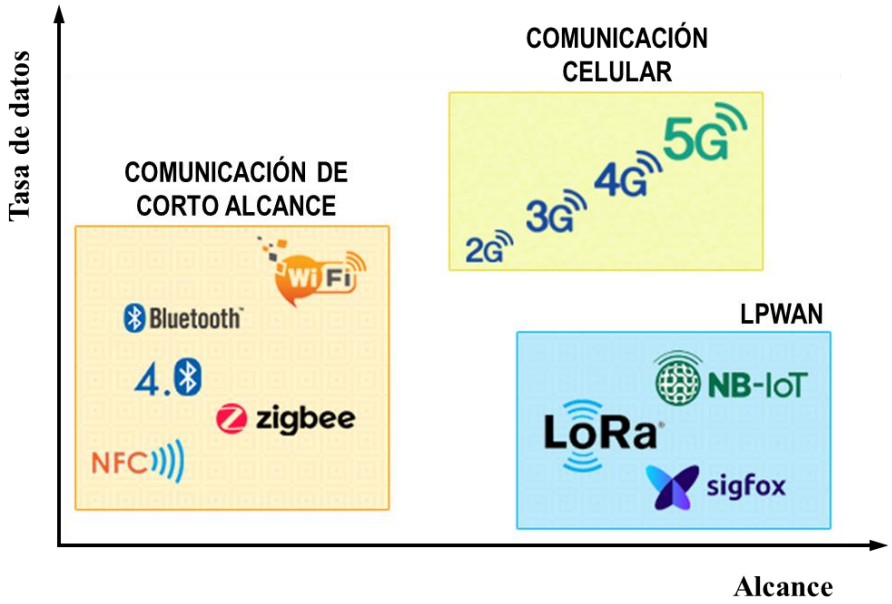
2.2.3 Tecnologías de comunicación inalámbrica

Para que los dispositivos puedan conectarse existen una diversidad de tecnologías (Kumar, 2019) de comunicación inalámbrica, como: Bluetooth, Wifi, ZigBee; la tecnología celular (2G, 3G, 4G, 5G) y las tecnologías LPWAN (SigFox, LoRaWAN, NB-IoT); cuya principal diferencia radica en el alcance de la comunicación, la tasa de transmisión de datos y el consumo de energía.

La comunicación inalámbrica de largo alcance, con un bajo consumo de energía y con un ancho de banda reducido, son las características más relevantes de la tecnología LPWAN, tal como se observa en la Figura 9; estas prestaciones son idóneas para soluciones haciendo uso de sensores en entornos urbanos, por lo tanto, para el diseño del sistema propuesto se hará uso de la tecnología LPWAN.

Figura 9

Principales tecnologías inalámbricas



Fuente: Adaptado de (Kumar, 2019)

Para determinar la tecnología LPWAN a utilizar, se lleva a cabo una comparación de cuatro tecnologías, teniendo en cuenta sus características más importantes. En la Tabla 1, la tecnología LoRaWAN utiliza la modulación CSS (LoRa), que se caracteriza por su alta inmunidad a las interferencias. La transferencia de datos alcanza velocidades de hasta 50 kbps, con una carga útil de hasta 243 bytes, lo que permite un número ilimitado de mensajes Half-Duplex.

Esta tecnología opera en la banda no licenciada (ISM) y ofrece una cobertura de hasta 5 km en entornos urbanos y más de 20 km en zonas rurales. Lo más importante es que permite construir una red sin depender de operadores de pago, ya que es una tecnología de código abierto. Por esta razón, para el desarrollo de esta tesis, se utiliza esta tecnología.

Tabla 1

Comparación de las características de las tecnologías LPWAN

TECNOLOGÍAS LPWAN			
CARACTERÍSTICAS	LORAWAN	SIGFOX	NB-IoT
Modulación	CSS (LoRa)	BPSK	QPSK
Ancho de Banda	250 kHz- 125 kHz	100 Hz	200 kHz
Frecuencia de trabajo	Banda ISM no licenciada	Banda ISM no licenciada	Bandas de frecuencias LTE licenciadas y 2G
Velocidad de datos máxima	50 kbps	100 bps	200 kbps
Rango de cobertura promedio (zona urbana)	5 km	10 km	1 km
Consumo de energía	bajo	bajo	bajo
Máximo número de mensajes / día	ilimitado	140 (UL) y 4(DL)	ilimitado
Inmunidad a la interferencia	Muy alto	Bajo	Bajo
Operadores de servicio	Operadores de pago y gratuito	Solo un operador de pago	Operadores de telefonía móvil
Longitud máxima de carga útil	243 bytes	12 bytes (UL) y 8 bytes (DL)	1600 bytes
Dirección de comunicación	Half-duplex	Half-duplex	Half-duplex

Fuente: Adaptado de (Kumar, 2019)

LoRa (Long Range): Es una técnica de modulación que proporciona un alcance significativamente mayor a las tecnologías comúnmente conocidas, como WI-FI (Wireless Fidelity) o Bluetooth, es la tecnología inalámbrica utilizada para crear enlaces de comunicación de largo alcance y de baja potencia. LoRa está basado en la modulación del espectro ensanchado chirp (Chirp Spread Septum Modulation), al igual que FSK mantiene las mismas características de bajo consumo energético, incrementando en gran medida el alcance de la comunicación.

Debido a estas razones, la modulación CSS fue utilizada por décadas para las comunicaciones militares y espaciales, considerando adicionalmente su alta robustez a la interferencia.

Debido a la capacidad de largo alcance de la tecnología LoRa, con un solo gateway se puede cubrir ciudades enteras, dependiendo de las obstrucciones presentes en el entorno, sin embargo, LoRa implementa un enlace superior a otras tecnologías (LoRa Alliance, 2015).

LoRa fue desarrollada por Cycleo el 2010, empresa que dos años más tarde fue adquirida por Semtech, quien actualmente es el fabricante de los chips LoRa y ofrece a disposición del usuario una librería creada por Libelium, que permite la comunicación entre nodos LoRa (Carrión, 2017).

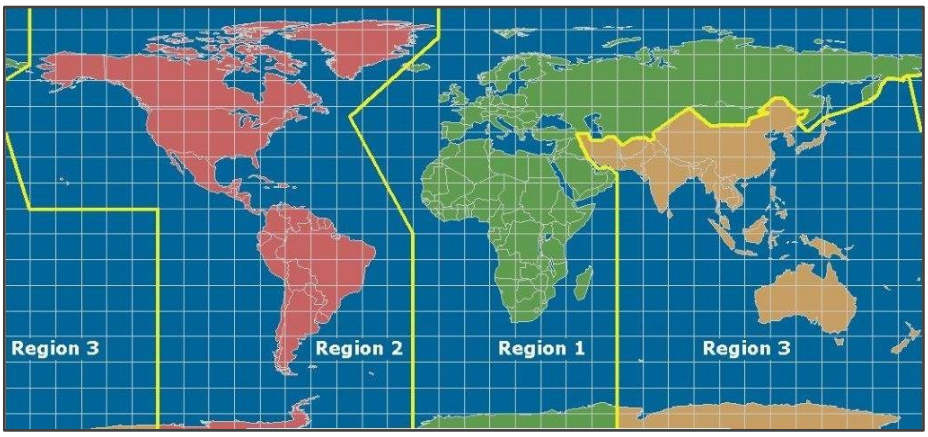
LoRaWAN: Establece el protocolo de comunicación y la arquitectura para la red, haciendo uso de la modulación LoRa como la capa física, LoRaWAN fue propuesta por la LoRa Alliance el 2015. El protocolo y la arquitectura de red son influyentes en la determinación de la vida útil de la batería de un nodo, la capacidad de la red, la calidad del servicio, la seguridad y la diversidad de aplicaciones (LoRa Alliance, 2015). LoRaWAN, es un protocolo de red de código abierto que utiliza espectro radioeléctrico sin licencia en las bandas Industrial, Científica y Médica (ISM).

Banda ISM: LoRa opera en bandas industriales, científicas y médicas sobre las frecuencias 433 MHz en Asia, 868 MHz en Europa y 915 MHz en América, utilizando tres rangos de ancho de banda: 125 KHz, 250 KHz y 500 KHz. El uso de estos rangos depende de la región o del plan de frecuencia que se aplique en el país. LoRa Alliance emite un documento de Parámetros Regionales (LoRa Alliance Technical committee, 2017), que contiene los planes de canales aprobados para varias regiones globales, y que sigue las restricciones regulatorias

establecidas en cada región. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), divide al mundo en tres Regiones para atribuir las bandas de frecuencia del espectro radioeléctrico, tal como se muestra en la Figura 10.

Figura 10

Regiones según la Unión Internacional de Telecomunicaciones



Fuente: (UIT, 2022)

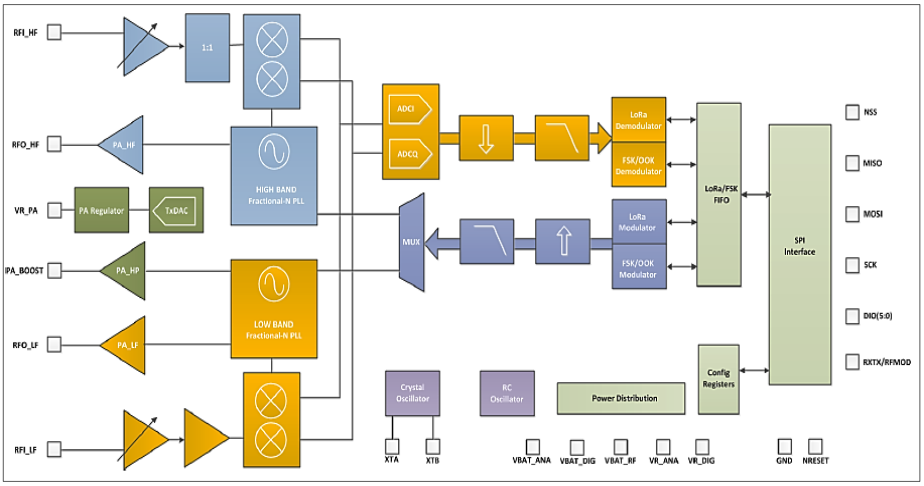
Según este organismo los países de América pertenecen a la Región 2, entonces, en Perú se hace uso de la banda ISM de 902-928 MHz (con frecuencia central de 915 MHz) para trabajar con LoRa.

Redes de Área Amplia de Baja Potencia (LPWAN)

Los dispositivos de radio Semtech LoRa (Semtech, 2021) cuentan con un modem de largo alcance con alta inmunidad al ruido y mínimo consumo de corriente. Las series SX1272/78 (ver Figura 11) utilizan la técnica de modulación patentada LoRa alcanzando una sensibilidad de -137dBm (SX1272) y -148 dBm (SX1278). Esta alta sensibilidad combinada con amplificador LNA de +20 dBm optimiza el rango de alcance y brindan la robustez necesaria para aplicaciones industriales.

Figura 11

Diagrama de bloques con características de SX1278.



Fuente: (SEMTECH, 2022)

Por lo general, LoRa puede alcanzar una distancia de 5 km a 30 km y puede funcionar con batería durante años. Recuerde que LoRa, LoRaWAN y LPWAN son tres terminologías diferentes y no deben confundirse.

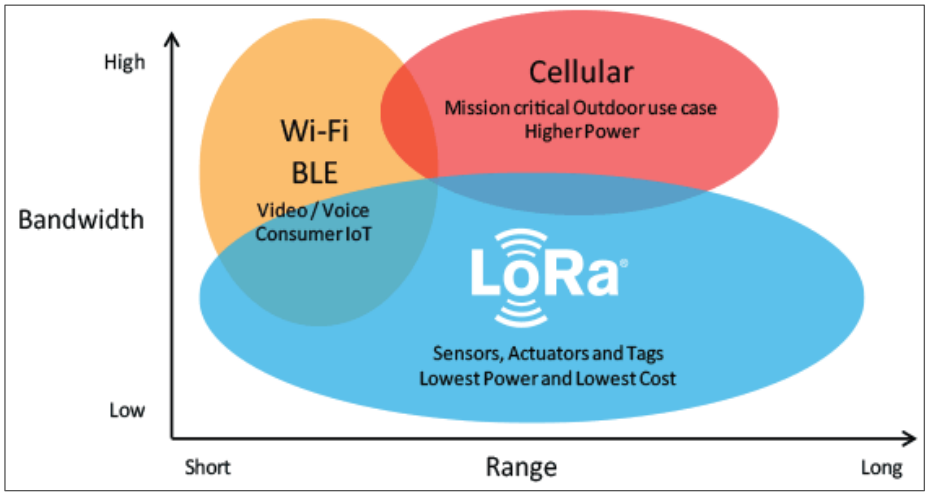
En cualquier solución de IoT típica proporcionada para la gestión de almacenes o la supervisión de campo, habrá cientos de nodos sensores implementados en el campo que supervisarán los parámetros vitales y los enviarán a la red para su procesamiento. Pero estos sensores deben ser inalámbricos y deben funcionar con una batería pequeña para que sea portátil. Las soluciones inalámbricas como RF pueden enviar datos a larga distancia, pero requieren más potencia para hacerlo, por lo que no pueden funcionar con batería, mientras que BLE, por otro lado, puede funcionar con muy poca potencia, pero no puede enviar datos a larga distancia. Entonces esto es lo que trae la necesidad de LoRa.

En LoRa podemos lograr comunicación a larga distancia sin usar mucha energía, superando así el inconveniente de la comunicación Wi-Fi y BLE.

Para alcanzar una gran distancia con compromisos de baja potencia LoRa en el ancho de banda, funciona con un ancho de banda muy bajo. El ancho de banda máximo para Lora es de aproximadamente 5.5 Kbps, esto significa que podrá enviar solo una pequeña cantidad de datos a través de LoRa. Por lo tanto, no puede enviar audio o video a través de esta tecnología, funciona muy bien solo para transmitir menos información, como los valores del sensor. La Figura 12 muestra dónde se encuentra LoRa en comparación con los dispositivos Wi-Fi, Bluetooth y celulares.

Figura 12

Ancho de banda y alcance de LoRa



Fuente: (SEMTECH, 2023)

Un dispositivo LoRa puede configurarse para utilizar diferentes (Bor & Roedig, 2017) potencias de transmisión (TP), frecuencias portadoras (CF), factores de dispersión (SF), anchos de banda (BW) y tasas de codificación (CR) para ajustar el rendimiento del enlace y el consumo de energía.

Potencia de Transmisión (PT): En la radio de LoRa, la potencia de transmisión puede ajustarse desde -4 dBm hasta 20 dBm, en incrementos de 1 dBm. Sin embargo, debido a las restricciones de implementación del

hardware, el rango generalmente se limita entre 2 dBm y 20 dBm. Además, debido a estas limitaciones, los niveles de potencia superiores a 17 dBm solo pueden utilizarse con un ciclo de trabajo del 1%.

Frecuencia portadora (CF): Se refiere a la frecuencia central que puede programarse en pasos de 61 Hz, abarcando desde 137 MHz hasta 1020 MHz. Dependiendo del chip LoRa específico, este rango puede estar restringido entre 860 MHz y 1020 MHz.

Factor de dispersión (SF): Es la relación entre la tasa de símbolos y la tasa de chips (La tasa de la señal de código). Un factor de dispersión más alto aumenta la relación señal/ruido (SNR) y, por tanto, la sensibilidad y el alcance, pero también aumenta el tiempo de emisión del paquete. El número de chips por símbolo se calcula como 2^{SF}. Por ejemplo, con un SF de 12 se utilizan 4.096 chips/símbolo.

Cada aumento del SF reduce a la mitad la velocidad de transmisión y, por tanto, duplica la duración de la transmisión y, en última instancia, el consumo de energía. El factor de dispersión puede seleccionarse entre 6 y 12. Las radiocomunicaciones con diferentes SF son ortogonales entre sí y es posible la separación de redes utilizando diferentes SF (Bor, Vidler, & Roedig, LoRa for the Internet of Things, 2016).

Ancho de banda (BW): Es el ancho de las frecuencias en la banda de transmisión. A mayor ancho de banda, mayor velocidad de transmisión (menor tiempo en el aire), pero menor sensibilidad (por la integración de ruido adicional). A menor ancho de banda, mayor sensibilidad, pero menor velocidad de transmisión. Un BW más bajo también requiere cristales más precisos (menos ppm).

Los datos se envían a una velocidad de chip igual al ancho de banda; un ancho de banda de 125 kHz corresponde a una velocidad de

chip de 125 kcps. Aunque el ancho de banda puede seleccionarse en un rango de 7,8 kHz a 500 kHz, una red LoRa típica funciona a 500 kHz, 250 kHz o 125 kHz.

Tasa de codificación (CR): Es la tasa FEC utilizada por el módem LoRa que ofrece protección contra ráfagas de interferencias, y puede ajustarse a 4/5, 4/6, 4/7 o 4/8. Un CR más alto ofrece más protección, pero aumenta el tiempo en el aire. Las radios con diferentes CR (y el mismo CF, SF y BW), pueden comunicarse entre sí utilizan un encabezado explícito, ya que el CR de la carga útil se almacena en el encabezado del paquete, que siempre está codificado en CR 4/8.

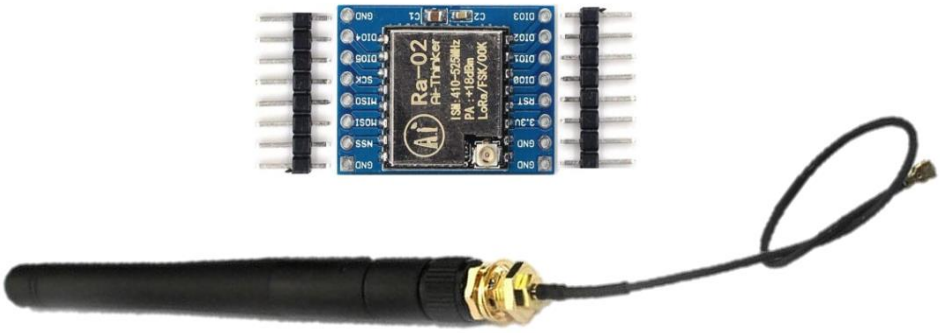
Para evaluar el rendimiento de los enlaces de comunicación con módulos LoRa, se debe realizar mediciones en la red de sensores inalámbricos de las variables: RSSI, SNR, porcentaje de paquetes recibidos (RP); para lo cual se enviará paquetes entre los nodos de la red para diferentes parámetros de propagación. Adicionalmente se pueden realizar pruebas de retardos en el envío de paquetes.

LoRa Ra-02: La tarjeta utiliza el chip SX1278 y se ajusta a las características de un prototipo debido a sus ventajas en cuanto a la prevención de bloqueos y la adopción de tecnología de espectro ensanchado, lo que permite una comunicación de largo alcance de hasta 10 km y una alta fiabilidad.

En la red, el dispositivo utilizado pertenece a la Clase C, lo que posibilita la comunicación bidireccional, pero con un menor ahorro de energía, ya que permanece en modo de recepción continuamente, es decir, está siempre listo para recibir datos en cualquier momento. Por esta razón, en esta clase se requiere el uso de una fuente de alimentación externa para mantener la transmisión. Además, este módulo incluye una antena SMA, como se observa en la figura 13.

Figura 13

Tarjeta LoRa Ra-02 (SX1278) con antena SMA



Fuente: (Medium, 2023)

Estos elementos están diseñados para cumplir con los protocolos y normas como IEEE 802.15.4g y WMBus. Los transponders RF se emplean para diversas aplicaciones de la banda Médica, Científica e Industrial (ISM) que cuentan con lectores de medidores a larga y corta distancia para diversos elementos naturales. En la Tabla 2 se pueden apreciar las características específicas del módulo.

Tabla 2

Características de la tarjeta LoRa Ra-02

Parámetros	Rangos
Estándar Inalámbrico	433 MHz
Rango de frecuencia	420-450MHZ
Distancia	10-15 km
Comunicación SPI	Half-duplex
RF de potencia de salida	+ 20dBm-100mW
Sensibilidad	hasta - 148dBm
Rango de fuente de alimentación	2.5-3.7 V

Fuente: (Ai-Thinker Technology, 2022)

Tipos de conexiones (Intersoft de Latinoamerica, 2018)

Se trata de abstracciones que nos permiten observar el flujo de información sin necesidad de estar considerando constantemente las características del medio y todos los demás elementos involucrados.

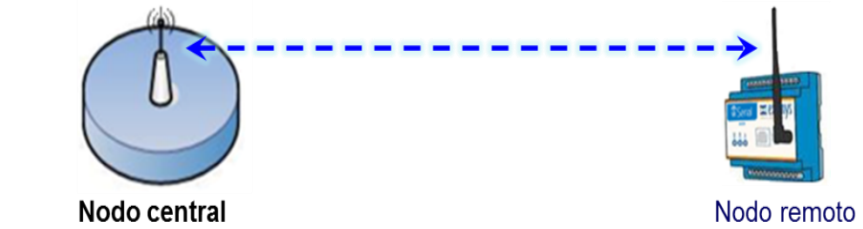
Cuando nos referimos a una determinada conexión, podemos utilizarla para representar la forma de conexionado y el flujo físico de los datos.

Punto a punto: En este caso, la comunicación se produce entre dos nodos y únicamente entre ellos, como se observa en la Figura 14.

Una comunicación punto a punto half-duplex, requiere una conexión entre ambos nodos, y las señales viajan en ambos sentidos, pero no simultáneamente. Una comunicación punto a punto full-duplex, requiere una conexión en ambos nodos, y las señales viajan en ambos sentidos al mismo tiempo a través del mismo medio de comunicación. Por ejemplo, los teléfonos móviles, pueden transmitir sus mensajes simultáneamente.

Figura 14

Enlace punto a punto



Fuente: (Cika Electrónica SRL, 2022)

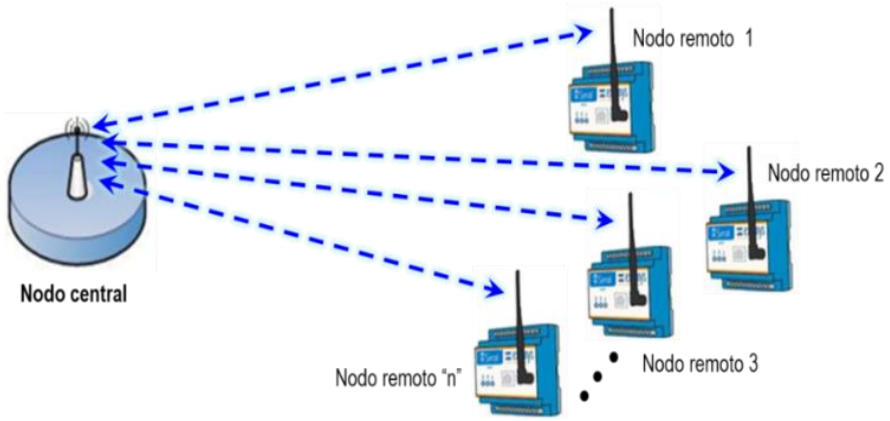
Punto a multipunto: En un enlace punto a multipunto, existe un nodo central que se comunica con varios otros puntos remotos, como se observa en la Figura 15. Por lo general, en esta configuración, la comunicación se limita al intercambio entre el nodo central y los remotos, sin comunicación directa entre estos últimos.

Este tipo de enlace suele operar en modo half-duplex, aunque hay casos donde se emplea una conexión del punto central a todos los remotos y otra compartida por los remotos, permitiendo así que la central y un remoto puedan hablar simultáneamente.

Por ejemplo, una conferencia se puede considerar como una comunicación punto a multipunto, ya que involucra un único orador (transmisor) y varios asistentes (receptores).

Figura 15

Enlace punto a multipunto



Fuente: (Cika Electrónica SRL, 2022)

2.2.4 Arduino Nano

Es una pequeña (Arduino, 2021) y completa placa de circuito impreso, basada en el ATmega 328 llamada tarjeta de desarrollo Arduino Nano V3.0, como se observa en la Figura 16; se puede alimentar a través de la conexión USB Mini-B, una fuente de alimentación externa no regulada de 6-20 V (pin 30) o una fuente de alimentación externa regulada de 5 V (pin 27).

La fuente de alimentación se selecciona automáticamente a la fuente de voltaje más alto. ATmega328 tiene 32 KB, (también con 2 KB usados para el gestor de arranque. El ATmega328 tiene 2 KB de SRAM y 1 KB de EEPROM. En la Tabla 3 muestra sus principales características.

Tabla 3

Especificaciones técnicas de Arduino Nano

Microcontrolador	**ATmega328**
Arquitectura	AVR
Voltaje de operación	5 V
Memoria Flash	32 KB (2 KB en bootloader)
SRAM	2 KB
Reloj	16 MHz
Pines de E/S Analógico	8
EEPROM	1 KB
Corriente DC por Pin E/S	40 mA (E/S Pines)
Vin	7-12 V
Pines E/S Digital	22
Salida PWM	6
Potencia de consumo	19 mA
Tamaño PCB	18 x 45 mm
Peso	7 g

Fuente: (Arduino, 2021)

Entrada y salida (Arduino, 2021): Cada uno de los 14 pines digitales del Nano se puede utilizar como entrada o salida mediante las funciones pinMode (), digitalWrite () y digitalRead (). Funcionan a 5 voltios. Cada pin puede proporcionar o recibir un máximo de 40 mA y tiene una resistencia pull-up interna (desconectada por defecto) de 20-50 kΩ. Además, algunos pines tienen funciones especializadas como:

- **Serie:** Los pines 0 (RX) y 1 (TX) se utilizan para recibir (RX) y transmitir (TX) datos en serie TTL, conectados a los pines correspondientes del chip serie FTDI USB a TTL.

- **Interrupciones externas:** Los pines 2 y 3 pueden configurarse para activar una interrupción en un valor bajo, un flanco ascendente o descendente, o un cambio de valor. Consulte la función attachInterrupt () para obtener más detalles.

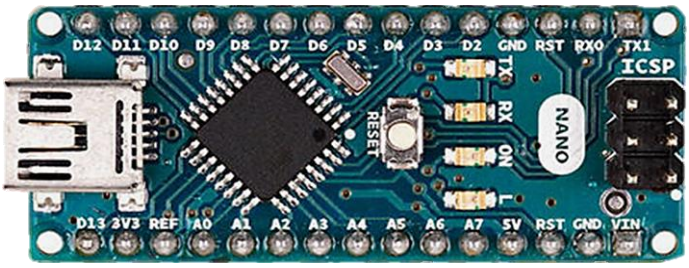
- **PWM:** Los pines 3, 5, 6, 9, 10 y 11 proporcionan una salida PWM de 8 bits con la función analogWrite ().

- **SPI:** Los pines 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO) y 13 (SCK) admiten la comunicación SPI, aunque esta función no está incluida actualmente en el lenguaje Arduino.

- **LED:** El pin 13 tiene un LED incorporado. Cuando el pin está en estado ALTO, el LED se enciende; cuando está en estado BAJO, se apaga.

Figura 16

Módulo Arduino Nano V3.0.



Fuente: (Arduino, 2021)

Nano tiene 8 entradas analógicas, cada una de las cuales proporciona 10 bits de resolución (es decir, 1024 valores diferentes). Por defecto miden desde tierra hasta 5 voltios, aunque es posible cambiar el extremo superior de su rango usando la función analogReference (). Los pines analógicos 6 y 7 no se utilizan como pines digitales.

Comunicación: Tiene una serie de instalaciones para comunicarse con una computadora, otro Arduino u otros microcontroladores. ATmega328 ofrece comunicación UART TTL (5V), disponible en los pines digitales 0 (RX) y 1 (TX). Un FTDI/FT232RL integrado en la placa facilita esta comunicación en serie a través del puerto USB, mientras que los controladores FTDI crean un puerto COM virtual para el software en la computadora.

El programa Arduino IDE incluye un monitor en serie que permite el intercambio de datos textuales simples entre la placa Arduino y la computadora.

Los LED RX y TX parpadean cuando se transmiten datos a través del chip FTDI y la conexión USB a la computadora, aunque no lo hacen para la comunicación serie en los pines 0 y 1. Además, una biblioteca SoftwareSerial permite la comunicación en serie en cualquiera de los pines digitales del Nano, y también es compatible con comunicación I2C y SPI. Para simplificar el uso del bus I2C, el software Arduino incluye la biblioteca Wire.

Para programar con el software Arduino IDE. Seleccione "Arduino Nano” en el menú Herramientas> Placa.

2.2.5 Sensor de nivel ultrasónico JSN-SR04T

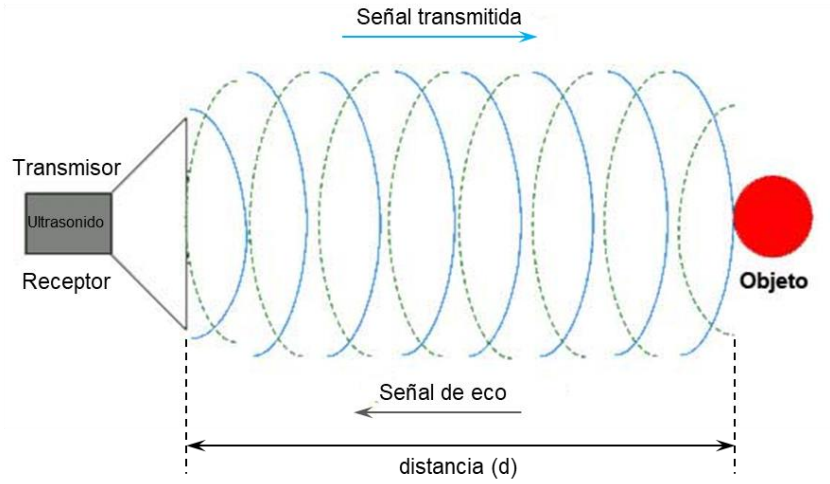
Principio de funcionamiento: Según (Microsonic, 2023), el sensor emite cíclicamente pulsos ultrasónicos o de ultrasonido y corta duración. Los ultrasonidos, son ondas sonoras cuyo rango de frecuencias es superior a los 20000Hz.

Estos pulsos se propagan a la velocidad del sonido en el aire, siguiendo una trayectoria rectilínea con velocidad constante (MRU) con lo que podemos usar las ecuaciones del movimiento rectilíneo para hallar la distancia que recorre la onda. Al encontrar un objeto, es reflejado y vuelve como eco al sensor ultrasónico.

Un sensor óptico tiene un transmisor y receptor, mientras que un sensor ultrasónico utiliza un elemento ultrasónico único, tanto para la emisión como la recepción. Un sensor ultrasónico de modelo reflectivo, el oscilador emite y recibe las ondas ultrasónicas, alternativamente como se observa en la Figura 17. Esto permite la miniaturización del sensor.

Figura 17

Principio de funcionamiento de un sensor de ultrasonido



Fuente: (Microsonic, 2023)

La distancia desde el emisor hasta el objeto se calcula internamente, está basado en el tiempo transcurrido entre la emisión de la señal acústica y la recepción de la señal de eco.

Aplicando algunos conocimientos básicos sobre la propagación de las ondas sonoras y mediante algunos sencillos cálculos matemáticos, es posible determinar a qué distancia se encuentra el objeto del emisor. El sensor de ultrasonidos fundamenta su operación en base a la física del sonido. Las señales sonoras viajan a través del aire a una velocidad aproximada de 340 m/s.

El trayecto que recorre la señal de ultrasonido se compone de dos partes. Una inicial, que corresponde a la salida del emisor hacia el objeto, y una final, que corresponde al eco de la señal desde el objeto hacia el micrófono transductor. A mayor distancia, mayor tiempo.

Para calcular la distancia de un objeto u obstáculo desde el sensor, se puede usar la siguiente ecuación:

$$d = (V_{sonido} * \ tiempo)/2$$

Hay que considerar que la precisión del sensor puede verse afectada por la temperatura y la humedad del aire en el que se está utilizando.

Dado que la señal recorre el doble de la distancia (desde el sensor hacia el objeto y viceversa) el tiempo es el doble que corresponde a la distancia real del objeto respecto al sensor. Por ello, al multiplicar el tiempo por la velocidad del sonido, el resultado debe ser entre dos.

Como la distancia hacia el objeto es medida por medio del tiempo de recorrido del sonido, y no por una medición de la intensidad, los sensores ultrasónicos son insensibles hacia el ruido de fondo.

Prácticamente todos los materiales que reflejan el sonido son detectados, independientemente de su color. Aún materiales transparentes o láminas delgadas no presentan problemas para los sensores ultrasónicos.

Los sensores con una zona ciega de sólo 20 mm y con un haz acústico extremadamente delgado abren en la actualidad un abanico de aplicaciones completamente nuevas: Las mediciones de estado de llenado en pocillos de placas microtiter y tubos de ensayo como también el escaneado de botellas pequeñas en la industria de los embalajes pueden llevarse a cabo sin problemas.

El sensor ultrasónico JSN-SR04T (Naylamp mechatronics, 2021) es un sensor de distancia como se ve en la Figura 18, que utiliza ultrasonido para determinar la distancia de un objeto en un rango de 25 a 450 cm. Este sensor se destaca por su resistencia al agua, su tamaño compacto, bajo consumo de energía y precisión confiable. Es ideal para aplicaciones donde estará expuesto a condiciones climáticas adversas como humedad o lluvia, siendo comúnmente utilizado en automóviles para detectar obstáculos al estacionarse o en sistemas de seguridad.

El sensor utiliza tecnología de ultrasonido y contiene todos los componentes electrónicos necesarios para realizar mediciones de distancia. Su funcionamiento es sencillo: emite un pulso de sonido (TRIG), mide la duración del eco de retorno (ECHO) y calcula la distancia en base a la diferencia de tiempo entre el pulso TRIG y el eco ECHO. Los pines de conexión incluyen VCC (+5V DC), TRIG (para el pulso de ultrasonido), ECHO (para recibir el eco del ultrasonido) y GND (tierra). Además, su desempeño no se ve afectado por la luz solar o materiales oscuros, aunque puede tener dificultades con materiales blandos como la tela o la lana.

La distancia se puede calcular utilizando la siguiente formula:

$$distancia\ (m) = ((Tiempo\ del\ pulso\ ECO) * (340\ m/s))/2$$

Especificaciones técnicas

- Modelo: JSN-SR04 (FZ1655)
- Voltaje de alimentación: 5V DC
- Corriente de trabajo: 30 mA
- Rango de detección: 25 cm - 450 cm
- Precisión: +-0.3 mm
- Frecuencia de emisión acústica: 40 kHz
- Duración mínima del pulso de disparo (nivel TTL): 10 µs
- Tiempo mínimo de espera entre una medida y el inicio de otro 20 ms
- Ángulo de detección: menor a 50º
- A prueba de agua (parte delantera)
- Dimensiones tarjeta: 41*28.5 mm
- Dimensiones transductor: D25, L19 mm
- Temperatura de trabajo: -10 ºC hasta 70 ºC
- Soporta exposición a la intemperie/humedad/agua

Figura 18

Diagrama de un sistema de medida por ultrasonido

Fuente: (Naylamp mechatronics, 2021)

2.2.6 Sensor de corriente SCT-013-030

Los transformadores de corriente (CTs), son sensores (Naylamp mechatronics, 2021) utilizados para la medición de corriente alterna. Son particularmente útiles para medir el consumo o generación de electricidad de todo un edificio u hogar. Funcionan como transformadores por el principio físico de inducción electromagnética.

El sensor presentado en la Figura 19, es muy fácil de manejar y acoplar. Puede colocarse como una pinza alrededor de un cable que entre al edificio sin la necesidad de realizar algún trabajo de alto voltaje.

Figura 19

Sensor de corriente no invasivo

Fuente: (Naylamp mechatronics, 2021)

Especificaciones técnicas

- Corriente de entrada (inducción): 0-30A AC
- Modo de salida: 0-1V
- No linealidad: ±1%
- Resistencia (RL): 62Ω
- Turn Ratio: 1800:1
- Grado de Resistencia: Grade B
- Temperatura de operación: -25°C ~ + 70°C
- Longitud del cable: 1m
- Tamaño abierto: 13mm x 13mm

Aplicaciones: Adecuado para la medición de corriente AC, monitoreo y protección de motores AC y equipo de iluminación.

2.2.7 Programas para el tratamiento de datos

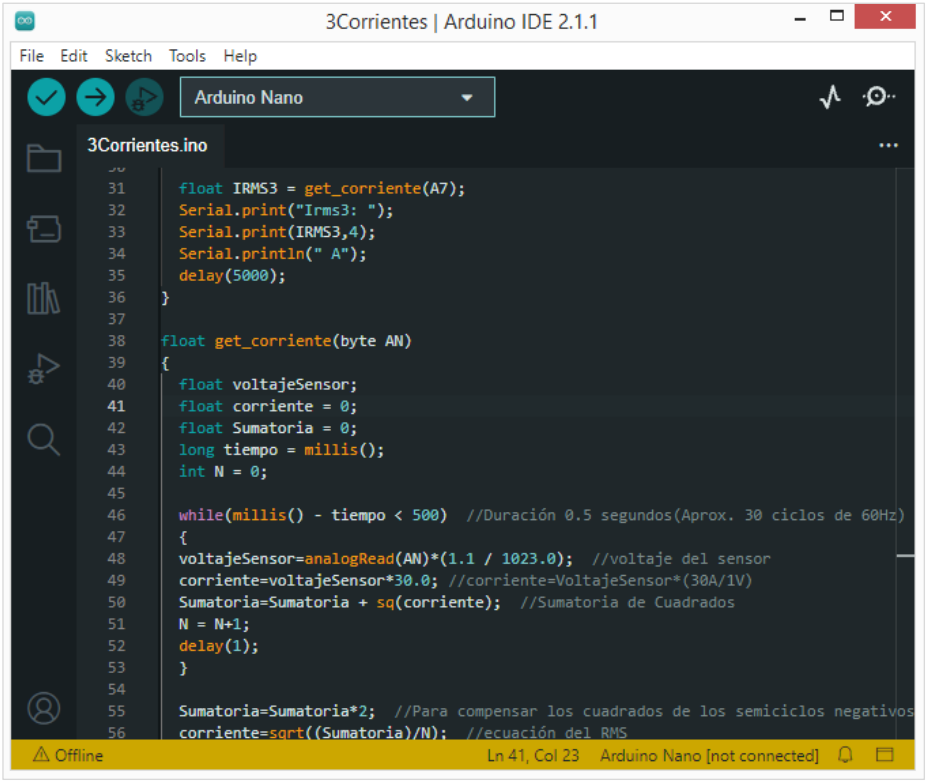
Los datos recolectados por el sensor de nivel y los sensores de corriente son fundamentales para monitorear el rendimiento y la eficiencia de un sistema. Una vez registrados, estos datos son almacenados meticulosamente en una base de datos para su posterior análisis. Este análisis no se limita simplemente a la recopilación de datos, sino que implica la utilización de programas especializados en estadística para extraer insights significativos. Estas herramientas permiten identificar patrones, tendencias y posibles anomalías que podrían pasar desapercibidas en un análisis superficial. Los programas que se emplearon para realizar la presente investigación son los siguientes:

Arduino IDE 2

Es un entorno de desarrollo (Arduino, 2023), como la Figura 20, se utiliza para la programación de las placas de Arduino. Tiene como base el entorno de Processing al igual que un lenguaje de programación fundamentado en Wiring, que es de código abierto.

Figura 20

Interface de programación de Arduino IDE



Fuente: (Arduino, 2023)

Arduino IDE 2 representa una evolución significativa del IDE clásico, brindando no solo un mayor rendimiento, sino también una interfaz de usuario más intuitiva y amigable. Las nuevas características, como el autocompletado, facilitan la escritura de código, mientras que la inclusión de un depurador integrado agiliza el proceso de identificación y corrección de errores. Además, la sincronización con Arduino Cloud permite una colaboración fluida y el acceso a proyectos desde cualquier lugar. En resumen, Arduino IDE 2 redefine la experiencia de desarrollo para los entusiastas y profesionales de la electrónica.

- **Verificar/Cargar**: compila y carga tu código en tu placa Arduino.
- **Seleccione Placa y puerto**: las placas Arduino detectadas aparecen automáticamente aquí, junto con el número de puerto.

- **Cuaderno de bocetos**: aquí encontrará todos sus bocetos almacenados localmente en su computadora. Además, puedes sincronizar con Arduino Cloud y también obtener tus bocetos desde el entorno online.

- **Administrador de placas**: explore los paquetes de Arduino y de terceros que se pueden instalar. Por ejemplo, utilizar una placa MKR WiFi 1010 requiere la Arduino SAMD Boards paquete instalado.

- **Administrador de bibliotecas**: explore miles de bibliotecas Arduino, creadas por Arduino y su comunidad.

- **Depurador**: prueba y depura programas en tiempo real.

- **Buscar**: busque palabras clave en su código.

- **Abrir Serial Monitor**: abre la herramienta Serial Monitor, como una nueva pestaña en la consola.

LabVIEW

Es un entorno de programación gráfica (NI, 2023), que los ingenieros utilizan para desarrollar rápidamente sistemas de pruebas automatizadas de investigación, validación y producción; controladores para automatizar cada uno de los instrumentos y el hardware de adquisición de datos.

- Miles de funciones de análisis disponibles.

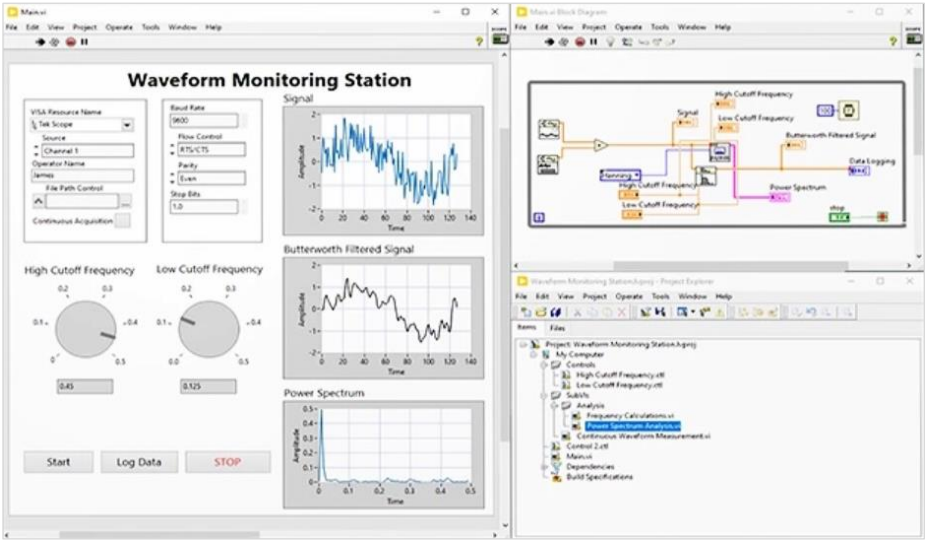
- Elementos de visualización interactivos y configurables.

- Controladores para automatizar cada uno de los instrumentos y el hardware de adquisición de datos.

- Conectividad a otros lenguajes y protocolos estándares de la industria.

Figura 21

Interface de programación de LabVIEW



Fuente: (NI, 2023)

La Figura 21 muestra la interface de programación. LabVIEW, es el acrónico de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbech. Es un lenguaje y, a la vez, un entorno de programación grafica en el que se pueden crear aplicaciones de forma rápida.

Es una herramienta gráfica para pruebas, control y diseño mediante la programación. El lenguaje que usa se llama lenguaje G, donde la G simboliza que es lenguaje gráfico. Este programa fue creado por National Instruments (1976) en Austin para funcionar sobre máquinas MAC, salió al mercado por primera vez en 1986.

NI, antes conocida como National Instruments, presentó una importante actualización de su software LabVIEW. Durante casi 40 años, LabVIEW ha sido el programa estándar de la industria en el campo de la adquisición de datos, control de instrumentos y automatización. Estas últimas mejoras facilitan a los ingenieros el uso de la información y los datos de pruebas para impulsar el rendimiento del producto y de la empresa. Las últimas mejoras incluyen:

- Zoom para diagrama de bloques
- Cambio rápido para crear objetos
- Doble clic para crear control o indicador a partir de un cable
- Mejoras visuales y opción de velocidades de ejecución
- Reconstrucción más rápida de aplicaciones y bibliotecas de proyectos empaquetadas
- Soporte de entorno virtual para usuarios de Python y LabVIEW

Además, NI y JKI firmaron una colaboración para centrarse en la mejora de los flujos de trabajo relacionados con paquetes en LabVIEW. Esto incluyó la expansión de las funciones del VI Package Manager (VIPM), haciéndolo más robusto para los programadores, así como la adición de Dragon.

Esta versión inicial se centra en el uso de proyectos y paquetes, y la relación continuará para mejorar la forma en que los programadores comparten y reutilizan el código.

JKI creó por primera vez VI Package Manager para ayudar a los programadores de LabVIEW a crear y reutilizar bibliotecas de código de LabVIEW. Esta colaboración con NI amplía la funcionalidad a los desarrolladores de LabVIEW en VIPM, como el acceso que los programadores tienen a los recursos disponibles en VIPM.io.

Las nuevas funciones de LabVIEW lo han hecho más fácil de usar, eficiente y potente para ayudar a los ingenieros de pruebas a centrarse en convertir el rendimiento de las pruebas en rendimiento empresarial.

2.3 Definición de términos

Contaminación de agua por relave (iAgua, 2018): La preocupación por la calidad de las aguas superficiales está directamente relacionada con la vida humana y con la irrigación, la contaminación del agua por relave no permite la vegetación, hay aumento de la erosión; la contaminación química afecta a cubierta vegetal y, por tanto, del hábitat de la fauna.

Por ejemplo, por lo menos las aguas de 8 ríos principales en el Perú están afectadas por altos niveles de cianuro y/o metales, incluyendo cobre, plomo, zinc, cadmio, arsénico, níquel, y mercurio. Al mismo tiempo, algunos de estos ríos son también afectados por contaminantes que no están relacionados a la minería, tales como los coliformes y nitratos, incluyendo el Rímac que es la única fuente de agua de beber para más de 10 millones de habitantes de Lima.

Sistema de control (Wikipedia, Sistema de control, 2021): Es un conjunto de dispositivos encargados de administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de otro sistema, con el fin de reducir las probabilidades de fallo y obtener los resultados deseados. Por lo general, se usan sistemas de control industrial en procesos de producción industriales para controlar equipos o máquinas.

Adquisición de datos (Agüero, 2017): Es un proceso mediante el cual fenómenos físicos del mundo real (sistema analógico) son transformados en señales eléctricas. Estas señales son medidas y convertidas en formato digital (conversión analógica-digital) para su procesamiento, análisis y almacenamiento en una computadora.

Para ello se utiliza un módulo de digitalización o tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ). Un sistema de adquisición de datos, se compone básicamente de: Sensores y transductores, acondicionamiento de la señal, hardware y software para la adquisición de datos, PC (sistema de operación).

Tecnología LoRa (Hernandez, 2019): LoRa es una tecnología de modulación del tipo spread spectrum (amplio espectro). Esto le permite tolerar ruido, caminos múltiples de señal y el efecto Doppler, mientras mantiene muy bajo el consumo de energía. El costo de lograr esto es el ancho de banda, que es muy bajo comparado con otras tecnologías inalámbricas. LoRa permite comunicar dispositivos hasta 30 km. en campo abierto, con un mínimo consumo de energía en los nodos remotos.

Sin embargo, esto no representa un problema cuando se trata de sensores que envían solo unos pocos bytes de información en intervalos de tiempo que van desde segundos hasta minutos, lo cual es común en las aplicaciones de IoT. Con diseños y configuraciones adecuados, el bajo consumo de energía puede permitir que un sensor funcione con una batería tipo botón durante varios años (los casos típicos hablan de 3 a 5 años). Por supuesto, la duración de la carga de la batería dependerá de varios factores, como el intervalo de tiempo en que el dispositivo está inactivo o activo, el hardware utilizado y la temperatura de operación.

Monitoreo remoto (Omega, 2021): Al permitir que las personas visualicen los datos de cualquier lugar, el monitoreo remoto es ideal para situaciones con condiciones ambientales severas o peligrosas o donde una única persona o equipo debe monitorear los resultados de varios lugares o fuentes. En general, los usuarios acceden a la información a través de un navegador web y la Internet, lo que hace económico y fácil de configurar.

El monitoreo remoto puede combinarse con el monitoreo celular o inalámbrico para enviar alertas cuando las condiciones locales necesitan ser revisadas o atendidas. Este tipo de monitoreo suele incluir capacidades de diagnóstico remoto, lo que permite que el equipo identifique problemas y tome medidas correctivas de forma remota.

Enlace punto a punto (Wikipedia, Comunicaciones_punto-a-punto, 2021): En general, se refieren a una conexión limitada a dos extremos o nodos, por ejemplo:

computadoras o dispositivos móviles. Punto-a-punto en inglés se denomina point-to-point o sus variaciones. Entre otras cosas, también se refiere a peer-to-peer (P2P) para compartir archivos de redes.

Los enlaces punto a punto son una solución eficiente para conectar redes remotas, creando una única red cohesiva a través de canales inalámbricos dedicados. Su versatilidad abarca distancias cortas de apenas 20 metros hasta impresionantes extensiones de hasta 50 km, lo que los hace ideales para aplicaciones que van desde la conectividad local hasta la interconexión de comunidades rurales.

Estos enlaces, al proporcionar una comunicación directa y sin interferencias, son clave en entornos donde la infraestructura física puede ser limitada o costosa de implementar. Su capacidad para superar obstáculos geográficos los convierte en una herramienta fundamental en la expansión de la conectividad digital, tanto en áreas urbanas como en zonas remotas. Además, su configuración y mantenimiento relativamente sencillos los hacen accesibles incluso para usuarios con conocimientos técnicos básicos.

Sensor de nivel (Omega Engineering, 2023): El Sensor de nivel es un dispositivo electrónico que mide la altura del material, generalmente líquido, dentro de un tanque u otro recipiente. Integral para el control de procesos en muchas industrias.

Los sensores de nivel se dividen en dos tipos principales. Los sensores de nivel de punto, que se utilizan para marcar la altura de un líquido en un determinado nivel prestablecido. Los sensores de nivel continuos, son más sofisticados y pueden realizar el seguimiento del nivel de todo un sistema.

Estos miden el nivel del fluido dentro de un rango especificado, en lugar de en un único punto, produciendo una salida analógica que se correlaciona directamente con el nivel en el recipiente.

Sensor de corriente (Arrow Electronics, 2020): Los sensores de corriente son dispositivos utilizados para medir el flujo de corriente en un circuito eléctrico. También conocidos como transductores de corriente o transformadores de detección de corriente, estos dispositivos están disponibles en varios tipos para medir intensidad de corriente eléctrica del tipo AC o DC; así tenemos: los de efecto Hall, las bobinas de Rogowski y los transformadores.

Estos sensores de corriente no tienen una conexión eléctrica directa, lo que permite un aislamiento galvánico del circuito de medida. Funcionan en circuitos de lazo abierto o cerrado. Los circuitos de lazo abierto suelen ser más económicos, pero menos precisos que las alternativas de lazo cerrado, ya que utilizan la tensión de detección para obtener directamente el flujo de corriente.

Un sensor de efecto Hall detecta el flujo magnético causado por la corriente en el conductor que está siendo medido induciendo un flujo de corriente en una bobina de detección. El dispositivo se coloca en un hueco en el núcleo de la bobina detectora y emite una tensión Hall proporcional al flujo de la corriente de la bobina.

Los sensores de corriente tipo transformador se emplean para detectar y medir la corriente alterna. Estos sensores se utilizan comúnmente en aplicaciones como equipos de prueba. En este caso, un anillo de hierro blando o ferrita dividida rodea a un conductor por el cual circula la corriente que se desea medir. Un alambre se enrolla alrededor del material del núcleo, creando así un transformador de corriente con el cable individual que lo rodea.

2.4 Variables

Variable independiente: Prototipo de monitoreo remoto (permite que los usuarios visualicen los datos de cualquier lugar).

Variable dependiente: Control del sistema de retorno de agua de infiltración.

2.5 Operacionalización de variables

En la Tabla 4 se muestra la operatividad de las variables, señalando sus dimensiones, indicadores, unidades de medida y los instrumentos que son utilizados.

Tabla 4

Definición operativa de variables

Definición operativa	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos
Variable independiente X = Prototipo de monitoreo remoto (Permite que los usuarios visualicen los datos de cualquier lugar, en condiciones ambientales severas, peligrosas o donde un equipo debe monitorear los datos de varios lugares o fuentes y proveen de métricas para una base de datos, útiles para prevenir fallas críticas o cuando estas ocurren)	X1 = Tecnologías inalámbricas • LPWAN LoRa	Cantidad de datos (Bytes) Longitud de enlace (m) RSSI (dBm) SNR (dBm) Perdida de datos (Bytes)	Kit módulo LoRa y LCD.
Variable dependiente: Y = Control del sistema de retorno de agua de infiltración (Revisa si la variable de proceso está por encima o por debajo de un setpoint determinado. El control utilizado es ON u OFF. Este tipo de control lo podemos ver en procesos como el control de nivel de agua de un tanque, donde lo que se quiere es evitar su derrame con actuadores y alarma)	Y1 = Nivel del reservorio Y2 = Funcionamiento de las electrobombas	Nivel prefijado para activación de electrobomba (m) Activación de alarma sonora y luminosa Consumo de corriente en ON, OFF o vacío de electrobomba (A)	Sensor de ultrasonido. Sensor de corriente. Protocolo. Tablero de control y electrobombas. Kit de alarma.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ámbito temporal y espacial

La investigación se realizó en la temporada que corresponde a la estación de invierno de lluvias torrenciales y cielo nublado, a temperatura promedio de 10 °C, durante los meses de diciembre hasta marzo. La unidad minera San Rafael se encuentra en la cordillera oriental de los andes del Perú a 4500 msnm, ubicado en la coordenada 14° 15`20” Sur y 70° 19`12” Oeste, en la provincia de Melgar del departamento de Puno al sur del Perú, aproximadamente a 1200 km de Lima. Las pruebas de campo se realizaron específicamente en los alrededores de la relavera B3 y dique B3 de la unidad minera San Rafael.

3.2 Tipo de investigación

El tipo de investigación a realizar, es tecnológica (Tam Malaga, Vera, & Oliveros Ramos, 2008). En las ciencias de la ingeniería se presenta una serie de características que la vinculan en forma natural con la innovación tecnológica, lo cual indica que las instancias de promoción inicial de los proyectos de investigación y la evaluación de la investigación tecnológica pueden ser utilizadas como un instrumento para fomentar la innovación.

Con innovación tecnológica se designa la incorporación del conocimiento científico y tecnológico, propio o ajeno, con el objeto de crear o modificar un proceso productivo, un artefacto, una máquina, para cumplir un fin valioso con la sociedad.

La investigación es de tipo aplicada-tecnológica, porque se aplica los recursos tecnológicos y de conocimientos existentes dentro del campo de la ingeniería electrónica, telecomunicaciones, ambiental, de software, además una serie de dispositivos hardware y software como parte de un sistema de monitoreo remoto inalámbrico y control del sistema de retorno de agua de infiltración de relave del sumidero en la unidad minera San Rafael ubicado en la provincia de Melgar departamento de Puno.

3.3 Nivel de investigación

Por los objetivos que se persigue, el nivel de investigación a la que corresponde es descriptiva. En (Hernández, 2012), se define el nivel descriptivo como aquel que se efectúa cuando se desea describir, todos sus componentes principales, una realidad. Para el prototipo a escala, se describe el proceso de monitoreo de nivel del sumidero y sistema de bombeo, y control remoto de la bomba de contingencia, utilizando la tarjeta Arduino Nano V3 con interface USB y los transceptores LoRa Ra-02 SX1278, evitando el rebose del reservorio de emergencia para no contaminar el riachuelo que es afluente del rio Antauta. El agua del riachuelo y el rio son utilizados por la población rural y otros.

3.4 Métodos de investigación

El método de investigación científico es un procedimiento de actuación general que se sigue en el conocimiento científico; por lo tanto, el procedimiento científico se concreta en un conjunto de fases o etapas. En esta investigación se empleó el método científico y se utilizó como proceso lógico la deducción. En (Carbajal Rodríguez, 2013) señala que la deducción se entiende a la conclusión a la que lleguemos después de un razonamiento.

Metodología de diseño:

Dentro del contexto del planteamiento del problema y los antecedentes, para la investigación se utilizó tres elementos metodológicos: Fundamento teórico, desarrollo del hardware y desarrollo del firmware, como se muestra en la Figura 22. Se debió validar el prototipo de monitoreo remoto.

El fundamento teórico se basó en la recopilación de información de conceptos sobre la tecnología de comunicación inalámbrica LoRa punto a punto, monitoreo/medición y automatización/control remoto, tecnología LoRa, interface, sensor de corriente, tablero de control, electrobombas, etc. Teniendo presente el problema de evitar el reboce del sumidero de agua de infiltración de relave; se desarrolló el equipamiento y programas con algoritmos adecuados. Implementado el prototipo se validó por partes, luego integrado y todo el prototipo completo; se realizaron modificaciones en equipamiento y programas, se adquirieron los datos y se controló remotamente, se procesaron los resultados para finalmente obtener las conclusiones.

Figura 22

Esquema general de la metodología de investigación

En el desarrollo del prototipo a escala de la investigación, se emplearon una variedad de materiales, que incluyen dispositivos electrónicos, varios micromódulos electrónicos, componentes eléctricos, tanques de PVC, tuberías, entre otros. Estos materiales se encuentran distribuidos en los siguientes módulos:

3.4.1 Módulo controlado

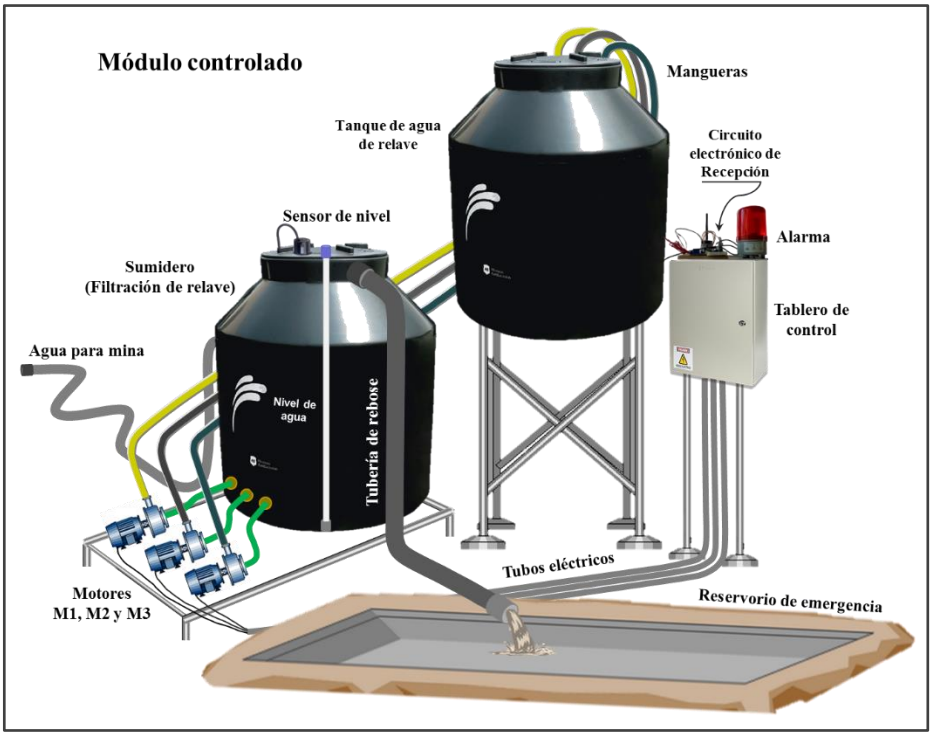
El diagrama pictórico del módulo se muestra en la Figura 23. Esta se encarga de la parte lógica programada, se encargó del control de encendido o apagado de motores y alarma, según el nivel de agua del tanque, tiempo de muestreo para el nivel de agua y corriente de consumo de los 3 motores. La Figura 24 muestra su esquema general.

Está conformado por:

- Dos tanques de agua de polietileno con capacidad de 600 litros
- Tres bombas centrifugas de 0.5 HP/220 AC monofásico
- Tubo visor transparente de nivel de Ø3/4”
- Tuberías de PVC de Ø1”
- Adaptadores diversos
- Estructura metálica para los tanques
- Válvulas manuales tipo bola de PVC para agua de Ø 1”
- Niples de PVC de Ø 1”
- Uniones universales de Ø1”
- Codos de 90° de Ø3/4”
- Manguera Ø1”

Figura 23

Módulo controlado completo



Tablero de control.

La Figura 25 y 26 muestra sus esquemas eléctricos.

- Tablero eléctrico 35 x 45 x 15 cm con protección IP20
- Tres sensores de corriente SCT-013-030
- Un interruptor termomagnético monofásico 220/400V – 25A
- Cuatro interruptores termomagnético monofásico 220/400V – 16A
- Tres contactores trifásicos 220/400V – 16A
- Tres relés térmicos trifásico 22A
- Tres pulsadores ON
- Tres pulsadores OFF
- Pulsador de parada de emergencia
- Tres selectores (manual-automático)
- Una alarma sonora/luminosa
- Diversas regletas

- Cable eléctrico
- Borneras
- Rótulos diversos
- Estructura metálica para soporte del tablero eléctrico
- Tuberías flexibles de PVC de Ø1/2”

Circuito de recepción.

La Figura 27 muestra su esquema electrónico.

- Un transceptor LoRa Ra-02 SX1278 / 433 MHz con base y antena
- Una tarjeta Arduino Nano V3
- Dos OPAM LM380
- Fuente de voltaje regulado de 5V/2A
- Micromódulo de cuatro relés de 5V/10A
- Sensor de nivel de agua por ultrasonido (JSN-SR04T)
- Cables diversos
- Cable USB
- Cable de alimentación de 220 VAC
- Dos protoboard
- Resistores de diversos valores
- Capacitores, leds, etc.

Figura 24

Diagrama de bloques del módulo controlado completo

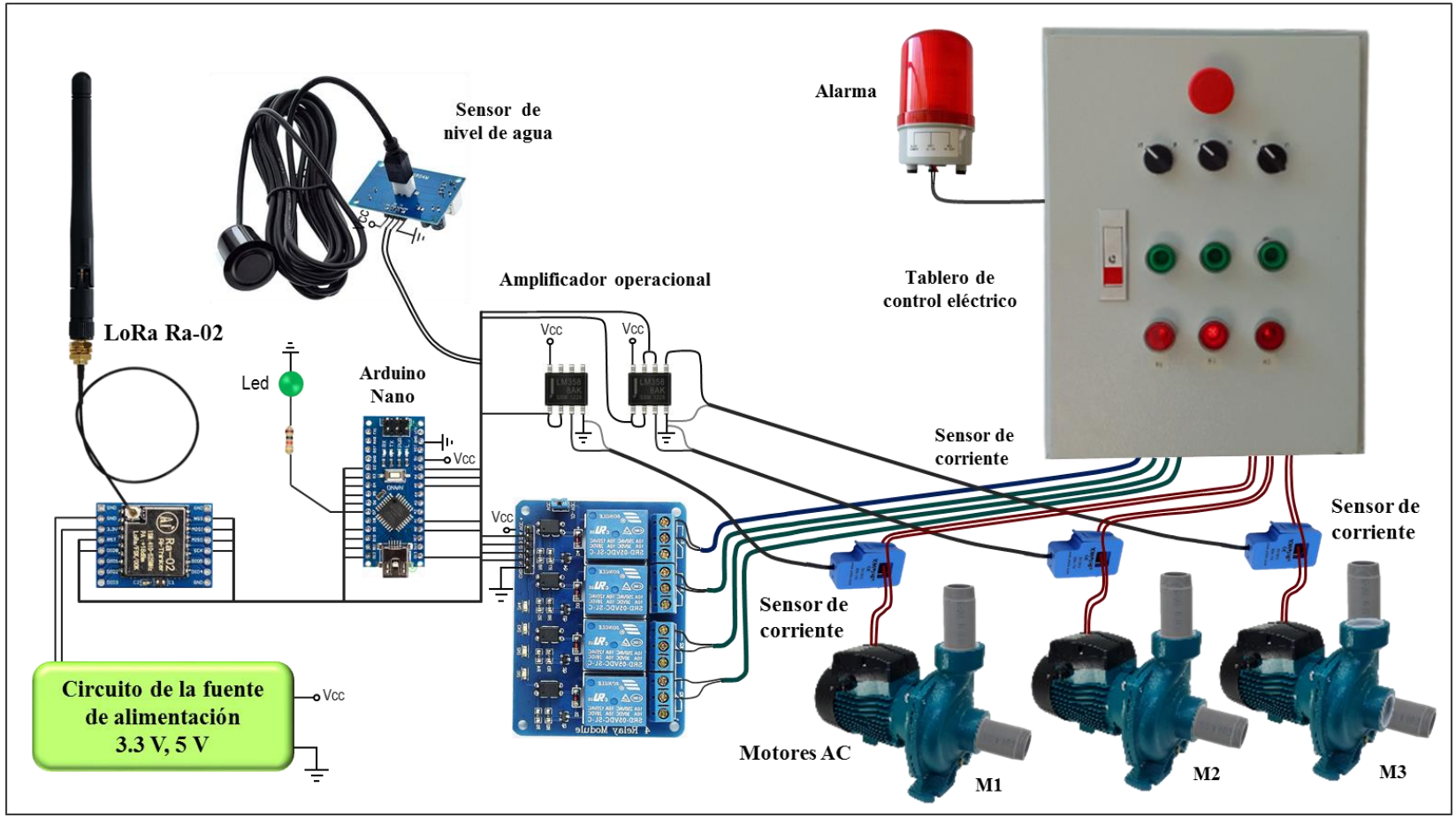


Figura 25

Esquema del circuito eléctrico de potencia

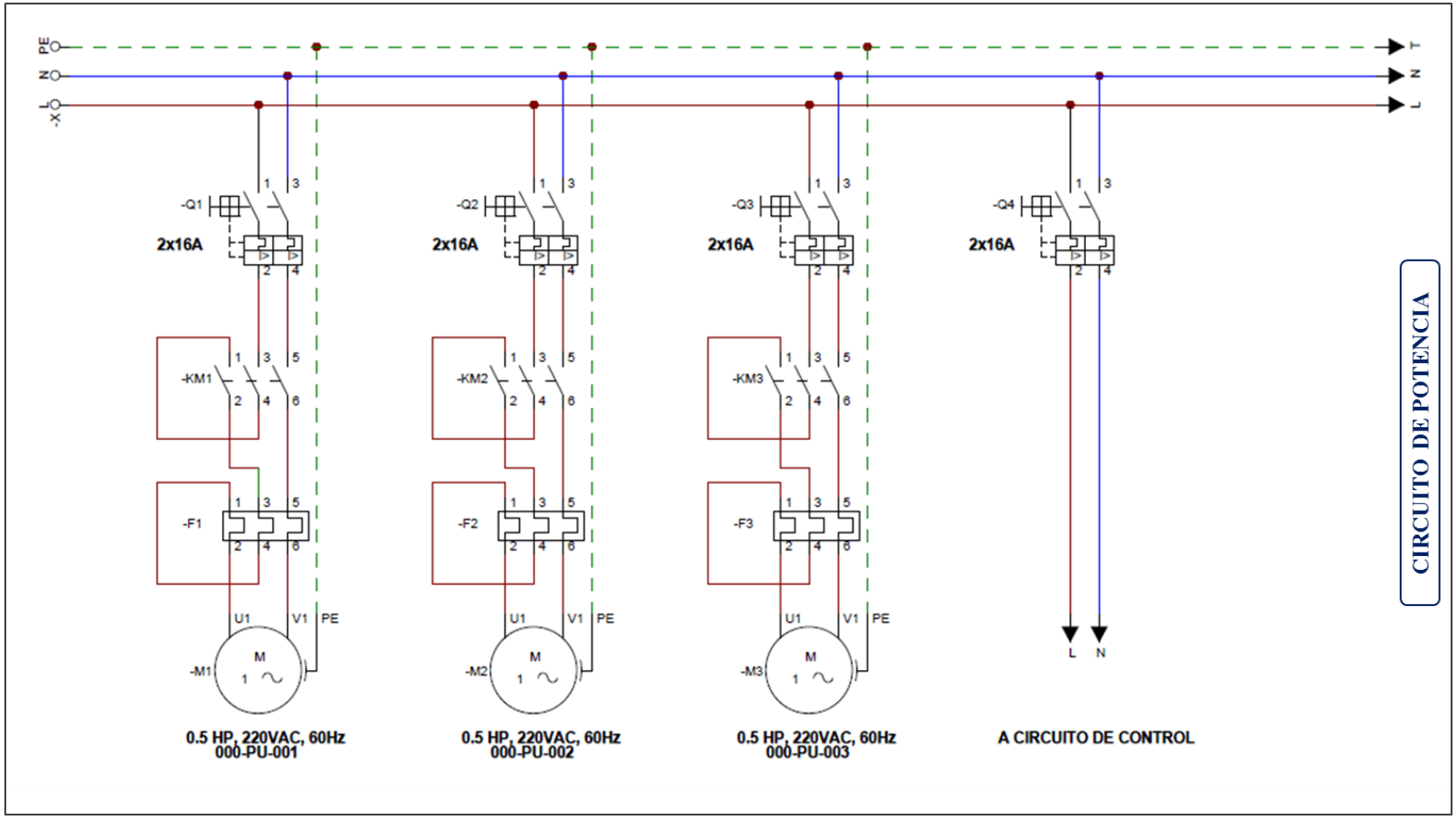


Figura 26

Esquema del circuito eléctrico de control

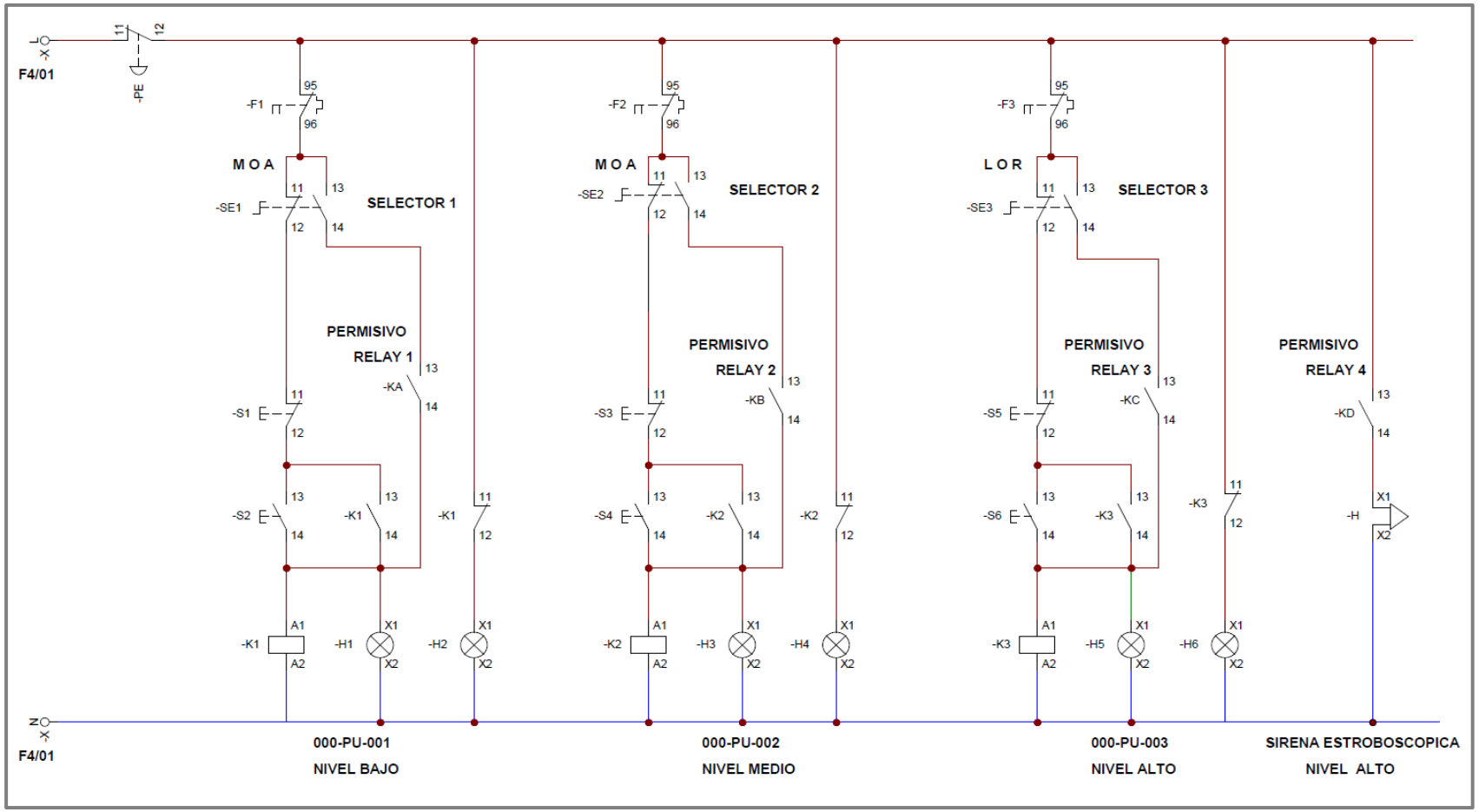
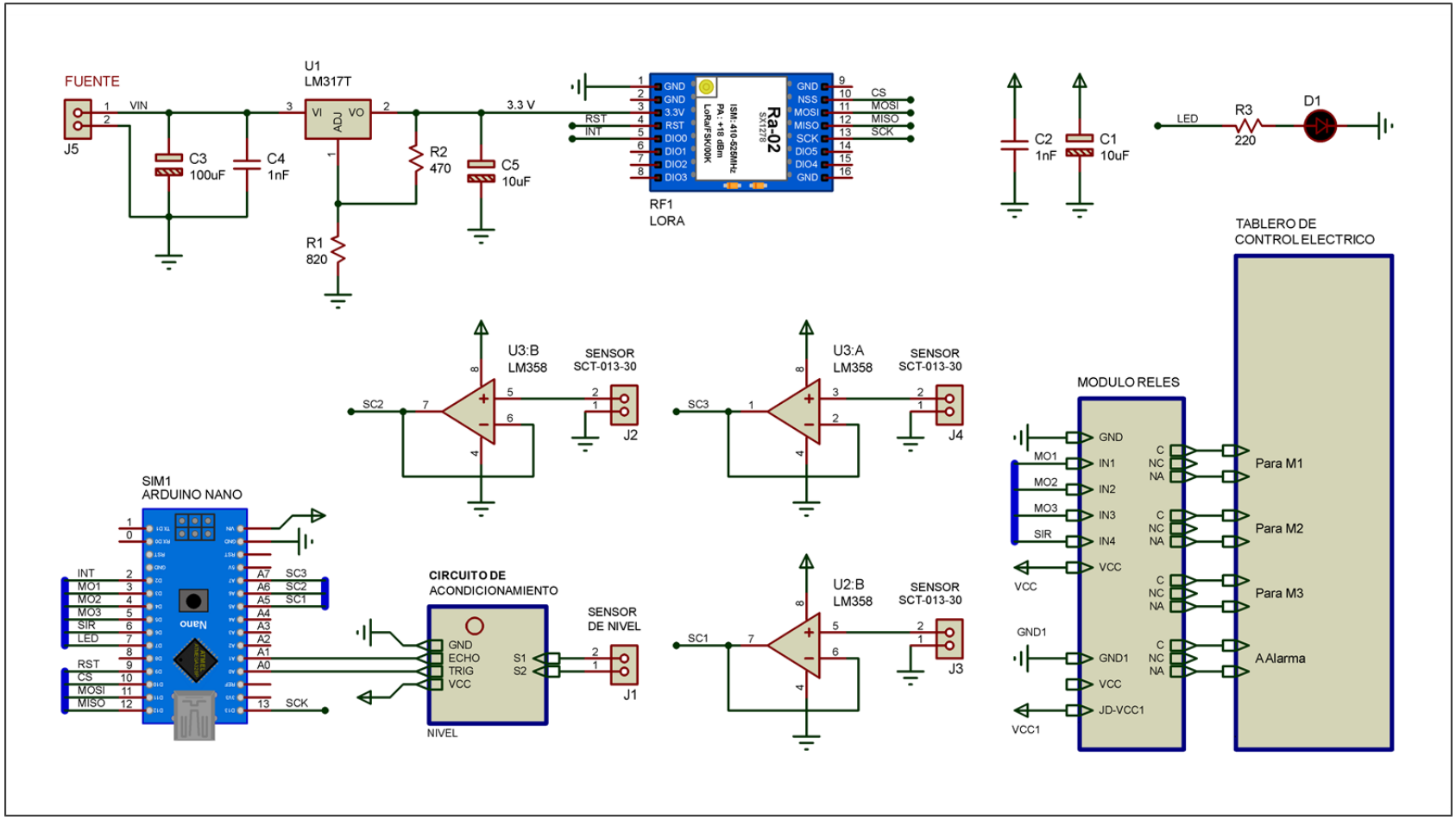


Figura 27

Esquema del circuito electrónico de recepción



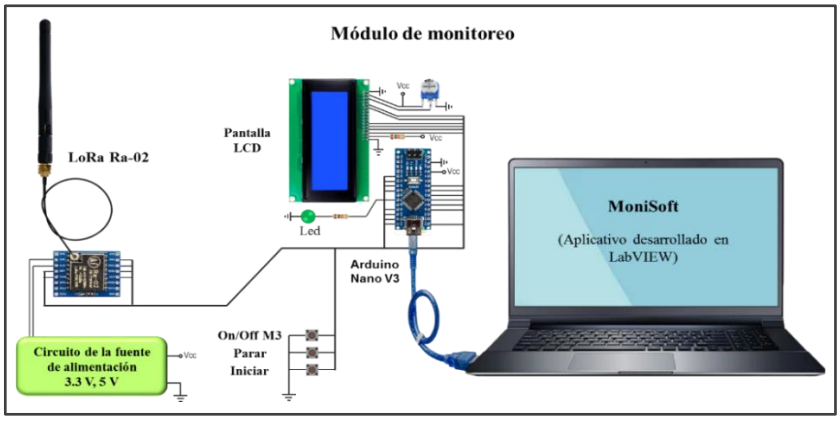
3.4.2 Módulo de monitoreo

La Figura 28 muestra el diagrama de bloques de la unidad de monitoreo, el cual está conformado por:

- Laptop y cable USB
- Transceptor LoRa SX1278 Ra-02/ 433 MHz con base y antena
- Una tarjeta Arduino Nano V3
- Una pantalla LCD de 20x4 con fondo iluminado
- Fuente de voltaje regulado de 5V/2A
- Pulsadores, diodos leds, resistores y otros
- Pulsadores, resistencias, potenciómetro, led, etc.

Figura 28

Módulo de monitoreo completo



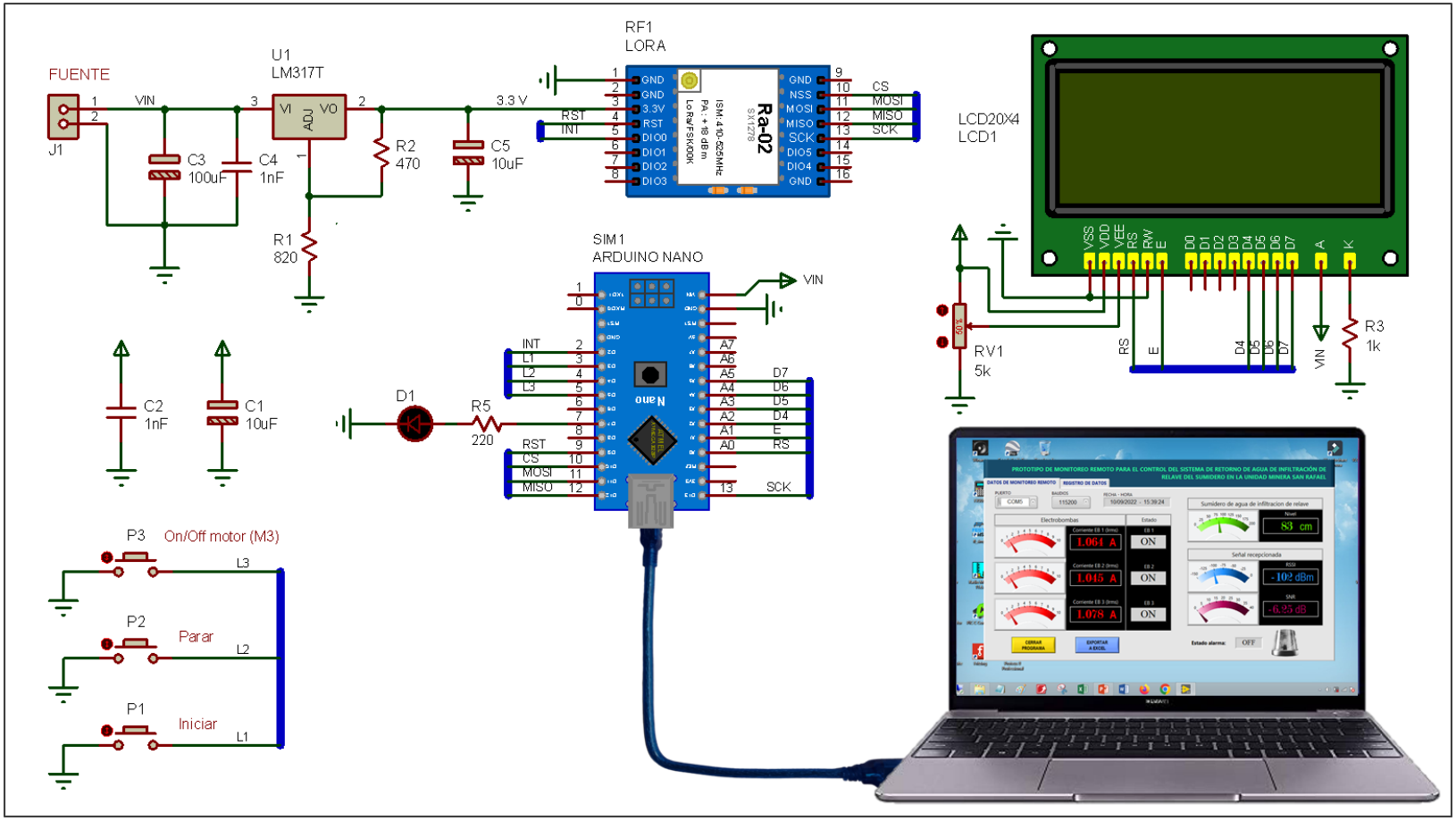
Así mismo se utilizaron los programas: Proteus ISIS 8.14 sp0, para realizar los esquemas y simulaciones de circuitos electrónicos; CADe_SIMU 4.0, para realizar los esquemas y simulaciones de circuitos eléctricos; LabVIEW 2020 para desarrollar el aplicativo de monitoreo y adquisición de datos de los sensores.

La Figura 29 muestra el esquema del circuito electrónico de recepción, que es parte del módulo de monitoreo y también puede transmitir.

El circuito de transmisión y circuito de recepción realizan el enlace de comunicaciones LoRa, y monitoreo remoto del sistema.

Figura 29

Esquema del circuito electrónico de la unidad de monitoreo



3.5 Diseño de investigación

En la investigación se utilizará el diseño cuasiexperimental (Sánchez Carlessi & Reyes Meza, 2017). Los diseños cuasi experimentales se emplean en situaciones en las cuales es difícil el control experimental riguroso y se cuenta con un grupo; por ejemplo, en la prueba de un equipo en una planta; esta no puede parar. En la investigación se evalúa el comportamiento del prototipo de monitoreo/control remoto para diversas situaciones.

El diseño de la investigación queda representado con el siguiente esquema:

$$\left.\begin{array}{l} M0: \quad O0 \\ M1: \quad O1 \\ M3: \quad O3 \\ \quad . \\ \quad . \\ \quad . \\ Mn: \quad On \end{array}\right\} \text{A ser comparados con los valores establecidos de nivel, consumo de corriente de electrobomba, RSSI y SNR.}$$

Dónde:

M0, M1, M3, …, Mn: Es la muestra de investigación.

O1, O2, O3, ..., On: Son datos adquiridos de variables de la investigación.

3.6 Población, muestra y muestreo

Población: Está constituida por las medidas del nivel de agua del sumidero y corriente consumido por las electrobombas; estas mediciones se consideran infinitas por lo que la población es infinita.

Muestra: El monitoreo remoto se realizó de forma automática, la toma de datos de las medidas utilizando el aplicativo ProgMoni.vi desarrollado en LabVIEW 2020. Las muestras a tomar son para las medidas de nivel del sumidero de infiltración y el consumo de corriente eléctrica de las electrobombas.

El tamaño de la muestra, para una población ***N*** infinita, se determina utilizando la Tabla 5 (Bejarano Benites, Mormontoy Laurel, & Tipacti Alvarado, 2006) y la siguiente fórmula:

$$n = \frac{Z^2(P)(1-P)}{E^2}$$

Dónde:

n: Tamaño de la muestra a considerar.

Z: Nivel de confianza o coeficiente de confianza, del 95%.

E: Error de la muestra o error permitido de 5%.

P: Proporción de unidades que poseen el atributo de interés en la población. Se considera el 50%.

Reemplazando los valores en la ecuación anterior, obtenemos como resultado:

$$n = \frac{(1.96)^2(0.5)(1-0.5)}{(0.05)^2}$$

$$n = \frac{0.9604}{0.0025} \rightarrow n = 385$$

Entonces el número de muestras necesarias es 384.

Tabla 5

Muestra los valores que toma Z y E

Los valores Z más utilizados y sus niveles de confianza							
Z	1,15	1,28	1,44	1,65	1,96	2	2,58
Nivel de confianza	75%	80%	85%	90%	95%	95,5%	99%
Error (E)	25%	20%	15%	10%	5%	4,5%	1%

Fuente: (Bejarano Benites, Mormontoy Laurel, & Tipacti Alvarado, 2006).

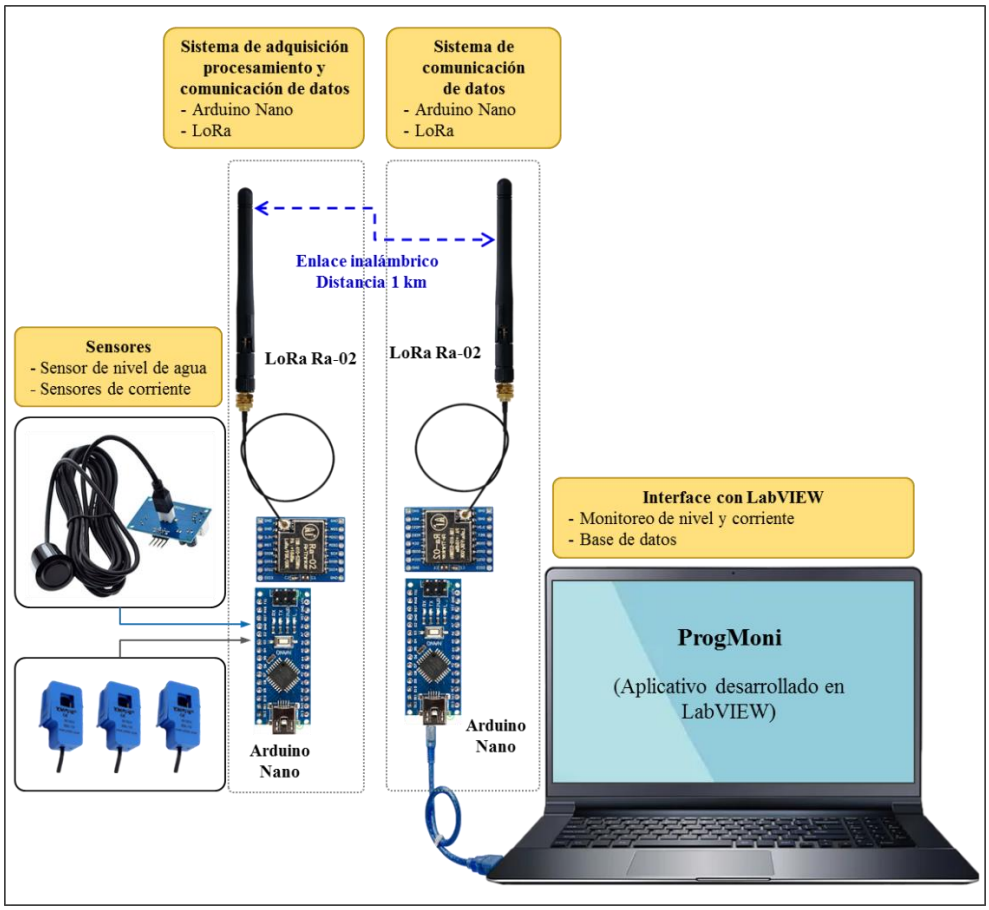
3.7 Técnicas e instrumento de recolección de datos

En la investigación se empleó la técnica de la observación y toma de datos a través de diversos sensores, realizando la medida de las variables nivel de agua y consumo de corrientes del sistema electrónico.

Se implementó un sistema electrónico de recolección de datos compuesto por: sensor de nivel, sensores de corriente, tarjetas Arduino Nano y módulos LoRa. La Figura 30, presenta el diagrama general del sistema electrónico que permitió la recolección de datos.

Figura 30

Diagrama general del sistema electrónico implementado



El sistema de recolección de datos, es parte del módulo controlado y el módulo de monitoreo. La Figura 31, muestra el módulo controlado implementado en laboratorio. Los datos que fueron adquiridos automáticamente en tablas en las que cuentan con los ítems siguientes: corriente de funcionamiento de las electrobombas, estado de funcionamiento de las electrobombas, estado de la alarma, nivel del sumidero, RSSI, NSR y fecha - hora; través del aplicativo desarrollado en LabVIEW.

Figura 31

Módulo controlado implementado

La Figura 32, muestra el módulo de monitoreo implementado el cual se conecta a una laptop con el aplicativo ProgMoni.vi desarrollado en LabVIEW para la adquisición de datos.

Sensores

a. Sensor de nivel

El sensor permitió medir el nivel de agua de infiltración de relave, entregando un valor numérico en centímetros.

Para la lectura de datos de nivel de agua de infiltración, se implementó el algoritmo de la Figura 33.

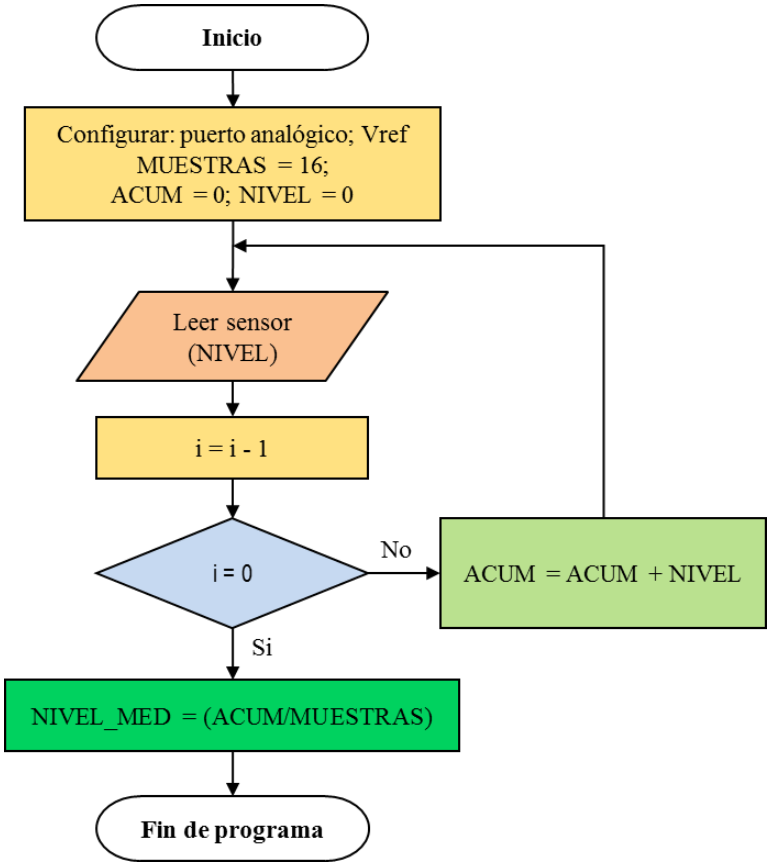
Figura 32

Módulo de monitoreo implementado

Para las condiciones ambientales de la cordillera de los andes en donde se encuentra la unidad minera San Rafael con: lluvias torrenciales, granizo, heladas, vientos y bajas temperaturas en general, existentes en la minería del lugar, se implemento un prototipo de monitoreo remoto que controla el sistema de retorno de agua de infiltración de relave del sumidero. Este prototipo debe controlar el nivel de agua de infiltración, verificar el funcionamiento correcto de las electrobombas de drenaje de agua de infiltración, activando la sirena estroboscópica, cuando el nivel de agua del tanque de sumidero y evitar su rebose.

Figura 33

Diagrama de flujo del algoritmo de lectura de datos: sensor de nivel



b. Sensor de corriente

Los sensores posibilitaron la medición del consumo de corriente de las tres electrobombas de drenaje del reservorio de infiltración de relave, proporcionando un valor numérico en amperios. Se implementó el algoritmo de la Figura 34, para la lectura de consumo de corriente de las tres electrobombas de drenaje.

Sistema de adquisición, procesamiento y comunicación de datos

Es parte del módulo controlado implementado, permite adquirir los datos del sensor de nivel y sensores de corriente de manera continua. Se procesa una trama de datos y se envía a LoRa Ra-02 por el puerto SPI. El diagrama de flujo del algoritmo se presenta en la Figura 35.

Figura 34

Diagrama de flujo del algoritmo de lectura: sensores de corriente

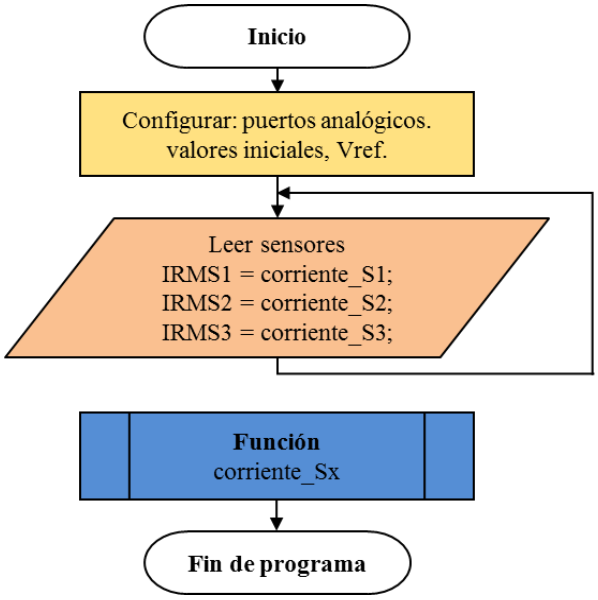
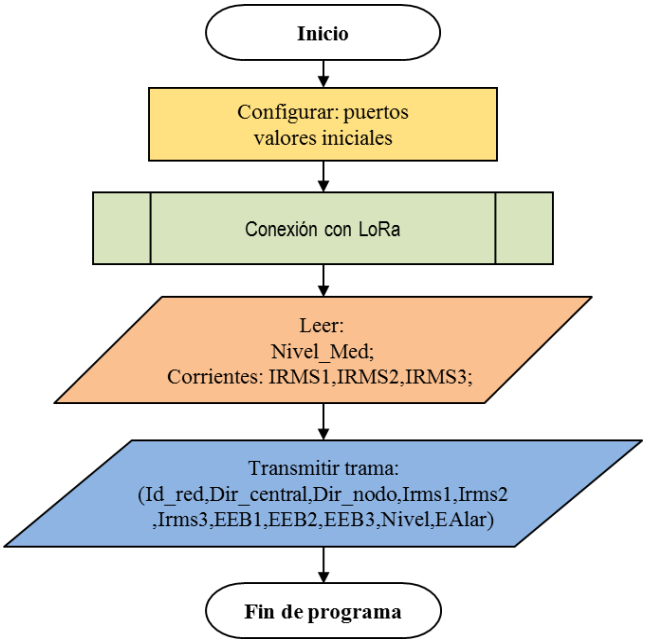


Figura 35

Diagrama de flujo del algoritmo del sistema de adquisición, procesamiento y comunicación de datos



La trama de datos provenientes del módulo controlado a través del enlace de comunicaciones con LoRa, que incluye: Identificación del enlace (Id red,

Dirección central, Dirección nodo), consumo de corrientes, estado de las electrobombas, nivel de agua, estado de alarma; con un total de 42 Bytes para el caso de pruebas y 76 bytes en caso de monitoreo remoto.

Sistema de comunicación de datos

Es parte del módulo de monitoreo implementado, que permite adquirir la trama de datos provenientes del módulo controlado a través del enlace de comunicaciones LoRa - LoRa, que incluye: Identificación del enlace (Id red, Dirección central, Dirección nodo), consumo de corrientes, estado de las electrobombas, nivel de agua, estado de alarma; con un total de 42 Bytes. La Tabla 6 muestra la trama de datos que ingresa al Arduino Nano vía el protocolo de comunicación SPI.

Tabla 6

Formato de la trama de datos transmitido

Identificacion de enlace

1B	1B	1B	1B	1B	1B
Id red	**,**	**Dir central**	**,**	**Dir nodo**	**,**
0xEE		0xAC		0x61	

5B	1B	5B	1B	5B	1B	3B	1B	3B	1B	3B	1B	2B	1B	3B
Irms1	**,**	**Irms2**	**,**	**Irms3**	**,**	**EEB1**	**,**	**EEB2**	**,**	**EEB3**	**,**	**Nivel**	**,**	**Ealar**
1.057		1.053		1.082		OFF		OFF		OFF		85		OFF

Datos de la trama transmitido

Interface con LabVIEW

Es parte del módulo de monitoreo implementado, en LabVIEW se desarrolló una aplicación denominado **ProgMoni.vi**, se encargó de monitorear el nivel de agua, las corrientes de consumo y guardarlos en una base de datos. Se realiza la conexión al aplicativo LabVIEW a través del puerto USB de la tarjeta Arduino Nano.

La trama de datos entrante al programa **ProgMoni**, se muestra en la Tabla 7, el cual consta: Identificación de enlace (Id red, Dirección central, Dirección nodo), consumo de corrientes, estado de las electrobombas, nivel de agua, estado de alarma, RSSI, SNR, Fecha-Hora; teniendo un total de 76 Bytes que se utiliza en el programa desarrollado. Este programa que consta del panel frontal, diagrama de bloques y la tabla, se muestra en las Figuras 36, 37 y la Tabla 8.

Se registraron los datos de las medidas del nivel de agua, el consumo de corriente de las electrobombas; estos datos leídos se guardarán en una tabla de datos previa codificación y organizados en: consumo de corriente de las tres electrobombas, estado de las tres electrobombas, nivel de agua, estado de alarma, RSSI, SNR, Fecha-Hora.

Tabla 7

Formato de la trama de datos que ingresa a ProgMoni

Identificacion de enlace																							
1B	1B	1B	1B	1B	1B	5B	1B	5B	1B	5B	1B	3B	1B	3B	1B	3B	1B	2B	1B	3B	1B	4B	1B	6B	1B	21B
Id red	**,**	**Dir central**	**,**	**Dir nodo**	**,**	**Irms1**	**,**	**Irms2**	**,**	**Irms3**	**,**	**EEB1**	**,**	**EEB2**	**,**	**EEB3**	**,**	**Nivel**	**,**	**EAlar**	**,**	**RSSI**	**,**	**NSR**	**,**	**Fecha - Hora**
0xEE		0xAC		0x61		1.057		1.053		1.282		OFF		OFF		OFF		85		OFF		-130		-18.37		20/10/2023-23:14:10

Datos de la trama entrante al programa ProgMoni

3.8 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

El análisis y procesamiento de los datos obtenidos, se realizaron en función al valor medio y la desviación estándar de los datos que se obtuvieron en las mediciones realizadas, y su respectiva validación; con lo cual se acepta la

validez de los datos obtenidos en las mediciones realizadas de nivel de agua en el reservorio de infiltración y el consumo de corriente para las diversas combinaciones de funcionamiento normal de las electrobombas.

La validación del enlace de comunicación entre el módulo controlado y el módulo de monitoreo, crucial para garantizar la fiabilidad de la transmisión de datos, se llevó a cabo meticulosamente. Se empleó una prueba de campo que abarcó una distancia de aproximadamente un kilómetro, donde se evaluó la capacidad del sistema para mantener una conexión estable. Esto se logró mediante la comparación con la sensibilidad de recepción del módulo LoRa Ra-02, que es de -148 dBm, un estándar reconocido en la industria. Además, se verificó la integridad de la transmisión examinando la pérdida de datos para los 42 bytes de información enviados, asegurando así que la comunicación se mantenga robusta incluso en condiciones adversas.

Los datos recopilados fueron adquiridos mediante el software de LabVIEW, conocido por su precisión en la adquisición de datos en tiempo real. Posteriormente, para analizar y comprender mejor estos datos, se empleó la estadística descriptiva, una herramienta fundamental para revelar patrones y tendencias significativas. Esta etapa de análisis se llevó a cabo utilizando Microsoft Excel, aprovechando su versatilidad para generar tablas y gráficos que facilitaron la interpretación de los resultados. Esta combinación de tecnologías permitió una exploración exhaustiva de los datos, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones y el avance del proyecto.

Así mismo se consideró, el marco legal peruano que contempla la no contaminación de agua de ríos; esta situación la prevé en la Ley 1775274 en su capítulo II, artículo 22, que a la letra dice “Está prohibido verter o emitir cualquier residuo, sólido, líquido o gaseoso que pueda contaminar las aguas causando daños o poniendo en peligro la salud humana o el normal desarrollo de la flora o fauna, comprometiendo su empleo para otros usos”. La problemática presentada esta muy latente en la unidad minera San Rafael.

Figura 36

Panel frontal del programa ProgMoni

Figura 37

Diagrama de bloques del programa ProgMoni

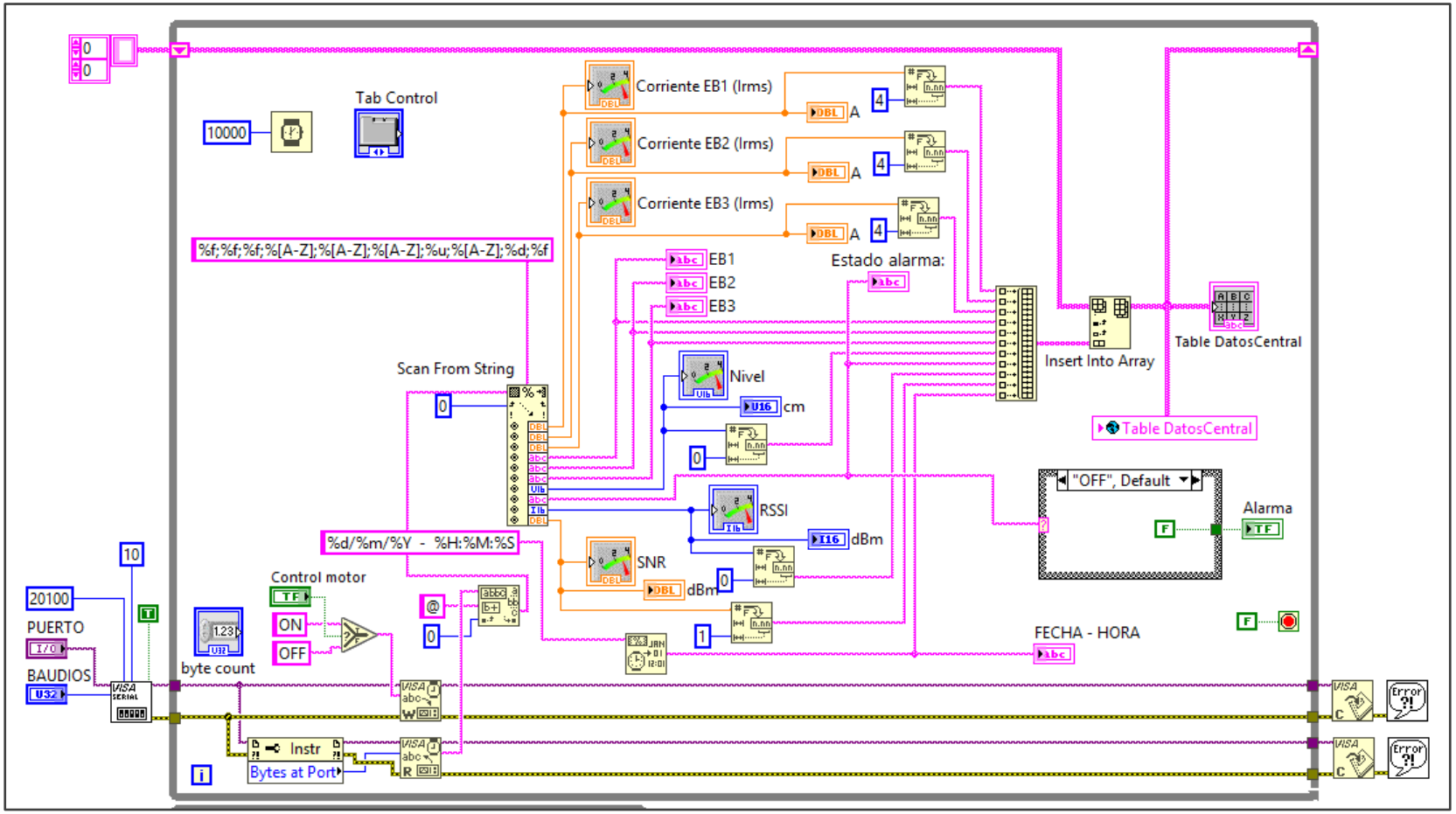
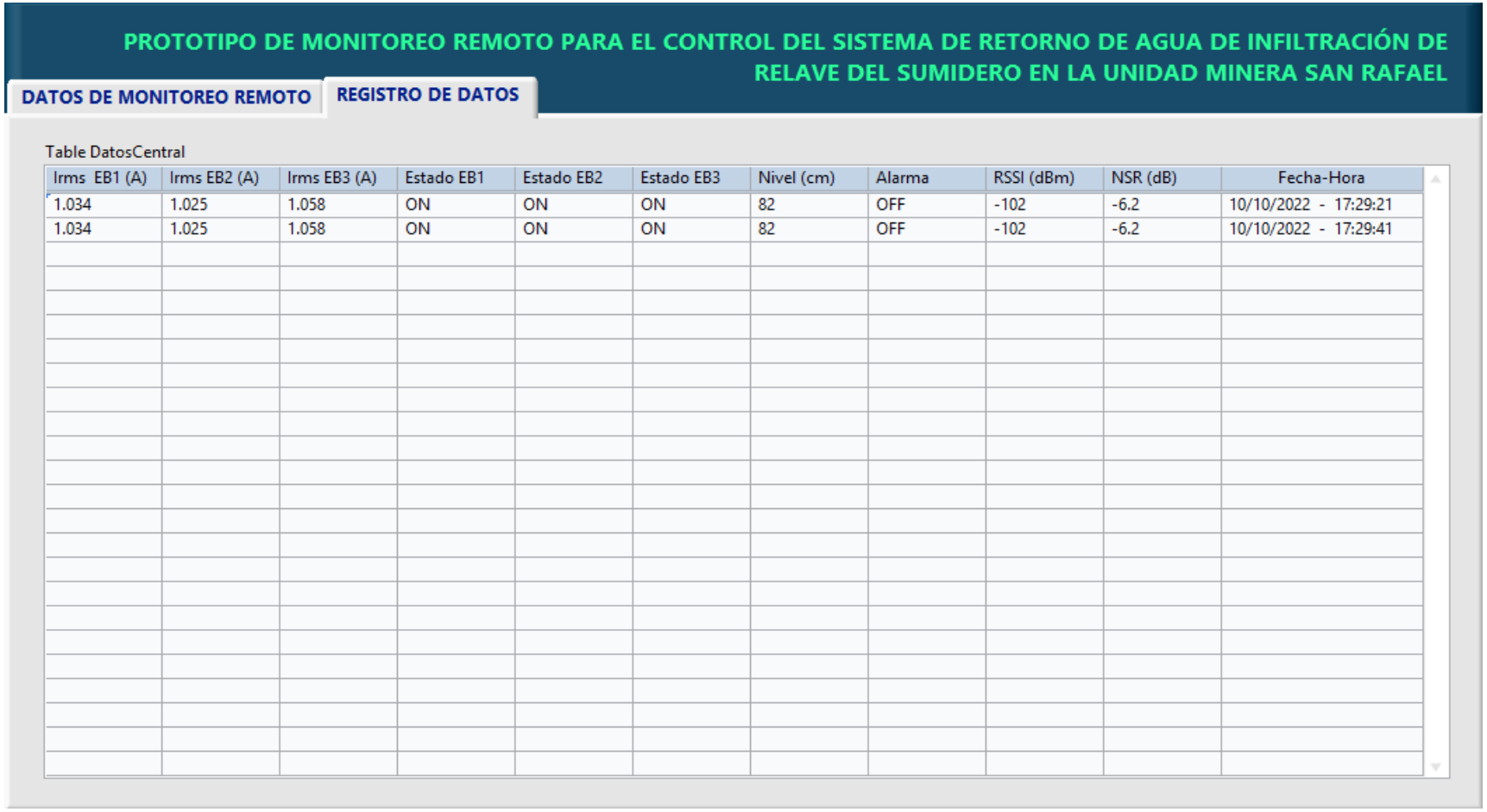


Tabla 8

Tabla generada por el programa ProgMoni



Irms EB1 (A)	Irms EB2 (A)	Irms EB3 (A)	Estado EB1	Estado EB2	Estado EB3	Nivel (cm)	Alarma	RSSI (dBm)	NSR (dB)	Fecha-Hora
1.034	1.025	1.058	ON	ON	ON	82	OFF	-102	-6.2	10/10/2022 - 17:29:21
1.034	1.025	1.058	ON	ON	ON	82	OFF	-102	-6.2	10/10/2022 - 17:29:41

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Análisis de información

Una vez concluido el ensamblado del prototipo, el cual fue realizado en diversas etapas, procedemos a realizar las pruebas orientadas a validar las diversas partes como: la parte que corresponde a la medida de nivel del tanque, medida del consumo de corriente eléctrica por funcionamiento de los motores y enlace de comunicaciones LoRa.

Se inició el ensamblado de los módulos, con las partes conformadas por los soportes metálicos, tanques, mangueras, sensores, módulo de monitoreo y módulo de control, concluyendo con todo el prototipo y su funcionamiento.

4.1.1 Pruebas por partes

Se realizó las pruebas de cada etapa del prototipo, llamados subsistemas, iniciando con las conexiones de llenado y vaciado de agua de tanques, medición del consumo de corriente eléctrica de los motores y enlace de comunicaciones LoRa. Finalmente se realiza las pruebas experimentales de forma independiente para la validación de los parámetros del sistema y la adquisición de datos desde el Arduino IDE, a través del puerto USB. El alcance de las pruebas realizadas,

según la Tabla 9, es tener retroalimentación para hacer modificaciones del diseño, en circuitería o programa.

Tabla 9

Pruebas al prototipo por partes

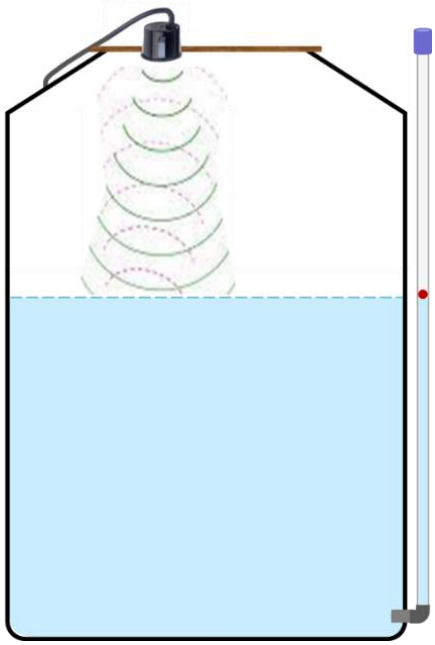
Alcance	Actividad	Tarea
Validación de medición de nivel de tanque	Prueba del sensor ultrasónico	Registro de nivel, sensor vs flexómetro
Validación de medición de corriente de consumo de electrobombas	Prueba de los sensores de corriente	Registro de consumo de corriente, sensores vs pinza amperimétrica
Validación de enlace comunicaciones LoRa	Prueba del transceptor LoRa Ra-02	Registro de datos en Arduino IDE

Validación de medición de nivel de tanque

Para la medición de la magnitud nivel de agua en el tanque, se utilizó el sensor ultrasónico JSN-SR04T, el cual fue instalado como se observa en la Figura 38.

Figura 38

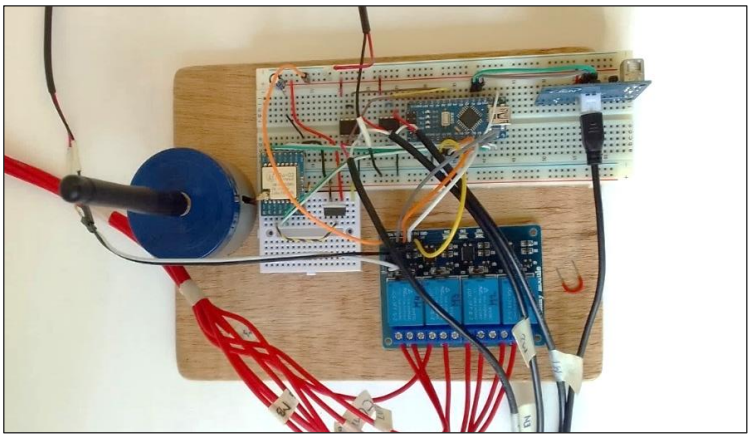
Posición del sensor de nivel ultrasónico JSN-SR04T



Para la medición del nivel de agua en el tanque se utiliza el circuito electrónico del módulo a controlar que se muestra en la Figura 39, donde se encuentra conectado el circuito de adaptación para el sensor ultrasónico.

Figura 39

Conexión del circuito de adaptación del sensor JSN-SR04T



Programado el Arduino Nano con el programa para medir el nivel de líquido (de la filtración de relave), se realizó tres medidas de nivel para cada caso y de forma simultánea sensor y flexómetro, como se muestra en las Figuras 40, 41 y 42.

Figura 40

Medidas de nivel de agua con flexómetro para 80.0 cm

Figura 41

Medidas de nivel de agua con flexómetro para 57.2 cm

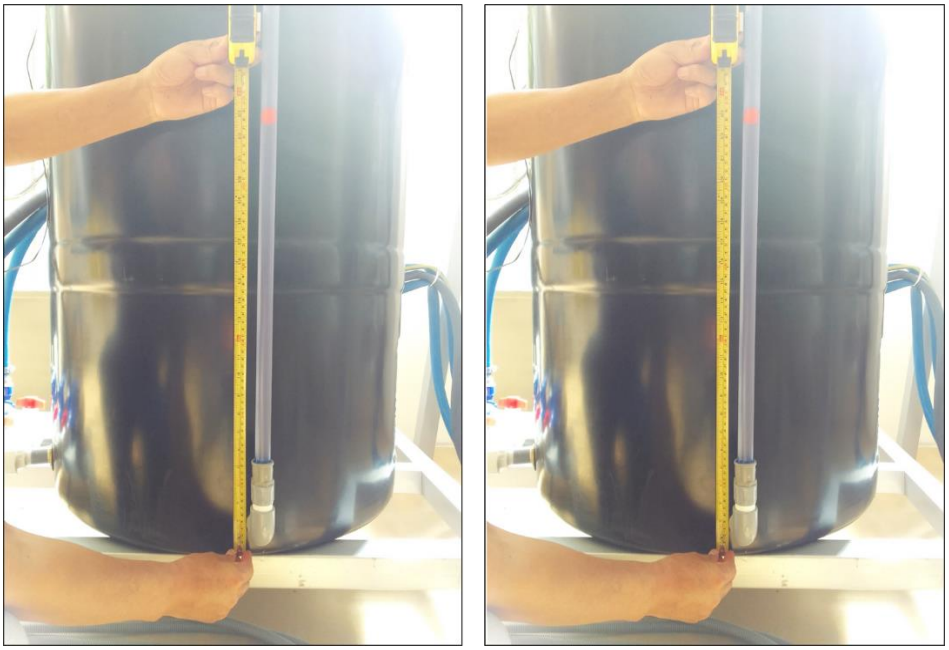
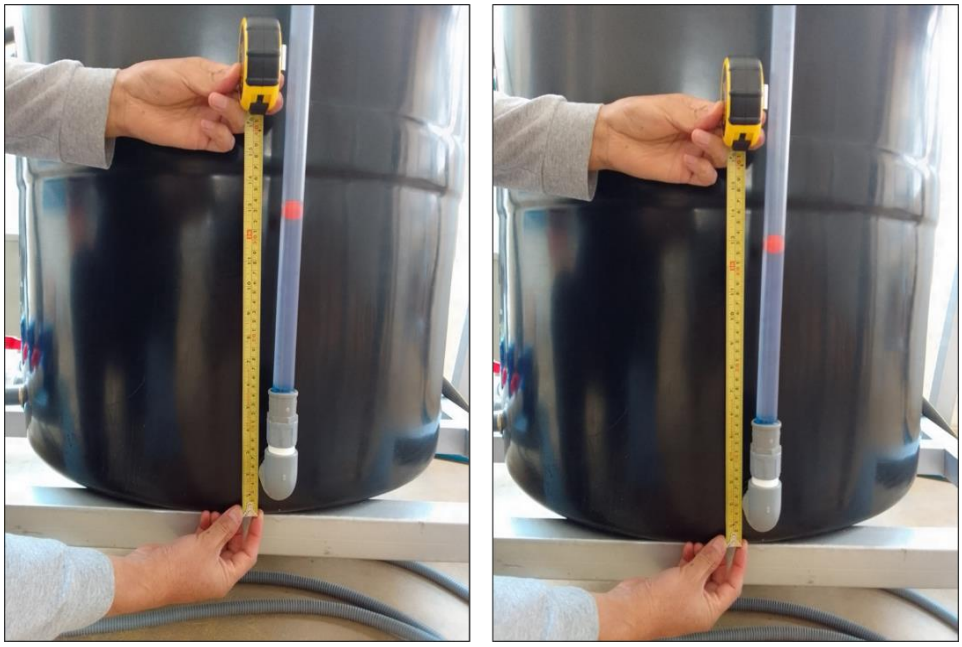


Figura 42

Medidas de nivel de agua con flexómetro para 32.0 cm



Los datos de nivel se obtuvieron vía el puerto USB/serie en el programa Arduino IDE; para los tres niveles, los cuales se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10

Medidas de nivel de agua en el tanque

Medida	Nivel de agua 80.0 cm		Nivel de agua 57.0 cm		Nivel de agua 32.0 cm	
	Nivel medido (cm)		Nivel medido (cm)		Nivel medido (cm)	
	Sensor	Flexómetro	Sensor	Flexómetro	Sensor	Flexómetro
1	80.2	80.3	57.3	57.2	32.2	32.0
2	80.1	80.2	57.2	57.1	32.1	32.1
3	80.1	80.2	57.1	57.3	32.2	32.3

Con los valores obtenidos de las mediciones realizadas de los niveles del tanque utilizando el sensor de ultrasonido y el flexómetro simultáneamente; se valida las mediciones hechas, estos valores como se observa en la Tabla 10 son muy próximos, para los tres niveles medidos. Lo cual asegura la correcta medición de nivel del tanque utilizando el sensor ultrasónico JSN-SR04T.

Validación de medición de corriente de consumo de electrobombas

Instalado los tres sensores de corriente SCT-013-030 no invasivos para medir la intensidad de corriente eléctrica consumido por las electrobombas, en el tablero de control como se muestra en la Figura 43, con las condiciones siguientes: la toma de medida se realiza dentro del minuto de iniciado el funcionamiento de las electrobombas, teniendo inicialmente el tanque a un nivel de agua de 90 cm.

Para todos los casos de funcionamiento de las electrobombas se realizaron tres mediciones simultáneamente con sensor y pinza amperimétrica.

Figura 43

Sensores de corriente en tablero y electrobombas

Se realizó la edición y programación con Arduino IDE de la tarjeta Arduino Nano con el programa para las mediciones de las intensidades de corriente eléctrica que consumen los motores, para las combinaciones siguientes:

i. En funcionamiento independiente de cada motor M1, M2 o M3, como se muestra en la Figura 44. Los valores de las intensidades de corriente eléctrica que consumen los motores, se muestran en la Tabla 11.

ii. En funcionamiento para dos motores simultáneamente con tres combinaciones (M1-M2, M1-M3 y M2-M3), como se muestran en la Figura 46. Los valores de las intensidades de corriente eléctrica que consumen estos motores se muestran en la Tabla 12.

iii. En funcionamiento de los tres motores simultáneamente, es decir (M1-M2-M3), como se muestra en la Figura 48. Las intensidades de corriente eléctrica que consumen se muestran en la Tabla 13.

Tras completar la programación específica para la tarjeta Arduino Nano y configurarla para diversas combinaciones, se procedió a la adquisición de datos sobre las intensidades de corriente eléctrica consumida por las electrobombas. Este proceso se llevó a cabo utilizando el Serial Monitor del entorno de

desarrollo Arduino IDE 2.1.1, permitiendo una visualización inmediata de los datos obtenidos. Las mediciones se realizaron de manera simultánea utilizando tanto un sensor de corriente SCT-013-030 como una pinza amperimétrica de la reconocida marca Amprobe, esta última contando con su respectivo certificado de calibración para garantizar la precisión de las mediciones realizadas.

La Figura 45, incluida a continuación, representa específicamente la lectura de corriente registrada durante el funcionamiento individual del motor M1. Este registro proporciona una comprensión visual y precisa de los niveles de corriente consumida por el motor en cuestión, lo que resulta fundamental para evaluar su rendimiento y eficiencia en el contexto del proyecto en curso.

Figura 44

Medición de la corriente en funcionamiento individual

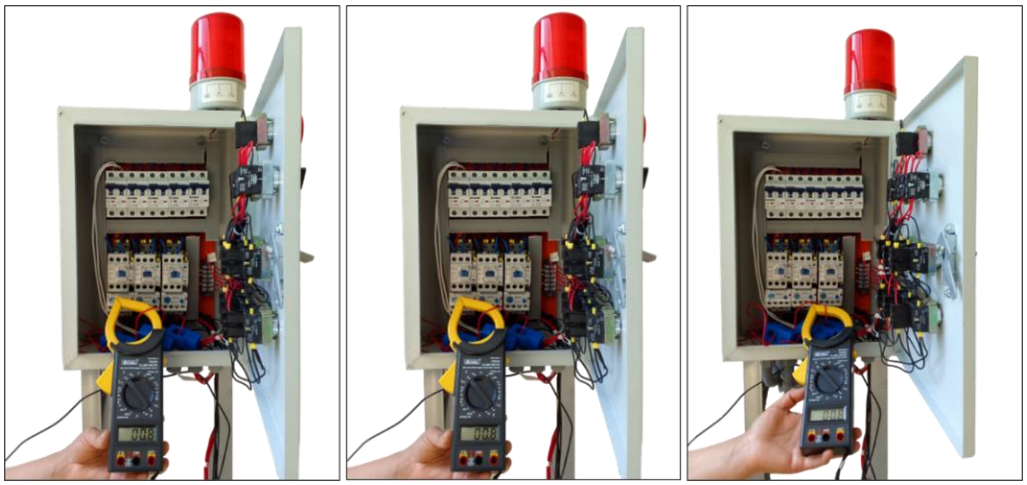


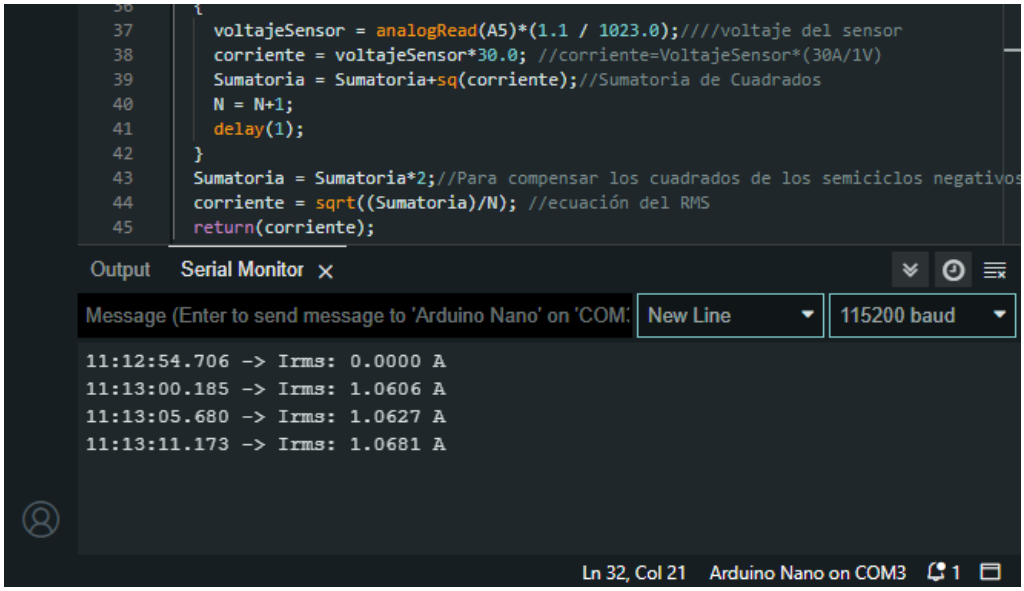
Tabla 11

Intensidad de corriente de cada electrobomba

Medida	Consumo de corriente (A)					
	M1		M2		M3	
	Sensor	Pinza amperimetr	Sensor	Pinza	Sensor	Pinza
1	1.0606	1.0300	1.1011	1.0600	1.0864	1.0300
2	1.0627	1.0200	1.0965	1.0500	1.0779	1.0200
3	1.0681	1.0300	1.0984	1.0600	1.0831	1.0300

Figura 45

Adquisición de corriente eléctrica que consume M1



La Figura 46, muestra la disposición y la medición realizada con la pinza amperimétrica de la intensidad de corriente en funcionamiento simultaneo de dos electrobombas M1-M2. En la Figura 47, se ve la adquisición de la intensidad de corriente consumido por las dos electrobombas en funcionamiento simultaneo a través de Arduino IDE.

Figura 46

Medición de corriente en funcionamiento simultaneo de M1-M2

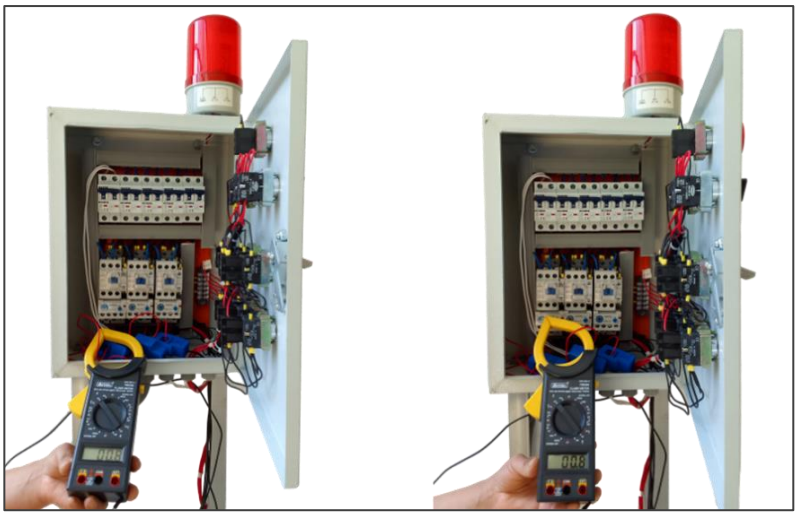


Figura 47

Adquisición de corriente que consumen M1-M2

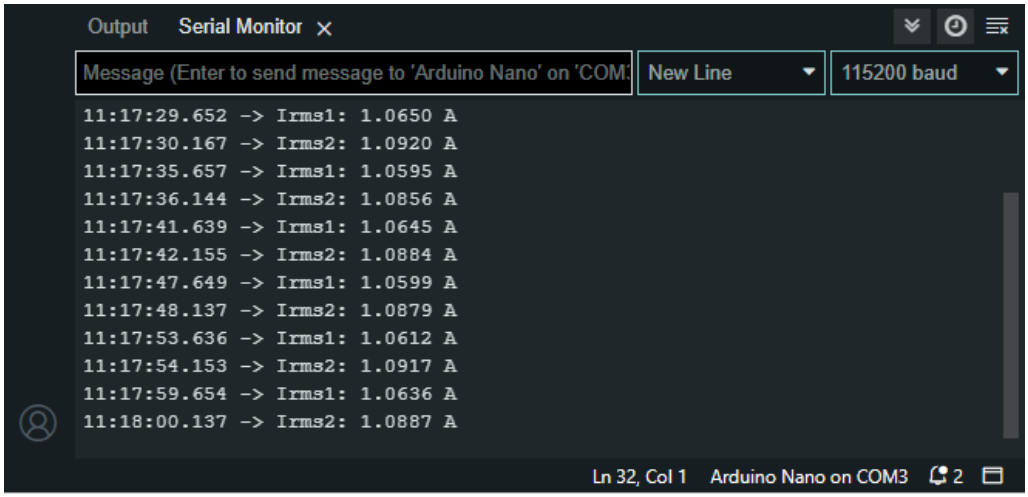


Tabla 12

Intensidad de corriente en simultaneo de dos electrobombas

Medida	Consumo de corriente (A)			
	M1		M2	
	Sensor	Pinza	Sensor	Pinza
1	1.0645	1.0300	1.0884	1.0900
2	1.0599	1.0200	1.0879	1.0800
3	1.0612	1.0300	1.0917	1.0900

Medida	Consumo de corriente (A)			
	M2		M3	
	Sensor	Pinza	Sensor	Pinza
1	1.0879	1.0600	1.0823	1.0100
2	1.0857	1.1200	1.0897	1.0200
3	1.0902	1.1400	1.0917	1.0100

Medida	Consumo de corriente (A)			
	M1		M3	
	Sensor	Pinza	Sensor	Pinza
1	1.0867	1.0100	1.0859	1.0100
2	1.0887	1.0200	1.0901	1.0200
3	1.0924	1.0100	1.0924	1.0200

La Figura 48 y 50, muestra la medición realizada con la pinza en funcionamiento simultaneo de las tres electrobombas y la Figura 49, muestra la adquisición de las corrientes consumidas.

Figura 48

Medición de corriente en funcionamiento simultaneo

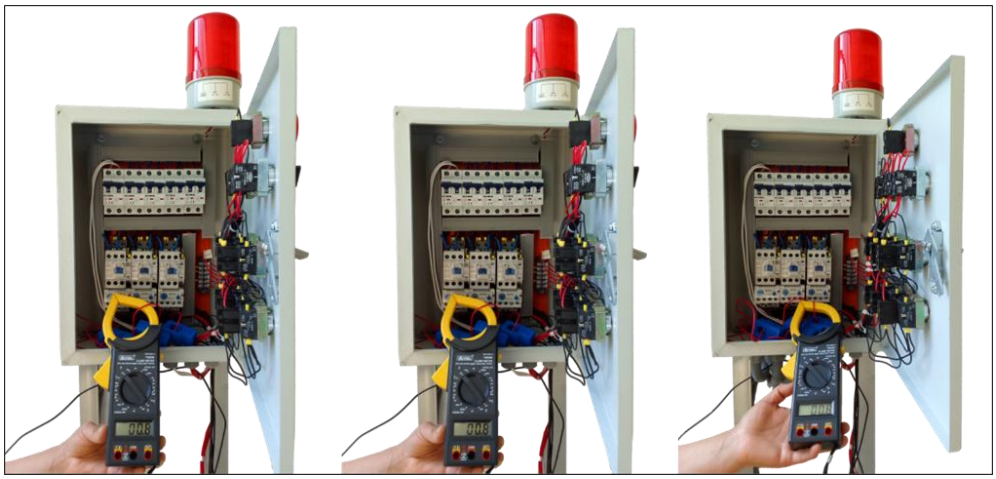


Figura 49

Adquisición de corriente en funcionamiento de M1, M2 y M3

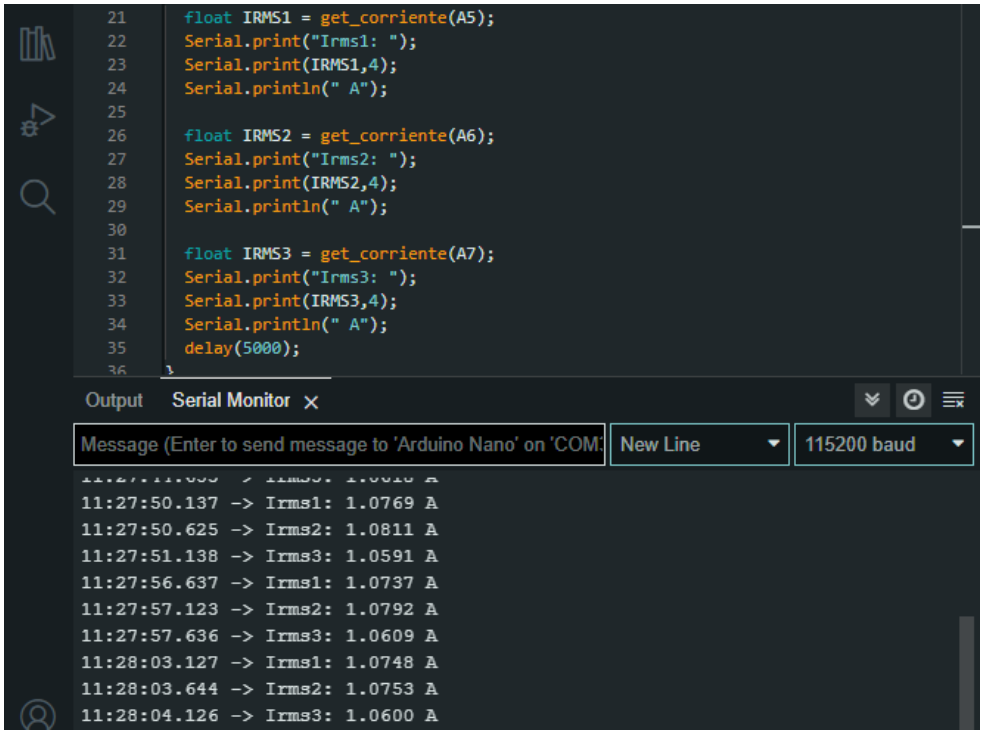


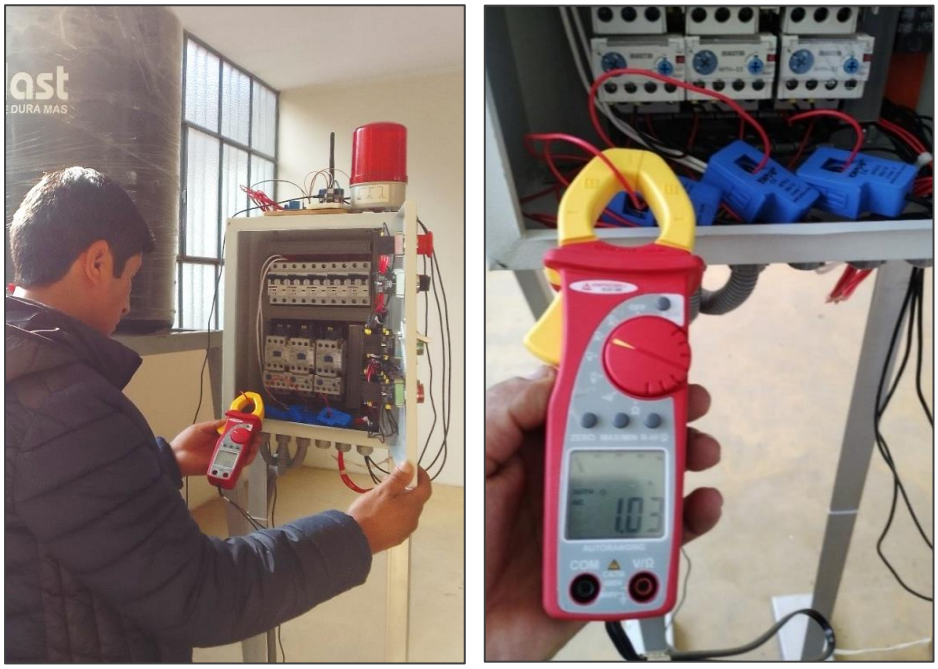
Tabla 13

Intensidades de corriente de M1, M2 y M3 simultaneo

Medida	Medida del consumo de corriente (A)					
	M1		M2		M3	
	Sensor	Pinza	Sensor	Pinza	Sensor	Pinza
1	1.0769	1.0300	1.0811	1.0900	1.0591	1.0300
2	1.0737	1.0300	1.0792	1.0800	1.0609	1.0400
3	1.0748	1.0400	1.0753	1.0900	1.0600	1.0300

Figura 50

Medición de corriente de M1, M2 y M3 en simultaneo



Con los valores obtenidos de las intensidades de corriente eléctrica que consumen las electrobombas; se valida el consumo de corriente eléctrica en funcionamiento, debido a que, en las mediciones realizadas simultáneamente con los sensores de corriente y la pinza amperimétrica, estos son muy próximos; validándose también el funcionamiento de las electrobombas. Cuando el sistema completo está en funcionamiento, cualquier lectura de intensidad de corriente eléctrica que se encuentre fuera de estos valores nos indica que el motor podría estar en avería o que está funcionando en vacío debido a un consumo anormal.

Validación de enlace de comunicaciones LoRa

Para realizar la validación de enlace de comunicaciones LoRa, primero se determinó, la distancia desde el centro de monitoreo (CdM) pasando por el punto de paso (PP), hasta las instalaciones de la sala de bombas (SdB), como se muestra en la Figura 51. La distancia está conformada por dos tramos, realizado el diseño se observa que no se cuenta con línea de vista en un solo tramo, por lo cual se realizó el diseño como se muestra en la Figura 51.

Calculado la distancia, se realizó el enlace de comunicaciones LoRa, validándose con las pruebas experimentales para las distancias: 500 m. entre los puntos Pm1 y Pm2, como se ve en la Figura 52; 1.0 km. entre los puntos Pm1 y Pm3, como se observa en la Figura 53 y en la Figura 54 para el caso de 2.01 km. entre los puntos Pm1 y Pm4.

Las antenas de los transceptores, ubicados en los puntos PdP, SdB y SdB, se encuentran instaladas a una altura aproximada de 2.0 m de la superficie. Así, mismo, las tarjetas LoRa Ra-02 fueron configurados con los parámetros que se muestran en la Tabla 14, antes de ser utilizados en la prueba experimental.

Tabla 14

Valores configurados en tarjetas LoRa Ra-02

Parametro	Valor
Potencia de transmisión (dBm)	17
Frecuencia de la portadora (MHz)	433
Factor de dispersion (CF)	7
Ancho de banda (KHz)	125
Tasa de codificacion (CR)	4/5

Para cada distancia de prueba experimental, la validación de enlace de comunicaciones LoRa, utilizó la medición del nivel de potencia de la señal recibida (RSSI), la medición de la relación señal ruido (SNR) y la recepción de 100 paquetes, estando cada paquete constituido por 42 bytes, según la Tabla 6. Los datos obtenidos en la prueba experimental de enlace de comunicaciones

LoRa, se muestran en el anexo B; en la tabla I para la distancia de 500 m, en la tabla II para la distancia de 1.0 km y en la tabla III, para la distancia de 2.01 km. Los datos señalados son adquiridos a través del puerto USB de una Laptop.

De la tabla I para la distancia de 500 m, tabla II para la distancia de 1.0 km y tabla III para la distancia de 2.01 km; se obtuvieron la cantidad de bytes de datos recibidos, los valores máximos y mínimos de RSSI y SNR, los cuales se muestran en las Tablas 15, 16 y 17.

Tabla 15

Valores máximos y mínimos para la distancia de 500 m

Muestra	Recepción de datos			
	Fecha	Bytes recibidos	RSSI (dBm)	SNR (dBm)
Min.	16/08/22	42	-83	-10.00
Max.	16/08/22	42	-66	-4.75

Tabla 16

Valores máximos y mínimos para la distancia de 1.0 km

Muestra	Recepción de datos			
	Fecha	Bytes recibidos	RSSI (dBm)	SNR (dBm)
Min.	17/08/22	42	-97	-8.25
Max.	17/08/22	42	-95	-1.75

Tabla 17

Valores máximos y mínimos para la distancia de 2.01 km

Muestra	Recepción de datos			
	Fecha	Bytes recibidos	RSSI (dBm)	SNR (dBm)
Min.	18/08/22	42	-96	-11.00
Max.	18/08/22	42	-95	-6.25

La validación del enlace de comunicación entre el módulo controlado y el módulo de monitoreo con LoRa Ra-02, se realiza comparando los valores de los bytes recibidos, los máximos y mínimos de RSSI y SNR, para cada distancia de prueba que se realizó; con los 42 bytes transmitidos, la sensibilidad de hasta - 148 dBm de RSSI mínimo y - 20 dBm de SNR máximo para un enlace LoRa de recepción, tal como se detalla:

Distancia de 500 m: Al comparar con los valores de la Tabla 15, se observa que se transmitieron 42 Bytes y se recibieron 42 Bytes; lo cual demuestra que el enlace de comunicaciones LoRa no presenta ninguna pérdida de datos. Para el RSSI, los datos se recibieron con - 83 dBm a - 66 dBm, los cuales no superan el umbral mínimo de - 148 dBm. En cuanto a la SNR, se observó que los datos se recibieron con - 10.00 dBm a - 4.75 dBm, no superaron el umbral máximo de - 20 dBm.

Distancia de 1.0 km: Al comparar con los valores de la Tabla 16, se observa que se transmitieron 42 Bytes y se recibieron 42 Bytes; lo cual demuestra que el enlace de comunicaciones LoRa no presenta ninguna pérdida de datos. Para el RSSI, los datos se recibieron con - 97 dBm a - 95 dBm, los cuales no superan el umbral mínimo de - 148 dBm. En cuanto a la SNR, se observó que los datos se recibieron con - 8.25 dBm a - 1.75 dBm, no superaron el umbral máximo de - 20 dBm.

Distancia de 2.01 km: Al comparar con los valores de la Tabla 17, se observa que se transmitieron 42 Bytes y se recibieron 42 Bytes; lo cual demuestra que el enlace de comunicaciones LoRa no presenta ninguna pérdida de datos. Para el RSSI, los datos se recibieron con - 96 dBm a - 95 dBm, los cuales no superan el umbral mínimo de - 148 dBm. En cuanto a la SNR, se observó que los datos se recibieron con - 11.00 dBm a - 6.25 dBm, no superaron el umbral máximo de - 20 dBm.

Por lo tanto, podemos concluir que el enlace de comunicaciones LoRa fué validado, ya que para las tres distancias de prueba: 500 m, 1.0 km y 2.01 km, no se sobrepasó el umbral mínimo de -148 dBm para RSSI y tampoco se excedió el umbral máximo de -20 dBm para SNR.

Figura 51

Distancia entre el centro de monitoreo y la sala de bombas

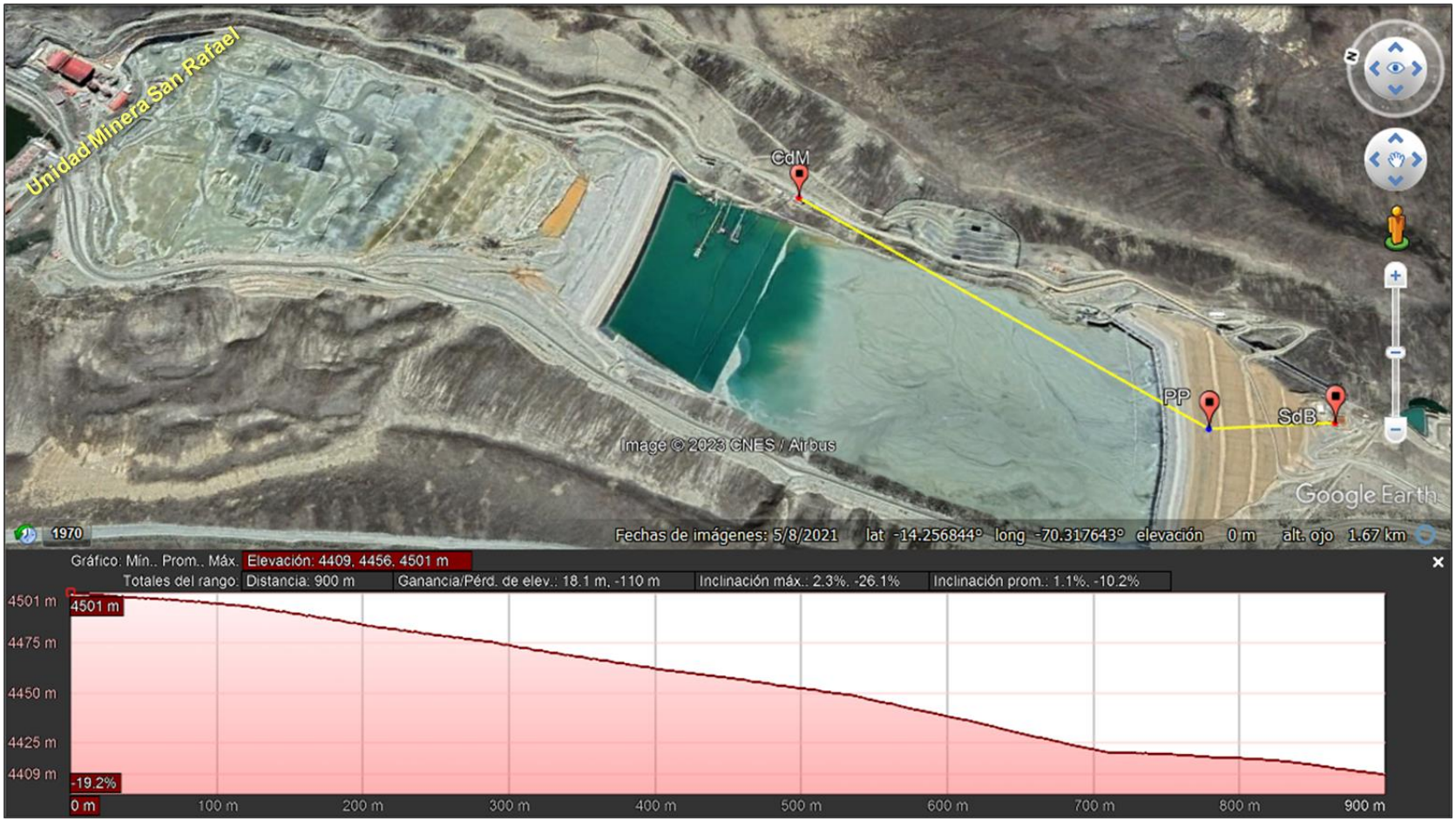


Figura 52

Puntos de enlace de comunicación para 500 m

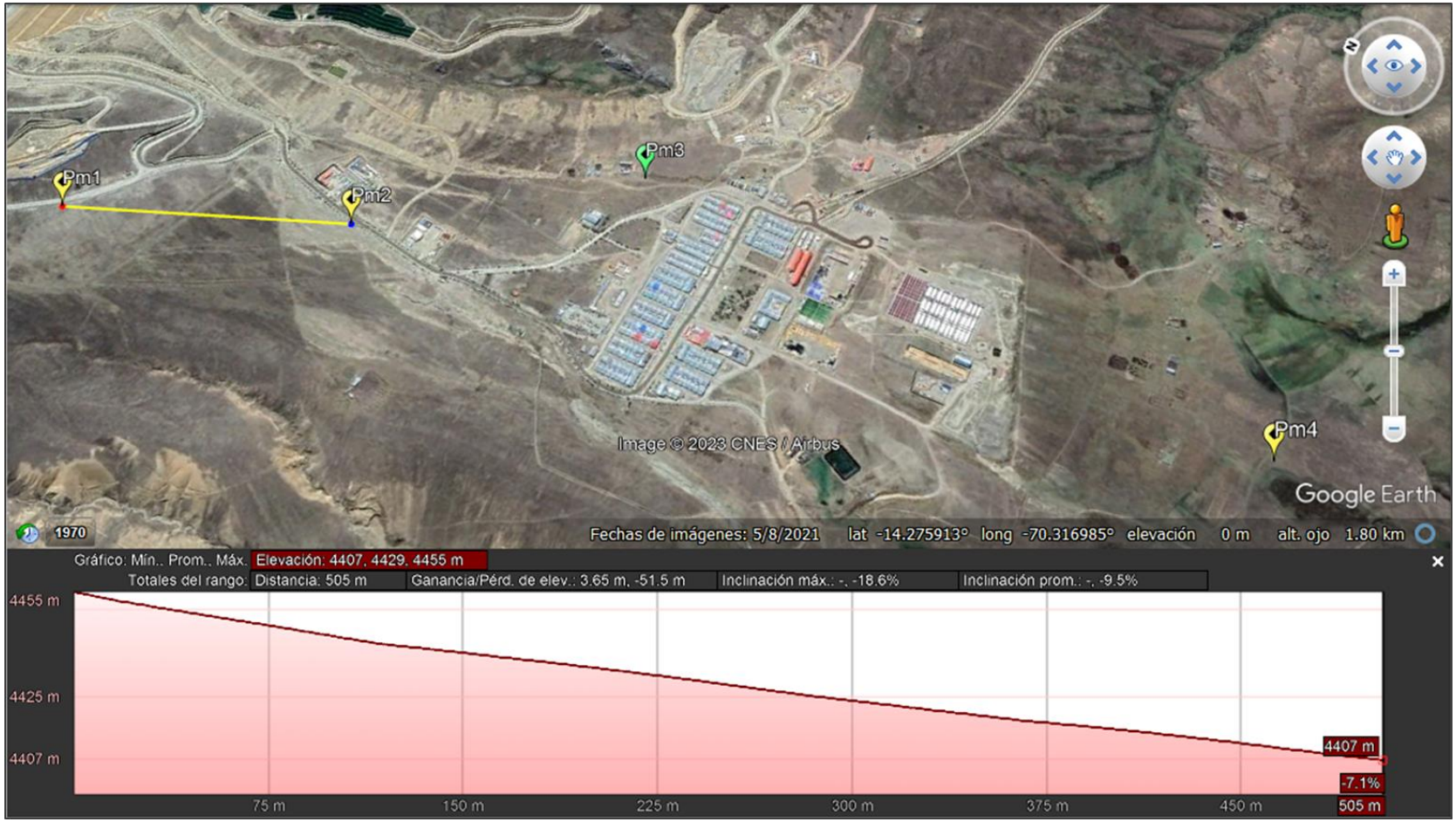


Figura 53

Puntos de enlace de comunicación para 1.0 km

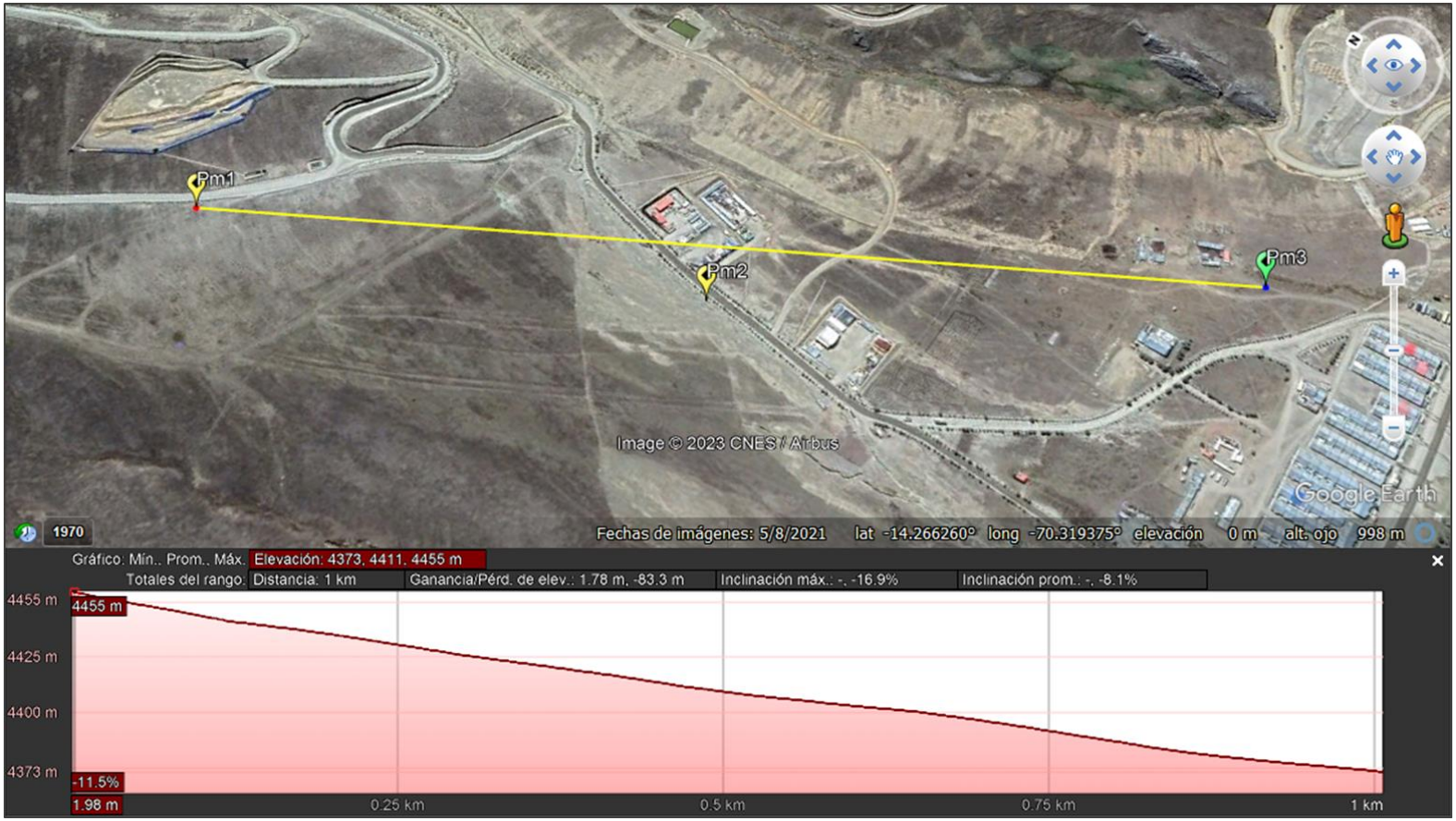


Figura 54

Puntos de enlace de comunicación para 2.01 km

La Figura 55, muestra la instalación de los transceptores LoRa Ra-02 por porte de los autores en campo, para realizar las pruebas experimentales de enlace de comunicación para las tres distancias establecidas (se utilizó baterías).

Figura 55

Instalación del transceptor LoRa Ra-02

4.1.2 Pruebas de integración

En esta etapa se realizaron las pruebas de interacción de los subsistemas que conforman todo el prototipo, trabajando de forma sincronizada, de uno a uno para revisar si se requieren ajustes al diseño realizado; se prueban el sensor de nivel y sensores de corriente, las tarjetas Arduino de ambos módulos, el enlace de comunicaciones LoRa y la adquisición de datos con la interface Arduino IDE en conjunto con los módulos, como se muestra en la Figura 56. Algunos componentes, como los cables de conexión a puerto USB y las fuentes de alimentación de 5 Vdc fueron reemplazados. En la Tabla 18 se presentan los objetivos, actividades y tareas que se realizaron para validar la integración del prototipo.

Figura 56

Prueba de integración, módulo: (a) controlado (b) de monitoreo

Tabla 18

Pruebas que validan la integración del prototipo

Alcance	Actividad	Tarea
Validación de registro de medición de nivel de tanque	Prueba de sensor ultrasónico	Registro de nivel. Arduino IDE
		Prueba de alarma, si se superó nivel máximo. Arduino IDE
Validación de registro de consumo de corriente de electrobombas	Prueba de sensores de corriente	Registro de consumo de corriente. Arduino IDE
		Prueba de alarma, en funcionamiento no adecuado de electrobomba
Validación de registro de datos en enlace de comunicaciones LoRa	Pruebas al transceptor LoRa Ra-02	Registro de datos de enlace LoRa. Arduino IDE

Validación de registro de medición de nivel de tanque

En la prueba por partes se validó las mediciones de nivel de agua, en el cual se observó que los datos de nivel de agua medidos con el sensor y flexómetro son muy próximos para cada uno de los tres niveles; lo cual certifica la correcta medición de nivel de agua, utilizando el sensor ultrasónico JSN-SR04T.

En la prueba de integración, en las mediciones realizadas se utilizaron el sensor JSN-SR04T y Arduino IDE, los 206 datos de nivel de agua de infiltración se adquirieron cada 30 segundos en una hora y 45 minutos aproximadamente que se muestra en la tabla IV del Anexo C. Se validaron los datos de nivel de agua y su respectivo registro, debido a que los datos fueron adquiridos y registrados correctamente en Arduino IDE como se muestra en la Figura 57.

Validación de registro de consumo de corriente de electrobombas

En la prueba por partes se validó el funcionamiento de las tres electrobombas, por las mediciones realizadas simultáneamente con los sensores de corriente y la pinza amperimétrica, los valores obtenidos son muy próximos; lo cual certifica la correcta medición del consumo de corriente eléctrica y el funcionamiento normal de las electrobombas, utilizando los sensores SCT-013-030.

En la prueba de integración, en las mediciones realizadas se utilizaron los sensores de corriente y el programa Arduino IDE; se adquirieron 206 datos de consumo de corriente para las tres electrobombas cada 30 segundos, que se muestra en la tabla IV del Anexo C; los 206 datos se obtuvieron en una hora y 45 minutos aproximadamente. Se validaron los datos de consumo de corriente para las tres electrobombas de las mediciones hechas y su respectivo registro, debido a que los datos fueron adquiridos y registrados correctamente en Arduino IDE como se muestra en la Figura 57.

Validación de registro de datos en enlace de comunicaciones LoRa

En la prueba por partes se validó el enlace de comunicaciones LoRa; para las tres distancias de prueba: 500 m, 1.0 km y 2.01 km, los datos no sobrepasaron el umbral mínimo de -148 dBm para RSSI y tampoco se excedió el umbral máximo de -20 dBm para SNR.

En la prueba de integración (datos para LabVIEW), se utilizaron las tarjetas Lora Ra-02 y el programa Arduino IDE; los 206 datos de RSSI y SNR se adquirieron cada 30 segundos y se obtuvieron en una hora y 45 minutos aproximadamente, los cuales se ve en la tabla IV del Anexo C. Se validaron los datos de RSSI y SNR y el registro de los datos fueron adquiridos y registrados correctamente en Arduino IDE (ver Figura 57).

Los 206 datos que se obtuvieron en las mediciones, en general se encuentran dentro del rango de los valores validados anteriormente. Estos datos fueron procesados con Excel y se realizó la gráfica del nivel de agua vs la hora, que tiene un máximo de 83 cm y mínimo de 14 cm, como se muestra en la Figura 58. También se realizó las gráficas del consumo de corriente de las tres electrobombas vs la hora, presentando un máximo de 1.4 A y un mínimo de 0.0 A cuando está apagado, lo cual se ve en la Figura 59. Así mismo los valores adquiridos de RSSI y SNR se encuentran dentro de los valores establecidos y sus gráficos se muestra en la Figura 60.

Figura 57

Adquisición y registro de datos con Arduino IDE

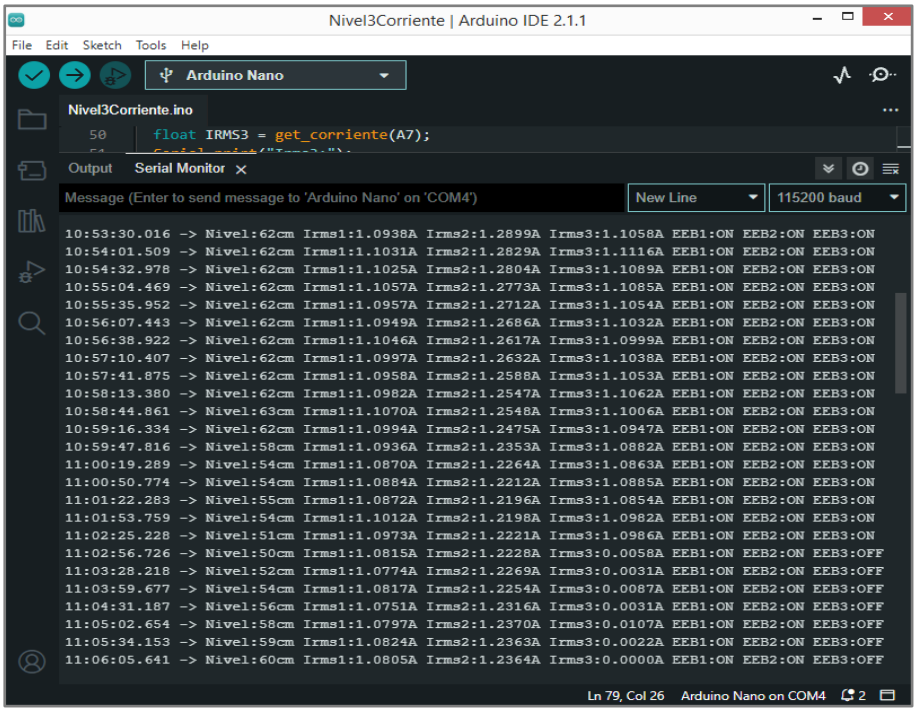


Figura 58

Gráfico de nivel de agua con datos registrados

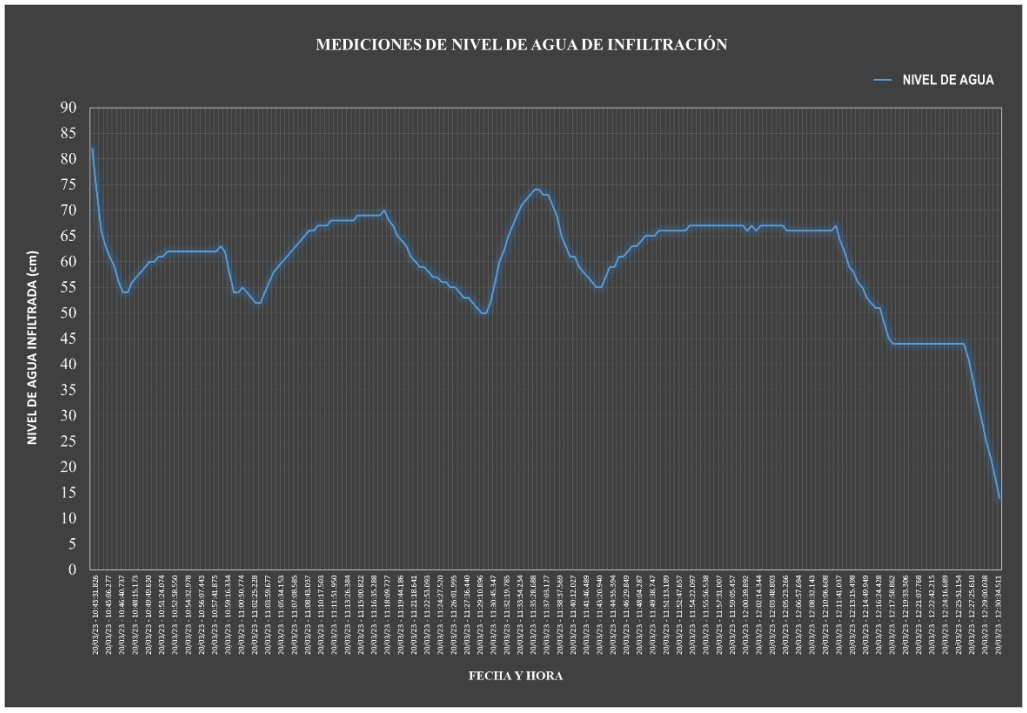


Figura 59

Gráfico de consumo de corriente con datos registrados

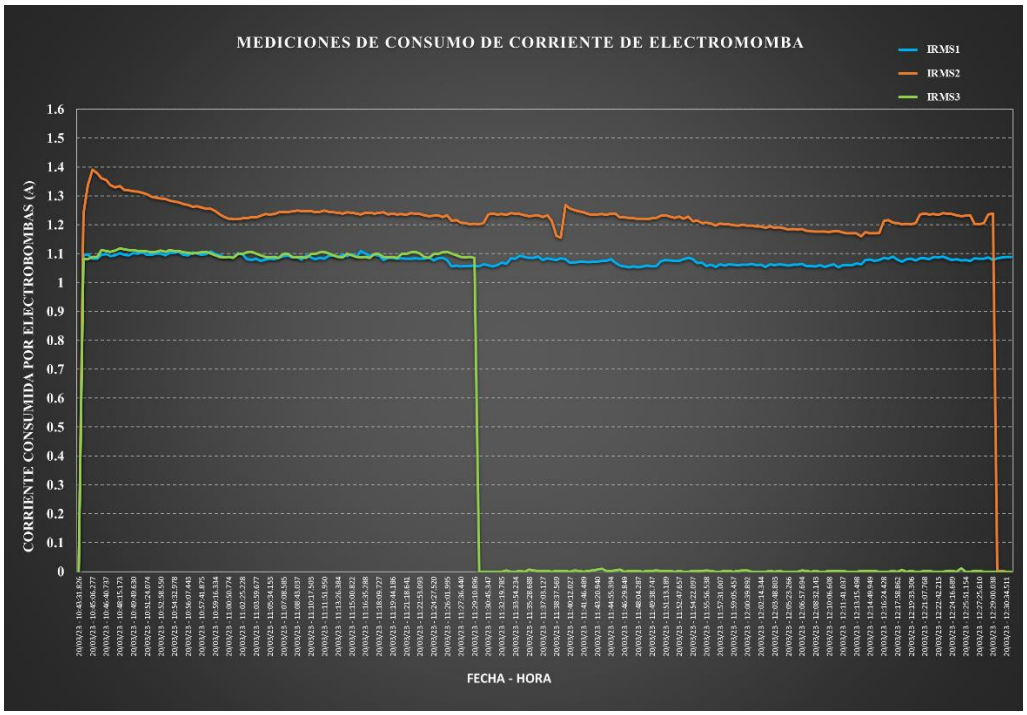
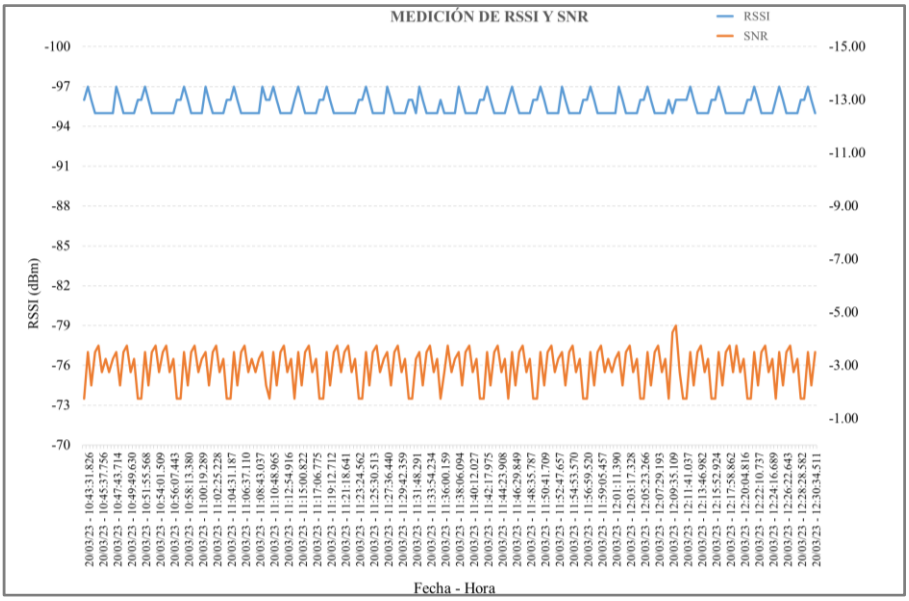


Figura 60

Gráfico de consumo de corriente con datos registrados



4.1.3 Pruebas al prototipo completo con ProgMoni

En las pruebas de integración, se realizaron algunas modificaciones y adaptaciones al prototipo, como añadir selectores en el tablero de control para que el sistema esté en modo manual o automático y algunos cambios en los programas de las tarjetas Arduino Nano y el programa ProgMoni. El prototipo implementado, fue utilizado para realizar las pruebas en conjunto utilizando el Programa ProgMoni.vi; está conformado por el módulo controlado, que se muestra en la Figura 56a, donde destaca el tablero de control eléctrico, las electrobombas, los sensores, la tarjeta LoRa Ra-2, Arduino Nano; y el módulo de monitoreo, donde destaca la tarjeta LoRa Ra-2, Arduino Nano, el programa ProgMoni y la Laptop que se ven en la Figura 56b.

Para realizar las pruebas en conjunto, se instaló el módulo de monitoreo en la cercanía del ambiente dedicado al monitoreo del relave B3. Igualmente, el módulo de monitoreo fue instalado en la cercanía de la sala de bombas en la unidad minera San Rafael.

Se realizó la prueba experimental para una distancia de separación de aproximadamente de 1 km, distancia a la cual se encuentran instalados el módulo controlado y el módulo de monitoreo; se obtuvo los datos remotamente de las mediciones según el formato que se muestra en la Figura 62, cuyos ítems son: corriente consumido por electrobomba 1 (Irms1), corriente consumido por electrobomba 2 (Irms2), corriente consumido por electrobomba 3 (Irms3), en amperio (A); estado de funcionamiento de electrobomba 1 (EB1), estado de funcionamiento ON/OFF de electrobomba 2 (EB2), estado de funcionamiento de electrobomba 3 (EB3); nivel de agua de infiltración (Nivel) en centímetros (cm), estado de alarma ON/OFF (Alarma), potencia de la señal recibida (RSSI) en decibelios (dBm), la relación señal ruido (SNR) en decibelios (dBm) y Fecha - Hora.

Algunos de estos datos fueron transmitidos desde el transceptor LoRa Ra-2 del módulo controlado al módulo de monitoreo remoto, estos datos son: Irms1, Irms2, Irms3, EB1, EB2, EB3, Nivel y Alarma, teniendo la trama 42 bytes como se muestra en la Tabla 6; otros datos fueron añadidos desde el receptor del transceptor LoRa Ra-2 del módulo de monitoreo y de la Laptop, estos datos fueron: RSSI, SNR y Fecha - Hora, quedando la trama que recibió el programa ProgMoni constituida por 76 bytes, como se mostró en la Tabla 7.

Se realizaron pruebas a todos los subsistemas conectadas completamente como el prototipo final, en periodos largos y bajo situaciones variadas. Los datos adquiridos remotamente cumplen con los límites establecidos.

4.2 Resultados

El prototipo final implementado que se muestra en la Figura 61, se encuentran validados para la adquisición remota de datos de nivel de agua de infiltración, consumo de corriente de electrobombas, estado de funcionamiento de las electrobombas, estado de alarma, RSSI, SNR y Fecha-Hora de la adquisición.

Los dos módulos fueron instalados para la adquisición de datos, los cuales fueron utilizados en la investigación titulado: **“Prototipo de monitoreo remoto para el control del sistema de retorno de agua de infiltración de relave del sumidero en la unidad minera San Rafael”**, según se detalla:

Módulo controlado: Modulo remoto que se instala en las cercanías de la sala de bombas en la unidad minera San Rafael; incluye una tarjeta LoRa para el enlace de comunicaciones que envió los datos en una trama de 42 bytes.

Figura 61

Prototipo final implementado ubicado en campo

Luego de energizarlo con una fuente de 5V/2A, en la pantalla LCD que está conectado al Arduino Nano; cada vez que se enciende se visualiza una

bienvenida, titulo, autores; valores numéricos de las lecturas de los sensores y luego de un minuto se muestra: las corrientes consumidas, estado de las electrobombas, nivel de agua, estado de alarma y espera recibir la solicitud de envió de datos desde la unidad de monitoreo.

Módulo de monitoreo: Se instala en las cercanías del ambiente dedicado al monitoreo del relave B3, en la unidad minera San Rafael, incluye una tarjeta LoRa para el enlace de comunicaciones que recibe la trama de 42 bytes.

Se energiza con una fuente de 5V/2A y se conecta a la PC con cable USB; cuando se ejecuta el programa **ProgMoni**, se muestra el panel frontal (ver Figura 62) y la tabla de adquisición de datos, que se muestra en la Tabla 19.

Cuando se ejecutó **ProgMoni,** nos permitió visualizar gráficamente y numéricamente el consumo de corriente de las electrobombas, nivel de agua de infiltración, RSSI y SNR, también se visualizó en texto el estado de funcionamiento de las electrobombas, estado de alarma y Fecha-Hora de adquisición, como se muestra en la Figura 62.

Durante la adquisición de datos realizada en un periodo de 3 días con un funcionamiento continuo del sistema, se registraron diversas variables clave para el monitoreo y análisis de su rendimiento. Entre estas variables se incluyeron el consumo de corriente de las electrobombas, el nivel de agua de infiltración, así como los parámetros de RSSI (Received Signal Strength Indication) y SNR (Signal-to-Noise Ratio).

Cada 30 segundos, se capturaron mediciones precisas de estas variables, lo que resultó en un total de 8640 pruebas experimentales a lo largo del periodo de observación. Este riguroso proceso de recolección de datos permitió obtener un conjunto completo y detallado de información sobre el comportamiento del sistema en condiciones operativas reales.

El análisis de estas mediciones proporcionará una visión profunda de la eficiencia energética de las electrobombas, la dinámica del nivel de agua de infiltración, así como la calidad y estabilidad de la señal de comunicación inalámbrica. Estos datos serán fundamentales para identificar posibles áreas de mejora, optimizar el rendimiento del sistema y garantizar su operación confiable y eficaz a largo plazo.

Además, la cantidad significativa de pruebas experimentales recopiladas ofrece una base sólida para llevar a cabo análisis estadísticos detallados, lo que permitirá identificar patrones, tendencias y anomalías en el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo. Esto facilitará la toma de decisiones informadas para implementar ajustes y mejoras que impulsen la eficiencia y la fiabilidad del sistema en su conjunto.

En la evaluación de las variables: consumo de corriente de las electrobombas (que determina el funcionamiento de electrobombas), nivel de agua de infiltración, RSSI y SNR; considerando las validaciones hechas en las diversas etapas y con los datos adquiridos remotamente con el prototipo final, se determina que el consumo de corriente de las electrobombas, nivel de agua de infiltración, se encuentran dentro de los valores obtenidos visualmente en el flexómetro y la pinza amperimétrica, lo que indica que los valores son muy próximos y homogéneos en la adquisición de datos remotamente. Con la adquisición de datos remotamente, se realizaron los gráficos que se muestran en las Figuras 63, 64,65 y 66.

Entonces podemos señalar que el prototipo a escala realiza el monitoreo remoto de las variables; consumo de corriente de las electrobombas, nivel de agua de infiltración y el estado de las electrobombas y estado de alarma. Esto cumple con el objetivo de implementar un prototipo de monitoreo remoto que controla el nivel de agua de infiltración y verifica el funcionamiento de las electrobombas, activando la alarma en caso de problemas en la unidad minera San Rafael.

Figura 62

Panel frontal del programa ProgMoni

Tabla 19

Registro de datos con el programa ProgMoni en LabVIEW

Irms EB1 (A)	Irms EB2 (A)	Irms EB3 (A)	Estado EB1	Estado EB2	Estado EB3	Nivel (cm)	Alarma	RSSI (dBm)	NSR (dBm)	Fecha-Hora
1.0733	1.1634	1.0427	ON	ON	ON	81	ON	-95	-4.8	22/05/2023 - 17:07:46
1.0733	1.1634	1.0427	ON	ON	ON	81	ON	-95	-4.8	22/05/2023 - 17:07:56
1.0733	1.1634	1.0427	ON	ON	ON	81	ON	-95	-4.8	22/05/2023 - 17:08:06
1.0733	1.1634	1.0427	ON	ON	ON	81	ON	-95	-4.8	22/05/2023 - 17:08:16
1.0733	1.1634	1.0427	ON	ON	ON	81	ON	-95	-4.8	22/05/2023 - 17:08:26
1.0733	1.1634	1.0427	ON	ON	ON	81	ON	-95	-4.8	22/05/2023 - 17:08:36
1.0733	1.1634	1.0427	ON	ON	ON	81	ON	-95	-4.8	22/05/2023 - 17:08:46
1.0733	1.1634	1.0427	ON	ON	ON	81	ON	-95	-4.8	22/05/2023 - 17:08:56
1.0733	1.1634	1.0427	ON	ON	ON	81	ON	-95	-4.8	22/05/2023 - 17:09:06
1.0733	1.1634	1.0427	ON	ON	ON	81	ON	-95	-4.8	22/05/2023 - 17:09:16
1.0733	1.1634	1.0427	ON	ON	ON	81	ON	-95	-4.8	22/05/2023 - 17:09:26
1.0733	1.1634	1.0427	ON	ON	ON	81	ON	-95	-4.8	22/05/2023 - 17:09:36
1.0733	1.1634	1.0427	ON	ON	ON	81	ON	-95	-4.8	22/05/2023 - 17:09:46
1.0733	1.1634	1.0427	ON	ON	ON	81	ON	-95	-4.8	22/05/2023 - 17:09:56
1.0733	1.1634	1.0427	ON	ON	ON	81	ON	-95	-4.8	22/05/2023 - 17:10:06
1.0733	1.1634	1.0427	ON	ON	ON	81	ON	-95	-4.8	22/05/2023 - 17:10:16
1.0733	1.1634	1.0427	ON	ON	ON	81	ON	-95	-4.8	22/05/2023 - 17:10:26
1.0733	1.1634	1.0427	ON	ON	ON	81	ON	-95	-4.8	22/05/2023 - 17:10:36
1.0733	1.1634	1.0427	ON	ON	ON	81	ON	-95	-4.8	22/05/2023 - 17:10:46
1.0733	1.1634	1.0427	ON	ON	ON	81	ON	-95	-4.8	22/05/2023 - 17:10:56
1.0733	1.1634	1.0427	ON	ON	ON	81	ON	-95	-4.8	22/05/2023 - 17:11:06

Figura 63

Gráfico de nivel de agua con datos registrados en ProgMoni

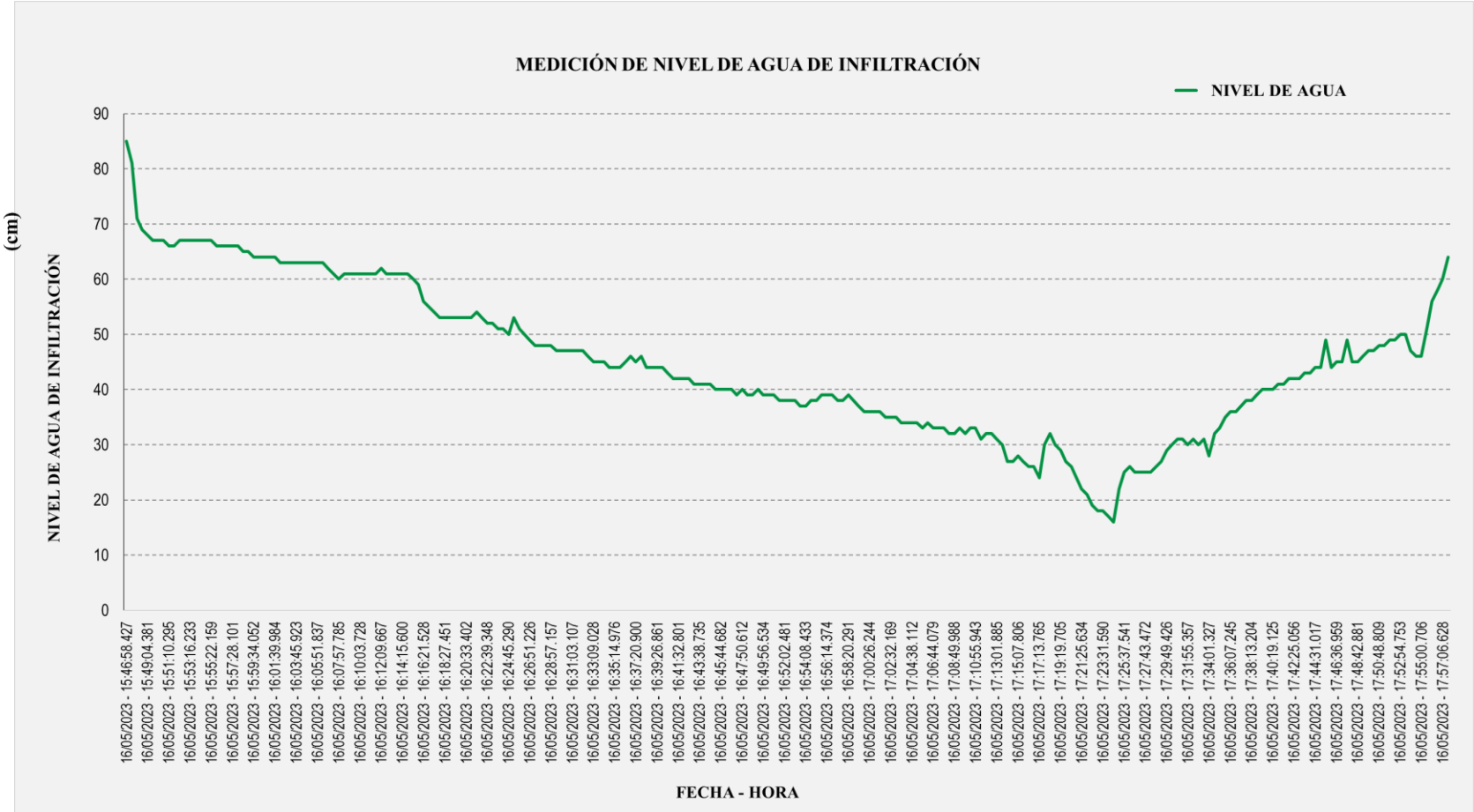


Figura 64

Gráfico de consumo de corriente en ProgMoni

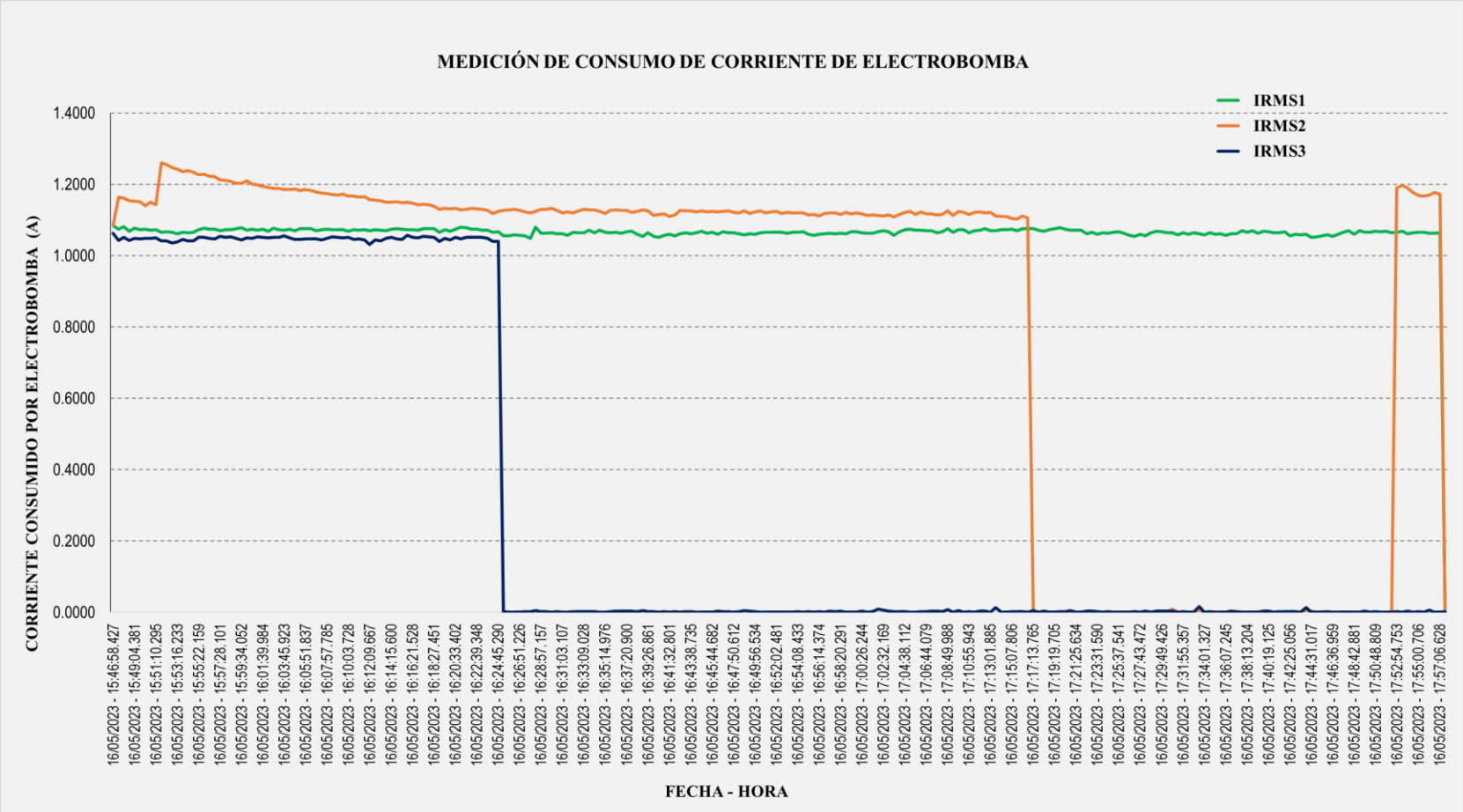


Figura 65

Gráfico de RSSI con datos registrados en ProgMoni

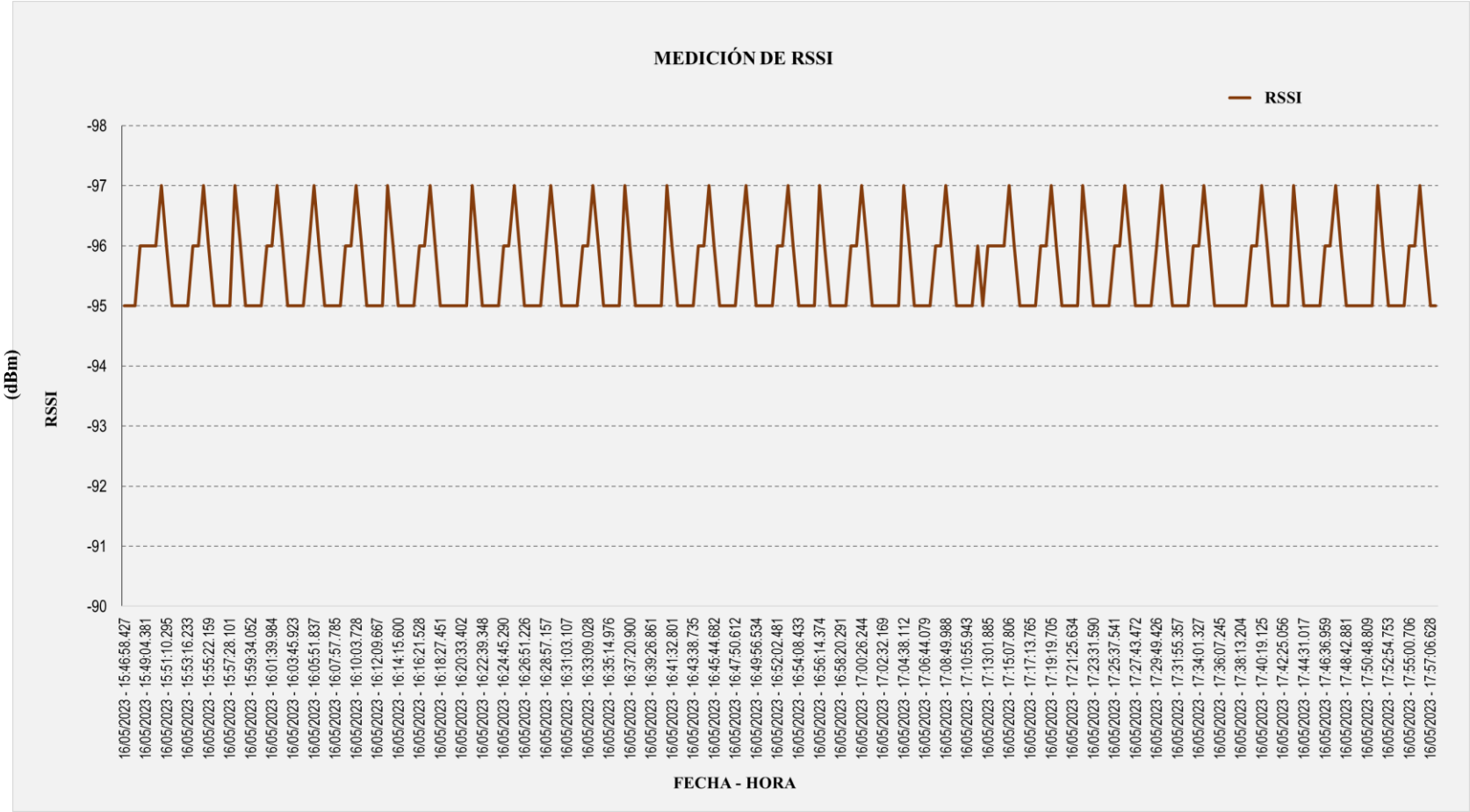
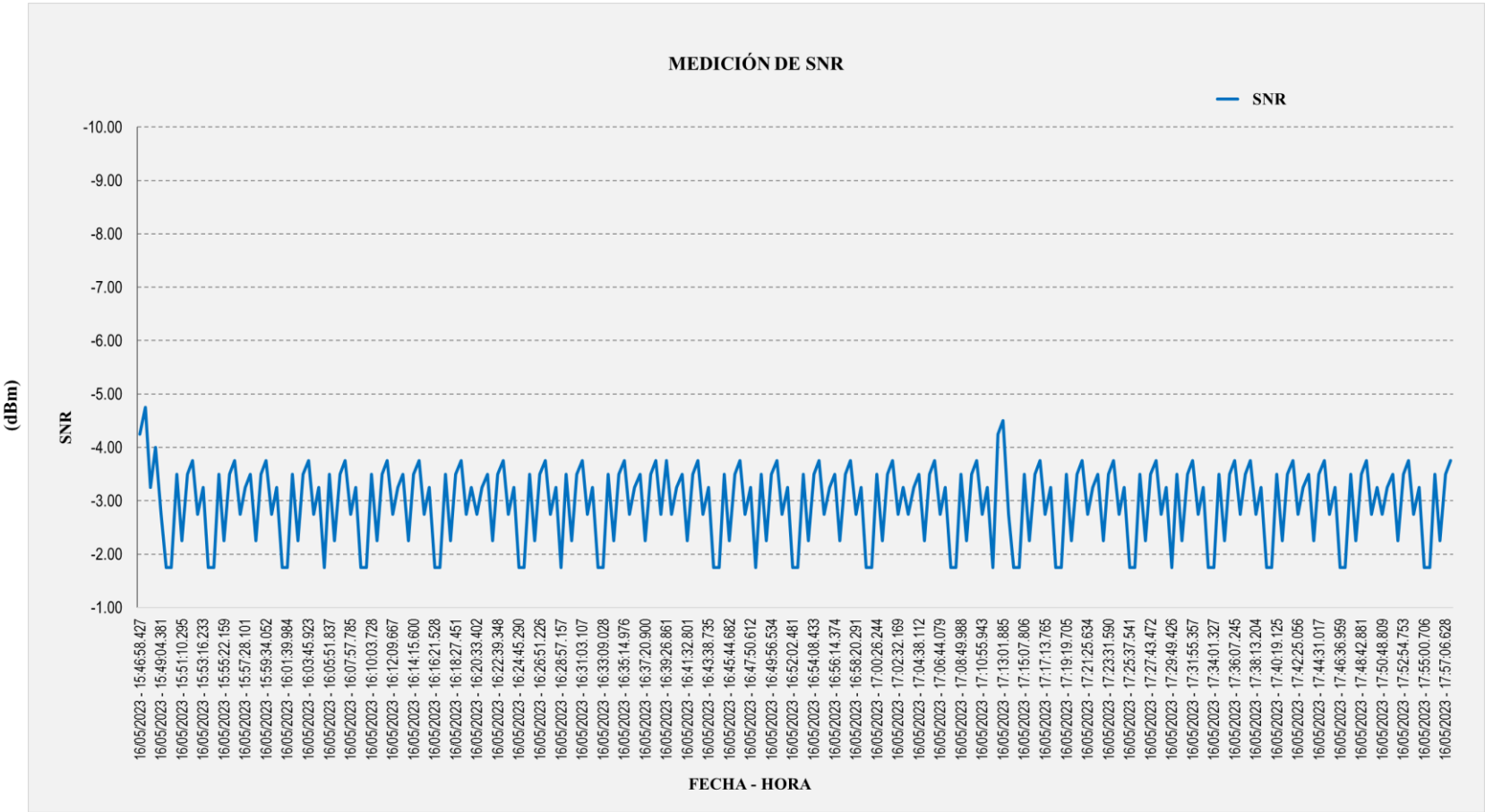


Figura 66

Gráfico de SNR con datos registrados en ProgMoni



4.3 Discusión de resultados

En relación al objetivo general, los resultados obtenidos en esta investigación muestran similitudes y diferencias con respecto a los antecedentes y bases teóricas consultadas. En primer lugar, al igual que en los trabajos de Sánchez González (2023), De la Cámara (2019) y Salazar Vilañez (2018), se diseñó e implementó un sistema de monitoreo remoto utilizando tecnología inalámbrica. Sin embargo, a diferencia de estos estudios que emplearon LoRa para monitorear niveles de agua en depósitos, en esta investigación se utilizó LoRa para controlar el sistema de retorno de agua de infiltración de relave en una unidad minera. En cuanto a las bases teóricas, se pueden observar coincidencias con los conceptos y principios descritos en torno al relave minero (Union IndustriALL Global, 2018; MINSUR S.A., 2019, 2020), los sistemas de bombeo de agua (Rafael Barzola, 2019; Tun, 2013; Tameco Mecanica Industrial, 2018) y las tecnologías de comunicación inalámbrica, específicamente LPWAN y LoRa (Kumar, 2019; LoRa Alliance, 2015; Carrión, 2017; LoRa Alliance Technical committee, 2017; Semtech, 2021; Bor & Roedig, 2017; Bor, Vidler, & Roedig, 2016). Estos conceptos teóricos sirvieron de base para el diseño e implementación del prototipo propuesto. No obstante, a diferencia de los antecedentes revisados, en esta investigación se empleó la plataforma Arduino Nano (Arduino, 2021) como sistema de adquisición de datos, así como el sensor ultrasónico JSN-SR04T (Microsonic, 2023) para medir el nivel del sumidero de agua de infiltración. Además, se utilizó el software LabVIEW (NI, 2023) para el monitoreo y control remoto del sistema, lo cual representa una innovación en comparación con los trabajos previos consultados. Por lo que, si bien existen similitudes en cuanto al uso de la tecnología LoRa para el monitoreo remoto, esta investigación se diferencia por su aplicación específica en el control del sistema de retorno de agua de infiltración de relave en una unidad minera, así como por la integración de componentes y herramientas como Arduino Nano, el sensor ultrasónico JSN-SR04T y LabVIEW, que brindan una solución innovadora y adaptada a las necesidades de este proyecto en particular.

Los resultados del objetivo específico 1 sobre la implementación de un prototipo de monitoreo remoto que controla el nivel de agua de infiltración de relave del sumidero en la unidad minera San Rafael, muestran concordancia con los antecedentes y bases teóricas revisadas. En el antecedente de Sánchez González (2023), se realizó el diseño de la solución para un sistema de monitoreo utilizando la tecnología LoRa, lo cual se alinea con la presente investigación al emplear esta misma tecnología para el monitoreo remoto. De la Cámara (2019) implementó un sistema similar utilizando LoRa para monitorear los parámetros de un depósito de agua, lo que respalda la viabilidad de esta tecnología para el monitoreo de niveles de agua como en el caso del sumidero de la unidad minera. Salazar Vilañez (2018) detalló la construcción de una unidad de adquisición y transferencia de variables remotas para monitorear tanques de almacenamiento de agua potable, utilizando un sensor de ultrasonido, lo cual es coherente con el uso de un sensor ultrasónico para medir el nivel de agua en el sumidero. Rodríguez Munca (2016) desarrolló un controlador para dispositivos LoRa, llevando a cabo pruebas de alcance y consumo energético, lo que brinda un respaldo teórico al uso de esta tecnología en el presente trabajo. Mejía Torres (2011) abordó el diseño de la automatización de estaciones de bombeo y tanques de reserva, lo que guarda relación con el monitoreo y control del sistema de bombeo del sumidero. En cuanto a los antecedentes nacionales, Cutipa Gonzales (2017) describió la estrategia de control para la automatización de un sistema de recuperación de agua de relave, lo que se relaciona con el objetivo de controlar el nivel de agua del sumidero. Medrano Herrera y Trujillo Huamán (2016) desarrollaron un sistema de control remoto basado en tecnología GSM para evitar el rebose de un sistema de bombeo de agua, lo que es afín al objetivo de monitorear y controlar el nivel del sumidero. Ojeda Chinchayán (2012) elaboró la ingeniería de detalle de un sistema de bombeo de aguas ácidas, lo que brinda una base teórica relevante para el presente trabajo. Las bases teóricas revisadas, como las características de la relavera B3 y el sistema de retorno de agua de infiltración (MINSUR S.A., 2019, 2020), los sistemas de bombeo de agua de mina (Rafael Barzola, 2019; Tun, 2013; Tameco Mecanica Industrial, 2018), las tecnologías de comunicación inalámbrica y LPWAN

(Kumar, 2019; LoRa Alliance, 2015; Carrión, 2017; Bor & Roedig, 2017; Bor, Vidler, & Roedig, 2016), el Arduino Nano (Arduino, 2021), el sensor ultrasónico (Microsonic, 2023) y LabVIEW (NI, 2023), proporcionan un sólido fundamento teórico para el desarrollo del prototipo de monitoreo remoto implementado. En ese sentido, los resultados obtenidos en la implementación del prototipo de monitoreo remoto se encuentran respaldados por los antecedentes y bases teóricas revisadas, lo que demuestra la coherencia y solidez del trabajo realizado en función del objetivo específico 1. Se han contrastado y comparado adecuadamente los hallazgos con las fuentes citadas, empleando un lenguaje técnico acorde al área de investigación.

Con referencia al objetivo 2, sobre los resultados de la implementación del prototipo de monitoreo remoto que verifica el funcionamiento de las electrobombas de drenaje de agua de infiltración de relave del sumidero en la unidad minera San Rafael concuerdan con los trabajos previos de Sánchez González (2023), De la Cámara (2019), Salazar Vilañez (2018), Rodríguez Munca (2016) y Mejía Torres (2011). Estos estudios también abordaron el diseño e implementación de sistemas de monitoreo remoto utilizando tecnologías inalámbricas como LoRa, Arduino y sensores para medir variables como nivel de agua, pH, temperatura y humedad. Coinciden en la eficacia de estos enfoques para realizar un seguimiento preciso y en tiempo real de los parámetros clave en aplicaciones de monitoreo de agua y procesos industriales. Sin embargo, los resultados difieren de algunos antecedentes nacionales como Cutipa Gonzales (2017), Medrano Herrera y Trujillo Huamán (2016), y Ojeda Chinchayán (2012), quienes se enfocaron principalmente en la automatización de sistemas de bombeo de agua utilizando PLC y redes industriales cableadas. Aunque estos enfoques son válidos, la implementación de un sistema inalámbrico de monitoreo remoto basado en LoRa ofrece ciertas ventajas, como una instalación más sencilla, mayor alcance de comunicación y bajo consumo energético, lo que resulta más adecuado para entornos mineros remotos y de difícil acceso. Además, los resultados obtenidos se sustentan en las bases teóricas revisadas, como la gestión de relaves

mineros (Union IndustriALL Global, 2018; MINSUR S.A., 2019, 2020), los sistemas de bombeo de agua (Rafael Barzola, 2019; Tun, 2013; Tameco Mecanica Industrial, 2018), las tecnologías de comunicación inalámbrica (Kumar, 2019; LoRa Alliance, 2015; Carrión, 2017; LoRa Alliance Technical committee, 2017; Semtech, 2021; Bor & Roedig, 2017; Bor, Vidler, & Roedig, 2016), y el uso de Arduino (Arduino, 2021), sensores ultrasónicos (Microsonic, 2023) y LabVIEW (NI, 2023) para el monitoreo y control de procesos. Estas bases teóricas proporcionaron los fundamentos necesarios para el diseño e implementación del prototipo de monitoreo remoto.

Finalmente, los resultados referidos al objetivo 3, demuestran la efectividad de implementar un prototipo de monitoreo remoto que activa la alarma sonora y luminosa, señalando el mal funcionamiento del sistema de retorno de agua de infiltración de relave del sumidero en la unidad minera San Rafael. Este enfoque es consistente con investigaciones previas, como el "Diseño de un sistema de monitoreo remoto para minera El Peñón" (Sánchez González, 2023), que abordó el diseño de una solución de monitoreo utilizando la tecnología LoRa, proporcionando el fundamento teórico, incluyendo LoRa WAN, la modulación LoRa y los principales parámetros. Además, se explican las topologías de red, los medios de transmisión y los componentes principales de una red LoRa, así como las bandas de frecuencia utilizadas, la interferencia, la seguridad y los métodos de activación. Asimismo, los resultados obtenidos se alinean con el "Diseño de un sistema de monitorización remota de un depósito de agua mediante LoRa" (De la Cámara, 2019), donde se implementó un sistema para monitorizar y transmitir datos de un depósito de agua, monitoreando parámetros como el nivel del depósito, pH, temperatura y humedad relativa. Este trabajo utilizó el entorno Arduino como sistema de monitorización y la tecnología LoRa para la transmisión de datos de forma remota, empleando los módulos TTGO LORA32 V2.1_1.6, que presentan la ventaja de una pantalla OLED para visualizar la información directamente. De manera similar, la "Unidad de adquisición y transferencia de variables remotas para el monitoreo en tanques de almacenamiento de agua

potable" (Salazar Vilañez, 2018) detalla la construcción de una unidad para monitorear tanques de agua potable, utilizando un sensor de ultrasonido SICK UM30-215113 y un PLC DVP16ES2 con tablero de control y pantalla HMI DELTA DOP-B3211. Además, los hallazgos del presente estudio se complementan con investigaciones enfocadas en el desarrollo de dispositivos LoRa y su aplicación en ámbitos como el agua, saneamiento, energía y salud, como el "Dispositivo LoRa de comunicación a largo alcance y bajo consumo energético para aplicaciones del ámbito del desarrollo" (Rodríguez Munca, 2016). En esta investigación, se desarrolló un controlador para dispositivos LoRa SX127X, realizando pruebas de alcance y consumo energético, y documentando la librería para el uso y control de estos dispositivos en condiciones reales, tanto en ambientes interiores como exteriores. Finalmente, el "Diseño de la automatización de las estaciones de bombeo y tanques de reserva del sistema de agua potable de la ciudad de Loja" (Mejía Torres, 2011) se enfoca en desarrollar un sistema de automatización para las estaciones de bombeo y tanques de reserva del sistema de agua potable, examinando los aspectos de diseño y especificaciones de los equipos e instalaciones, y realizando una simulación exhaustiva utilizando LabVIEW.

CONCLUSIONES

1. Se realizó pruebas que validó las mediciones de nivel de agua, en el cual se observó que los datos de nivel de agua medidos con el sensor y flexómetro son muy próximos para cada uno de los tres niveles; lo cual certifica la correcta medición de nivel de agua, utilizando el sensor ultrasónico JSN-SR04T. Así mismo se validaron los datos de nivel de agua y su respectivo registro, con los datos que fueron adquiridos y registrados correctamente en el programa ProgMoni.

2. Se realizó la prueba que validó el funcionamiento de las tres electrobombas, por las mediciones realizadas simultáneamente con los sensores de corriente y la pinza amperimétrica, los valores obtenidos son muy próximos; lo cual certifica la correcta medición del consumo de corriente eléctrica y el funcionamiento normal de las electrobombas, utilizando los sensores SCT-013-030. Así mismo se validaron los datos de consumo de corriente para las tres electrobombas y su respectivo registro, con los datos que fueron adquiridos y registrados correctamente en el programa ProgMoni.

3. Se realizó la prueba que validó el enlace de comunicaciones Lora Ra-02; para las tres distancias de prueba: 500 m, 1.0 km y 2.01 km, los datos no sobrepasaron el umbral mínimo de -148 dBm para RSSI y tampoco se excedió el umbral máximo de -20 dBm para SNR. Así mismo se validaron los datos de RSSI y SNR y su respectivo registro con los datos que fueron adquiridos y registrados correctamente en el programa ProgMoni.

4. Los datos adquiridos remotamente con el prototipo a escala y el programa ProgMoni, indican que estos valores son consistentes con los obtenidos manualmente mediante un equipo de medición, lo que sugiere una homogeneidad en los datos. Para evaluar las variables, que incluye el consumo de corriente de las electrobombas, estado de funcionamiento de las electrobombas, nivel de agua de infiltración, estado de alarma, fueron adquiridos 8640 valores en 24 horas, durante

3 días, registrados los datos cada 30 segundos.

5. Los datos enviados a la central de monitoreo se almacenan en una base de datos, lo que permite un estudio de la dinámica del comportamiento del sistema de retorno de agua de infiltración. Estos datos pueden correlacionarse con otros factores para una mejor gestión de los relaves. Así las pruebas realizadas en el monitoreo se llevaron a cabo de manera continua durante las 24 horas de funcionamiento, durante 3 días.

6. El programa ProgMoni desarrollado en LabVIEW y el sistema de monitoreo remoto supervisan los indicadores de consumo de corriente de las electrobombas, estado de funcionamiento de las electrobombas, nivel de agua de infiltración, estado de alarma en la unidad minera San Rafael, lo cual se realizó con una efectividad superior al 99%.

7. Los datos relacionados con el consumo de corriente de las electrobombas, estado de funcionamiento de las electrobombas, nivel de agua de infiltración, estado de alarma, permiten mejorar el diagnóstico de la operatividad del sistema implementado a escala en un 50%.

RECOMENDACIONES

1. Puede ser beneficioso explorar la posibilidad de utilizar un sensor de nivel de agua de mayores prestaciones y para aplicaciones industriales. Este tipo de sensor debería ser resistente a las condiciones climáticas y tener una vida útil prolongada, lo que sería ideal para llevar a cabo pruebas experimentales.

2. Es esencial llevar a cabo pruebas de campo relacionadas con el conexionado eléctrico y otros aspectos. Se deben medir los voltajes en los puntos de prueba de todo el circuito eléctrico y electrónico para garantizar el correcto funcionamiento de todo el sistema.

3. La creación y gestión de una sólida base de datos que permita realizar diversos estudios teniendo en cuenta el entorno, otras variables o factores adicionales.

4. Se debe tener en cuenta la posibilidad de enfrentar retrasos en la adquisición de datos de forma remota, por lo que sería prudente considerar un sistema de respaldo para enlaces de gran distancia.

5. Para mejorar el diagnóstico de operatividad del prototipo, se deberían ampliar otras variables a monitorear y evaluar.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Agüero, M. B. (2017). *Sistema de adquisición de datos.* Recuperado el 3 de Mayo de 2021, de http://materias.df.uba.ar/mta2019c1/files/2014/08/Adquisicion-de-datos-Aguero.pdf

Ai-Thinker Technology. (Octubre de 2022). *Ra-01/Ra-02 LoRa Module User Manual.* Obtenido de https://docs.ai-thinker.com/en/lora/man

Apaza Quinta, Y. E. (2018). *Evaluación del circuito de conminación y flotación de la planta concentradora de la empresa minera Minsur S.A.* Universidad Nacional de San Aguntín de Arequipa, Arequipa. Recuperado el 10 de Octubre de 2023, de https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/9631abf1-8cf3-44f4-a6aa-638d1b2db3ca/content

Arduino. (2021). *Arduino Nano*. Recuperado el 15 de Marzo de 2021, de https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-nano?selectedStore=us

Arduino. (2023). *Arduino IDE 2.* Recuperado el 10 de junio de 2023, de https://docs.arduino.cc/software/ide-v2/tutorials/getting-started-ide-v2

Arrow Electronics. (2020). *Sensores de corriente.* Recuperado el 2023 de Junio de 15, de https://www.arrow.com/es-mx/categories/sensors/current-sensors

Bejarano Benites, L., Mormontoy Laurel, W., & Tipacti Alvarado, C. (2006). *Muestreo e inferencia estadística en ciencias de la salud.* Lima, Perú: Editorial Imprenta Unión.

Bor, M., & Roedig, U. (2017). LoRa Transmission Parameter Selection. *13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, 27-34. Recuperado el 15 de Noviembre de 2021

Bor, M., Vidler, J., & Roedig, U. (2016). LoRa for the Internet of Things. *Embedded Wireless Systems and Networks*, 361–366. Recuperado el 15 de Noviembre de 2021

Carbajal Rodríguez, L. (2013). *El método deductivo de investigación*. Recuperado el 3 de Mayo de 2021, de https://www.lizardo-carvajal.com/el-metodo-deductivo-de-investigacion/

Carrión, M. d. (2017). *Desarrollo de una pasarela LORA y evaluación de prestaciones.* Recuperado el 15 de Enero de 2022, de https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/91597/CARRI%c3%93N%20-%20Desarrollo%20de%20una%20pasarela%20LORA%20y%20evaluaci%c3%b3n%20de%20prestaciones.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Cika Electrónica SRL. (2022). *Principios de comunicaciones de datos.* Recuperado el 7 de Julio de 2022, de https://www.cika.com/newsletter/archives/pp1.pdf

Congreso del Perú. (1991). *Congreso de la Republica del Perú.* Recuperado el 27 de Marzo de 2022, de https://www2.congreso.gob.pe/Sicr/Comisiones/2004/Ambiente_2004.nsf/Documentosweb/8C45B66E6815D2DE05256F320055052B/$FILE/DL17752.pdf

Cutipa Gonzales, R. A. (2017). *Automatización de un sistema de recuperación de agua de relave.* Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa. Recuperado el 20 de Febrero de 2021, de http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/3372/IEcugora.pdf?sequence=1&isAllowed=y

De la Cámara, R. A. (2019). *Diseño de un sistema de monitorización remota de un depósito de agua mediante LoRa.* Universitat Oberta de Catalunya, Catalunya. Recuperado el 10 de Febrero de 2021, de http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/97127/8/radriandTFM0619memoria.pdf

DINEL. (2020). *Medidor nivel ultrasonidos DINEL mod.ULM.* Recuperado el 15 de Marzo de 2021, de https://www.disai.net/producto/medidor-nivel-ultrasonidos-dinel-modelo-ulm/

Espín, D., Jarrín, J., & Escobar, O. M. (2017). Manejo, gestión, tratamiento y disposición final de relaves mineros generados en el proyecto Río Blanco. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa, II*(4), 1-13.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. d. (2014). *Metodología de la investigación* (Vol. VI). México DF: McGRAW-HILL Educación.

Hernández, M. (2012). Recuperado el 3 de Mayo de 2021, de http://metodologiadeinvestigacionmarisol.blogspot.com/2012/12/tipos-y-niveles-de-investigacion.html

Hernandez, R. (2019). *¿Qué es la tecnología LoRa y por qué es importante para IoT?* Recuperado el 3 de Mayo de 2021, de https://www.thethingsnetwork.org/community/santa-rosa/post/que-es-la-tecnologia-lora-y-por-que-es-importante-para-iot

iAgua. (2018). *Preocupados: contaminación del agua a causa de la minería.* Recuperado el 3 de Mayo de 2021, de https://www.iagua.es/blogs/carlos-revilla-calcina/preocupados

Intersoft de Latinoamerica. (2018). *PUNTO A PUNTO Y MULTIPUNTO*. Recuperado el 20 de Abril de 2021, de https://www.intersoftla.com/servicios/redes-inalambricas/punto_a_punto_y_multipunto/

Kumar, A. (Febrero de 2019). *INTRODUCTION TO LORA TECHNOLOGY*. Recuperado el 20 de Noviembre de 2021, de https://www.embien.com/blog/2019/02/

La Republica. (11 de Mayo de 2020). Puno: Aparición de truchas muertas en ribera de río Antauta causa alarma en población. Recuperado el 10 de Febrero de 2021

Lajara Vizcaino, J. R., & Pelegrí Sebastiá, J. (2011). *LabVIEW: Entorno gráfico de programación* (Segunda ed.). México: Alfaomega Grupo Editores, S.A. de C.V.

LoRa Alliance. (2015). *LoRaWAN. What is it? A technical overview of loRa and loRaWAN*. Recuperado el 20 de Enero de 2022, de https://docs.wixstatic.com/ugd/eccc1a_ed71ea1cd969417493c74e4a13c55685.pdf

LoRa Alliance Technical committee. (2017). *LoRaWAN™ 1.0.2 Regional Parameters.* Recuperado el 15 de Enero de 2022, de https://lora-alliance.org/wp-

content/uploads/2020/11/lorawan_regional_parameters_v1.0.2_final_1944_1.pdf

Medium. (2023). *Interfacing SX1278 (Ra-02) LORA Module with Arduino.* Recuperado el 17 de Enero de 2023, de https://medium.com/@shathiralakdilu/interfacing-sx1278-ra-02-lora-module-with-arduino-a02b7b520fc7

Medrano Herrera, C. F., & Trujillo Huamán, S. J. (2016). *Un sistema de control remoto basado en una estrategia de control on/off y tecnología gsm es la manera más adecuada para evitar el rebose del sistema de bombeo de agua en el reservorio de la municipalidad de Ascope.* Trujillo. Recuperado el 18 de Noviembre de 2022, de https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/3527

Mejía Torres, S. M. (2011). *Diseño de la automatización de las estaciones de bombeo y tanques di reserva del sistema de agua potable de la ciudad de Loja.* Universidad Nacional de Loja, Loja. Recuperado el 20 de Febrero de 2021, de https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/12447/1/Mej%C3%ADa%20Torre%2C%20Santiago%20Mauricio.pdf

Microsonic. (2023). *Sensores ultrasónicos.* Recuperado el 20 de Marzo de 2023, de https://www.microsonic.de/es/suporte/ultrasonic-tecnolog%C3%ADa/principio.htm

MINSUR. (2016). *San Rafael*. Recuperado el 15 de Enero de 2021, de https://www.minsur.com/nuestras-operaciones/unidad-minera-san-rafael/operaciones/

MINSUR. (2021). *San Rafael*. Recuperado el 3 de Mayo de 2021, de https://www.minsur.com/nuestras-operaciones/unidad-minera-san-rafael/

MINSUR S.A. (2019). *Minsur Reporte de Sostenibilidad 2019.* Recuperado el 20 de Marzo de 2021, de https://www.minsur.com/wp-content/uploads/pdf/Memoria%20Anual/ESP/Minsur%20Reporte%20de%20Sostenibilidad%202019%20%20Documento.pdf

MINSUR S.A. (2020). *Las 3R en la operación minera de San Rafael.* Recuperado el 12 de Abril de 2021, de https://www.goldfields.com.pe/upload/semana-ambiental/4.%20PPT%203R%20en%20la%20Producci%C3%B3n%20de%20San%20Rafael%202020%20VFinal%20(1).pdf

Naito, K. (2017). A Survey on the Internet-of-Things:. *Journal of Information Processing, XXV*. doi:10.2197/ipsjjip.25.23

Naylamp mechatronics. (2021). *Sensor de Corriente AC 30A no invasivo - SCT-013-030*. Recuperado el 15 de Marzo de 2021, de https://naylampmechatronics.com/sensores-corriente-voltaje/154-sensor-de-corriente-ac-30a-no-invasivo-sct-013-030.html

Naylamp mechatronics. (2021). *Sensor Ultrasonido JSN-SR04T*. Recuperado el 15 de Noviembre de 2021, de https://naylampmechatronics.com/sensores-proximidad/326-sensor-ultrasonido-jsn-sr04t.html

NI. (2023). *¿Qué es LabVIEW?* Recuperado el 10 de Mayo de 2022, de https://www.ni.com/es/shop/labview.html

Ojeda Chinchayán, C. M. (2012). *Diseño de un sistema de automatización industrial para el sistema de bombeo de aguas acidas.* Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima. Recuperado el 20 de Febrero de 2021, de http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/4795/OJEDA_CARLOS_DISE%C3%91O_AUTOMATIZACION_.INDUSTRIAL_BOMBEO_AGUAS_ACIDAS.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Oldecop, L., Zabala, F., Rodríguez Pacheco, R., & Lucas, G. (2008). Funcionamiento hidráulico, estabilidad y mecanismos de rotura de presas de relaves mineros. *V Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos. At Tucumán, Argentina*. Recuperado el 15 de Enero de 2021

Omega. (2021). *Monitoreo Remoto*. Recuperado el 3 de Mayo de 2021, de https://mx.omega.com/technical-learning/monitoreo-remoto.html

Omega Engineering. (2023). *Sensor de nivel.* Recuperado el 15 de Junio de 2023, de https://es.omega.com/prodinfo/sondas-de-nivel-medicion.html

Rafael Barzola, J. E. (2019). *Implementación de un Sistema de Bombeo Integral para la Evacuación de Aguas Subterráneas en Minera Kolpa S.A.* UNCP,

Huancayo. Recuperado el 20 de Abril de 2021, de https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5149/T010_73891431_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Raj, A. (2019). *Interfacing SX1278 (Ra-02) LoRa Module with Arduino*. (Circuitdigest, Editor) Recuperado el 15 de Marzo de 2021, de https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/arduino-lora-sx1278-interfacing-tutorial

Rodríguez Munca, J. D. (2016). *Dispositivo LoRa de comunicación a largo alcance y bajo consumo energético para aplicaciones del ámbito del desarrollo.* Madrid. Recuperado el 10 de Febrero de 2021

Salazar Vilañez, M. D. (2018). *Unidad de adquisición y transferencia de variables remotas para el monitoreo en tanques de almacenamiento de agua potable.* Ibarra. Recuperado el 10 de Febrero de 2021

Sánchez Carlessi, H., & Reyes Meza, C. (2017). *Metodología y diseños en la investigacion científica.* Lima: Business Support Aneth.

Sánchez González, I. N. (2023). *Diseño de un sistema de monitoreo remoto para minera el Peñón.* Universidad Técnica Federico Santa María, Viña del Mar. Recuperado el 30 de Noviembre de 2023, de https://repositorio.usm.cl/server/api/core/bitstreams/2b51c841-814b-402e-946f-79fc2a7231ce/content

Semtech. (2021). *Products Wireless RF.* Recuperado el 15 de Marzo de 2021, de https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1278

SEMTECH. (2022). *Specifications and Datasheets.* Recuperado el 25 de Enero de 2022, de https://lora-developers.semtech.com/documentation/product-documents/

SEMTECH. (2023). *Benefits of LoRa.* Recuperado el 20 de Marzo de 2023, de https://www.semtech.com/lora/why-lora

Suministro de Materiales Electricos Ltda. (2022). *TABLEROS ELÉCTRICOS: TIPOS Y APLICACIONES*. Recuperado el 20 de Marzo de 2022, de https://jdelectricos.com.co/

Tam Malaga, J., Vera, G., & Oliveros Ramos, R. (2008). http://www.imarpe.pe/imarpe/archivos/articulos/imarpe/oceonografia/adj_modela_pa-5-145-tam-2008-investig.pdf. *Pensamiento y acción 5*, 145-154. Recuperado el 3 de Mayo de 2021, de http://www.imarpe.pe/imarpe/archivos/articulos/imarpe/oceonografia/adj_modela_pa-5-145-tam-2008-investig.pdf

Tameco Mecanica Industrial. (Mayo de 2018). *¿Qué es una electrobomba?* Recuperado el 20 de Marzo de 2021, de https://tameco.es/que-es-una-electrobomba/

Tun, G. A. (2013). *Libro instrumentos para tableros.* Recuperado el 20 de Marzo de 2021, de https://unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes_Finales_Investigacion/IF_DICIEMBRE_2012/IF_RODRIGUEZ%20ABURTO_FIEE/LIBRO%20INSTRUMENTOS%20PARA%20TABLEROS.pdf

UIT. (2022). *Frequency Bands allocated to Terrestrial Broadcasting Services*. Recuperado el 15 de Enero de 2022, de https://www.itu.int/en/ITU-R/terrestrial/broadcast/Pages/Bands.aspx

Union IndustriALL Global. (2018). *Lo que se debe saber sobre las represas de relave.* Recuperado el 15 de Marzo de 2021, de http://www.industriall-union.org/es/lo-que-se-debe-saber-sobre-las-represas-de-relave

WelkerPeru. (2021). *Bombas de agua*. Recuperado el 20 de Marzo de 2021, de https://www.welkerperu.com/product-category/electrobombas/page/4/

Wikipedia. (2021). *Comunicaciones_punto-a-punto*. Recuperado el 3 de Mayo de 2021, de https://es.wikipedia.org/wiki/Comunicaciones_punto-a-punto

Wikipedia. (2021). *Red inalámbrica*. Recuperado el Marzo de Enero de 2021, de https://es.wikipedia.org/wiki/Red_inal%C3%A1mbrica

Wikipedia. (Marzo de 2021). *Sistema de control*. Recuperado el 20 de Abril de 2021, de https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_control

APÉNDICE

Apéndice A. Fotografías

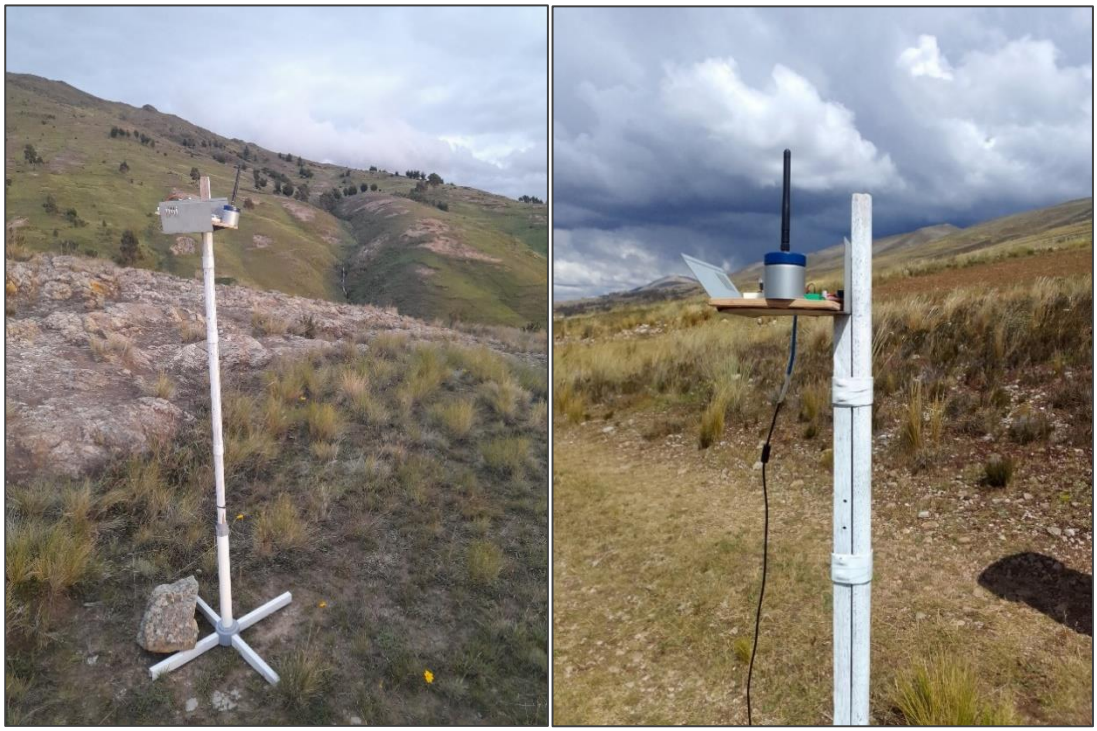


Foto 2. Prueba de enlace entre transmisor y receptor con los módulos LoRa

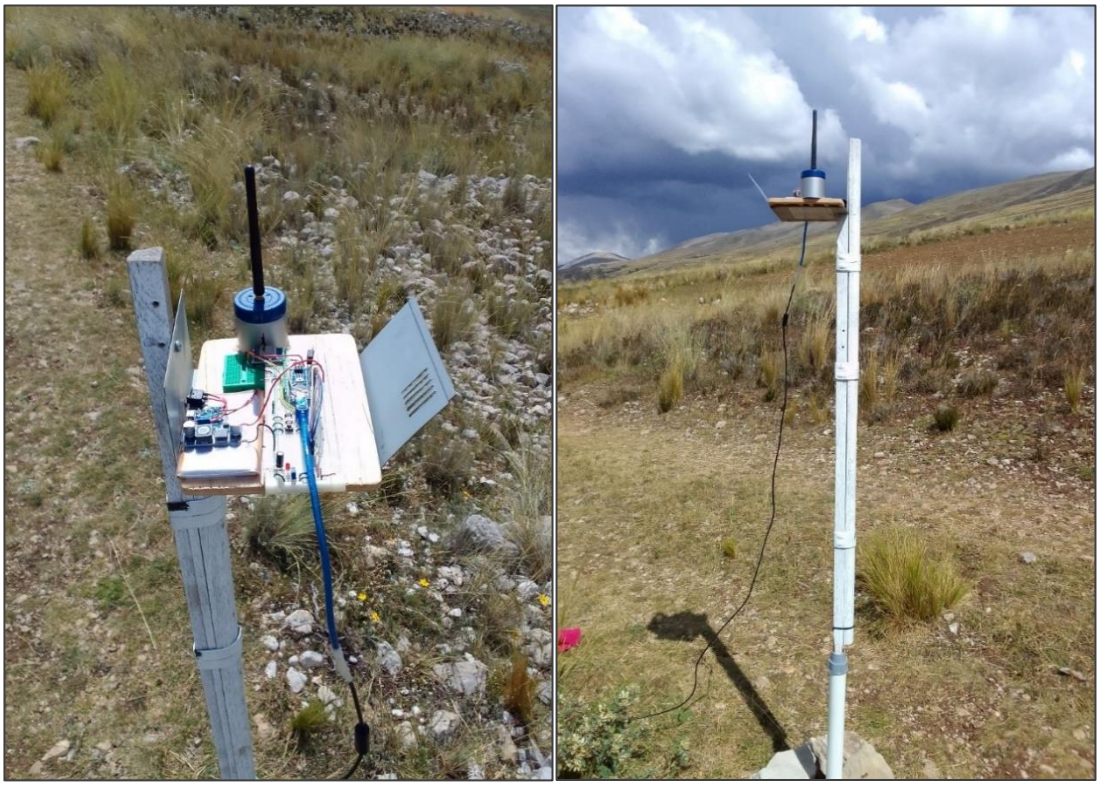


Foto 3. Prueba de enlace entre transmisor y receptor con los módulos LoRa

Foto 4. Prueba de enlace entre transmisor y receptor con los módulos LoRa

Foto 9. Prueba en campo del prototipo completo

Foto 7. Prototipo totalmente concluido para su prueba final

Foto 8. Prueba en campo del prototipo completo

Foto 9. Realizando la instalación del prototipo que corresponde al tanque de agua

Foto 10. Las electrobombas, su tablero de control de eléctrico y su instalación

Apéndice B. Datos adquiridos con Arduino IDE

Tabla I (datos obtenidos en la prueba de enlace para 500 m)

Muestra	Recepción de datos				
	Fecha	Hora	Bytes recibidos	RSSI (dBm)	SNR (dBm)
1	16/08/22	09:58:09.700	42	-70	-9.75
2	16/08/22	09:59:09.752	42	-71	-9.75
3	16/08/22	10:00:10.010	42	-71	-9.50
4	16/08/22	10:01:10.077	42	-71	-9.50
5	16/08/22	10:02:10.236	42	-71	-9.50
6	16/08/22	10:03:10.419	42	-70	-9.50
7	16/08/22	10:04:10.428	42	-75	-9.25
8	16/08/22	10:05:10.450	42	-80	-9.25
9	16/08/22	10:06:10.581	42	-78	-9.00
10	16/08/22	10:07:10.776	42	-80	-9.50
11	16/08/22	10:08:10.993	42	-81	-9.25
12	16/08/22	10:09:11.168	42	-79	-9.50
13	16/08/22	10:10:11.337	42	-79	-9.50
14	16/08/22	10:11:11.579	42	-71	-9.50
15	16/08/22	10:12:11.591	42	-72	-9.75
16	16/08/22	10:13:11.841	42	-72	-9.75
17	16/08/22	10:14:11.834	42	-66	-9.75
18	16/08/22	10:15:11.903	42	-72	-9.50
19	16/08/22	10:16:12.131	42	-72	-9.75
20	16/08/22	10:17:12.234	42	-71	-9.50
21	16/08/22	10:18:12.328	42	-75	-9.50
22	16/08/22	10:19:12.379	42	-70	-4.75
23	16/08/22	10:20:12.555	42	-72	-9.50
24	16/08/22	10:21:12.750	42	-73	-9.50
25	16/08/22	10:22:12.915	42	-71	-9.75
26	16/08/22	10:23:12.989	42	-66	-9.75
27	16/08/22	10:24:13.164	42	-73	-9.50
28	16/08/22	10:25:13.239	42	-73	-9.75
29	16/08/22	10:26:13.288	42	-71	-9.75
30	16/08/22	10:27:13.338	42	-70	-9.50
31	16/08/22	10:28:13.438	42	-78	-9.75
32	16/08/22	10:29:13.536	42	-76	-9.50
33	16/08/22	10:30:13.608	42	-77	-9.50
34	16/08/22	10:31:13.615	42	-79	-9.50
35	16/08/22	10:32:13.628	42	-78	-9.50

Continua tabla I

Muestra	Recepción de datos				
	Fecha	Hora	Bytes recibidos	RSSI (dBm)	SNR (dBm)
36	16/08/22	10:33:13.691	42	-79	-9.75
37	16/08/22	10:35:14.055	42	-76	-9.75
38	16/08/22	10:36:14.189	42	-83	-9.50
39	16/08/22	10:37:14.266	42	-69	-9.50
40	16/08/22	10:38:14.336	42	-72	-9.50
41	16/08/22	10:39:14.569	42	-73	-9.75
42	16/08/22	10:40:14.736	42	-72	-9.50
43	16/08/22	10:41:14.867	42	-70	-9.75
44	16/08/22	10:42:14.956	42	-71	-9.00
45	16/08/22	10:43:15.184	42	-71	-9.50
46	16/08/22	10:44:15.424	42	-71	-9.75
47	16/08/22	10:45:15.660	42	-73	-9.50
48	16/08/22	10:46:15.747	42	-70	-9.50
49	16/08/22	10:47:15.922	42	-73	-9.75
50	16/08/22	10:48:16.041	42	-72	-9.75
51	16/08/22	10:49:16.043	42	-72	-9.75
52	16/08/22	10:50:16.207	42	-76	-9.50
53	16/08/22	10:51:16.386	42	-73	-9.75
54	16/08/22	10:52:16.580	42	-73	-9.75
55	16/08/22	10:53:16.757	42	-74	-9.75
56	16/08/22	10:54:16.981	42	-73	-9.75
57	16/08/22	10:55:17.115	42	-75	-9.25
58	16/08/22	10:56:17.331	42	-71	-9.50
59	16/08/22	10:57:17.349	42	-71	-9.50
60	16/08/22	10:58:17.499	42	-71	-9.75
61	16/08/22	10:59:17.717	42	-73	-9.50
62	16/08/22	11:00:17.891	42	-72	-9.75
63	16/08/22	11:01:17.935	42	-72	-9.75
64	16/08/22	11:02:17.956	42	-72	-9.50
65	16/08/22	11:03:17.984	42	-71	-9.50
66	16/08/22	11:04:18.080	42	-70	-9.50
67	16/08/22	11:05:18.327	42	-73	-9.50
68	16/08/22	11:06:18.467	42	-73	-9.75
69	16/08/22	11:07:18.708	42	-74	-9.75
70	16/08/22	11:08:18.880	42	-72	-9.50

Continua tabla I

Muestra	Recepción de datos				
	Fecha	Hora	Bytes recibidos	RSSI (dBm)	SNR (dBm)
71	16/08/22	11:09:18.917	42	-72	-9.75
72	16/08/22	11:10:19.159	42	-72	-9.75
73	16/08/22	11:11:19.287	42	-69	-9.75
74	16/08/22	11:12:19.308	42	-72	-9.75
75	16/08/22	11:13:19.414	42	-72	-9.75
76	16/08/22	11:14:19.480	42	-72	-9.50
77	16/08/22	11:15:19.550	42	-71	-9.75
78	16/08/22	11:16:19.566	42	-71	-9.50
79	16/08/22	11:17:19.747	42	-72	-9.75
80	16/08/22	11:18:19.912	42	-72	-10.00
81	16/08/22	11:19:20.012	42	-72	-9.50
82	16/08/22	11:20:20.123	42	-72	-9.75
83	16/08/22	11:21:20.263	42	-73	-9.75
84	16/08/22	11:22:20.235	42	-72	-9.75
85	16/08/22	11:23:20.260	42	-72	-9.75
86	16/08/22	11:24:20.446	42	-72	-9.00
87	16/08/22	11:25:20.549	42	-72	-9.50
88	16/08/22	11:26:20.715	42	-74	-9.50
89	16/08/22	11:27:20.922	42	-72	-9.50
90	16/08/22	11:28:21.159	42	-72	-9.75
91	16/08/22	11:29:21.287	42	-72	-9.75
92	16/08/22	11:30:21.308	42	-72	-9.50
93	16/08/22	11:31:21.414	42	-71	-9.75
94	16/08/22	11:32:21.480	42	-71	-9.50
95	16/08/22	11:33:21.550	42	-72	-9.75
96	16/08/22	11:34:21.566	42	-72	-9.25
97	16/08/22	11:35:21.747	42	-72	-9.50
98	16/08/22	11:36:21.912	42	-72	-9.75
99	16/08/22	11:37:22.041	42	-73	-9.75
100	16/08/22	11:38:22.043	42	-74	-9.50

Tabla II (datos obtenidos en la prueba de enlace para 1.0 km)

Muestra	Recepción de datos				
	Fecha	Hora	Bytes recibidos	RSSI (dBm)	SNR (dBm)
1	17/08/22	08:27:20.739	42	-95	-6.25
2	17/08/22	08:28:20.797	42	-95	-6.75
3	17/08/22	08:29:21.034	42	-95	-8.25
4	17/08/22	08:30:21.114	42	-96	-6.00
5	17/08/22	08:31:21.273	42	-96	-0.75
6	17/08/22	08:32:21.442	42	-96	-1.75
7	17/08/22	08:33:21.455	42	-96	-1.75
8	17/08/22	08:34:21.528	42	-97	-3.50
9	17/08/22	08:35:21.632	42	-96	-2.25
10	17/08/22	08:36:21.821	42	-95	-3.50
11	17/08/22	08:37:22.034	42	-95	-3.75
12	17/08/22	08:38:22.197	42	-95	-2.75
13	17/08/22	08:39:22.361	42	-95	-3.25
14	17/08/22	08:40:22.615	42	-96	-1.75
15	17/08/22	08:41:22.663	42	-96	-1.75
16	17/08/22	08:42:22.870	42	-97	-3.50
17	17/08/22	08:43:22.885	42	-96	-2.25
18	17/08/22	08:44:22.970	42	-95	-3.50
19	17/08/22	08:45:23.201	42	-95	-3.75
20	17/08/22	08:46:23.285	42	-95	-2.75
21	17/08/22	08:47:23.404	42	-95	-3.25
22	17/08/22	08:48:23.458	42	-97	-3.50
23	17/08/22	08:49:23.629	42	-96	-2.25
24	17/08/22	08:50:23.821	42	-95	-3.50
25	17/08/22	08:51:23.970	42	-95	-3.75
26	17/08/22	08:52:24.042	42	-95	-2.75
27	17/08/22	08:53:24.209	42	-95	-3.25
28	17/08/22	08:54:24.299	42	-96	-1.75
29	17/08/22	08:55:24.358	42	-96	-1.75
30	17/08/22	08:56:24.420	42	-97	-3.50
31	17/08/22	08:57:24.505	42	-96	-2.25
32	17/08/22	08:58:24.573	42	-95	-3.50
33	17/08/22	08:59:24.660	42	-95	-3.75
34	17/08/22	09:00:24.663	42	-95	-2.75
35	17/08/22	09:01:24.686	42	-95	-3.25

Continua tabla II

Muestra	Recepción de datos				
	Fecha	Hora	Bytes recibidos	RSSI (dBm)	SNR (dBm)
36	17/08/22	09:02:24.754	42	-96	-1.75
37	17/08/22	09:03:24.884	42	-97	-3.50
38	17/08/22	09:04:25.118	42	-96	-2.25
39	17/08/22	09:05:25.245	42	-95	-3.50
40	17/08/22	09:06:25.344	42	-95	-3.75
41	17/08/22	09:07:25.423	42	-95	-2.75
42	17/08/22	09:08:25.615	42	-95	-3.25
43	17/08/22	09:09:25.786	42	-96	-1.75
44	17/08/22	09:10:25.931	42	-96	-1.75
45	17/08/22	09:11:26.008	42	-97	-3.50
46	17/08/22	09:12:26.230	42	-96	-2.25
47	17/08/22	09:13:26.493	42	-95	-3.50
48	17/08/22	09:14:26.701	42	-95	-3.75
49	17/08/22	09:15:26.816	42	-95	-2.75
50	17/08/22	09:16:27.005	42	-95	-3.25
51	17/08/22	09:17:27.117	42	-97	-3.50
52	17/08/22	09:18:27.115	42	-96	-2.25
53	17/08/22	09:19:27.256	42	-95	-3.50
54	17/08/22	09:20:27.449	42	-95	-3.75
55	17/08/22	09:21:27.629	42	-95	-2.75
56	17/08/22	09:22:27.821	42	-95	-3.25
57	17/08/22	09:23:27.970	42	-96	-1.75
58	17/08/22	09:24:28.080	42	-96	-1.75
59	17/08/22	09:25:28.327	42	-97	-3.50
60	17/08/22	09:26:28.467	42	-96	-2.25
61	17/08/22	09:27:28.708	42	-95	-3.50
62	17/08/22	09:28:28.880	42	-95	-3.75
63	17/08/22	09:29:28.917	42	-95	-2.75
64	17/08/22	09:30:29.159	42	-95	-3.25
65	17/08/22	09:31:29.287	42	-95	-2.75
66	17/08/22	09:32:29.308	42	-95	-3.25
67	17/08/22	09:33:29.414	42	-97	-3.50
68	17/08/22	09:34:29.480	42	-96	-2.25
69	17/08/22	09:35:29.550	42	-95	-3.50
70	17/08/22	09:36:29.566	42	-95	-3.75

Continua tabla II

Muestra	Recepción de datos				
	Fecha	Hora	Bytes recibidos	RSSI (dBm)	SNR (dBm)
71	17/08/22	09:37:29.747	42	-95	-2.75
72	17/08/22	09:38:29.912	42	-95	-3.25
73	17/08/22	09:39:30.012	42	-96	-1.75
74	17/08/22	09:40:30.123	42	-96	-1.75
75	17/08/22	09:41:30.263	42	-97	-3.50
76	17/08/22	09:42:30.235	42	-96	-2.25
77	17/08/22	09:43:30.260	42	-95	-3.50
78	17/08/22	09:44:30.446	42	-95	-3.75
79	17/08/22	09:45:30.549	42	-95	-2.75
80	17/08/22	09:46:30.715	42	-95	-3.25
81	17/08/22	09:47:30.922	42	-96	-1.75
82	17/08/22	09:48:31.159	42	-97	-3.50
83	17/08/22	09:49:31.287	42	-96	-2.25
84	17/08/22	09:50:31.308	42	-95	-3.50
85	17/08/22	09:51:31.414	42	-95	-3.75
86	17/08/22	09:52:31.480	42	-95	-2.75
87	17/08/22	09:53:31.550	42	-95	-3.25
88	17/08/22	09:54:31.566	42	-96	-1.75
89	17/08/22	09:55:31.747	42	-96	-1.75
90	17/08/22	09:56:31.912	42	-97	-3.50
91	17/08/22	09:57:32.149	42	-96	-2.25
92	17/08/22	09:58:32.287	42	-95	-3.50
93	17/08/22	09:59:32.308	42	-95	-3.75
94	17/08/22	10:00:32.414	42	-95	-2.75
95	17/08/22	10:01:32.480	42	-95	-3.25
96	17/08/22	10:02:32.550	42	-97	-3.50
97	17/08/22	10:03:32.566	42	-96	-2.25
98	17/08/22	10:04:32.747	42	-95	-3.50
99	17/08/22	10:05:32.912	42	-95	-3.75
100	17/08/22	10:06:33.123	42	-95	-2.75

Tabla III (datos obtenidos en la prueba de enlace para 2.01 km)

Muestra					
	Fecha	Hora	Bytes recibidos	RSSI (dBm)	SNR (dBm)
1	17/08/22	12:55:50.663	42	-95	-7.75
2	17/08/22	12:55:50.686	42	-96	-8.00
3	17/08/22	12:55:50.750	42	-96	-8.00
4	17/08/22	12:56:50.765	42	-96	-11.00
5	17/08/22	12:57:51.038	42	-96	-7.25
6	17/08/22	12:58:51.139	42	-96	-6.25
7	17/08/22	12:59:51.290	42	-96	-7.00
8	17/08/22	13:00:51.445	42	-96	-6.25
9	17/08/22	13:01:51.494	42	-96	-8.00
10	17/08/22	13:02:51.518	42	-96	-6.75
11	17/08/22	13:03:51.668	42	-96	-8.00
12	17/08/22	13:04:51.833	42	-96	-9.00
13	17/08/22	13:05:52.063	42	-96	-8.00
14	17/08/22	13:06:52.230	42	-96	-8.00
15	17/08/22	13:07:52.413	42	-96	-9.00
16	17/08/22	13:08:52.652	42	-96	-8.75
17	17/08/22	13:09:52.697	42	-96	-8.25
18	17/08/22	13:10:52.938	42	-95	-7.00
19	17/08/22	13:11:52.965	42	-95	-6.50
20	17/08/22	13:12:53.058	42	-95	-7.75
21	17/08/22	13:13:53.366	42	-95	-7.50
22	17/08/22	13:14:53.615	42	-96	-7.25
23	17/08/22	13:15:53.663	42	-96	-6.25
24	17/08/22	13:16:53.870	42	-96	-7.00
25	17/08/22	13:17:53.885	42	-96	-6.25
26	17/08/22	13:18:53.970	42	-96	-8.00
27	17/08/22	13:19:54.201	42	-96	-6.75
28	17/08/22	13:20:54.285	42	-96	-8.00
29	17/08/22	13:21:54.404	42	-96	-9.00
30	17/08/22	13:22:54.458	42	-96	-8.00
31	17/08/22	13:23:54.629	42	-96	-8.00
32	17/08/22	13:24:54.821	42	-96	-9.00
33	17/08/22	13:25:54.970	42	-96	-8.75
34	17/08/22	13:26:55.042	42	-96	-8.25
35	17/08/22	13:27:55.209	42	-95	-7.00

Continua tabla III

Muestra	Recepción de datos				
	Fecha	Hora	Bytes recibidos	RSSI (dBm)	SNR (dBm)
36	17/08/22	13:28:55.299	42	-95	-6.50
37	17/08/22	13:29:55.358	42	-95	-7.75
38	17/08/22	13:30:55.420	42	-95	-7.50
39	17/08/22	13:31:55.505	42	-96	-8.00
40	17/08/22	13:32:55.573	42	-96	-6.75
41	17/08/22	13:33:55.660	42	-96	-8.00
42	17/08/22	13:34:55.663	42	-96	-9.00
43	17/08/22	13:35:55.686	42	-96	-8.00
44	17/08/22	13:36:55.754	42	-96	-8.00
45	17/08/22	13:37:55.884	42	-96	-9.00
46	17/08/22	13:38:56.118	42	-96	-8.75
47	17/08/22	13:39:56.245	42	-96	-8.25
48	17/08/22	13:40:56.344	42	-95	-7.00
49	17/08/22	13:41:56.423	42	-95	-6.50
50	17/08/22	13:42:56.615	42	-95	-7.75
51	17/08/22	13:43:56.786	42	-95	-7.50
52	17/08/22	13:44:56.931	42	-96	-7.25
53	17/08/22	13:45:57.008	42	-96	-6.25
54	17/08/22	13:46:57.230	42	-96	-7.00
55	17/08/22	13:47:57.493	42	-96	-6.25
56	17/08/22	13:48:57.701	42	-96	-8.00
57	17/08/22	13:49:57.816	42	-96	-6.75
58	17/08/22	13:50:58.005	42	-96	-8.00
59	17/08/22	13:51:58.117	42	-96	-9.00
60	17/08/22	13:52:58.115	42	-96	-8.00
61	17/08/22	13:53:58.256	42	-96	-8.00
62	17/08/22	13:54:58.449	42	-96	-9.00
63	17/08/22	13:55:58.629	42	-96	-8.75
64	17/08/22	13:56:58.821	42	-96	-8.25
65	17/08/22	13:57:58.970	42	-95	-7.00
66	17/08/22	13:58:59.080	42	-95	-6.50
67	17/08/22	13:59:59.327	42	-95	-7.75
68	17/08/22	14:00:59.467	42	-95	-7.50
69	17/08/22	14:01:59.708	42	-95	-7.00
70	17/08/22	14:02:59.880	42	-95	-6.50

Continua tabla III

Muestra	Recepción de datos				
	Fecha	Hora	Bytes recibidos	RSSI (dBm)	SNR (dBm)
71	17/08/22	14:03:59.917	42	-95	-7.75
72	17/08/22	14:04:00.159	42	-95	-7.50
73	17/08/22	14:05:00.287	42	-96	-7.25
74	17/08/22	14:06:00.308	42	-96	-6.25
75	17/08/22	14:07:00.414	42	-96	-7.00
76	17/08/22	14:08:00.480	42	-96	-6.25
77	17/08/22	14:09:00.550	42	-96	-8.00
78	17/08/22	14:10:00.566	42	-96	-6.75
79	17/08/22	14:11:00.747	42	-96	-8.00
80	17/08/22	14:12:00.912	42	-96	-9.00
81	17/08/22	14:13:01.012	42	-96	-8.00
82	17/08/22	14:14:01.123	42	-96	-8.00
83	17/08/22	14:15:01.263	42	-96	-9.00
84	17/08/22	14:16:01.235	42	-96	-8.75
85	17/08/22	14:17:01.260	42	-96	-8.25
86	17/08/22	14:18:01.446	42	-95	-7.00
87	17/08/22	14:19:01.549	42	-95	-6.50
88	17/08/22	14:20:01.715	42	-95	-7.75
89	17/08/22	14:21:01.922	42	-95	-7.50
90	17/08/22	14:22:02.159	42	-96	-8.00
91	17/08/22	14:23:02.287	42	-96	-6.75
92	17/08/22	14:24:02.308	42	-96	-8.00
93	17/08/22	14:25:02.414	42	-96	-9.00
94	17/08/22	14:26:02.480	42	-96	-8.00
95	17/08/22	14:27:02.550	42	-96	-8.00
96	17/08/22	14:28:02.566	42	-96	-9.00
97	17/08/22	14:29:02.747	42	-96	-8.75
98	17/08/22	14:30:02.912	42	-96	-8.25
99	17/08/22	14:31:03.149	42	-95	-7.00
100	17/08/22	14:32:03.287	42	-95	-6.50

Apéndice C. Datos adquiridos para ProgMoni

Tabla IV (datos obtenidos en la prueba de enlace para 1.0 km)

Muestra	Fecha - Hora	Nivel (cm)	Irms1 (A)	Irms2 (A)	Irms3 (A)	EEB1	EEB2	EEB3	RSSI (dBm)	SNR (dBm)
1	20/03/23 - 10:43:31.826	82	0.0031	0.0022	0.0000	ON	ON	ON	-96	-1.75
2	20/03/23 - 10:44:03.307	74	1.0938	1.2364	1.0803	ON	ON	ON	-97	-3.50
3	20/03/23 - 10:44:34.816	66	1.0967	1.3349	1.0814	ON	ON	ON	-96	-2.25
4	20/03/23 - 10:45:06.277	63	1.0830	1.3905	1.0883	ON	ON	ON	-95	-3.50
5	20/03/23 - 10:45:37.756	61	1.0824	1.3782	1.0882	ON	ON	ON	-95	-3.75
6	20/03/23 - 10:46:09.256	59	1.0954	1.3611	1.1123	ON	ON	ON	-95	-2.75
7	20/03/23 - 10:46:40.737	56	1.0987	1.3543	1.1098	ON	ON	ON	-95	-3.25
8	20/03/23 - 10:47:12.209	54	1.0913	1.3370	1.1067	ON	ON	ON	-95	-2.75
9	20/03/23 - 10:47:43.714	54	1.0950	1.3297	1.1100	ON	ON	ON	-95	-3.25
10	20/03/23 - 10:48:15.173	56	1.1019	1.3335	1.1180	ON	ON	ON	-97	-3.50
11	20/03/23 - 10:48:46.681	57	1.0951	1.3208	1.1144	ON	ON	ON	-96	-2.25
12	20/03/23 - 10:49:18.154	58	1.0938	1.3192	1.1122	ON	ON	ON	-95	-3.50
13	20/03/23 - 10:49:49.630	59	1.1024	1.3165	1.1115	ON	ON	ON	-95	-3.75
14	20/03/23 - 10:50:21.117	60	1.0999	1.3151	1.1085	ON	ON	ON	-95	-2.75
15	20/03/23 - 10:50:52.604	60	1.1045	1.3106	1.1092	ON	ON	ON	-95	-3.25
16	20/03/23 - 10:51:24.074	61	1.0959	1.3062	1.1083	ON	ON	ON	-96	-1.75
17	20/03/23 - 10:51:55.568	61	1.0960	1.2960	1.1044	ON	ON	ON	-96	-1.75
18	20/03/23 - 10:52:27.061	62	1.0999	1.2943	1.1058	ON	ON	ON	-97	-3.50
19	20/03/23 - 10:52:58.550	62	1.1002	1.2909	1.1112	ON	ON	ON	-96	-2.25
20	20/03/23 - 10:53:30.016	62	1.0938	1.2899	1.1058	ON	ON	ON	-95	-3.50
21	20/03/23 - 10:54:01.509	62	1.1031	1.2829	1.1116	ON	ON	ON	-95	-3.75
22	20/03/23 - 10:54:32.978	62	1.1025	1.2804	1.10890	ON	ON	ON	-95	-2.75
23	20/03/23 - 10:55:04.469	62	1.1057	1.2773	1.1085	ON	ON	ON	-95	-3.50
24	20/03/23 - 10:55:35.952	62	1.0957	1.2712	1.1054	ON	ON	ON	-95	-3.75
25	20/03/23 - 10:56:07.443	62	1.0949	1.2686	1.1032	ON	ON	ON	-95	-2.75
26	20/03/23 - 10:56:38.922	62	1.1046	1.2617	1.0999	ON	ON	ON	-95	-3.25
27	20/03/23 - 10:57:10.407	62	1.0997	1.2632	1.1038	ON	ON	ON	-96	-1.75
28	20/03/23 - 10:57:41.875	62	1.0958	1.2588	1.1053	ON	ON	ON	-96	-1.75
29	20/03/23 - 10:58:13.380	62	1.0982	1.2547	1.1062	ON	ON	ON	-97	-3.50
30	20/03/23 - 10:58:44.861	63	1.1070	1.2548	1.1006	ON	ON	ON	-96	-2.25
31	20/03/23 - 10:59:16.334	62	1.0994	1.2475	1.0947	ON	ON	ON	-95	-3.50
32	20/03/23 - 10:59:47.816	58	1.0936	1.2353	1.0882	ON	ON	ON	-95	-3.75
33	20/03/23 - 11:00:19.289	54	1.0870	1.2264	1.0863	ON	ON	ON	-95	-2.75
34	20/03/23 - 11:00:50.774	54	1.0884	1.2212	1.0885	ON	ON	ON	-95	-3.25
35	20/03/23 - 11:01:22.283	55	1.0872	1.2196	1.0854	ON	ON	ON	-97	-3.50
36	20/03/23 - 11:01:53.759	54	1.1012	1.2198	1.0982	ON	ON	ON	-96	-2.25
37	20/03/23 - 11:02:25.228	53	1.0973	1.2221	1.0986	ON	ON	ON	-95	-3.50
38	20/03/23 - 11:02:56.726	52	1.0815	1.2228	1.1053	ON	ON	ON	-95	-3.75
39	20/03/23 - 11:03:28.218	52	1.0774	1.2269	1.1062	ON	ON	ON	-95	-2.75
40	20/03/23 - 11:03:59.677	54	1.0817	1.2254	1.1006	ON	ON	ON	-95	-3.25
41	20/03/23 - 11:04:31.187	56	1.0751	1.2316	1.0947	ON	ON	ON	-96	-1.75
42	20/03/23 - 11:05:02.654	58	1.0797	1.2370	1.0882	ON	ON	ON	-96	-1.75
43	20/03/23 - 11:05:34.153	59	1.0824	1.2363	1.0863	ON	ON	ON	-97	-3.50
44	20/03/23 - 11:06:05.641	60	1.0805	1.2364	1.0885	ON	ON	ON	-96	-2.25
45	20/03/23 - 11:06:37.110	61	1.0859	1.2429	1.0854	ON	ON	ON	-95	-3.50
46	20/03/23 - 11:07:08.585	62	1.0906	1.2433	1.0982	ON	ON	ON	-95	-3.75
47	20/03/23 - 11:07:40.064	63	1.0931	1.2446	1.0986	ON	ON	ON	-95	-2.75
48	20/03/23 - 11:08:11.540	64	1.0873	1.2460	1.0882	ON	ON	ON	-95	-3.25
49	20/03/23 - 11:08:43.037	65	1.0883	1.2486	1.0863	ON	ON	ON	-95	-2.75
50	20/03/23 - 11:09:14.531	66	1.0791	1.2476	1.0885	ON	ON	ON	-95	-3.25
51	20/03/23 - 11:09:45.995	66	1.0922	1.2469	1.0854	ON	ON	ON	-97	-3.50
52	20/03/23 - 11:10:17.503	67	1.0875	1.2469	1.0982	ON	ON	ON	-96	-2.25
53	20/03/23 - 11:10:48.965	67	1.0806	1.2430	1.0986	ON	ON	ON	-96	-1.75
54	20/03/23 - 11:11:20.449	67	1.0856	1.2442	1.1053	ON	ON	ON	-97	-3.50
55	20/03/23 - 11:11:51.950	68	1.0822	1.2486	1.1062	ON	ON	ON	-96	-2.25
56	20/03/23 - 11:12:23.416	68	1.0925	1.2449	1.1006	ON	ON	ON	-95	-3.50
57	20/03/23 - 11:12:54.916	68	1.0926	1.2433	1.0947	ON	ON	ON	-95	-3.75
58	20/03/23 - 11:13:26.384	68	1.0890	1.2421	1.0882	ON	ON	ON	-95	-2.75

Continua tabla IV (datos obtenidos en la prueba de enlace para 1.0 km)

Muestra	Fecha - Hora	Nivel (cm)	Irms1 (A)	Irms2 (A)	Irms3 (A)	EEB1	EEB2	EEB3	RSSI (dBm)	SNR (dBm)
59	20/03/23 - 11:13:57.872	68	1.0956	1.2392	1.0863	ON	ON	ON	-95	-3.25
60	20/03/23 - 11:14:29.350	68	1.0906	1.2437	1.1006	ON	ON	ON	-96	-1.75
61	20/03/23 - 11:15:00.823	69	1.0994	1.2416	1.0947	ON	ON	ON	-97	-3.50
62	20/03/23 - 11:15:32.313	69	1.0890	1.2390	1.0882	ON	ON	ON	-96	-2.25
63	20/03/23 - 11:16:03.793	69	1.1098	1.2352	1.0863	ON	ON	ON	-95	-3.50
64	20/03/23 - 11:16:35.288	69	1.0999	1.2423	1.0885	ON	ON	ON	-95	-3.75
65	20/03/23 - 11:17:06.775	69	1.0930	1.2413	1.0854	ON	ON	ON	-95	-2.75
66	20/03/23 - 11:17:38.264	69	1.0960	1.2388	1.0982	ON	ON	ON	-95	-3.25
67	20/03/23 - 11:18:09.727	70	1.0930	1.2413	1.0986	ON	ON	ON	-96	-1.75
68	20/03/23 - 11:18:41.198	68	1.0776	1.2428	1.0882	ON	ON	ON	-96	-1.75
69	20/03/23 - 11:19:12.712	67	1.0854	1.2360	1.0863	ON	ON	ON	-97	-3.50
70	20/03/23 - 11:19:44.186	65	1.0856	1.2389	1.0885	ON	ON	ON	-96	-2.25
71	20/03/23 - 11:20:15.653	64	1.0818	1.2358	1.0854	ON	ON	ON	-95	-3.50
72	20/03/23 - 11:20:47.151	63	1.0834	1.2375	1.0982	ON	ON	ON	-95	-3.75
73	20/03/23 - 11:21:18.641	61	1.0817	1.2338	1.0986	ON	ON	ON	-95	-2.75
74	20/03/23 - 11:21:50.119	60	1.0817	1.2397	1.1053	ON	ON	ON	-95	-3.50
75	20/03/23 - 11:22:21.614	59	1.0834	1.2389	1.1062	ON	ON	ON	-95	-3.75
76	20/03/23 - 11:22:53.093	59	1.0826	1.2367	1.1006	ON	ON	ON	-95	-2.75
77	20/03/23 - 11:23:24.562	58	1.0829	1.2321	1.0885	ON	ON	ON	-95	-3.25
78	20/03/23 - 11:23:56.040	57	1.0871	1.2292	1.0854	ON	ON	ON	-96	-1.75
79	20/03/23 - 11:24:27.520	57	1.0759	1.2315	1.0982	ON	ON	ON	-96	-1.75
80	20/03/23 - 11:24:58.999	56	1.0844	1.2330	1.0986	ON	ON	ON	-97	-3.50
81	20/03/23 - 11:25:30.513	56	1.0861	1.2263	1.1053	ON	ON	ON	-96	-2.25
82	20/03/23 - 11:26:01.995	55	1.0780	1.2331	1.1062	ON	ON	ON	-95	-3.50
83	20/03/23 - 11:26:33.480	55	1.0563	1.2133	1.1006	ON	ON	ON	-95	-3.75
84	20/03/23 - 11:27:04.962	54	1.0585	1.2157	1.0947	ON	ON	ON	-95	-2.75
85	20/03/23 - 11:27:36.440	53	1.0557	1.2076	1.0882	ON	ON	ON	-95	-3.25
86	20/03/23 - 11:28:07.918	53	1.0572	1.2059	1.0863	ON	ON	ON	-97	-3.50
87	20/03/23 - 11:28:39.404	52	1.0566	1.2012	1.0885	ON	ON	ON	-96	-2.25
88	20/03/23 - 11:29:10.896	51	1.0586	1.2025	1.0854	ON	ON	ON	-95	-3.50
89	20/03/23 - 11:29:42.359	50	1.0549	1.2018	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-3.75
90	20/03/23 - 11:30:13.866	50	1.0629	1.2060	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-2.75
91	20/03/23 - 11:30:45.347	52	1.0602	1.2360	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-3.25
92	20/03/23 - 11:31:16.822	56	1.0555	1.2389	0.0000	ON	ON	OFF	-96	-1.75
93	20/03/23 - 11:31:48.291	60	1.0599	1.2358	0.0000	ON	ON	OFF	-96	-1.75
94	20/03/23 - 11:32:19.785	62	1.0689	1.2375	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-3.25
95	20/03/23 - 11:32:51.272	65	1.0653	1.2338	0.0031	ON	ON	OFF	-97	-3.50
96	20/03/23 - 11:33:22.765	67	1.0842	1.2397	0.0000	ON	ON	OFF	-96	-2.25
97	20/03/23 - 11:33:54.234	69	1.0828	1.2389	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-3.50
98	20/03/23 - 11:34:25.725	71	1.0921	1.2367	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-3.75
99	20/03/23 - 11:34:57.215	72	1.0891	1.2321	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-2.75
100	20/03/23 - 11:35:28.688	73	1.0847	1.2292	0.0065	ON	ON	OFF	-95	-3.25
101	20/03/23 - 11:36:00.159	74	1.0860	1.2315	0.0031	ON	ON	OFF	-96	-1.75
102	20/03/23 - 11:36:31.652	74	1.0904	1.2330	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-2.75
103	20/03/23 - 11:37:03.127	73	1.0775	1.2263	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-3.75
104	20/03/23 - 11:37:34.617	73	1.0841	1.2331	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-2.75
105	20/03/23 - 11:38:06.094	71	1.0802	1.2133	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-3.25
106	20/03/23 - 11:38:37.569	69	1.0786	1.1612	0.0022	ON	ON	OFF	-97	-3.50
107	20/03/23 - 11:39:09.080	65	1.0838	1.1558	0.0022	ON	ON	OFF	-96	-2.25
108	20/03/23 - 11:39:40.554	63	1.0815	1.2684	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-3.50
109	20/03/23 - 11:40:12.027	61	1.0693	1.2565	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-3.75
110	20/03/23 - 11:40:43.528	61	1.0692	1.2512	0.0031	ON	ON	OFF	-95	-2.75
111	20/03/23 - 11:41:15.001	59	1.0719	1.2464	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-3.25
112	20/03/23 - 11:41:46.489	58	1.0723	1.2432	0.0000	ON	ON	OFF	-96	-1.75
113	20/03/23 - 11:42:17.975	57	1.0710	1.2373	0.0022	ON	ON	OFF	-96	-1.75
114	20/03/23 - 11:42:49.442	56	1.0720	1.2338	0.0031	ON	ON	OFF	-97	-3.50
115	20/03/23 - 11:43:20.940	55	1.0727	1.2356	0.0069	ON	ON	OFF	-96	-2.25
116	20/03/23 - 11:43:52.406	55	1.0754	1.2370	0.0097	ON	ON	OFF	-95	-3.50
117	20/03/23 - 11:44:23.908	57	1.0749	1.2337	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-3.75
118	20/03/23 - 11:44:55.394	59	1.0806	1.2389	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-2.75
119	20/03/23 - 11:45:26.880	59	1.0690	1.2392	0.0038	ON	ON	OFF	-95	-3.25
120	20/03/23 - 11:45:58.374	61	1.0580	1.2254	0.0065	ON	ON	OFF	-96	-1.75

Continua tabla IV (datos obtenidos en la prueba de enlace para 1.0 km)

Muestra	Fecha - Hora	Nivel (cm)	Irms1 (A)	Irms2 (A)	Irms3 (A)	EEB1	EEB2	EEB3	RSSI (dBm)	SNR (dBm)
121	20/03/23 - 11:46:29.849	61	1.0553	1.2252	0.0000	ON	ON	OFF	-97	-3.50
122	20/03/23 - 11:47:01.324	62	1.0531	1.2232	0.0022	ON	ON	OFF	-96	-2.25
123	20/03/23 - 11:47:32.808	63	1.0560	1.2222	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-3.50
124	20/03/23 - 11:48:04.287	63	1.0527	1.2201	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-3.75
125	20/03/23 - 11:48:35.787	64	1.0557	1.2204	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-2.75
126	20/03/23 - 11:49:07.259	65	1.0591	1.2196	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-3.25
127	20/03/23 - 11:49:38.747	65	1.0561	1.2216	0.0022	ON	ON	OFF	-96	-1.75
128	20/03/23 - 11:50:10.235	65	1.0574	1.2241	0.0038	ON	ON	OFF	-96	-1.75
129	20/03/23 - 11:50:41.709	66	1.0733	1.2315	0.0022	ON	ON	OFF	-97	-3.50
130	20/03/23 - 11:51:13.189	66	1.0774	1.2320	0.0022	ON	ON	OFF	-96	-2.25
131	20/03/23 - 11:51:44.681	66	1.0762	1.2279	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-3.50
132	20/03/23 - 11:52:16.148	66	1.0751	1.2239	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-3.75
133	20/03/23 - 11:52:47.657	66	1.0750	1.2277	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-2.75
134	20/03/23 - 11:53:19.116	66	1.0803	1.2215	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-3.25
135	20/03/23 - 11:53:50.603	66	1.0860	1.2289	0.0000	ON	ON	OFF	-97	-3.50
136	20/03/23 - 11:54:22.097	67	1.0810	1.2119	0.0022	ON	ON	OFF	-96	-2.25
137	20/03/23 - 11:54:53.570	67	1.0674	1.2142	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-3.50
138	20/03/23 - 11:55:25.052	67	1.0684	1.2066	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-3.75
139	20/03/23 - 11:55:56.538	67	1.0572	1.2077	0.0031	ON	ON	OFF	-95	-2.75
140	20/03/23 - 11:56:28.041	67	1.0613	1.2039	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-3.25
141	20/03/23 - 11:56:59.520	67	1.0546	1.1970	0.0000	ON	ON	OFF	-96	-1.75
142	20/03/23 - 11:57:31.007	67	1.0638	1.2045	0.0000	ON	ON	OFF	-96	-1.75
143	20/03/23 - 11:58:02.477	67	1.0586	1.2020	0.0022	ON	ON	OFF	-97	-3.50
144	20/03/23 - 11:58:33.963	67	1.0637	1.2018	0.0022	ON	ON	OFF	-96	-2.25
145	20/03/23 - 11:59:05.457	67	1.0616	1.1984	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-3.50
146	20/03/23 - 11:59:36.936	67	1.0608	1.1970	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-3.75
147	20/03/23 - 12:00:08.422	67	1.0616	1.2006	0.0031	ON	ON	OFF	-95	-2.75
148	20/03/23 - 12:00:39.892	67	1.0614	1.1973	0.0031	ON	ON	OFF	-95	-3.25
149	20/03/23 - 12:01:11.390	66	1.0643	1.1974	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-2.75
150	20/03/23 - 12:01:42.869	67	1.0601	1.1940	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-3.25
151	20/03/23 - 12:02:14.344	66	1.0619	1.1943	0.0000	ON	ON	OFF	-97	-3.50
152	20/03/23 - 12:02:45.845	67	1.0547	1.1891	0.0000	ON	ON	OFF	-96	-2.25
153	20/03/23 - 12:03:17.328	67	1.0624	1.1936	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-3.50
154	20/03/23 - 12:03:48.803	67	1.0607	1.1892	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-3.75
155	20/03/23 - 12:04:20.283	67	1.0630	1.1916	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-2.75
156	20/03/23 - 12:04:51.780	67	1.0622	1.1878	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-3.25
157	20/03/23 - 12:05:23.266	67	1.0583	1.1837	0.0000	ON	ON	OFF	-96	-1.75
158	20/03/23 - 12:05:54.736	66	1.0621	1.1845	0.0000	ON	ON	OFF	-96	-1.75
159	20/03/23 - 12:06:26.234	66	1.0623	1.1843	0.0000	ON	ON	OFF	-97	-3.50
160	20/03/23 - 12:06:57.694	66	1.0649	1.1847	0.0044	ON	ON	OFF	-96	-2.25
161	20/03/23 - 12:07:29.193	66	1.0573	1.1790	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-3.50
162	20/03/23 - 12:08:00.683	66	1.0564	1.1783	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-3.75
163	20/03/23 - 12:08:32.143	66	1.0549	1.1766	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-2.75
164	20/03/23 - 12:09:03.623	66	1.0596	1.1756	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-3.25
165	20/03/23 - 12:09:35.109	66	1.0535	1.1756	0.0000	ON	ON	OFF	-96	-1.75
166	20/03/23 - 12:10:06.608	66	1.0583	1.1741	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-4.25
167	20/03/23 - 12:10:38.072	66	1.0631	1.1770	0.0022	ON	ON	OFF	-96	-4.50
168	20/03/23 - 12:11:09.559	66	1.0529	1.1769	0.0022	ON	ON	OFF	-96	-2.75
169	20/03/23 - 12:11:41.037	67	1.0596	1.1734	0.0022	ON	ON	OFF	-96	-1.75
170	20/03/23 - 12:12:12.526	64	1.0595	1.1709	0.0000	ON	ON	OFF	-96	-1.75
171	20/03/23 - 12:12:44.031	62	1.0595	1.1699	0.0000	ON	ON	OFF	-97	-3.50
172	20/03/23 - 12:13:15.498	59	1.0666	1.1709	0.0000	ON	ON	OFF	-96	-2.25
173	20/03/23 - 12:13:46.982	58	1.0638	1.1603	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-3.50
174	20/03/23 - 12:14:18.487	56	1.0777	1.1748	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-3.75
175	20/03/23 - 12:14:49.949	55	1.0789	1.1704	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-2.75
176	20/03/23 - 12:15:21.460	53	1.0757	1.1703	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-3.25
177	20/03/23 - 12:15:52.924	52	1.0773	1.1716	0.0000	ON	ON	OFF	-96	-1.75
178	20/03/23 - 12:16:24.428	51	1.0855	1.2133	0.0000	ON	ON	OFF	-96	-1.75
179	20/03/23 - 12:16:55.882	51	1.0818	1.2157	0.0000	ON	ON	OFF	-97	-3.50
180	20/03/23 - 12:17:27.371	48	1.0905	1.2076	0.0022	ON	ON	OFF	-96	-2.25
181	20/03/23 - 12:17:58.862	45	1.0801	1.2059	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-3.50
182	20/03/23 - 12:18:30.361	44	1.0713	1.2012	0.0053	ON	ON	OFF	-95	-3.75

Continua tabla IV (datos obtenidos en la prueba de enlace para 1.0 km)

Muestra	Fecha - Hora	Nivel (cm)	Irms1 (A)	Irms2 (A)	Irms3 (A)	EEB1	EEB2	EEB3	RSSI (dBm)	SNR (dBm)
183	20/03/23 - 12:19:01.851	44	1.0816	1.2025	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-2.75
184	20/03/23 - 12:19:33.306	44	1.0822	1.2018	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-3.75
185	20/03/23 - 12:20:04.816	44	1.0768	1.2060	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-2.75
186	20/03/23 - 12:20:36.293	44	1.0840	1.2360	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-3.25
187	20/03/23 - 12:21:07.768	44	1.0843	1.2389	0.0022	ON	ON	OFF	-96	-1.75
188	20/03/23 - 12:21:39.252	44	1.0805	1.2358	0.0022	ON	ON	OFF	-96	-1.75
189	20/03/23 - 12:22:10.737	44	1.0882	1.2375	0.0000	ON	ON	OFF	-97	-3.50
190	20/03/23 - 12:22:42.215	44	1.0865	1.2338	0.0000	ON	ON	OFF	-96	-2.25
191	20/03/23 - 12:23:13.728	44	1.0894	1.2397	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-3.50
192	20/03/23 - 12:23:45.193	44	1.0839	1.2389	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-3.75
193	20/03/23 - 12:24:16.689	44	1.0775	1.2367	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-2.75
194	20/03/23 - 12:24:48.169	44	1.0803	1.2321	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-3.25
195	20/03/23 - 12:25:19.657	44	1.0766	1.2292	0.0109	ON	ON	OFF	-96	-1.75
196	20/03/23 - 12:25:51.154	44	1.0778	1.2315	0.0000	ON	ON	OFF	-97	-3.50
197	20/03/23 - 12:26:22.643	44	1.0757	1.2330	0.0000	ON	ON	OFF	-96	-2.25
198	20/03/23 - 12:26:54.123	44	1.0844	1.2025	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-3.50
199	20/03/23 - 12:27:25.610	41	1.0828	1.2018	0.0022	ON	ON	OFF	-95	-3.75
200	20/03/23 - 12:27:57.095	37	1.0817	1.2060	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-2.75
201	20/03/23 - 12:28:28.582	33	1.0865	1.2360	0.0000	ON	ON	OFF	-95	-3.25
202	20/03/23 - 12:29:00.038	29	1.0778	1.2389	0.0000	ON	ON	OFF	-96	-1.75
203	20/03/23 - 12:29:31.551	25	1.0843	0.0022	0.0000	ON	OFF	OFF	-96	-1.75
204	20/03/23 - 12:30:03.039	22	1.0869	0.0022	0.0000	ON	OFF	OFF	-97	-3.50
205	20/03/23 - 12:30:34.511	18	1.0878	0.0000	0.0000	ON	OFF	OFF	-96	-2.25
206	20/03/23 - 12:31:05.998	14	1.0891	0.0000	0.0000	OFF	OFF	OFF	-95	-3.50

Apéndice D. Programa Arduino nano módulo Controlado y Monitoreo.

Programa para Modulo Controlado

```
/*********************************************************
  ModuloControlado.ino
  ====================
  Programa de la tesis:
  "PROTOTIPO DE MONITOREO REMOTO PARA EL CONTROL DEL
SISTEMA
  DE RETORNO DE AGUA DE INFILTRACIÓN DE RELAVE DEL SUMIDERO
  EN LA UNIDAD MINERA SAN RAFAEL"
  Autores:
  Bach. Ing. Ronald Casavilca Rojas
  Bach. Ing. Roger Antonio Chávez
  Pampas, julio 2023
 *********************************************************/
//Librerias utilizadas
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <NewPing.h>
#define TRIG 14
#define ECHO 15
#define PINM1 3
#define PINM2 4
#define PINM3 5
#define SIR 6
const int csPin = 10;          //Seleccion de chip de radio Lora
const int resetPin = 9;        // Reset de radio LoRa
const int irqPin = 2;          //Cambio para tablero, debe ser un pin de interrupción.
const long frecuencia = 433E6;  //Frecuencia de LoRa
```

```
String outgoing;              //Salida de mensaje
uint32_t msgCount = 0;        //Contador de mensajes de salida
//Identificación del sistema LoRa
byte ID_RED = 0xFE;
byte DIR_CENTRAL = 0xEC;      //Dirección de dispositivo
byte DIR_NODO = 0x71;         //Destino a enviar
long lastSendTime = 0;        //tiempo de envio
uint32_t interval = 3000;     //Intervalo entre envio
//Declaracion de variables
float IRMS1,IRMS2,IRMS3;
String EEB1,EEB2,EEB3;
float NIVELV,NIVEL;
int NIVELH2O;
String EAL;
bool E1 = false;
bool E2 = false;
bool E3 = false;
bool S = false;
void setup()
{
  pinMode(PINM1,OUTPUT);
  pinMode(PINM2,OUTPUT);
  pinMode(PINM3,OUTPUT);
  pinMode(SIR,OUTPUT);
    digitalWrite(PINM1,HIGH);
  digitalWrite(PINM2,HIGH);
  digitalWrite(PINM3,HIGH);
  digitalWrite(SIR,HIGH);
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial);
  LoRa.setPins(csPin,resetPin,irqPin);    //set CS, reset, IRQ pin
```

```
  if (!LoRa.begin(frecuencia))
  {Serial.println("Inicio de LoRa fallido. Revisa sus conexiones");
   while (true);  }
  analogReference(INTERNAL);
  pinMode(TRIG,OUTPUT);     //Initializing Trigger Output and Echo Input
  pinMode(ECHO,INPUT_PULLUP);
  Serial.println("LoRa inicia exitosamente");
  delay(5000);}
void loop(){
  digitalWrite(TRIG,LOW);  //Set the trigger pin to low for 2uS
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(TRIG,HIGH); //Send a 20uS high to trigger ranging
  delayMicroseconds(20);
  digitalWrite(TRIG, LOW);  //Send pin low again
    NIVELV = pulseIn(ECHO, HIGH, 26000); //Read in times pulse
  NIVEL = (NIVELV/56.2);
  NIVELH2O = 109 - int(NIVEL);
  Serial.print("Nivel:");
  Serial.print(NIVELH2O);
  Serial.print("cm ");
//Niveles para el control del reservorio de filtración
//Nivel 1
  if (E1 == false)  {
    if (NIVELH2O >= 30)
    {
      E1 = true;
      digitalWrite(PINM1,LOW);
      delay(2000);    }
  }
    if (NIVELH2O < 18)
  {
```

```
    E1 = false;
    digitalWrite(PINM1,HIGH);  }
  //Nivel 2
    if (E2 == false)
  {
    if (NIVELH2O >= 50)
    {
      E2 = true;
      digitalWrite(PINM2,LOW);
      delay(2000);    }  }
    if (NIVELH2O < 30)
  {
    E2 = false;
    digitalWrite(PINM2,HIGH);  }
//Nivel 3
  if (E3 == false)
  {
    if (NIVELH2O >= 70)
    {
      E3 = true;
      digitalWrite(PINM3,LOW);
      delay(2000);    }  }
    if (NIVELH2O < 50)
  {
    E3 = false;
    digitalWrite(PINM3,HIGH);
  }
 //Control de alarma
  if (S == false)
  {
    if (NIVELH2O >= 70)
```

```
    {
      S = true;
      digitalWrite(SIR,LOW);
      EAL = "ON";
      delay(200);
    }
  }

  if (NIVELH2O < 68)
  {
    S = false;
    digitalWrite(SIR,HIGH);
    EAL = "OFF";
  }
//Medida de corriente de las electrobombas
  float IRMS1 = get_corriente(A5);
  Serial.print("Irms1:");
  Serial.print(IRMS1,4);
  Serial.print("A ");
  float IRMS2 = get_corriente(A6);
  Serial.print("Irms2:");
  Serial.print(IRMS2,4);
  Serial.print("A ");
     float IRMS3 = get_corriente(A7);
  Serial.print("Irms3:");
  Serial.print(IRMS3,4);
  Serial.print("A ");
//Estado de funcionamiento de electrobombas
  if (IRMS1 > 0.5)
    {
      Serial.print("EEB1:ON ");
```

```
      EEB1 = "ON";
    }
    else
  {
    Serial.print("EEB1:OFF ");
    EEB1 = "OFF";
  }
  if (IRMS2 > 0.5)
    {
      Serial.print("EEB2:ON ");
      EEB2 = "ON";
    }
    else
  {
    Serial.print("EEB2:OFF ");
    EEB2 = "OFF";  }
    if (IRMS3 > 0.5)
    {
      Serial.print("EEB3:ON ");
      EEB3 = "ON";    }
       else
  {
    Serial.print("EEB3:OFF ");
    EEB3 = "OFF";  }
  Serial.println(EAL);
//Envio de la trama de datos via LoRa
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.print(IRMS1,4);
  LoRa.print(";");
  LoRa.print(IRMS2,4);
  LoRa.print(";");
```

```
  LoRa.print(IRMS3,4);
  LoRa.print(";");
  LoRa.print(EEB1);
  LoRa.print(";");
  LoRa.print(EEB2);
  LoRa.print(";");
  LoRa.print(EEB3);
  LoRa.print(";");
  LoRa.print(NIVELH2O);
  LoRa.print(";");
  LoRa.print(EAL);
  LoRa.endPacket();
  delay(5000);}
//Función para la medida de corriente
float get_corriente(byte AN)
{
  float voltajeSensor;
  float corriente=0;
  float Sumatoria=0;
  long tiempo=millis();
  int N=0;
    while(millis() - tiempo < 500)  //Duración 0.5 segundos(Aprox. 30 ciclos de 60Hz)
  {
  voltajeSensor = analogRead(AN)*(1.1 / 1023.0); //voltaje del sensor
  corriente=voltajeSensor*30.0; //corriente=VoltajeSensor*(30A/1V)
  Sumatoria=Sumatoria + sq(corriente);  //Sumatoria de Cuadrados
  N = N+1;
  delay(1);  }
  Sumatoria=Sumatoria*2;  //Para compensar los cuadrados de los semiciclos
negativos.
  corriente = sqrt((Sumatoria)/N);  //ecuación del RMS
```

```
  return(corriente);
}
```

Programa para Módulo Monitoreo

```
//*************************************************************
  MóduloMonitoreo.ino
  ======================
  Programa de la tesis:
  "PROTOTIPO DE MONITOREO REMOTO PARA EL CONTROL DEL
SISTEMA
  DE RETORNO DE AGUA DE INFILTRACIÓN DE RELAVE DEL SUMIDERO
  EN LA UNIDAD MINERA SAN RAFAEL"

  Autores:
  Bach. Ing. Ronald Casavilca Rojas
  Bach. Ing. Roger Antonio Chávez
  Pampas, julio 2023
 //*************************************************************/
//Librerias utilizadas
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(A0,A1,A2,A3,A4,A5);  //LCD
const int csPin = 10;          //Seleccion de chip de radio Lora
const int resetPin = 9;       // Reset de radio Lora
const int irqPin = 2;         //Cambio para el tablero, debe ser un pin de interrupción de
hardware.
const long frecuencia = 433E6;  //Frecuencia de LoRa
String outgoing;               //Mensaje saliente
uint32_t msgCount = 0;  //Recuento de mensajes salientes
//Identificación del sistema LoRa
byte ID_RED = 0xFE;
byte DIR_CENTRAL = 0xEC;       //Dirección de dispositivo
byte DIR_NODO = 0x71;          //Destino a enviar
long lastSendTime = 0;         //Ultimo envio de mensaje
uint32_t interval = 3000;    //Intervalo entre envios
//Declaracion de variables
float I1,I2,I3;
String EB1,EB2,EB3;
int NIVEL;
```

```
String EAL;
int RSSI;
float SNR;
void setup()
{ pinMode(A0, OUTPUT);
  pinMode(A1, OUTPUT);
  pinMode(A2, OUTPUT);
  pinMode(A3, OUTPUT);
  pinMode(A4, OUTPUT);
  pinMode(A5, OUTPUT);

  Serial.begin(115200);
  while (!Serial);

  if (!LoRa.begin(433E6))
  {Serial.println("Error al iniciar LoRa");
   while (1);
  }
  Serial.println("LoRa Recibe datos");
   lcd.begin(20,4);
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Prototipo de bombeo");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Nivel de reservorios");
  lcd.setCursor(0,2);
  lcd.print("Corriente de motores");
  lcd.setCursor(0,3);
  lcd.print("Ronald Casavilca R.");
  delay(3000);
  lcd.setCursor(0,3);
  lcd.print("Roger Antonio Chavez");
  delay(3000);
  lcd.clear();
}
void loop()
{ // try to parse packet
  int packetSize = LoRa.parsePacket();
  if (packetSize)
  { // received a packet
```

```
    //Serial.print("Received packet: ");
    //Lee la trama de datos via LoRa
    while (LoRa.available())
    {
      Serial.print((char)LoRa.read());
    }
    //Añade datos a la trama
    Serial.print(";");
    Serial.print(LoRa.packetRssi());
    Serial.print(";");
    Serial.println(LoRa.packetSnr());
  }
//delay(100);
}
```

Apéndice E. Matriz de consistencia

TITULO: "PROTOTIPO DE MONITOREO REMOTO PARA EL CONTROL DEL SISTEMA DE RETORNO DE AGUA DE INFILTRACIÓN DE RELAVE DEL SUMIDERO EN LA UNIDAD MINERA SAN RAFAEL"

PROBLEMA	OBJETIVOS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
1.2.1 Problema general ¿Cómo implementar un prototipo de monitoreo remoto que controla al sistema de retorno de agua de infiltración de relave del sumidero en la unidad minera San Rafael? **1.2.2 Problemas específicos** a. ¿Cómo implementar un prototipo de monitoreo remoto que controla el nivel de agua de infiltración de relave del sumidero, en la unidad minera San Rafael? b. ¿Cómo implementar un prototipo de monitoreo remoto que verifica el funcionamiento de las electrobombas de drenaje de agua de infiltración de relave del sumidero en la unidad minera San Rafael? c. ¿Cómo implementar un prototipo de monitoreo remoto que active la alarma	**1.3.1 Objetivo general** Implementar un prototipo de monitoreo remoto para controlar el sistema de retorno de agua de infiltración de relave del sumidero en la unidad minera San Rafael **1.3.2. Objetivos específicos** a. Implementar un prototipo de monitoreo remoto que controla el nivel de agua de infiltración de relave del sumidero en la unidad minera San Rafael. b. Implementar un prototipo de monitoreo remoto que verifica el funcionamiento de las electrobombas de drenaje de agua de infiltración de relave del sumidero en la unidad minera San Rafael. c. Implementar un prototipo de monitoreo remoto que activa la alarma sonora y	**2.4 Operacionalización de variables** **V. independiente** Prototipo de monitoreo remoto (permite que los usuarios visualicen los datos de cualquier lugar) **V. Dependiente** Control del sistema de retorno de agua de infiltración	Cantidad de datos (Bytes). Longitud de enlace (m). Tiempo de retardo (ms). Perdida de datos (Bytes). Nivel prefijado para activación de electrobomba (m) Activación de alarma sonora y luminosa. Consumo de corriente en ON, OFF o vacío de electrobomba (A).	**3.3 Tipo de investigación** Tecnológica. **3.3 Nivel de investigación** Por los objetivos que se persigue, el nivel de investigación a la que corresponde es descriptiva. Se define el nivel descriptivo como aquel que se efectúa cuando se desea describir, en todos sus componentes principales, una realidad. Se describe el proceso de medición de nivel y control remoto inalámbrico para el sistema de retorno de agua de infiltración de relave del sumidero, utilizando la tarjeta Arduino Nano V3 con interface USB y los módulos LoRa SX1278 Ra-02, evitando el rebose del reservorio de emergencia para no contaminar el riachuelo que es afluente del rio Antauta **3.4 Método de investigación** El método específico es experimental porque es el proceso de investigación que genera las condiciones necesarias y suficientes para medir y revelar las relaciones de los fenómenos que interesan a la investigación. **3.5 Método de investigación** El método de investigación científico es un procedimiento de actuación general que se sigue en el conocimiento científico; por lo tanto, el

señalando el mal funcionamiento del sistema de retorno de agua de infiltración de relave del sumidero en la unidad minera San Rafael?	luminosa que señala el mal funcionamiento del sistema de retorno de agua de infiltración de relave del sumidero en la unidad minera San Rafael.			procedimiento científico se concreta en un conjunto de fases o etapas. **3.5 Diseño de investigación** En la investigación se utilizará el diseño cuasiexperimental. Los diseños cuasi experimentales se emplean en situaciones en las cuales es difícil el control experimental riguroso y se cuenta con un grupo; por ejemplo, en la prueba de un equipo en una planta; esta no puede parar. En la investigación se evalúa el comportamiento del prototipo de monitoreo remoto para diversas situaciones. M: X_1 O_1 X_0 O_2 X_1 O_3 X_0 O_4 **3.6 Población, muestra, muestreo** **Población:** Está constituida por las medidas del nivel de agua del sumidero y corriente consumido por las electrobombas; estas mediciones se consideran infinitas por lo que la población es infinita. **Muestra:** El tamaño de la muestra, para una población ***N*** infinita es 384. **Muestreo:** El muestreo será aleatorio simple **3.7 Técnicas e instrumentos de recolección de datos** Observación. Análisis documental. Cuasiexperimental.