Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

DISEÑO DE CONTROL REMOTO PARA OPERAR MOTOR DE RIEGO DE UN INGENIO DE LARGO ALCANCE Y BAJO CONSUMO ENERGÉTICO UTILIZANDO DISPOSITIVOS DE TECNOLOGÍA SEMTECH LORA CAPAZ DE ACCIONAR A MÁS DE UN KILÓMETRO DE ALCANCE UTILIZANDO UNA BATERÍA CONVENCIONAL DE 5 VOLTIOS

Firmado electrónicamente por: José Francisco Goméz Rivera
Motivo: Informe final TESIS
Fecha: 04/07/2024 21:06:45
Lugar: Facultad de Ingeniería, USAC.

Christian Andrés Acajabón Rivera

Asesorada por Inga. Ingrid Salomé Rodríguez de Loukota

Guatemala, junio de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE CONTROL REMOTO PARA OPERAR MOTOR DE RIEGO DE UN INGENIO DE LARGO ALCANCE Y BAJO CONSUMO ENERGÉTICO UTILIZANDO DISPOSITIVOS DE TECNOLOGÍA SEMTECH LORA CAPAZ DE ACCIONAR A MÁS DE UN KILÓMETRO DE ALCANCE UTILIZANDO UNA BATERÍA CONVENCIONAL DE 5 VOLTIOS

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CHRISTIAN ANDRÉS ACAJABÓN RIVERA
ASESORADA POR INGA. INGRID SALOMÉ RODRÍGUEZ DE LOUKOTA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, JUNIO DE 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO a.i.	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Ing. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)
EXAMINADORA	Inga. Ana María Navarro Orozco
EXAMINADORA	Inga. Matilde Lucrecia Martínez Aguirre
EXAMINADORA	Inga. Ingrid Salomé Rodríguez de Loukota
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE CONTROL REMOTO PARA OPERAR MOTOR DE RIEGO DE UN INGENIO DE LARGO ALCANCE Y BAJO CONSUMO ENERGÉTICO UTILIZANDO DISPOSITIVOS DE TECNOLOGÍA SEMTECH LORA CAPAZ DE ACCIONAR A MÁS DE UN KILÓMETRO DE ALCANCE UTILIZANDO UNA BATERÍA CONVENCIONAL DE 5 VOLTIOS

Tema que me fuera aprobado por la Dirección de la Escuela de Mecánica Eléctrica, con fecha 17 de agosto de 2020.

Christian Andrés Acajabón Rivera

Guatemala 2 de enero 2023

Ingeniero
Julio César Solares Peñate
Coordinador del Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Apreciable Ingeniero Solares,

Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titulado ¨**Diseño de control remoto para operar motor de riego de un ingenio de largo alcance y bajo consumo energético utilizando dispositivos de tecnología SEMTECH LORA capaz de accionar a más de un kilómetro de alcance utilizando una batería convencional de 5 voltios**¨, del señor **Christian Andrés Acajabón Rivera**, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

Por tanto, el autor de este trabajo de graduación y, yo, como su asesora, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones de este.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente,

MSc. Ingrid Rodríguez de Loukota
Ingeniera en Electrónica
Colegiada 5,356
Asesora

Ingrid Rodríguez de Loukota
Ingeniera en Electrónica
colegiado 5356

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 19 de enero de 2024

Señor director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC

Estimado Señor director:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado **DISEÑO DE CONTROL REMOTO PARA OPERAR MOTOR DE RIEGO DE UN INGENIO DE LARGO ALCANCE Y BAJO CONSUMO ENERGÉTICO UTILIZANDO DISPOSITIVOS DE TECNOLOGÍA SEMTECH LORA CAPAZ DE ACCIONAR A MÁS DE UN KILÓMETRO DE ALCANCE UTILIZANDO UNA BATERÍA CONVENCIONAL DE 5 VOLTIOS**, desarrollado por el estudiante **Christian Andrés Acajabón Rivera**, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica

ESCUELA DE
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

SIST.LNG.DIRECTOR.5.EIME.2024

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante Christian Andres Acajabon Rivera: DISEÑO DE CONTROL REMOTO PARA OPERAR MOTOR DE RIEGO DE UN INGENIO DE LARGO ALCANCE Y BAJO CONSUMO ENERGÉTICO UTILIZANDO DISPOSITIVOS DE TECNOLOGÍA SEMTECH LORA CAPAZ DE ACCIONAR A MÁS DE UN KILÓMETRO DE ALCANCE UTILIZANDO UNA BATERÍA CONVENCIONAL DE 5 VOLTIOS, procede a la autorización del mismo.

Ingeniero Armando Alonso Rivera Carrillo
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Guatemala, abril de 2024

Decanato
Facultad e Ingeniería

24189101- 24189102

LNG.DECANATO.OIE.277.2024

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE CONTROL REMOTO PARA OPERAR MOTOR DE RIEGO DE UN INGENIO DE LARGO ALCANCE Y BAJO CONSUMO ENERGÉTICO UTILIZANDO DISPOSITIVOS DE TECNOLOGÍA SEMTECH LORA CAPAZ DE ACCIONAR A MÁS DE UN KILÓMETRO DE ALCANCE UTILIZANDO UNA BATERÍA CONVENCIONAL DE 5 VOLTIOS**, presentado por: **Christian Andres Acajabon Rivera** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Firmado electrónicamente por: José Francisco Goméz Rivera
Motivo: Informe final TESIS
Fecha: 04/07/2024 20:43:27
Lugar: Facultad de Ingeniería, USAC.

Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANO a.i.
Facultad de Ingeniería

Guatemala, junio de 2024

Para verificar validez de documento ingrese a https://www.ingenieria.usac.edu.gt/firma-electronica/consultar-documento

Tipo de documento: Correlativo para orden de impresión Año: 2024 Correlativo: 277 CUI: 2430806620301

Escuelas: Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, - Escuela de Ciencias, Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS). Postgrado Maestría en Sistemas Mención Ingeniería Vial. Carreras: Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Ciencias y Sistemas. Licenciatura en Matemática. Licenciatura en Física. Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM). Guatemala, Ciudad

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Fuente de toda la sabiduría y conocimiento.
Mis padres	Otto Acajabón y Luz Elena Rivera, por todo el amor y esfuerzo realizado para que pueda cumplir esta meta en mi vida.
Mis hermanos	Silvia, José y Otto Acajabón, por ser un apoyo incondicional en mi vida.
Mis sobrinos	Ana Paula y Diego Muñoz, por tantos momentos de alegría y darle luz a mi vida.
Mis abuelos	Everardo y Herlinda Acajabón, Jorge y Silvia Rivera. Por tantos consejos y apoyo durante mi carrera.
Mis tíos y primos	Por siempre estar cuando los he necesitado y siempre contar con su amistad.
Amigo	Carlos Laínez (q.e.p.d.), por su amistad y ayudarme a ser una persona 5 estrellas. *Carpe Diem.*

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Porque sin Él no podría cumplir esta meta.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios y darme conciencia social.
Mis amigos	Jaime Salvador, Julio Flores, Javier Orantes, Paolo Pierri, Bayron Archila, William Alarcón, Hugo Pivaral y Daniel Alemán, por siempre estar para mí.
Ingeniera	Ingrid Rodríguez, por ser una gran profesional y amiga, y compartir sus conocimientos para realizar este trabajo de graduación.
Presbitero	Juan Carlos Dealtan, por sus consejos, acompañamiento y amistad.
Ingeniero	Belter Molina, por ayudarme en mi inicio profesional, su amistad y consejos que me permiten llegar a esta meta.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES V
LISTADO DE SIMBOLOS XI
GLOSARIO XIII
RESUMEN XV
OBJETIVOS XVII
INTRODUCCIÓN XIX

1. BREVE DOCUMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS ACTUALES DE RIEGO DENTRO DE LOS INGENIOS 1
   1.1. Listado de los principales ingenios dentro de Guatemala 1
      1.1.1. Ingenio Pantaleón 1
      1.1.2. Ingenio Palo Gordo 1
      1.1.3. Ingenio Santa Ana 1
      1.1.4. Ingenio Magdalena 2
      1.1.5. Ingenio La Unión 2
      1.1.6. Ingenio Madre Tierra 2
   1.2. Características climáticas de los principales ingenios 3
   1.3. Sistemas de riego en los principales ingenios 7
      1.3.1. Suministrador de agua 9
      1.3.2. Conductor 9
      1.3.3. Aplicación 10
         1.3.3.1. Tipo goteo 10
         1.3.3.2. Tipo microaspersión 11
         1.3.3.3. Tipo aspersión 11

2. TECNOLOGÍA LORA 15
2.1. Breve desarrollo histórico de la creación de la tecnología LoRa 15
2.2. Ventajas y desventajas de la tecnología LoRa 16
2.2.1. PAN 16
2.2.2. LAN 17
2.2.3. MAN 18
2.2.4. WAN 19
2.2.5. Transceptor SX1276 / 1278 25
2.3. Módulos LoRa y sus detalles técnicos 30
2.3.1. Módulo LoRa 32
2.3.2. Módulo LoRa GPS 41
2.4. Alcance de los principales módulos LoRa 49
2.4.1. Prueba 1 50
2.4.2. Prueba 2 52
2.4.3. Prueba 3 54
2.4.4. Prueba 4 56
2.4.5. Prueba 5 58
2.4.6. Prueba 6 60
2.4.7. Prueba 7 61

3. TECNOLOGÍA ARDUINO 65
3.1. Arduino 65
3.2. Hardware 71
3.2.1. Placa de desarrollo Arduino UNO 72
3.2.2. Comparación general de otras placas de Arduino 79
3.3. Lenguaje de programación de Arduino 84
3.3.1. Entorno de desarrollo integrado 85
3.3.2. Cargador de arranque 89

4. DISEÑO DE CONTROL REMOTO Y MÓDULO DE CONTROL PARA MOTOR 93
4.1. Componentes 93
4.1.1. Control remoto LoRa 93
4.1.2. Módulo de control de motor 95
4.2. Presupuesto 95
4.2.1. Control remoto LoRa 96
4.3. Código de programación 97
4.4. Placas y diagramas de conexión 103
4.4.1. Control remoto 103
4.4.2. Módulo de control de motor 106

5. PRUEBAS EN CAMPO ABIERTO 113
5.1. Parámetros de medición 113
5.1.1. Elevación 113
5.1.2. Indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI, por las siglas en inglés) 114
5.1.3. Relación señal/ruido (SNR, por las siglas en inglés) 114
5.2. Pruebas de comunicación del control remoto y el módulo de control del motor en un entorno cerrado 114
5.3. Pruebas de alcance en campo abierto con vegetación de por medio 121
5.4. Pruebas de alcance en un entorno residencial 128
5.5. Simulación de enlaces en los principales ingenios de Guatemala 135
5.5.1. Ingenio Pantaleón 136
5.5.2. Ingenio Palo Gordo 141
5.5.3. Ingenio Santa Ana 146

5.5.4. Ingenio Magdalena 150
5.5.5. Ingenio La Unión 155
5.5.6. Ingenio Madre Tierra 159

CONCLUSIONES..... 165
RECOMENDACIONES 167
REFERENCIAS..... 169

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1. Ubicación de principales ingenios en Guatemala 5
Figura 2. Diagrama de un pozo de agua 8
Figura 3. Diagrama básico de funcionamiento de aspersión por áreas 13
Figura 4. Diagrama PAN 16
Figura 5. Diagrama LAN 17
Figura 6. Diagrama MAN 18
Figura 7. Diagrama WAN 19
Figura 8. Comparación de ancho de banda entre tecnologías 21
Figura 9. Comparación de tecnologías inalámbricas de comunicación 22
Figura 10. Regiones para banda ISM según ITU 23
Figura 11. Diagrama de transceptores SX1276 / 1278 26
Figura 12. Diagrama de Pines SX1276 27
Figura 13. Diagrama de Pines SX1278 28
Figura 14. Esquema básico de módulo Arduino 31
Figura 15. Módulo LoRa versión 1.0 33
Figura 16. Esquemático módulo LoRa Dragino v 1.0 34
Figura 17. Esquemático módulo LoRa Dragino v 1.2 35
Figura 18. Esquemático módulo LoRa versión 1.2 36
Figura 19. Esquemático módulo LoRa versión 1.3 37
Figura 20. Módulo LoRa versión 1.4 38
Figura 21. Esquema de conexión módulo LoRa v 1.4 39
Figura 22. Mapa de pines módulo LoRa v 1.4 40
Figura 23. Módulo LoRa GPS v 1.0 42

Figura 24. Módulo LoRa GPS v 1.3 44
Figura 25. Mapa de pines módulo LoRa GPS v 1.3 46
Figura 26. Módulo LoRa GPS montado sobre Arduino Uno 48
Figura 27. Medición de terreno de prueba 1 51
Figura 28. Medición de terreno de prueba 2 53
Figura 29. Medición de terreno de prueba 3 55
Figura 30. Medición de terreno de prueba 4 57
Figura 31. Medición de terreno de prueba 5 59
Figura 32. Medición de terreno de prueba 6 60
Figura 33. Medición de terreno de prueba 7 62
Figura 34. BASIC Stamp 66
Figura 35. Diagrama BASIC Stamp 67
Figura 36. Placa de desarrollo Wiring 68
Figura 37. Conexión básica de Arduino 72
Figura 38. Diagrama de componentes Arduino UNO 73
Figura 39. Mapa de pines Arduino UNO 74
Figura 40. Relación ATMega16u2 y ATMega328P Arduino UNO 75
Figura 41. Esquemático Arduino UNO 76
Figura 42. Diagrama de bloques ATMega328P 77
Figura 43. Diagrama de bloques arquitectura ATMega328P 78
Figura 44. Distribución memoria RAM de ATMega328P 79
Figura 45. Arduino Mega 2560 81
Figura 46. Arduino UNO 82
Figura 47. Arduino Nano 83
Figura 48. Arduino Cero 84
Figura 49. IDE Arduino 86
Figura 50. Partes de IDE Arduino 87
Figura 51. Diagrama de activación de bootloader 91
Figura 52. Esquema general de código de programación 98

Figura 53. Diagrama de conexión del control remoto 103
Figura 54. Esquemático de placa 1 del control remoto.....105
Figura 55. PCB de placa del control remoto.....106
Figura 56. Diagrama de conexión del módulo de control del motor.....107
Figura 57. Esquemático de placa 1 del módulo de control del motor 109
Figura 58. PCB de placa 1 del módulo del control del motor.....110
Figura 59. Esquemático de placa 2 del módulo de control del motor 111
Figura 60. PCB de placa 2 del módulo del control del motor.....112
Figura 61. Módulo de control de motor en prueba de entorno cerrado.....115
Figura 62. Ubicación módulo de motor en prueba de entorno cerrado.....116
Figura 63. Control remoto en prueba de entorno cerrado 117
Figura 64. Ubicación del control remoto en prueba de entorno cerrado 118
Figura 65. Ubicación de los módulos de prueba de entorno cerrado.....120
Figura 66. Simulación de geografía en prueba de campo abierto 121
Figura 67. Simulación en enlace de prueba de campo abierto.....122
Figura 68. Ubicación de módulos en pruebas de campo abierto.....123
Figura 69. Módulo de control de motor en prueba de campo abierto 124
Figura 70. Ubicación módulo de motor en prueba de campo abierto 125
Figura 71. Control remoto en prueba de campo abierto 126
Figura 72. Simulación de geografía en prueba de entorno residencial.....128
Figura 73. Simulación de enlace en prueba de entorno residencial 129
Figura 74. Ubicación de módulos en pruebas de entorno residencial 130
Figura 75. Módulo de control de motor en prueba de entorno residencial...131
Figura 76. Ubicación módulo de motor en prueba de entorno residencial...132
Figura 77. Control remoto en prueba de entorno residencial.....133
Figura 78. Simulación de cobertura desde ingenio Pantaleón.....136
Figura 79. Estudio de enlace entre nodo 1 y central Pantaleón 137
Figura 80. Ubicación nodo 1 y central Pantaleón 138
Figura 81. Estudio de enlace entre nodo 2 y central Pantaleón 139

Figura 82. Ubicación nodo 2 y central Pantaleón 140
Figura 83. Simulación de cobertura desde Ingenio Palo Gordo 141
Figura 84. Estudio de enlace entre nodo 1 y central Palo Gordo 142
Figura 85. Ubicación nodo 1 y central Palo gordo 143
Figura 86. Estudio de enlace entre nodo 2 y central Palo Gordo 144
Figura 87. Ubicación nodo 2 y central Palo Gordo..... 145
Figura 88. Simulación de cobertura desde Ingenio Santa Ana 146
Figura 89. Estudio de enlace entre nodo 1 y central Santa Ana 147
Figura 90. Ubicación nodo 1 y central Santa Ana 148
Figura 91. Estudio de enlace entre nodo 2 y central Santa Ana 149
Figura 92. Ubicación nodo 2 y central Santa Ana 150
Figura 93. Simulación de cobertura desde Ingenio Magdalena 151
Figura 94. Estudio de enlace entre nodo 1 y central Magdalena 152
Figura 95. Ubicación nodo 1 y central Magdalena 153
Figura 96. Estudio de enlace entre nodo 2 y central Magdalena 154
Figura 97. Ubicación nodo 2 y central Magdalena 154
Figura 98. Simulación de cobertura desde Ingenio La Unión..... 156
Figura 99. Estudio de enlace entre nodo 1 y central La Unión..... 157
Figura 100. Ubicación nodo 1 y central La Unión 157
Figura 101. Estudio de enlace entre nodo 2 y central La Unión..... 158
Figura 102. Ubicación nodo 2 y central La Unión 159
Figura 103. Simulación de cobertura desde Ingenio Madre Tierra..... 160
Figura 104. Estudio de enlace entre nodo 1 y central Madre Tierra..... 161
Figura 105. Ubicación nodo 1 y central Madre Tierra 161
Figura 106. Estudio de enlace entre nodo 2 y central Madre Tierra..... 162
Figura 107. Ubicación nodo 2 y central Madre Tierra 163

TABLAS

Tabla 1. Resumen meteorológico de Guatemala en 2018 6
Tabla 2. Comparación entre LoRaWAN y NB IoT 24
Tabla 3. Rango de frecuencias y factor de alcance Semtech..... 29
Tabla 4. Ancho de banda, tasa de bits y sensibilidad Semtech..... 29
Tabla 5. Prueba de control de módulo LoRa..... 49
Tabla 6. Mediciones de prueba 1 52
Tabla 7. Mediciones de prueba 2..... 54
Tabla 8. Mediciones de prueba 3..... 56
Tabla 9. Mediciones de prueba 4..... 58
Tabla 10. Mediciones de prueba 5..... 59
Tabla 11. Mediciones de prueba 6..... 61
Tabla 12. Mediciones de prueba 7..... 63
Tabla 13. Comparación placas de desarrollo Arduino..... 80
Tabla 14. Presupuesto control remoto LoRa..... 96
Tabla 15. Presupuesto módulo de control remoto LoRa 97
Tabla 16. Escala RSSI.....114
Tabla 17. Resultados de prueba en entorno cerrado 119
Tabla 18. Resultados de prueba de campo abierto.....127
Tabla 19. Resultados de prueba de entorno residencial 134
Tabla 20. Parámetros de ingreso para simulación 135

LISTADO DE SIMBOLOS

Símbolo	Significado
bps	bits por segundo
ºC	Grados centígrados
g	Gramo
Hz	Hertz
H	Horas
kbps	Kilo bits por segundo
KB	Kilo Bytes
KΩ	Kilo Ohmio
MHz	Mega Hertz
m	Metro
mA	Miliamperio
mm	Milímetros
ms	Milisegundos
nA	Nano amperio
%	Porcentaje
dBm	Potencia de decibelios relativos a un milivoltio
t	Toneladas
v	voltio

GLOSARIO

Bit	Unidad básica de información digital.
Byte	8 bits.
CSS	Chirp Spread Spectrum (Espectro ensanchado de Chirp) – tecnología de modulación utilizada por LoRa para modular su comunicación.
GPS	Global Positioning System (Sistema de posicionamiento global).
Hardware	Componentes físicos de un circuito electrónico.
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
LAN	Local Area Network (Red de área local).
LED	Light emitting diode (diodo emisor de luz).
LoRa	Long Range (Largo alcance) – tecnología patentada por empresa Semtech, cuya principal característica es el largo alcance y baja potencia.

LPWAN	Low-Power Wide Area Network (Red de área amplia y baja potencia).
MAN	Metropolitan Area Network (Red de área metropolitana).
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar.
PAN	Personal Area Network (Red de área personal) – clasificación de red.
PCB	Placa de circuito impreso por sus siglas en ingles.
RSSI	Received Signal Strength Indicator (Indicador de fuerza de la señal recibida).
Software	Conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en una computadora.
WAN	Wide Area Network (Red de área amplia).
Zafra	Periodo de cosecha de la caña de azúcar realizado durante la época sin lluvia, puede durar de 4 a 6 meses.

RESUMEN

En la actualidad dentro de los principales ingenios de Guatemala se maneja un sistema de riego de control manual; el sistema se compone de motores que suministran el agua, tubería y aspersores en su extremo cuya presión necesaria para su funcionamiento adecuado viene proporcionado por el fabricante.

Al tener un sistema manual se requiere que los operadores coloquen la tubería dentro de la plantación seleccionada para riego, un operador encienda el motor y lo lleve a las revoluciones por minuto necesarias para suministrar la presión requerida por los aspersores. Al ser un sistema manual, el operador no tiene conocimiento de la presión en el extremo del aspersor; esto genera un gran costo para los ingenios en tiempo de operación y en la calidad del riego al utilizar presiones arbitrarias.

Para solucionar este problema se utilizó la tecnología LoRa para diseñar un sistema de comunicación con el cual el operador pueda encender, desde el extremo final de la tubería, el motor y pueda subir o bajar la presión dependiendo de un sensor colocado en el aspersor. De esta forma el operario tendrá la certeza de la presión con que el sistema opera y se ahorrará tiempo que se traduce en eficiencia para los ingenios

OBJETIVOS

General

Diseñar un sistema de comunicación de largo alcance entre el aspersor y el motor, caracterizado por su facilidad de uso y configuración. El diseño estará orientado a garantizar una transmisión confiable de datos a larga distancia, al tiempo que se simplifica la interfaz de usuario para una operación intuitiva y accesible.

Específicos

1. Desarrollar un dispositivo de control remoto portátil que emplee tecnología LoRa para la transmisión de datos, destinado a gestionar funciones específicas de un sistema de riego. Este dispositivo estará equipado con botones dedicados para enviar comandos. Además, integrará una pantalla para visualizar en tiempo real los niveles de presión en el aspersor.

2. Esquematizar un receptor para la comunicación que esté instalado junto al motor, que sea capaz de controlar el acelerador del motor, su encendido y apagado. Diseñar un receptor de comunicaciones LoRa destinado a ser instalado en proximidad al motor, con la capacidad de regular la aceleración, así como encender y apagar dicho motor.

3. Demostrar la factibilidad de establecer una comunicación efectiva entre el módulo de control remoto y el módulo de control del motor a través de una combinación de simulaciones y pruebas prácticas. Este proceso implicará la demostración tanto en entornos simulados como en situaciones reales.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación consta de cinco capítulos, en ellos se describe el desarrollo de las actividades realizadas.

En el capítulo uno se hace una descripción breve de los principales ingenios de Guatemala con sus estadísticas climáticas, así como la descripción de los elementos básicos que componen un sistema de riego.

El capítulo dos presenta la tecnología LoRa, con su desarrollo histórico, sus ventajas sobre otras tecnologías, los módulos disponibles de la marca Dragino y pruebas básicas de conexión para establecer un marco de referencia de su operación y alcance.

El capítulo tres muestra la historia del desarrollo de la placa de desarrollo Arduino, su hardware, incluyendo comparativas técnicas de sus diferentes versiones, su lenguaje de programación incluyendo las partes del entorno de desarrollo integrado (IDE).

En el capítulo cuatro se dan a conocer los diseños del control remoto y el módulo de control del motor, incluyendo el listado de componentes, presupuesto aproximado, esquema de código de programación, librerías necesarias para la programación y las placas de cobre y diagramas de conexión.

En el capítulo cinco se indican las pruebas de enlace entre el control remoto y el módulo de control del motor. Se establecen los parámetros de medición que permiten establecer o no la conexión, pruebas en un entorno

cerrado, en campo abierto con vegetación de por medio, en un entorno residencial y simulaciones de enlace en los principales ingenios de Guatemala.

Para finalizar se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas de la investigación, así como las referencias consultadas.

1. BREVE DOCUMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS ACTUALES DE RIEGO DENTRO DE LOS INGENIOS

1.1. Listado de los principales ingenios dentro de Guatemala

Se presenta a continuación información general de los principales ingenios dentro de Guatemala.

1.1.1. Ingenio Pantaleón

Este ingenio se encuentra en la zona sur de Guatemala, específicamente en el departamento de Escuintla. Fundado el 8 de agosto de 1849. Actualmente con una capacidad de molienda de 29,000 t diarias (Ingenio Pantaleón, 2016).

1.1.2. Ingenio Palo Gordo

El ingenio se encuentra ubicado en el departamento de Suchitepéquez. Fue fundado en 1929. Este ingenio tuvo su mayor capacidad de molienda en 2008-2009 donde procesaron 925,000 t de caña de azúcar durante la zafra (Ingenio Palo Gordo, 2012).

1.1.3. Ingenio Santa Ana

Fundado en 1968 en el departamento de Escuintla, un año después realizaron su primera zafra cuando tenían una capacidad de molienda de 3,500 t diaria. Actualmente tienen 24,000 hectáreas entre terrenos propios y arrendados.

El Ingenio Santa Ana aporta el 14.1 % del total producido en Guatemala (Ingenio Santa Ana, 2019).

1.1.4. Ingenio Magdalena

En 1983 se funda el ingenio cuyo principal modelo de negocio era la producción de mil para ron, sin embargo, en 1976 cambia su modelo de trabajo para producir azúcar; para finales de la década de 1980 tenían una capacidad de molienda de 5,500 t. Actualmente tienen una capacidad de molienda diaria de 38,640 t (Ingenio Magdalena, 2017).

1.1.5. Ingenio La Unión

Inició sus operaciones en 1969, ubicado en el departamento de Escuintla. Tiene una capacidad de molienda de 19,250 t diaria, llegando a procesar más de 3,000,000 t por zafra (Ingenio La Unión, 2019).

1.1.6. Ingenio Madre Tierra

Inicia en 1966 con una producción de 344,000 t de azúcar al año. A medida que pasa el tiempo aumentan su capacidad de producción y actualmente producen más de 4,000,000 t por zafra. Ubicado en el departamento de Escuintla con más de 14,000 hectáreas de tierra para el cultivo de caña de azúcar (Fundación Madre Tierra, 2018).

1.2. Características climáticas de los principales ingenios

Según Redacción Infoagro (2020):

La caña de azúcar necesita características climáticas específicas.

Temperatura: la caña de azúcar no soporta temperaturas inferiores a 0ºC. Para crecer exige un mínimo de temperatura de 14 a 16ºC y la temperatura óptima de germinación oscila entre 32-38ºC.

Radiación solar: es una planta que necesita y asimila la radiación solar llegando a conseguir una transformación de hasta el 2% de la energía incidente en biomasa. Por tanto, durante todo el ciclo este cultivo requiere de una buena iluminación si se pretenden conseguir óptimos resultados. Dicho de otra forma: A mayor radiación solar, mayor será la eficiencia de la fotosíntesis y en consecuencia mayor será también la producción y la acumulación de azúcares.

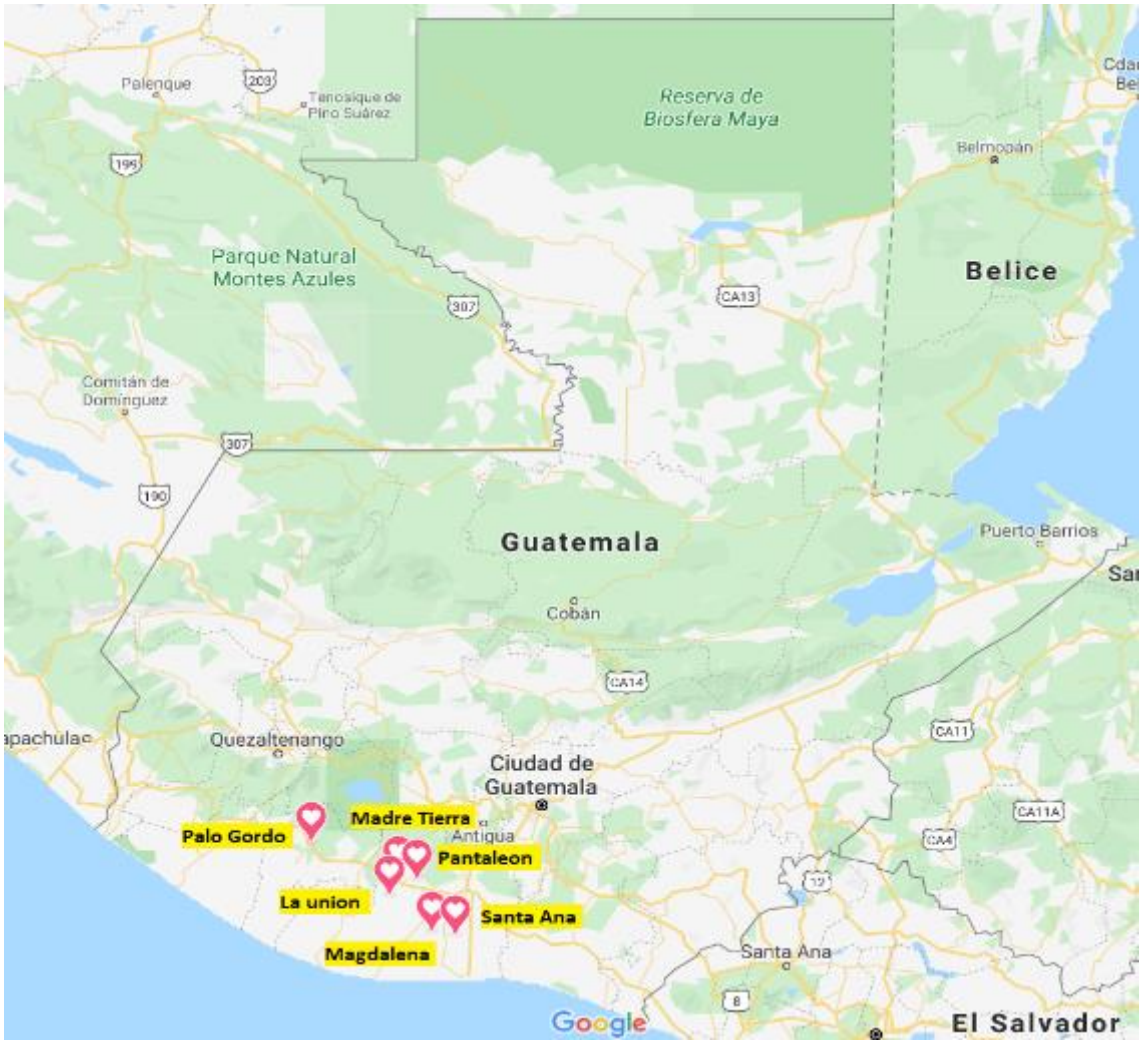
Riegos: los requerimientos hídricos son de 1200-1500mm anuales prefiriéndose un reparto adecuado de los aportes hídricos a lo largo de todo el período vegetativo. Por otro lado, para estimular la producción y acumulación de carbohidratos, se recomienda disminuir el aporte hídrico un mes antes de la cosecha.

Estas características necesarias para el cultivo de caña de azúcar se pueden encontrar en los departamentos ubicados en el sur de Guatemala. Según datos del INSIVUMEH, el departamento de Escuintla en el 2018 tuvo una precipitación de lluvia de 1496 a 2255 mm, en 108 días de lluvia. Su temperatura promedio a largo del año fue de 26.5ºC con mínima de 17.5 ºC y máxima de 33ºC. Con humedad relativa promedio de 75.5% y 7.8h de insolación diaria promedio.

Por otro lado, Suchitepéquez tuvo una precipitación de lluvia promedio de 4200 mm distribuidos en 197 días. Tuvo una temperatura promedio de 26.3ºC durante el año 2018, con una máxima de 33.7ºC y una mínima de 19.3 ºC. La humedad relativa promedio durante ese mismo transcurso de tiempo fue de 83.0% y no se cuenta con las horas al día promedio de insolación. (p. 24)

Figura 1.

Ubicación de principales ingenios en Guatemala



Nota. Descripción de la ubicación de los principales ingenios en Guatemala. Google Maps. (2023). *Ingenios en Guatemala*. (https://www.google.com/maps/search/ingenios/@14.4718103,-91.5134761,8.96z?entry=ttu), consultado el 13 de agosto de 2020. De dominio público.

En la Tabla 1, se presenta un cuadro comparativo entre los valores óptimos para la producción de caña de azúcar y los datos climáticos de cada departamento de Guatemala.

Tabla 1.

Resumen meteorológico de Guatemala en 2018

	Precipitación [mm]	Temperatura máxima [°C]	Temperatura mínima [°C]	Insolación [h/día]
Ideal	1200-1500	<38	>15	>6
Alta Verapaz	1773.2	29.9	8.6	6.0
Baja Verapaz	712.9	29.7	15.6	S/D
Chimaltenango	703.3	26.5	7.9	6.8
Chiquimula	1367.5	31.8	15.4	6.0
El Progreso	1418.3	27.9	14.4	S/D
Escuintla	1496.4	34.9	19.2	7.8
Guatemala	1012.1	28.6	13.6	7.0
Huehuetenango	752.9	29.5	6.3	7.5
Izabal	3316.4	34.0	19.9	S/D
Jalapa	843	29.4	17.1	S/D
Jutiapa	1446	34.3	21.5	7.2
Peten	1383.7	32.8	20.4	S/D
Quetzaltenango	747.7	25.6	1.5	5.7
Quiche	1819.9	22.6	10.2	S/D
Retalhuleu	3421.6	35.3	20.4	7.5
Sacatepéquez	1046.2	24.9	4.9	S/D
San Marcos	1130.2	21.7	4.9	5.5
Santa Rosa	1654.3	33.8	16.0	S/D
Sololá	695.9	25.7	13.6	6.9
Suchitepéquez	4200.9	33.7	19.3	S/D
Totonicapán	S/D	S/D	S/D	S/D
Zacapa	409.6	34.5	22.2	S/D

Nota. Descripción de las condiciones meteorológicas por departamento en 2018. Obtenido del Instituto Nacional de Estadística de Guatemala (2019). *Estadísticas ambientales- Instituto Nacional de Estadística*. (https://www.ine.gob.gt/bases-de-datos/estadisticas-ambientales/), consultado el 13 de agosto de 2020. De dominio público.

Existen varios departamentos que cumplen con algunas características sin embargo no las cumplen todas, algunas regiones del país tienen temperaturas apropiadas para el cultivo de la caña de azúcar, pero tienen alta precipitación de lluvia al año.

Los departamentos que mejor se adaptan a las necesidades del cultivo son las del sur del país, los principales productores de azúcar se encuentran en Escuintla. Los días de lluvia en este departamento fueron de 108 en el 2018, lo cual hace necesario que los ingenios tengan que implementar sistemas de riego para los cultivos.

1.3. Sistemas de riego en los principales ingenios

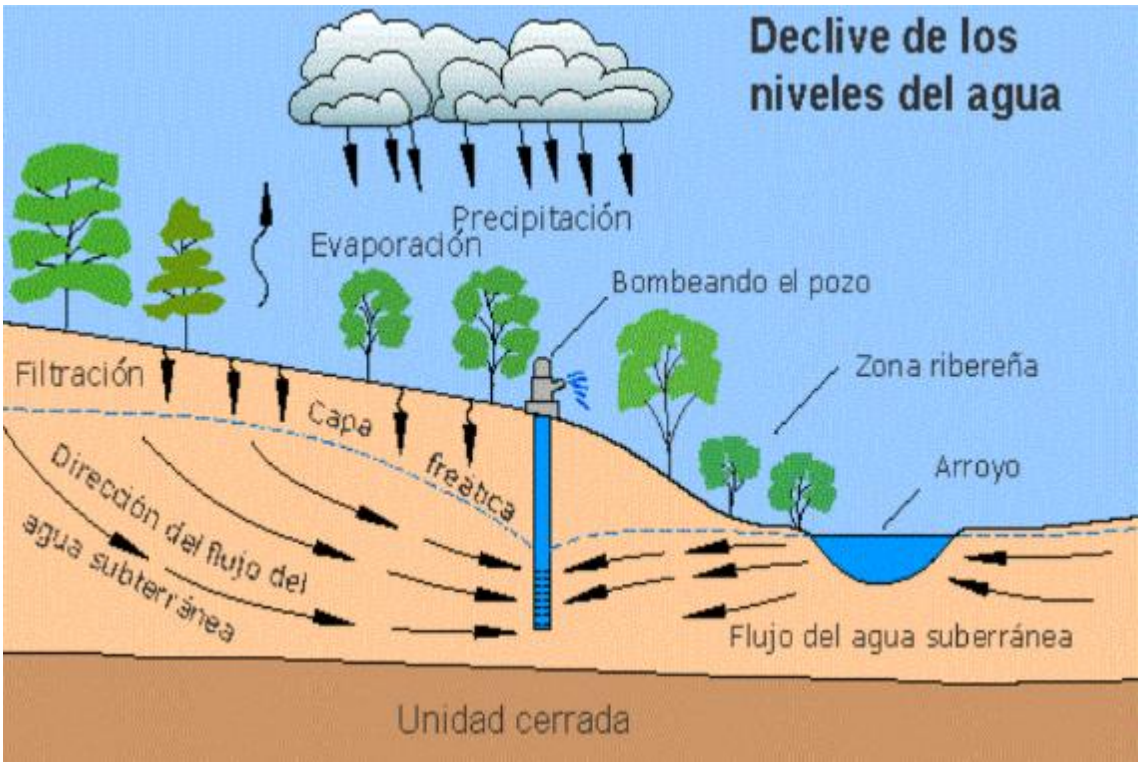
Aunque los departamentos del sur de Guatemala cumplen con este clima o están dentro de los rangos aceptados, se sabe que cada año cambian las situaciones climáticas, al igual que cada estación tiene sus propias características.

Teniendo temporadas (que pueden ser varios meses), en los cuales en estos departamentos no hay presencia de lluvia, o si la hay es en cantidades muy pequeñas a lo que necesita la caña; por lo que desde sus inicios se ha optado por utilizar un sistema diseñado por el hombre para suplir esa falta de agua.

Para suplir el agua necesaria se puede utilizar fuentes de agua cercana como ríos, estanques, lagunas, entre otros; así como la perforación de pozos para su sustracción. En la mayoría de los casos se utilizan tanques de agua para almacenarla hasta que esta sea requerida.

Figura 2.

Diagrama de un pozo de agua



Nota. Descripción de un pozo de agua. Obtenido de G. Carita (2016). *¿Qué origina que los niveles de agua en los pozos suban y bajen?* (https://gidahatari.com/ih-es/que-origina-que-los-niveles-de-agua-en-los-pozos-suban-y-bajen), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

Este principio de extraer agua de fuentes cercanas y almacenarlas para su posterior utilización para fines productivos viene desde el inicio de la agricultura. Aunque ha habido avances en la tecnología y desarrollos en la humanidad, este se mantiene.

Luego de extraer el agua y almacenarla, se incluye un sistema de riego. El sistema de riego muchas veces está condicionado por el tipo de cultivo, la capacidad de obtención de agua y la topografía del terreno.

1.3.1. Suministrador de agua

Es la parte del sistema que se encarga de aportar el agua al sistema para su funcionamiento. Dadas las características mencionadas anteriormente este elemento puede ser por:

- Gravedad (colocando el depósito en una posición alta del terreno, utilizando únicamente una válvula de apertura para el paso del agua y dejando que sea la gravedad quien le suministre al sistema el agua en la presión correcta para su funcionamiento).

- Motor de combustión (utilizando un depósito a una altura relativamente baja y suministrando el agua a la presión correcta mediante un motor de combustión regularmente Diesel).

- Mediante una bomba eléctrica (las características del depósito son las mismas del motor de combustión, pero en este caso se utiliza una bomba eléctrica para suministrar el agua al sistema).

1.3.2. Conductor

Es el elemento que se encarga de transportar el agua desde el tanque o depósito hasta el punto final donde es requerido. El material de esta tubería depende de la presión a la cual funcionará el sistema, entre los más comunes o utilizados se encuentran:

- Policloruro de Vinil (PVC)
- Policloruro de Vinil Colorado (CPVC)
- Acero inoxidable
- Galvanizadas
- Cobre

Pudiendo incluso tener una mezcla de los tipos de tubería: una parte con una tubería de material A, y otra parte final de material B. siendo A y B cualquier material anteriormente mencionado, según diseño y necesidades del sistema.

1.3.3. Aplicación

Son los elementos que encargan de aplicar el agua a los cultivos, son los elementos de punto final en el sistema.

1.3.3.1. Tipo goteo

- También se conoce como riego gota a gota, es un sistema que busca optimizar la cantidad de agua debido a que la aplica en un punto específico del suelo alrededor del cultivo a una velocidad controlada.

- La forma más común utilizada en Guatemala para este sistema es mediante manguera de goteo, la cual tiene aperturas pequeñas a cierta distancia que permite que el agua salsa de forma gradual en forma de gotas. Lo cual genera un área circular de humedad alrededor de la apertura.

- Una ventaja de este sistema es que no requiere alta presión en el sistema. A pesar de sus ventajas tiene la característica de ser más costoso que los sistemas que se describen a continuación.

1.3.3.2. Tipo microaspersión

- Aplica el agua en los cultivos en forma de lluvia controlada o localizada. Utiliza un micro aspersor y se utiliza principalmente en árboles frutales debido a que aplica el agua en su base, por lo cual se optimiza su uso al no desperdiciar en áreas sin plantas productivas.

  - Requieren una presión baja-media y tienen un costo mayor al sistema de goteo.

1.3.3.3. Tipo aspersión

- Utiliza el mismo principio que el riego de microaspersión, pero con una cantidad mayor de agua aplicada sobre el suelo.

  - Entre las ventajas de este sistema es que pueden llegar a cubrir un área grande. Suelen ser sistemas móviles cuando no están siendo utilizados.

- Los aspersores utilizados en este sistema tienen una presión de operación dada por el fabricante, el cual debe de ser verificado constantemente para que el sistema funcione.

- La forma de obtención de agua, el suministrador y el conductor pueden variar según las disposiciones de cada ingenio, luego de evaluar sus

costos, ventajas y desventajas. Sin embargo, el sistema de aplicación que más se utiliza en esta industria es el de aspersión.

- El sistema de goteo es poco viable debido a que el método de goteo tiene que ser superficial lo cual deja las mangueras semi expuestas y estas pueden ser fácilmente dañadas cuando se pasa maquinaria en los cultivos para su cuidado o mantenimiento, también cuando se hace trabajo de limpieza de plantas no deseadas.

- Otro factor importante es que antes de que llegue a la cosecha estas mangueras deberían de ser recogidas y dada la densidad del cultivo esto sería complicado, dañando aún más el sistema e incrementando el gasto.

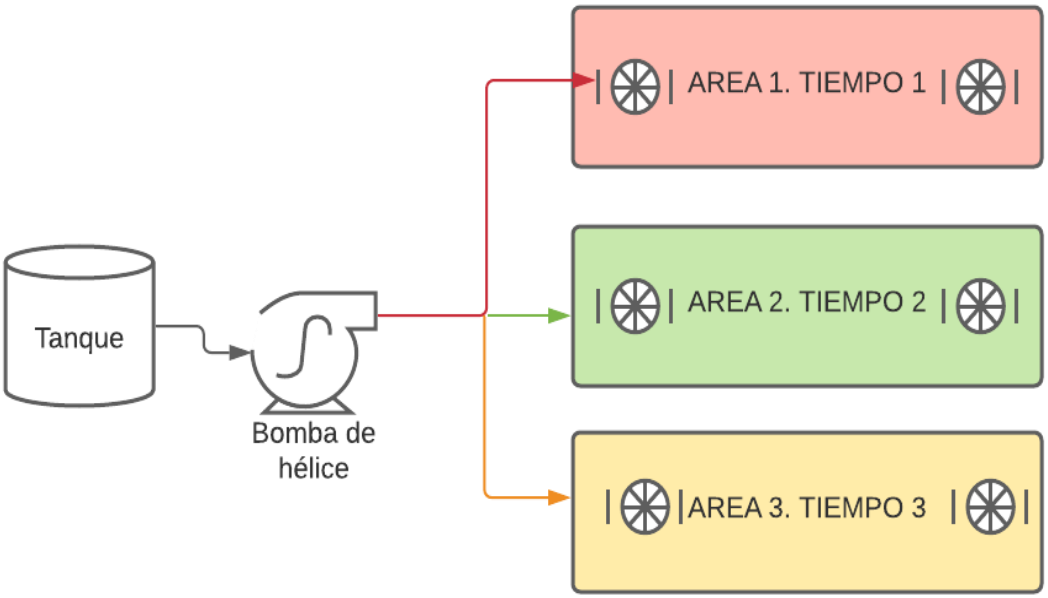
- El sistema de microaspersión no puede ser utilizado ya que este tiene un alcance bajo, y dada la densidad de cultivo, su funcionamiento sería deficiente, causando charcos, los cuales son contradictorios al cultivo (sección 1.2).

- Utilizar el sistema de aspersión de forma fija, haría un costo muy elevado e innecesario dado que la planta no necesita lluvia (o aspersión) todo el tiempo, sino solo que el suelo mantenga una humedad óptima.

    - Los ingenios han optado por tener “cuadrillas” de riego que se encargan de armar y desarmar la tubería que lleva el riego cada cierto tiempo, corriendo los aspersores por área. Esto reduce el costo en cuanto a tubería y aspersores.

Figura 3.

Diagrama básico de funcionamiento de aspersión por áreas



Nota. Descripción del diagrama básico de funcionamiento de aspersión por áreas. Elaboración propia, realizado con Lucid Chart.

2. TECNOLOGÍA LORA

2.1. Breve desarrollo histórico de la creación de la tecnología LoRa

El 30 y 31 de enero de 2020 se realizó The Things Conference (La Conferencia de las Cosas) en Ámsterdam, Holanda. En ella, Nicolas Sornin, Oliver Seller y François Sforza, quienes fueron los desarrolladores de la tecnología LoRa, compartieron la historia de esta tecnología.

En 2009 Oliver y Nicolas se unieron para desarrollar una tecnología de modulación que fuera de largo alcance y baja potencia. En 2010 conocen a François y juntos fundan la compañía Cycleo.

Aunque Cycleo no la creó, utilizó la tecnología Chirp Spread Spectrum (CSS) para modular su comunicación y enviar datos. CSS es una tecnología que se utiliza principalmente en industria de radares de aviación e industria marítima; emulando la manera que utilizan animales como el murciélago y el delfín para identificar sus presas u objetos.

El principal objetivo de Cycleo era desarrollar soluciones para la comunicación de sensores de agua, gas y electricidad. En 2012 la compañía Semtech adquirió a Cycleo, patentando la tecnología LoRa, desarrollando los chips para dispositivos finales y creando el protocolo llamado *LoRaMAC* (Slats, 2020).

En marzo de 2015 se fundó LoRa Alliance (Alianza LoRa) y el protocolo *LoRaMAC* pasó a llamarse *LoRaWan*. LoRa Alliance ya cuenta con más de 500

miembros, entre otras cosas ellos se dedican a la estandarización y certificación de los dispositivos finales de LoRa. Este modelo de estandarización busca que los diferentes dispositivos puedan implementarse o cambiar de red sin importar la infraestructura de red.

2.2. Ventajas y desventajas de la tecnología LoRa

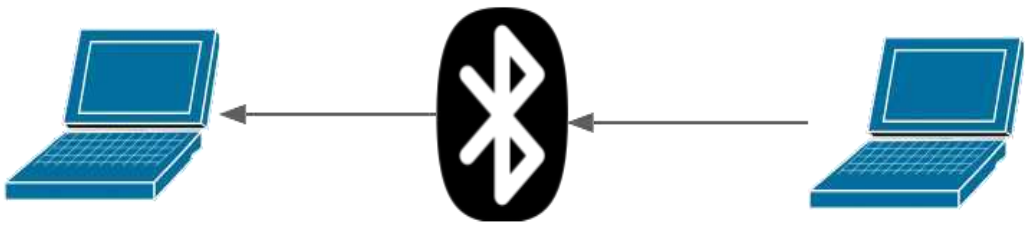
Un conjunto de dispositivos conectados entre sí recibe el nombre de una red. Las redes informáticas se pueden clasificar de varias formas, si se refiere según su alcance se pueden encontrar las siguientes:

2.2.1. PAN

Se trata de una red de área personal donde cada dispositivo está conectado a un punto de acceso. Es la forma de una red más básica y también de menor alcance.

Figura 4.

Diagrama PAN



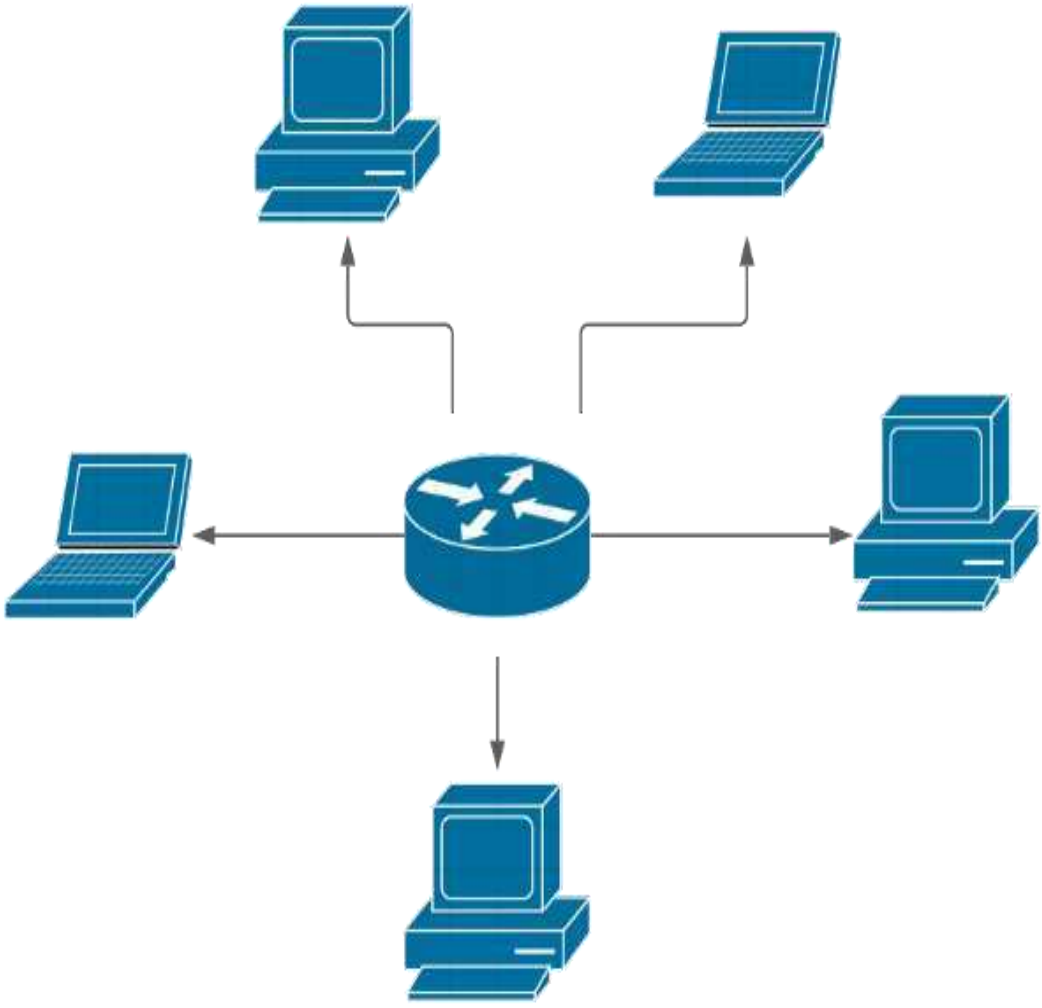
Nota. Descripción del diagrama PAN. Elaboración propia, realizado con Lucid Chart.

2.2.2. LAN

Se trata de una red donde diferentes dispositivos están interconectados entre sí, pero limitados físicamente a un área pequeña.

Figura 5.

Diagrama LAN



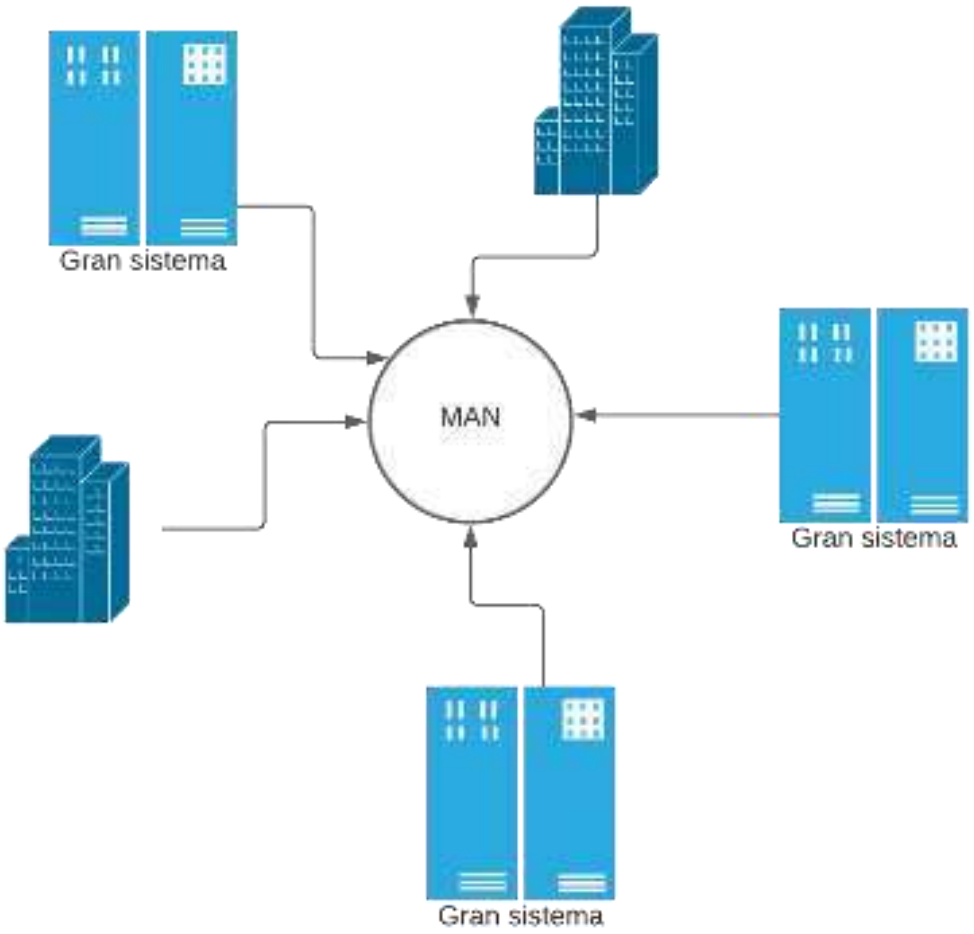
Nota. Descripción del diagrama LAN. Elaboración propia, realizado con Lucid Chart.

2.2.3. MAN

Es una red que amplía el concepto de la LAN, pero con un alcance mayor que puede ser de una región o un área metropolitana. Es un tipo de red muy utilizado por organizaciones o edificios corporativos donde se establecen interconexiones entre los dispositivos dando muchas ventajas.

Figura 6.

Diagrama MAN



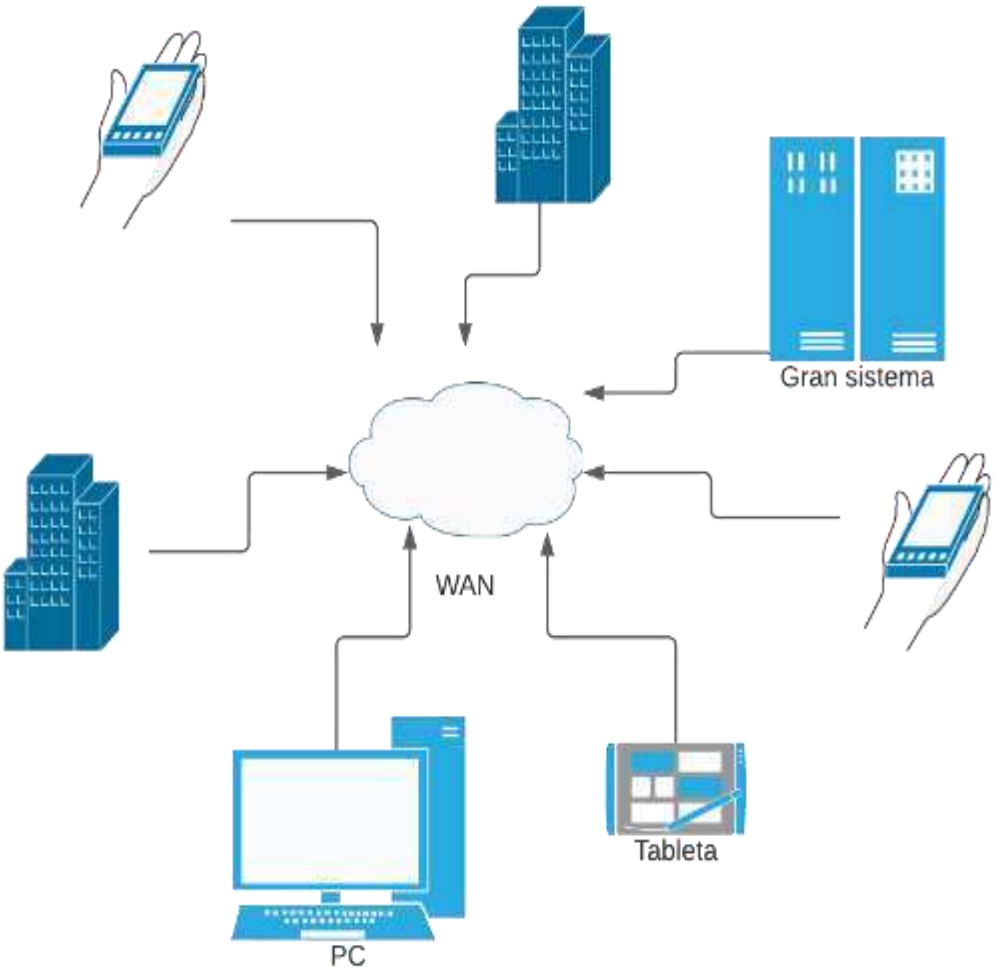
Nota. Descripción del diagrama MAN. Elaboración propia, realizado con Lucid Chart.

2.2.4. WAN

Es una red que se extiende por un área geográfica extensa, permitiendo la interconexión de redes o dispositivos que están separados a largas distancias en sí.

Figura 7.

Diagrama WAN



Nota. Descripción del diagrama WAN. Elaboración propia, realizado con Lucid Chart.

Dentro de las redes WAN se encuentra una subcategoría conocida como LPWAN (Low-Power Wide Area Network), LoRa es una de las tecnologías aplicada a LPWAN.

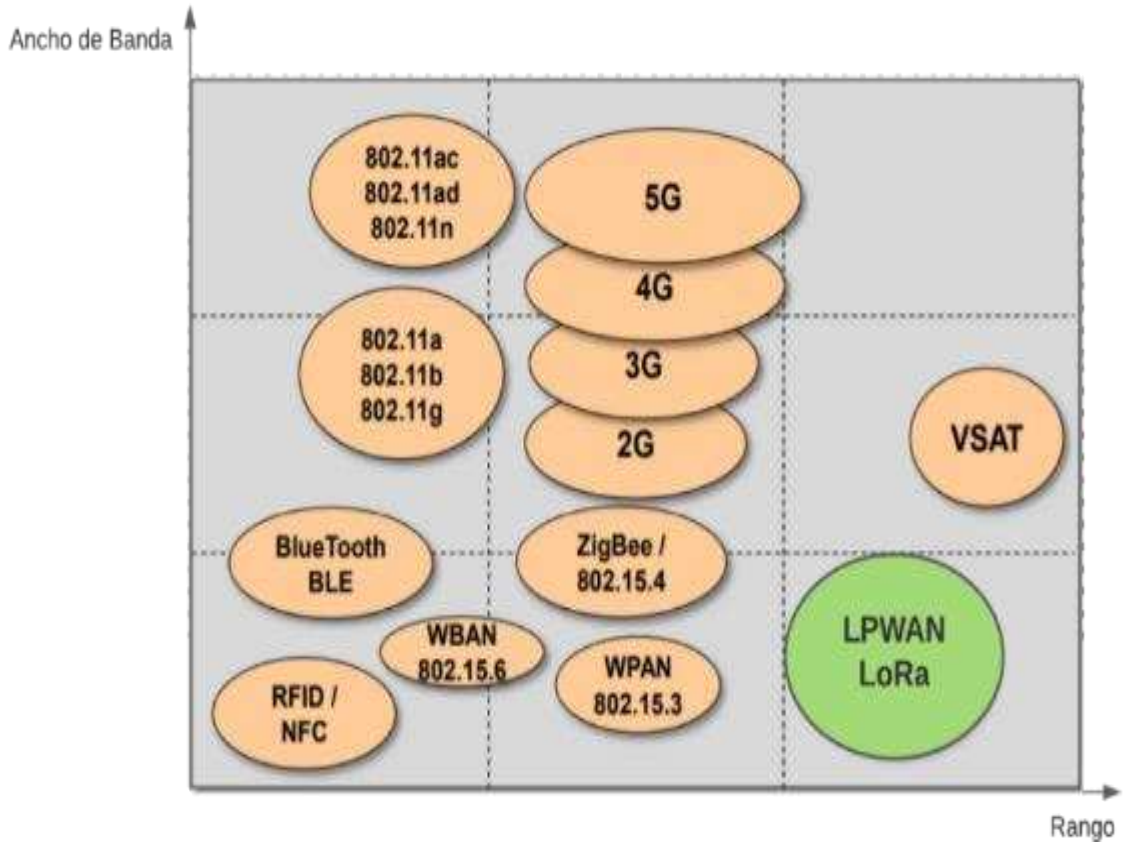
LoRa es desde su concepción una tecnología inalámbrica, y también se pueden encontrar tecnologías como:

- Bluetooth
- WiFi
- Zigbee
- RFID
- NFC
- VSAT (terminal de apertura muy pequeña)
- Otros

LPWAN ofrece la ventaja de tener un ancho de banda bajo para operar y ofrecer un largo alcance de comunicación, en comparación con el resto de las tecnologías anteriormente mencionadas.

Figura 8.

Comparación de ancho de banda entre tecnologías

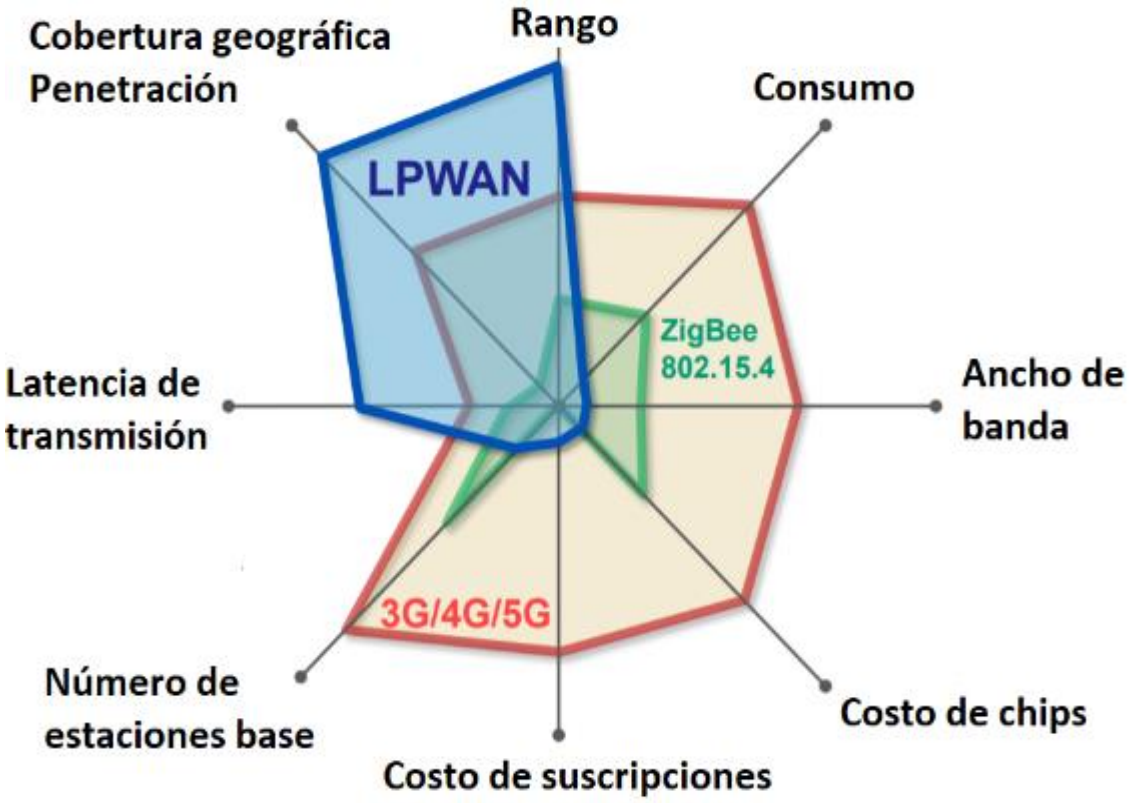


Nota. Descripción de tecnologías de comunicación inalámbricas. Obtenido de Indigoo (2015). *Overview of emerging technologies for low power wide area networks in internet of things and m2m scenarios*. (https://indigoo.com/dox/itdp/12_MobileWireless/LPWAN.pdf), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

Adicional a esta ventaja de LPWAN sobre las demás tecnologías se puede hacer una comparación que muestra sus otras ventajas.

Figura 9.

Comparación de tecnologías inalámbricas de comunicación



Nota. Descripción de tecnologías de comunicación inalámbricas. Obtenido de Indigoo (2015). *Overview of emerging technologies for low power wide area networks in internet of things and m2m scenarios*. (https://indigoo.com/dox/itdp/12_MobileWireless/LPWAN.pdf), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

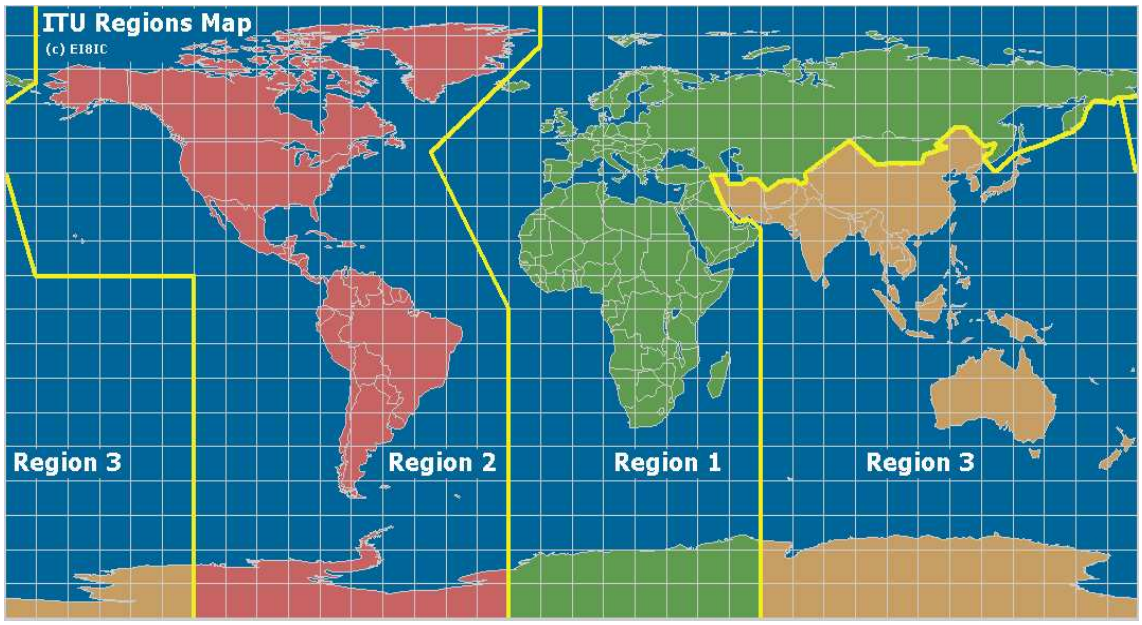
En el mundo, LoRa utiliza la banda de radio ISM (industrial, científico y médico), al ser una banda sin licencia.

Las radiofrecuencias comprendidas en esta banda están reservadas a lo largo del mundo para uso industrial, científico y médico.

El ente internacional encargado de regular el uso de las tecnologías de la información y comunicación es la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, por sus siglas en ingles), la ITU determina 3 regiones para dividir el mundo y le asigna una banda diferente a cada región.

Figura 10.

Regiones para banda ISM según ITU



Nota. Descripción de regiones para banda ISM. Obtenido de ITU (2020). *Mapas*. (https://www.qsl.net/xe1usg/mapas.htm), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

- Para la región 1 está asignada las frecuencias en torno a 868MHz
- La región 2 en torno a 915MHz
- La región 3 en torno a 433MHz

Se puede hacer una comparación entre otras tecnologías celulares para mostrar las ventajas de la tecnología LPWAN/LoRaWan. Entre sus competidores se encuentra NB IoT (Narrow Band Internet of Things – Banda estrecha internet de las cosas).

Tabla 2.

Comparación entre LoRaWAN y NB IoT

Tecnología	**LoRaWan**	**NB IoT**
Ecosistema	LoRa Alliance	3GPP
Espectro	Sin licencia (Banda ISM)	Con Licencia (Banda LTE)
Cobertura desplegada	49 países	25 países
Opción de despliegue	Flexible. Opción de redes públicas, privadas o mixtas	Fija. Utiliza redes celulares 4G / LTE
Protocolo	Asíncrono. Envía datos solo cuando es necesario lo cual optimiza el uso de la batería	Síncrono. Mantiene una conexión celular incluso si no se envían datos, establecer la conexión requiere tiempo y consume batería
Corriente de transmisión	18 mA a 10 dBm 84 mA a 20 dBm	100 mA a 13 dBm 220 mA a 23 dBm
Corriente de recepción	5 mA aproximadamente	40 mA aproximadamente
Velocidad de transmisión	293 bps – 50 kbps	20 kbps

Nota. Comparación entre LoRaWan y NB IoT. Obtenido de R. Lorrain (2022). *10 Things About LoRaWAN & NB-IoT*. (https://blog.semtech.com/title-10-things-about-lorawan-nb-iot), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

Semtech ha desarrollado transceptores que sirven como base para los productos que desean utilizar la tecnología LoRa con la certificación de LoRa Alliance.

En general los transceptores Semtech cuentan con un modem inalámbrico de largo alcance que permite minimizar el consumo de energía. Estos transceptores alcanzan una sensibilidad de -137 dBm a -148 dBm, y por medio de un amplificador de potencia se puede obtener +22 dBm; esta combinación es la que permite que estos transceptores sean ideales para comunicaciones de largo alcance.

2.2.5. Transceptor SX1276 / 1278

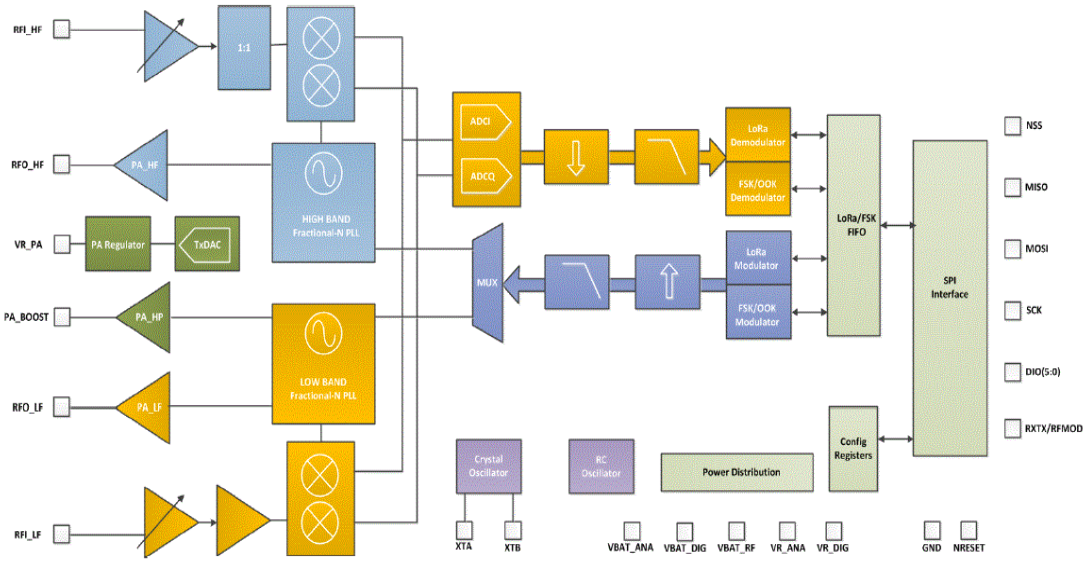
Principales características de esta familia de transceptores se presentan a continuación.

- Son modem LoRa.
- Enlace máximo a 168 dBm
- Tasa de bits programable hasta 300 kbps
- Alta sensibilidad: hasta -148 dBm
- 9.9mA de corriente de recepción
- Amplificador de bajo ruido de +20 dBm
- Verificación de redundancia cíclica de hasta 256 Bytes
- 200nA cuando se encuentra inactivo
- Rango dinámico RSSI de hasta 127 dBm

Ambos transceptores tienen 21 pines de conexión. En la Figura 11, se muestra el diagrama de bloques que muestra el funcionamiento interno de estos transceptores.

Figura 11.

Diagrama de transceptores SX1276 / 1278

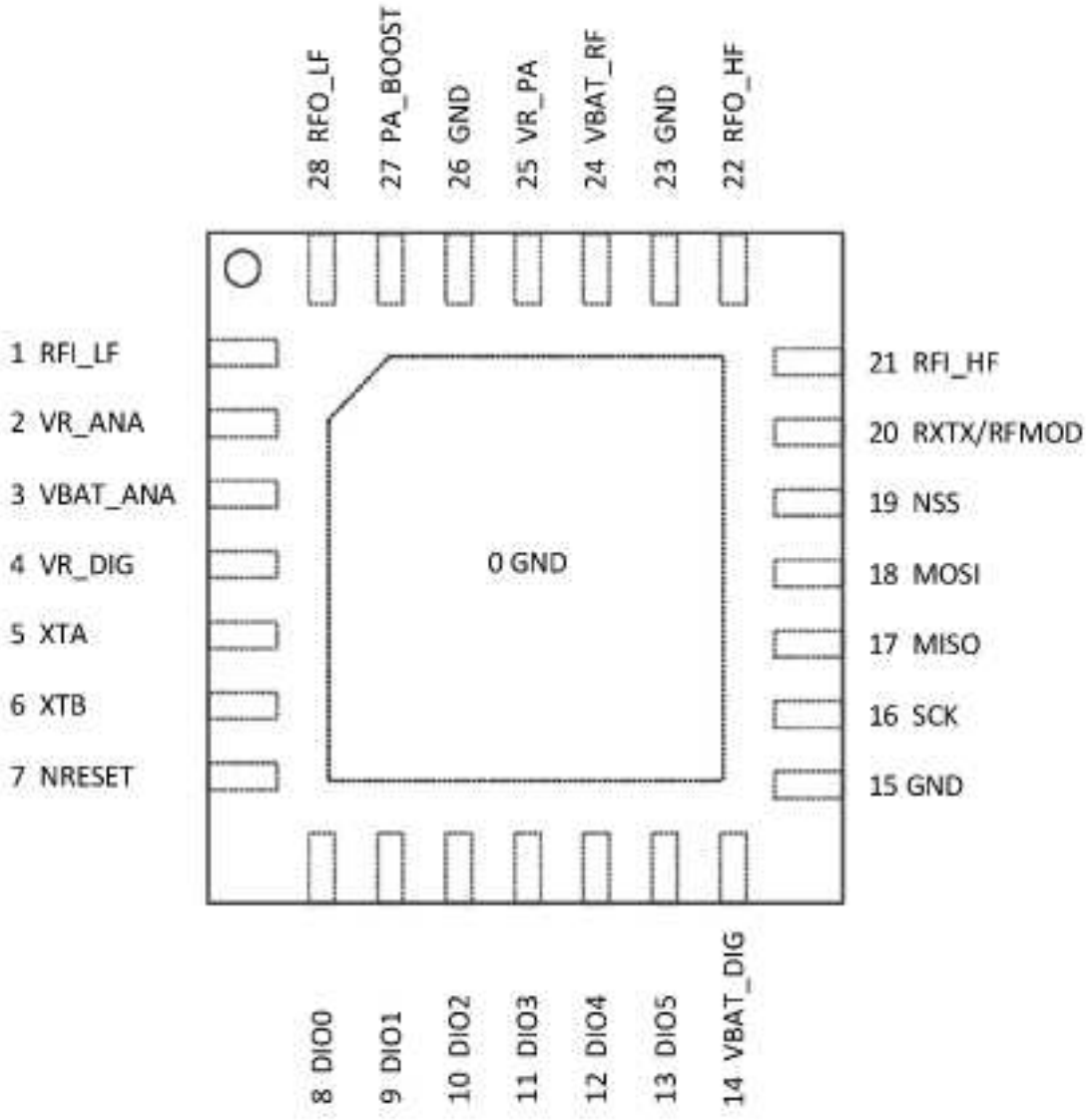


Nota. Descripción del diagrama de transceptores SX1276 /1278. Obtenido de Semtech (2021). *LoRa Connect™ 137MHz to 1020MHz Long Range Low Power Transceiver.* (https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

Cada uno de los transceptores cuenta con diferencias en cuanto a su diagrama de pines.

Figura 12.

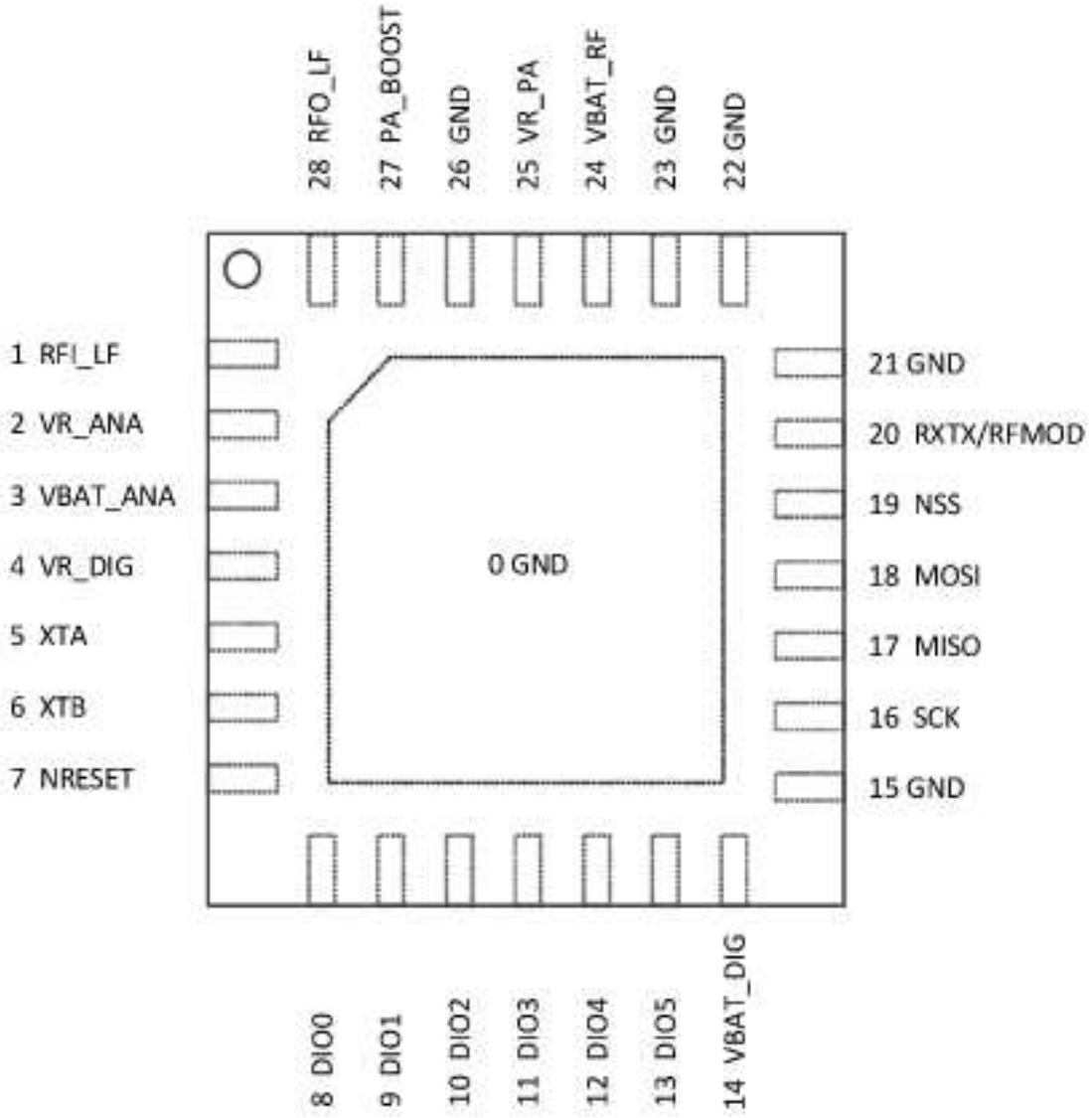
Diagrama de Pines SX1276



Nota. Descripción del diagrama de pines SX1276. Obtenido de Semtech (2021). *LoRa Connect 137MHz to 1020MHz Long Range Low Power Transceiver.* (https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

Figura 13.

Diagrama de Pines SX1278



Nota. Descripción del diagrama de pines SX1278. Obtenido de Semtech (2021). *LoRa Connect™ 137MHz to 1020MHz Long Range Low Power Transceiver.* (https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

Tabla 3.

Rango de frecuencias y factor de alcance Semtech

Transceptor	Rango de Frecuencias	Factor de alcance
SX1276	137 – 1020 MHz	6 – 12
SX1278	137 – 525 MHz	6 - 12

Nota. Descripción del rango de frecuencias y factor de alcance de transceptores Semtech. Obtenido de Semtech (2021). *LoRa Connect™ 137MHz to 1020MHz Long Range Low Power Transceiver.* (https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

Al seleccionar el chip adecuado se debe tomar en cuenta principalmente el rango de frecuencias, debido a que Guatemala se encuentra dentro de la región 2 de ITU, le corresponde la frecuencia de 915 MHz. Por lo cual el chip utilizado será el SX1276.

El factor de alcance representa el número de símbolos enviados por bit de información.

Tabla 4.

Ancho de banda, tasa de bits y sensibilidad Semtech

Transceptor	Ancho de banda (KHz)	Tasa efectiva de bits (kbps)	Sensibilidad (dBm)
SX1276	7.8 – 500	0.018 – 37.5	-111 a -148
SX1278	7.8 – 500	0.018 – 37.5	-111 a -148

Nota. Descripción del diagrama de transceptores SX1276 /1278. Obtenido de Semtech (2021). *LoRa Connect™ 137MHz to 1020MHz Long Range Low Power Transceiver.* (https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

- El aumento en el ancho de banda permite el uso de una tasa de datos efectiva más alta. Esto ayuda principalmente a reducir el tiempo de transmisión.

- La tasa efectiva de bits indica la cantidad de información que se puede enviar en una unidad de tiempo para que dicha información no se pierda.

- La sensibilidad indica el valor mínimo de potencia que necesita el receptor para poder decodificar los datos recibidos. Al estar representados en dBm, entre menor sea su valor, será mayor la sensibilidad del receptor.

2.3. Módulos LoRa y sus detalles técnicos

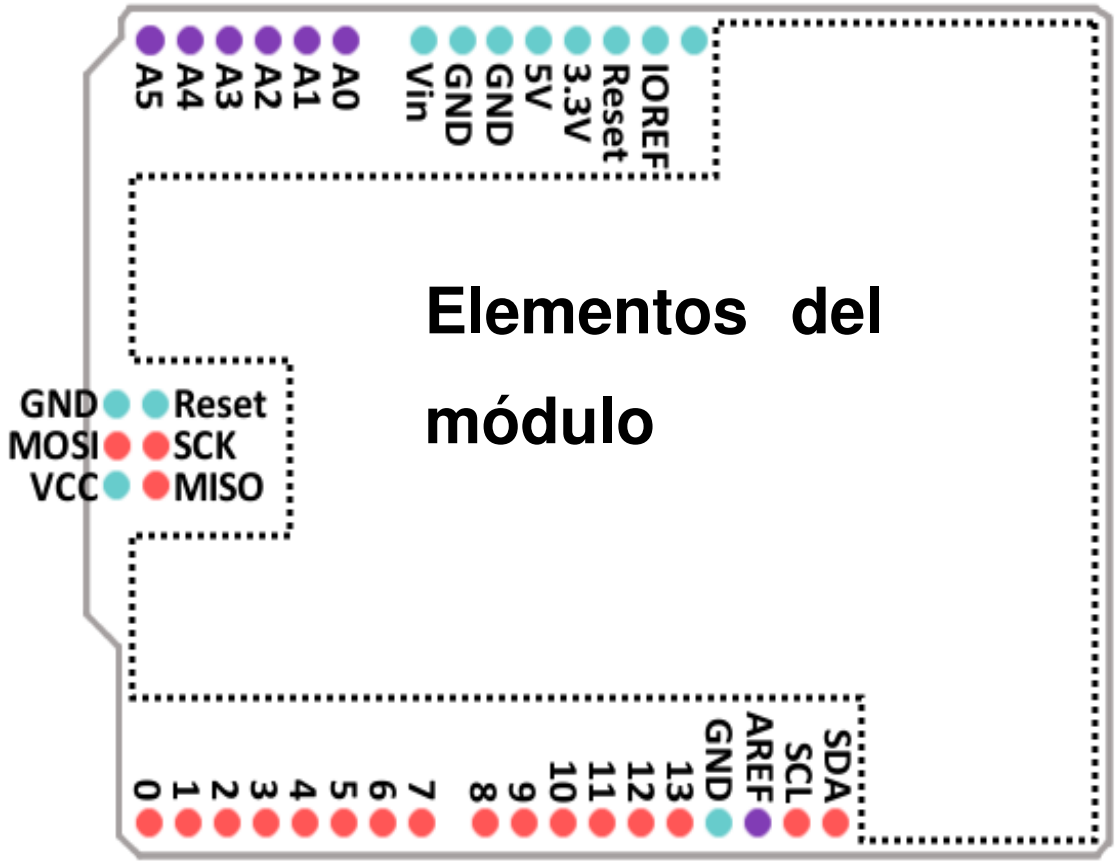
A las placas de circuitos diseñadas para propósitos específicos con la capacidad de ser montados o desmontados se les conoce como *shield* o módulos.

Un módulo se monta sobre el elemento electrónico al cual se le desea extender una función.

Cada módulo se conecta con el microcontrolador a través de los pines de este, tanto de alimentación como pines análogos, digitales y periféricos.

Figura 14.

Esquema básico de módulo Arduino



Nota. Descripción del esquema básico de módulo Arduino. Obtenido de Jecrespom (2019). *Aprendiendo Arduino*. (https://aprendiendoarduino.wordpress.com/category/shields/), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

Existen diferentes módulos LoRa para diferentes microcontroladores, así como diferentes empresas que los fabrican.

En este proyecto se usará los módulos LoRa de la marca Dragino para Arduino.

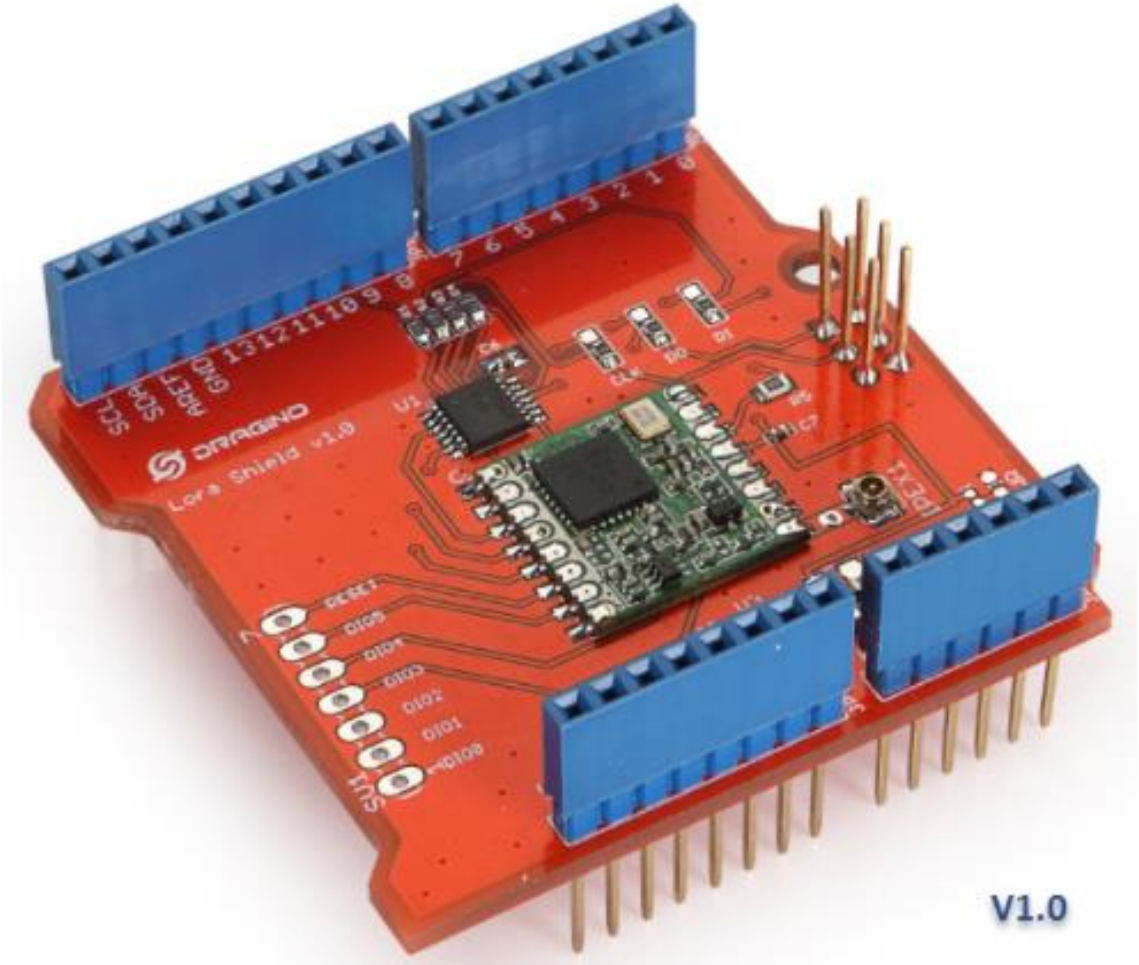
2.3.1. Módulo LoRa

Este módulo LoRa está basado en el transceptor SX1276 obteniendo de este sus características tanto de comunicación como de consumo y alcance, permitiendo que esta comunicación LoRa se pueda extender a la funcionalidad que permite el Arduino.

Existen varias versiones de este módulo, cada una con características que fueron mejorando según su versión.

Figura 15.

Módulo LoRa versión 1.0

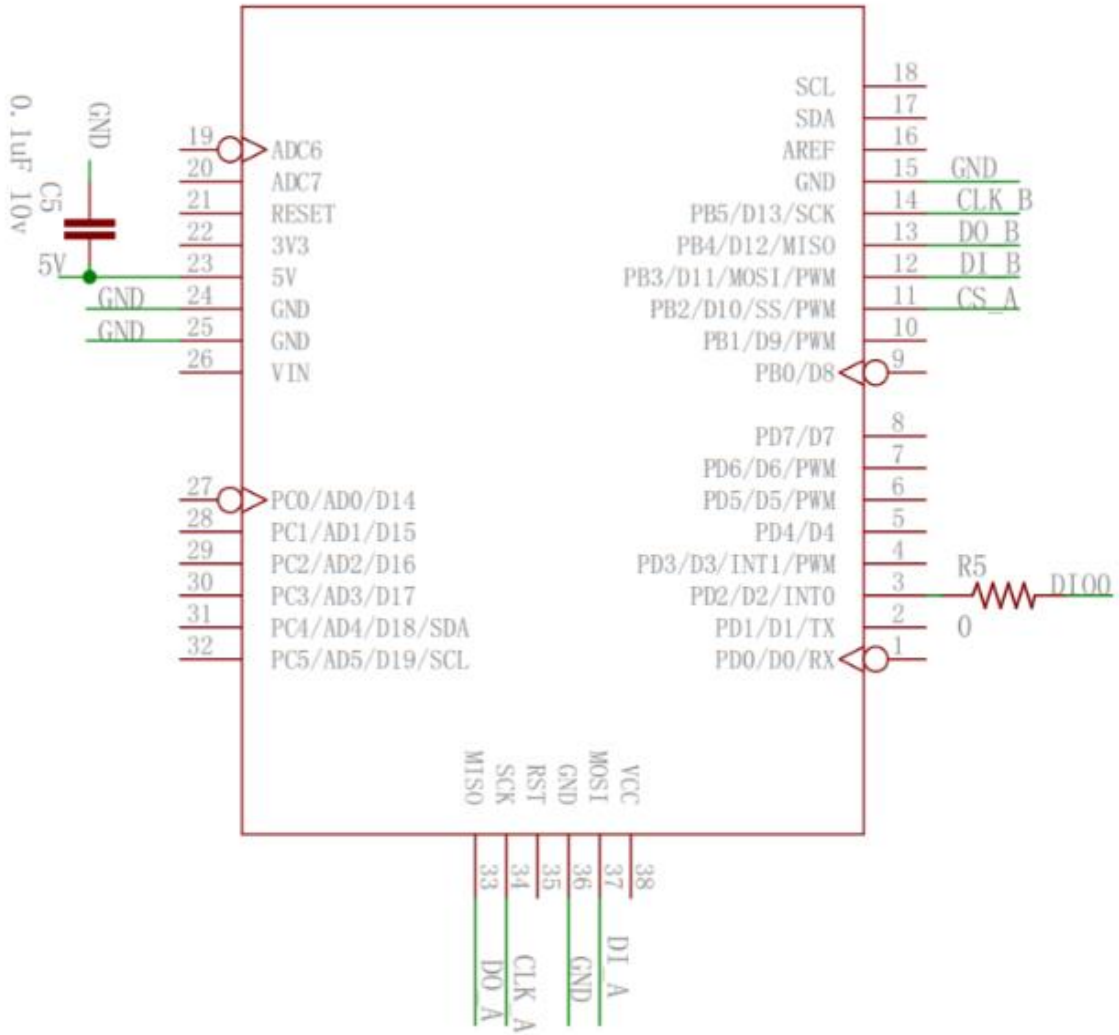


Nota. Descripción del módulo LoRa. Obtenido de Dragino (2021). *Arduino Shield featuring LoRa technology*. (https://dragino.com/products/lora/item/102-lora-shield.html), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

Esta placa fue la primera versión de un módulo LoRa para Arduino. Que, si bien permitía la utilización de la tecnología LoRa para la comunicación, era poco versátil y tenía deficiencias en su funcionamiento que fueron corregidas en las posteriores versiones.

Figura 16.

Esquemático módulo LoRa Dragino v 1.0

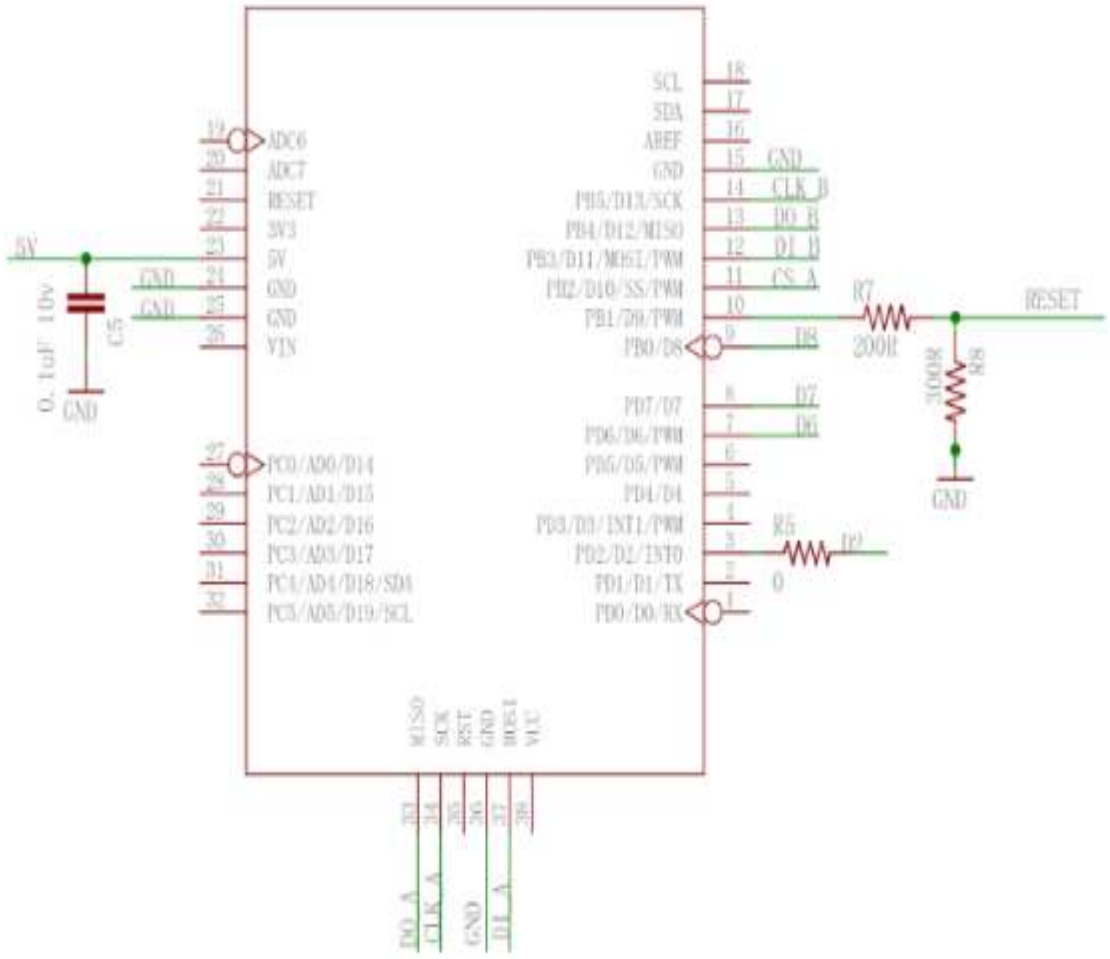


Nota. Descripción del módulo LoRa Dragino v 1.0. Obtenido de Dragino (2021). *Arduino Shield featuring LoRa technology*. (https://dragino.com/products/lora/item/102-lora-shield.html), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

La siguiente versión que corresponde a la 1.2 maneja el mismo esquemático de la versión 1.0 con la diferencia que integra R7 y R8 al pin 10.

Figura 17.

Esquemático módulo LoRa Dragino v 1.2

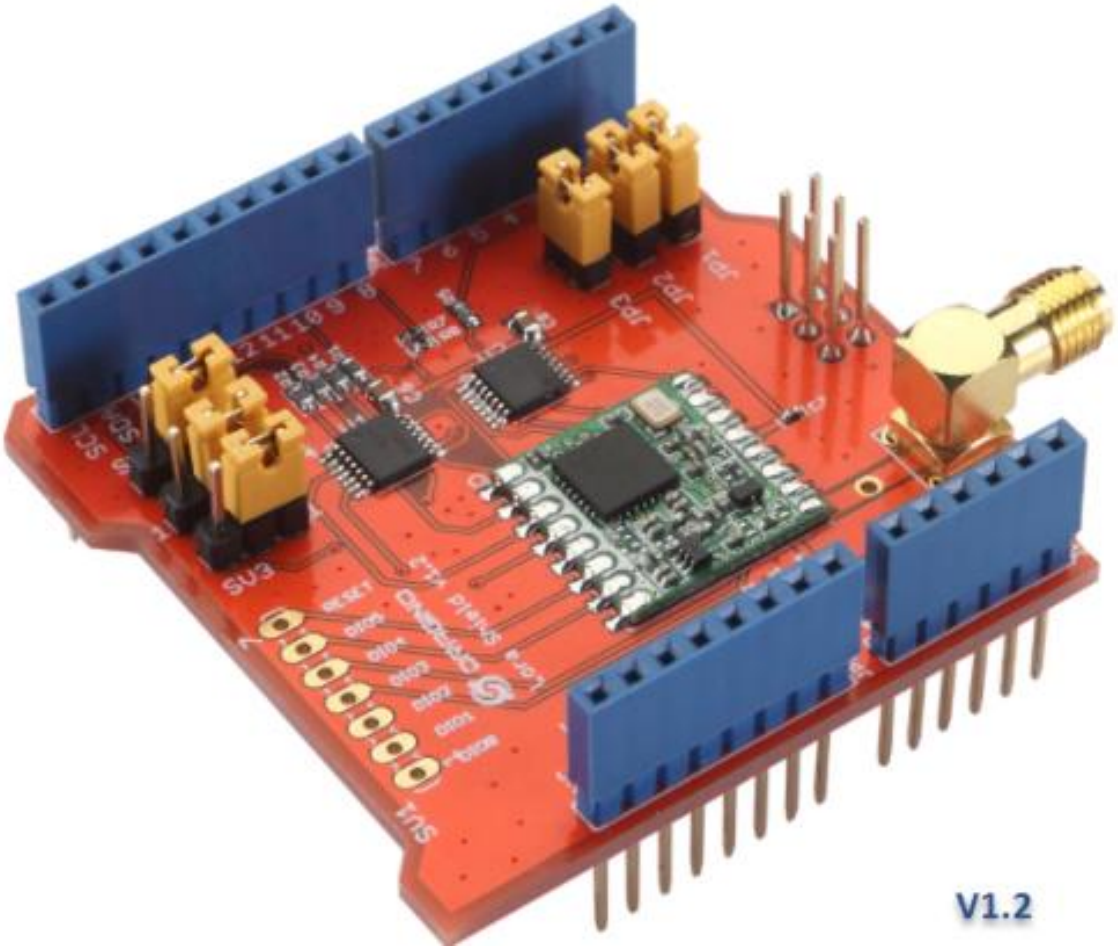


Nota. Descripción del esquemático módulo LoRa Dragino v 1.2. Obtenido de Dragino (2021). *Arduino Shield featuring LoRa technology*. (https://dragino.com/products/lora/item/102-lora-shield.html), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

En cuanto a la placa, este módulo permite conectar los DIO a Arduino IO mediante el uso de jumpers y cambia el conector para la antena de i-pex a SMA.

Figura 18.

Esquemático módulo LoRa versión 1.2

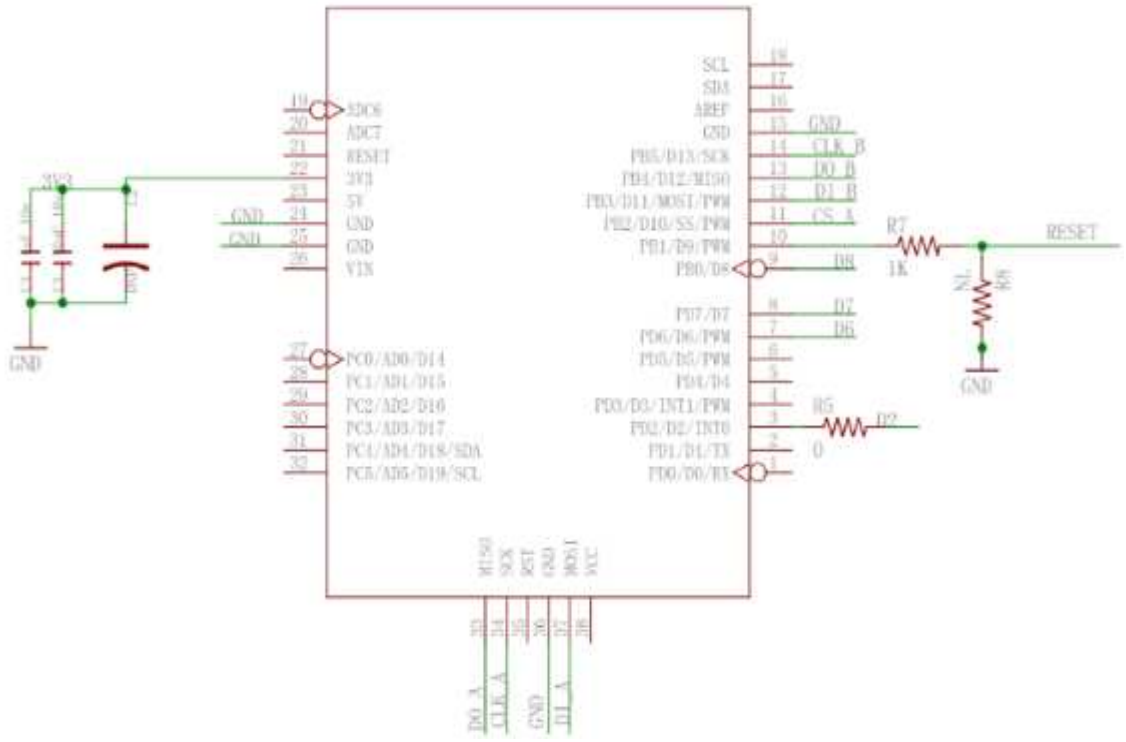


Nota. Descripción del módulo LoRa versión 1.2. Obtenido de Dragino (2021). *Arduino Shield featuring LoRa technology*. (https://dragino.com/products/lora/item/102-lora-shield.html), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

La versión 1.3 del módulo LoRa cambia si esquemático de tal forma que se pueda utilizar directamente los 3.3v que suministra el Arduino a través de su pin +3.3v.

Figura 19.

Esquemático módulo LoRa versión 1.3



Nota. Descripción del esquemático módulo LoRa versión 1.3. Obtenido de Dragino (2021). *Arduino Shield featuring LoRa technology*. (https://dragino.com/products/lora/item/102-lora-shield.html), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

La versión 1.4 es la que se utiliza en este proyecto al ser la versión más reciente y que ha adaptado correcciones que el fabricante ha determinado de sus versiones anteriores.

Adicional a la versión 1.3, adiciona las resistencias R9, R10 y R11 con el propósito de que sea posible cambiar la conexión del pin LoRa CS al pin Arduino de forma sencilla; esto ayuda a que el dispositivo pueda conectarse a dispositivos SPI múltiples de manera predeterminada.

De forma predeterminada R9 esta completada mientras que R10 y R11 no lo está. Esto indica que de forma predeterminada el pin LoRa CS será el pin 10 del Arduino.

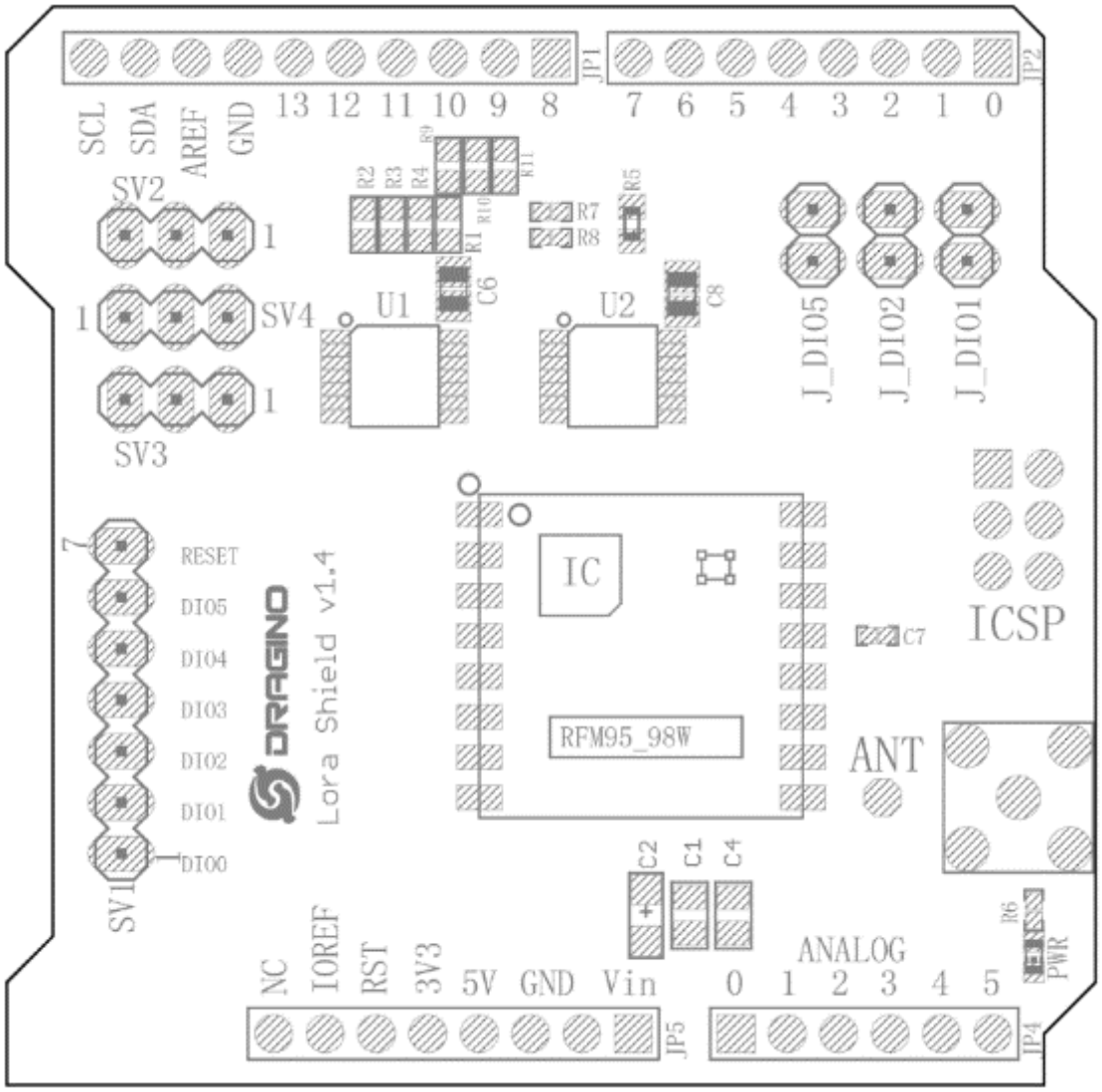
Figura 20.

Módulo LoRa versión 1.4

Nota. Descripción del módulo LoRa versión 1.4. Obtenido de Dragino (2021). *Arduino Shield featuring LoRa technology*. (https://dragino.com/products/lora/item/102-lora-shield.html), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

Figura 21.

Esquema de conexión módulo LoRa v 1.4

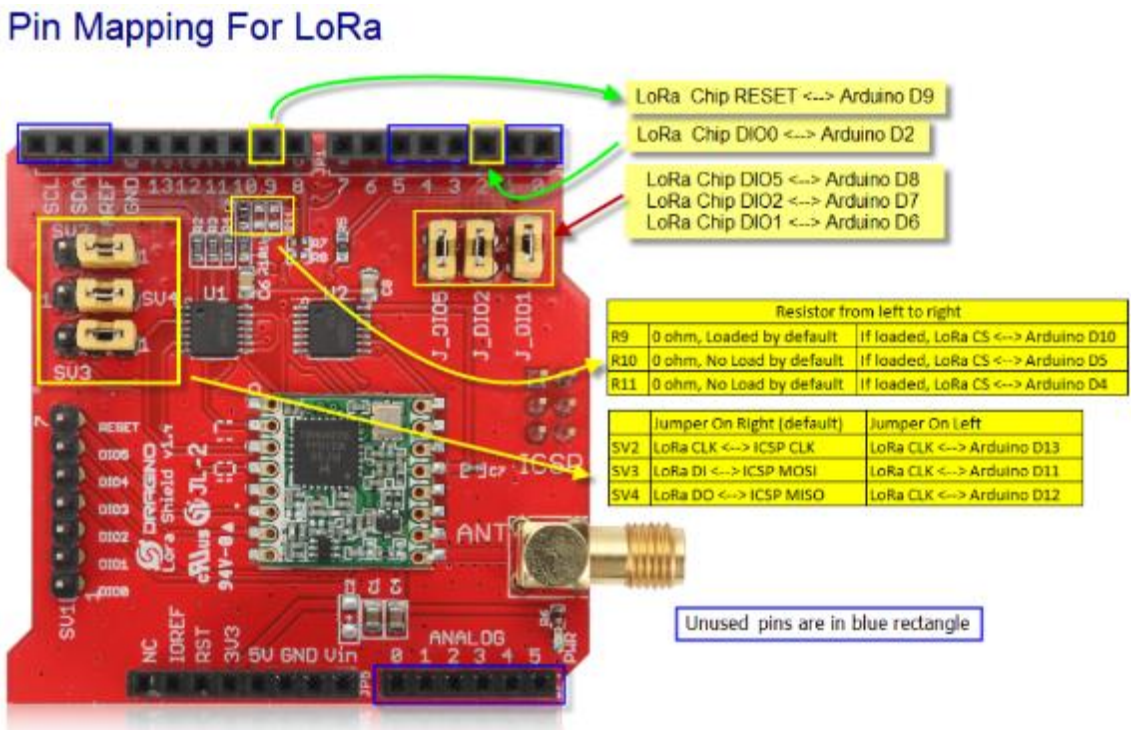


Nota. Descripción del esquema de conexión módulo LoRa versión 1.4. Obtenido de Dragino (2021). *Arduino Shield featuring LoRa technology*. (https://dragino.com/products/lora/item/102-lora-shield.html), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

Es importante identificar el mapa de pines de este módulo para conocer sus conexiones y configuraciones.

Figura 22.

Mapa de pines módulo LoRa v 1.4



Nota. Descripción del mapa de pines del módulo LoRa versión 1.4. Obtenido de Dragino (2021). *Arduino Shield featuring LoRa technology*. (https://dragino.com/products/lora/item/102-lora-shield.html), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

La Figura 22 muestra de forma gráfica la forma de poder configurar el módulo para cambiar los pines LoRa CS, LoRa CLK, LoRa DI y LoRa DO. Este módulo es compatible con Arduino Leonardo, Uno, Mega y DUE. Sus dimensiones son 62 x 43 x 23 mm con un peso de 22 g.

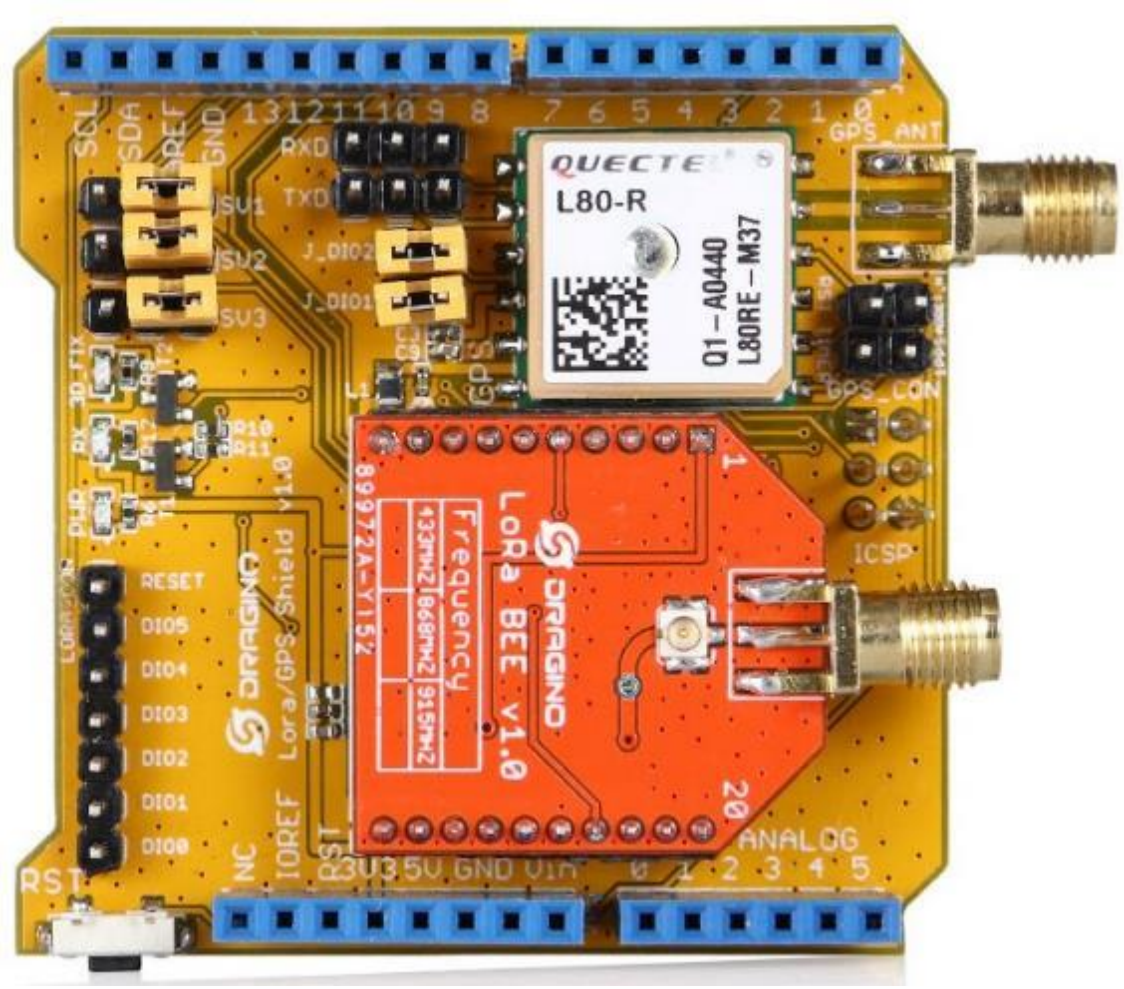
2.3.2. Módulo LoRa GPS

Módulo LoRa diseñado para ser utilizado con Arduino con la adaptación de tener la capacidad de obtener la ubicación GPS. Utiliza como base de funcionamiento el transceptor SX1276 para la comunicación LoRa. Y MT3339 como base para el funcionamiento del GPS. Al utilizar el transceptor SX1276 obtiene de este sus características de comunicación y consumo.

Al igual que el módulo LoRa convencional, este módulo cuenta con diferentes versiones que se han desarrollado por Dragino a lo largo del tiempo, con el fin de corregir errores o agregar características que hagan los módulos más versátiles en su uso. La primera versión corresponde a la 1.0.

Figura 23.

Módulo LoRa GPS v 1.0



Nota. Descripción del módulo LoRa GPS versión 1.0. Obtenido de Dragino (2021). *Arduino Shield featuring LoRa technology*. (https://dragino.com/products/lora/item/102-lora-shield.html), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

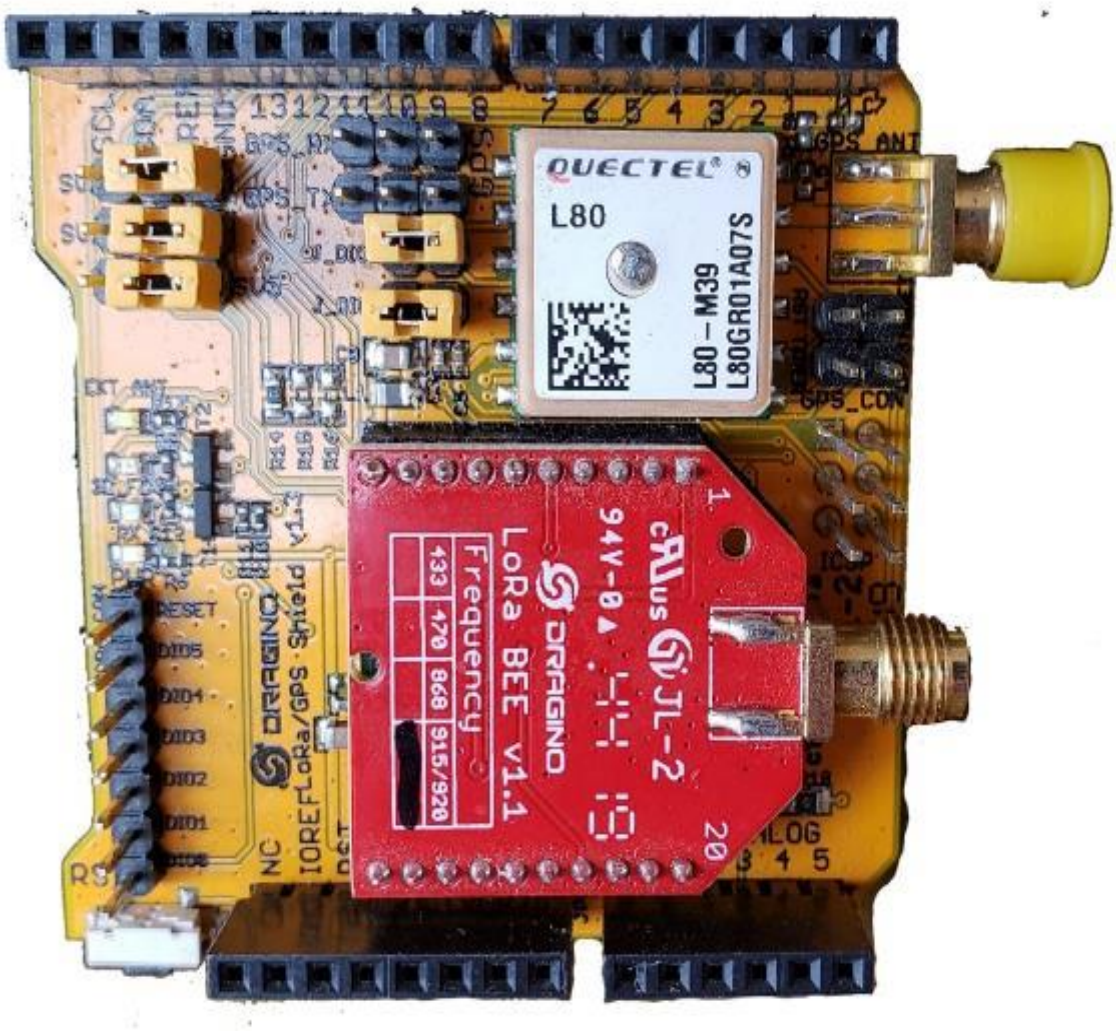
Este módulo cuenta con la función GPS integrada directa en la placa y el transceptor SX1276 de forma removible. La siguiente versión corresponde a la 1.2. La cual, aunque mantiene la mayor parte de las cualidades de tu predecesora, integra otras características. Entre las que se encuentran el cambio

en la nomenclatura de la placa de TXD a GPS_TX y RXD a GPS_RX. Donde el término TX o GPS_TX corresponde al pin en el cual el GPS transmite sus datos. Mientras que el término RX o GPS_RX corresponde al pin de recepción de información del GPS desde el Arduino.

La versión 1.2 también integra las resistencias R14, R15 y R16. Estas resistencias mediante algunas configuraciones pueden cambiar la configuración del pin SS. La versión 1.3. permite la conexión de una antena activa externa para el GPS e integra un LED llamado “AADET_N LED” que muestra el estado de la antena activa del GPS.

Figura 24.

Módulo LoRa GPS v 1.3



Nota. Descripción del módulo LoRa GPS versión 1.3. Obtenido de Dragino (2021). *Arduino Shield featuring LoRa technology*. (https://dragino.com/products/lora/item/102-lora-shield.html), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

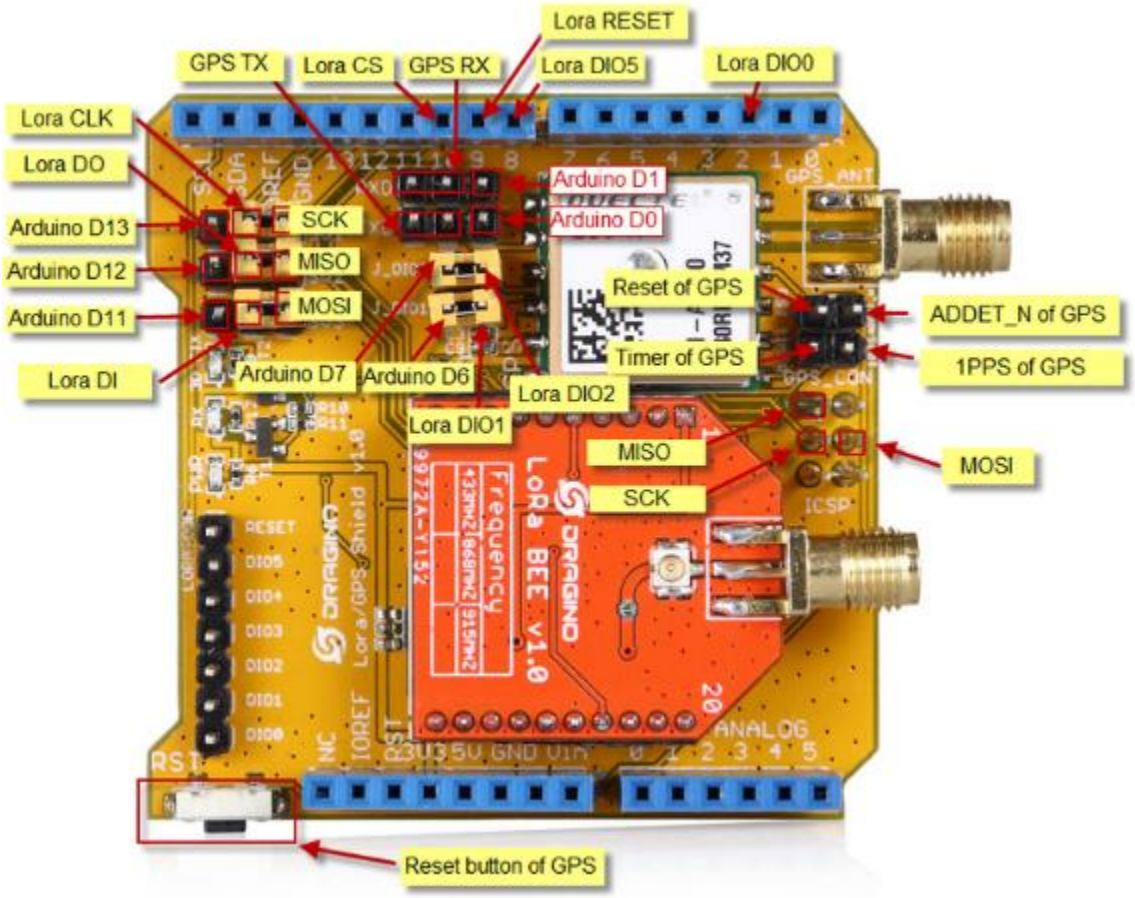
Las dimensiones de este módulo son 60 x 53 x 25 mm con un peso de 30 g.

Dentro de las características del GPS se encuentran:

- Basado en MT3339
- 25mA de corriente de adquisición de posicionamiento
- 20mA de corriente de seguimiento
- Tasa de bits programable hasta 300kbps
- Interfaz UART ajustable en el rango 4800 a 115200 bps, siendo 9600 bps el valor predeterminado.
- Tasa de actualización hasta 10Hz, siendo 1 Hz el valor predeterminado.
- Sensibilidad de adquisición: -148dBm.
- Sensibilidad de seguimiento: -165 dBm.
- Sensibilidad de readquisición: -160 dBm.
- Temperatura ambiental de funcionamiento -40 a 85° C.

Figura 25.

Mapa de pines módulo LoRa GPS v 1.3



Nota. Descripción del mapa de pines módulo LoRa GPS versión 1.3. Obtenido de Dragino (2021). *Arduino Shield featuring LoRa technology*. (https://dragino.com/products/lora/item/102-lora-shield.html), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

Todas las versiones cuentan con un botón que permite reiniciar la localización del módulo para que pueda reajustarse.

En el Arduino se configura la comunicación serial en 2 pines, los cuales deberán conectarse por medio de cables a los pines GPS_TX y GPS_RX para obtener la medición.

La versión 1.3 cuenta con 4 leds indicadores. PWR indica que el módulo está correctamente alimentado y que se encuentra encendido. RX cuando se enciende indica que hay un paquete LoRa recibido por el módulo. 3D_FIX indica que el GPS detectó la ubicación, y se puede verificar cuando parpadea a 100ms. AADET_N LED indica que hay una antena activa externa conectada en el GPS.

Figura 26.

Módulo LoRa GPS montado sobre Arduino Uno

Nota. Descripción del módulo LoRa GPS montado sobre Arduino Uno. Obtenido de Dragino (2021). *Arduino Shield featuring LoRa technology*. (https://dragino.com/products/lora/item/102-lora-shield.html), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

2.4. Alcance de los principales módulos LoRa

Los valores principales que determinan la calidad de la comunicación son: el indicador de fuerza de la señal recibida y la relación señal-ruido (RSSI y SNR, por sus siglas en inglés, respectivamente).

Ambos modelos funcionan de la misma manera con relación a su comunicación LoRa. Configurados con sus parámetros predeterminados tienen los siguientes valores de comunicación:

Tabla 5.

Prueba de control de módulo LoRa

	RSSI [dBm]	SNR [dBm]	Distancia [m]
Prueba de control	-30	10	1

Nota. Descripción de la prueba de control del módulo LoRa. Elaboración propia, realizado con Word.

Teniendo estos módulos un rango de SNR de -10 a 10. Siendo 10 el valor máximo que indica la mejor calidad en la comunicación, sin que el ruido del medioambiente afecte el paquete transmitido. Por otro lado, el valor -10 indica que la comunicación cuenta con bastante ruido, y la información transmitida puede verse comprometida incluso algunos paquetes de datos se podrían perder.

El índice de fuerza de la señal recibida tiene valores negativos, a medida que este índice se aproxima al 0, la señal tiene una mayor fuerza.

El fabricante indica que este módulo puede recibir datos aun con el índice de fuerza de la señal recibida igual a -127dBm, sin embargo, con los valores predeterminados solo se alcanza la recepción de los datos con un RSSI igual a -110dBm.

Se realizaron 2 pruebas para determinar la calidad de la conexión y la distancia máxima para cada ambiente.

La primera prueba se realizó en un ambiente natural, con barreras naturales como lo son:

- Árboles
- Arbustos
- Plantas
- Plantaciones agrícolas
- diferentes elevaciones del terreno

2.4.1. Prueba 1

La prueba consiste en la medición del terreno de prueba y los resultados de las mediciones que se describen a continuación:

Figura 27.

Medición de terreno de prueba 1

Nota. Descripción de la prueba de control del módulo LoRa. Elaboración propia, realizado con Google Maps.

Tabla 6.

Mediciones de prueba 1

	Prueba 1
RSSI [dBm]	-100
SNR	2
Distancia [m]	160
Altitud de punto 1 [m s.n.m.]	1920
Altitud de punto 2 [m s.n.m.]	1902
Diferencia de altitud entre punto 1 y punto 2 [m]	18

Nota. Descripción de la prueba de control del módulo LoRa. Elaboración propia, realizado con Word.

2.4.2. Prueba 2

La prueba consiste en la medición del terreno de prueba y los resultados de las mediciones que se describen a continuación:

Figura 28.

Medición de terreno de prueba 2

Nota. Descripción de la prueba de control del módulo LoRa. Elaboración propia, realizado con Google Maps.

Tabla 7.

Mediciones de prueba 2

	Prueba 2
RSSI [dBm]	-104
SNR	0
Distancia [m]	640
Altitud de punto 1 [m s.n.m.]	1920
Altitud de punto 2 [m s.n.m.]	1875
Diferencia de altitud entre punto 1 y punto 2 [m]	45

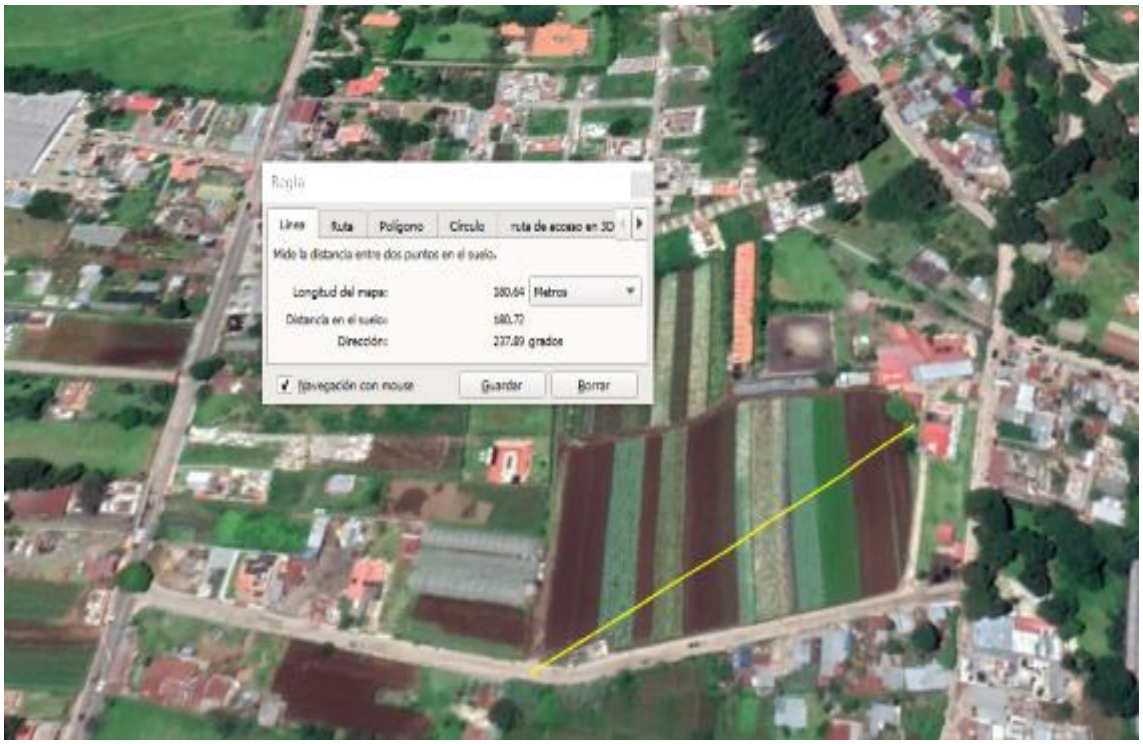
Nota. Descripción de la prueba de control del módulo LoRa. Elaboración propia, realizado con Word.

2.4.3. Prueba 3

La prueba consiste en la medición del terreno de prueba y los resultados de las mediciones que se describen a continuación:

Figura 29.

Medición de terreno de prueba 3



Nota. Descripción de la prueba de control del módulo LoRa. Elaboración propia, realizado con Google Maps.

Tabla 8.

Mediciones de prueba 3

	Prueba 3
RSSI [dBm]	-87
SNR	9.5
Distancia [m]	180
Altitud de punto 1 [m s.n.m.]	1970
Altitud de punto 2 [m s.n.m.]	1967
Diferencia de altitud entre punto 1 y punto 2 [m]	3

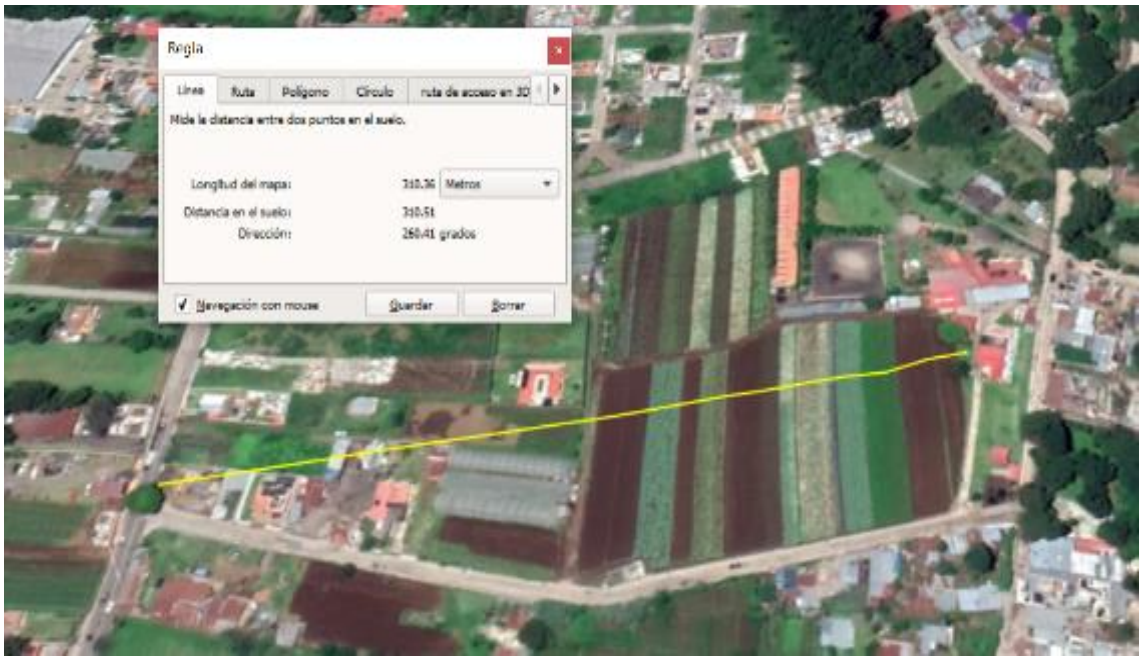
Nota. Descripción de la prueba de control del módulo LoRa. Elaboración propia, realizado con Word.

2.4.4. Prueba 4

La prueba consiste en la medición del terreno de prueba y los resultados de las mediciones que se describen a continuación:

Figura 30.

Medición de terreno de prueba 4



Nota. Descripción de la prueba de control del módulo LoRa. Elaboración propia, realizado con Google Maps.

Tabla 9.

Mediciones de prueba 4

	Prueba 4
RSSI [dBm]	-103
SNR	-0.5
Distancia [m]	310
Altitud de punto 1 [m s.n.m.]	1970
Altitud de punto 2 [m s.n.m.]	1965
Diferencia de altitud entre punto 1 y punto 2 [m]	5

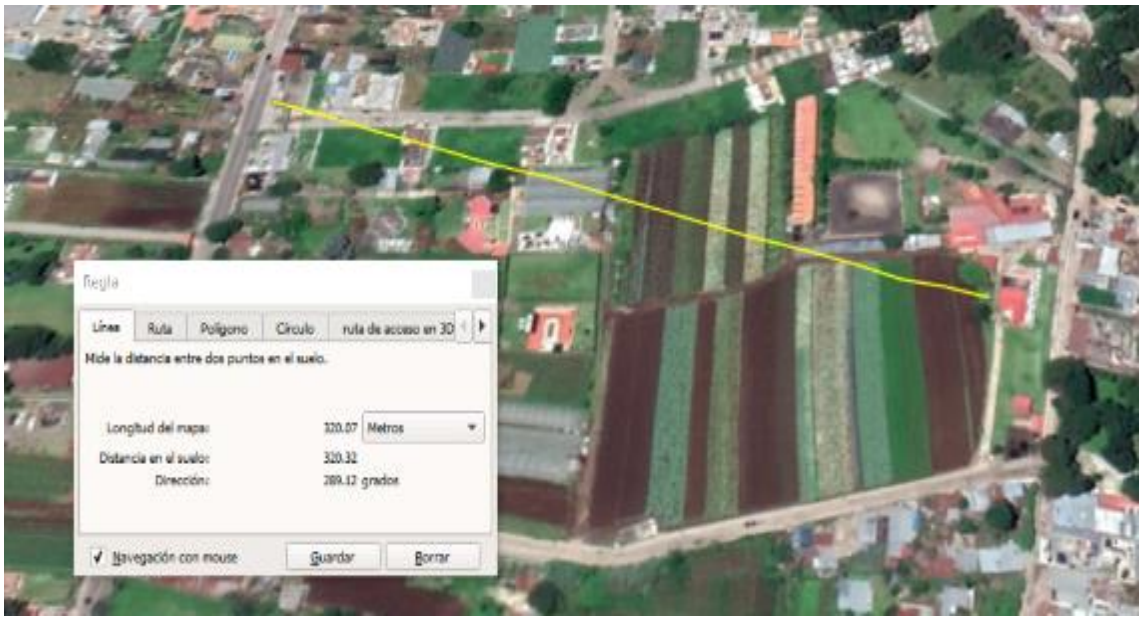
Nota. Descripción de la prueba de control del módulo LoRa. Elaboración propia, realizado con Word.

2.4.5. Prueba 5

La prueba consiste en la medición del terreno de prueba y los resultados de las mediciones que se describen a continuación:

Figura 31.

Medición de terreno de prueba 5



Nota. Descripción de la prueba de control del módulo LoRa. Elaboración propia, realizado con Google Maps.

Tabla 10.

Mediciones de prueba 5

	Prueba 5
RSSI [dBm]	-103
SNR	-1
Distancia [m]	320
Altitud de punto 1 [m s.n.m.]	1970
Altitud de punto 2 [m s.n.m.]	1960
Diferencia de altitud entre punto 1 y punto 2 [m]	10

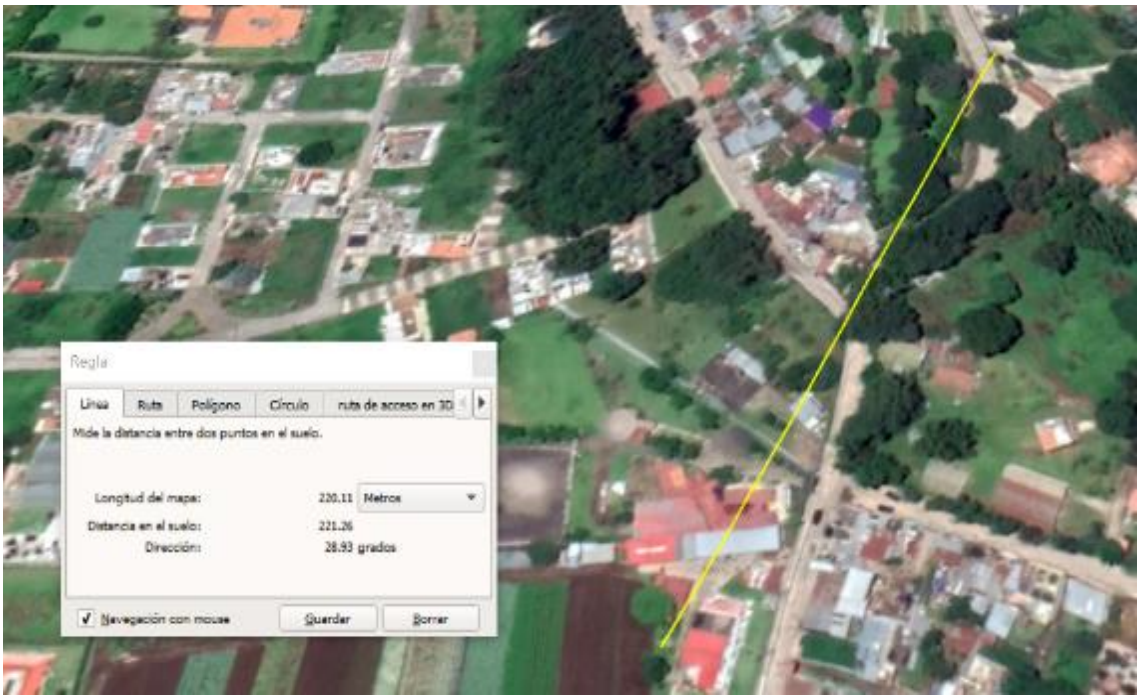
Nota. Descripción de la prueba de control del módulo LoRa. Elaboración propia, realizado con Word.

2.4.6. Prueba 6

La prueba consiste en la medición del terreno de prueba y los resultados de las mediciones que se describen a continuación:

Figura 32.

Medición de terreno de prueba 6



Nota. Descripción de la prueba de control del módulo LoRa. Elaboración propia, realizado con Google Maps.

Tabla 11.

Mediciones de prueba 6

	Prueba 6
RSSI [dBm]	-104
SNR	-3
Distancia [m]	220
Altitud de punto 1 [m s.n.m.]	1970
Altitud de punto 2 [m s.n.m.]	1990
Diferencia de altitud entre punto 1 y punto 2 [m]	20

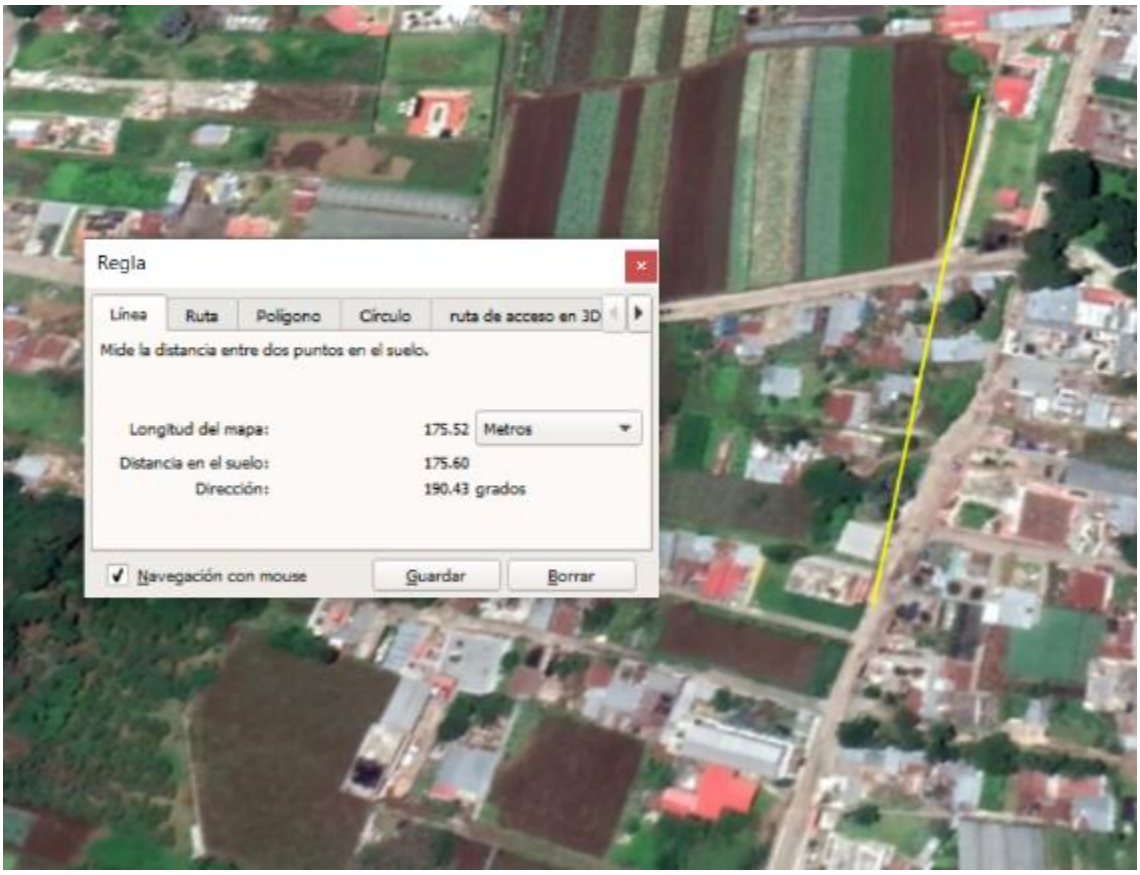
Nota. Descripción de la prueba de control del módulo LoRa. Elaboración propia, realizado con Word.

2.4.7. Prueba 7

La prueba consiste en la medición del terreno de prueba y los resultados de las mediciones que se describen a continuación:

Figura 33.

Medición de terreno de prueba 7



Nota. Descripción de la prueba de control del módulo LoRa. Elaboración propia, realizado con Google Maps.

Tabla 12.

Mediciones de prueba 7

	Prueba 7
RSSI [dBm]	-104
SNR	-7
Distancia [m]	175
Altitud de punto 1 [m s.n.m.]	1970
Altitud de punto 2 [m s.n.m.]	1973
Diferencia de altitud entre punto 1 y punto 2 [m]	3

Nota. Descripción de la prueba de control del módulo LoRa. Elaboración propia, realizado con Word.

3. TECNOLOGÍA ARDUINO

3.1. Arduino

Arduino es una plataforma de código abierto, cuya principal característica es que tanto el hardware como el software son fáciles de utilizar (Arduino, 2018).

El proyecto Arduino fue lanzado en 2005 en Ivrea, Italia. Fue desarrollado por estudiantes del Interaction Design Institute Ivrea (IDII, por sus siglas en inglés).

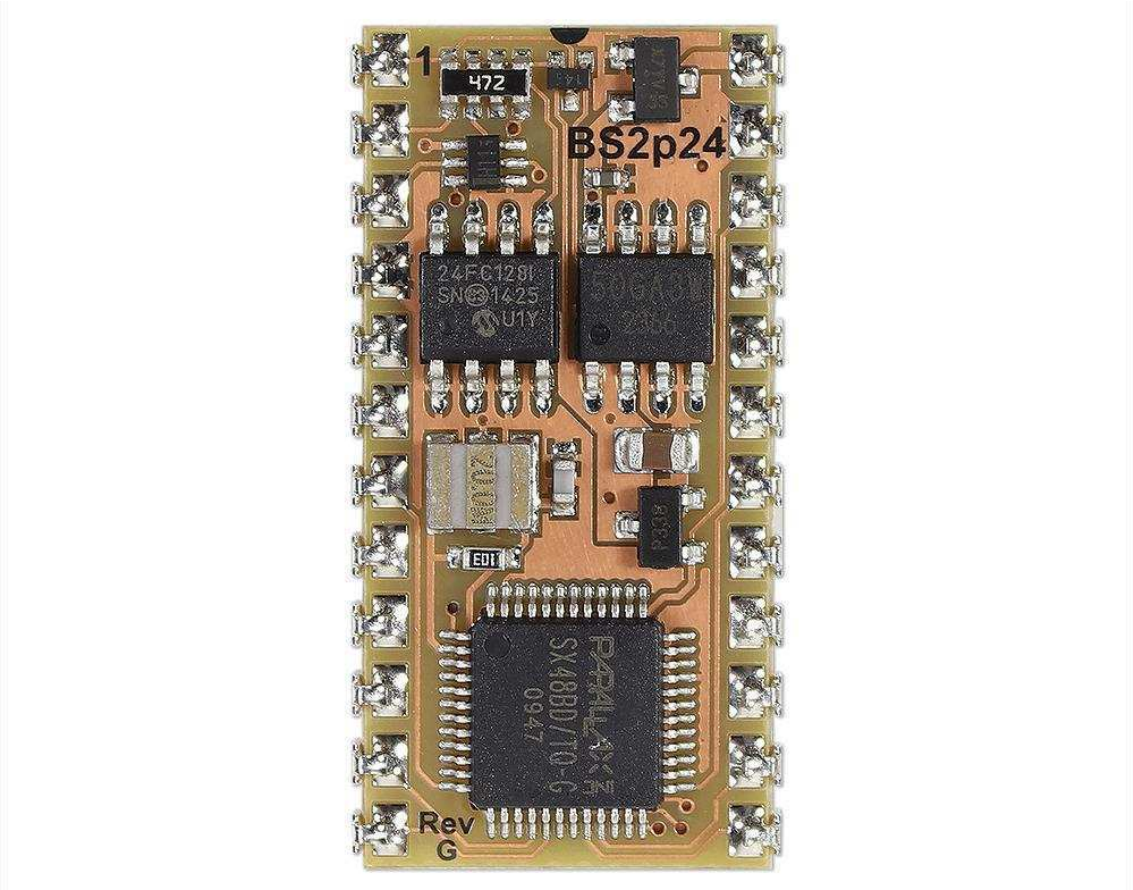
El equipo inicial de Arduino estaba formado por Tom Igoe, David Mellis, Gianluca Martino, Massimo Banzi y David Cuartielles.

En 2002 Massimo Banzi fue contratado por IDII como profesor. Encontró el reto de cómo enseñar a los estudiantes a crear dispositivos o aplicaciones electrónicas de forma sencilla y accesible; las opciones de la época eran pocas o de acceso limitado, Banzi junto con sus estudiantes empezaron a utilizar BASIC.

BASIC Stamp es un microcontrolador creado por Parallax que se basaba en el lenguaje de programación Basic. Esta placa de desarrollo contaba con regulador de voltaje de entrada, un microcontrolador, memoria, oscilador y puertos de entrada/salida. BASIC Stamp tenía las desventajas de baja capacidad de cómputo y su elevado costo ($100 en ese año) (Kushner, 2011).

Figura 34.

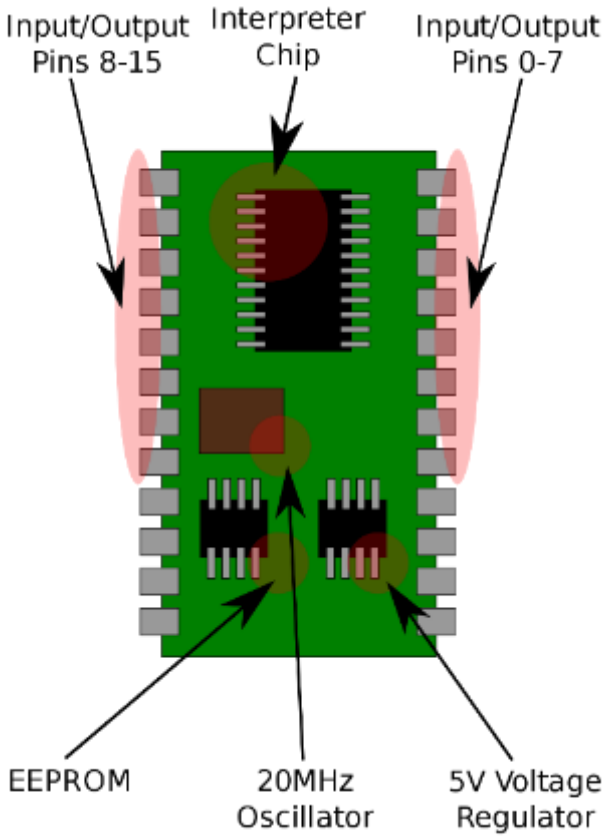
BASIC Stamp



Nota. Descripción de BASIC Stamp. Obtenido de Parallax (2020). *BASIC Stamp 2p24 Microcontroller Module*. (https://www.parallax.com/product/basic-stamp-2p24-microcontroller-module/), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

Figura 35.

Diagrama BASIC Stamp



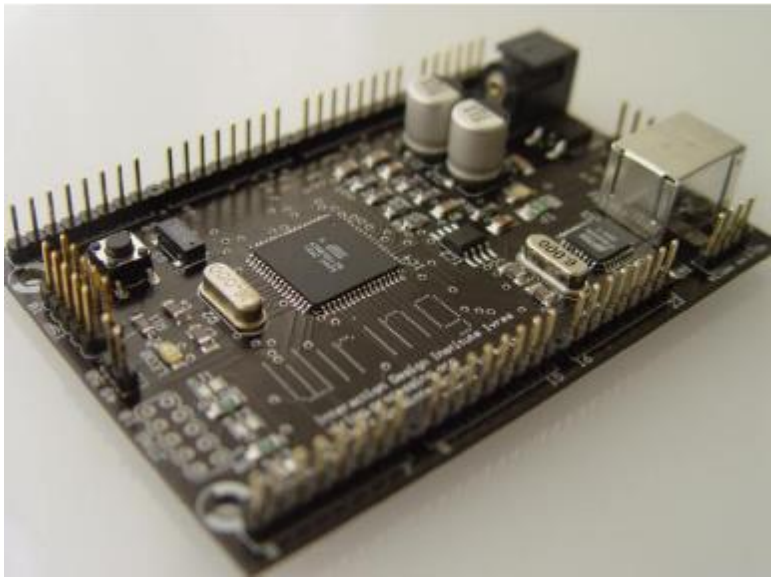
Nota. Descripción del diagrama BASIC Stamp. Obtenido de Wikipedia (2020). *BASIC Stamp 2p24 Microcontroller Module*. (https://es.wikipedia.org/wiki/BASIC_Stamp), consultado el 13 de septiembre de 2021. De dominio público.

Banzi hizo consultas para utilizar un lenguaje de programación llamado Processing y aplicarlo para crear herramientas que permitieran codificar un microcontrolador.

En 2003, Hernando Barragán, estudiante de IDII, desarrollo una plataforma de creación de prototipos llamada Wiring. Esta plataforma contaba con un entorno de desarrollo integrado (IDE, por sus siglas en inglés) y una placa de circuitos listo para usar.

Figura 36.

Placa de desarrollo Wiring



Nota. Descripción de la placa de desarrollo Wiring. Obtenido de E. Williams (2020). *Wiring Was Arduino Before Arduino*. (https://hackaday.com/2016/03/04/wiring-was-arduino-before-arduino/), consultado el 13 de septiembre de 2021. De dominio público.

La placa de desarrollo de Wiring se basaba en el microcontrolador ATMega168. Barragán se graduó en 2005 y Banzi tomó como base su proyecto Wiring, invitando a otras personas y buscando bajar el costo de la placa de desarrollo; cambiando el microcontrolador por otro más económico y quitando de la placa lo que ellos consideraron no necesario.

Decidieron también adquirir el modelo de código abierto para el proyecto. El nombre del proyecto surge en un bar que visitaba Banzi, llamado Bar di Re Arduino. Arduino se ha vuelto una plataforma muy popular dada su versatilidad, cantidad de documentación que existe y entorno amigable que ofrece.

En 2011, Adafruit Industries, fabricante de placas de circuito impreso, estimó que se habían producido más de 300,000 unidades de placas Arduino. En 2013, la estimación iba por 700,000 unidades oficiales, sin contar en las placas no oficiales que se pueden comprar o fabricar desde cero.

En la actualidad, cuenta con muchos módulos que amplían su capacidad de aplicaciones como conectarse a:

- Wifi
- Ethernet
- Bluetooth
- Pantallas
- Teclados
- Matrices LED
- Otros

También cuenta con gran variedad de sensores que permiten registrar datos como:

- Humedad del suelo
- Humedad relativa del ambiente
- Temperatura ambiente
- Temperatura de un objeto
- Presión atmosférica

- Revoluciones de un motor y muchas más variables

Aunque Arduino fue pensado para un público objetivo de personas principiantes en temas de electrónica, su plataforma ha adquirido robustez que le permite tener aplicaciones que requieren precisión. Arduino ofrece varias ventajas entre las que se pueden mencionar:

- Economía: las placas Arduino son de bajo precio si se comparar con otras placas de microcontroladores. Tomando como referencia la tienda virtual Amazon Internacional, se puede encontrar Arduino Nano desde $5. Incluso se pueden encontrar paquetes de 10 Arduino Nano por $36, dando un costo por unidad de $3.6. Mientras que otras placas de microcontrolador como Tiva C se puede encontrar en esta misma tienda por $24 la unidad. Arduino incluso, al ser de código abierto, permite que la placa pueda ser ensamblada por el usuario, diseñando la placa según los requerimientos que requiera.

- Multiplataforma: el software que se utiliza para programar las placas de Arduino está disponible para Windows, MacOS y Linux.

- Simpleza en su entorno de programación: dado el origen de Arduino, su entorno de programación cuenta con un diseño simple e intuitivo para los usuarios.

- Software de código abierto: al ser un código abierto permite que se creen comunidades de programadores que ofrecen soluciones y propuestas para ciertas aplicaciones con Arduino. Cuenta con amplia documentación y también es flexible con programadores con más experiencia.

- Hardware abierto: a pesar de que el nombre Arduino se encuentra registrado como una marca, los diagramas de sus placas son de uso público; por lo que cualquier persona puede descargarlo, hacerle mejoras o adaptarlo a lo que necesite incluso darle nuevas características.

3.2. Hardware

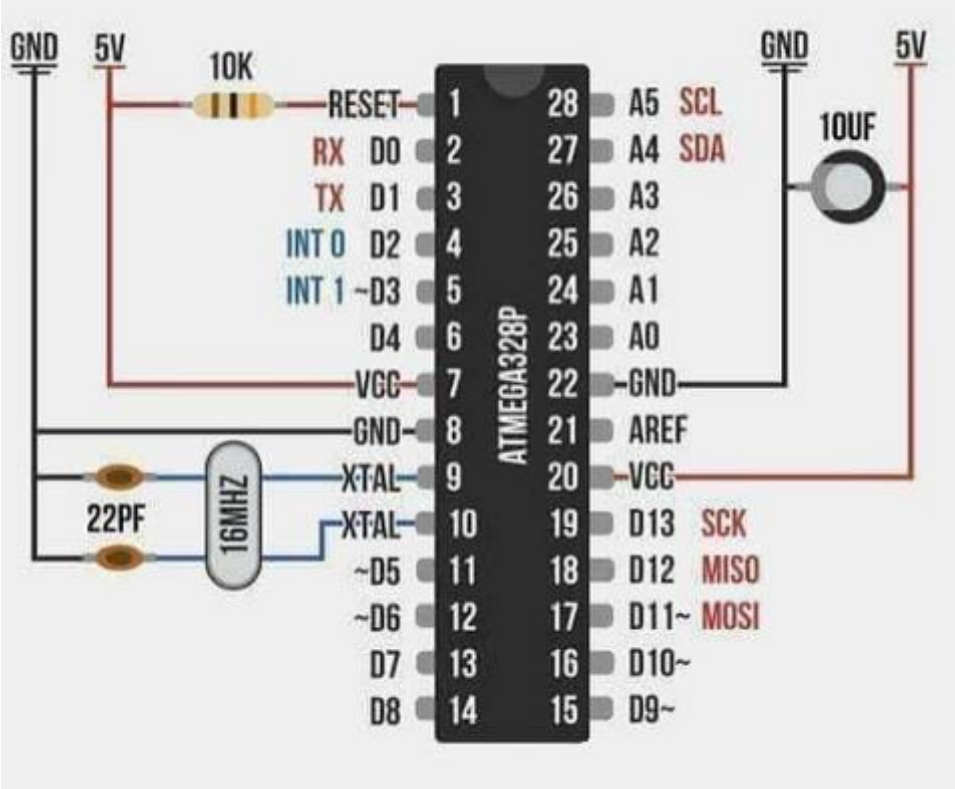
Arduino al ser una plataforma de uso libre los diseños de su hardware como lo son los esquemáticos y archivos de montaje de componentes se encuentran de forma gratuita en internet.

Las placas Arduino de forma general se componen de un microcontrolador, tarjetas flash, pines, funciones, un oscilador de cristal de 8 o 16 MHz y algunas versiones cuentan también con un regulador de voltaje de 5 v.

Arduino cuenta con alrededor de 26 placas de desarrollo. Entre las cuales las más comunes y comerciales son Mega 2560, UNO, NANO y CERO. En la Figura 37 se puede observar el diagrama básico de conexión para un Arduino utilizando el microcontrolador ATMega328P. Se requiere un oscilador de cristal de 16 MHz conectado a los pines 9 y 10, una resistencia de 10 KΩ para reset conectada al pin 1, un condensador de filtrado de ruido de alimentación conectado a los pines 20 y 22 y los condensadores del oscilador.

Figura 37.

Conexión básica de Arduino



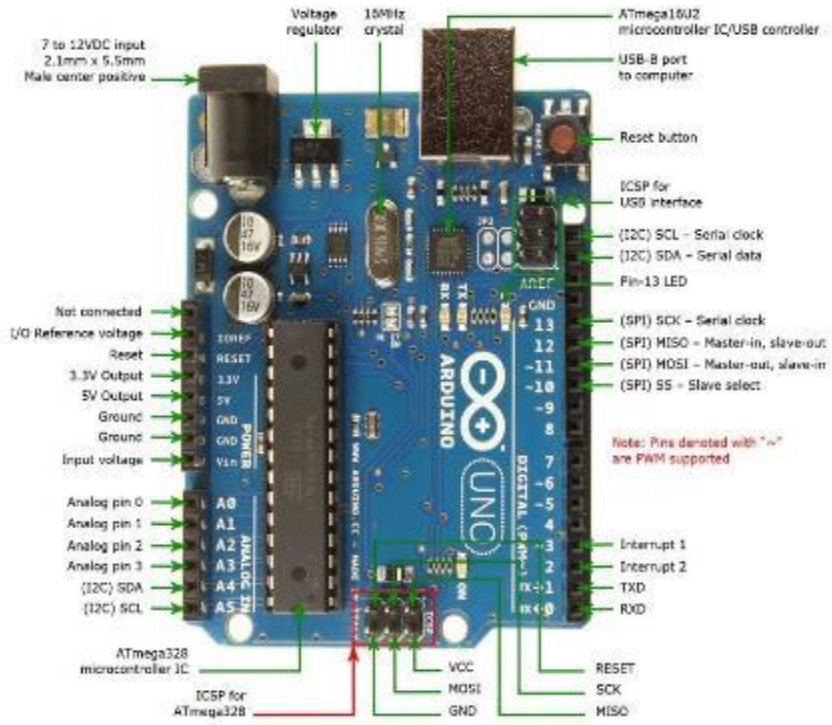
Nota. Descripción de la conexión básica de Arduino. Obtenido de S. Vinci (2015). *Taller de electrónica*. (https://tallerelectronica.com/page/4/), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

3.2.1. Placa de desarrollo Arduino UNO

Arduino UNO es una placa de desarrollo basada en el microcontrolador ATMega328P, elegida para este proyecto por su compatibilidad con el módulo LoRa, su capacidad de procesamiento y la capacidad de sus periféricos para los requerimientos del control remoto y el módulo control del motor.

Figura 38.

Diagrama de componentes Arduino UNO

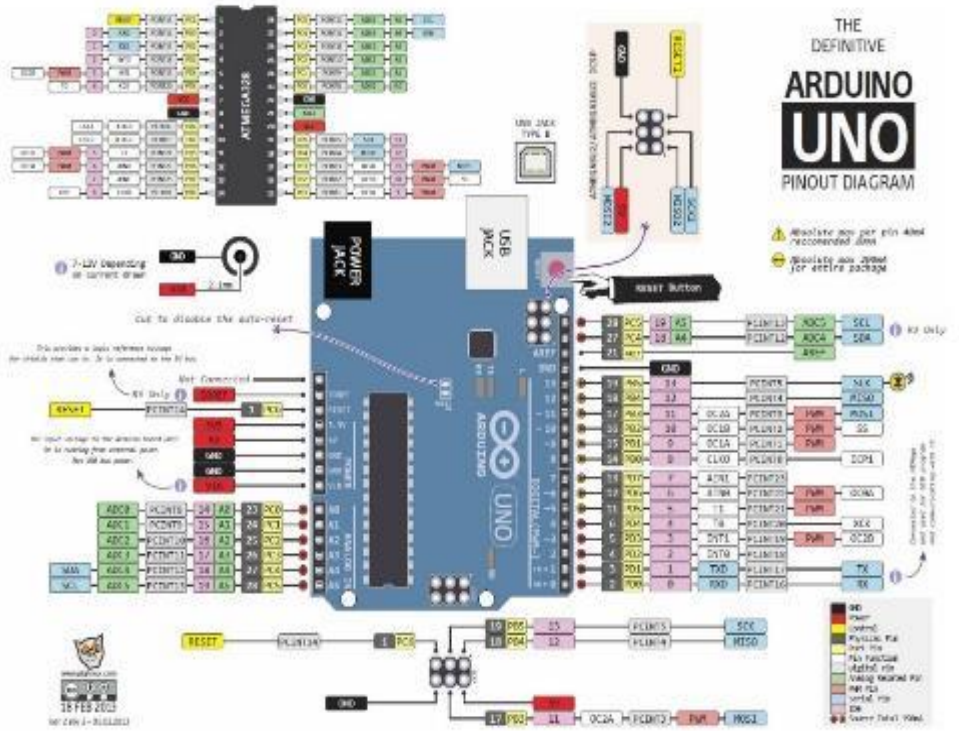


Nota. Descripción del diagrama de componentes de Arduino UNO. Obtenido de Jecrespom (2016). *Esquemas eléctricos*. (https://aprendiendoarduino.wordpress.com/tag/esquemas-electricos/), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

Arduino UNO tiene pines que pueden tener varias funciones distintas dependiendo de la forma en que se programen. Para lo cual se requiere de un mapa de pines que permite saber que pines están habilitados para lectura/escritura digital, entrada análoga, salida PWM, comunicación serie, comunicación I2C o conexión SPI. La Figura 39 muestra este diagrama de pines.

Figura 39.

Mapa de pines Arduino UNO

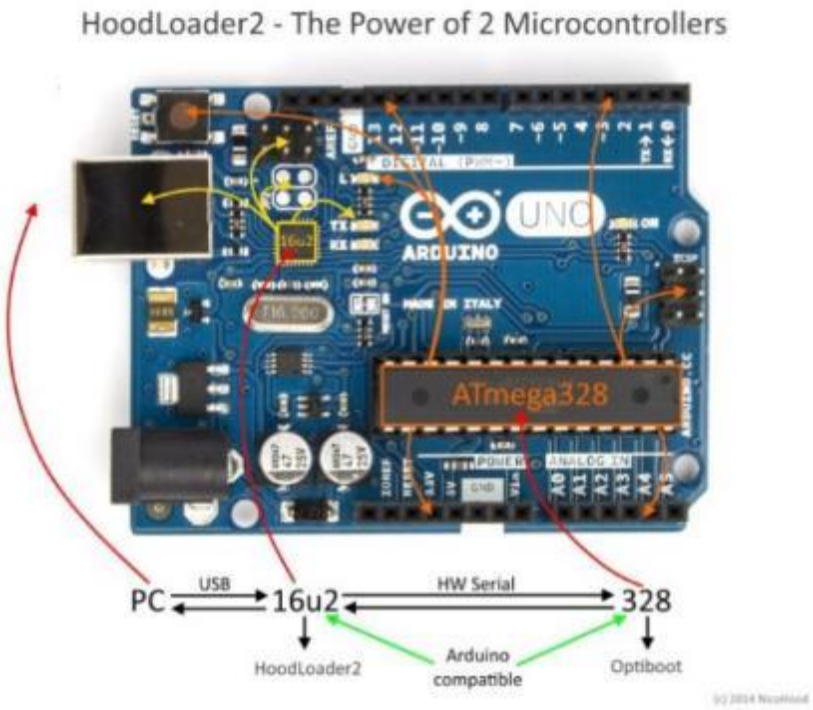


Nota. Descripción del diagrama de componentes de Arduino UNO. Obtenido de Jecrespom (2016). *Esquemas eléctricos*. (https://aprendiendoarduino.wordpress.com/tag/esquemas-electricos/), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

Arduino UNO utiliza el integrado ATMega16u2 o ATMega8u2 (dependiendo la versión de Arduino UNO), que permite dar una interfaz USB al Arduino y comunicar los datos mediante el puerto serie del microcontrolador ATMega328P, como se muestra en la Figura 40.

Figura 40.

Relación ATMega16u2 y ATMega328P Arduino UNO

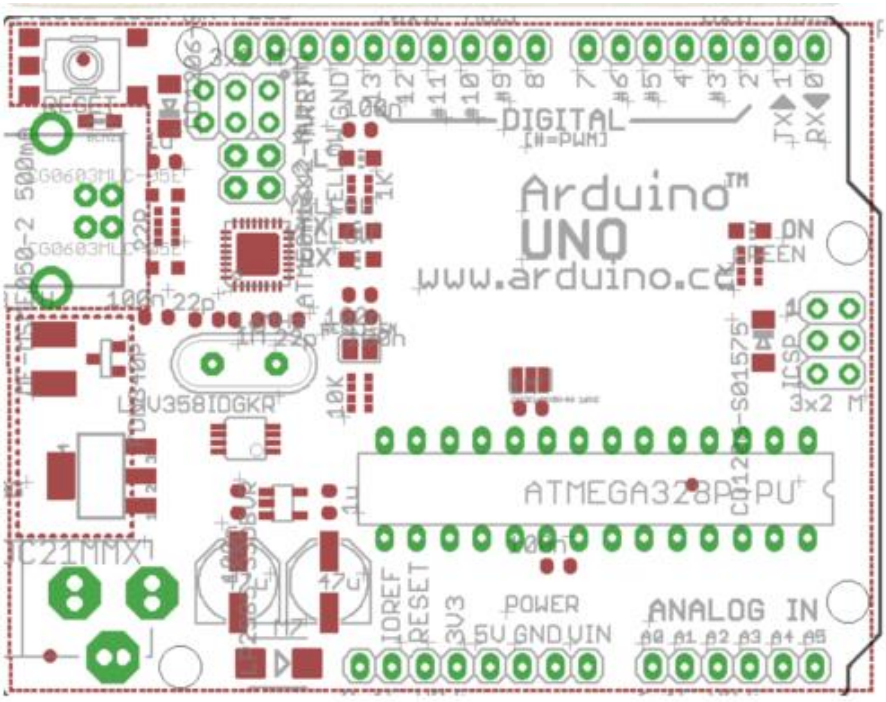


Nota. Relación ATMega16u2 y ATMega328P Arduino UNO. Obtenido de Hoodloader2 (2020). *Awesome Open Source*. (https://awesomeopensource.com/project/NicoHood/HoodLoader2), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

El esquemático de la placa de desarrollo Arduino UNO se encuentra disponible en la página oficial de Arduino para uso no comercial. Siendo la versión más reciente la que se muestra en la Figura 41.

Figura 41.

Esquemático Arduino UNO

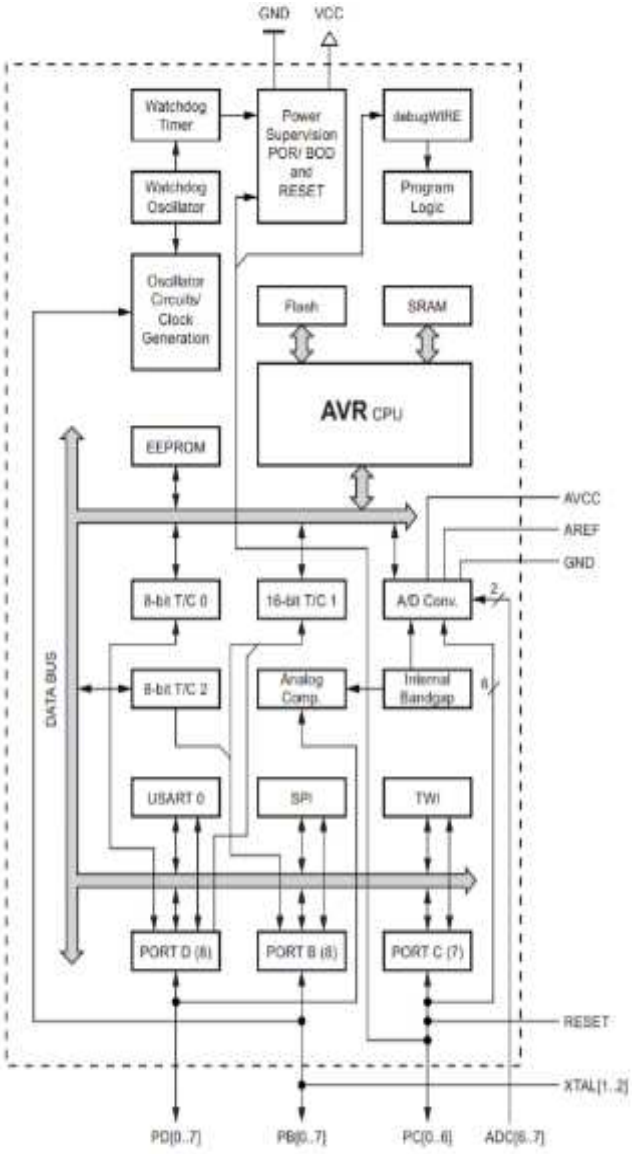


Nota. Descripción del esquemático de Arduino UNO. Obtenido de Jecrespom (2016). *Esquemas eléctricos*. (https://aprendiendoarduino.wordpress.com/tag/esquemas-electricos/), consultado el 10 de septiembre de 2021. De dominio público.

La Figura 42 muestra el diagrama de bloques interno del microcontrolador ATMega328P, permite observar de forma gráfica como cada sección está conectada o interconectada.

Figura 42.

Diagrama de bloques ATMega328P

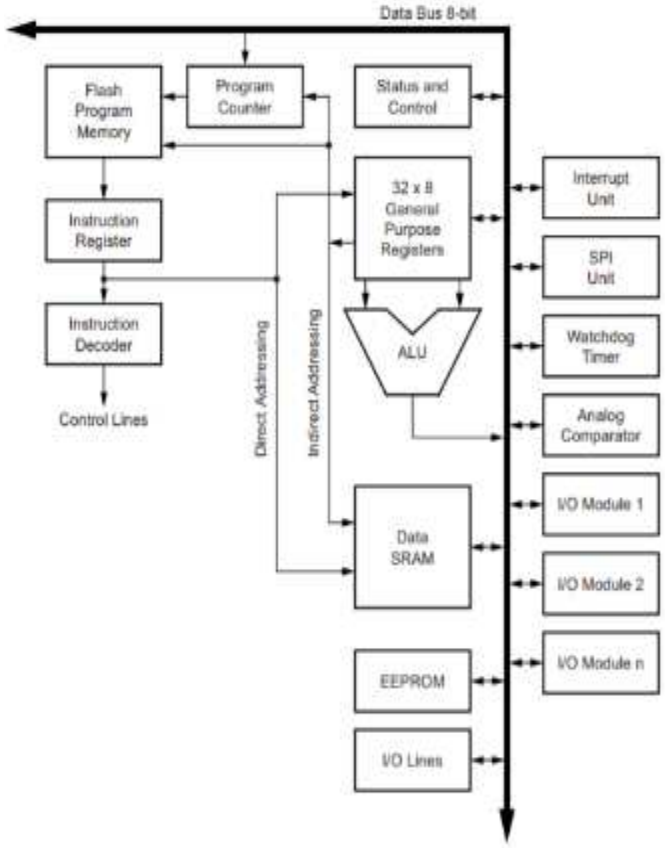


Nota. Descripción del diagrama de bloques de ATMega328P. Obtenido de Microchip (2015). *Microchip Technology*. (https://www.microchip.com/en-us/product/atmega328p), consultado el 13 de septiembre de 2021. De dominio público.

La Figura 43 muestra el diagrama de bloques de la arquitectura del AVR (CPU) del microcontrolador ATMega328P.

Figura 43.

Diagrama de bloques arquitectura ATMega328P



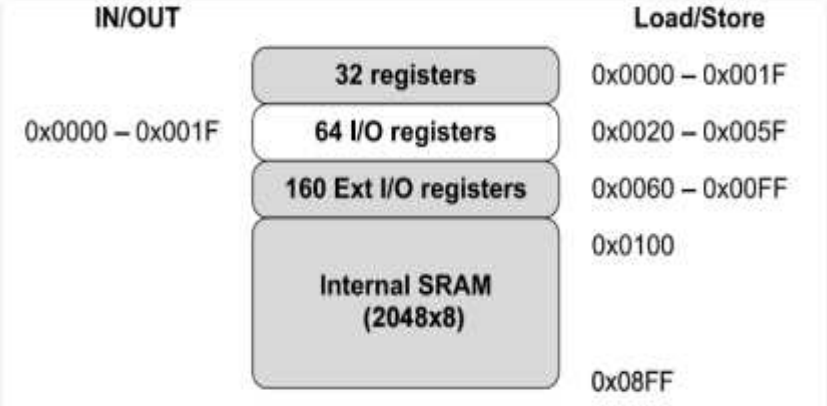
Nota. Descripción del diagrama de bloques de ATMega328P. Obtenido de Microchip (2015). *Microchip Technology*. (https://www.microchip.com/en-us/product/atmega328p), consultado el 13 de septiembre de 2021. De dominio público.

La memoria RAM del microcontrolador ATMega328P se divide en 4 partes, teniendo las primeras 32 localizaciones para registro de ficheros, las siguientes 64 localizaciones para memoria I/O (entrada/salida por sus iniciales en inglés),

estándar, las siguientes 160 localizaciones para memoria I/O extendida y las restantes localizaciones para memoria interna SRAM, como se muestra en la Figura 44.

Figura 44.

Distribución memoria RAM de ATMega328P



Nota. Descripción del diagrama de bloques de ATMega328P. Obtenido de Microchip (2015). *Microchip Technology*. (https://www.microchip.com/en-us/product/atmega328p), consultado el 13 de septiembre de 2021. De dominio público.

3.2.2. Comparación general de otras placas de Arduino

La comparación general de otras placas de Arduino se presenta en la siguiente Tabla:

Tabla 13.

Comparación placas de desarrollo Arduino

Arduino	Mega 2560	UNO	NANO	CERO
Microcontrolador	ATMega 2560	ATMega 328P	ATMega 328	ATSAMD 21G18
Tensión de funcionamiento	5 v	5 v	5 v	3.3 v
Voltaje recomendado	7 – 12 v	7 – 12 v	7 - 12 v	-
Voltaje limite	6 – 20 v	6 – 20 v	-	-
Pines E/S digitales	54	14	22	20
Pines E analógicos	16	6	8	6
Corriente por pin E/S	20 mA	20 mA	-	7 mA
Corriente por pin 3.3 v	50 mA	50 mA	40 mA	-
Memoria flash	256 KB	32 KB	32 KB	256 KB
SRAM	8 KB	2 KB	2 KB	32 KB
EEPROM	4 KB	1 KB	1 KB	-
Velocidad de reloj	16 MHz	16 MHz	16 MHz	48 MHz
Longitud	101.52 mm	68.6 mm	45 mm	68 mm
Ancho	53.3 mm	53.4 mm	18 mm	53 mm
Peso	37 g	25 g	7 g	12 g

Nota. Comparación de placas de desarrollo Arduino. Obtenido de Arduino CC (2015). *Comparación de placas de desarrollo*. (https://www.arduino.cc/), consultado el 13 de septiembre de 2021. De dominio público.

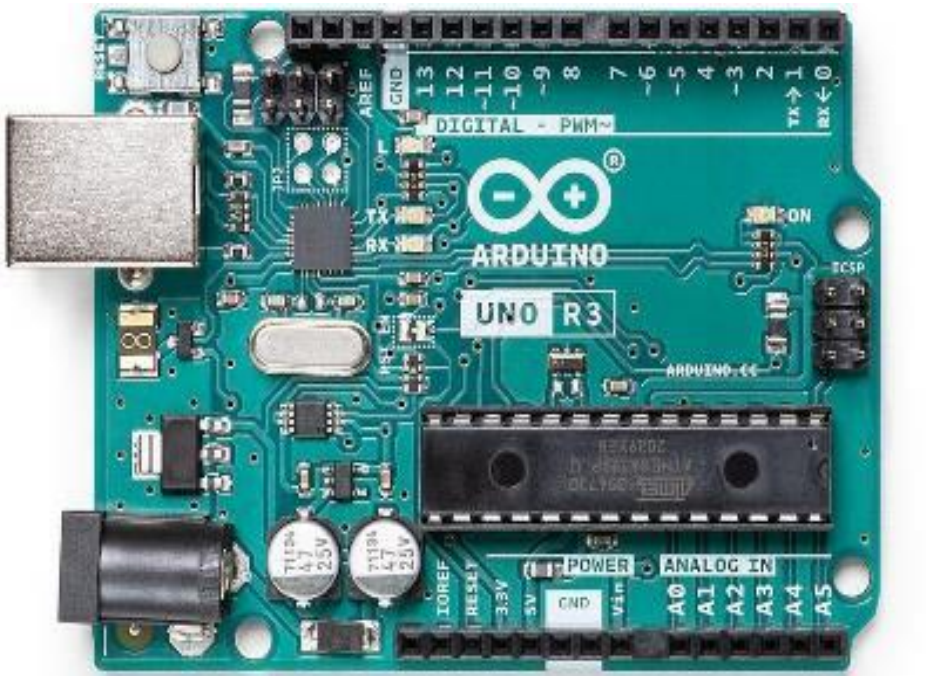
Figura 45.

Arduino Mega 2560

Nota. Descripción de placa Arduino Mega 2560. Obtenido de Arduino Store (2021). *Arduino Mega 2560 Rev3*. (https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3), consultado el 13 de septiembre de 2021. De dominio público.

Figura 46.

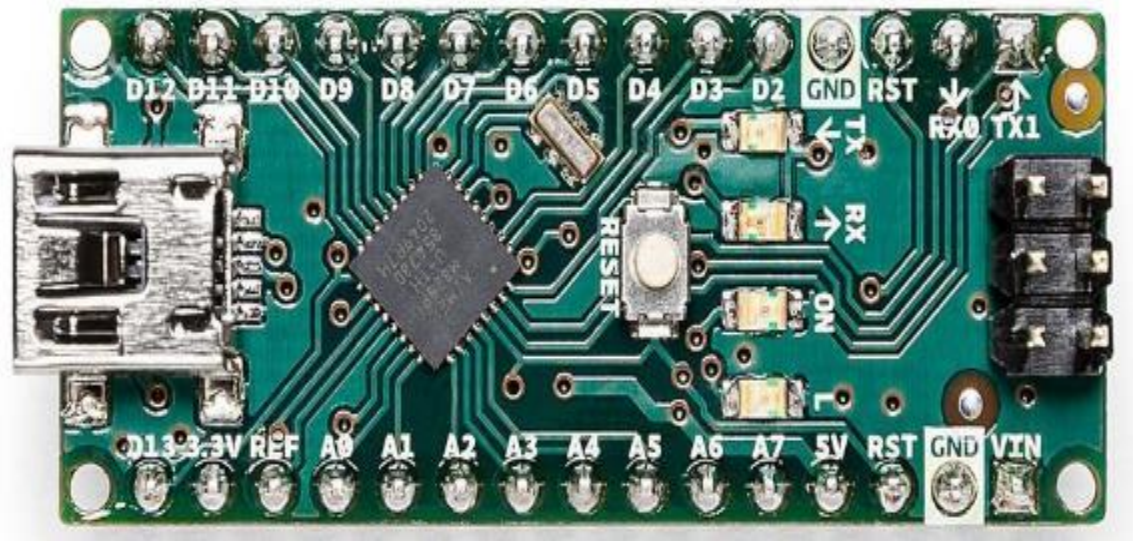
Arduino UNO



Nota. Descripción de placa Arduino UNO. Obtnido de Arduino Store (2021). *Arduino Mega 2560 Rev3*. (https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3), consultado el 13 de septiembre de 2021. De dominio público.

Figura 47.

Arduino Nano



Nota. Descripción de placa Arduino Nano. Obtenido de Arduino Store (2021). *Arduino Mega 2560 Rev3*. (https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3), consultado el 13 de septiembre de 2021. De dominio público.

Figura 48.

Arduino Cero

Nota. Descripción de placa Arduino Cero. Obtenido de Arduino Store (2021). *Arduino Mega 2560 Rev3*. (https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3), consultado el 13 de septiembre de 2021. De dominio público.

3.3. Lenguaje de programación de Arduino

El software de Arduino está dividido en 2 partes: el entorno de desarrollo integrado y el cargador de arranque.

3.3.1. Entorno de desarrollo integrado

También conocido como IDE dadas las siglas en inglés de Integrated Development Environment. Un IDE es una aplicación o herramienta que permite al usuario programar una placa.

El IDE Arduino está basado en el lenguaje de programación “Processing”, el cual como se ha mencionado antes es de código abierto. Processing está basado en el lenguaje Java sin embargo utiliza sintaxis más simple y permite que el modelo de programación sea más gráfico para que quien lo utiliza pueda entender el esquema y funcionamiento general, aunque tenga poca experiencia.

Un programa para Arduino tiene un esquema básico que consta de 2 secciones.

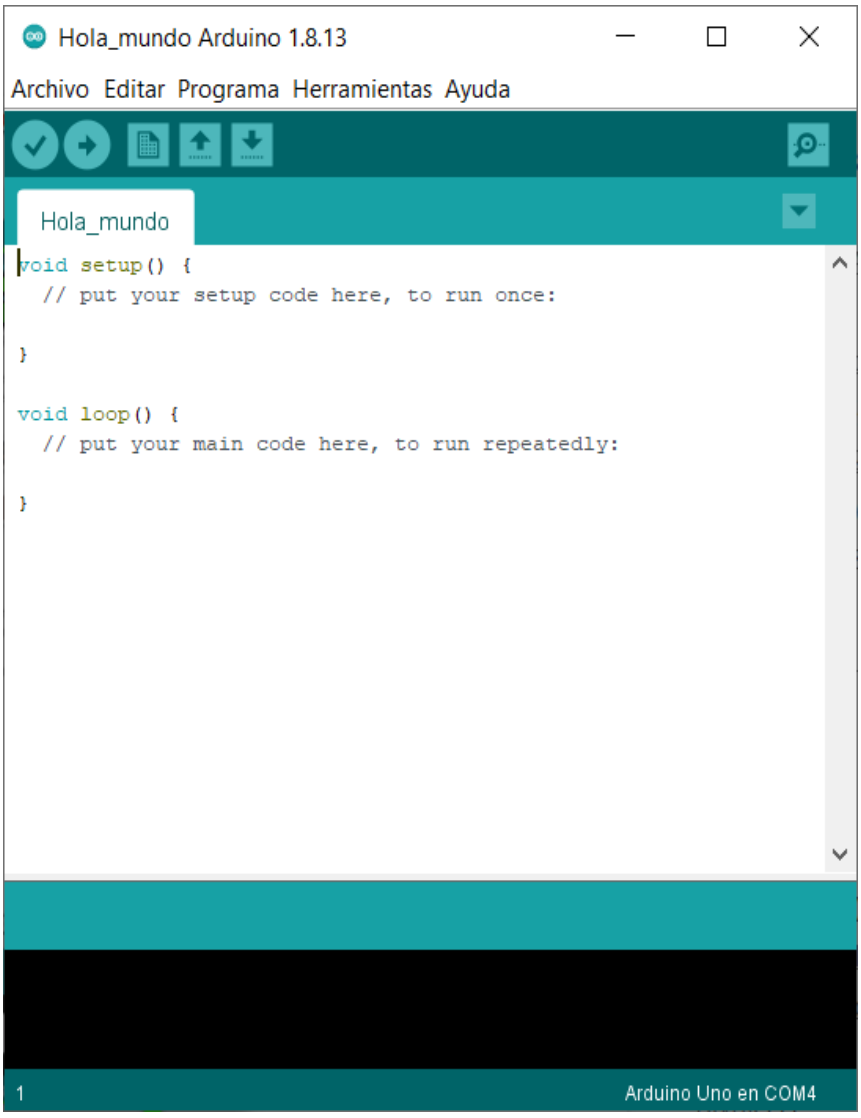
- Setup, en esta sección se programa toda la configuración que tendrá la placa para su funcionamiento una vez que el programa empiece a correr.

- Loop, en esta sección se escribe el programa y este se repite de forma cíclica de acuerdo con como el programador lo haya indicado realizando cada una de las instrucciones colocadas dentro de este bloque.

La versión más actualizada del IDE Arduino es 1.8.13 y se encuentra de forma gratuita en la página web oficial de Arduino.

Figura 49.

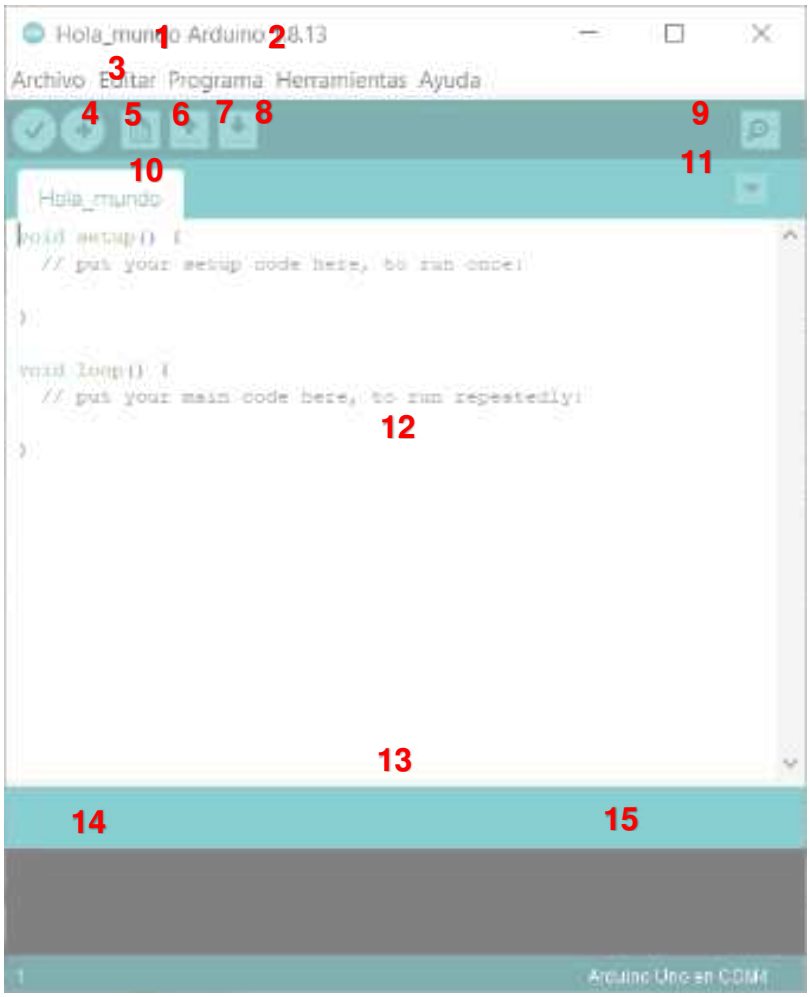
IDE Arduino



Nota. Descripción del IDE Arduino. Elaboración propia, realizado con IDE Arduino versión 1.8.13.

Figura 50.

Partes de IDE Arduino



Nota. Descripción del IDE Arduino. Elaboración propia, realizado con IDE Arduino versión 1.8.13.

En la Figura 50 se encuentra identificado parte que compone el IDE Arduino, siendo estas partes:

- Nombre del archivo o programa
- Versión de IDE Arduino

- Menú
- Verificador del código
- Compila y carga el programa al Arduino
- Crear nuevo programa
- Abrir un programa
- Guardar programa
- Abre monitor serial
- Pestaña actual
- Menú de pestañas
- Editor
- Consola de errores
- Línea actual del código
- Modelo y puerto COM de Arduino seleccionado

IDE Arduino cuenta también con herramientas como el monitor serie que permite por medio de una consola tener comunicación serial con el Arduino utilizando el cable USB y mostrando los valores en forma de caracteres o como el graficador serial que grafica las variables obtenidas mediante la comunicación serial con el Arduino.

El administrador de bibliotecas permite descargar librerías para funciones específicas que se deseen realizar con el Arduino por medio del IDE.

Algunos ejemplos de librerías son:

- Los que permiten controlar servomotores
- Leer y mapear teclados
- Leer pantallas táctiles
- Utilizar pantallas LCD

- Utilizar pantallas OLED
- Leer sensores
- Utilizar matrices LED
- Reducir el consumo energético del Arduino deshabilitando funciones
- Otros

El IDE Arduino permite también instalar bibliotecas de terceros o que no se encuentran dentro de su administrador, mediante la función incluir librería; siendo requisito que las librerías que se deseen incluir estén comprimidas en formato .zip.

Los programas creados en el IDE Arduino tienen la extensión ino.

3.3.2. Cargador de arranque

- Conocido en inglés como bootloader, es el programa que se ejecuta luego de que el microcontrolador de enciende.

- Es cargado al Arduino mediante una computadora de forma serial y con ayuda del entorno de desarrollo integrado (IDE).

- Bootloader es el programa que permite cargar código al Arduino sin necesidad de hardware adicional.

- Este programa se ejecuta cuando el microcontrolador se enciende o se pulsa el botón de reset, luego de que es ejecutado busca el programa cargado dentro de la memoria flash del Arduino y lo ejecuta.

- Cuando se ejecuta parpadea el LED del Arduino integrado en la placa.

- Bootloader ocupa 0.5 KB de los 32KB de memoria flash que tiene el microcontrolador ATMega328P.

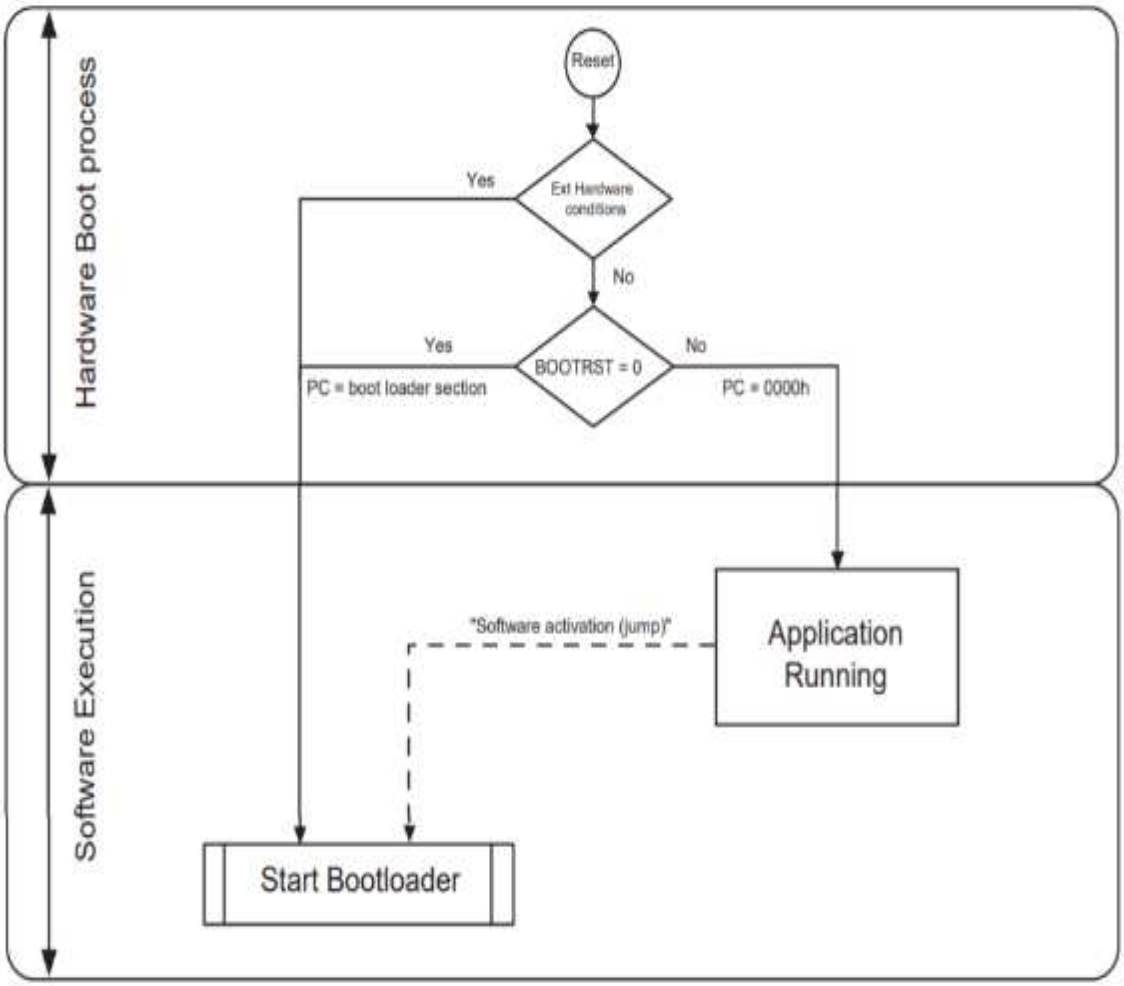
- El bootloader se comunica mediante el protocolo STK500 que es propio de la empresa Atmel.

- Mientras se está ejecutando este programa, el puerto serie funciona a 19200 baudios.

La Figura 51 muestra diagrama del proceso de activación del bootloader.

Figura 51.

Diagrama de activación de bootloader



Nota. Descripción del diagrama de activación de bootloader. Obtenido de Microchip Technology (2015). *ATMega328P.* (https://www.microchip.com/en-us/product/atmega328p), consultado el 13 de septiembre de 2021. De dominio público.

4. DISEÑO DE CONTROL REMOTO Y MÓDULO DE CONTROL PARA MOTOR

4.1. Componentes

Los componentes se presentan divididos por control remoto LoRa y el módulo de control de motor.

4.1.1. Control remoto LoRa

- El control remoto utiliza como base de funcionamiento una placa de desarrollo Arduino Uno y un Módulo LoRa. El Módulo indicado para esta aplicación es el Módulo LoRa versión 1.4, sin embargo, debido a desabastecimiento de componentes y atrasos de envío por la pandemia de Covid-19, se ha optado por utilizar el Módulo LoRa GPS v 1.3.

- Como se ha descrito en el capítulo dos, ambos módulos ofrecen el mismo desempeño en cuanto a la comunicación, envío y recepción de datos. Con una pequeña diferencia de consumo de energía y que el Módulo GPS ofrece la posibilidad de obtener sus coordenadas geográficas utilizando otras librerías de programación.

- El control remoto le presenta al operador de una forma gráfica los valores de revoluciones por minuto que tiene el motor de riego, la presión de la tubería a la salida del motor y la presión de la tubería en el extremo donde se encuentran conectados los aspersores.

- Las revoluciones por minuto le permiten al operario saber que el motor no está trabajando forzado, cada modelo de motor tiene una hoja de datos de operación donde se deberá verificar cuales son los valores normales de operación para optimizar el tiempo de vida de sus partes mecánicas e hidráulicas.

- La presión de la tubería en la salida del motor le permite determinar si hay algún inconveniente en la trayectoria de la tubería; debido a la longitud o cambios de diámetro de la tubería hay una diferencia en la presión entre la salida del motor y la que llega donde están los aspersores.

- Si la diferencia entre las presiones es muy grande, el operario tendrá la opción de apagar el sistema y recorrerlo para determinar si hay alguna ruptura en la tubería y que ese sea el motivo por el cual se pierde la presión durante la trayectoria.

    - La presión en la tubería de los aspersores, adicional de la toma de decisiones descrita en el párrafo anterior, permite que el sistema proporcione la presión correcta para el funcionamiento óptimo de los aspersores a fin de que el patrón de aspersión sea el correcto.

- Las revoluciones por minuto y las presiones se muestran utilizando una pantalla TFT de 1.8 pulgadas.

    - Las pantallas TFT tienen la característica de tener un alto contraste, un ángulo amplio de visión y un tamaño compacto.

- Para el envío de los diferentes comandos del control remoto al módulo de control del motor se utilizar 4 botones, proporcionando los mensajes:

- ON
- OFF
- UP
- DOWN

    - Ejecutan el encendido
    - Apagado
    - Aceleración
    - Desaceleración del motor respectivamente

4.1.2. Módulo de control de motor

Al igual que el control remoto, el módulo de control del motor utiliza como base de funcionamiento una placa de desarrollo Arduino UNO y un módulo LoRa GPS versión 1.3 (considerando el mismo factor de selección que con el control remoto).

El módulo ha sido diseñado de tal forma que permita una fácil conexión de los diferentes periféricos, como lo son las entradas de los sensores, las salidas de los módulos relé y la salida hacia el servomotor.

4.2. Presupuesto

El presupuesto para la elaboración del control remoto LoRa se presenta a continuación.

4.2.1. Control remoto LoRa

En la siguiente tabla se describen los componentes, cantidades y precio de cada componente para el control remoto LoRa.

Tabla 14.

Presupuesto control remoto LoRa

Cantidad	Descripción	Precio [Q]	Subtotal [Q]
1	Arduino UNO	102.00	102.00
1	Módulo LoRa	440.00	440.00
1	Caja de empalme	45.00	45.00
1	Pantalla TFT 1.8”	40.00	40.00
4	Pulsador impermeable	6.50	26.00
5	Resistencia 1 KΩ	0.50	2.50
4	Resistencia 10 KΩ	0.50	2.00
2	Terminal 2 posiciones	1.90	3.80
1	Interruptor on/off	3.75	3.75
1	Porta baterías AA	6.00	6.00
2	2xBatería AA	9.50	19.00
6	4xJumper	3.50	21.00
1	Metro de termoencogible 3 mm.	5.00	5.00
1	PCB	25.00	25.00
	TOTAL		741.05

Nota. Descripción del presupuesto del control remoto LoRa. Elaboración propia, realizado con Word.

Tabla 15.

Presupuesto módulo de control remoto LoRa

Cantidad	Descripción	Precio [Q]	Subtotal [Q]
1	Arduino UNO	102.00	102.00
1	Módulo LoRa	440.00	440.00
1	Caja de empalme	27.00	27.00
1	Módulo relé de 2 canales	28.00	28.00
1	Servomotor	80.00	80.00
1	Interruptor on/off	3.75	3.75
5	Terminal 3 posiciones	3.00	15.00
1	Metro de termoencogible 3mm	5.00	5.00
1	Porta baterías AA	6.00	6.00
2	2xBatería AA	9.50	19.00
6	4xJumper	3.50	21.00
2	PCB	15.00	30.00
		TOTAL	776.75

Nota. Descripción del presupuesto del módulo de control remoto LoRa. Elaboración propia, realizado con Word.

4.3. Código de programación

Los códigos empleados para programar el control remoto y el módulo de control de motor tienen una estructura como se muestra en la Figura 52.

Figura 52.

Esquema general de código de programación

Nota. Descripción del esquema general de código de programación. Elaboración propia, realizado con Word.

Para poder enviar o recibir mensajes a través del protocolo LoRa se utiliza la librería LoRa. A continuación, se describen los principales comandos utilizados con esta librería.

- SetPins: permite establecer cuáles son los pines para la comunicación entre la placa Arduino UNO y el módulo LoRa. Recibe los parámetros de chip select, reset, pin de interrupción.
  LoRa.setPins(10, 9 ,2).

- Begin: activa la comunicación entre la placa Arduino UNO y el módulo LoRa, utilizando los pines indicados con el comando anterior (setPins). Recibe el parámetro que indica la frecuencia de operación de la comunicación.
  LoRa.begin(915E6).

- beginPacket: inicia el paquete con el protocolo lora. No recibe parámetros.
  LoRa.beginPacket().

- write: agrega al paquete un byte de información. Recibe como parámetro el byte que se desea escribir en el paquete, pueden ser escritos varios bytes y se leerán en el orden que sean escritos.
  LoRa.write(0xFF).

- print: agrega la carga útil al paquete que se desea transmitir. Recibe como parámetro varios tipos de datos como String.
  LoRa.print (carga útil a ser enviada en el paquete).

- endPacket: finaliza la construcción del paquete, encapsulándolo y enviándolo. No recibe ningún parámetro.
  LoRa.endPacket().

- parsePacket: analiza el paquete recibido. No recibe parámetros y devuelve un entero con el tamaño del paquete.
  LoRa.parsePacket().

- read: permite leer cada uno los bytes puestos como encabezado del paquete recibido. No recibe parámetros y devuelve el byte recibido.
  LoRa.read().

- available: utilizado para obtener la información de la carga útil del paquete recibido, se utiliza en combinación con el comando de lectura. No recibe ningún parámetro y devuelve un valor lógico verdadero mientras está recibiendo la carga útil, cuando la carga útil se termina de recibir devuelve un valor lógico falso.
  LoRa.available().

- La pantalla TFT: es controlada utilizando la librería “TFT”. A continuación, se describen los principales comandos utilizados con esta librería.

  - TFT: permite establecer los pines de conexión para la pantalla, adicional se le debe asignar un nombre al objeto que será utilizado para controlarla. Recibe como parámetros chip select, pin DC y reset.
    TFT NombrePantalla = TFT(10, 7, 8).

  - begin: inicia la comunicación con la pantalla y enciende a la misma. No recibe ningún parámetro.
    NombrePantalla.begin().

  - background: permite establecer el color de fondo de la pantalla. Recibe como parámetros el valor del color en rojo, verde y azul.
    NombrePantalla.background(R, G, B).

  - stroke: establece el color de la fuente que se desea escribir en la pantalla. Recibe como parámetros el valor del color en rojo, verde y azul.
    NombrePantalla.stroke(R, B, B).

- setTextSize: establece el tamaño del texto a mostrarse en la pantalla. Recibe como parámetros un número del 1 al 5, cada número representa 10 pixeles de tamaño.
  NombrePantalla.setTextSize(2).

- setCursor: permite colocar el cursor de la pantalla en una posición específica para escribir a partir de allí. Recibe como parámetro las coordenadas de los pixeles para el cursor.
  NombrePantalla.setCursor(20, 30).

- print: muestra en la pantalla el texto ingresado. Recibe como parámetro una cadena de caracteres.
  NombrePantalla.print (Texto a mostrar).

Dentro del bloque de constantes de los programas se establecen:

- Los pines de funcionamiento del módulo Lora
- Los pines de funcionamiento de la pantalla TFT
- Los bytes que representan el distintivo del nombre del dispositivo
- El destino al cual quieren establecer la comunicación
- La frecuencia de operación del radio Lora,
- Los pines de entrada/salida (para botones, lectura de sensores, salida del servomotor y salida de módulos relé).

  - Algunos sensores de presión o revoluciones tienen una ecuación para convertir el voltaje de lectura en psi o rpm, respectivamente.

- En la sección de constantes se pueden definir los valores que permitan hacer la operación necesaria para la conversión de factores.

- En la sección de variables se declaran todas las variables que sean necesarias para el funcionamiento del programa, como variables para almacenar los valores leídos en los paquetes, el estado de los pines de entrada/salida, entre otras.

- En el setup del programa se ejecutan todos los comandos necesarios para el correcto funcionamiento de la placa de desarrollo Arduino UNO y los módulos conectados al mismo.

- Se establece un conjunto de funciones que permitan que el funcionamiento del programa sea el correcto y se encuentre ordenado.

- Se establecen funciones que coloquen el radio en modo de escucha, en modo de transmisión, inicien el empaquetado y escriban toda la información necesaria para el envío de un paquete, y una función que determine los pasos a seguir cuando un paquete sea recibido y como procesar la información recibida.

- Por último, el programa principal establece todos los comandos y expresiones necesarias para el funcionamiento del control remoto y el módulo control del motor.

4.4. Placas y diagramas de conexión

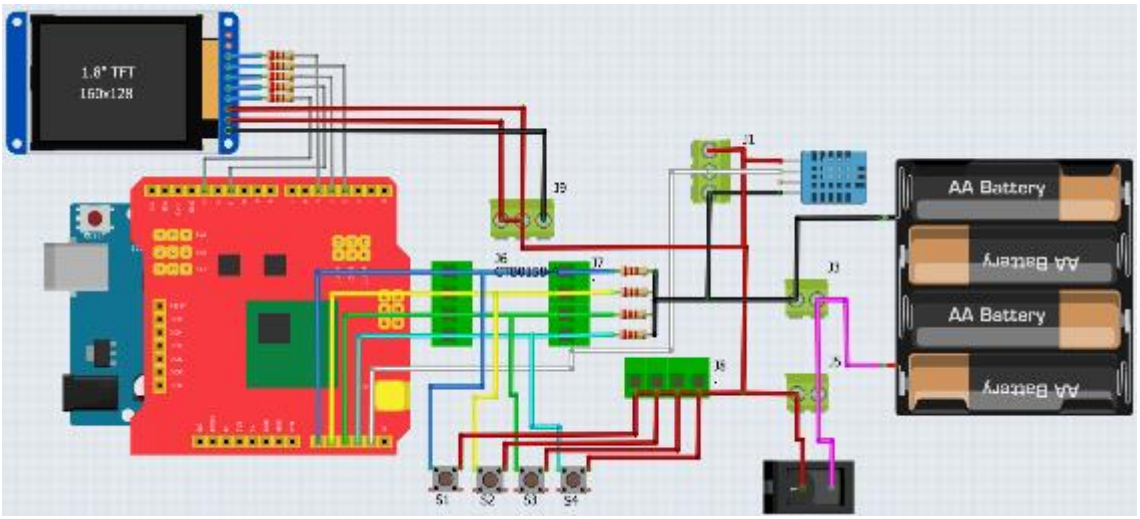
Las placas y diagramas de conexión se presentan a continuación pera el control remoto y el módulo de control de motor.

4.4.1. Control remoto

El diagrama de conexión del control remoto se presenta en la siguiente Figura.

Figura 53.

Diagrama de conexión del control remoto



Nota. Descripción del diagrama de conexión del control remoto. Elaboración propia, realizado con Fritzing.

Explicación del diagrama que se presenta en la Figura 53:

- La terminal J3 representa la conexión de alimentación para la pcb del control remoto.

- La terminal J5 es la conexión para un interruptor que se encarga de encender y apagar el control remoto y todos sus componentes.

- La terminal J6 sirve para establecer la conexión desde la pcb hacia el Arduino UNO en los pines A0, A1, A2 y A3.

    - Estos pines dentro del programa corresponden a las entradas de los botones.

- Cada uno de los botones identificados como S1, S2, S3 y S4 se conectan a la terminar J7.

    - Dicha terminal esta a su vez conectada a 4 resistencias de 10 KΩ que cumplen la función de darle una tierra virtual a los pines de entrada del Arduino UNO para evitar lecturas falsas que afecten el funcionamiento en general.

El sensor DHT11 mostrado en la Figura 53 es solo con fines ilustrativos.

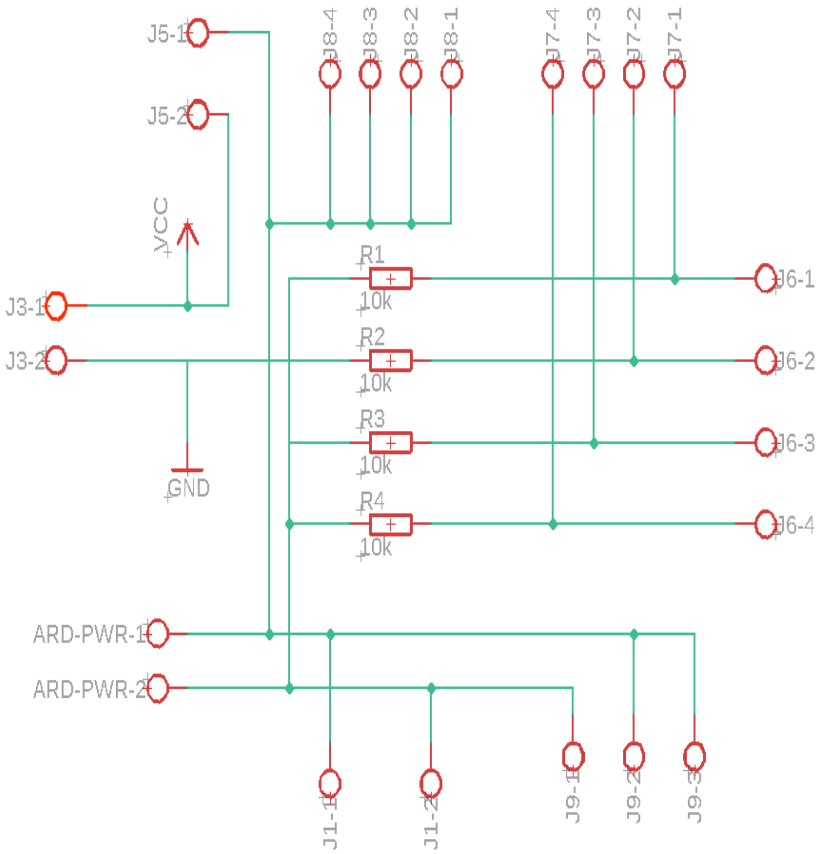
- La terminar J1 establece un periférico del control remoto que permite la conexión del sensor de presión, suministrando el voltaje requerido por este y teniendo una posición para la entrada de la medición.

- La terminal J9 se utiliza para alimentar la pantalla TFT, esta a su vez está conectada a los pines 3, 4, 5, 11 y 13 del Arduino UNO mediante 5 resistencias de 1 KΩ, debido a que, según las especificaciones de la

pantalla, esta funciona con un voltaje de 3v. Por lo que es necesario la utilización de resistencias como protección para que no se dañe.

Figura 54.

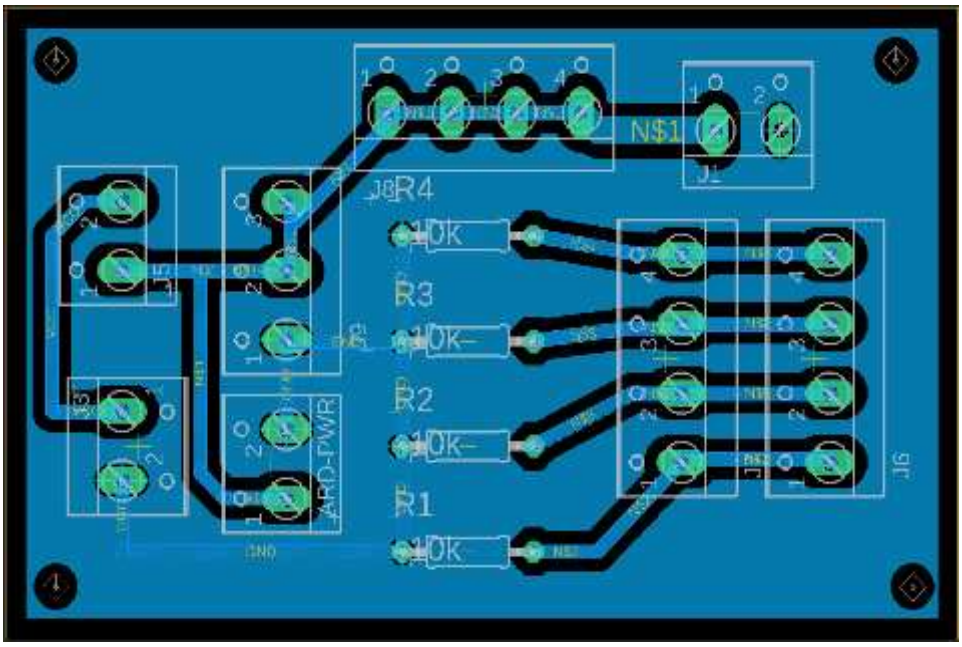
Esquemático de placa 1 del control remoto



Nota. Descripción del esquemático de placa 1 del control remoto. Elaboración propia, realizado con Eagle.

Figura 55.

PCB de placa del control remoto



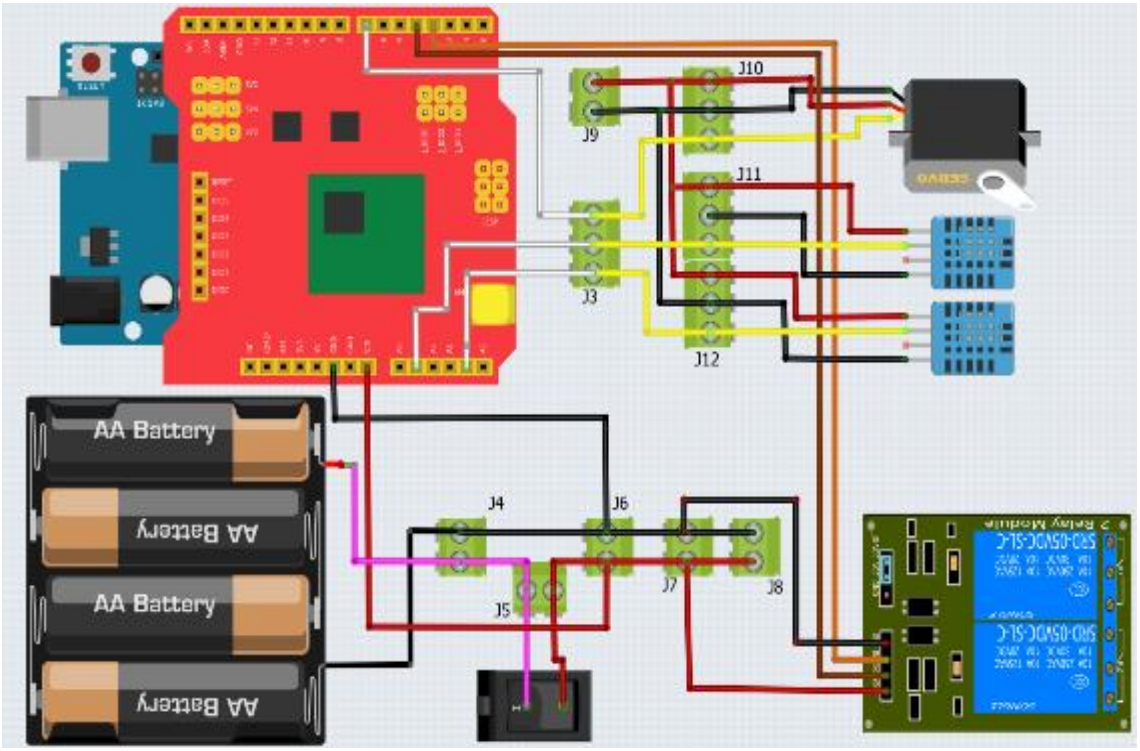
Nota. Descripción de PCB de placa del control remoto. Elaboración propia, realizado con Eagle.

4.4.2. Módulo de control de motor

El diagrama de conexión del módulo de control remoto se describe en la siguiente Figura.

Figura 56.

Diagrama de conexión del módulo de control del motor



Nota. Descripción del esquemático de placa 1 del control remoto. Elaboración propia, realizado con Fritzing.

Los sensores DHT11 mostrados en la Figura 56 son solo con fines ilustrativos, muestra la forma de conexión de un sensor de presión y un sensor de revoluciones por minuto.

- El módulo de control del motor está diseñado para tener 2 conexiones de terminal, cada una permite alimentar un sensor de 5v y hacer una lectura analógica para enviarla al control remoto y que el operador pueda ver en tiempo real la presión de salida de la tubería del motor y revoluciones del motor.

- Estas terminales están descritas como J11 y J12.

- El módulo cuenta con una salida para un servomotor que es el encargado de acelerar o desacelerar de forma mecánica el motor (como se menciona en la sección 1.3.1), controlado por el operador del control remoto.

  - La salida para la alimentación y señal del servomotor se identifica con la terminal J10.

- El módulo relé se encarga de encender el motor, mediante el contacto eléctrico durante un tiempo determinado que permita el arranque de este utilizando uno de los canales.

  - El otro canal del módulo es el que apaga el motor abriendo el contacto eléctrico.

  - Este módulo es alimentado mediante la terminal J7, y está conectado a los pines 3 y 4 del Arduino UNO.

  - La alimentación general del módulo de control del motor se establece en la terminal J4, y la terminal J5 se conecta al interruptor general para encender o apagar los dispositivos.

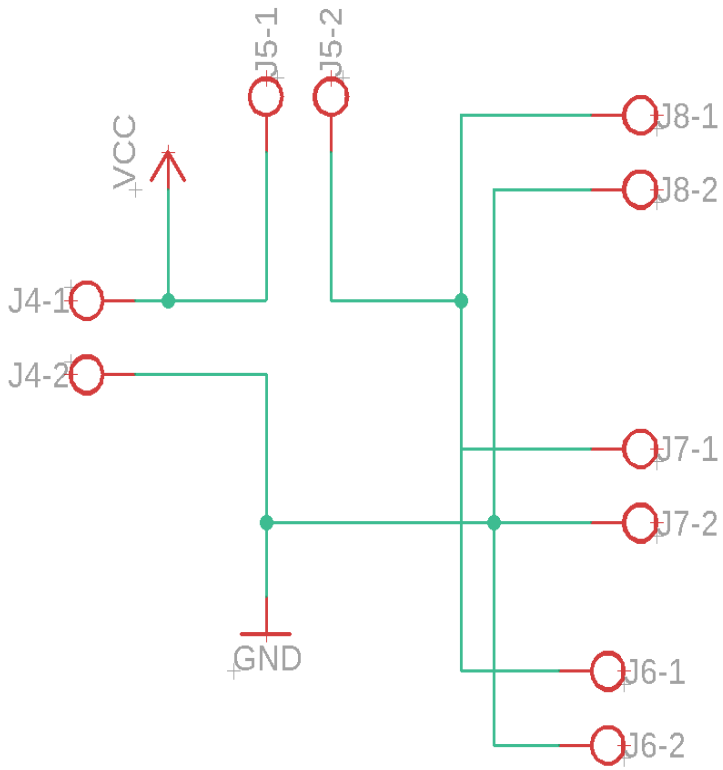
  - El Arduino UNO y el módulo LoRa GPS son alimentados mediante la terminal J6.

  - La terminal J8 establece una salida de voltaje para ser conectad a la terminal J9 y alimentar la pcb de sensores y periféricos.

- La terminal J3 permite la conexión de los pines de señal que controla el servomotor y realiza las mediciones analógicas de los sensores.

Figura 57.

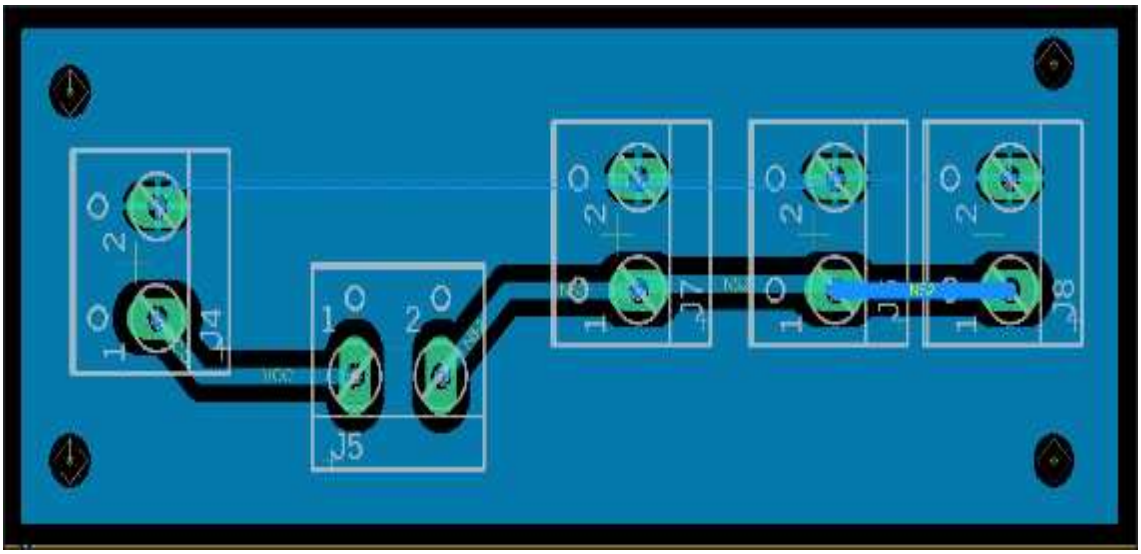
Esquemático de placa 1 del módulo de control del motor



Nota. Descripción del esquemático de placa 1 del control del motor. Elaboración propia, realizado con Eagle.

Figura 58.

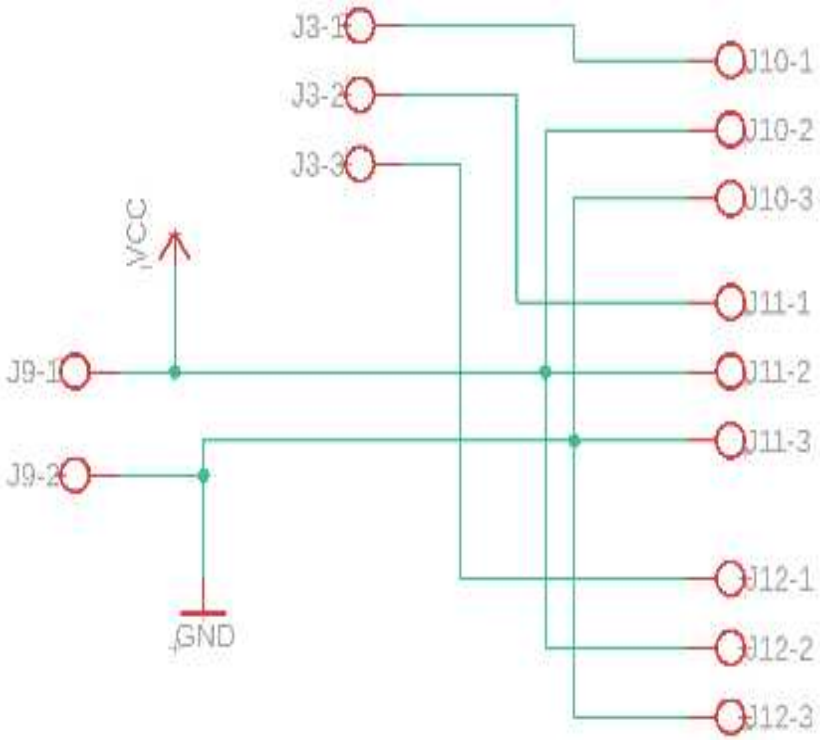
PCB de placa 1 del módulo del control del motor



Nota. Descripción de PCB de placa del control del motor. Elaboración propia, realizado con Eagle.

Figura 59.

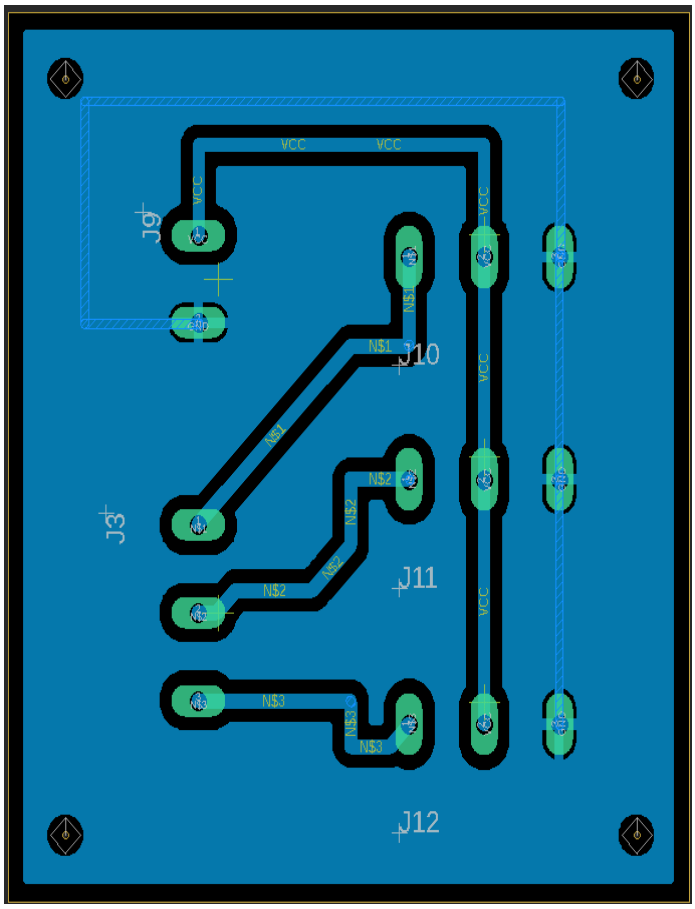
Esquemático de placa 2 del módulo de control del motor



Nota. Descripción del esquemático de placa 2 del módulo de control del motor. Elaboración propia, realizado con Eagle.

Figura 60.

PCB de placa 2 del módulo del control del motor



Nota. Descripción de PCB de placa del control remoto. Elaboración propia, realizado con Eagle.

5. PRUEBAS EN CAMPO ABIERTO

5.1. Parámetros de medición

Los parámetros de medición se describen a continuación, elevación, indicador de fuerza de señal recibida y relación señal / ruido.

5.1.1. Elevación

Se utiliza la altura sobre el nivel del mar para considerar la diferencia de altura entre el transmisor y el receptor del enlace.

En la implementación de un sistema de control remoto y control de motor será necesario analizar la topología del terreno para determinar las mejores ubicaciones para la antena del control de motor, la altura de la antena o mástil y las características de la antena.

Se requiere analizar la topología del terreno o, al menos, la diferencia de altura entre emisor y receptor debido a que para establecer un enlace estable se necesita que exista línea vista entre ambos.

Donde línea vista se refiere a un camino limpio o sin obstrucciones entre la antena del emisor y el receptor. De lo contrario existiría interferencia en la comunicación y esta seria deficiente.

5.1.2. Indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI, por las siglas en inglés)

RSSI es una escala de referencia (en relación a 1 mW), para medir el nivel de potencia de las señales recibidas por un dispositivo en las redes inalámbricas (Wikipedia, 2021).

Tabla 16.

Escala RSSI

RSSI [dBm]	Condición RF
> -80	Muy buena
-80 a -95	Buena
-95 a -105	Media
< -105	Mala cobertura

Nota. Descripción de la escala RSSI. Elaboración propia, realizado con Word.

5.1.3. Relación señal/ruido (SNR, por las siglas en inglés)

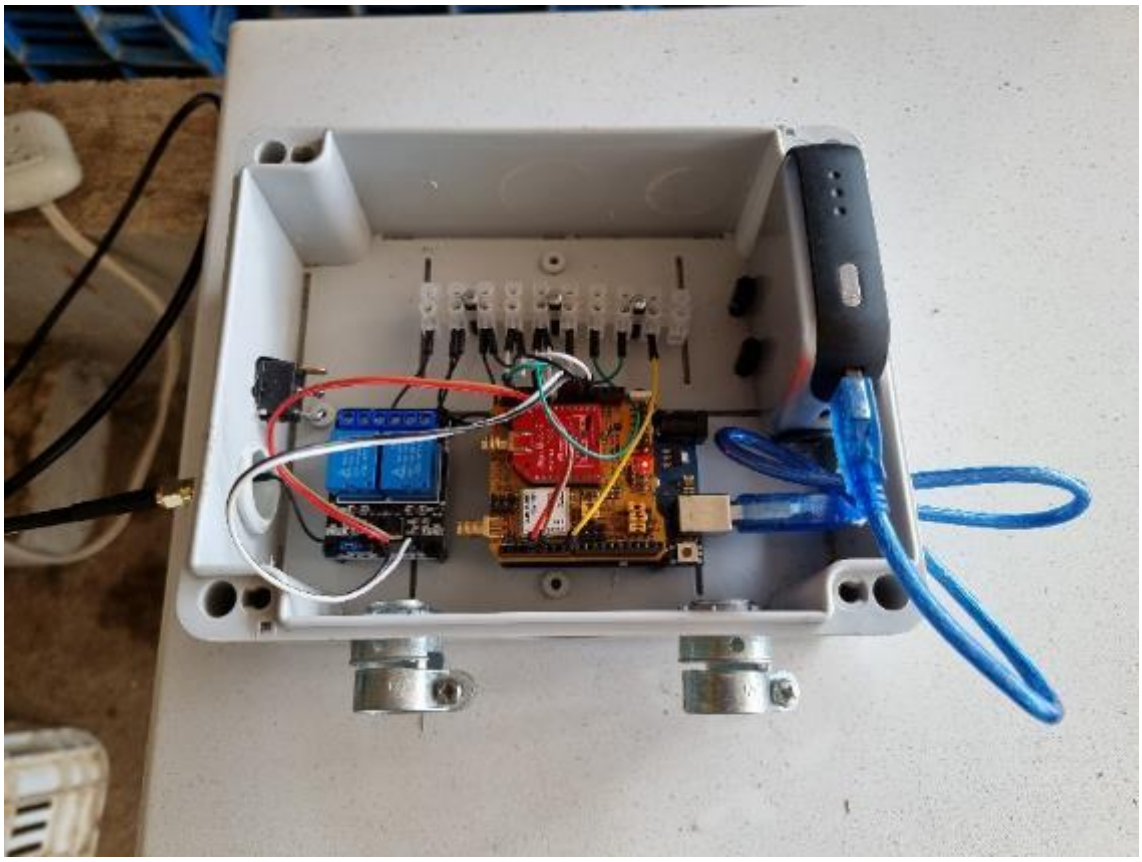
Una relación señal/ruido compara un nivel de potencia de señal con un nivel de potencia de ruido. Esta relación la proporciona la librería de LoRa, que la determina en un rango de 10 a -10; teniendo 10 la mejor relación señal-ruido y – 10 la peor.

5.2. Pruebas de comunicación del control remoto y el módulo de control del motor en un entorno cerrado

Esta prueba busca simular el comportamiento del módulo de control del motor y el control remoto dentro de un entorno industrial, sin pérdidas por vegetación, pero con maquinaria, herramienta, muros, entre otros.

Figura 61.

Módulo de control de motor en prueba de entorno cerrado



Nota. Descripción del módulo de control de motor en prueba de entorno cerrado con sus componentes, utilizando batería portátil para alimentación. Elaboración propia.

Figura 62.

Ubicación módulo de motor en prueba de entorno cerrado

Nota. Prueba en entorno cerrado utilizando el módulo de motor y antena instalada sobre mástil de baja altura. Elaboración propia.

El módulo de control de motor se alimenta con una batería portátil que le suministra 5v y 2A. Se cuenta con 2 relés, uno corresponde al arranque de un motor y el otro al apagado de ese mismo motor; también cuenta con las terminales para lectura de 2 sensores y salida del servomotor para controlar la aceleración del motor, como se detalla en la sección 4.4.2.

La ubicación corresponde a una bodega de componentes y herramienta agrícola, la estructura es de metal, con suelo fundido y techo de lámina. La antena se instaló de forma temporal a una altura de 2m.

Figura 63.

Control remoto en prueba de entorno cerrado

Nota. Resultados en pantalla de control remoto de pruebas realizadas con enlace en entorno cerrado. Elaboración propia.

Figura 64.

Ubicación del control remoto en prueba de entorno cerrado

Nota. Control remoto ubicado dentro de cuarto cerrado, con interferencias físicas. Elaboración propia.

El control remoto cuenta con pantalla donde se muestran datos simulados de:

- Revoluciones por minuto
- Presión en el motor
- Presión del aspersor

Para fines de las pruebas se muestra el RSSI y el SNR, la ubicación es una bodega donde se encuentran:

- Herramientas
- Motobombas de fumigación
- Cajas de registro de metal
- Repuestos para tractor
- Bombas sumergibles de pozos
- Otros

Tanto el control remoto como su antena se colocaron a una altura de 1m.

Tabla 17.

Resultados de prueba en entorno cerrado

Parámetro	Valor	Dimensional
RSSI	-68	dBm
SNR	3.2	
Distancia	103	M
Altitud de punto 1	1969	m.s.n.m.
Altitud de punto 2	1966	m.s.n.m.
Diferencia de altitud	3	M

Nota. Descripción de los resultados de prueba en entorno cerrado. Elaboración propia, realizado con Word.

Figura 65.

Ubicación de los módulos de prueba de entorno cerrado

Nota. Detalles de longitud de línea vista de enlace en prueba de entorno cerrado. Elaboración propia, realizado con Google Maps.

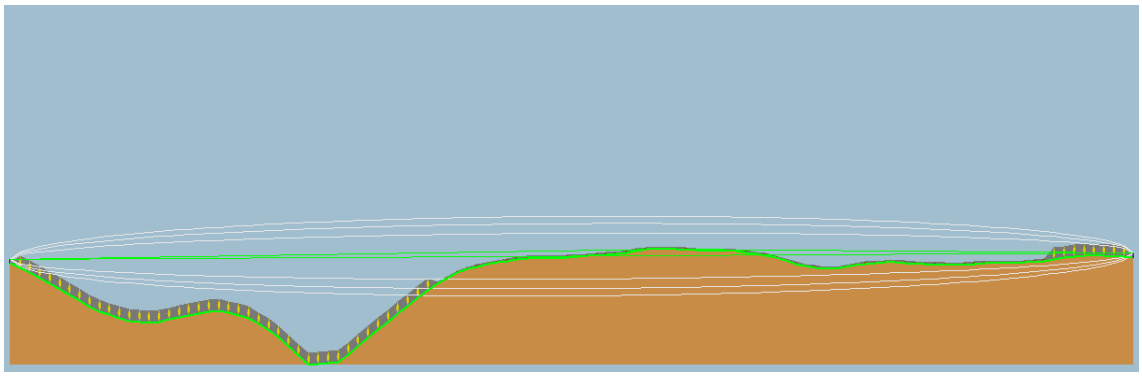
La prueba muestra que la comunicación entre el módulo de control del motor y el control remoto es posible dentro de un entorno industrial, como una planta de procesamiento.

5.3. Pruebas de alcance en campo abierto con vegetación de por medio

La simulación muestra que la potencia recibida (RSSI), por el control remoto es de -89.7 dBm, considerando la geografía del lugar y los obstáculos naturales que podría experimentar la señal.

Figura 66.

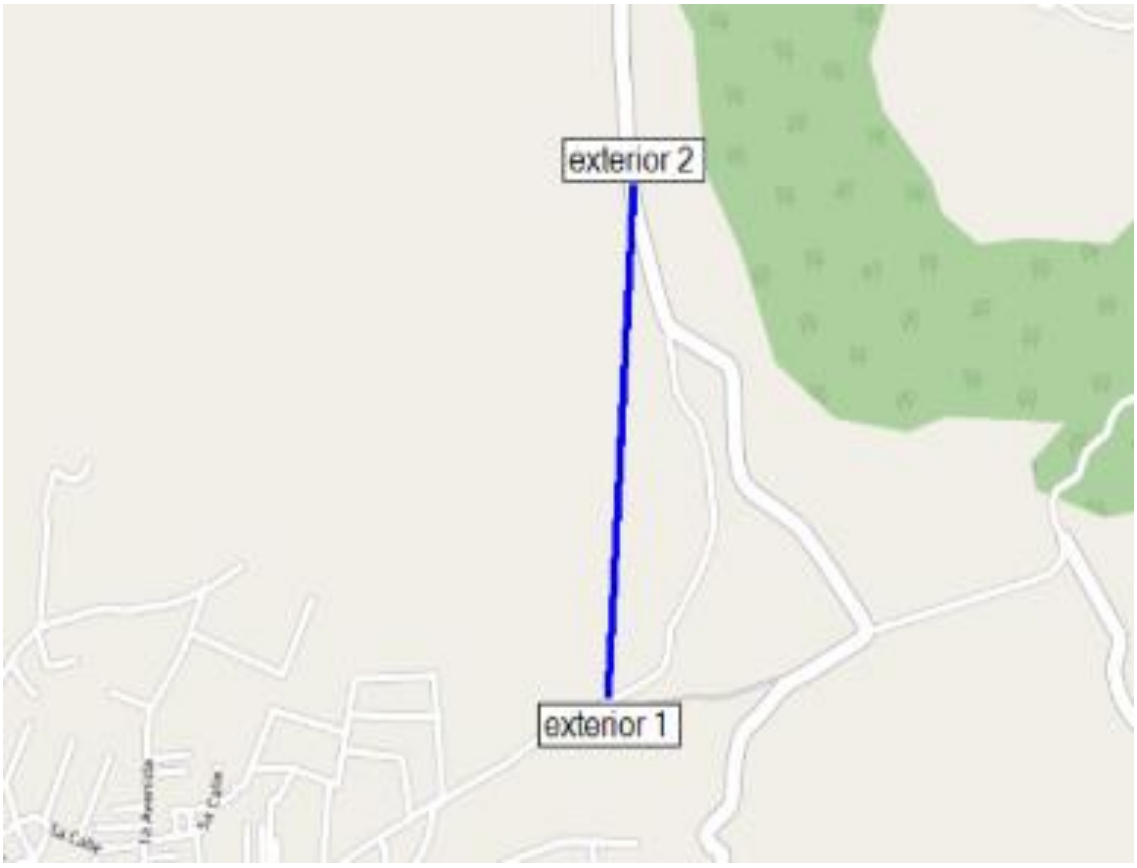
Simulación de geografía en prueba de campo abierto



Nota. Zonas de Fresnel en enlace de campo abierto. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Figura 67.

Simulación en enlace de prueba de campo abierto



Nota. Línea vista y ubicación de dispositivos en enlace de pruebas de campo abierto. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

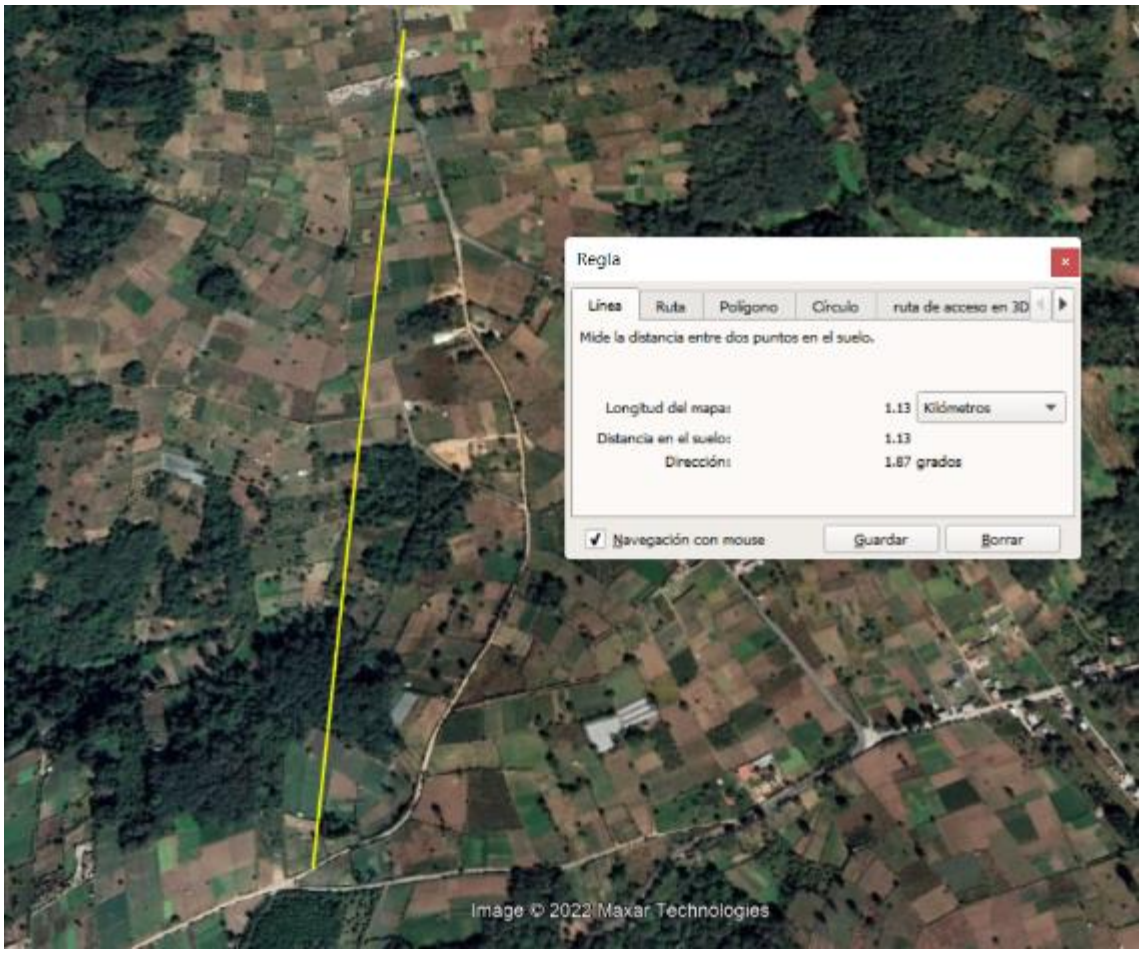
Se ha escogido realizar las pruebas en la carretera que va de Santiago Sacatepéquez a San Pedro Sacatepéquez, debido a que es un entorno muy parecido al que se encontraría en los sembradíos de caña de azúcar en los ingenios:

- Terrenos casi planos
- Poca diferencia en la altura

- Un punto respecto al segundo
- Plantaciones de vegetales de altura media
- Poca densidad residencial

Figura 68.

Ubicación de módulos en pruebas de campo abierto



Nota. Detalles de longitud de línea vista de enlace en prueba de campo abierto. Elaboración propia, realizado con Google Maps.

Figura 69.

Módulo de control de motor en prueba de campo abierto

Nota. Colocación de módulo de control de motor sobre estructura móvil para prueba de campo abierto. Elaboración propia.

Figura 70.

Ubicación módulo de motor en prueba de campo abierto

Nota. Lugar de prueba en campo abierto con instalación de antena sobre estructura de baja altura. Elaboración propia.

Figura 71.

Control remoto en prueba de campo abierto

Nota. Resultados en pantalla de control remoto de pruebas realizadas con enlace en campo abierto. Elaboración propia.

Tabla 18.

Resultados de prueba de campo abierto

Parámetro	Valor	Dimensional
RSSI	-103	dBm
SNR	-2.5	
Distancia	1.13	Km
Altitud de punto 1	2168	m.s.n.m.
Altitud de punto 2	2170	m.s.n.m.
Diferencia de altitud	2	M

Nota. Resultados de prueba de campo abierto. Elaboración propia, realizado con Word.

Las pruebas muestran que es posible establecer la comunicación entre el módulo de control del motor y el control remoto.

Experimentalmente se observa una diferencia de -4 dBm en la potencia recibida (RSSI), comparación con la simulación; esto puede deberse a que el programa no contempla todas las interferencias que la señal puede experimentar o que haya una diferencia en la potencia de transmisión entre el dato teórico y el experimental.

Sin embargo, la potencia recibida de -103 dBm da un margen para que la comunicación sea estable considerando la sensibilidad del equipo.

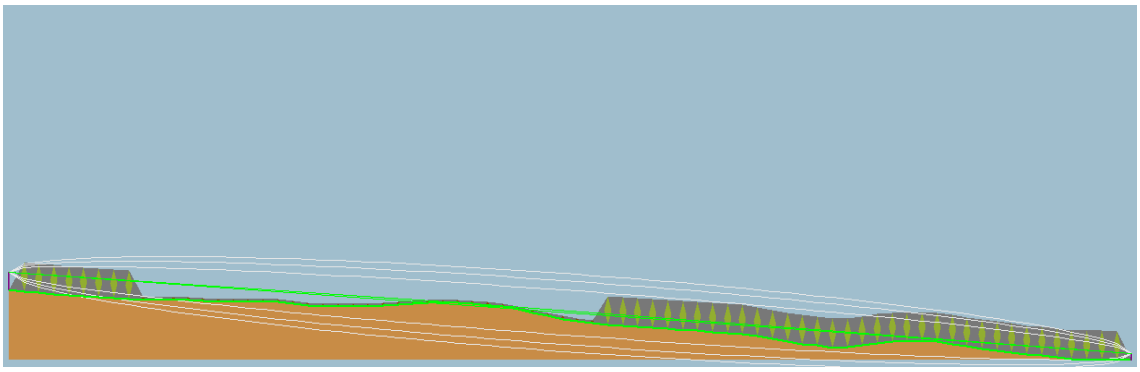
En una instalación real, el módulo de control del motor podría tener instalada la antena con un mástil a una altura mayor, lo cual proporcionaría una mejor potencia de señal recibida.

5.4. Pruebas de alcance en un entorno residencial

Los resultados de las pruebas de alcance en un entorno residencial se presentan a continuación.

Figura 72.

Simulación de geografía en prueba de entorno residencial



Nota. Simulación de geografía y zonas de Fresnel en prueba de entorno residencial. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Figura 73.

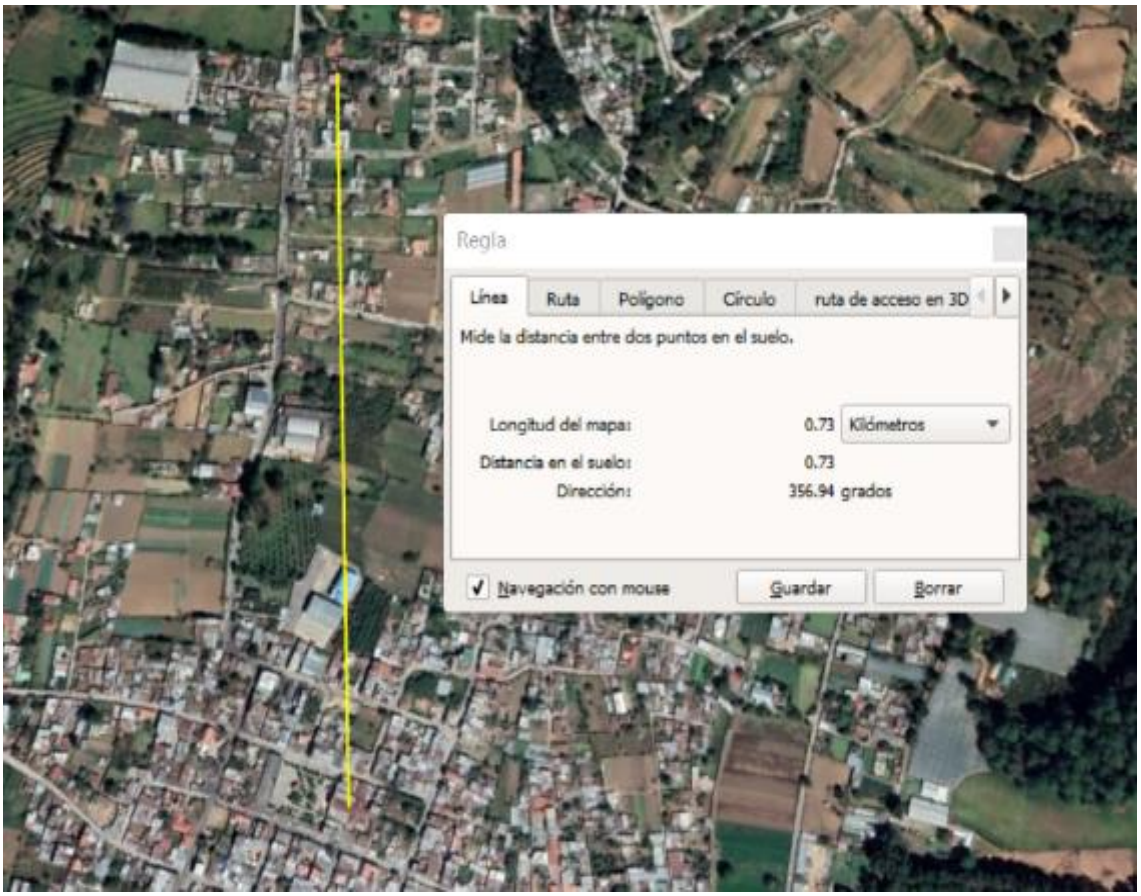
Simulación de enlace en prueba de entorno residencial

Nota. Línea vista y ubicación de dispositivos en enlace en prueba de entorno residencial. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

La simulación utilizando Radio Mobile determina que la potencia recibida por el control remoto sería de -88.95 dBm, teniendo un dato teórico que permite la comunicación entre ambos módulos.

Figura 74.

Ubicación de módulos en pruebas de entorno residencial



Nota. Detalles de longitud de línea vista de enlace en prueba de campo abierto. Elaboración propia, realizado con Google Maps.

La prueba se realiza en una ubicación que tiene una densidad domiciliar media, teniendo también vegetación interfiriendo la comunicación, aunque esta vegetación no es densa sino consta de algunos árboles y plantas.

El enlace se comprueba a una distancia de 0.73 Km porque, aunque el requerimiento principal es establecer una comunicación de al menos 1Km, este se refiere a un ambiente de campo abierto.

Se realiza esta prueba de entorno residencial para establecer como se comportarían los módulos si se instalarán en una ubicación con casas interrumpiendo el enlace.

Figura 75.

Módulo de control de motor en prueba de entorno residencial

Nota. Colocación de módulo de control de motor sobre estructura móvil para prueba de campo abierto. Elaboración propia.

Figura 76.

Ubicación módulo de motor en prueba de entorno residencial

Nota. Lugar de prueba en entorno residencial con instalación de antena sobre estructura de baja altura. Elaboración propia.

El módulo de control remoto fue instalado sobre la terraza de una residencia y adicional utilizando la estructura de una escalera como mástil temporal para darle mayor altura a la antena.

Figura 77.

Control remoto en prueba de entorno residencial

Nota. Resultados en pantalla de control remoto de pruebas realizadas con enlace en entorno residencial. Elaboración propia.

Tabla 19.

Resultados de prueba de entorno residencial

Parámetro	Valor	Dimensional
RSSI	-112	dBm
SNR	-6.2	
Distancia	0.73	Km
Altitud de punto 1	1979	m.s.n.m.
Altitud de punto 2	1955	m.s.n.m.
Diferencia de altitud	24	M

Nota. Resultados de prueba de entorno residencial. Elaboración propia, realizado con Word.

Tanto la simulación como la prueba experimental muestran que es posible establecer enlace y comunicación entre el módulo de control del motor y el control remoto.

Sin embargo, aunque la distancia es menor a los resultados mostrados en la Tabla 19, la potencia recibida es menor y la relación señal-ruido es peor considerando los rangos descritos en la sección 5.1.

Esto puede deberse a las diferencias en la naturaleza de las interferencias, siendo la primera interferencia natural y la segunda construcción con diferentes infraestructuras, también a que es muy posible que las casas durante el trayecto de la señal tengan servicios que emitan o reciban señales electromagnéticas, como:

- Internet WiFi
- Radio
- Televisiones satélites
- Otros

A pesar de estas limitaciones y atenuación de la señal emitida, si es posible establecer comunicación y que el sistema funcione con estas características.

5.5. Simulación de enlaces en los principales ingenios de Guatemala

Para las siguientes simulaciones se consideran los siguientes parámetros:

Tabla 20.

Parámetros de ingreso para simulación

Parámetro	Valor
Frecuencia	915 MHz
Altura de la antena base	2 m
Ganancia de la antena base	5 dBi
Altura de la antena móvil (operador)	1.7m
Ganancia de la antena móvil	2 dBi
Potencia de transmisión (Tx)	0.1 W (20 dBm)
Pérdidas en el cable de transmisión	0.5 dBm
Pérdidas en el cable de recepción	0.5 dBm
Sensibilidad del receptor	-110 dBm
Margen requerido para una señal fuerte	10 dBm

Nota. Parámetros de ingreso para simulación. Elaboración propia, realizado con Word.

Para las simulaciones en los programas Radio Mobile y Google Earth el color azul corresponde a los lugares donde la potencia recibida estaría dentro del rango medio, bueno y muy bueno.

El color anaranjado corresponde a los lugares “frontera” donde la potencia recibida sería tan baja que no podría establecerse un enlace estable, los paquetes transmitidos no podrían llegar a su destino y se consideraría la calidad de la señal como mala cobertura.

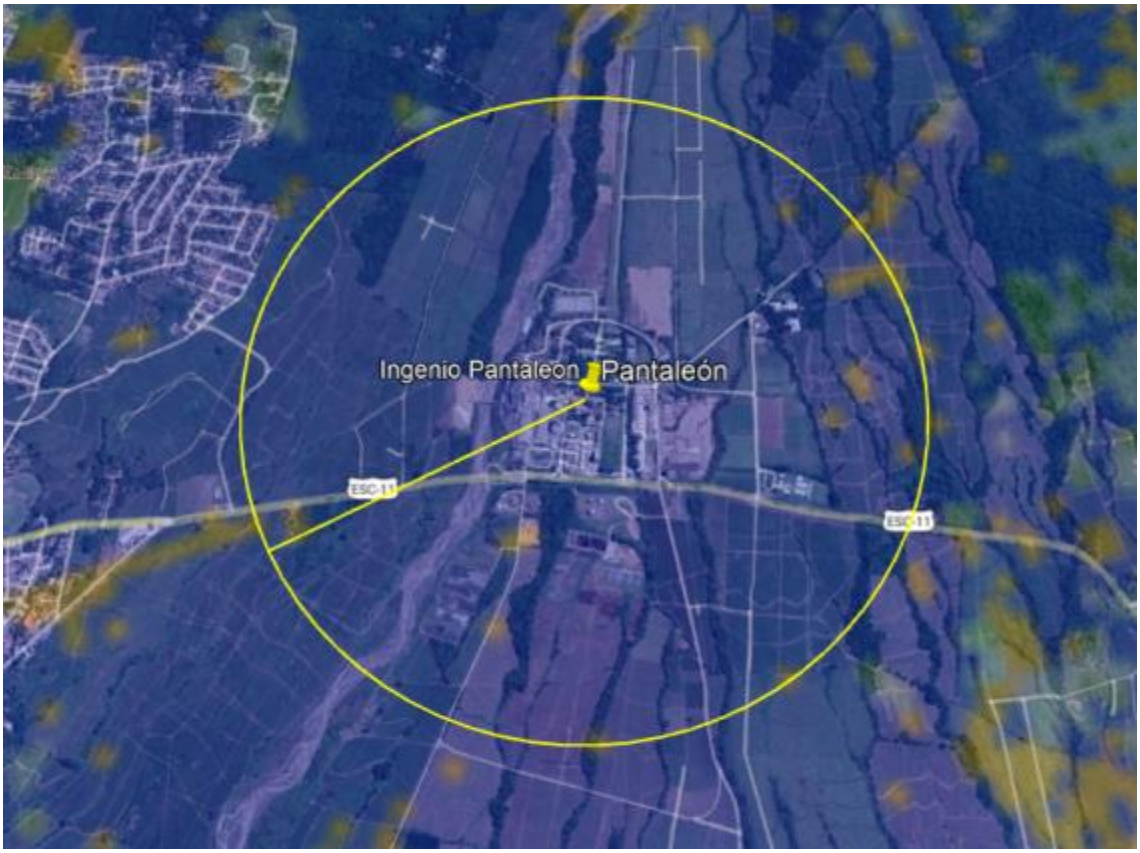
5.5.1. Ingenio Pantaleón

Se presentan los resultados para el Ingenio Pantaleón, como:

- Simulación de cobertura
- Estudio de enlace
- Otros

Figura 78.

Simulación de cobertura desde Ingenio Pantaleón



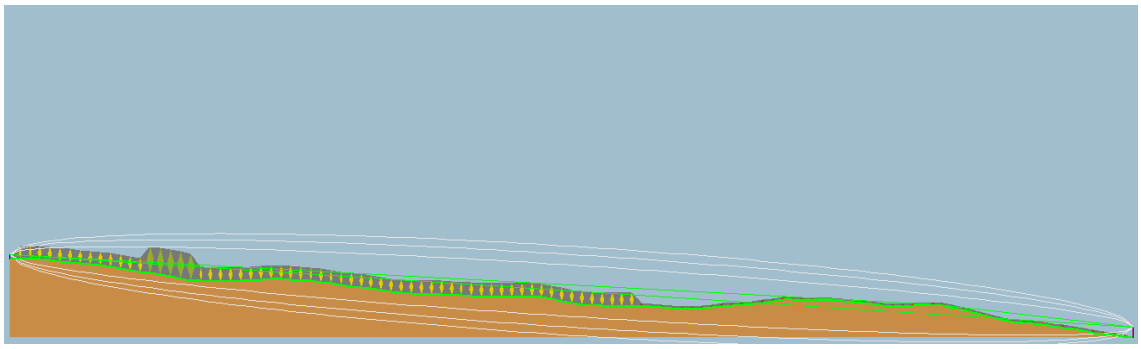
Nota. Simulación de cobertura desde Ingenio Pantaleón, utilizando parámetros de configuración y escala de colores. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile y Google Earth.

La Figura 78 utiliza una circunferencia de referencia de:

- 1.5 Km
- Radio Mobile muestra que dentro de este rango es posible establecer un enlace estable que permita la operación del sistema.

Figura 79.

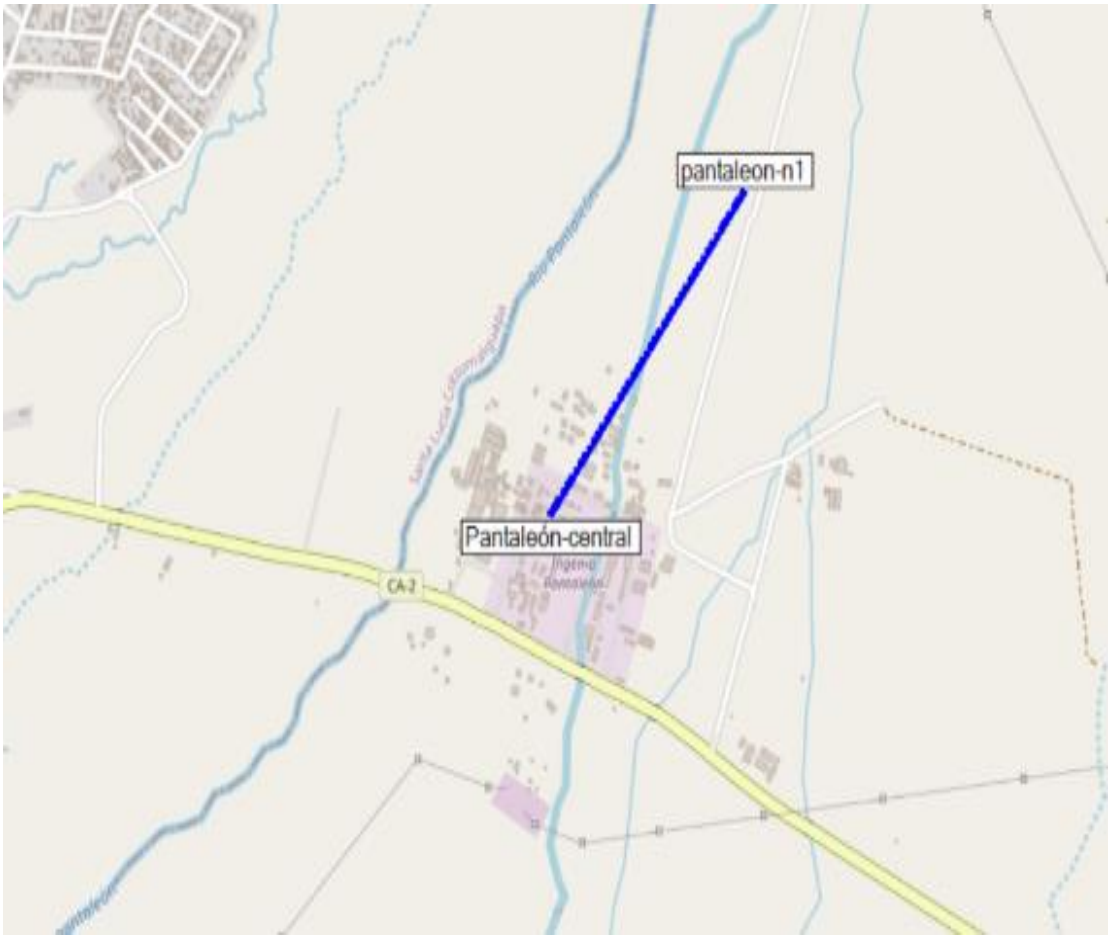
Estudio de enlace entre nodo 1 y central Pantaleón



Nota. Estudio de enlace entre nodo 1 y central Ingenio Pantaleón, haciendo análisis geográfico y zonas de Fresnel. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Figura 80.

Ubicación nodo 1 y central Pantaleón



Nota. Línea vista y ubicación de nodo 1 y central Ingenio Pantaleón. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Las figuras 79 y 80 muestran los datos obtenidos mediante la simulación en Radio Mobile entre el nodo 1 (ubicación supuesta únicamente para fines de simulación y obtener datos de enlace) y el control de motor ubicado en la central del Ingenio Pantaleón.

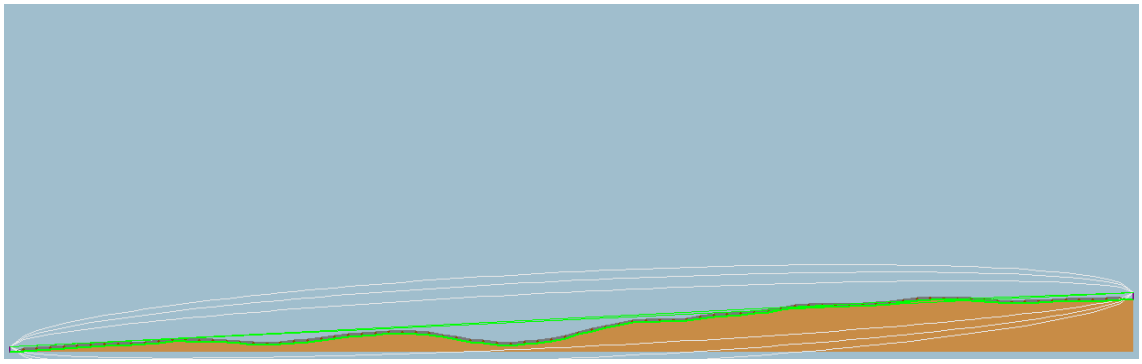
La simulación muestra una distancia lineal de:

- 1.118Km
- Diferencia de altitud de 30m
- Un valor RSSI de -97.1 dBm.

Con dichos valores se determina que es posible establecer operación en esas ubicaciones.

Figura 81.

Estudio de enlace entre nodo 2 y central Pantaleón



Nota. Estudio de enlace entre nodo 2 y central Ingenio Pantaleón, haciendo análisis geográfico y zonas de Fresnel. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Figura 82.

Ubicación nodo 2 y central Pantaleón

Nota. Línea vista y ubicación de nodo 2 y central Ingenio Pantaleón. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Los resultados de la simulación del nodo 2 y la central Pantaleón dan una distancia lineal de:

- 0.95Km
- Diferencia de altura de 15m
- Un RSSI de -85.2dBm

En estas ubicaciones también es posible establecer un enlace de operación.

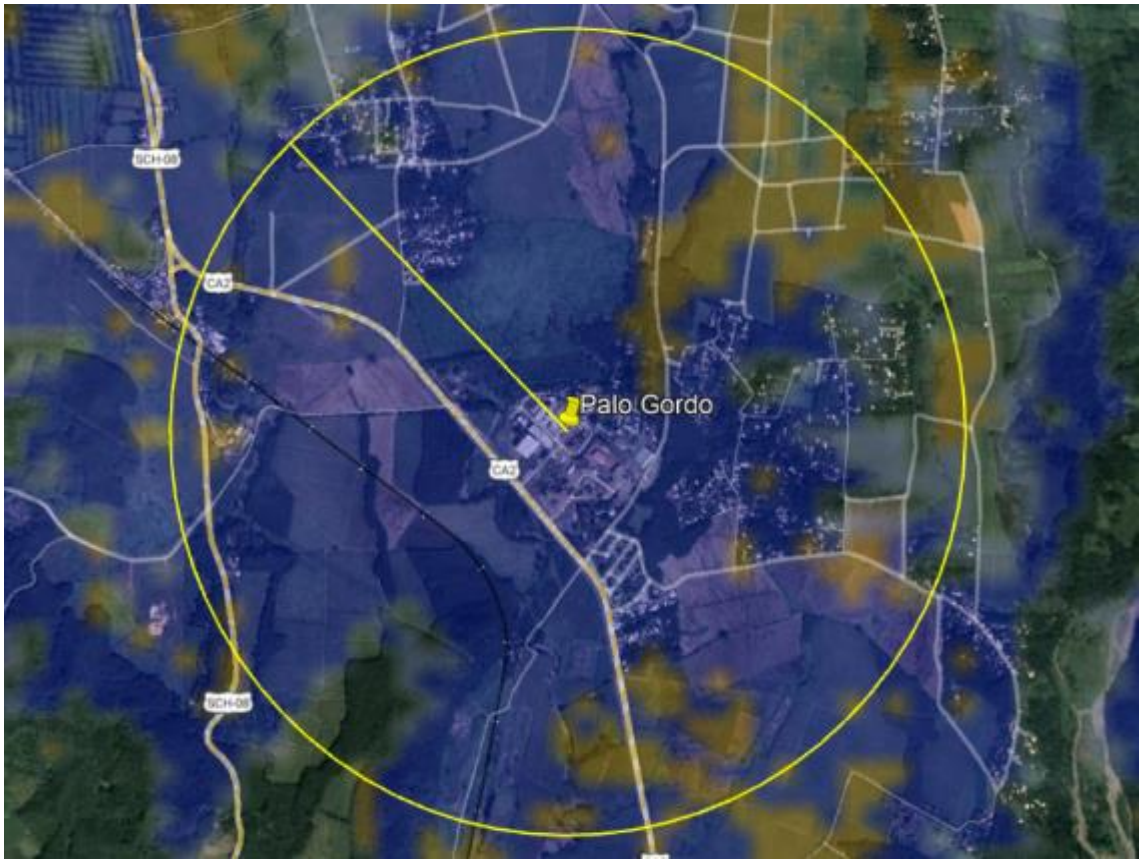
5.5.2. Ingenio Palo Gordo

Se presentan los resultados para el Ingenio Palo Gordo, como:

- Simulación de cobertura
- Estudio de enlace
- Otros

Figura 83.

Simulación de cobertura desde Ingenio Palo Gordo



Nota. Simulación de cobertura desde Ingenio Palo Gordo, utilizando parámetros de configuración y escala de colores. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile y Google Earth.

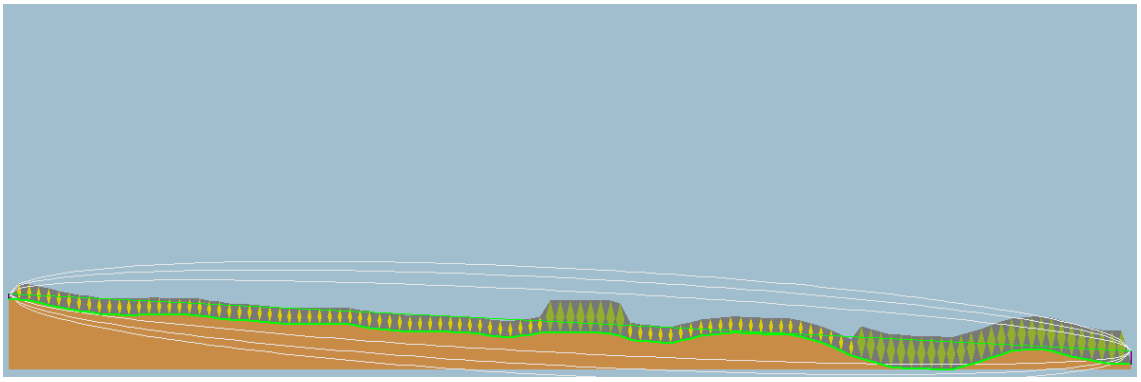
La Figura 83 utiliza una circunferencia de referencia de:

- 1.5 Km
- Radio Mobile muestra que dentro de este rango es posible establecer un enlace estable que permita la operación del sistema.

El programa determina ubicaciones donde estaría dentro del rango frontera de la señal y ubicaciones donde no sería posible establecer un enlace con los parámetros utilizados debido a la geografía del ingenio.

Figura 84.

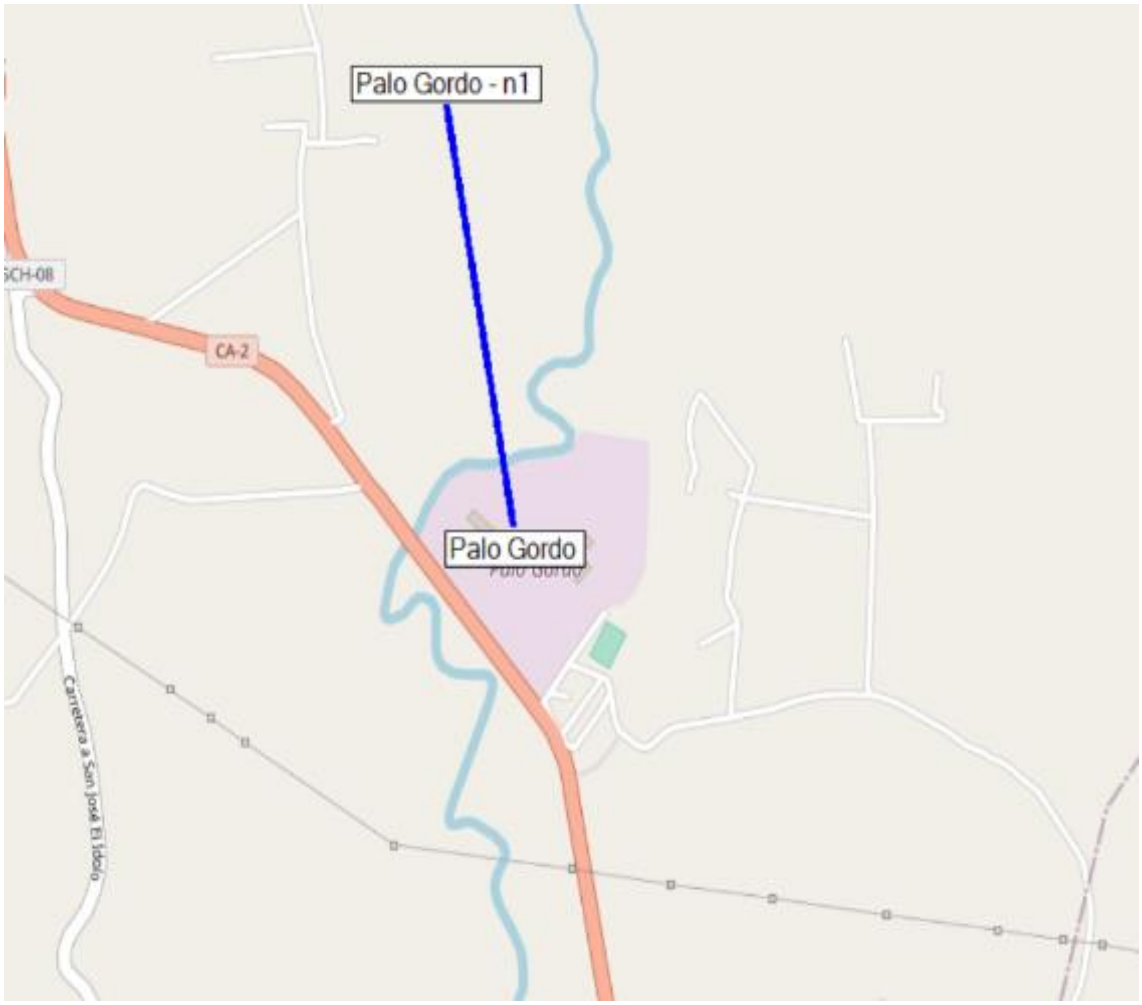
Estudio de enlace entre nodo 1 y central Palo Gordo



Nota. Estudio de enlace entre nodo 1 y central Ingenio Palo Gordo, haciendo análisis geográfico y zonas de Fresnel. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Figura 85.

Ubicación nodo 1 y central Palo gordo



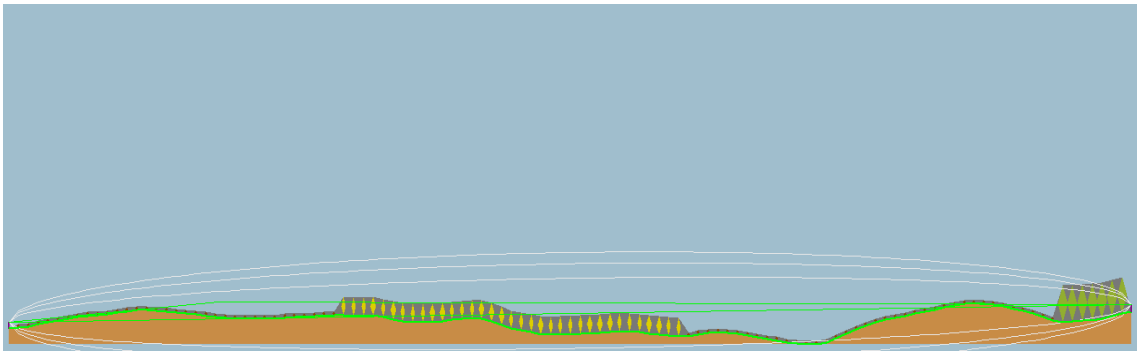
Nota. Línea vista y ubicación de nodo 1 y central Ingenio Palo Gordo. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Los resultados de la simulación del nodo 1 y la central Palo Gordo dan una distancia lineal de:

- 1.115Km
- Diferencia de altura de 19m
- Un RSSI de -91.06dBm

Figura 86.

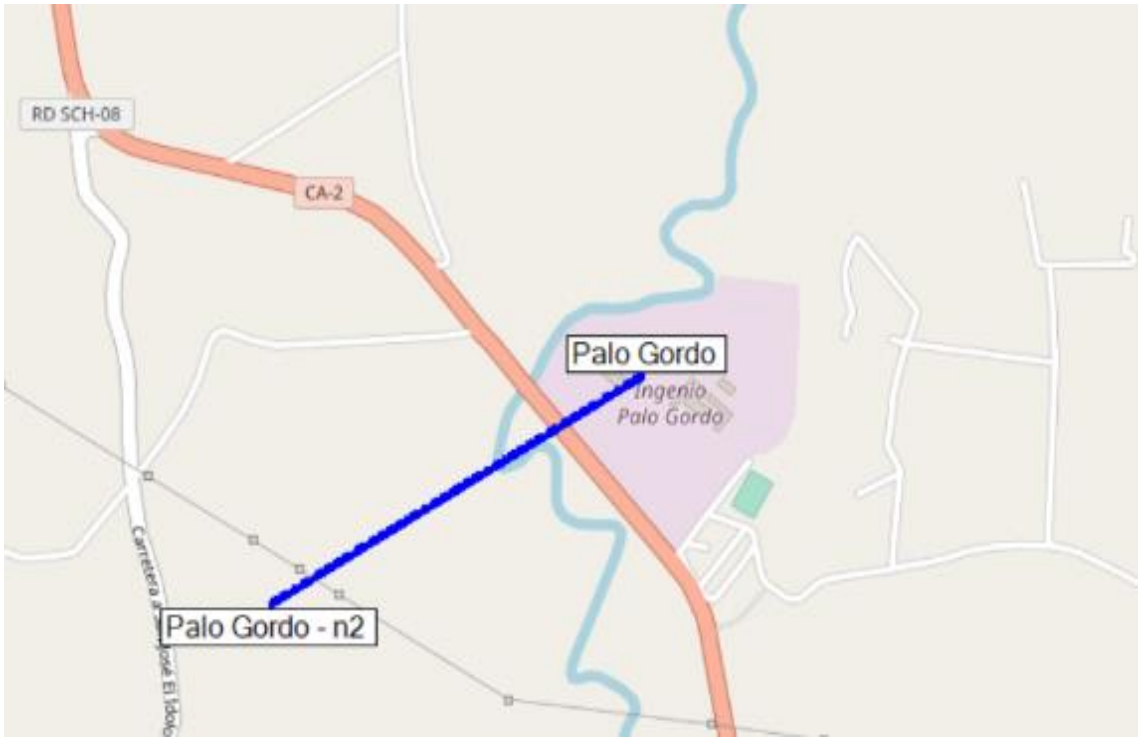
Estudio de enlace entre nodo 2 y central Palo Gordo



Nota. Estudio de enlace entre nodo 2 y central Ingenio Palo Gordo, haciendo análisis geográfico y zonas de Fresnel. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Figura 87.

Ubicación nodo 2 y central Palo Gordo



Nota. Línea vista y ubicación de nodo 2 y central Palo Gordo. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Los resultados de la simulación del nodo 2 y la central Palo Gordo dan una distancia lineal de:

- 1.138Km
- Diferencia de altura de 5m
- Un RSSI de -99.19dBm

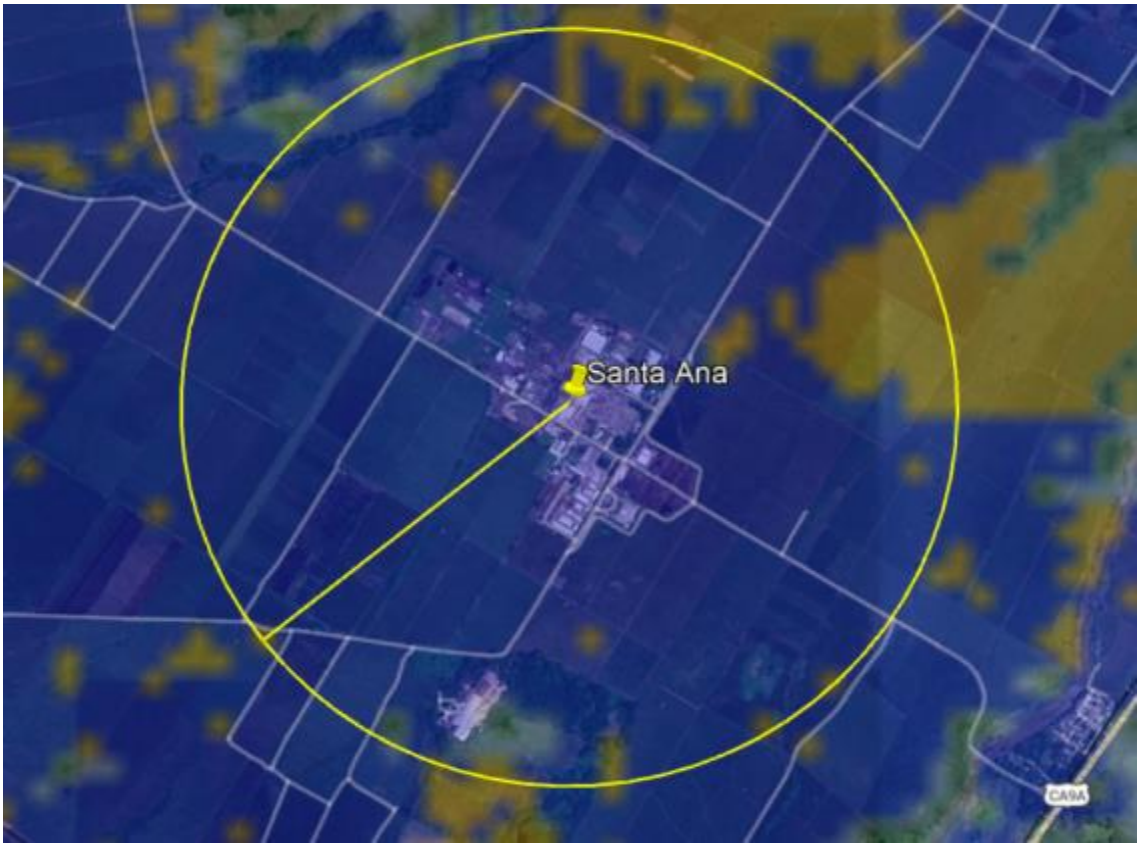
5.5.3. Ingenio Santa Ana

Se presentan los resultados para el Ingenio Santa Ana, como:

- Simulación de cobertura
- Estudio de enlace
- Otros

Figura 88.

Simulación de cobertura desde Ingenio Santa Ana



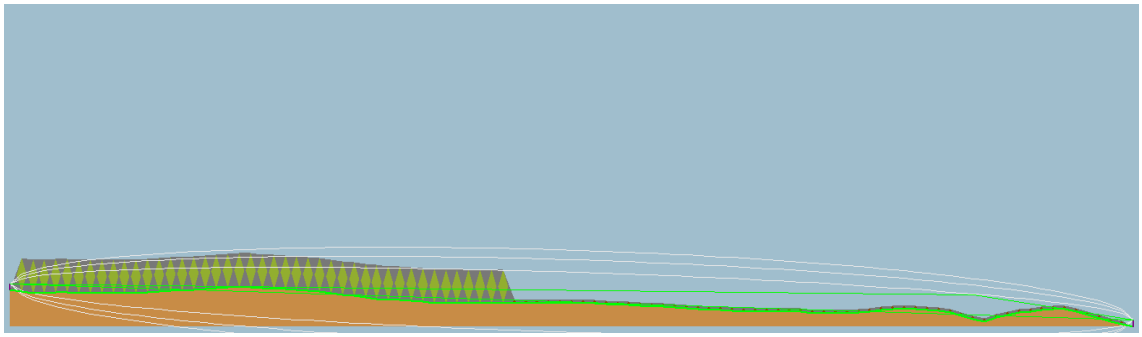
Nota. Simulación de cobertura desde Ingenio Santa Ana, utilizando parámetros de configuración y escala de colores. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile y Google Earth.

La Figura 88 utiliza una circunferencia de referencia de:

- 1.5 Km
- Radio Mobile muestra que dentro de este rango es posible establecer un enlace estable que permita la operación del sistema en prácticamente toda la circunferencia alrededor de la central.

Figura 89.

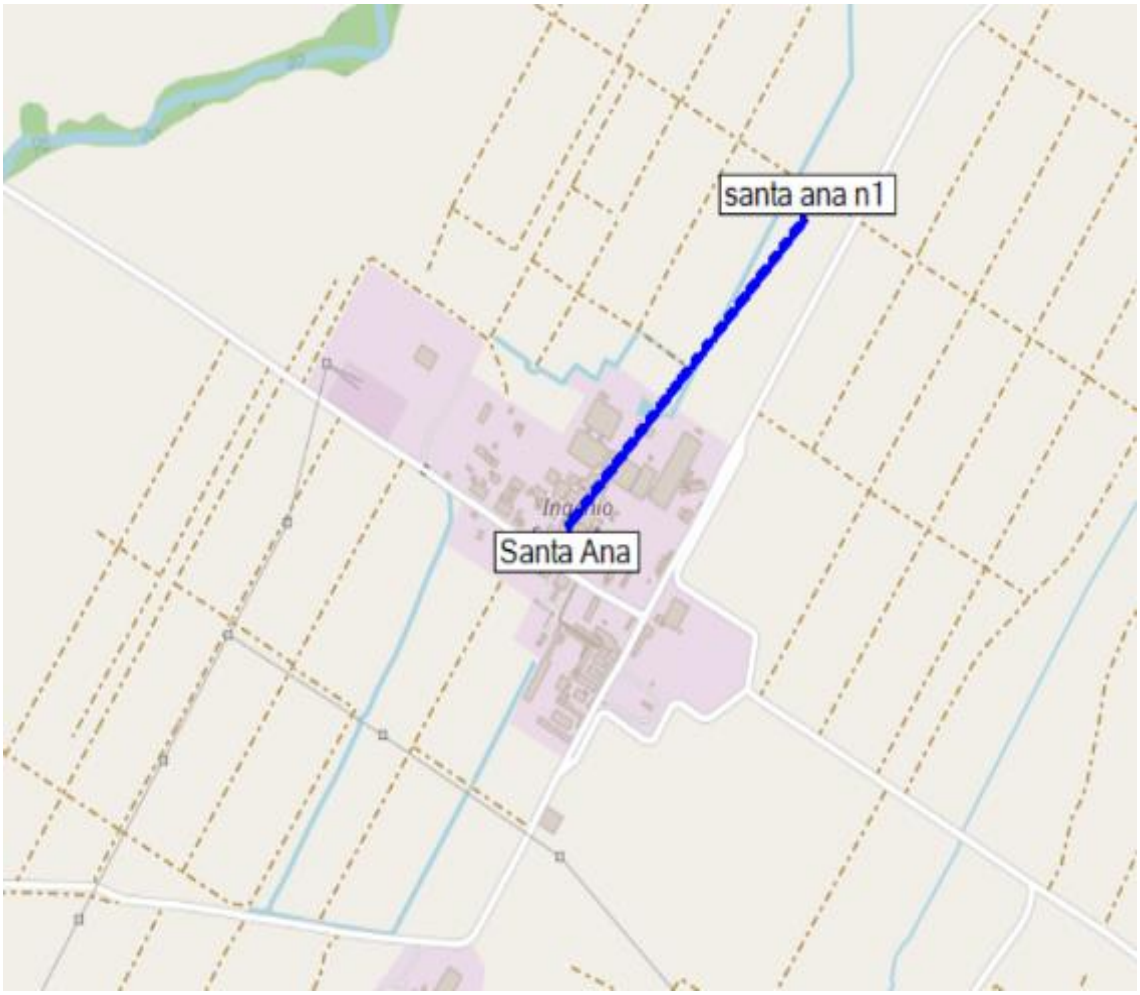
Estudio de enlace entre nodo 1 y central Santa Ana



Nota. Estudio de enlace entre nodo 1 y central Santa Ana, haciendo análisis geográfico y zonas de Fresnel. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Figura 90.

Ubicación nodo 1 y central Santa Ana



Nota. Línea vista y ubicación de nodo 1 y central Santa Ana. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

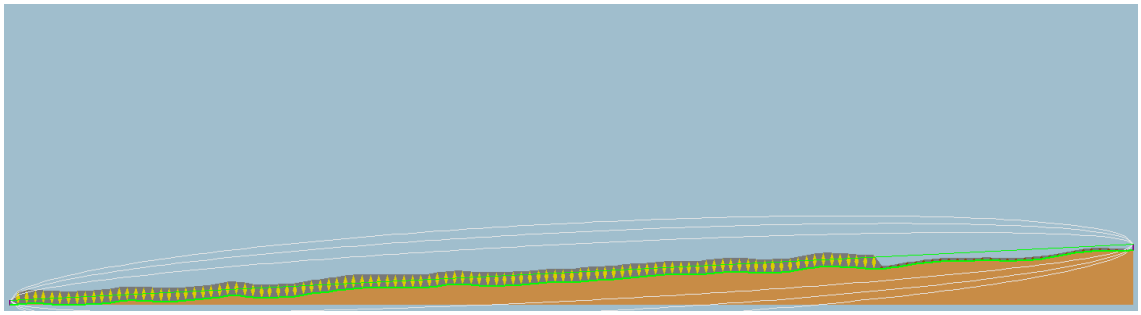
Los resultados de la simulación del nodo 1 y la central Santa Ana dan una distancia lineal de:

- 0.973Km

- Diferencia de altura de 11m
- Un RSSI de -102.82dBm

Figura 91.

Estudio de enlace entre nodo 2 y central Santa Ana



Nota. Estudio de enlace entre nodo 2 y central Santa Ana, haciendo análisis geográfico y zonas de Fresnel. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Figura 92.

Ubicación nodo 2 y central Santa Ana

Nota. Línea vista y ubicación de nodo 2 y central Santa Ana. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Los resultados de la simulación del nodo 2 y la central Santa Ana dan una distancia lineal de:

- 1.339Km
- Diferencia de altura de 21m
- Un RSSI de -84.15dBm

5.5.4. Ingenio Magdalena

Se presentan los resultados para el Ingenio Magdalena, como:

- Simulación de cobertura
- Estudio de enlace
- Otros

Figura 93.

Simulación de cobertura desde Ingenio Magdalena

Nota. Simulación de cobertura desde Ingenio Magdalena, utilizando parámetros de configuración y escala de colores. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile y Google Earth.

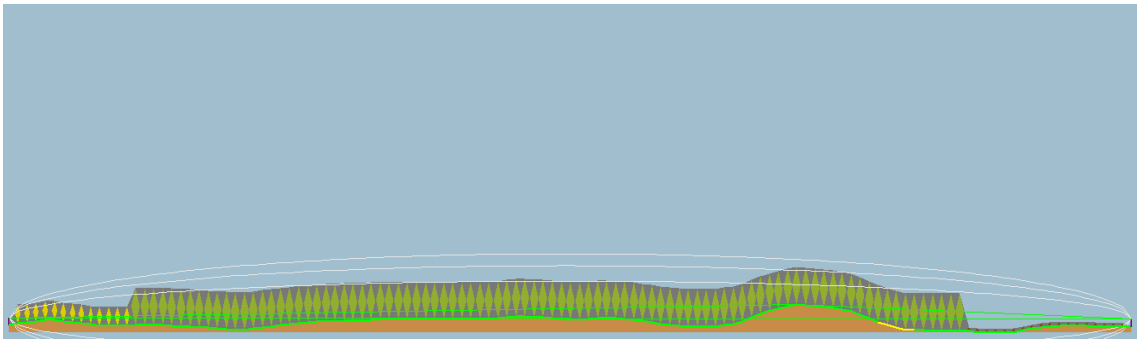
La Figura 93 utiliza una circunferencia de referencia de:

- 1.5 Km

- Radio Mobile muestra que dentro de este rango es posible establecer un enlace estable que permita la operación del sistema.

Figura 94.

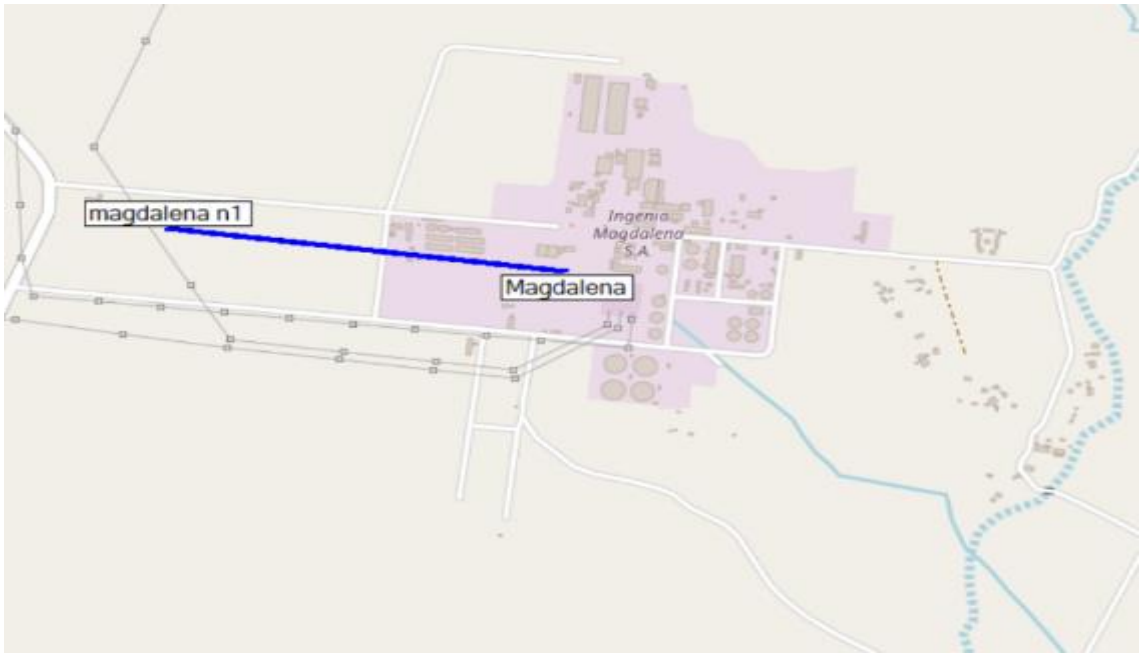
Estudio de enlace entre nodo 1 y central Magdalena



Nota. Estudio de enlace entre nodo 1 y central Magdalena, haciendo análisis geográfico y zonas de Fresnel. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Figura 95.

Ubicación nodo 1 y central Magdalena



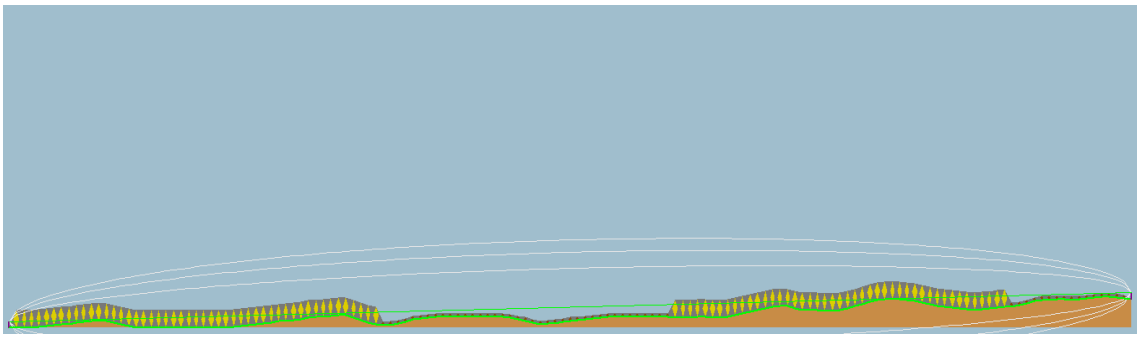
Nota. Línea vista y ubicación de nodo 1 y central Magdalena. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Los resultados de la simulación del nodo 1 y la central Magdalena dan una distancia lineal de:

- 1.231Km
- Diferencia de altura de 1m
- Un RSSI de -105.32dBm

Figura 96.

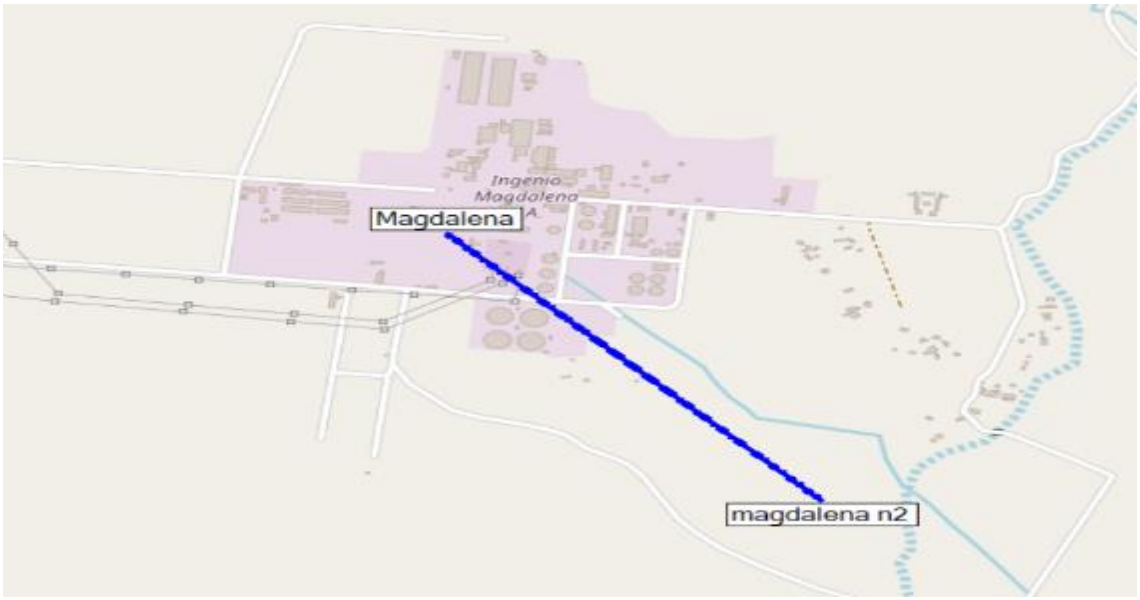
Estudio de enlace entre nodo 2 y central Magdalena



Nota. Estudio de enlace entre nodo 2 y central Magdalena, haciendo análisis geográfico y zonas de Fresnel. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Figura 97.

Ubicación nodo 2 y central Magdalena



Nota. Línea vista y ubicación de nodo 2 y central Magdalena. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Los resultados de la simulación del nodo 2 y la central Palo Gordo dan una distancia lineal de:

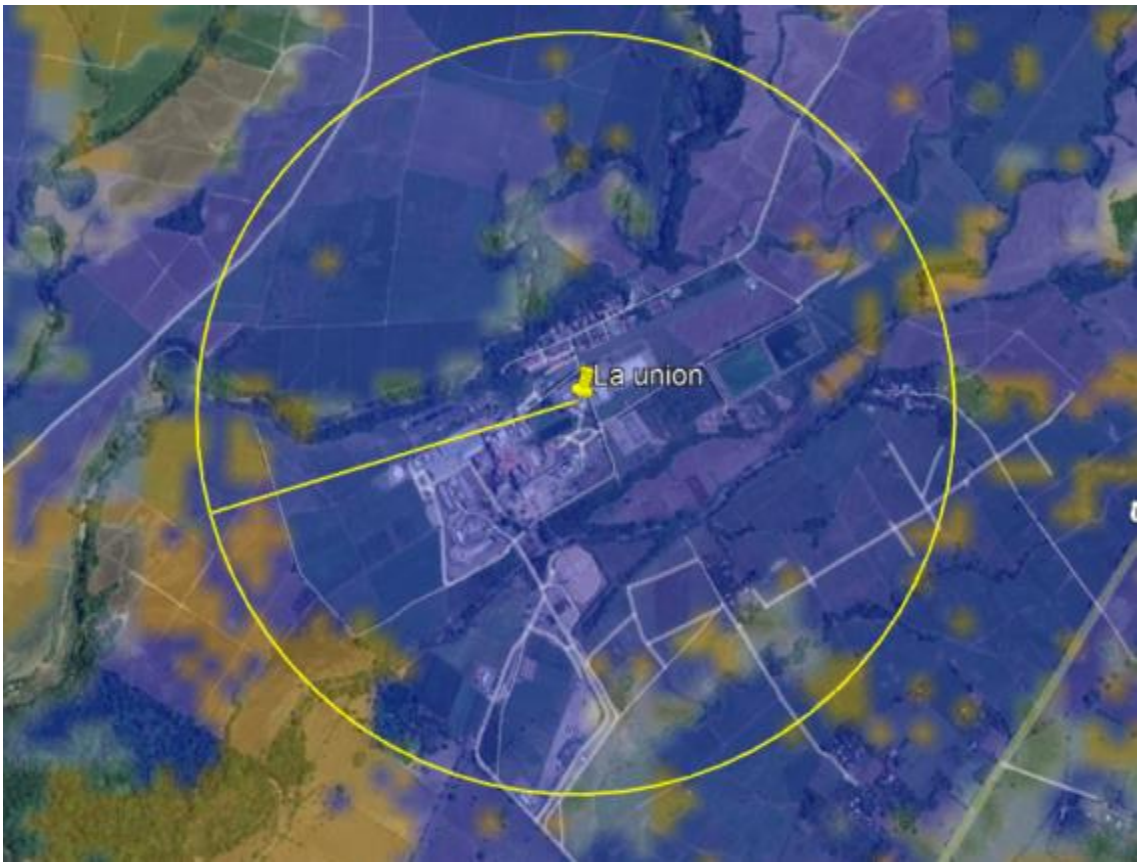
- 1.494Km
- Diferencia de altura de 8m
- Un RSSI de -88.68dBm

5.5.5. Ingenio La Unión

Se presentan los resultados para el Ingenio La Unión, como la simulación de cobertura, estudio de enlace, entre otros.

Figura 98.

Simulación de cobertura desde Ingenio La Unión



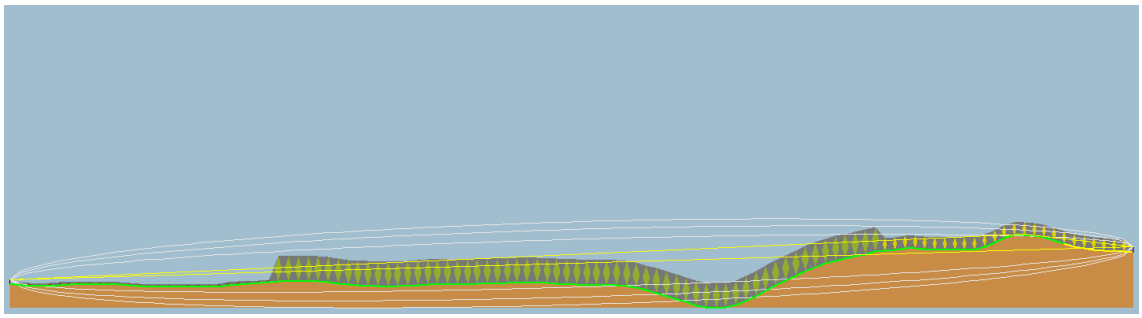
Nota. Simulación de cobertura desde Ingenio La Unión, utilizando parámetros de configuración y escala de colores. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile y Google Earth.

La Figura 98 utiliza una circunferencia de referencia de:

- 1.5 Km
- Radio Mobile muestra que dentro de este rango es posible establecer un enlace estable que permita la operación del sistema, considerando que hay algunos lugares donde no es posible debido a la geografía del terreno.

Figura 99.

Estudio de enlace entre nodo 1 y central La Unión



Nota. Estudio de enlace entre nodo 1 y central La Unión, haciendo análisis geográfico y zonas de Fresnel. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Figura 100.

Ubicación nodo 1 y central La Unión

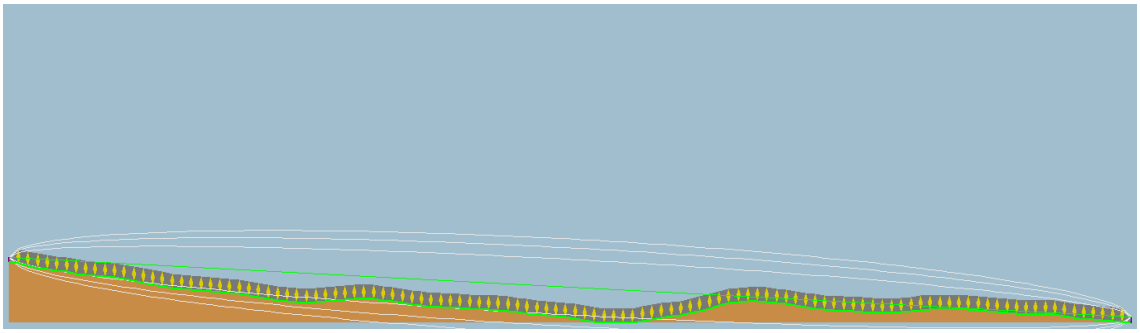
Nota. Línea vista y ubicación de nodo 1 y central La Unión. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Los resultados de la simulación del nodo 1 y la central La Unión dan una distancia lineal de:

- 1.126Km
- Diferencia de altura de 13m y
- Un RSSI de -114.88dBm

Figura 101.

Estudio de enlace entre nodo 2 y central La Unión



Nota. Estudio de enlace entre nodo 2 y central La Unión, haciendo análisis geográfico y zonas de Fresnel. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Figura 102.

Ubicación nodo 2 y central La Unión

Nota. Línea vista y ubicación de nodo 2 y central La Unión. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Los resultados de la simulación del nodo 2 y la central La Unión dan una distancia lineal de:

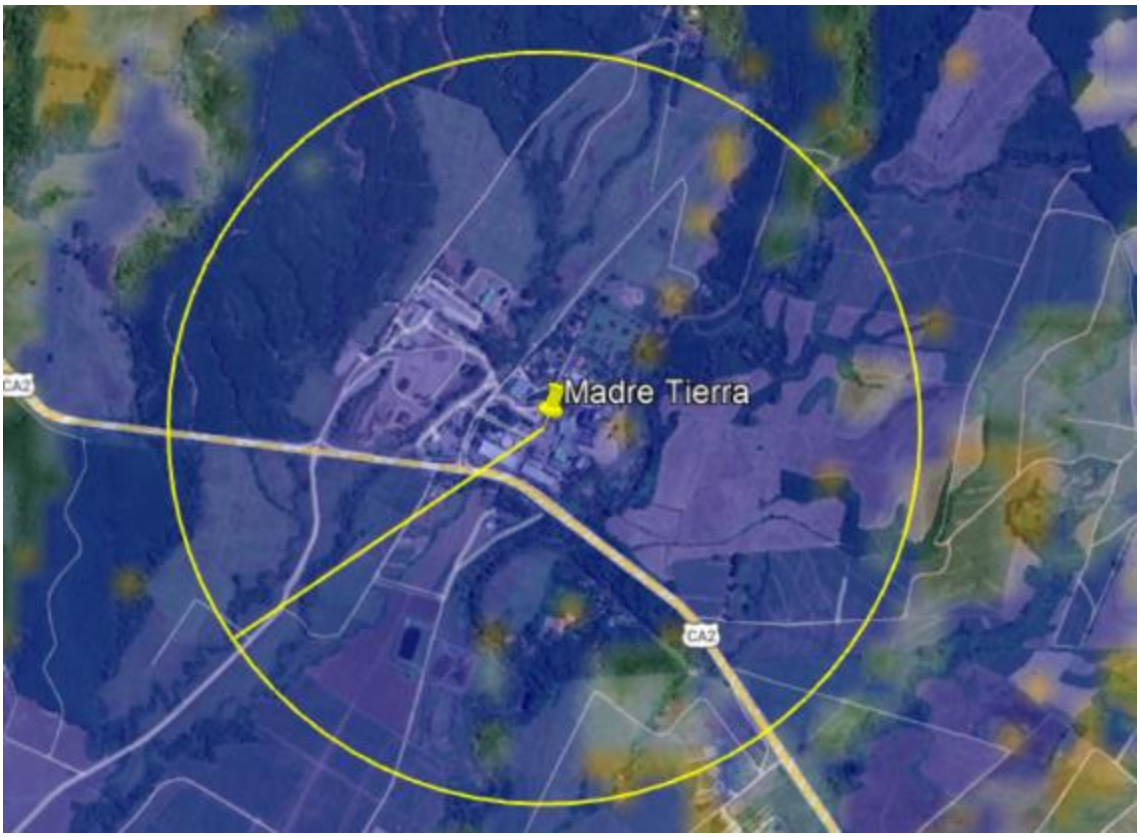
- 1.160Km
- Diferencia de altura de 21m
- Un RSSI de -86.75dBm

5.5.6. Ingenio Madre Tierra

Se presentan los resultados para el Ingenio Madre Tierra, como la simulación de cobertura, estudio de enlace, entre otros.

Figura 103.

Simulación de cobertura desde Ingenio Madre Tierra



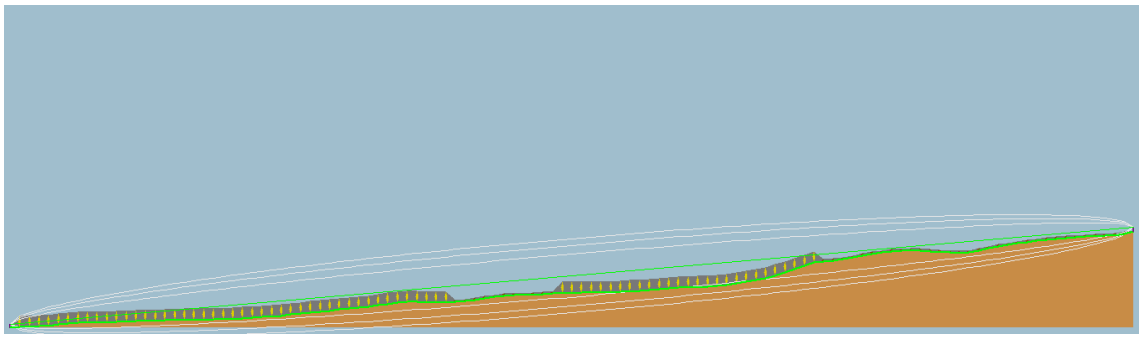
Nota. Simulación de cobertura desde Ingenio Madre Tierra, utilizando parámetros de configuración y escala de colores. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile y Google Earth.

La Figura 103 utiliza una circunferencia de referencia de:

- 1.2 Km
- Radio Mobile muestra que dentro de este rango es posible establecer un enlace estable que permita la operación del sistema, sin embargo, existen algunas ubicaciones donde existiría mala cobertura debido a la geografía del terreno.

Figura 104.

Estudio de enlace entre nodo 1 y central Madre Tierra



Nota. Estudio de enlace entre nodo 1 y central Madre Tierra, haciendo análisis geográfico y zonas de Fresnel. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Figura 105.

Ubicación nodo 1 y central Madre Tierra

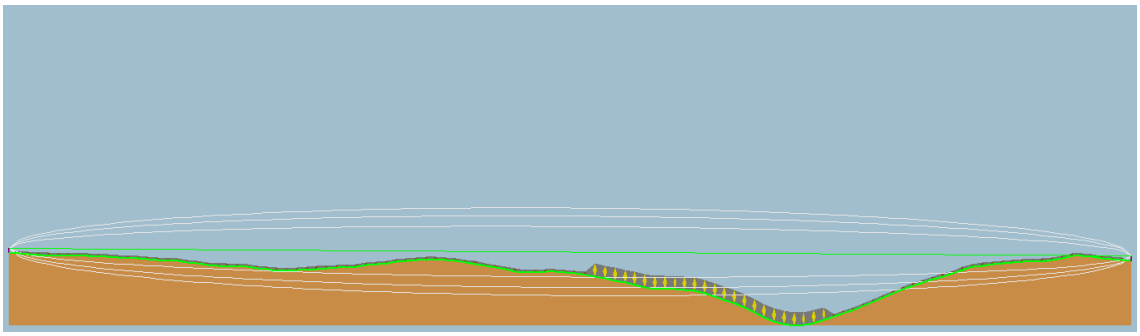
Nota. Línea vista y ubicación de nodo 1 y central Madre Tierra. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Los resultados de la simulación del nodo 1 y la central Madre Tierra dan una distancia lineal de:

- 1.154K
- Diferencia de altura de 43m
- Un RSSI de -79.23dBm

Figura 106.

Estudio de enlace entre nodo 2 y central Madre Tierra



Nota. Estudio de enlace entre nodo 2 y central Madre Tierra, haciendo análisis geográfico y zonas de Fresnel. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Figura 107.

Ubicación nodo 2 y central Madre Tierra

Nota. Línea vista y ubicación de nodo 2 y central Madre Tierra. Elaboración propia, realizado con Radio Mobile.

Los resultados de la simulación del nodo 2 y la central Madre Tierra dan una distancia lineal de:

- 1.125Km
- Diferencia de altura de 3m
- Un RSSI de -82.61dBm

CONCLUSIONES

1. La tecnología LoRa por sus características de hardware y frecuencia utilizada, permite establecer enlace de comunicación a larga distancia con poco consumo de energía.

2. El diseño del módulo de control del motor permite la conexión de 2 sensores análogos que manejen un rango de 0 a 5 v. para establecer las revoluciones por minuto y presión de salida. También cuenta con una salida de conexión para un servomotor que permita acelerar o desacelerar el motor de forma mecánica, y salida de 2 relés que permitan encenderlo y apagarlo de forma eléctrica/electrónica.

3. Dadas las características geográficas de los principales ingenios de Guatemala y las características de los módulos LoRa, las simulaciones muestran que es posible establecer un sistema de control de riego a distancia.

RECOMENDACIONES

1. Colocar la antena del módulo de control del motor sobre un mástil o a una altura mayor puede mejorar el alcance y la potencia de señal recibida por ambos módulos.

2. Hacer un análisis de la geografía donde se instalará el sistema para determinar el modelo de antena que permita mejorar el alcance y potencia de señal recibida.

3. Establecer el sistema con todas sus funcionalidades utilizando módulos LoRa de una marca distinta a Dragino es posible.

4. Utilizar un Arduino distinto al utilizado en este trabajo (Arduino UNO), es posible, si se determina que el procesamiento y las diferentes memorias permiten el funcionamiento del programa y las lecturas de pines necesarias.

REFERENCIAS

Arduino CC. (2018). *¿Qué es Arduino?* Arduino.CC. https://www.arduino.cc/en/guide/introduction

Fundación Madre Tierra. (2018). *Home - Madre Tierra producción responsable en armonía con el medio ambiente*. Madre Tierra. http://www.madretierra.com.gt/

Ingenio La Unión. (2019). *Inicio de operaciones en la zafra*. La Unión. http://www.launion.com.gt/

Ingenio Magdalena. (2017). *Historia*. IMSA. https://www.imsa.com.gt/historia.html

Ingenio Palo Gordo. (2012). *Inicio*. IPG. http://www.ipg.com.gt/web/guest/inicio

Ingenio Pantaleón. (2016). *Ingenio Pantaleón sobre nosotros*. Pantaleón.com. https://www.pantaleon.com/#ingenios-guatemala-pantaleon

Ingenio Santa Ana. (2019). *Somos Santa Ana*. SantaAna.com.gt https://www.santaana.com.gt/web/guest/somossantaana/nuestrahistoria

Kushner, D. (2011). *IEEE Spectrum: technology, engineering, and science news* [IEEE Spectrum: noticias sobre tecnología, ingeniería y ciencia]. The making of Arduino [La creación de Arduino]. https://spectrum.ieee.org/geek-life/hands-on/the-making-of-arduino

Redacción Infoagro. (2020). *El cultivo de la caña de azúcar*. Infoagro. https://www.infoagro.com/documentos/el_cultivo_cana_azucar.asp

Slats, L. (8 de enero de 2020). *Una breve historia de LoRa: tres inventores comparten su historia personal en la Conferencia de las Cosas*. Semtech. https://blog.semtech.com/a-brief-history-of-lora-three-inventors-share-their-personal-story-at-the-things-conference

Wikipedia. (2021). *Indicador de fuerza de la señal recibida*. Wikipedia. https://es.wikipedia.org/wiki/Indicador_de_fuerza_de_la_señal_recibida