SENATI

SERVICIO NACIONAL DE ADIESTRAMIENTO EN TRABAJO INDUSTRIAL

DIRECCION ZONAL LIMA CALLAO

Proyecto de Innovación y/o Mejora
Nivel Profesional Técnico

ESCUELA / CFP Electrotecnia, Independencia

"Implementación de un sistema de localización en tiempo real de herramientas e instrumentos de medición para Ferreyros S. A."

Autor : Carolina Celeste Navarro Aldoradin

Asesor : Alexsander Manco Malpica

Lima, Perú

2025

ESTRUCTURA PROYECTO DE INNOVACIÓN Y/O MEJORA NIVEL PROFESIONAL TÉCNICO

Índice

Índice 2

Figuras 5

Tablas 9

Ecuaciones 11

Resumen ejecutivo del proyecto de innovación y/o mejora 14

CAPÍTULO I GENERALIDADES DE LA EMPRESA 16

1.1. Razón social 16

1.2. Misión, Visión, Objetivos, Valores de la empresa 16

1.2.1. Misión 16

1.2.3. Objetivos 16

1.2.4. Valores 17

1.3. Productos, mercado y clientes 18

1.3.1. Producto/servicio 18

1.3.2. Mercado 19

1.3.3. Clientes 19

1.4. Estructura de la organización 19

1.5. Otra información relevante 21

CAPÍTULO II PLAN DEL PROYECTO DE INNOVACIÓN Y/O MEJORA 22

2.1. Identificación del problema técnico en la empresa 22

2.1.1. Presentación de la empresa 22

2.1.2. Descripción de procesos 23

2.2. Objetivos del Proyecto de Innovación y/o Mejora 40

2.3. Antecedentes del Proyecto de Innovación y/o Mejora 46

2.4. Justificación del Proyecto de Innovación y/o Mejora 49

2.5. Marco Teórico y Conceptual 51

2.5.1. Fundamento teórico del Proyecto de Innovación y Mejora 51

2.5.2. Conceptos y términos utilizados 69

CAPÍTULO III ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL 77

3.1. Mapa del flujo de valor actual y/o diagrama de proceso actual 77

3.2. Efectos del problema en el área de trabajo o en los resultados de la empresa 82

3.3. Análisis de las causas raíz que generan el problema 83

3.4. Priorización de causas raíz (Diagrama de Pareto, factores cualitativos, etc) 86

3.5. Análisis de causas principales 91

CAPÍTULO IV PROPUESTA TÉCNICA DE LA MEJORA. 95

4.1. Plan de acción de la mejora propuesta 95

4.1.1. Diseño detallado del RTLS (1 día / 8 h) 99

4.1.2. Configuración de beacons nRF52833 (1 día / 8 h) 99

4.1.3. Configuración de gateways ESP32 DA N4 (1 día / 8 h) 99

4.1.4. Desarrollo de flujos Node-RED (1 día / 8 h) 100

4.1.5. Configuración de Google Sheets y Apps Script (0.5 día / 4 h) 100

4.1.6. Configuración de BigQuery (1 día / 8 h) 101

4.1.7. Algoritmo básico de trilateración (1 día / 8 h) **101**

4.1.8. Dashboard en Node-RED (0.5 día / 4 h) **101**

4.1.9. Pruebas de campo integrales (1.5 días / 12 h) **102**

4.1.10. Documentación y capacitación (1 día / 8 h) **102**

4.2. Consideraciones técnicas, operativas y ambientales para la implementación de la mejora 103

4.2.1. Consideraciones técnicas **103**

4.2.2. Consideraciones previas **131**

4.2.3. Consideraciones de seguridad **132**

4.2.4. Consideraciones ambientales **132**

4.3. Recursos técnicos para implementar la mejora propuesta **134**

4.3.1. Materiales **134**

4.3.2. Mano de obra **138**

4.3.3. Máquinas, instrumentos, herramientas y equipos **139**

4.3.4. Otros recursos **139**

4.4. Mapa de flujo de valor de la situación mejorada o diagrama de proceso mejorado 140

4.5. Cronograma de ejecución de la mejora **143**

4.6. Aspectos limitantes de la implementación de la mejora **145**

CAPÍTULO V COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN DE LA MEJORA **146**

5.1. Costo de materiales **146**

5.2. Costo de mano de obra **154**

5.3. Costo de máquinas, herramientas y equipos **154**

5.4. Otros costos de implementación 155

5.5. Costo total de la implementación de la Mejora 156

CAPÍTULO VI EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA MEJORA 157

6.1 Análisis cuantitativo 157

6.2 Relación Beneficio/Costo 162

CAPÍTULO VII CONCLUSIONES 164

7.1 Conclusiones respecto a los objetivos del Proyecto de Innovación y/o Mejora 164

CAPÍTULO VIII RECOMENDACIONES 166

8.1 Recomendaciones para la empresa respecto del Proyecto de Innovación y Mejora 166

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 168

ANEXOS 177

Anexo A Selección de MCU para beacon 193

FIGURAS

Figura 1 *Logotipo de Ferreyros S. A.* 16

Figura 2 *Valores corporativos de Ferreyros S. A.* 17

Figura 3 *Camión Minero 797F con motor CAT C175-20* 18

Figura 4 *Divisiones de Ferreyros S. A.* 20

Figura 5 *Estructura organizacional de las gerencias del CRC e Ingeniería* 20

Figura 6 *Logotipo de Ferreycorp* 21

Figura 7 *Sede principal de talleres* 21

Figura 8 *Armado de componentes* 23

Figura 9 *Diagnóstico de fallas en RGBi* 26

Figura 10 *Creación de solicitud de pedido (Solped) en SAP* 26

Figura 11 *Armario de herramientas mediano marca Husky* 30

Figura 12 *Problemas identificados en la empresa* 39

Figura 13 *No ubicadas - Desarmado de motores* 44

Figura 14 *No ubicadas Armado de motores* 44

Figura 15 *No ubicadas Armado de motores* 44

Figura 16 *No ubicadas Desarmado de motore*s 45

Figura 17 *Flujo de uso de AppSheet* 48

Figura 18 *Programación semanal de inventario* 49

Figura 19 *Distribución de frecuencias por canales de BLE* 54

Figura 20 *Arquitectura de la pila de protocolos Bluetooth Low Energy (BLE)* 56

Figura 21 *Coexistencia espectral entre Wi-Fi y Bluetooth Low Energy (BLE) en la banda de 2.4 GHz* 57

Figura 22 *Salto de frecuencias adaptativo a lo largo del tiempo* 59

Figura 23 *Intervalos de Advertising y Scanning* 61

Figura 24 *Tipos de dirección de dispositivo BLE* 61

Figura 25 *Diagrama de flujo de la situación actual del proceso de gestión de activos* ... 78

Figura 26 *Diagrama actual de proceso de inventariado* 80

Figura 27 *Causas del problema* 85

Figura 28 *Priorización de causas del problema según resultados de encuesta* 90

Figura 29 *Imagen de referencia Inventario de Armado de motores 1* 93

Figura 30 *Control de herramientas vencidas*.....93

Figura 31 *Ficha técnica del HLK-PM01* 103

Figura 32 *Ficha técnica del Step Down MP1584EN*.....104

Figura 33 *Ficha técnica del Conversor USB-Serial CH340C*.....105

Figura 34 *Ficha técnica del ESP32-WROOM-DA-N4*.....106

Figura 35 Ficha técnica del cristal oscilador SMD.....107

Figura 36 *Ficha técnica del SoC BLE*.....108

Figura 37 *Ficha técnica del RTC de bajo consumo*.....109

Figura 38 *Ficha técnica de la Antena cerámica SMD*.....110

Figura 39 *Plano mecánico de carcasa ensamblada para lector BLE* 112

Figura 40 *Plano mecánico de tapa de carcasa para lector BLE*.....113

Figura 41 *Plano mecánico de base de carcasa para lector BLE*.....114

Figura 42 *Plano mecánico de ensamble de carcasa de beacon BLE* 115

Figura 43 *Plano mecánico de tapa de la carcasa del beacon* 116

Figura 44 *Base de carcasa del beacon* 117

Figura 45 *Diagrama de arquitectura del sistema*.....119

Figura 46 *Esquemático electrónico para el lector BLE*.....120

Figura 47 *Diseño PCB para lector BLE* 121

Figura 48 *Vista blanco y negro de diseño PCB de lector BLE*.....122

Figura 49 *Vista 3D de la placa PCB del lector* 123

Figura 50 *Esquemático electrónico de beicon BLE* 124

Figura 51 *Diseño PCB de beacon BLE* 125

Figura 52 *Vista blanco y negro de diseño PCB para beacon BLE* 126

Figura 53 *Flujo de datos* 127

Figura 54 *Dashboard de referencia del sistema RTLS para uso del personal técnico y administrativo* 128

Figura 55 *Ubicaciones de los lectores* 130

Figura 56 *DAP del proceso mejorado de inventariado de herramientas* 141

Figura 57 *Cronograma de ejecución de la mejora* 143

Figura 58 *Definición de pines del ESP32-WROOM-DA-N4* 180

Figura 59 *Vista 2D de la placa PCB del lector BLE* 181

Figura 60 *Visualización de RSSI en prueba con ESP32* 182

Figura 61 *Flujo básico de prueba en node-red* 183

Figura 62 *Resultados en terminal de respuesta de broker* 184

Figura 63 *Tabla de RSSI* 186

Figura 64 *Comparación de soporte de protocolo inalámbrico entre modelos de la serie nRF52* 196

Figura 65 *Corriente empleada según nRF52833* 208

Figura 66 *Flujo Operativo Optimizado* 212

Figura 67 *PCB* 213

Figura 68 *Vista 3D del PCB del beacon con capas separadas* 215

Figura 69 *Código para el beacon* 218

Figura 70 *Algoritmo del Firmware del Beacon* 231

Figura 71 *Código de gateway* 232

Figura 72 *Diagrama del flujo del gateway ESP32* 240

Figura 73 *Flujo de Node-RED* 241

Figura 74 *Google Apps Script para Notificaciones Automáticas de Vencimientos* 248

Figura 75 *Diagrama de flujo del AppScript* 251

Figura 76 *Flujo de entrada a BigQuery* 252

TABLAS

Tabla 1 *Personal de la empresa entrevistado* 27

Tabla 2 *Lluvia de ideas por fenómenos para la identificación de los problemas* 28

Tabla 3 *Criterio de valoración* 33

Tabla 4 *Resultados de la valoración de problemas* 34

Tabla 5 *Análisis de frecuencias según valoración* 36

Tabla 6 *Problema principal y causas raíz* 41

Tabla 7 *Objetivos específicos de la mejora* 41

Tabla 8 *Causas del problema y objetivos específicos* 42

Tabla 9 *Búsqueda de herramientas Motores noviembre 2024* 46

Tabla 10 *Causas del retraso en el inventariado y pérdida de herramientas* 84

Tabla 11 *Cuadro de valoración para la priorización de causas* 87

Tabla 12 *Resultados de encuesta de causas del problema principal* 87

Tabla 13 *Matriz de frecuencias resultado de la encuesta de causas* 88

Tabla 14 *Recursos usados para una toma de inventario usual* 93

Tabla 15 *Plan de acción para la mejora propuesta* 95

Tabla 16 *Materiales para un beacon* 134

Tabla 17 *Materiales para Gateway* 136

Tabla 18 *Mano de obra involucrada en la implementación* 138

Tabla 19 *Lista de programas usados en el diseño y la implementación de la mejora* ... 139

Tabla 20 *Costos de materiales para un beacon* 147

Tabla 21 *Costos de materiales para un lector/gateway* 149

Tabla 22 *Costos total de materiales* 153

Tabla 23 *Costo de mano de obra de la mejora* 154

Tabla 24 *Costo de máquinas, herramientas y equipos* 154

Tabla 25 *Programas utilizados* 155

Tabla 26 *Otros costos de implementación* 156

Tabla 27 *Costo total de la mejora* 156

Tabla 28 *Causas principales del problema* 157

Tabla 29 *Diagrama de análisis de proceso de inventario* 158

Tabla 30 *Tiempo perdido en el proceso de inventariado* 158

Tabla 31 *Costo temporal del proceso de inventariado de herramientas* 159

Tabla 32 *Costo de mano de obra por proceso de inventariado anualmente* 159

Tabla 33 *Análisis de costos de herramientas* 160

Tabla 34 *Resumen de pérdidas totales* 160

Tabla 35 *Pérdida anual* 161

Tabla 36 *Inversión anual de la mejora* 161

Tabla 37 *Pérdidas y ahorro según mejora* 162

Tabla 38 *Comparación de procesadores de beacon* 178

Tabla 39 *Comparativa de Baterías para Beacon con SoC nRF52833* 179

Tabla 40 *Tabla Comparativa de Módulos BLE Ultracompactos (< 2 cm)* 194

Tabla 41 *Principales diferencias entre el nRF52811 y el nRF52833* 196

Tabla 42 *Lista resumida de requisitos de batería* 201

Tabla 43 *Baterías evaluadas inicialmente* 202

Tabla 44 *Modos de Sueño en nRF52833* 203

Tabla 45 *Variables del sistema* 204

Tabla 46 *Parámetros de seguridad* 207

Tabla 47 *Mapeo de modos operativos vs. Términos técnicos* 209

Tabla 48 *Parámetros completados* 209

Tabla 49 *Resultados preliminares para las 3 baterías* 211

ECUACIONES

Ecuación 1 *Algoritmo de salto de frecuencia adaptativo* 59

Ecuación 2 *Modelo de Atenuación con Shadowing* 62

Ecuación 3 *Desfase de señal de elementos adyacentes* 63

Ecuación 4 *Distancia según retardo de viaje de ida y vuelta* 64

Ecuación 5 *Sistema de ecuaciones hiperbólicas* 65

Ecuación 6 *Relación señal-ruido (SNR)* 65

Ecuación 7 *Distribución de Rayleigh para Fading Multipath* 66

Ecuación 8 *Factor K de Rice para Componente Dominante* 66

Ecuación 9 *Predicción en Filtro de Kalman* 67

Ecuación 10 *Actualización en Filtro de Kalman* 67

Ecuación 11 *Probabilidad de Éxito en AFH* 68

Ecuación 12 *Jitter* 68

Ecuación 13 *Beneficio/Costo* 162

Ecuación 14 *Relación Costo Beneficio* 162

Ecuación 15 *Tiempo de recuperación de inversión en meses* 162

Ecuación 16 *Conversión de mes incompleto a días* 163

Ecuación 17 *Eventos de TX por día* 205

Ecuación 18 *Energía Diaria en TX* 205

Ecuación 19 *Energía Diaria en Deep Sleep* 205

Ecuación 20 *Energía Diaria en Hibernación* 206

Ecuación 21 *Consumo Total Diario Ajustado* 206

Ecuación 22 *Autonomía (días)* 206

Ecuación 23 *Autonomía (meses)* 206

Ecuación 24 *Cálculos para CR1220 (TX cada 7s)* 211

RESUMEN EJECUTIVO DEL PROYECTO DE INNOVACIÓN Y/O MEJORA

El presente proyecto titulado “Implementación de un Sistema de Localización de Activos en Tiempo Real” tiene como finalidad optimizar la gestión de herramientas en la empresa Ferreyros, abordando dos problemas críticos: la pérdida recurrente de activos y el retraso significativo en los procesos de inventariado. Actualmente, el proceso de control y registro de herramientas se realiza de forma manual, generando inconsistencias, demoras y un alto riesgo de pérdidas materiales. Esta situación no solo afecta la eficiencia operativa, sino que también genera un costo económico considerable para la empresa.

La propuesta consiste en implementar un sistema RTLS (Real-Time Location System) utilizando tecnología BLE 5.0 con Angle of Arrival (AoA), aprovechando las capacidades del microcontrolador nRF52833 como beacon y del ESP32-WROOM-DA como lector BLE. Este sistema permitirá la localización en tiempo real de las herramientas dentro del almacén o áreas de operación, automatizando el registro de ubicación y reduciendo el tiempo requerido para los inventarios, además de disminuir los riesgos asociados a extravíos o pérdidas.

En términos de impacto operativo, el análisis DAP (Diagnóstico del Alto Potencial) muestra una mejora significativa en los tiempos de inventariado, reduciendo de 2192 minutos a 385 minutos por inventario, lo que representa un ahorro de 1807 minutos por cada ciclo. Esta mejora se traduce en una mayor disponibilidad de herramientas, mejor planificación operativa y una reducción de la carga administrativa para el personal logístico.

Desde el punto de vista económico, se estima que el costo de oportunidad por no implementar este sistema asciende a S/. 52,297.60 anuales, asociados a pérdidas de herramientas y tiempos improductivos. En contraste, la inversión total requerida para la implementación del sistema es de S/. 32,130.40, lo cual evidencia una relación costo-beneficio favorable para la empresa en el corto plazo, con posibilidades de escalabilidad y adaptabilidad a otras sedes o unidades de negocio.

En conclusión, el desarrollo e implementación del sistema de localización de activos en tiempo real representa una solución tecnológica efectiva, de bajo costo y alto impacto, alineada con las metas de innovación y mejora continua de Ferreyros. Su ejecución contribuirá directamente a la eficiencia operativa, la trazabilidad de activos y el fortalecimiento del control logístico, posicionando a la empresa a la vanguardia en la gestión digital de herramientas en entornos industriales.

CAPÍTULO I
GENERALIDADES DE LA EMPRESA

1.1.Razón social

FERREYROS S.A.

RUC: 20100028698

Figura 1

Logotipo de Ferreyros S. A.

Teléfono: Lima: (51-1) 626-4000

Domicilio fiscal: Jr. Cristóbal de Peralta Norte 820, Surco.

Sede principal de talleres: Av. Industrial 675, Lima

1.2.Misión, Visión, Objetivos, Valores de la empresa

1.2.1. Misión

Proveer las soluciones que cada cliente requiere, facilitándole los bienes de capital y servicios que necesita para crear valor en los mercados en los que actúa.

1.2.2. Visión

Fortalecer nuestro liderazgo siendo reconocidos por nuestros clientes como la mejor opción, de manera que podamos alcanzar las metas de crecimiento.

1.2.3. Objetivos

- Proteger la seguridad y salud de sus colaboradores.

- Preservar el medio ambiente, reduciendo el impacto en el planeta y reduciendo el consumo de los recursos energéticos, hídricos y residuos.
- Mantener altos estándares de desempeño, mejorar nuestras reparaciones y la confiabilidad de nuestros clientes.

1.2.4. Valores

Los valores de una empresa son la base de su cultura organizacional y, por lo tanto, estarán arraigados a todos los procesos productivos de ésta. En Ferreyros, se cuentan con distintas políticas sobre el buen gobierno corporativo, declaración de conflicto de intereses, sistema de cumplimiento corporativo, etc., todas éstas se basan en los siguientes valores definidos por la empresa.

Figura 2

Valores corporativos de Ferreyros S. A.

1.3. Productos, mercado y clientes

1.3.1. Producto/servicio

Servicio de venta de bienes de capital de Caterpillar. Incluyendo la venta de repuestos de componentes para sus máquinas. Reparación y mantenimiento de los bienes de capital y sus componentes y soporte técnico en campo en el lugar de las operaciones.

- Calibraciones.
- Válvulas de motores, sistemas hidráulicos y transmisiones.
- Diagnóstico de fallas.
- Pruebas específicas.
- Campar (Motores marinos en embarcaciones) y pruebas de mar.
- Verificación de parámetros de los diferentes sistemas de equipos (motor, transmisión, hidráulico, frenos).
- Análisis técnico Nivel 1 (TA1)
- Análisis técnico Nivel 2 (TA2)
- Mantenimiento preventivo

Figura 3

Camión Minero 797F con motor CAT C175-20

Nota. Adaptado de Camión 797F [Fotografía], por Ferreyros (https://www.ferreyros.com.pe/equipo/camion-minero-797f/?parent=761)

1.3.2. Mercado

Mercado de bienes de capital en el Sector Industrial.

1.3.3. Clientes

La clientela de Ferreyros está constituida por empresas de los sectores agricultura, exploración marina, y minería. En este último, destacan las siguientes empresas:

- COMPAÑIA MINERA ANTAMINA S. A.
- MINERA CHINALCO PERÚ S.A.
- SOUTHERN PERU COPPER CORPORATION - SUCURSAL DEL PERU
- SOCIEDAD MINERA CERRO VERDE S.A.A.

1.4. Estructura de la organización

La empresa está constituida por Divisiones o Gerencias. A continuación, en las figuras 4 y 5 se muestran organigramas por divisiones y de las gerencias en las que se practicó respectivamente.

Figura 4

Divisiones de Ferreyros S. A.

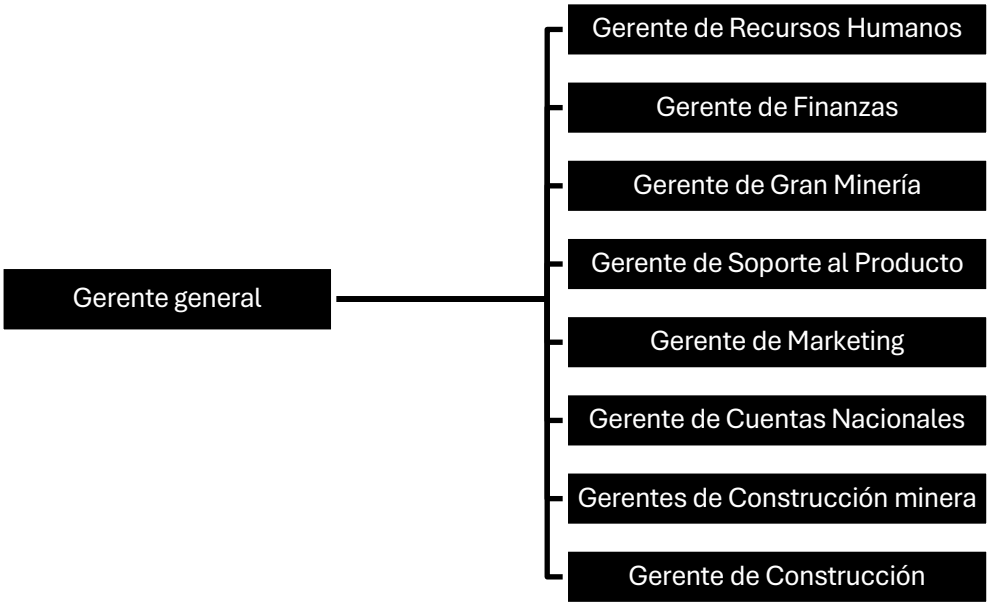
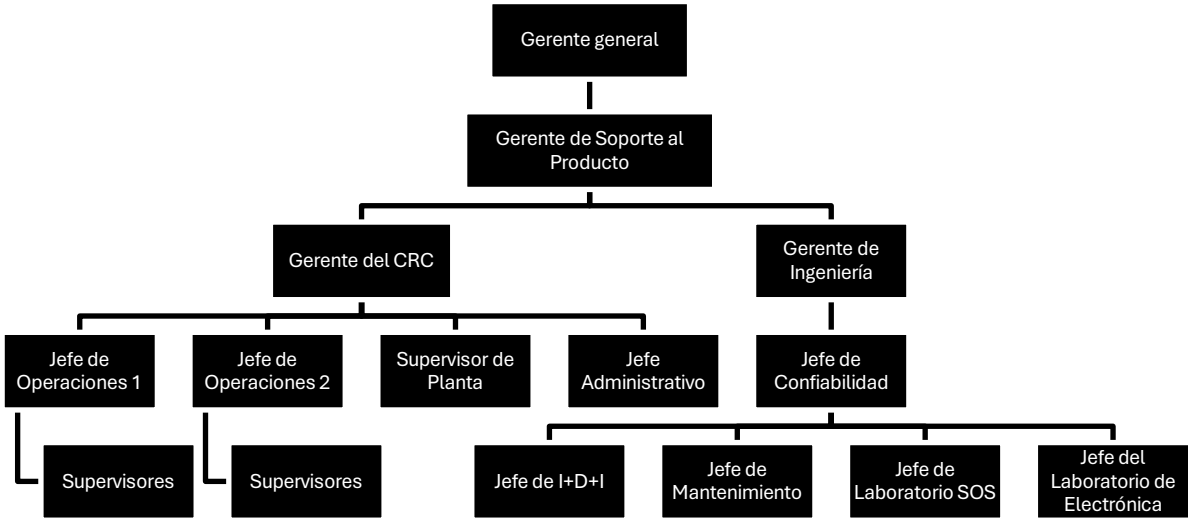


Figura 5

Estructura organizacional de las gerencias del CRC e Ingeniería



Nota: No se incluyen puestos como operador, técnico, especialista, investigador, ingeniero, etc.

1.5. Otra información relevante

Figura 6

Logotipo de Ferreycorp

- Integrante de la Corporación Ferreycorp.
- Representante de la marca Caterpillar en Perú.
- Certificación ISO 9001 – Procesos de Gerencia de División de Soporte al Producto de Ferreyros.
- En el ranking de Reputación Empresarial por sector productivo de Merco (Monitor Empresarial de Reputación Corporativa) se encuentra en el puesto 1° en sector industrial por once años consecutivos.
- 1er puesto en 2016, como Distintivo Empresa Socialmente Responsable (DESR), otorgado por Perú 21, en alianza con el Centro Mexicano para la Filantropía (CEMEFI).
- La empresa cuenta con diferentes locales y sedes, entre ellos la oficina principal, la sede principal de talleres, el centro de repuestos, la sede La Joya en Arequipa, y otros. Ferreyros S. A. está constituida por divisiones y gerencias, de las cuales algunas son transversales y otras de operaciones. Entre las transversales encontramos a Recursos Humanos, Marketing y Finanzas, y entre las divisiones de operaciones encontramos a Gran Minería, Construcción, Construcción Minera y Soporte al Producto.

Figura 7

Sede principal de talleres

Nota. Adaptado de Ferreyros Industrial [Fotografía], por Jefferson Romero, 2023, Google Maps. (https://lh3.googleusercontent.com/p/AF1QipNgQQLrj0jiH_C8LrIXTsX57A9vQ_cL_crVQa6x=s680-w680-h510)

CAPÍTULO II
PLAN DEL PROYECTO DE INNOVACIÓN Y/O MEJORA

2.1. Identificación del problema técnico en la empresa

Para identificar el problema técnico, previamente se requiere la identificación de procesos de la empresa, para analizar las oportunidades de mejora en ésta.

Adicionalmente, se realizará una breve descripción de cada proceso, dividido por área.

2.1.1. Presentación de la empresa

Ferreyros es la empresa líder en la comercialización de bienes de capital en el país y en la provisión de servicios en este ámbito. Integrante de la corporación Ferreycorp, es distribuidora de Caterpillar desde 1942, así como de otras prestigiosas marcas.

2.1.2. Descripción de procesos

Se presenta una lista de procesos que se realizan en la División de Soporte al Producto, clasificándose por el área a los que pertenecen, entre ellas el Centro de Reparación de Componentes (en adelante, el CRC) y el Laboratorio de Electrónica.

Centro de Reparación de Componentes (CRC):

Procesos de producción

- Desarmado de componentes (motores, transmisiones, convertidores, etc.). Consiste en el desarmado de componentes dependiendo del tipo de reparación, ya sea parcial, general, y/o AFA.
- Armado de componentes (motores, transmisiones, convertidores, etc.). Después del correcto de desarmado de los componentes y sustitución de las partes no idóneas para el funcionamiento de éstos, se procede a armar el componente.

Figura 8
Armado de componentes

Nota: Técnico del CRC haciendo ajuste en un motor Caterpillar.

- Pruebas instrumentales (pruebas en dinamómetro o banco hidráulico). Después del armado correcto del componente, para comprobar el funcionamiento correcto, se requiere realizar pruebas instrumentales en las que se tienen que cumplir parámetros específicos para las variables del componente y certificar su adecuado rendimiento en operación.

Procesos administrativos/transversales

- Inventario de herramientas/instrumentos. Periódicamente se realiza una revisión, bahía por bahía, a los armarios de herramientas/instrumentos, para verificar su ubicación. Se cuenta con una lista de herramientas/instrumentos no ubicados y/o vencidos, de la cual también se tiene que hacer la revisión bahía por bahía. Esta revisión se realiza llevando una lista impresa con las listas necesarias y un carrito para llevar las herramientas que se encuentren vencidas o sin marcar a mantenimiento. El inventario se realiza en las más de 60 bahías con un o dos armarios cada una, de manera manual, y se actualiza alrededor de cada 3 semanas, generalmente por los practicantes y/o técnicos nuevos.

- Cotización de componentes y/o sistemas. Se realiza la cotización de los componentes que se tienen que sustituir en la reparación por daños excesivos/no permitidos. Para ello, se hace una lista de todos los componentes, separándolos por sistemas, y agregando los precios correspondientes según la plataforma de precios.
- Redacción de informes. Se redactan informes técnicos de las reparaciones por área, resaltando los hallazgos de partes que no pasan los estándares de calidad (sus niveles de desgaste sobrepasan los parámetros establecidos, por ejemplo), tomando fotos de estos para la justificación ante el cliente de la necesidad de uso de componentes nuevos o reman core de almacén.
- Creación de orden de compra. Se sube la cotización con datos adicionales al sistema SAP para que el área de compras continúe con el proceso de adquisición del activo. Generalmente realizado por los asistentes administrativos del CRC.

Laboratorio de Electrónica

Procesos de investigación/diagnóstico

- Inspección técnica. Se realiza una revisión visual o con instrumentos de medición a los componentes eléctricos o electrónicos con fallas para su diagnóstico. Algunos ejemplos de los componentes que llegan al laboratorio para este fin son las ECMs y recientemente los RGBIs (Ver figura X).

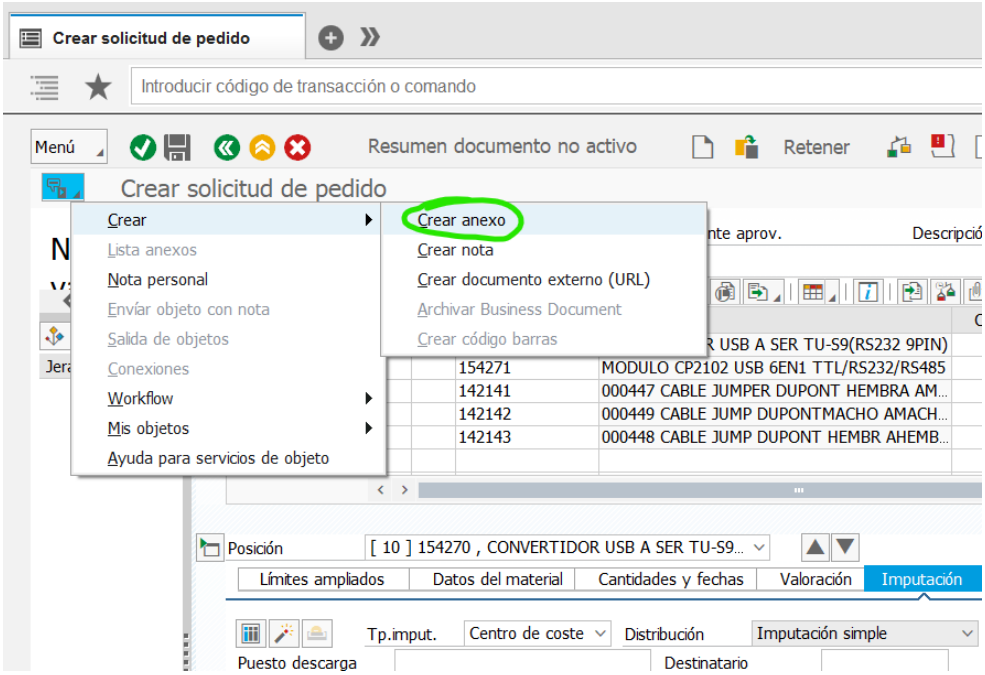
Figura 9
Diagnóstico de fallas en RGBi

- Programación. Programar en JavaScript, C++, Python, etc., y/o configurar dispositivos como microcontroladores o sensores.

Procesos administrativos/transversales:

- Generación de Solped. Se genera una orden de compra de los insumos, materiales y aparatos necesarios para algún proyecto del laboratorio (Ver figura X).

Figura 10
Creación de solicitud de pedido (Solped) en SAP



- Investigación. Proceso en el que se recopila información sobre un equipo en específico o el funcionamiento de un sistema. Generalmente se trata de un proceso de investigación por internet, pero también cuando se tienen, se realiza la lectura de planos eléctricos o instructivos entregados por los proveedores.
- Cotización. Se contacta con proveedores de los equipos, materiales y/o servicios que se desean adquirir y se les solicita cotizaciones. Se consigue al menos 3 proveedores.
- Redacción de informes. Se redactan informes internos para la futura consulta por algún miembro del equipo de los procedimientos que se realizaron en un proyecto.

La identificación del problema requerirá llevar a cabo una evaluación en las áreas del CRC y el laboratorio de Electrónica de la empresa **FERREYROS S.A** con el apoyo del personal del área. Para ello, se realizará una lluvia de ideas de los problemas más frecuentes en las áreas, esta técnica luego será sometida a un procesamiento que nos permitirá diagnosticar el problema principal y las causas que ocasionan dicho problema.

En la siguiente tabla se ha dominado con las letras ABCD al personal de la Empresa, también se menciona el cargo que ocupa cada uno de ellos; será quienes nos ayudaran con la entrevista.

Tabla 1

Personal de la empresa entrevistado

N°	Nombre y apellidos	Cargo
A	Carlos Cossio	Jefe de Operaciones del CRC
B	Sofia Calzada	Asistente administrativo del CRC

C	Angel Quispe	Asistente administrativo del CRC
D	Luis Zapata	Jefe del laboratorio de Electrónica

Comentario: *Personal de las áreas del taller CRC y el Laboratorio de Electrónica.*

A continuación, se presenta una tabla con los problemas identificados en las áreas del CRC y el laboratorio de Electrónica.

Tabla 2

Lluvia de ideas por fenómenos para la identificación de los problemas

N°	Problemas encontrados
1	Duración excesiva del proceso de extracción de dowels
2	Retrasos en el proceso de inventariado y pérdida de herramientas
3	Ubicación y sujeción errónea de los extintores
4	Falta de mantenimiento preventivo y predictivo para insumos de importación
5	Ineficiente gestión de correos electrónicos
6	Creación de reservas en el Pide de manera manual
7	Creación de informes de prueba de Banco hidráulico de manera manual para los modelos de transmisión o convertidores de los que no se tiene plantilla
8	Retraso de devolución de herramientas por mantenimiento
9	Falta de planificación de las tareas diarias y entregables de los miembros del laboratorio de electrónica
10	Condiciones ambientales inadecuadas del Banco de pruebas hidráulico

Comentario: Se realizó una lluvia de ideas para poder encontrar los problemas más recurrentes en las áreas mencionadas anteriormente.

En la tabla 2, se han enumerado los problemas encontrados del 1 al 10, para su identificación posterior, se tendrá en cuenta la denominación Px, donde "x" será el número del problema mencionado. A continuación, se realiza una breve descripción de cada problema.

- **P1. La extracción de dowels** del monoblock es un paso parte del proceso de desarmado de motores. Este se realiza con ayuda de una herramienta mecánica que requiere de una fuerza física manual. El mayor problema es que pese a que no requiere de un gran esfuerzo físico, la herramienta mecánica requiere de varios pasos para extraer un solo dowel, lo que retrasa el proceso de desarmado.
- **P2. El proceso de inventariado de herramientas e instrumentos** toma entre 2 días a una semana y necesita de un personal de más de 4 personas. El proceso se repite cada 3 semanas o cada mes y consiste en la revisión de las herramientas de cada husky de cada bahía con la ayuda de una lista impresa, apuntando manualmente detalles importantes, como si se encontró una herramienta no ubicada, una herramienta sin marcar, etc. En total son alrededor de 60 bahías, en algunas bahías hay más de una husky, y en cada husky se encuentran alrededor de 10 a 20 herramientas e instrumentos. Las herramientas se mueven frecuentemente, tanto en el momento de operación, como en el traslado de un técnico a otra bahía de trabajo, en cuyas oportunidades puede mover solo algunas herramientas o llevar consigo toda su husky. En otras oportunidades, el traslado de una herramienta o instrumento se podría deber al préstamo de un técnico a otro de uno de estos activos. Estos dos factores, con el transcurso del tiempo ha derivado en que algunas herramientas e instrumentos sean imposibles de ubicar ya que ya nos encuentran en la ubicación

original a la que fueron asignadas o a las que se las vio en un anterior inventario. Esta falta de localización o pérdida ha causado que dé una acumulación de herramientas no ubicadas y/o vencidas.

Figura 11

Armario de herramientas mediano marca Husky

Nota: Las “huskyes” son los armarios o “cajas” en las que los técnicos guardan las herramientas de sus bahías.

- P3. Ubicación y sujeción errónea de los extintores

Este problema surge cuando los extintores no están colocados en los lugares designados o no están debidamente asegurados. Esto puede deberse a la falta de señalización adecuada, modificaciones en la distribución del área de trabajo sin reubicar los extintores correctamente, o instalaciones deficientes que no garantizan su estabilidad. La incorrecta ubicación de los extintores puede generar riesgos en situaciones de emergencia, retrasando su acceso y aumentando la posibilidad de que

un incendio no sea controlado a tiempo. Además, una mala sujeción puede provocar caídas accidentales, dañando el equipo o generando riesgos de lesiones para el personal.

- P4. Falta de mantenimiento preventivo y predictivo para insumos de importación

Los insumos de importación, como herramientas especializadas, repuestos o equipos críticos, requieren mantenimiento preventivo y predictivo para garantizar su correcto funcionamiento y prolongar su vida útil. La falta de estas estrategias puede generar fallas inesperadas, afectando la operatividad de los equipos y provocando tiempos de inactividad no planificados. Además, dado que se trata de insumos de importación, los tiempos de reposición pueden ser largos debido a trámites aduaneros y disponibilidad de proveedores, lo que agrava el impacto de la falta de mantenimiento adecuado.

- P5. Ineficiente gestión de correos electrónicos

Este problema ocurre cuando no hay una organización clara en el manejo del correo electrónico dentro de la empresa. La acumulación de mensajes sin clasificar, la falta de respuesta oportuna y la pérdida de información importante generan retrasos en la comunicación y afectan la coordinación de actividades. Además, la ausencia de filtros o automatización puede hacer que correos críticos se pierdan entre notificaciones menos relevantes, impactando la productividad y aumentando el riesgo de errores por falta de seguimiento.

- P6. Creación de reservas en el Pide de manera manual

El proceso manual de creación de reservas en el sistema Pide representa una carga operativa innecesaria que consume tiempo y puede generar errores humanos,

como la duplicación de pedidos, omisión de datos o retrasos en la aprobación. La ausencia de automatización hace que los usuarios deban ingresar la información de manera repetitiva, aumentando la posibilidad de inconsistencias y reduciendo la eficiencia del proceso de reservas.

- P7. Creación de informes de prueba de Banco hidráulico de manera manual para los modelos de transmisión o convertidores de los que no se tiene plantilla

Cuando no existen plantillas predefinidas para ciertos modelos de transmisión o convertidores, la generación de informes de prueba en el Banco hidráulico se vuelve un proceso manual que demanda más tiempo y aumenta el riesgo de errores en la documentación. Esto puede retrasar la entrega de resultados, afectar la trazabilidad de los registros y dificultar el análisis de datos históricos para mantenimiento o mejoras en el proceso.

- P8. Retraso de devolución de herramientas por mantenimiento

Las herramientas enviadas a mantenimiento deben ser devueltas en los tiempos establecidos para evitar interrupciones en el trabajo. Sin embargo, los retrasos en su devolución pueden deberse a una mala planificación, falta de seguimiento o problemas con los proveedores encargados del mantenimiento. Esto puede ocasionar tiempos muertos en la operación, afectar la productividad y generar la necesidad de adquirir herramientas adicionales como medida temporal, aumentando los costos operativos.

- P9. Falta de planificación de las tareas diarias y entregables de los miembros del laboratorio de electrónica

La ausencia de una planificación clara para las actividades diarias del laboratorio de electrónica genera desorden y reduce la eficiencia del equipo. La falta de asignación de tareas específicas y la ausencia de cronogramas definidos pueden provocar retrasos en los entregables, solapamiento de actividades y una mala gestión del tiempo. Además, esto impacta en la capacidad de respuesta del laboratorio ante requerimientos urgentes, ya que no se tienen en claro la prioridad de cada proyecto y por lo tanto, se compromete la calidad del trabajo realizado.

- P10. Condiciones inadecuadas de control de contaminación del Banco de pruebas hidráulico

El Banco de pruebas hidráulico requiere condiciones específicas para garantizar la precisión de las pruebas y la integridad de los componentes analizados. La presencia de partículas contaminantes, polvo o fluidos no controlados puede afectar los resultados de las pruebas, acelerar el desgaste de los equipos y generar fallos en los componentes analizados. La falta de un adecuado control de contaminación también puede impactar la seguridad del personal y la confiabilidad de los diagnósticos realizados.

Se presenta un cuadro de valoración con el cual serán calificados los problemas encontrados en la lluvia de ideas. Esta valoración será realizada por el personal de la empresa de la tabla 2. Cada uno dará su calificación a cada problema identificado para obtener un puntaje total.

Tabla 3

Criterio de valoración

BAJO	MEDIO	ALTO

1	2	3

Comentario : En este cuadro podemos visualizar el puntaje que se estableció para evaluar nuestra lluvia de ideas lo cual será efectuado con el apoyo del personal de la Empresa.

La Empresa, representada a través de sus Gerentes, Jefes, Supervisores o quién asignen para esta función, determinará los criterios de mayor importancia, designándole un valor numérico a cada uno de ellos.

Tabla 4

Resultados de la valoración de problemas

N°	Problema	A	B	C	D	TOTAL
1	Duración excesiva del proceso de extracción de dowels	2	1	1	1	5
2	Retrasos en el proceso de inventariado y pérdida de herramientas	3	3	3	1	10
3	Problemas de infraestructura no resuelta	2	2	1	1	6
4	Falta de mantenimiento preventivo y predictivo para insumos de importación	1	1	1	1	4
5	Ineficiente gestión de correos electrónicos	1	1	1	1	4
6	Creación de reservas en el Pide de manera manual	1	1	1	1	4
7	Creación de informes de prueba de Banco hidráulico de manera manual para los	1	1	1	1	4

	modelos de transmisión o convertidores de los que no se tiene plantilla					
8	Retraso de devolución de herramientas por mantenimiento	3	2	1	1	7
9	Falta de planificación de las tareas diarias y entregables de los miembros del laboratorio de electrónica	1	1	1	3	6
10	Condiciones inadecuadas de control de contaminación del Banco de pruebas hidráulico	1	1	1	1	4

Comentario: Se realizó una encuesta al personal de la tabla 1, el cual calificó a cada problema según el criterio establecido en la tabla 3.

Tabla 5

Análisis de frecuencias según valoración

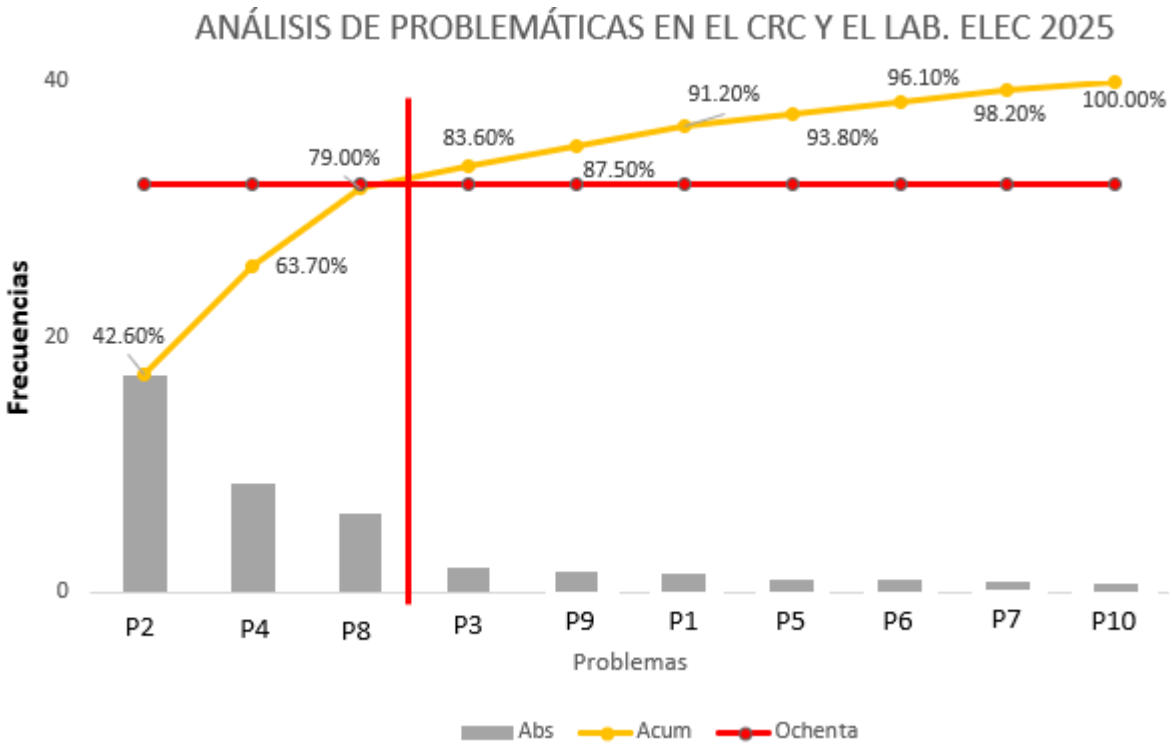
N°	Problema	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecu relativa acumulad
2	Retrasos en el proceso de inventariado y pérdida de herramientas	10	17.86%	17.8
8	Retraso de devolución de herramientas por mantenimiento	7	12.50%	30.3
3	Problemas de infraestructura no resuelta	6	10.71%	41.0
9	Falta de planificación de las tareas diarias y entregables de los miembros del laboratorio de electrónica	6	10.71%	51.7

1	Duración excesiva del proceso de extracción de dowels	5	8.93%	60.7
4	Falta de mantenimiento preventivo y predictivo para insumos de importación	5	8.93%	69.6
5	Ineficiente gestión de correos electrónicos	5	8.93%	78.5
6	Creación de reservas en el Pide de manera manual	4	7.14%	85.7
7	Creación de informes de prueba de Banco hidráulico de manera manual	4	7.14%	92.8

	para los modelos de transmisión o convertidores de los que no se tiene plantilla			
10	Condiciones inadecuadas de control de contaminación del Banco de pruebas hidráulico	4	7.14%	100.0

Figura 12

Problemas identificados en la empresa



Comentario: Con los insumos del cuadro de frecuencia absoluta se elaboró el diagrama de Pareto, el cual nos muestra los porcentajes obtenidos de acuerdo con la puntuación de la encuesta realizada de los empleados, esto nos permitió identificar nuestro problema principal.

Por lo tanto, se concluye que el problema a abordar es el **"Retraso en el proceso de inventariado y pérdida de herramientas" en el CRC**.

Descripción del problema. Este problema genera pérdidas económicas a la empresa debido a la pérdida de herramientas de trabajo, en especial instrumentos de medición. Por otro lado, también genera un desperdicio de horas hombres ya que se tiene que usar al personal técnico para realizar el inventario de manera manual. Finalmente, tiene otros inconvenientes como consecuencia de los primeros, ya que, al ser un proceso manual, las listas de inventario no son del todo confiables y son propensas a errores. Por otro lado, la falta de un inventario actualizado y confiable no permite implementar el

mantenimiento preventivo y predictivo correctamente y, por lo tanto, se llegan a encontrar herramientas vencidas o en mal estado en el taller que ocasionan que el área de Mantenimiento tenga que realizar el mantenimiento correctivo correspondiente, teniendo como consecuencia un tiempo de inactividad no planificada.

2.2. Objetivos del Proyecto de Innovación y/o Mejora

Los indicadores son una gran herramienta para controlar y mejorar los procesos (Corral), es por ello por lo que, en el presente proyecto, se dispuso de un análisis exhaustivo de las causas del problema, para así establecer objetivos finitos y realistas que satisfagan las necesidades del cliente.

El análisis aquí detallado se refiere al método de plantear objetivos específicos que ataquen directamente a las causas del problema, de esa forma, al cumplir con éstos, se daría como consecuencia la reducción de las principales fuentes que alimentan el problema y por lo tanto del problema multifactorial.

Por las razones que serán mencionadas a continuación, se estableció el siguiente como objetivo general:

"Implementar un sistema de localización en tiempo real de herramientas e instrumentos de medición para Ferreyros S. A. que permita reducir el tiempo empleado en el proceso de inventariado y búsqueda de herramientas no ubicadas"

Esto permitirá no tener la necesidad de buscar manualmente herramientas o instrumentos dentro del CRC, ya que se tendrá la ubicación a nivel de bahía, además de que se automatizará la notificación de vencimiento de cada activo a los involucrados interesados.

El problema principal encontrado y sus causas raíz, los cuales fueron encontrados y analizados en la primera sección del presente capítulo y en el capítulo III respectivamente, se listan a continuación.

Tabla 6

Problema principal y causas raíz

Problema	**Pérdida de herramientas y retrasos en el proceso de inventariado**
Causa 1	Inventario esporádico pocas veces al año que causa discrepancias en las bases de datos
Causa 2	Errores humanos en el inventario
Causa 3	Excesiva prolongación del proceso de inventariado
Causa 4	Herramientas vencidas en uso

De la anterior tabla, se estableció como el objetivo general del presente trabajo a "Automatizar el proceso de inventariado en el CRC". El objetivo general será acompañado de cuatro objetivos específicos, los cuales representan áreas clave del sistema y atacan una causa raíz de manera directa.

Tabla 7

Objetivos específicos de la mejora

N°	**Objetivos específicos**
1	Establecer un mecanismo de localización en tiempo real

2	Optimizar la integración de datos de herramientas entre el CRC y mantenimiento
3	Reducir el tiempo del proceso de inventariado en un 75% del tiempo original medido en minutos
4	Establecer un sistema de alarmas de fecha de vencimiento

Tabla 8

Causas del problema y objetivos específicos

Causas	Objetivos específicos	KPI
Inventario esporádico pocas veces al año que causa discrepancias en las bases de datos	Establecer un mecanismo de localización en tiempo real	Frecuencia de consulta de ubicación
Errores humanos en el inventario	Optimizar la integración de datos de herramientas entre el CRC y mantenimiento	Cantidad de bases de datos usadas en la consulta
Excesiva prolongación del proceso	Reducir el tiempo del proceso de inventariado en un 75% del tiempo original medido en minutos	Minutos en el Diagrama de Procesos
Herramientas vencidas en uso	Establecer un sistema de alarmas de fecha de vencimiento	Alarmas en funcionamiento

Nota: Entregable se refiere a la unidad de medida del indicador de cada objetivo específico.

A continuación, se describen los objetivos específicos y sus relaciones con cada causa raíz:

- Establecer un mecanismo de localización en tiempo real nos permitirá aumentar la frecuencia de inventariado a alrededor de 5 segundos, lo que significa que tendrá trazabilidad de la ubicación de las herramientas.
- Optimizar la integración de datos de herramientas entre el CRC y mantenimiento. Actualmente, se cuentan con una diversa cantidad de bases de datos entre CRC y mantenimiento, las cuales tienen discrepancias entre sí, ello no permite un control eficiente de las herramientas e instrumentos. Es por ello que, con la implementación de la presente mejora, solo se actualizará una sola base de datos que será compartida a ambas áreas.
- Reducir el tiempo del proceso de inventariado en un 75% del tiempo original medido en minutos. Tomándose como referencia el resultado de los minutos empleados en el inventario según el Diagrama Actual de Proceso, se propuso un conservador 75% de reducción, ya que en según el diagrama mejorado del proceso se obtendría una reducción del 82% medidos en minutos empleados al año.
- Establecer un sistema de alarmas de fecha de vencimiento permitirá el seguimiento activo de las fechas de vencimiento y recalibración de los instrumentos de medición. Estas alarmas llegarán a los técnicos del CRC a los que se les asignó la herramienta, así como al personal asignado por mantenimiento para el seguimiento de la herramienta. Las alarmas de seguimiento reducirán el uso de herramientas e instrumentos vencidos por los técnicos, ya que se les notificará con cierta anterioridad para que éstos puedan organizarse en cuanto al monto de trabajo que tienen y tomar mejores decisiones en cuanto a que momento llevarlo a mantenimiento.

Figura 13
No ubicadas - Desarmado de motores

10009242	13876	TURBINA ELECTRICA	GENERAL	No se encontró	H007	D18	H053
10009243	13877	TURBINA NEUMATICA	GENERAL	No se encontró	H053	D18	H053
10009379	14121	RACHET NEUMATICO	GENERAL	No se encontró		D19	H052
10060385	nan	CANCAMO GIRATORIO DESARMADO DE M	IZAJE	No se encontró		DESARMADO DE MOTORES 1	01 UND. 1,5 T
10062760	nan	TURBINA NEUMATICA	GENERAL	No se encontró	H007	D13	H007
10070525	90514	P-TURBINETA NEUMATICA 180° 1/4" C/CO	GENERAL	No se encontró		DESARMADO DE MOTORES 1	ANAQUEL 76
10076721	nan	Turbina neumática	GENERAL	No se encontró		SISTEMA DE LUBRICACION	
10076723	nan	HAND DRILL / TURBINETA NEUMATICO	GENERAL	No se encontró		SISTEMA DE LUBRICACION	TEC. VALER
10077220	nan	BRACKETS DESARMADO DE CULATAS	IZAJE	No se encontró		DESARMADO DE CULATAS	1 UND DE 3/8"
10078575	nan	BRACKETS DESARMADO DE HOUSING	IZAJE	No se encontró		DESARMADO DE HOUSING	01 UND DE 1/2"
10126070	nan	BRACKETS (2 UND DE 2TN)	IZAJE	No se encontró		DESARMADO DE MOTORES 1	2 UND DE 2TN
10126071	nan	BRACKETS (2 UND DE 1.5TN)	IZAJE	No se encontró		DESARMADO DE MOTORES 1	2 UND DE 1.5TN
10126079	nan	CANCAMOS (2 UND DE M16)	IZAJE	No se encontró		DESARMADO DE MOTORES 1	2 UND DE M16
10126080	nan	CANCAMOS (1 UND DE M8)	IZAJE	No se encontró		DESARMADO DE MOTORES 1	1 UND DE M8
10126083	nan	CANCAMOS (1 UND DE 0.4TN)	IZAJE	No se encontró		DESARMADO DE MOTORES 1	1 UND DE 0.4TN
10126787	nan	BRACKETS (01 UND DE 1/2")	IZAJE	No se encontró		DESARMADO DE HOUSING	01 UND DE 1/2"
10126817	nan	GRILLETES (01 UND DE 1/2")	IZAJE	No se encontró		DESARMADO DE MOTORES 1	01 UND DE 1/2"
10127630		PISTON HIDRAULICO ITH	IZAJE	No se encontró		D12	
10127632		CANCAMO GIRATORIO (02 UND DE M24)	IZAJE	No se encontró		D14	H003

Convertir a tabla

[UBICADAS - FINAL - DES. MOT] DES-MOT [NO UBICADAS - FINAL - DES. MOT.] [UBICADAS - FINAL - ARM. MOT.] [NO U Recuento: 74

Nota: Extraído de búsqueda de herramientas motores 2024 del mes de noviembre. No se ubicaron 74 unidades entre herramientas e instrumentos en el área de desarmado de motores.

Figura 14
No ubicadas Armado de motores

BUSQUEDA DE HERRAMIENTAS MOT
Archivo Editar Ver Insertar Formato Datos Herramientas Extensiones Ayuda
Compartir
C2:C113 BASE DE ALEXOMETRO MILIMETRADO

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
96	10008314	B2.4	CADENA DE IZAJE (02 RAMALES)	ARM-MOT	22 nov 2024	4	ARMADO DE MOTORES 1				
97	10008319	DM21	CADENA DE IZAJE (04 RAMALES)	ARM-MOT	7 dic 2024	-10	SALA DE PRUEBAS DE MOTORES 1				
98	10008935	13170	CANCAMOS ARMADO DE MOTORES #7	ARM-MOT	8 dic 2024	-11	ARMADO DE MOTORES 7	1 UND DE M24			
99	10009148	13724	BRACKETS ARMADO DE MOTORES #2	ARM-MOT	1 dic 2024	-4	ARMADO DE MOTORES 2	1 UND DE 3/8"			
100	10009150	13726	GANCHO	ARM-MOT	24 may 2024	186	ARMADO DE VENTILADORES				
101	10063066	nan	CANCAMO GIRATORIO ARMADO DE MOTORES #7	ARM-MOT	6 sept 2024	81	ARMADO DE MOTORES 7	2 UND DE 0,3T			
102	10063265	nan	CANCAMO GIRATORIOS (01 UND DE 1TN)	ARM-MOT	14 sept 2024	73	ARMADO DE TURBOCARGADORES	01 UND DE 1TN			
103	10064248	nan	MANOMETRO	ARM-MOT	10 nov 2024	16	SALA DE PRUEBAS DE MOTORES 2	TORRETA N°1			
104	10064969	nan	CADENA DE IZAJE	ARM-MOT	20 jul 2024	129	ARMADO DE MOTORES 1				
105	10074862	92339	P-PROFUNDIMETRO DIGITAL 6" (0-150MM)	ARM-MOT	23 oct 2024	34	ARMADO DE MOTORES 6				
106	10075523	nan	CALIBRADOR DE LAMINAS	ARM-MOT	19 oct 2024	38	ARMADO DE COMPONENTES MENORES				
107	10075639	nan	BRACKETS ARMADO DE COMPONENTES MENOR	ARM-MOT	27 oct 2024	30	ARMADO DE COMPONENTES MENORES	1,8 T (4 UNID)			
108	10077053	nan	CANCAMO M16 ARMADO DE MOTORES #10	ARM-MOT	19 oct 2024	38	ARMADO DE MOTORES 10	01 UND DE M16			
109	10125862	nan	BRACKETS ARMADO DE MOTORES #2	ARM-MOT	18 oct 2024	39	ARMADO DE MOTORES 2	1 UND DE 1.5T			
110	10126101	nan	GRILLETES (01 UND DE 12 TN)	ARM-MOT	17 nov 2024	9	ARMADO DE MOTORES 6	01 UND DE 12 TN			
111	10126402	nan	PISTON HIDRAULICO ITH	ARM-MOT	7 nov 2024	19	ARMADO DE MOTORES 2	BOMBA STUD COCHE #2			
112	10126783	nan	GRILLETE (1 UND DE 12 TN)	ARM-MOT	23 nov 2024	3	ARMADO DE MOTORES 6				
113	10127949	nan	CANCAMOS (02 UND DE 5/16")	ARM-MOT	23 nov 2024	3	A14	02 UND DE 5/16"			
114											
115											
116											

Convertir a tabla

- DES. MOT] DES-MOT [NO UBICADAS - FINAL - DES. MOT.] [UBICADAS - FINAL - ARM. MOT.] [NO UBICADAS - FINAL - AR Recuento: 112

Nota: Extraído de búsqueda de herramientas motores 2024 del mes de noviembre. No se ubicaron 112 unidades entre herramientas e instrumentos en el área de armado de motores.

Figura 15
No ubicadas Armado de motores

BUSQUEDA DE HERRAMIENTAS MOT

Archivo Editar Ver Insertar Formato Datos Herramientas Extensiones Ayuda

C2:C54 BRACKETS ARMADO DE TURBOCARGADORES

ID	Alterno	Denominación de objeto técnico	CLASIFICACIÓN	Estado	husky	bahia	inSitu
10006890	nan	BRACKETS ARMADO DE TURBOCARGA	IZAJE	Se envió a mantenimiento			No
10007457	nan	MANOMETRO	GENERAL	Se envió a mantenimiento			No
10008312	nan	CADENA DE IZAJE (02 RAMALES)	IZAJE	Se envió a mantenimiento		Arm. Motores 4	No
10008318	nan	CADENA DE IZAJE (04 RAMALES)	IZAJE	Se envió a mantenimiento		Arm. Turbo	No
10008438	nan	RELOJ COMPARADOR ANALOGICO	GENERAL	Se encontró	ANAQUEL 53	Fecha de calibra	No
10058407	nan	MANOMETRO	GENERAL	Se envió a mantenimiento			No
10058859	nan	RELOJ COMPARADOR ANALOGICO	GENERAL	Se envió a mantenimiento	Maleta 2	Dino2	No
10065603	nan	TERMOCUPLA TIPO K	GENERAL	Se envió a mantenimiento			No
10070649	nan	CANCAMO GIRATORIO	IZAJE	Se envió a mantenimiento		Arm. Motores 6	No
10125978	nan	VIDEOSCOPIO	GENERAL	Se encontró		A16	No
10127363	nan	P-ESTROBO DE CADENA (2 RAMALES)	GENERAL	Se envió a mantenimiento	H031	A11	No
10127535	nan	P-LAPIZ GRABADOR NEUMATICO	GENERAL	Se encontró		A24	No
10127701	nan	COMMUNICATIONS ADAPTER 3 GROUF	GENERAL	Se encontró		Dinamómetro 3	No
10128248	nan	PISTOLA DE GIRO MOTOR NEUMATICA	GENERAL	Se encontró		Dinamómetro 3	No
10131497	nan	P-ESTROBO DE CADENA (4 RAMALES)	GENERAL	Se encontró		Dinamómetro 3	No
10009039	nan	MANOMETRO	GENERAL	Se encontró	Bomba HYD #25	Calibraciones De	En herramienta
10064179	nan	MANOMETRO	GENERAL	Se encontró	Torreta de agua principal	Dinamómetro 3	InSitu
10064261	nan	MANOMETRO	GENERAL	Se encontró	Linea de aire	Dinamómetro 3	InSitu
10070639	nan	MANOMETRO	GENERAL	Se encontró		Sala de bombas	InSitu

Convertir en chips desplegables

- DES. MOT] DES-MOT [NO UBICADAS - FINAL - DES. MOT.] [UBICADAS - FINAL - ARM. MOT.] [NO UBICADAS - FINAL - ARI

Recuento: 53

Nota: Extraído de búsqueda de herramientas motores 2024 del mes de noviembre. Se ubicaron 53 unidades entre herramientas e instrumentos en el área de armado de motores.

Figura 16

No ubicadas Desarmado de motores

BUSQUEDA DE HERRAMIENTAS MOT

Archivo Editar Ver Insertar Formato Datos Herramientas Extensiones Ayuda

C2:C42 BRACKET GIRATORIO (2 UND DE 1.35 TN)

ID	Alterno	Denominación de objeto técnico	CLASIFICACIÓI	Estado	husky	bahia	inSitu		
10005937		CALIBRADOR DE VALVULAS	GENERAL	Se encontró	01 UND DE 3/4"	D17		Nuevo	Jorge Quispe
10007226		TALADRO NEUMATICO 1/2"(P.728)	GENERAL	Se encontró		D22			
10057374		RELOJ COMPARADOR	GENERAL	Se encontró	H072	D22			
10063082		TALADRO NEUMATICO 1/2"	GENERAL	Se encontró		D22			
10063253		MARCADOR NEUMATICO	GENERAL	Se encontró, en uso		Desarmado de Housing			
10063902		RELOJ COMPARADOR	GENERAL	Se encontró		D22			
10072061		CILINDRO HIDRAULICO 15 TON	GENERAL	Se encontró		D22			
10072261		P-DETECTOR PORTATIL DE FISURAS UV	GENERAL	Se encontró, nuevo		D17			
10072262		P-DETECTOR PORTATIL DE FISURAS UV	GENERAL	Se encontró, nue	ASIG: ALEXANI	D16			
10072630		P-LAPICERO NEUMATICO PARA MARCADO	GENERAL	Se encontró	H053	D12			
10127700		ESLINGA CADENA DE 1 RAMAL	GENERAL	Se encontró		D12			
10128287		P-RUGOSIMETRO DIGITAL 178-561	GENERAL	Se encontró	H053	D18			
10129073		P-LAPIZ GRABADOR NEUMATICO	GENERAL	Se encontró	H002	D20			
10129074		P-LAPIZ GRABADOR NEUMATICO	GENERAL	Se encontró	H001	D19			
10129076		P-LAPIZ GRABADOR NEUMATICO	GENERAL	Se encontró	H001	D16			
10129119		DIAL INDICATOR/RELOJ INDICADOR	GENERAL	Se encontró		D18			Técnico no lo entregó porque herramienta estaba
10132530		TALADRO REVERSIBLE 1/2" 900 RPM	GENERAL	Se encontró	BOMBA PARA A	D14			
10133126		CILINDRO HIDRAULICO 700 BAR-10TON	GENERAL	Se encontró		D22			
10006134	P.089	PISTOLA NEUMÁTICA 3/4"(P.089)	GENERAL	Enviado a mante	H061	D25			Arturo Huilca
10006419	P.347	PISTOLA NEUMÁTICA 1/2"(P.347)	GENERAL	Enviado a mante	H061	D25			Arturo Huilca

[UBICADAS - FINAL - DES. MOT] DES-MOT [NO UBICADAS - FINAL - DES. MOT.] [UBICADAS - FINAL - ARM. MOT.] [NO UE

Recuento: 41

Nota: Extraído de búsqueda de herramientas motores 2024 del mes de noviembre. Se ubicaron 41 unidades entre herramientas e instrumentos en el área de desarmado de motores.

De las últimas dos figuras, se visualiza como podemos encontrar un recuento de 74 y 112 herramientas e instrumentos entre desarmado y armado de motores respectivamente. A continuación, se muestra un resumen los resultados.

Tabla 9

Búsqueda de herramientas Motores noviembre 2024

Área	En lista de vencidas y/o no ubicadas	Ubicadas después de búsqueda	No ubicadas después de búsqueda	Eficiencia	Deficiencia
Desarmado de motores	115	41	74	35.65%	64.34%
Armado de motores	165	53	112	32.12%	67.87%
			186	33.885%	66.105%

Nota: Extraído de "Búsqueda de herramientas motores 2024" del mes de noviembre. En lista de búsqueda se encontraban tanto herramientas como instrumentos, de los cuales, algunos se encontraban vencidos en el momento de la búsqueda.

2.3. Antecedentes del Proyecto de Innovación y/o Mejora

Los sistemas de gestión de activos han evolucionado significativamente, pasando de registros en papel a modernos sistemas de localización en tiempo real. Esta transformación ha sido impulsada por la necesidad de mayor eficiencia, precisión e integración.

Según (Ugarelli & Sægrov, 2022) la introducción de los sistemas computarizados de información marcaron el primer hito, permitiendo una mejor recolección y análisis estadístico de la data. Estos sistemas primarios han servido de base para el desarrollo de prácticas más avanzadas.

Según (Varshney, Saini, & Erickson, 2020) el uso de códigos de barra y etiquetas de Identificación de Radio Frecuencia (RFID) representó un paso significativo en la gestión de activos, ya que estas tecnologías permiten la identificación automática. Sin embargo, estos sistemas tienen limitaciones en términos de ubicación en tiempo real y a menudo son afectados por factores ambientales como interferencias o desfases en la señal de radio (Yang, 2016).

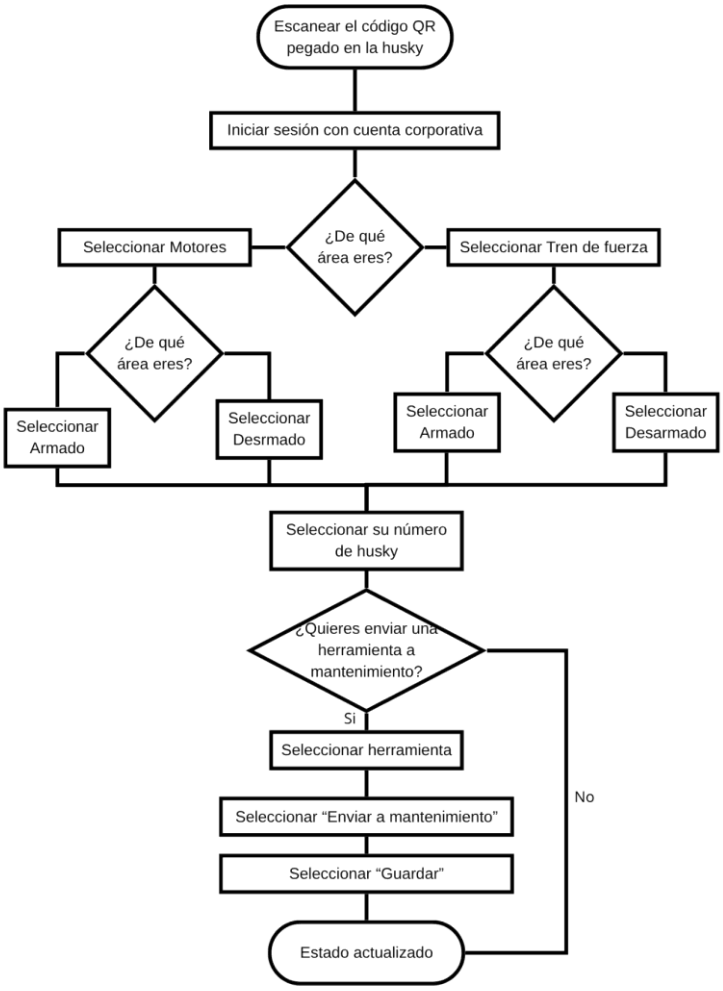
Las tendencias actuales reflejan los avances tecnológicos y la creciente complejidad de gestionar activos. El desarrollo de sistemas de localización en tiempo real (RTLS por sus siglas en inglés) usando RFID activo y otras tecnologías como BLE y etiquetas UWB, superaron muchas limitaciones de los anteriores sistemas. Similarmente, la proliferación del Internet de las cosas (IoT) y sensores inteligentes ha permitido una vista más completa del estado de los activos, y las predicciones futuras indican una mayor adopción de la tecnología de gemelos digitales, soluciones de plataforma y la integración de sistemas de información geográfica. Estos avances facilitan un análisis más sofisticado, especialmente en ambientes complejos (Petchrompo & Parlikad, 2019).

En el contexto del Centro de Reparación de FERREYROS S. A., se implementaron dos estrategias para mejorar el proceso de inventario y la gestión de los activos internos como herramientas e instrumentos. Sin embargo, una de ellas cayó en el desuso, y la restante solo sigue siendo empleada porque es la única alternativa existente por el momento. Una de las estrategias fue el desarrollo de una aplicación, desarrollada con AppSheet, plataforma de desarrollo de aplicaciones sin código de Google, que permite a cualquier persona, incluso sin conocimientos de programación, crear aplicaciones móviles y web personalizadas a partir de datos existentes (Google, s.f.). Esta aplicación tenía como objetivo permitir a los técnicos actualizar el estado de sus herramientas/instrumentos para actualizar una de las bases de datos en Google Sheets que se tenía, de esa manera, tanto el técnico dueño de las herramientas,

como el administrativo encargado de conocer el estado sabrían si la herramienta se encuentra "en bahía" o en mantenimiento. Para cambiar el estado de las herramientas, se seguiría el siguiente flujo en la aplicación:

Figura 17

Flujo de uso de AppSheet



Pese a la capacitación de los técnicos en esta herramienta, no se obtuvieron resultados de uso en el largo plazo.

Por otro lado, como herramienta para el inventario se tiene una base de datos en Google Sheets que se alimenta manualmente. Precisamente, no es una sola base de datos,

sino varias las que se encuentran en formato de Google Sheets, esto, como resultado de la actualización periódica copiando y pegando datos para diferentes filtrados, además de nuevos inventarios que actualizan las Google Sheets. El principal problema con esto, es que no se tiene una sola base de datos maestra actualizada, sino que varias bases de datos con discrepancias una de la otra e insuficientes para un filtrado preciso. El proceso de alimentado de datos a la base consiste de ir a cada bahía del CRC, abrir todos los cajones de las husky's (maletas de herramientas) y revisar el código de cada herramienta/instrumento para apuntar el código o la ubicación de este activo en una lista física. Los datos de esta lista física se introducen manualmente a las hojas de cálculo de Google (Google Sheets). Este proceso no solo es extremadamente lento, debido a la cantidad de bahías y herramientas existentes, sino que también propenso a errores, lo que genera mayores discrepancias entre las herramientas disponibles en la realidad y las hojas de datos.

Figura 18

Programación semanal de inventario

Área	Nombre de las Bahias	# de Husky		TÉCNICO RESPONSABLE	MARCACIÓN	INVENTARIO	POWER BI	APP SHEETS
DESARMADO TREN DE FUERZA	Desarmado de frenos1	005	Realizado	Jose Burga / Sebastian Ibañes	☐	☐	☐	☐
	Desarmado de diferenciales 1	042 / 044		Aldair Roldan / Christian Rosario	☐	☐	☐	☐
	Desarmado Mandos Finales 2	040		Eladio Huacoha / Miguel Valentin	☐	☐	☐	☐
	Desarmado Transmisiones 2 D8	005	Realizado	**Hector Capire / Grimaldo Paz**	☑	☑	☑	☐
	Desarmado de diferenciales 2	045		Felipe Mendoza	☐	☐	☐	☐
	Desarmado de controles hidraulicos D24	060	Realizado	Judith Peralta / Cristian Aranciga	☑	☑	☐	☑
	Desarmado de convertidores 1	004		Felipe Mendoza (avanzado al 20%)	☐	☐	☐	☐
	Desarmado Transmisiones 1	043	Realizado	Hector Capire	☑	☑	☑	☑
	Desarmado Mandos Finales 1 D2	006	Realizado	**Fredy Matamoros / Diego Manrique**	☑	☑	☐	☐
	Desarmado Transmisiones 3	041		Carlos Quiñones	☐	☐	☐	☐
	Desarmado de Misceláneos	038		Jhonatan Chahuaillacc / Anggela Choque	☐	☐	☐	☐
	Desarmado de Reducciones	039		Eladio Huacha	☐	☐	☐	☐
	RACK DE MAESTRANZA	083			☐	☐	☐	☐
	HUSKY MAESTRANZA	084			☐	☐	☐	☐
	HUSKY MAESTRANZA	085			☐	☐	☐	☐
	HUSY DE HERRAMIENTAS DE USO COMUN	063			☐	☐	☐	☐

Nota: No todas las bahías siguen con los 4 proceso de gestión de inventario.

2.4. Justificación del Proyecto de Innovación y/o Mejora

En Centro de Reparación de Componentes, un taller de clase mundial certificado por Caterpillar, con un área techada de 5,000m^2, actualmente enfrenta importantes desafíos administrativos debido al sistema manual de gestión de herramientas e

instrumentos. Durante los últimos años se reportaron herramientas ubicadas, que en el inventario noviembre-diciembre 2024 se descubrió que esta cantidad ascendía a 186 herramientas e instrumentos no ubicados, lo que genera no solo costos de reposición sino también interrupciones en los procesos productivos. Adicionalmente, el proceso de inventario consume 2,192 minutos por inventario (equivalente a 36.5 horas) y requiere la participación de 4 empleados cada vez, sumando 146 horas-hombre perdidas por inventario. La frecuencia de inventario suele ser de 6 veces al año, por lo que al año tendríamos alrededor de 876.8 horas-hombre perdidas al año. Esto representa un costo total anual de S/. 52,297.60 entre mano de obra y reposición de herramientas perdidas.

Para resolver estos problemas, se propone la implementación de un sistema RTLS/IPS basado en tecnología BLE, que permitirá la localización en tiempo real de todas las herramientas e instrumentos con una precisión de ±1 metro. Esta solución automatizará los inventarios, eliminando el registro manual y reduciendo el tiempo de auditoría en horas-hombre anuales en un 75% conservativamente hablando. Además, el sistema incluirá alertas para prevenir movimientos no autorizados, lo que disminuirá significativamente las pérdidas.

Los beneficios cuantificables de esta implementación son considerables. En cuanto a ahorro de mano de obra, se liberarán 838 horas-hombre anuales, equivalentes a aproximadamente S/ 5,571.58. Respecto a la reducción de reposiciones, si el sistema logra evitar el 80% de las pérdidas (26 herramientas al año), el ahorro sería de S/ 36,592.66. El costo total de la implementación asciende a S/. 32130.40, y con un ahorro anual estimado de S/. 52,438.08 (sumando mano de obra y reposiciones), el proyecto alcanzará su punto de equilibrio en menos de 8 meses, demostrando una rápida recuperación de la inversión.

Más allá de los beneficios económicos, este proyecto fortalecerá el posicionamiento del CRC como taller de clase mundial alineado con los estándares Industry 4.0 (SMF-SDO, 2019) (Asociación Española de Normalización (UNE)) (International Society of Automation (ISA), 2016), reforzando su certificación Caterpillar con la que cuenta el centro, y la de Ferreyros S. A., como referente de innovación y eficiencia entre sus clientes. También contribuirá a la sostenibilidad, minimizando el desperdicio de recursos y mejorando la eficiencia operativa. En un mercado cada vez más competitivo, esta innovación nos permitirá destacar como líderes en mantenimiento inteligente, optimizando no solo nuestros recursos para nuestra capacidad de respuesta externa, sino también externa, y elevar nuestros niveles de productividad. Este enfoque está alineado al interés de la empresa de enfocarse en la innovación y la implementación de soluciones digitales para mejorar la eficiencia de sus procesos y la experiencia de sus clientes (Ferreyros S. A., 2024).

En conclusión, la implementación de este sistema RTLS/IPS no representa un gasto, sino una inversión estratégica con retorno tangible en menos de un año. Resolverá problemas críticos de gestión, optimizará el uso de recursos humanos y materiales, y sentará las bases para una operación más inteligente y eficiente. Los datos respaldan su viabilidad, y los beneficios operativos y económicos justifican plenamente su adopción.

2.5. Marco Teórico y Conceptual

2.5.1. Fundamento teórico del Proyecto de Innovación y Mejora

Introducción a RLTS e IPS. Un Sistema de Localización en Tiempo Real, mejor conocido como RTLS, denota un grupo de sistemas que pueden determinar la posición exacta o relativa de una persona o ítem. Los RLTS son tipos de sistema o

tecnologías específicas, sino un objetivo que puede ser alcanzado por medio de diferentes tipos de tecnología (Smiley, 2020)

Por otro lado, los sistemas de posicionamiento pueden globales o locales. Los sistemas de posicionamiento global pueden proveer de estimaciones de posición a nivel mundial. Los sistemas de posicionamiento global disponibles actualmente son llamados colectivamente Sistema de Navegación por Satélite Global, Global Navigation Satellite System en inglés (GNSS). El posicionamiento basado en GNSS tiene una larga tradición de éxito debido a su disponibilidad, cobertura y la existencia de receptores que son tanto baratos como compactos. Sin embargo, este tipo de posicionamiento no es adecuado para todos los escenarios y aplicaciones por los requisitos de precisión y la degradación de la señal de los satélites. (Mendoza-Silva, Torres-Sospedra, & Huerta, 2019)

Los sistemas de posicionamiento local son aplicados en escenarios en los que el posicionamiento por GNNS no es apropiado. La diversidad de estos sistemas va desde sistemas basados en redes hasta luz. A los sistemas de posicionamiento local especializados en la estimación de posición dentro de edificios se le conoce como Sistemas de Posicionamiento de Interiores (IPS).

Los IPS deben cumplir con ciertas características para su óptima implementación y uso. Entre ellos, se debe tener en cuenta la complejidad, la robustez, la escalabilidad, el costo, la privacidad, y los requerimientos energéticos (Mendoza-Silva, Torres-Sospedra, & Huerta, 2019).

- La complejidad del sistema refiere a los esfuerzos requeridos para la instalación, configuración y programación del hardware y software del IPS.
- La robustez refiere a la capacidad de un IPS de trabajar en condiciones no ideales o nominales. Dígase entornos industriales (revisar Sección 2.5.2., Entornos

industriales) u otros en los que las condiciones ambientales y tecnológicas obligan al sistema a sobrepasar limitaciones como la pérdida de señal, la interferencia y otros fenómenos.

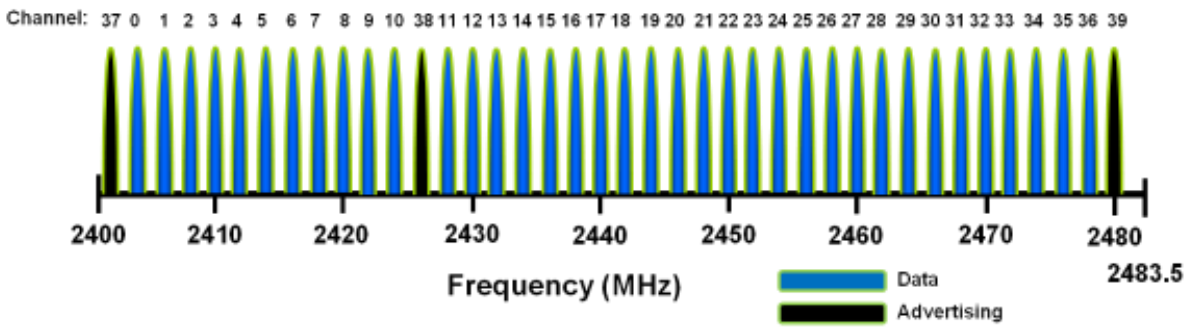
- La escalabilidad se refiere a la capacidad de un IPS de crecer y agregar nuevos módulos o incluir nuevos dispositivos sin afectar la precisión u obligar grandes cambios de infraestructura física o arquitectura de redes para incluir estos nuevos elementos. Un sistema IPS escalable debe tener una predicción de lo que pasará con él en escenarios en los que aumenta el número de ítems o personas a "trackear", así como el número de receptores. En otros escenarios, la escalabilidad también aplica si se quiere aplicar el sistema en un área de mayor tamaño.
- El costo de los sistemas IPS puede variar grandemente dependiendo de la tecnología y/o tecnologías a usar, el área a cubrir, la capacidad de los dispositivos de hardware, la configuración del sistema, el número de dispositivos, las condiciones ambientales a las que se trabaja, entre otros factores. Sin embargo, el costo de los IPS debe ir acorde con los beneficios que trae. Por ello su costo debe ser analizado dependiendo del objetivo que se espera cumplir con su funcionamiento óptimo.
- La privacidad en los IPS como en todo sistema impiden que usuarios no autorizados accedan a información de los elementos ubicados u otra información confidencial que se pueda derivar de ella.
- Los requerimientos energéticos de un IPS deben tener en cuenta la independencia de los dispositivos de una fuente conectada. En la mayoría de los casos es mejor buscar el menor requerimiento energético, ya que los dispositivos que se colocan en los elementos a ubicar deben ser "Wireless" (tener batería y no necesitar estas conectados).

Introducción a Bluetooth Low Energy. Bluetooth es un protocolo de comunicación inalámbrica que utiliza ondas de radio para conectar dispositivos a corta distancia y diseñado para consumir mínima energía, basado en el estándar IEEE 802.15.1. Existen dos tipos de dispositivos Bluetooth: uno es referido como Bluetooth Classic (BR/EDR), usado ampliamente en altavoces inalámbricos, sistemas de información y entretenimiento para automóviles y auriculares, y el otro es Bluetooth Low Energy (BLE). BLE, también referido como Bluetooth Smart o BTLE, e introducido en la versión 4.0 de Bluetooth, es más prominente en aplicaciones donde el consumo de energía es crucial, como dispositivos energizados por batería y donde pequeños paquetes de datos son transferidos infrecuentemente (Afaneh, 2018).

BLE opera en la banda ISM (Industrial, Scientific, and Medical) de 2.4 GHz, específicamente en el rango de 2400 a 2483.5 MHz, al igual que el Bluetooth clásico, pero con un esquema de modulación y canales diferente. Sin embargo, BLE utiliza solo 40 canales, de los cuales 3 están dedicados a la publicidad (advertising channels) en las frecuencias 2402 MHz, 2426 MHz y 2480 MHz, mientras que los 37 restantes se emplean para la transmisión de datos. Esta selección de frecuencias permite un equilibrio entre el alcance y la resistencia a interferencias, como las generadas por redes Wi-Fi que comparten la misma banda (Gomez, Oller, & Paradells, 2012).

Figura 19

Distribución de frecuencias por canales de BLE



Para la transmisión de datos, BLE emplea Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK), una técnica de modulación que reduce el consumo energético al limitar el ancho de banda a 1 MHz por canal. En sus versiones iniciales (BLE 4.0 a 4.2), la velocidad de transmisión era de 1 Mbps, mientras que en BLE 5.0 se introdujo una opción para alcanzar 2 Mbps, mejorando la eficiencia en aplicaciones que requieren mayor throughput (Heydon, 2012).

BLE utiliza una topología en estrella, donde un dispositivo central (como un smartphone) se comunica con múltiples dispositivos periféricos (como sensores o wearables). El protocolo define dos roles principales: el dispositivo central (master), que escanea y establece conexiones, y el dispositivo periférico (slave), que anuncia su disponibilidad para ser descubierto. Este esquema simplificado contribuye a la eficiencia energética, ya que los periféricos solo activan su radio en intervalos cortos (Bluetooth SIG, 2021)

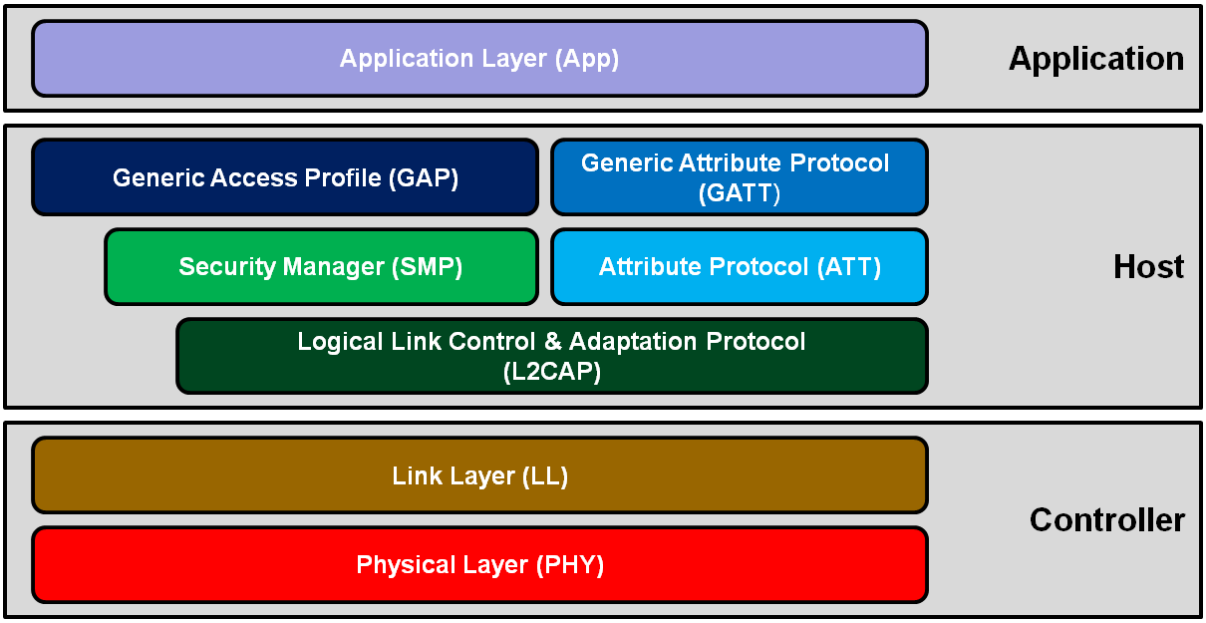
Una de las principales ventajas de BLE es su bajo consumo, logrado mediante un duty cycle reducido, donde los dispositivos transmiten en ráfagas muy breves (por ejemplo, 1 ms cada 100 ms) y permanecen en modo de bajo consumo el resto del tiempo. En reposo, un dispositivo BLE puede consumir tan solo 1 µA, mientras que durante la transmisión el consumo aumenta a 10–20 mA, dependiendo de la potencia de salida (Farahani, 2021). (Farahani, 2021)

El stack de protocolos de BLE sigue una estructura jerárquica:

- La capa física (PHY) se encarga de la modulación y transmisión en la banda de 2.4 GHz.
- La capa de enlace (Link Layer) gestiona el establecimiento y mantenimiento de conexiones.
- El protocolo L2CAP permite la multiplexación de datos.
- Finalmente, los perfiles ATT/GATT definen servicios y características estandarizadas, como la lectura de niveles de batería o datos de sensores (Sivaraman, Gharakheili, & Vishwanath,, 2015).

Figura 20

Arquitectura de la pila de protocolos Bluetooth Low Energy (BLE)



Nota. La figura representa la arquitectura en capas del protocolo Bluetooth Low Energy (BLE), dividida en tres niveles principales: Aplicación, Host y Controlador. Adaptado de Bluetooth SIG, Inc. (n.d.).

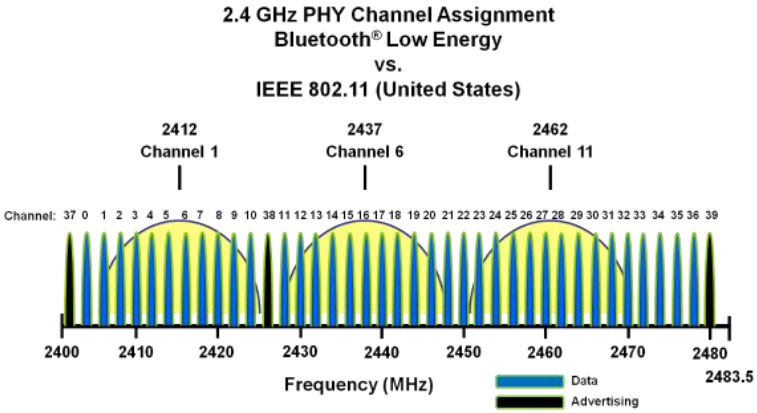
La capa física (PHY) de Bluetooth® Low Energy (BLE) contiene los circuitos de comunicaciones analógicas responsables de la traducción de símbolos digitales por aire. Es la capa más baja de la pila de protocolos y proporciona sus servicios a la capa de enlace.

El uso de los canales de advertising suele recaer en el descubrimiento de dispositivos, el establecimiento de conexión y las transmisiones broadcast. Asimismo, el uso de los canales de data suele ir ligado a la comunicación bidireccional entre dispositivos conectados y al Adaptive Frequency Hopping utilizado para eventos de conexión posteriores (Microchip, 2023).

Dado que los canales publicitarios forman la base del funcionamiento de BLE, se les han asignado frecuencias centrales que minimizan la superposición con los canales 802.11 más comunes, como se muestra:

Figura 21

Coexistencia espectral entre Wi-Fi y Bluetooth Low Energy (BLE) en la banda de 2.4 GHz



Nota. La figura muestra cómo se superponen los canales de Wi-Fi y BLE en la banda ISM de 2.4 GHz. Wi-Fi utiliza canales de 20 MHz de ancho, mientras que BLE emplea canales más estrechos de 2 MHz distribuidos en todo el espectro. Adaptado de Texas Instruments (2010).

En cambio, Wi-Fi utiliza canales más amplios (20 o 40 MHz), lo que puede generar interferencias con los canales BLE superpuestos, especialmente durante transmisiones continuas. Esta superposición puede ocasionar colisiones o pérdida de paquetes, afectando el rendimiento, especialmente en aplicaciones BLE de baja latencia o transmisión continua. Sin embargo, existen mecanismos de coexistencia que permiten mitigar este problema. Entre los mecanismos de coexistencia enter BLE y Wi-Fi encontramos al AFH (Adaptive Frequency Hopping), a las técnicas de coexistencia colaborativa (por hardware), al control de potencia y proximidad, y a la segmentación temporal de tráfico (Texas Instruments, 2010).

En el AFH, BLE evita automáticamente frecuencias donde detecta interferencia, redirigiendo su salto de canal a bandas menos congestionadas. Por otro lado, las técnicas de coexistencia colaborativa por hardware se evidencian en algunos chips SoC que integran Wi-Fi + BLE (como los ESP32), al implementar un planificador de radio compartido que prioriza temporalmente las transmisiones de cada tecnología para evitar conflictos (Bluetooth SIG, Inc, s.f.). Adicionalmente, ajustar la potencia de transmisión o separar físicamente los dispositivos puede reducir interferencia mutua. Finalmente, distribuir las transmisiones en diferentes intervalos de tiempo si el control del firmware lo permite (Nordic Semiconductor, 2021).

El alcance típico de BLE varía entre 10 y 100 metros, dependiendo de la potencia de transmisión (que puede ajustarse desde -20 dBm hasta +10 dBm) y las condiciones del entorno. La propagación de la señal se ve afectada por obstáculos físicos y por interferencias de otras tecnologías que operan en la misma banda, como Wi-Fi o Zigbee (Kumar & Gupta, 2016).

La capa de enlace (Link Layer) de Bluetooth® de baja energía (BLE) es la parte que interactúa directamente con la capa física (PHY). Es responsable de la publicidad, el escaneo y la creación y el mantenimiento de las conexiones.

En la capa de enlace, específicamente en el Adaptive Frecuency Hopping de los canales y la conexión de datos, un algoritmo de salto de frecuencia es usado para recorrer los 37 canales de datos.

Ecuación 1

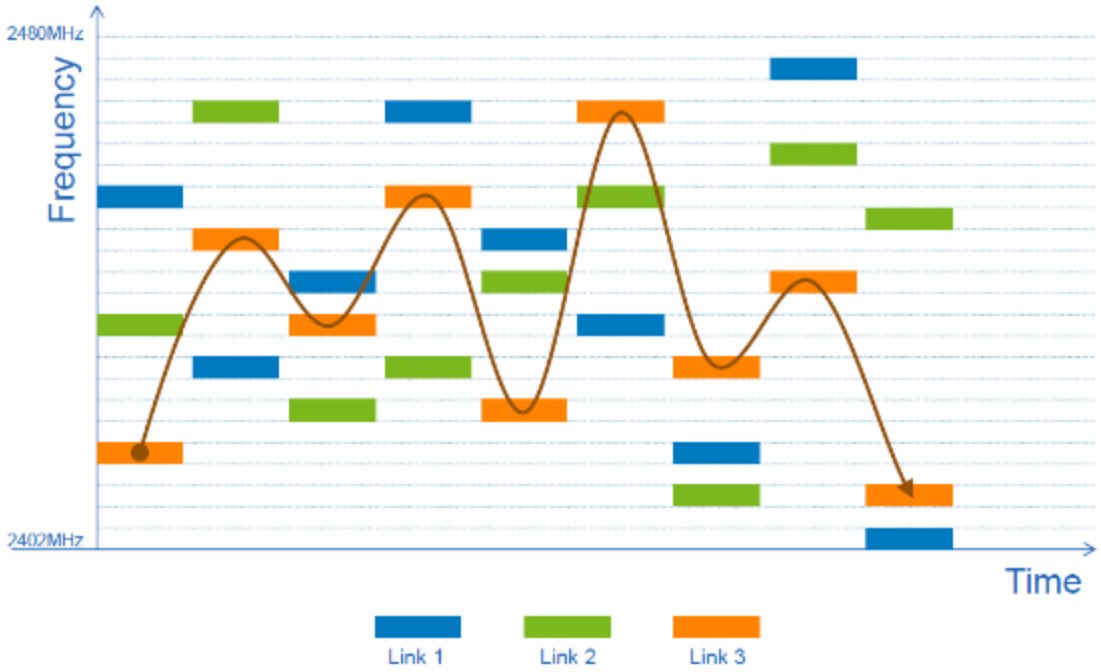
Algoritmo de salto de frecuencia adaptativo

$$f_{n+1} = (f_n + hop) mod 37$$

Nota: Donde f_{n+1}es la frecuencia (canal) a usar en el siguiente evento de conexión y hop (salto) es un valor que puede ir de 5 a 16 y es establecido cuando la conexión en creada. Es añadido en el último módulo de frecuencia 37.

Figura 22

Salto de frecuencias adaptativo a lo largo del tiempo



El proceso de descubrimiento en Bluetooth Low Energy (BLE) se basa en la transmisión y recepción de paquetes en canales publicitarios específicos. Este mecanismo permite que dos dispositivos se detecten mutuamente: uno actúa como *anunciante* (advertiser), mientras que el otro realiza tareas de escaneo (scanner) (Bluetooth SIG, Inc, s.f.).

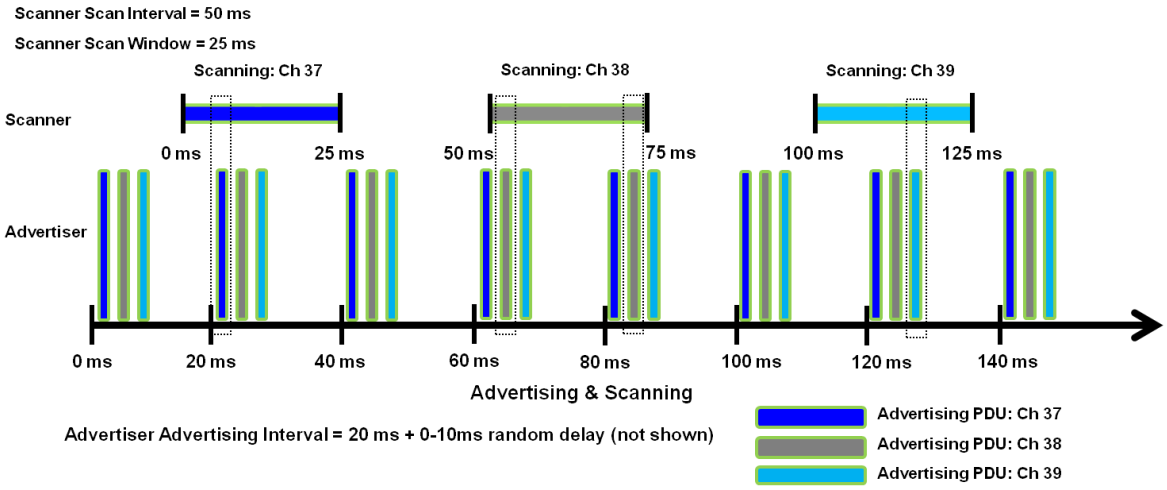
En BLE, existen varios modos de publicidad: general, dirigida, no conectable y escaneable. Cada evento publicitario implica la transmisión del mismo paquete por los tres canales de publicidad (canales 37, 38 y 39), lo que incrementa las probabilidades de ser detectado por un dispositivo escaneador (Siekkinen, Hiienkari, Nurminen, & & Nieminen, 2012). El intervalo entre eventos publicitarios puede ajustarse entre 20 ms y 10.24 segundos, con pasos de 0.625 ms, y se suele aplicar un retraso aleatorio adicional de hasta 10 ms para reducir colisiones entre múltiples dispositivos (NXP Semiconductors, 2020).

El escaneo, por su parte, se puede realizar de forma pasiva o activa. En el modo pasivo, el escáner simplemente escucha los paquetes de publicidad sin interacción con el anunciante. En cambio, el escaneo activo implica el envío de una solicitud (*SCAN_REQ*) al anunciante, quien puede responder con un paquete adicional (*SCAN_RSP*) que proporciona más datos sobre el dispositivo (Nordic Semiconductor, 2021)

Dado que ambos roles (anunciante y escáner) funcionan de forma no sincronizada, el éxito del descubrimiento depende de la superposición temporal entre los eventos de publicidad y las ventanas de escaneo. Por ejemplo, si un anunciante transmite cada 20 ms y un escáner explora el canal durante 25 ms dentro de un intervalo de 50 ms, las posibilidades de coincidencia se ven favorecidas, pero no garantizadas (Texas Instruments, 2016).

Figura 23

Intervalos de Advertising y Scanning

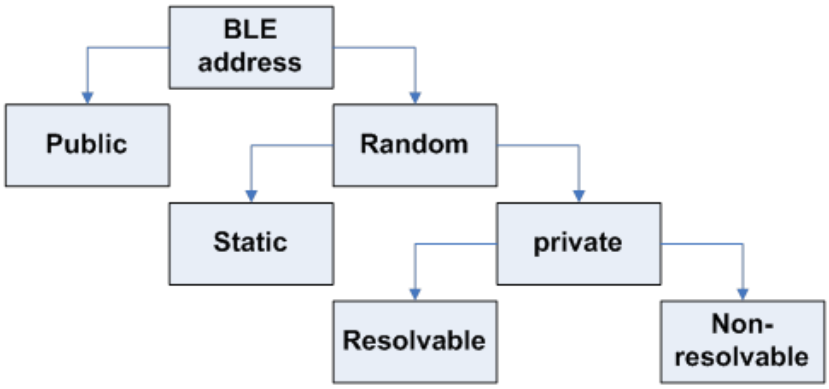


La configuración adecuada de estos parámetros —como los intervalos de publicidad y escaneo— es esencial para balancear el consumo energético y la latencia del descubrimiento, especialmente en dispositivos de bajo consumo.

Por otro lado, en cuanto a las direcciones de los dispositivos BLE, el identificador fundamental de un dispositivo Bluetooth® de bajo consumo, similar a una dirección de control de acceso al medio (MAC) Ethernet o Wi-Fi®, es la dirección del dispositivo Bluetooth. Este número de 48 bits (6 bytes) identifica de forma única un dispositivo entre sus pares. Existen dos tipos de direcciones de dispositivo, y se pueden configurar una o ambas en un dispositivo:

Figura 24

Tipos de dirección de dispositivo BLE



Nota: Cada procedimiento de descubrimiento o conexión debe ser realizado por uno de los dos tipos y es especificado por el host.

En el contexto del presente proyecto, se define como base del sistema de localización al protocolo BLE, debido principalmente por las alternativas que nos brinda en cuanto a técnicas de posicionamiento que aprovechan las características físicas de las señales de radiofrecuencia que se detallarán en adelante.

Posicionamiento por RSSI (Received Signal Strength Indicator) y Fingerprinting. El método basado en el Indicador de Intensidad de Señal Recibida (RSSI) constituye el enfoque más extendido por su simplicidad y bajo costo. Desde el punto de vista físico, la atenuación de la señal sigue un modelo logarítmico que puede expresarse como:

Ecuación 2

Modelo de Atenuación con Shadowing

$$P_r(d) = P_0 - 10nlog_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma$$

Donde P_0 representa la potencia de referencia a un metro de distancia, n es el coeficiente de atenuación (que varía entre 2 para espacio libre y 3-4 en entornos interiores), y X_σ modela las fluctuaciones por shadowing mediante una distribución log-normal.

Este modelo permite estimar distancias comparando la potencia recibida con la transmitida, aunque con precisiones limitadas debido a efectos multipath y variaciones ambientales.

El fingerprinting surge como una extensión avanzada del RSSI, superando algunas de sus limitaciones mediante un enfoque en dos fases. Durante la fase de aprendizaje, se construye un mapa radioeléctrico exhaustivo midiendo sistemáticamente los valores de RSSI en puntos conocidos del espacio, almacenando no solo las intensidades de señal de múltiples balizas, sino también información contextual del entorno. La precisión alcanzable, típicamente entre 2 y 5 metros, puede mejorarse significativamente mediante una densa red de balizas (idealmente una cada 5-10 metros) y técnicas de filtrado adaptativo como el filtro de Kalman.

Técnicas de Angle Arrival (AoA) y Direction Finding. El posicionamiento por Ángulo de Llegada (AoA) representa un salto cualitativo en precisión, fundamentado en principios de procesamiento espacial de señales. Cuando una señal incide sobre un arreglo lineal de antenas con separación *d*, se produce un desfase característico entre elementos adyacentes dado por:

Ecuación 3

Desfase de señal de elementos adyacentes

$$\Delta\phi = \frac{2\pi d sin\theta}{\lambda}$$

Para una frecuencia de 2.4 GHz ($\lambda \approx 12.5$ cm), la separación óptima entre antenas resulta ser aproximadamente 6.25 cm. Los algoritmos de estimación espectral como MUSIC (MUltiple SIgnal Classification) permiten resolver el problema de estimación angular mediante la descomposición en autovalores de la matriz de covarianza de la señal, ofreciendo resoluciones angulares del orden de 1-5 grados.

La especificación Bluetooth 5.1 introdujo capacidades nativas para Direction Finding mediante los paquetes CTE (Constant Tone Extension), que proporcionan una sección de portadora pura de 16 µs de duración, permitiendo muestreos de fase a 8 MHz. En implementaciones prácticas, los sistemas AoA pueden alcanzar precisiones de 0.3 a 1 metro en configuraciones multi-antena, aunque requieren calibraciones cuidadosas para compensar los patrones de radiación de las antenas y mitigar los efectos de multitrayectoria (Bluetooth SIG, 2023).

Métodos basados en Time-of-Flight (ToF) y Time Difference of Arrival (TDoA). Las técnicas de tiempo de vuelo ofrecen la mayor precisión al medir directamente el retardo de propagación. En el esquema de tiempo de ida y vuelta (Round-Trip Time), la distancia se calcula como:

Ecuación 4

Distancia según retardo de viaje de ida y vuelta

$$d = \frac{c\left(t_{round} - t_{reply}\right)}{2}$$

Nota: Donde c es la velocidad de la luz y t_{reply} representa un tiempo de respuesta conocido.

Para sistemas TDoA, que eliminan la necesidad de sincronización absoluta entre dispositivos, la posición se determina resolviendo el sistema de ecuaciones hiperbólicas:

Ecuación 5

Sistema de ecuaciones hiperbólicas

$$\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2}-\sqrt{\left(x-x_j\right)^2-\left(y-y_j\right)^2}=c\Delta t_{i,j}$$

Este sistema no lineal se resuelve típicamente mediante métodos iterativos de mínimos cuadrados, linealizando las ecuaciones a través de expansiones de Taylor. Las implementaciones actuales, como las basadas en el chip Decawave DW1000, combinan tecnologías UWB con interfaces BLE para co-existencia, alcanzando precisiones submétricas (10-50 cm) incluso en entornos complejos (Liu & al., 2022).

Fenómenos que afectan la precisión del BLE. Los sistemas de posicionamiento en interiores enfrentan múltiples fenómenos físicos que degradan su precisión. Entre los más significativos se encuentran el ruido térmico, el deep shadowing, los efectos multipath y la reflexión difusa, cada uno con características particulares que requieren enfoques específicos para su compensación. A continuación, se describe cada uno:

El ruido térmico en los receptores BLE sigue una distribución gaussiana con potencia spectral dada por $N_0 = kT$, donde k es la constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K) y T la temperatura en Kelvin. Este ruido de fondo limita fundamentalmente la relación señal-ruido (SNR) según:

Ecuación 6

Relación señal-ruido (SNR)

$$SNR=\frac{P_r}{N_0B}$$

donde Pr es la potencia recibida y BB el ancho de banda (1 MHz en BLE).

En entornos industriales, el deep shadowing puede causar atenuaciones superiores a 30 dB, modelándose como una variable aleatoria log-normal con desviación estándar σ entre 6-12 dB (Ju & Rappaport, 2024)

Los efectos multipath generan interferencia constructiva y destructiva, causando variaciones rápidas de amplitud (fading) descritas por la distribución de Rayleigh para NLOS (Non-Line-of-Sight):

Ecuación 7

Distribución de Rayleigh para Fading Multipath

$$f(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-r^2/2\sigma^2}$$

Nota. Adaptada de "Multipath Effects in Indoor Positioning Systems" (p. 12), por Y. Liu et al., 2023, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 22(4). https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3215678

Cuando existe componente LOS dominante, el fading sigue una distribución de Rice con factor K:

Ecuación 8

Factor K de Rice para Componente Dominante

$$f(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-(r^2+A^2)/2\sigma^2} I_0\left(\frac{rA}{\sigma^2}\right)$$

Nota: donde A*A* es la amplitud del componente dominante e I0*I*0 la función de Bessel modificada. Adaptada de *Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB* (p. 147), por M. S. Grewal y A. P. Andrews, 2022, Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119829875

Para contrarrestar estos efectos, los sistemas modernos implementan diversas estrategias. Los filtros de Kalman permiten estimar estados ocultos (como posición y velocidad) en presencia de ruido, mediante un proceso recursivo que alterna predicción:

Ecuación 9

Predicción en Filtro de Kalman

$$x_k^- = F_k x_{k-1} + B_k u_k$$

Nota. Ecuación derivada del trabajo original "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems" (p. 35), por R. E. Kalman, 1960, *Journal of Basic Engineering*, 82(1).

y actualización:

Ecuación 10

Actualización en Filtro de Kalman

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1}$$

Nota: donde F_k es la matriz de transición, K_k la matriz de observación, y R_k la covarianza del ruido (Grewal & Andrews, 2022).

El Adaptive Frequency Hopping (AFH) dinámicamente evita canales congestionados, mejorando la SNR. Su eficacia se cuantifica mediante la probabilidad de éxito de paquete:

Ecuación 11

Probabilidad de Éxito en AFH

$$P_s = 1 - (1 - e^{-\gamma/\Gamma})^L$$

Nota: con γ el umbral SNR, Γ la SNR promedio, y L la longitud del paquete. Adaptada de "Interference Mitigation in Dense BLE Networks" (p. 2462), por Y. Liu et al., 2023, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, *22*(4). https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3215678

La técnica de randomización de intervalos de transmisión (conocida como Jitter o Transmission Time Offset) reduce colisiones interferentes mediante:

Ecuación 12

Jitter

$$t_{tx} = t_0 + U(-t_{max}, t_{\max})$$

Nota: donde U representa una distribución uniforme. Estudios recientes demuestran que esto puede reducir interferencias hasta un 40% en entornos densos. Adaptado de Y. Liu et al., 2023, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, *22*(4). https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3215678

Introducción al Protocolo MQTT. El Protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), estandarizado bajo la norma ISO/IEC 20922, es un mecanismo de comunicación ligero basado en el modelo publicación/suscripción (Pub/Sub). Diseñado inicialmente para redes de sensores con restricciones de ancho de banda y

recursos computacionales limitados, se ha consolidado como estándar *de facto* en aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT), incluyendo sistemas de localización en tiempo real. Su arquitectura descentralizada permite la interconexión eficiente entre dispositivos heterogéneos mediante un servidor central denominado **bróker**.

Algunas de las características técnicas relevantes son el Modelo Pub/Sub, la eficiencia energética y de red, la calidad de servicio y la persistencia y retención de mensajes. En el modelo Pub/Sub, los nodos actúan como publishers (emisores) o suscribers (receptores) sin conocimiento directo entre ellos, comunicándose a través de tópicos jerárquicos. Asimismo, sus encabezados de mensaje mínimos (2 bytes) y su soporte para mensajes binarios (optimización vs. Formatos textuales como JSON/XML) le permiten ser eficiente a nivel energético y de red. Por otro lado, cuenta con tres niveles de calidad de servicio (QoS):

2.5.2. Conceptos y términos utilizados

En esta sección, se definirán brevemente todos los conceptos técnicos o clave que se usarán en el documento.

RTLS. Los sistemas de localización en tiempo real (Real-Time Localization Systems en inglés) son sistemas que usan tecnologías de localización que permiten encontrar, hacer seguimiento, medir y analizar data clave. Estos sistemas son usados ampliamente en diferentes sectores, incluyendo los sectores de la gestión de cadena de suministro (SCM), el cuidado de la salud, militar, retail, recreación, educación, entre otros (Senthamil Selvi, Deepa, Balamurugan, Jansi Rani, & Mohamed UvazeAhamed, 2022).

IPS. Los sistemas de posición de interiores (o Indoor Positioning System en inglés) son métodos que determinan la posición de un objeto en el espacio. Es un tipo de sistema dentro de la clasificación de LPS (Local Positioning System) y que ha

tenido un crecimiento en los últimos años debido a la mayor estancia de personas en ambientes de interiores. El uso de un sistema IPS óptimo en un ambiente de interiores se vuelve necesario con buena precisión, costo, poder de consumo y cobertura. Wireless Fidelity (Wi-Fi), Bluetooth Low Energy (BLE), Radio Frequency Identification (RFID), y Ultrawideband (UWB) son ejemplos de tecnologías de comunicación inalámbrica que están envueltas en los IPS (Wahab, 2022) (Mendoza-Silva, Torres-Sospedra, & Huerta, 2019).

BLE. Bluetooth Low Energy (BLE), también conocido como Bluetooth Smart, es una versión de la tecnología Bluetooth diseñada para tener un consumo de energía significativamente menor que el Bluetooth clásico. Esto lo hace ideal para dispositivos con baterías pequeñas, como sensores, dispositivos de fitness y dispositivos portátiles. (Samsung, 2022)

RSSI. (Received Signal Strength Indicator) es una medida de la intensidad de la señal de radio recibida por un dispositivo, como un dispositivo Wi-Fi o un teléfono móvil. Se expresa en decibel-miliwatts (dBm) y generalmente es negativa, siendo más cercana a 0 dBm cuanto más fuerte es la señal. (Teltonika, s.f.) (Juniper, 2024)

Fingerprinting. Es una tecnología común de posicionamiento en interiores para determinar la posición de un usuario. La técnica depende de los datos de la intensidad de la señal, llamada RSSI (Received Signal Strength), que representa la distancia de cada beacon o sensor desde un dispositivo del usuario (Pointr, 2025)

AoA. (Ángulo de Llegada) se refiere a una técnica que utiliza el ángulo de llegada de una señal para determinar la ubicación de un dispositivo o fuente emisora. AOA calcula la dirección de la que llega una señal, y a partir de múltiples mediciones de AOA, se puede determinar la posición de la fuente (Naha, 2024) (Alexandria Engineering Journal, 2018).

Trilateración. Es un método para determinar la posición de un punto desconocido en relación con al menos tres puntos de referencia conocidos. Se basa en la medición de las distancias entre el punto desconocido y los puntos de referencia, y utiliza la intersección de estas distancias para determinar la posición del punto (GPS.GOV, 2014) (PennState College of Earth and Mineral Sciences. Department of Geography, s.f.).

SoC. Un *System on a Chip* (SoC) es un circuito integrado que combina todos los componentes esenciales de un sistema informático en un único chip, incluyendo la unidad central de procesamiento (CPU), memoria, controladores de entrada/salida y, en algunos casos, unidades de procesamiento gráfico (GPU) y módulos de comunicación (Shanmugam, 2021). Según (Hennessy & Patterson, 2019), los SoC son fundamentales en dispositivos móviles como *smartphones* y tabletas debido a su eficiencia energética y reducido tamaño. Además, su diseño integrado permite optimizar costos y mejorar el rendimiento en aplicaciones específicas (Kumar & Chandra, 2020).

Beacon. Es un pequeño dispositivo que transmite señales de radio de forma periódica, utilizando la tecnología Bluetooth Low Energy (BLE). Estos dispositivos emiten una señal que contiene información, como un identificador único o datos de ubicación, que puede ser detectada por dispositivos cercanos, como smartphones o tablets (accent systems, s.f.) (Zebra, s.f.) (App2u, s.f.).

Lector o gateway. Es un dispositivo que actúa como intermediario entre los dispositivos BLE (como balizas, sensores, etc.) y otros sistemas, como una plataforma de nube o un servidor local. Su función principal es recibir datos de los dispositivos BLE y transmitirlos a un destino diferente (ela Innovation, s.f.) (GAO RFID Inc., s.f.).

ESP32. Es un microcontrolador de bajo costo y consumo de energía que integra conectividad Wi-Fi y Bluetooth, lo que lo convierte en una excelente opción para proyectos de Internet de las Cosas (IoT) y dispositivos integrados. Es un "Sistema en Chip" (SoC) desarrollado por Espressif Systems que proporciona un procesamiento rápido y eficiente, junto con una amplia gama de interfaces periféricas (Nabto, 2025).

nRF52. Es una familia de microcontroladores inalámbricos de bajo consumo (SoC) de Nordic Semiconductor diseñados para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) y dispositivos portátiles. Se caracterizan por su bajo consumo de energía, capacidad para soportar múltiples protocolos de comunicación inalámbrica (como Bluetooth Low Energy, ANT, NFC, y protocolos propietarios), y una amplia gama de periféricos integrados (ElectronicWings, s.f.) (Nordic Semiconductor, s.f.) (Nordic Semiconductor, s.f.).

MQTT. (Message Queuing Telemetry Transport) es un protocolo de mensajería de publicación/suscripción ligero y flexible, especialmente utilizado en el Internet de las Cosas (IoT) para la comunicación entre dispositivos. Permite a los dispositivos publicar y suscribirse a mensajes en "topics" (temas), facilitando el intercambio de información entre ellos (AWS (Amazon Web Services), 2025) (F5, 2025) (HiveMQ, 2025) (Paessler AG, 2025)

Broker MQTT. Es el intermediario que facilita la comunicación entre los clientes. Actúa como un nodo central que recibe mensajes de los publicadores, los filtra y los envía a los suscriptores que han manifestado interés en ellos. En esencia, el broker es el corazón de la red MQTT, gestionando el flujo de mensajes entre los dispositivos. (AWS (Amazon Web Services), 2025) (EMQ Technologies, 2025) (HiveMQ, 2025) (HiveMQ, 2025)

Mosquitto. Es un bróker MQTT de código abierto que permite la comunicación entre dispositivos en un entorno IoT (Internet de las Cosas) o M2M (Máquina a Máquina). (EMQ Technologies, 2025) (Logicbus, 2025) (The Things Industries, 2025)

Node-RED. Es una herramienta de programación basada en flujo que permite conectar dispositivos de hardware, APIs y servicios en línea de manera visual, sin necesidad de escribir código. Permite la creación de aplicaciones, especialmente en entornos de IoT, de forma sencilla y rápida. (OpenJS Foundation, 2025) (TupuNATRON, 2025) (Toptal, 2025)

Dashboard. Es una herramienta visual que presenta información clave de manera simplificada y fácil de entender. Permite a los usuarios, como gestores de empresas, monitorear el rendimiento de diferentes áreas y tomar decisiones estratégicas en base a los datos visualizados. (Tableau Software, 2023) (EDICOM, s.f.)

Inventario de activos. Lista completa y detallada de todos los recursos que una organización posee, que pueden ser físicos, como maquinaria o equipo, o intangibles, como software, patentes o derechos de autor. Su objetivo principal es identificar, clasificar y gestionar estos activos de manera eficiente, permitiendo un mejor control sobre su uso, mantenimiento y protección (INCIBE, s.f.) (TINSA México, s.f.)

Trazabilidad. Se refiere a la capacidad de rastrear la historia de un producto o lote a lo largo de su cadena de suministro, desde su origen hasta su destino final. (SCM Logística, s.f.) (Mecalux, s.f.)

IoT (Internet of Things). También conocido como "Internet de las Cosas" se refiere a la red de objetos cotidianos, dispositivos y máquinas conectados a Internet,

que pueden recopilar, compartir y procesar datos sin la intervención directa de una persona. Estos dispositivos, equipados con sensores y software, permiten la interconexión y comunicación entre diferentes sistemas y objetos, creando una red de objetos "inteligentes". (SAP, s.f.) (Gobierno de Argentina, s.f.) (Splashtop, s.f.) (Amazon Web Services (AWS), s.f.)

Entorno industrial. Significa fabricación o planta de procesamiento, recurso sitio de extracción, taller de reparación de automóviles, imprenta, lavado de autos comercial o cualquier otra área de trabajo contenida que requiera la limpieza de suelos específicos y extraordinarios de superficies duras (Law Insider, s.f.). En el contexto de Ferreyros S. A., nos referiremos a cualquiera de los talleres de la empresa, incluyendo el Centro de Reparación de Componentes (CRC). Asimismo, estos entornos se caracterizan por tener grandes cantidades de metal por las maquinarias que se utilizan, polvo en el ambiente, y un nivel de ruido superior al recomendado por estándares internacionales de seguridad y salud industrial.

Interferencia electromagnética. (EMI, por sus siglas en inglés) es una perturbación no deseada en un circuito eléctrico causada por una fuente externa. Esta interferencia puede afectar el funcionamiento de dispositivos electrónicos, degradando o incluso bloqueando la recepción de señales (TechTarget, s.f.) (ScienceDirect, s.f.) (Federal Communications Commission (FCC), s.f.).

Precisión. La precisión en localización se refiere a cuán cerca está la ubicación calculada de un objeto de su ubicación real en el mundo físico. Cuanto menor sea la diferencia entre la ubicación calculada y la real, mayor será la precisión (Gao, y otros, 2015) (Uniqo, s.f.) (Hernández, 2005).

Interferencia de interacción. Se refiere a la superposición de ondas que pueden resultar en un nuevo patrón de onda con características modificadas. Este

fenómeno puede ser observado en diversos tipos de ondas, como ondas de luz, radio, sonido, entre otros, y puede generar efectos como refuerzo o cancelación de la onda resultante. En el contexto de la comunicación, la interferencia puede ser considerada como ruido que perturba la transmisión de información (Martínez, Jáuregui, & Urrutia, 2014).

Multi-path Effect. El efecto multitrayecto, o multipath, es un fenómeno donde una señal de radio llega a un receptor a través de múltiples caminos, causando interferencia y degradación en la señal recibida. Estos caminos pueden ser directos y/o reflejados por objetos en el entorno, como edificios, árboles, o incluso el cuerpo humano (Acharya, 2017) (Sound Devices, 2021) (Chen, 2024).

Fading. En la localización, el "fading" (o desvanecimiento) se refiere a la variación de la intensidad de la señal, generalmente causada por obstáculos o interferencias, que dificultan la determinación precisa de la ubicación de un objeto o dispositivo. Esto puede ser causado por la multipath (la señal viaja por diferentes caminos) o por el shadowing (la señal se bloquea o atenúa por objetos) (Basheer & Jagannathan, 2014).

Reflecting. En la localización, "reflejado" se refiere a la influencia de las reflexiones, especialmente en contextos como la acústica, donde se utiliza para determinar la posición del sonido basándose en la información del sonido directo y sus reflexiones. También puede referirse a la técnica de "reflejado" utilizada en algunos sistemas de localización, donde se utiliza la reflexión de objetos o señales para ubicar o identificar algo (An, Son, Manocha, & Yoon, 2018) (Tan, Yu, & Rao, 2023)

Deep Shadowing Effect. En la localización, se refiere al efecto de los cuerpos, ya sea el cuerpo humano u otros objetos, de “absorber la señal” y disminuir

su amplitud. Su consideración es importante en la implementación de sistemas de localización, ya que los algoritmos que tengan en cuenta este efecto permitirán lecturas más precisas (Patwari & Agrawal, 2008) (Schmitt, Adler, & Kyas, 2014).

Delay Deterioration. En localización, "delay deterioration" (o "degradación por retardo") se refiere a la degradación de la precisión en la estimación de la posición de un objeto (como una fuente sonora o un objetivo) que ocurre debido a retrasos en la señal recibida por los sensores. Este efecto puede ser causado por diversos factores, como la presencia de obstáculos, la calidad del medio de transmisión o la configuración del sistema de sensores (SBG SYSTEMS, s.f.).

SNR. Son las siglas de "Signal-to-Noise Ratio" (Relación Señal a Ruido). Esta relación mide la relación entre la potencia de una señal deseada y la potencia del ruido de fondo. Se utiliza en diversos campos como la electrónica, las comunicaciones, la acústica y la imagenología médica para evaluar la calidad de una señal. En resumen, una SNR alta indica una señal fuerte y un ruido bajo, mientras que una SNR baja sugiere una señal débil y mucho ruido.

CAPÍTULO III
ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

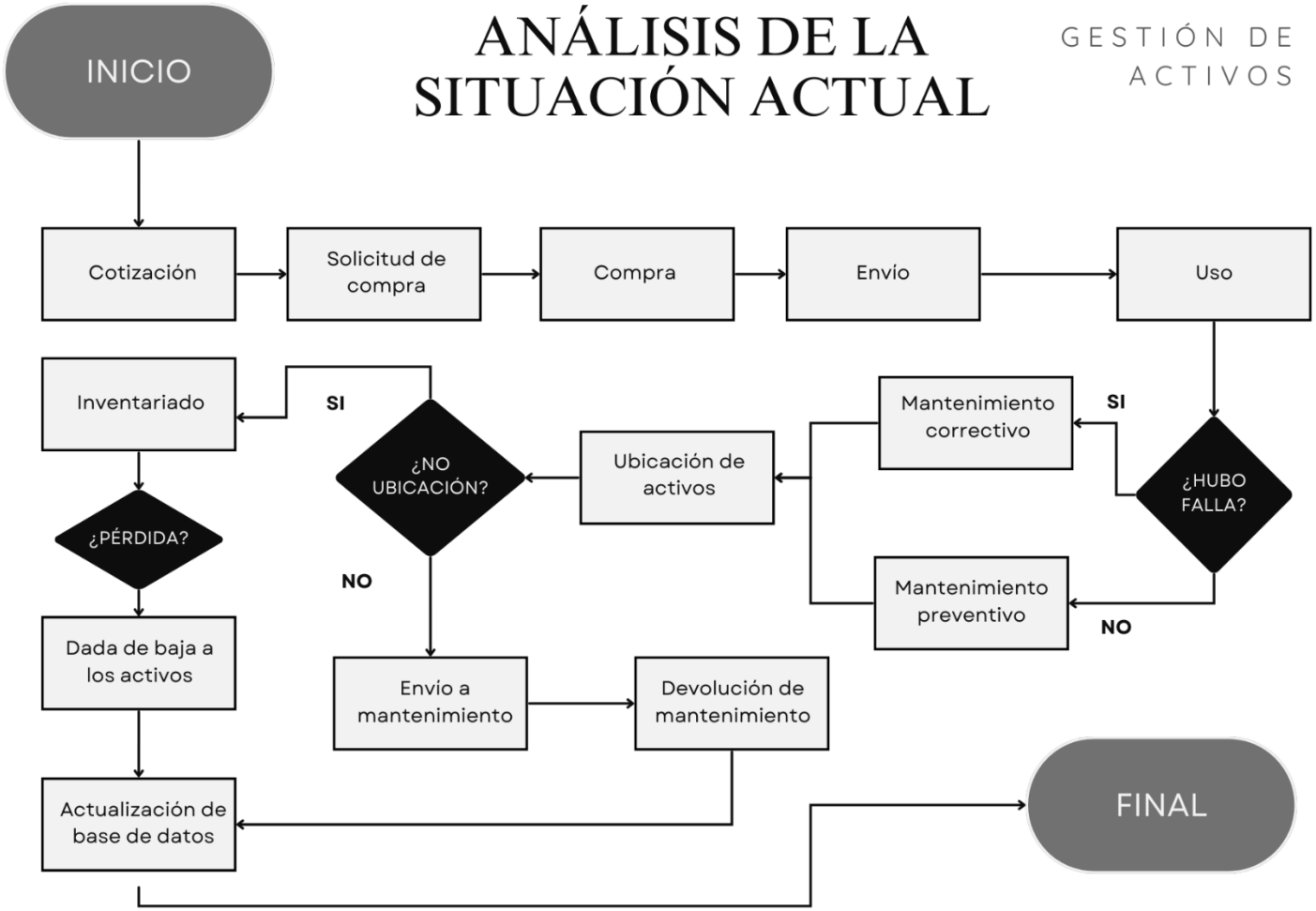
3.1. Mapa del flujo de valor actual y/o diagrama de proceso actual

Con el objetivo de analizar la situación actual del proceso de gestión e inventariado de herramientas e instrumentos de medición, a continuación, se presentan dos representaciones gráficas que permiten visualizar la secuencia de actividades y los puntos críticos que afectan su eficiencia.

En el siguiente diagrama de flujo se detalla el recorrido actual del proceso de gestión de activos en el CRC. Esta herramienta permite identificar las principales etapas en las que se concentran las operaciones pertenecientes al proceso de inventario. A través de esta visualización, es posible entender cómo se estructura el flujo de trabajo y cuáles son las actividades que desencadenan otras.

Figura 25

Diagrama de flujo de la situación actual del proceso de gestión de activos



Posteriormente, se presenta el Diagrama de Análisis de Proceso del Inventariado y búsqueda de herramientas e instrumentos de medición, el cual clasifica cada actividad del proceso según su naturaleza (operación, transporte, inspección, espera o almacenamiento). Esta representación permite cuantificar el número de actividades y evaluar el tiempo invertido en cada una, así como identificar tareas que no agregan valor. A partir de este análisis, se pueden identificar oportunidades de mejora en cuanto a simplificación, automatización y reducción de desperdicios.

Figura 26

Diagrama actual de proceso de inventariado

DIAGRAMA DE ANÁLISIS DEL PROCESO DE INVENTARIADO Y BÚSQUEDA DE HERRAMIENTAS ACTUAL (DAP)						
EMPRESA:			FERREYROS S.A.			
DEPARTAMENTO / ÁREA:			GERENCIA DE SOPORTE AL PRODUCTO			
SECCIÓN:			CENTRO DE REPARACIÓN DE COMPONENTES (CRC)			
ACTIVIDAD	Método Actual	Método Mejorado	Diferencia	OBSERVADOR:	CAROLINA CELESTE NAVARRO ALDORADIN	
Operación	6	3	3	FECHA:	27/03/2025	
Inspección	3	0	3	MÉTODO	ACTUAL	X
Transporte	3	2	1		MEJORADO	
Demora	4	4	0	TIPO:	OPERARIO	X
Almacenaje	1	0	1		MATERIAL	X
Tiempo Total	2192.0		2192		MÁQUINA	

N°	DESCRIPCIÓN	●	■	→	D	▼	Distancia (m)	Tiempo (min)	Observaciones
1	Filtrado de base anterior	●						3.0	
2	Impresión de listas en físico	●						4.0	
3	Traslado entre bahías			●			100 m	30.0	Tiempo total por más de 60 bahías
4	Inspección individual de herramientas		●					525.0	Tiempo total por aproximadamente 1050 herramientas
5	Revisión del código SAP de la herramienta en listas impresas		●					525.0	Tiempo total por aproximadamente 1050 herramientas
6	Escritura de ubicación	●						525.0	Tiempo total por aproximadamente 1050 herramientas
7	Consulta a técnico				●			140	Tiempo total por más de 70 huskyes

8	Dejar en bahía							50	Tiempo total por aproximadamente 1050 herramientas
9	Poner herramientas en carrito							50	Tiempo total por aproximadamente 1050 herramientas
10	Traslado a mantenimiento						100 m	5	
11	Verificación y escritura de lista de herramientas que se mandan a mantenimiento							15	
12	Mantenimiento correctivo o preventivo de herramienta							*	Depende de los tiempos del área de mantenimiento
13	Poner herramientas en carrito						20 m	15	
14	Traslado de mantenimiento a CRC							10	
15	Devolución de herramienta a técnico							100	
16	Ordenar herramientas en las husky							15	
17	Actualización de base de datos en Google Sheets							180	
		6	**3**	**3**	**4**	**1**	**220 m**	**2192.0**	

3.2. Efectos del problema en el área de trabajo o en los resultados de la empresa

El principal problema identificado es **retraso en el inventariado y pérdida de herramientas**, lo cual repercute de forma directa en la trazabilidad, disponibilidad y control de estos activos dentro del área de mantenimiento. Esto genera diversos efectos negativos en el proceso operativo y en los resultados generales de la empresa, como se detalla a continuación:

- **En el producto:** Si bien no se afecta directamente un producto final, sí se compromete la ejecución eficiente de los procesos productivos. La falta de herramientas puede retrasar reparaciones, inspecciones o tareas clave en las máquinas, lo que repercute en la calidad y cumplimiento de los trabajos.
- **En el costo:** La pérdida de herramientas genera gastos adicionales por la necesidad de reponer equipos con mayor frecuencia. Además, en muchos casos se opta por comprar de urgencia sin procesos de cotización, lo que incrementa los costos. También se desperdician recursos humanos al tener que buscar herramientas extraviadas o detener procesos.
- **En el tiempo:** El tiempo invertido en buscar herramientas que no están en su lugar o que no han sido registradas adecuadamente es considerable. Esto retrasa la ejecución de actividades operativas y afecta el cumplimiento de cronogramas, generando tiempos muertos innecesarios.
- **En la calidad:** La ausencia de herramientas adecuadas en el momento necesario puede provocar que se utilicen equipos alternativos no óptimos, afectando la calidad del mantenimiento o intervención realizada. También se incrementa el margen de error en las tareas operativas.
- **En los inventarios:** El inventario resulta desactualizado y poco confiable. Al no existir un registro en tiempo real ni una frecuencia de actualización constante, se

pierde visibilidad sobre el stock real, generando duplicidad de compras, herramientas olvidadas o mal ubicadas, y dificultades para tomar decisiones logísticas precisas.

3.3. Análisis de las causas raíz que generan el problema

Para identificar las posibles causas del problema principal "**Retraso en el inventariado y pérdida de herramientas**", se utilizó el Diagrama de Causa-Efecto (Ishikawa), considerando las categorías de las 6M (no se incluye la M de Medio ambiente, ya que no se identificaron factores relevantes para el análisis de las causas). Este análisis permite visualizar los factores que contribuyen a la raíz del problema, facilitando la priorización y posterior planteamiento de soluciones.

A continuación, se presenta una lista de las causas del problema principal, las cuales serán identificadas por la siguiente nomenclatura cuando se requieran abreviaciones: Cx, siendo "X" el número de orden en el que aparecen en la siguiente tabla:

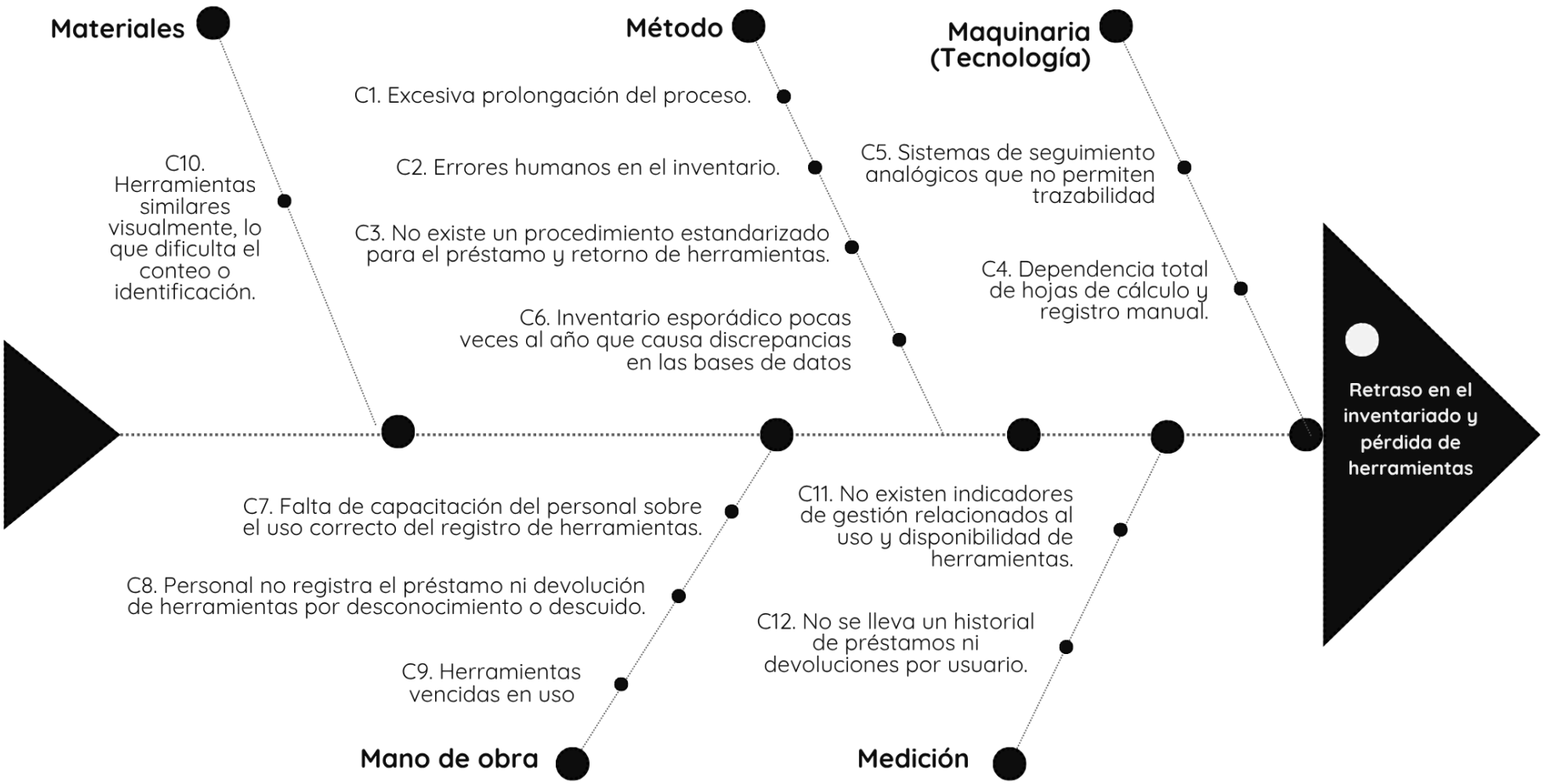
Tabla 10

Causas del retraso en el inventariado y pérdida de herramientas

N°	Nombre de la causa
C1	Excesiva prolongación del proceso.
C2	Errores humanos en el inventario.
C3	No existe un procedimiento estandarizado para el préstamo y retorno de herramientas.
C4	Dependencia total de hojas de cálculo y registro manual.
C5	Sistemas de seguimiento analógicos que no permiten trazabilidad.
C6	Inventario esporádico pocas veces al año que causa discrepancias en las bases de datos.
C7	Falta de capacitación del personal sobre el uso correcto del registro de herramientas.
C8	Personal no registra el préstamo ni devolución de herramientas por desconocimiento o descuido.
C9	Herramientas vencidas en uso.
C10	Herramientas similares visualmente, lo que dificulta el conteo o identificación.
C11	No existen indicadores de gestión relacionados al uso y disponibilidad de herramientas.
C12	No se lleva un historial de préstamos ni devoluciones por usuario.

Figura 27

Causas del problema



3.4. Priorización de causas raíz (Diagrama de Pareto, factores cualitativos, etc)

Una vez identificadas las posibles causas del problema mediante el diagrama de Ishikawa, se procede a realizar una priorización con el objetivo de enfocar los esfuerzos de mejora en aquellas causas que generan mayor impacto negativo. Esta priorización se ha desarrollado considerando factores cualitativos como la frecuencia con la que ocurre cada causa, su nivel de criticidad en el proceso operativo, y el grado de dificultad para implementar una solución. Para ello, se utilizará una matriz de evaluación que se aplicará en una encuesta al personal de la empresa y, posteriormente, un Diagrama de Pareto que permitirá visualizar cuáles son las causas principales que deben ser atendidas con mayor urgencia.

Las causas identificadas serán a partir de ahora nombradas con la nomenclatura CX, siendo "X" el número de orden en el que aparecen en la anterior sección se enlistan a continuación:

- C1. Excesiva prolongación del proceso.
- C2. Errores humanos en el inventario.
- C3. No existe un procedimiento estandarizado para el préstamo y retorno de herramientas.
- C4. Dependencia total de hojas de cálculo y registro manual.
- C5. Sistemas de seguimiento analógicos que no permiten trazabilidad.
- C6. Inventario esporádico pocas veces al año que causa discrepancias en las bases de datos.
- C7. Falta de capacitación del personal sobre el uso correcto del registro de herramientas.
- C8. Personal no registra el préstamo ni devolución de herramientas por desconocimiento o descuido.

- C9. Herramientas vencidas en uso.
- C10. Herramientas similares visualmente, lo que dificulta el conteo o identificación.
- C11. No existen indicadores de gestión relacionados al uso y disponibilidad de herramientas.
- C12. No se lleva un historial de préstamos ni devoluciones por usuario.

A continuación, se presenta un cuadro de valoración con 4 niveles de valoración.

Tabla 11

Cuadro de valoración para la priorización de causas

MUY BAJO	BAJO	MEDIO	ALTO
0	1	3	5

Se realizó la encuesta mencionada con anterioridad al personal del área, evaluando con la calificación establecida en el cuadro de valoración, obteniendo un puntaje total para cada causa. Estos puntajes nos ayudarán a identificar nuestra causa principal.

Tabla 12

Resultados de encuesta de causas del problema principal

N°	A	B	C	D	TOTAL
C1	5	5	5	5	20
C6	5	4	5	5	19
C2	4	5	5	4	18
C9	3	1	1	0	5

C5	1	3	0	1	5
C11	0	0	1	0	1
C10	0	1	0	0	1
C3	0	0	0	1	1
C4	1	0	0	0	1
C7	0	1	0	0	1
C12	0	0	1	0	1
C8	0	1	0	0	1

Posteriormente, se realizó el procesamiento de los resultados de la encuesta, para conocer el impacto de cada causa desde la perspectiva del personal de la empresa, para ello, se presentará una matriz donde se incluyen las frecuencias absolutas, relativas y relativas acumuladas de cada causa.

Tabla 13

Matriz de frecuencias resultado de la encuesta de causas

Causas	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa (%)	Frecuencia acumulada (%)
C1	20	27.03%	27.03%
C6	19	25.68%	52.70%
C2	18	24.32%	77.03%
C9	5	6.76%	83.78%

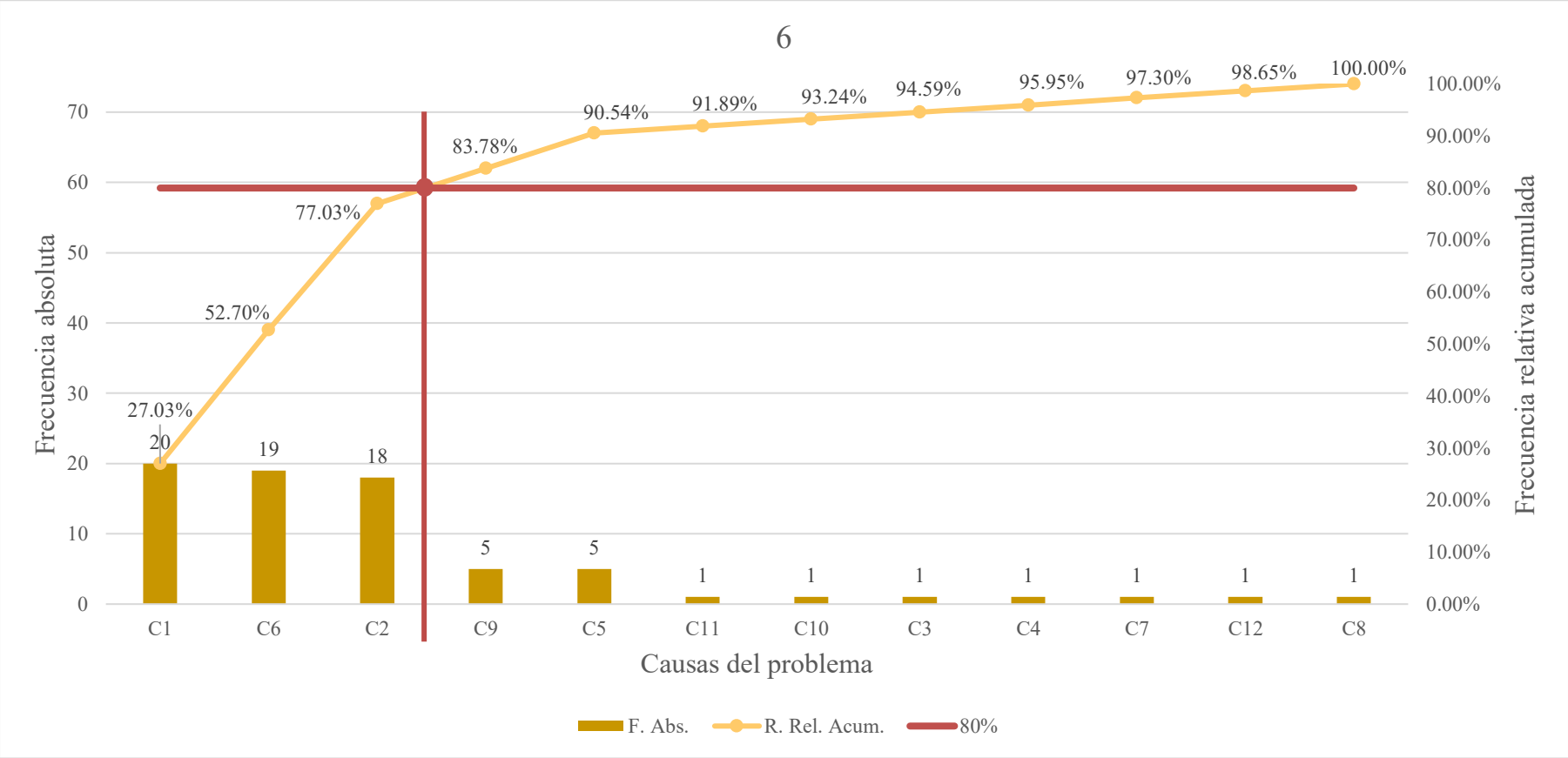
C5	5	6.76%	90.54%
C11	1	1.35%	91.89%
C10	1	1.35%	93.24%
C3	1	1.35%	94.59%
C4	1	1.35%	95.95%
C7	1	1.35%	97.30%
C12	1	1.35%	98.65%
C8	1	1.35%	100.00%
TOTAL	74	100.00%	

Comentario: Frecuencias ordenadas de las causas identificadas, donde la causa principal es la C6: Dependencia total de hojas de cálculo y registro manual con un porcentaje del **27.03%.**

Con el anterior insumo (Tabla 9), se aplicó el diagrama de Pareto, herramienta que nos permitirá visualizar el real impacto de las causas respecto a sus porcentajes.

Figura 28

Priorización de causas del problema según resultados de encuesta



Nota. El gráfico representa la relación entre la prioridad de las causas y como ésta contribuye al problema en su totalidad. Brindando insights sobre el rol de cada causa y cuáles se deberían priorizar.

3.5. Análisis de causas principales

A continuación, se describirá cada causa principal encontrada según el análisis de la sección anterior.

Causa #1 (C1) – Excesiva prolongación del proceso. Esta es la causa con mayor frecuencia relativa, representando el **27.03%** de las incidencias. Se refiere al tiempo excesivo que toma completar el proceso de inventariado, desde la recopilación manual de datos hasta su registro final en las bases correspondientes. Esta prolongación genera retrasos acumulativos y reduce significativamente la eficiencia operativa.

Factores contribuyentes:

- Ausencia de automatización en el registro de herramientas.
- Procesos manuales y repetitivos que requieren intervención constante del personal.
- Dependencia de múltiples pasos secuenciales sin integración digital.

Impacto:

- Aumenta los costos operativos por pérdida de tiempo productivo.
- Reduce la capacidad de respuesta ante auditorías o requerimientos de trazabilidad.
- Provoca acumulación de tareas y desgaste del personal encargado.

Causa #2 (C6) – Inventario esporádico pocas veces al año que causa discrepancias en las bases de datos. Representando el **25.68%** de los casos, esta causa se refiere a la baja frecuencia con la que se realiza el inventario físico, lo cual impide una actualización constante y confiable de los registros digitales. Esta discontinuidad permite la aparición de inconsistencias entre la realidad del almacén o área operativa y lo que figura en las bases de datos institucionales.

Factores contribuyentes:

- Falta de políticas de control de inventario periódico.
- Limitaciones de tiempo o personal para realizar inventarios frecuentes.

- Desactualización acumulada en los registros por eventos no reportados (movimientos, pérdidas, cambios de ubicación, etc.).

Impacto:

- Disminuye la confiabilidad de la información utilizada para la toma de decisiones.
- Genera confusión sobre la disponibilidad real de herramientas.
- Puede ocasionar pérdidas económicas por compras innecesarias o fallos operativos.

Causa #3 (C2) – Errores humanos en el inventario. Con un 24.32% de frecuencia, esta causa destaca por el componente humano en la generación de errores durante el proceso de inventariado. Estos errores pueden ser de transcripción, omisión, duplicación o clasificación incorrecta, y se deben a la naturaleza manual del proceso actual.

Factores contribuyentes:

- Falta de capacitación adecuada o estandarización en el procedimiento.
- Fatiga del personal por cargas de trabajo elevadas.
- Uso de herramientas ineficientes como hojas de cálculo sin validaciones.

Impacto:

- Provoca datos inconsistentes que afectan reportes y análisis posteriores.
- Dificulta la trazabilidad de activos y la detección temprana de pérdidas.
- Aumenta el margen de error en decisiones operativas y logísticas.

Figura 29

Imagen de referencia Inventario de Armado de motores 1

ARMADO DE MOTORES 1 .XLSX

Archivo Editar Ver Insertar Formato Datos Herramientas Ayuda

A1 DADOS ENCASTE DE 38 PULGADAS

DADOS ENCASTE DE 38 PULGADAS				
DESCRIPCION	CANTIDAD	CODIGO	TALLER	IMAGEN
DADO 1/2	1	271-4617	✓	
DADO 7/16	1	217-4616	✓	
DADO 5/8	1	271-4619	✓	
DADO 3/4	2	271-4621	✓	
DADO 11/16	1	271-4620	✓	
DADO 9/16	2	271-4618	✓	
DADO 3/8	1	271-4615	✓	
DADO TUBULAR 9/16	1	2714674	✓	
DADO TUBULAR 1/2	1	2141154	✓	
DADO TUBULAR 7/16	1	2714672	✓	
DADO TUBULAR 3/8	1	2714671	✓	
DADO TUBULAR 5/16	1	2714670	✓	
DADO ALLEN 3/16	2	2P8265	✓	
DADO ALLEN 7/32	1	8T3042	✓	
DADO ALLEN 1/4	2	2P8266	✓	
DADO ALLEN 5/16	2	2P8267	✓	
DADO ALLEN 3/8	1	2P8268	✓	
DADO ALLEN T40	1	1943536	✓	
DADO CARDANICO 3/8	1	8S2284	✓	

DADOS ENCASTE DE 38 PULGADAS | Herramientas para mantenimiento | DATA DE MANTENIMIENTO | ENCASTE DE 1 PULGADAS | ENCASTE DE12

Nota. Armado de motores 1 pertenece a una sola bahía, y tiene su propia hoja al igual que todas las demás bahías. Sin embargo, esta no proviene de una base de datos general, sino que se actualiza manualmente.

Figura 30

Control de herramientas vencidas

Equipo	Cod. Alterno	Descripción	Fecha programada	Días	ÁREA	EN INV	BAHIA	RESPONSABLE
10007648	P.849	TURBINA NEUMATICA(P.849)	1 feb 2024	322	DES-MOT			
10006155	P.156	HERRAMIENTA DE CORTE NEUMATICO(P.156)	5 feb 2024	318	DES-TREN			
10005824	H31002	MICROMETRO DE EXTERIORES ANALOGICO	18 feb 2024	305	ARM-MOT			
10006654	6184	TORQUIMETRO	29 sept 2024	81	DES-MOT	En bahia		
10008823	12962	PISTOLA ELECTRICA	8 mar 2024	286	DES-MOT			
10007881	10082	RELOJ COMPARADOR ANALOGICO	15 mar 2024	279	ARM-MOT			
10008339	AM.02	CADENA DE IZAJE	18 mar 2024	276	ARM-TREN			
10005917	1007	TORQUIMETRO	23 mar 2024	271	ARM-MOT	H058	A10	G.AGUILAR / V.BE
10008265	DES.MOT.	CADENA DE IZAJE	8 abr 2024	255	DES-MOT			
10063752	nan	CANCAMOS M10 ARMADO DE DIFERENCIALES #1	14 abr 2024	249	ARM-TREN			
10008279	B-37	CADENA DE IZAJE (03 RAMALES)	9 may 2024	224	DES-TREN			
10007381	P.771	PISTOLA NEUMATICA 1" (P.771)	24 may 2024	209	ARM-TREN			
10076672	nan	GRILLETES ARMADO DE TRANSMISIONES 1	25 may 2024	208	ARM-TREN			
10076671	nan	BRACKETS ARMADO DE CONTROL DE VÁLVULAS	25 may 2024	208	ARM-TREN			
10076668	nan	BRACKETS ARMADO DE TRANSMISIONES #06	25 may 2024	208	ARM-TREN			
10076667	nan	BRACKETS DESARMADO DE REDUCCIONES	25 may 2024	208	DES-TREN			
10076723	nan	HAND DRILL / TURBINETA NEUMATICO	30 may 2024	203	DES-MOT			
10076721	nan	Turbina neumática	30 may 2024	203	DES-MOT			
10008273	11181	BRACKETS ARMADO DE MOTORES #10	7 jun 2024	195	ARM-MOT			
10006977	P.649	PISTOLA NEUMÁTICA 1/2"(P.649)	7 jun 2024	195	DES-TREN			

tmi | 27/12 | BASE DE HERRAMIENTAS IVENTARIADAS | insitu f/s | ARMADO DE MOTORES | ARMADO DE TREN DE FUERZA | husky y bahia

Nota: En una sola hoja de cálculo de Google Sheets se encuentran varias hojas no sincronizadas.

Tabla 14

Recursos usados para una toma de inventario usual

N° Bahías	N° huskys	N° Herramientas	Jornadas laborales	Mano de obra
60	65	1500	5	4 personas

CAPÍTULO IV

PROPUESTA TÉCNICA DE LA MEJORA.

4.1. Plan de acción de la mejora propuesta

Con el objetivo de abordar la causa raíz identificada y optimizar el proceso actual, se propone un plan de acción estructurado que detalla las actividades necesarias para implementar la solución de mejora. Este plan contempla detalles importantes como recursos necesarios, tiempos requeridos y sus respectivos indicadores de seguimiento. Este plan está orientado en garantizar un entendimiento de los pasos a seguir para la ejecución exitosa del proyecto.

Tabla 15

Plan de acción para la mejora propuesta

Acciones de mejora	Tiempo (días)	Recursos necesarios	Indicador de seguimiento
1. Diseño detallado del RTLS	1 día (8h)	- Planos del taller - Data sheet BLE AoA - Laptop con software CAD (Inventor)	Documento de layout definido y validado
• Definir layout de beacons y gateways			
• Estimar áreas de cobertura BLE AoA			
• Definir puntos críticos del taller			

2. Configuración de beacons nRF52833		- nRF52833 Dev Kit	
• Programar advertising interval	1 día (8h)	- IDE Nordic	Scripts de beacon generados y validados
• Configurar potencia Tx		- RSSI tools	
• Pruebas RSSI en campo			
3. Configuración de gateways ESP32 WROOM DA N4		- ESP32 DA N4	
• Programar scan BLE	1 día (8h)	- VSCode / PlatformIO	Código ESP32 funcional para escaneo BLE
• Configurar Wi-Fi/MQTT		- MQTT bróker (Mosquitto)	
• Integrar antenas DA (AoA)			
4. Desarrollo de flujos Node-RED		- Node-RED	
• Captura datos MQTT	1 día (8h)	- PC / Servidor local	Flujos Node-RED operativos y testeados
• Parseo datos BLE		- Cuenta Google	
• Exportar a Google Sheets			

5. Configuración Google Sheets y Apps Script		- Cuenta Google	
• Crear hoja inventario • Crear script actualización automática • Pruebas de lectura/escritura	0.5 día (4h)	- Apps Script	Hoja conectada y actualizando datos
6. Configuración BigQuery		- Google Cloud account	
• Crear datasets • Definir esquema tablas • Crear integración con Node-RED	1 día (8h)	- Node-RED BigQuery node	Dataset en BigQuery creado y validado
7. Algoritmo básico de trilateración		- Node-RED	
• Implementar cálculo (2D) en Node-RED • Probar precisión en entorno real	1 día (8h)	- Datos reales de RSSI	Algoritmo calculando coordenadas (x,y)
8. Dashboard en Node-RED	0.5 día (4h)	- Node-RED UI nodes	Dashboard operativo y visualizando datos

• Crear UI con posiciones en tiempo real		- PC / servidor local	
• Mostrar estado de herramientas			
• Alertas básicas			
9. Pruebas de campo integrales		- Taller disponible	
• Colocar beacons en herramientas reales	1.5 días (12h)	- Herramientas reales	Reporte de pruebas con resultados
• Validar localización		- Beacons y gateways	
• Verificar integración GSheets / BigQuery			
10. Documentación y capacitación		- PC	
• Redactar manuales	1 día (8h)	- Plantillas documentación	Manual entregado y sesión de capacitación dictada
• Entrenar personal taller			
• Entregar backups de flujos y scripts			

De la tabla anterior, se visualizan las acciones de mejora, las cuales a continuación se detallan:

4.1.1. Diseño detallado del RTLS (1 día / 8 h)

En esta primera etapa se realizará un análisis exhaustivo del taller, revisando planos y zonas de trabajo para entender la distribución física y las posibles interferencias. Se definirá la ubicación preliminar de los beacons, que irán instalados en herramientas como torquímetros o manómetros, así como de los gateways ESP32 que se colocarán en techos o paredes. También se estimará la cobertura de señal BLE y se identificarán posibles puntos críticos, es decir, lugares donde la señal pueda verse afectada por estructuras metálicas, maquinaria pesada o interferencias. Al finalizar, se tendrá un documento que servirá como plano base para la instalación física y permitirá estimar cuántos dispositivos serán necesarios.

4.1.2. Configuración de beacons nRF52833 (1 día / 8 h)

En esta actividad se programarán los beacons para establecer parámetros como el intervalo de transmisión (advertising interval), que influye tanto en el consumo de batería como en la precisión de localización, y la potencia de transmisión (Tx Power), que determinará el alcance de la señal. Se asignarán identificadores únicos a cada beacon, como UUID, Major y Minor. Además, se realizarán pruebas en campo para medir la intensidad de señal (RSSI) y detectar posibles zonas sin cobertura o con interferencias. Se utilizarán herramientas de Nordic Semiconductor, como nRF Connect o SEGGER Studio, para completar esta etapa. Al finalizar, se contará con beacons totalmente configurados y listos para emitir información precisa hacia los gateways.

4.1.3. Configuración de gateways ESP32 DA N4 (1 día / 8 h)

Esta fase implica programar los ESP32 para escanear continuamente señales BLE y capturar información como la identificación del beacon, la intensidad de señal

y el tiempo de detección. Además, se configurará la conexión Wi-Fi y el protocolo MQTT para que los gateways puedan enviar los datos recolectados hacia el sistema central. Un aspecto crucial será integrar las antenas direccionales (DA) para aprovechar la funcionalidad de Angle of Arrival (AoA), fundamental para mejorar la precisión de la localización. Finalmente, se realizarán pruebas para validar tanto la calidad de la señal capturada como la estabilidad de la red inalámbrica. Al término de esta tarea, los gateways estarán funcionando correctamente y enviando datos al backend.

4.1.4. Desarrollo de flujos Node-RED (1 día / 8 h)

Aquí se diseñarán los flujos en Node-RED que permitirán recibir la información proveniente de los gateways a través de MQTT. Se programará la lógica necesaria para interpretar los datos BLE y transformarlos en formatos tabulares útiles, tanto para visualización como para almacenamiento. También se configurarán procesos para guardar estos datos de manera automática en Google Sheets o en bases de datos en la nube como BigQuery. Durante esta etapa se incluirán herramientas de depuración y registro de errores para garantizar que los flujos operen sin inconvenientes. El objetivo es contar con flujos Node-RED completamente funcionales, capaces de recibir y procesar datos en tiempo real.

4.1.5. Configuración de Google Sheets y Apps Script (0.5 día / 4 h)

En esta fase se creará una hoja de cálculo que sirva como repositorio intermedio de los datos generados por el sistema RTLS. Se definirán las columnas necesarias para registrar información como ID de beacon, timestamp, nivel de señal RSSI y coordenadas de ubicación. Se programarán scripts en Google Apps Script para automatizar el proceso de actualización de datos desde Node-RED, e incluso se

podrán crear alertas para notificar cuando se detecten valores fuera de rango. Al final de esta actividad, se contará con una hoja de cálculo operativa y sincronizada en tiempo real con el sistema RTLS.

4.1.6. Configuración de BigQuery (1 día / 8 h)

Durante esta etapa se diseñarán datasets y tablas dentro de Google Cloud BigQuery, definiendo cuidadosamente la estructura y los tipos de datos que se almacenarán, como enteros, flotantes, o timestamps. Se integrará Node-RED con BigQuery mediante nodos específicos o mediante APIs REST, asegurando que los datos se inserten correctamente y que puedan realizarse consultas rápidas y eficientes. También se realizarán pruebas de inserción y extracción de datos para verificar el funcionamiento del sistema. El resultado será una base de datos robusta, pensada para almacenar históricos y para realizar análisis de gran volumen de datos.

4.1.7. Algoritmo básico de trilateración (1 día / 8 h)

Aquí se desarrollará un algoritmo básico en Node-RED para calcular posiciones en dos dimensiones (x, y) a partir de los valores de señal RSSI obtenidos desde distintos gateways. Se implementará la fórmula matemática de trilateración y se probará en el taller para comparar las posiciones calculadas con las posiciones reales de los beacons. También se aplicarán técnicas de filtrado, como medias móviles, para reducir el margen de error y mejorar la estabilidad de las lecturas. El objetivo es lograr una precisión de localización inferior a 2 metros, un estándar bastante aceptable en entornos industriales.

4.1.8. Dashboard en Node-RED (0.5 día / 4 h)

Esta tarea consiste en diseñar una interfaz gráfica en Node-RED que muestre el plano del taller y la ubicación en tiempo real de cada herramienta o beacon.

Además de la visualización en mapa, se incluirán elementos gráficos como alertas de color, íconos personalizados y mensajes informativos para indicar el estado de cada dispositivo o si alguno sale de su zona permitida. Se harán pruebas de compatibilidad en distintos navegadores web para asegurar un correcto funcionamiento. El objetivo final es ofrecer una herramienta de monitoreo visual para los operarios o supervisores del taller.

4.1.9. Pruebas de campo integrales (1.5 días / 12 h)

En esta fase se instalarán físicamente los beacons en las herramientas reales del taller y se posicionarán los gateways según el diseño previamente definido. Se probarán distintos escenarios de funcionamiento para evaluar el rango efectivo, la precisión de localización y el desempeño general del sistema. Se verificará que toda la cadena de datos funcione correctamente, desde la captura de señales BLE hasta la visualización y almacenamiento en Google Sheets y BigQuery. Los resultados se documentarán en un reporte detallado, destacando métricas como el error medio en la localización, las zonas con interferencias y los tiempos de respuesta del sistema.

4.1.10. Documentación y capacitación (1 día / 8 h)

Finalmente, se elaborará la documentación técnica del proyecto, incluyendo diagramas de conexiones, instrucciones de instalación y manuales de uso para el personal del taller. Además, se realizarán respaldos de todos los scripts, flujos y configuraciones utilizadas en el sistema, para asegurar que pueda mantenerse o replicarse en el futuro. También se impartirá una breve capacitación para el equipo de trabajo, explicando cómo operar el sistema, cómo interpretar el dashboard y cómo reaccionar ante posibles incidencias. El objetivo es que el personal quede completamente preparado para gestionar el RTLS de manera autónoma.

4.2. Consideraciones técnicas, operativas y ambientales para la implementación de la mejora

4.2.1. Consideraciones técnicas

A.- Especificaciones de máquinas y equipos. A continuación, se especificarán las características técnicas de los equipos que se van a utilizar o forman parte de la innovación o mejora.

Figura 31

Ficha técnica del HLK-PM01

<table>
<tr><th colspan="8">FICHA TÉCNICA DE MÁQUINA / EQUIPO</th></tr>
<tr><td colspan="2">REALIZADO POR</td><td colspan="2">Carolina Celeste Navarro Aldoradin</td><td colspan="2">FECHA</td><td colspan="2">22/04/2025</td></tr>
<tr><td colspan="2">MÁQUINA / EQUIPO</td><td colspan="2">Fuente de alimentación AC-DC</td><td colspan="2">UBICACIÓN</td><td colspan="2">CRC</td></tr>
<tr><td colspan="2">FABRICANTE</td><td colspan="2">Hi-Link</td><td colspan="2">SECCIÓN</td><td colspan="2">Bahías</td></tr>
<tr><td colspan="2">MODELO</td><td colspan="2">HLK-PM01</td><td colspan="2" rowspan="2">CÓDIGO INVENTARIO</td><td colspan="2" rowspan="2">-</td></tr>
<tr><td colspan="2">MARCA</td><td colspan="2">Hi-Link</td></tr>
<tr><td colspan="8">CARACTERÍSTICAS GENERALES</td></tr>
<tr><td>ALTURA</td><td>15.5±0.10) mm</td><td>ANCHO</td><td>(18.00±0.10) mm</td><td>LARGO</td><td colspan="3">(28.0±0.10) mm</td></tr>
<tr><td colspan="4">CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
- Entrada: 90-264 VAC
- Salida: 5VDC /600 mA
- Aislamiento 3000VAC
- Eficiencia ~70-80%</td><td colspan="4" rowspan="3">
</td></tr>
<tr><td colspan="4">COMPONENTES

Transformador, convertidor switching, filtros</td></tr>
<tr><td colspan="4">FUNCIÓN
- Convertir red eléctrica AC a 5V DC para circuitos.</td></tr>
<tr><td colspan="4">FECHA DE MANTENIMIENTO</td><td colspan="4">No requiere mantenimiento</td></tr>
</table>

Se hizo uso del HLK-PM01 principalmente para convertir la corriente eléctrica estándar de 220V AC del taller a 5V DC para facilitar el procesado del voltaje para la alimentación de los demás componentes electrónicos del Gateway.

Figura 32

Ficha técnica del Step Down MP1584EN

<table>
<tr><th colspan="6">FICHA TÉCNICA DE MÁQUINA / EQUIPO</th></tr>
<tr><td colspan="2">REALIZADO POR</td><td colspan="2">Carolina Celeste Navarro Aldoradin</td><td>FECHA</td><td>22/04/2025</td></tr>
<tr><td colspan="2">MÁQUINA / EQUIPO</td><td colspan="2">Convertidor DC-DC Step Down</td><td>UBICACIÓN</td><td>CRC</td></tr>
<tr><td colspan="2">FABRICANTE</td><td colspan="2">eBoot (varios OEM)</td><td>SECCIÓN</td><td>Bahías</td></tr>
<tr><td colspan="2">MODELO</td><td colspan="2">MP1584EN DC-DC Module</td><td rowspan="2">CÓDIGO INVENTARIO</td><td rowspan="2">-</td></tr>
<tr><td colspan="2">MARCA</td><td colspan="2">eBoot</td></tr>
<tr><td colspan="6">CARACTERÍSTICAS GENERALES</td></tr>
<tr><td>ALTURA</td><td>10.0±0.10) mm</td><td>ANCHO</td><td>(17.00±0.10) mm</td><td>LARGO</td><td>(22.0±0.10) mm</td></tr>
<tr><td colspan="4">CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
- Entrada: 4.5-28 VDC
- Salida ajustable 0.8-20V DC
- Hasta 3ª
- Eficiencia > 90%</td><td colspan="2" rowspan="3"> </td></tr>
<tr><td colspan="4">COMPONENTES
Circuito MP1584EN, inductores, Capacitores</td></tr>
<tr><td colspan="4">FUNCIÓN
- Reducir tensión DC a niveles ajustables</td></tr>
<tr><td colspan="4">FECHA DE MANTENIMIENTO</td><td colspan="2">No requiere mantenimiento</td></tr>
</table>

Comentario. Se hizo uso del convertidor Step Down MP1584EN DC-DC para reducir el voltaje de 5V DC a 3.3V DC que es con el que alimentamos al microcontrolador del Gateway.

Figura 33

Ficha técnica del Conversor USB-Serial CH340C

<table>
<tr><th colspan="8">FICHA TÉCNICA DE MÁQUINA / EQUIPO</th></tr>
<tr><td colspan="2">REALIZADO POR</td><td colspan="2">Carolina Celeste Navarro Aldoradin</td><td colspan="2">FECHA</td><td colspan="2">22/04/2025</td></tr>
<tr><td colspan="2">MÁQUINA / EQUIPO</td><td colspan="2">Conversor USB-Serial</td><td colspan="2">UBICACIÓN</td><td colspan="2">CRC</td></tr>
<tr><td colspan="2">FABRICANTE</td><td colspan="2">WCH (Nanjing QinHeng)</td><td colspan="2">SECCIÓN</td><td colspan="2">Bahías</td></tr>
<tr><td colspan="2">MODELO</td><td colspan="2">CH340C</td><td colspan="2" rowspan="2">CÓDIGO INVENTARIO</td><td colspan="2" rowspan="2">-</td></tr>
<tr><td colspan="2">MARCA</td><td colspan="2">WCH</td></tr>
<tr><td colspan="8">CARACTERÍSTICAS GENERALES</td></tr>
<tr><td>ALTURA</td><td>(1.7±0.10) mm</td><td>ANCHO</td><td>(4.40±0.10) mm</td><td>LARGO</td><td colspan="3">(10.0±0.10) mm</td></tr>
<tr><td colspan="4">CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
- Protocolo USB 2.0 Full Speed
- Voltaje 3.3/5V
- Soporta UART
- Baudrate máx. 2 Mbps</td><td colspan="4" rowspan="3"> </td></tr>
<tr><td colspan="4">COMPONENTES
Chip CH340C, resistores, condensadores</td></tr>
<tr><td colspan="4">FUNCIÓN
- Conversión USB ↔ UART serial</td></tr>
<tr><td colspan="4">FECHA DE MANTENIMIENTO</td><td colspan="4">No requiere mantenimiento</td></tr>
</table>

Figura 34

Ficha técnica del ESP32-WROOM-DA-N4

<table>
<tr><th colspan="8">FICHA TÉCNICA DE MÁQUINA / EQUIPO</th></tr>
<tr><td colspan="2">REALIZADO POR</td><td colspan="2">Carolina Celeste Navarro Aldoradin</td><td colspan="2">FECHA</td><td colspan="2">22/04/2025</td></tr>
<tr><td colspan="2">MÁQUINA / EQUIPO</td><td colspan="2">Módulo Wi-Fi + Bluetooth</td><td colspan="2">UBICACIÓN</td><td colspan="2">CRC</td></tr>
<tr><td colspan="2">FABRICANTE</td><td colspan="2">Espressif</td><td colspan="2">SECCIÓN</td><td colspan="2">Bahías</td></tr>
<tr><td colspan="2">MODELO</td><td colspan="2">ESP32-WROOM-DA-N4</td><td colspan="2" rowspan="2">CÓDIGO INVENTARIO</td><td colspan="2" rowspan="2">-</td></tr>
<tr><td colspan="2">MARCA</td><td colspan="2">Espressif</td></tr>
<tr><td colspan="8">CARACTERÍSTICAS GENERALES</td></tr>
<tr><td>ALTURA</td><td>(3.45±0.10) mm</td><td>ANCHO</td><td>(18.00±0.10) mm</td><td>LARGO</td><td colspan="3">(18.0±0.10) mm</td></tr>
<tr><td colspan="4">CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
- Wi-Fi 802.11 b/g/n
- Bluetooth 4.2
- Dual antena
- 32-bit Xtensa LX6
- 4 MB Flash
- Múltiples GPIO</td><td colspan="4" rowspan="3">
</td></tr>
<tr><td colspan="4">COMPONENTES
SoC ESP32, antenas internas, Flash, cristal, pasivos
Pasivos</td></tr>
<tr><td colspan="4">FUNCIÓN
- Microcontrolador con Wi-Fi + BT,
Procesamiento</td></tr>
<tr><td colspan="4">FECHA DE MANTENIMIENTO</td><td colspan="4">No requiere mantenimiento</td></tr>
</table>

Los dispositivos anteriormente descritos forman parte del Gateway / lector / receptor, por otra parte, a continuación, se describen los dispositivos que forman parte del beacon.

Figura 35

Ficha técnica del cristal oscilador SMD

<table>
<tr><th colspan="8">FICHA TÉCNICA DE MÁQUINA / EQUIPO</th></tr>
<tr><td colspan="2">REALIZADO POR</td><td colspan="2">Carolina Celeste Navarro Aldoradin</td><td colspan="2">FECHA</td><td colspan="2">22/04/2025</td></tr>
<tr><td colspan="2">MÁQUINA / EQUIPO</td><td colspan="2">Cristal oscilador SMD</td><td colspan="2">UBICACIÓN</td><td colspan="2">CRC</td></tr>
<tr><td colspan="2">FABRICANTE</td><td colspan="2">NDK</td><td colspan="2">SECCIÓN</td><td colspan="2">Bahías</td></tr>
<tr><td colspan="2">MODELO</td><td colspan="2">CRYSTAL-SMD_4P-L1.6-W1.2-BL (NX1612SA-32MHz)</td><td colspan="2" rowspan="2">CÓDIGO INVENTARIO</td><td colspan="2" rowspan="2">-</td></tr>
<tr><td colspan="2">MARCA</td><td colspan="2">NDK</td></tr>
<tr><td colspan="8">CARACTERÍSTICAS GENERALES</td></tr>
<tr><td>ALTURA</td><td>(0.5±0.10) mm</td><td>ANCHO</td><td>(1.2±0.10) mm</td><td>LARGO</td><td colspan="3">(1.6±0.10) mm</td></tr>
<tr><td colspan="4">CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
- Frecuencia 32 MHz
- ESR típico 50Ω
- Carga 10Pf
- Tolerancia ±10 ppm,
- Temperatura -40/+85 °C</td><td colspan="4" rowspan="3"> </td></tr>
<tr><td colspan="4">COMPONENTES
Cristal de cuarzo</td></tr>
<tr><td colspan="4">FUNCIÓN
- Proveer señal de reloj precisa para circuitos
Circuitos</td></tr>
<tr><td colspan="4">FECHA DE MANTENIMIENTO</td><td colspan="4">No requiere mantenimiento</td></tr>
</table>

Figura 36

Ficha técnica del SoC BLE

<table>
<tr><th colspan="6">FICHA TÉCNICA DE MÁQUINA / EQUIPO</th></tr>
<tr><td colspan="2">REALIZADO POR</td><td colspan="2">Carolina Celeste Navarro Aldoradin</td><td>FECHA</td><td>22/04/2025</td></tr>
<tr><td colspan="2">MÁQUINA / EQUIPO</td><td colspan="2">SoC Bluetooth Low Energy</td><td>UBICACIÓN</td><td>CRC</td></tr>
<tr><td colspan="2">FABRICANTE</td><td colspan="2">Nordic</td><td>SECCIÓN</td><td>Bahías</td></tr>
<tr><td colspan="2">MODELO</td><td colspan="2">nRF52833 QFN40</td><td rowspan="2">CÓDIGO INVENTARIO</td><td rowspan="2">-</td></tr>
<tr><td colspan="2">MARCA</td><td colspan="2">Nordic</td></tr>
<tr><td colspan="6">CARACTERÍSTICAS GENERALES</td></tr>
<tr><td>ALTURA</td><td>(0.85±0.10) mm</td><td>ANCHO</td><td>(5.0±0.10) mm</td><td>LARGO</td><td>(5.0±0.10) mm</td></tr>
<tr><td colspan="4">CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
- BLE 5.1, 2.4 GHz
- Cortex-M4
- Flash 512KB
- RAM 128KB
- AoA/AoD</td><td colspan="2" rowspan="3">
</td></tr>
<tr><td colspan="4">COMPONENTES
Procesador, radio RF, memoria, periféricos</td></tr>
<tr><td colspan="4">FUNCIÓN
- Procesar datos y comunicación BLE AoA</td></tr>
<tr><td colspan="4">FECHA DE MANTENIMIENTO</td><td colspan="2">No requiere mantenimiento</td></tr>
</table>

Figura 37

Ficha técnica del RTC de bajo consumo

<table>
<tr><th colspan="8">FICHA TÉCNICA DE MÁQUINA / EQUIPO</th></tr>
<tr><td colspan="2">REALIZADO POR</td><td colspan="2">Carolina Celeste Navarro Aldoradin</td><td colspan="2">FECHA</td><td colspan="2">22/04/2025</td></tr>
<tr><td colspan="2">MÁQUINA / EQUIPO</td><td colspan="2">RTC de bajo consumo</td><td colspan="2">UBICACIÓN</td><td colspan="2">CRC</td></tr>
<tr><td colspan="2">FABRICANTE</td><td colspan="2">Micro Crystal</td><td colspan="2">SECCIÓN</td><td colspan="2">Bahías</td></tr>
<tr><td colspan="2">MODELO</td><td colspan="2">RV-3028-C7</td><td colspan="2" rowspan="2">CÓDIGO INVENTARIO</td><td colspan="2" rowspan="2">-</td></tr>
<tr><td colspan="2">MARCA</td><td colspan="2">Micro Crystal</td></tr>
<tr><td colspan="8">CARACTERÍSTICAS GENERALES</td></tr>
<tr><td>ALTURA</td><td>(0.7±0.10) mm</td><td>ANCHO</td><td>(3.2±0.10) mm</td><td>LARGO</td><td colspan="3">(1.5±0.10) mm</td></tr>
<tr><td colspan="4">CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
- I2C
- Alimentación 1.1-5.5V
- Consumo 45 nA, ±1 ppm
- Timestamp
- Alarma</td><td colspan="4" rowspan="3">
</td></tr>
<tr><td colspan="4">COMPONENTES
Oscilador, memoria RTC, interfaz I2C</td></tr>
<tr><td colspan="4">FUNCIÓN
- Mantener fecha/hora precisa, consumo ultrabajo</td></tr>
<tr><td colspan="4">FECHA DE MANTENIMIENTO</td><td colspan="4">No requiere mantenimiento</td></tr>
</table>

Figura 38

Ficha técnica de la Antena cerámica SMD

<table>
<tr><th colspan="8">FICHA TÉCNICA DE MÁQUINA / EQUIPO</th></tr>
<tr><td colspan="2">REALIZADO POR</td><td colspan="2">Carolina Celeste Navarro Aldoradin</td><td colspan="2">FECHA</td><td colspan="2">22/04/2025</td></tr>
<tr><td colspan="2">MÁQUINA / EQUIPO</td><td colspan="2">Antena cerámica SMD</td><td colspan="2">UBICACIÓN</td><td colspan="2">CRC</td></tr>
<tr><td colspan="2">FABRICANTE</td><td colspan="2">Johanson</td><td colspan="2">SECCIÓN</td><td colspan="2">Bahías</td></tr>
<tr><td colspan="2">MODELO</td><td colspan="2">2450AT18A100E</td><td colspan="2" rowspan="2">CÓDIGO INVENTARIO</td><td colspan="2" rowspan="2">-</td></tr>
<tr><td colspan="2">MARCA</td><td colspan="2">Johanson</td></tr>
<tr><td colspan="8">CARACTERÍSTICAS GENERALES</td></tr>
<tr><td>ALTURA</td><td>(1.1±0.10) mm</td><td>ANCHO</td><td>(1.6±0.10) mm</td><td>LARGO</td><td colspan="3">(3.2±0.10) mm</td></tr>
<tr><td colspan="4">CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
- Frecuencia 2.4-2.5 GHz
- Ganancia 1.8 dBi
- VSWR < 2.0
- Eficiencia ~70-80%,
- Imp. 50Ω</td><td colspan="4" rowspan="3"> </td></tr>
<tr><td colspan="4">COMPONENTES
Elemento cerámico resonante</td></tr>
<tr><td colspan="4">FUNCIÓN
- Radiar/recibir señal RF BLE/Wi-Fi</td></tr>
<tr><td colspan="4">FECHA DE MANTENIMIENTO</td><td colspan="4">No requiere mantenimiento</td></tr>
</table>

B. Diseño de máquinas y equipos

En esta sección se presentan los diseños y planos mecánicos de las carcasas para los 2 tipos de dispositivo a utilizar (beicons y lectores). Esta, permitirá equipar a las placas PCB que reciben o transmiten la señal BLE o Wifi con la robustez que necesitan para trabajar en un entorno exigente como el del taller en el que será instalado. Tanto en el caso del lector como el beacon, se consideraron dos partes: base y tapa, para la estructura de la carcasa.

Figura 39

Plano mecánico de carcasa ensamblada para lector BLE

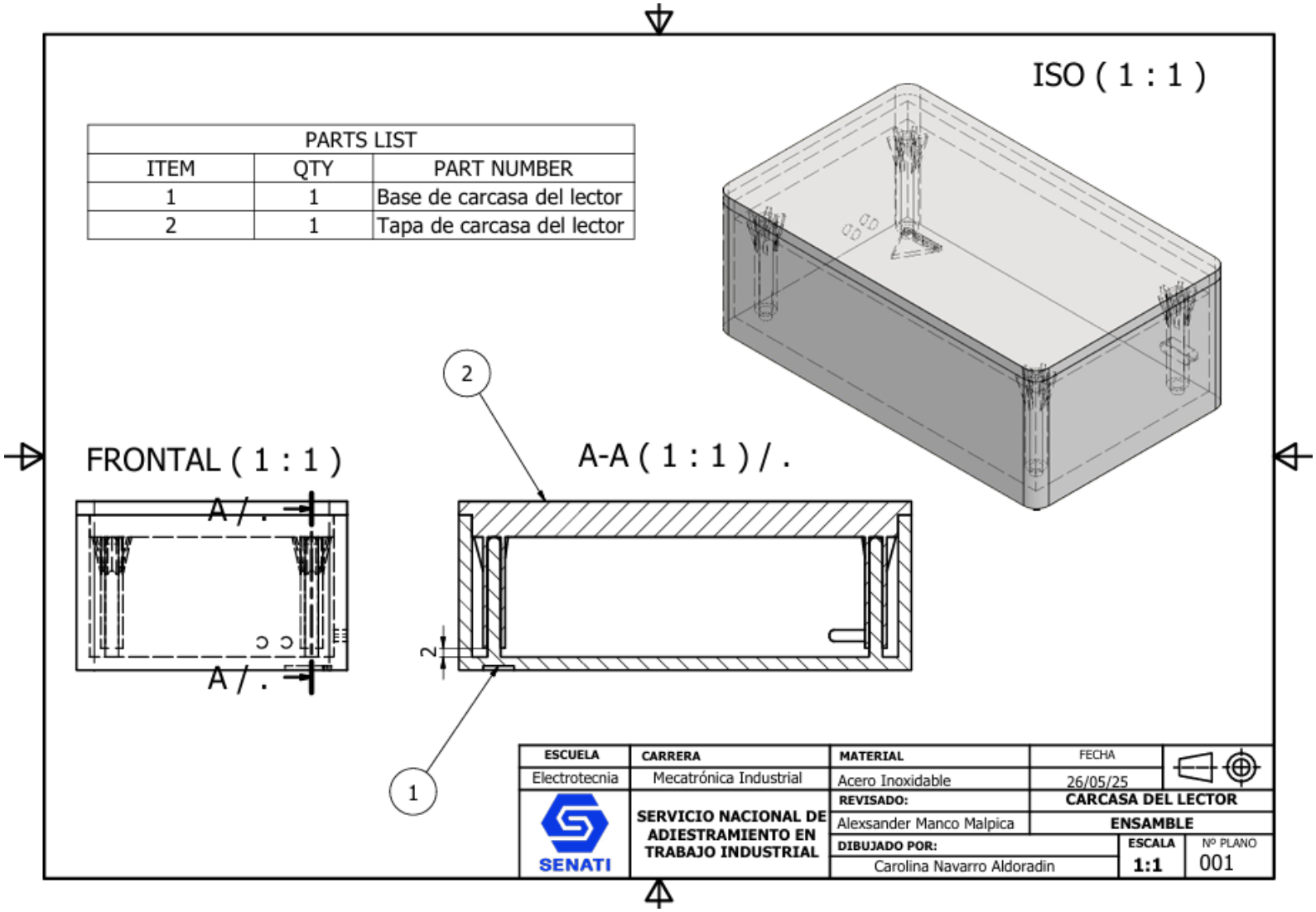


Figura 40

Plano mecánico de tapa de carcasa para lector BLE

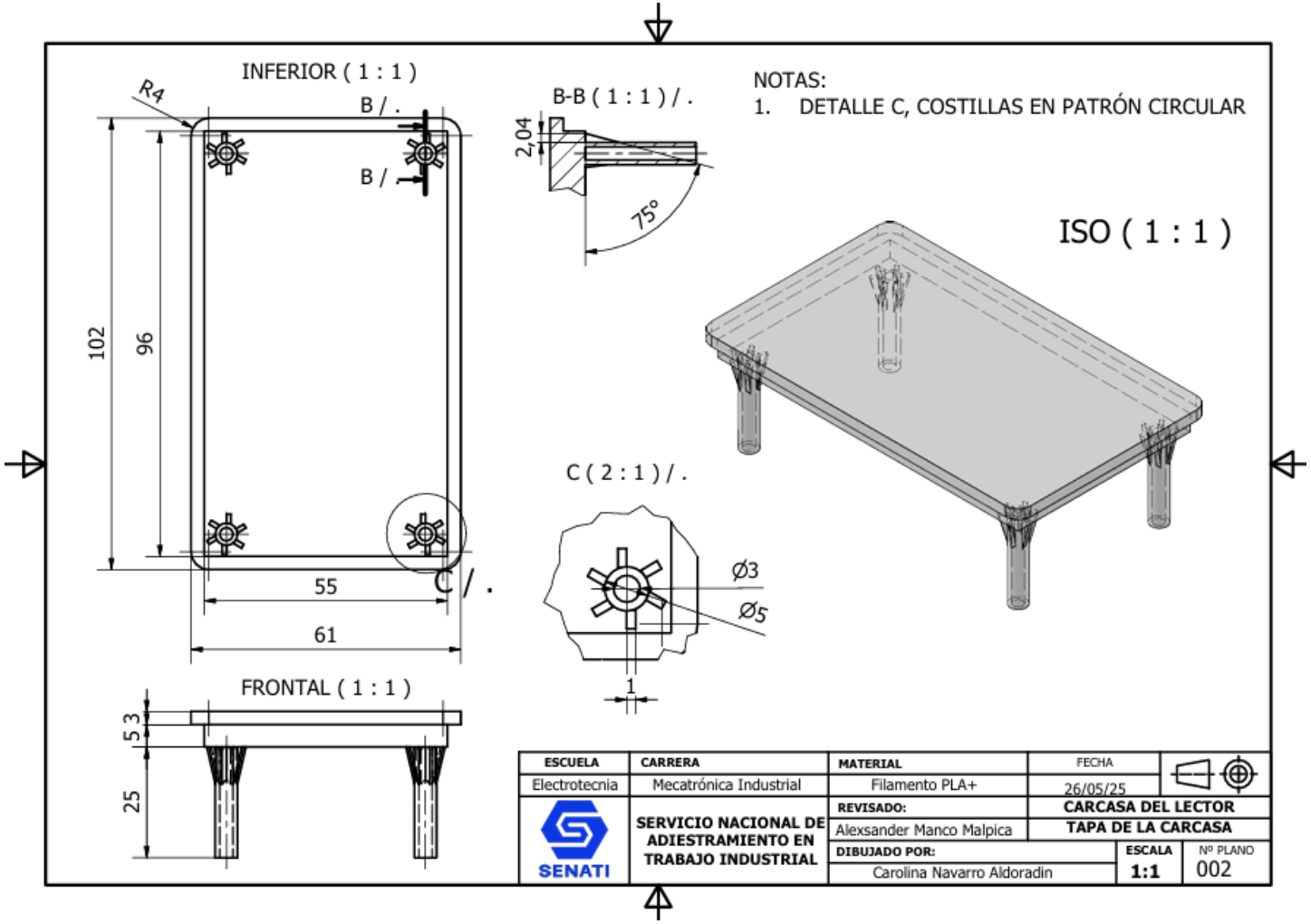


Figura 41

Plano mecánico de base de carcasa para lector BLE

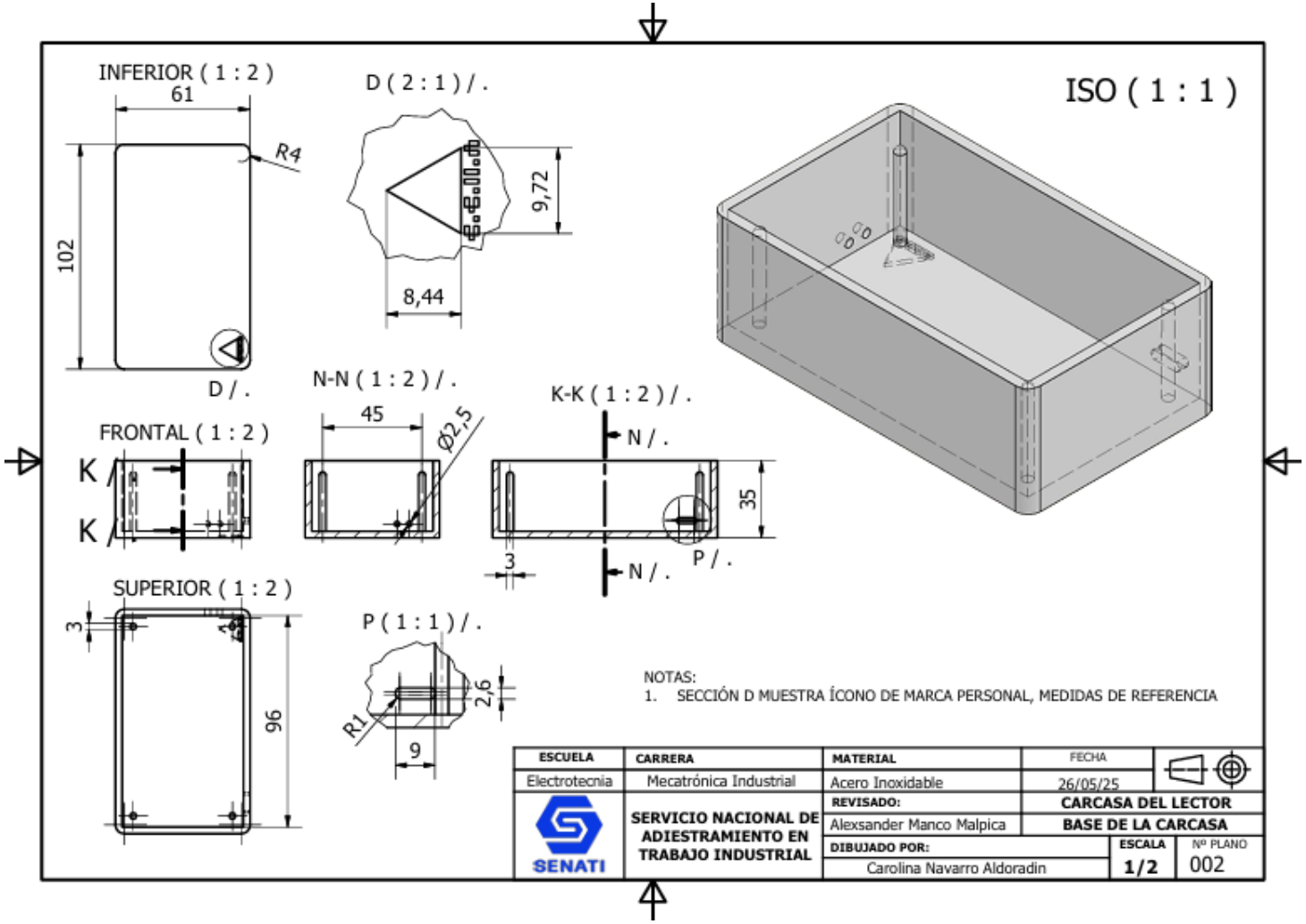


Figura 42

Plano mecánico de ensamble de carcasa de beacon BLE

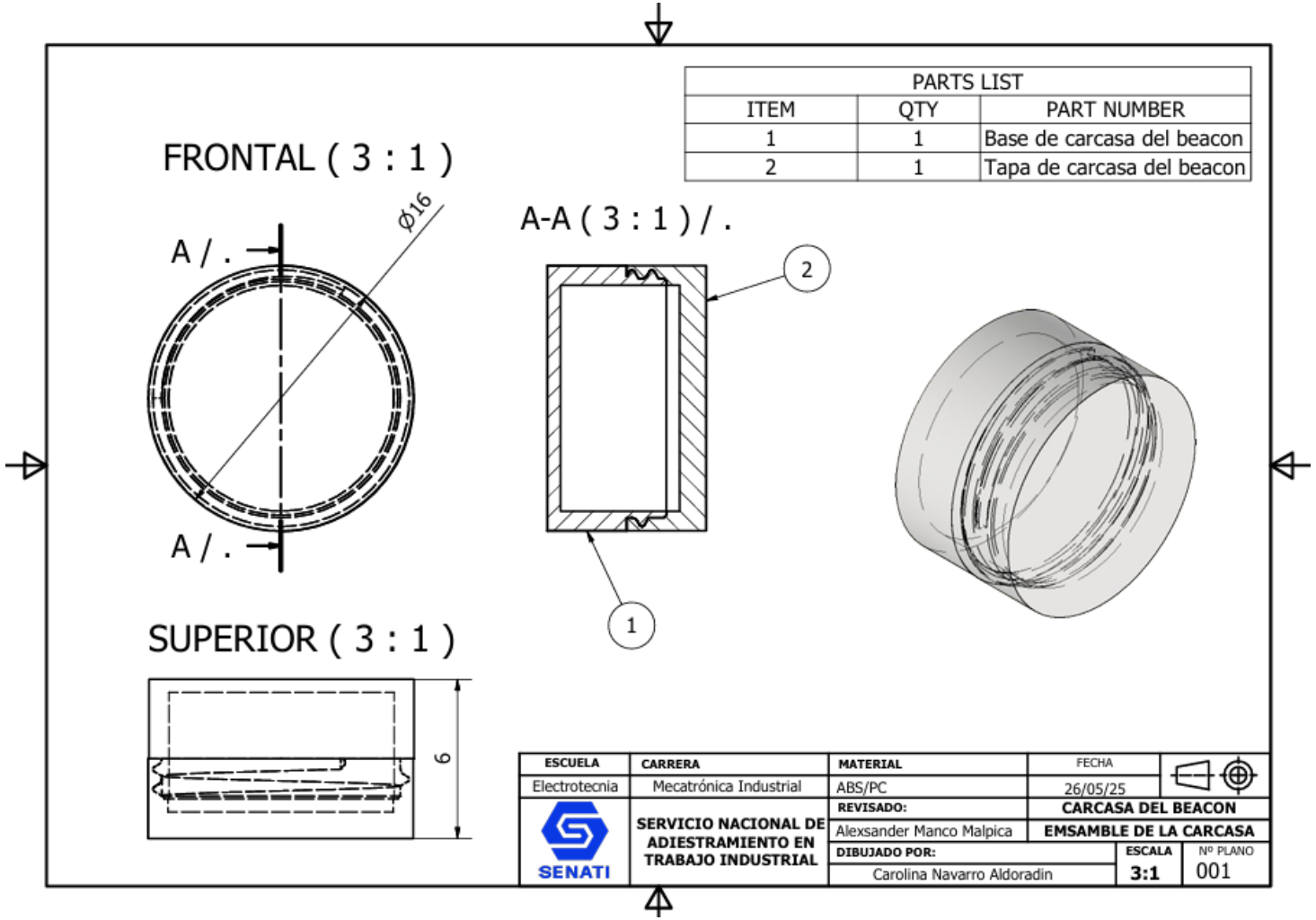
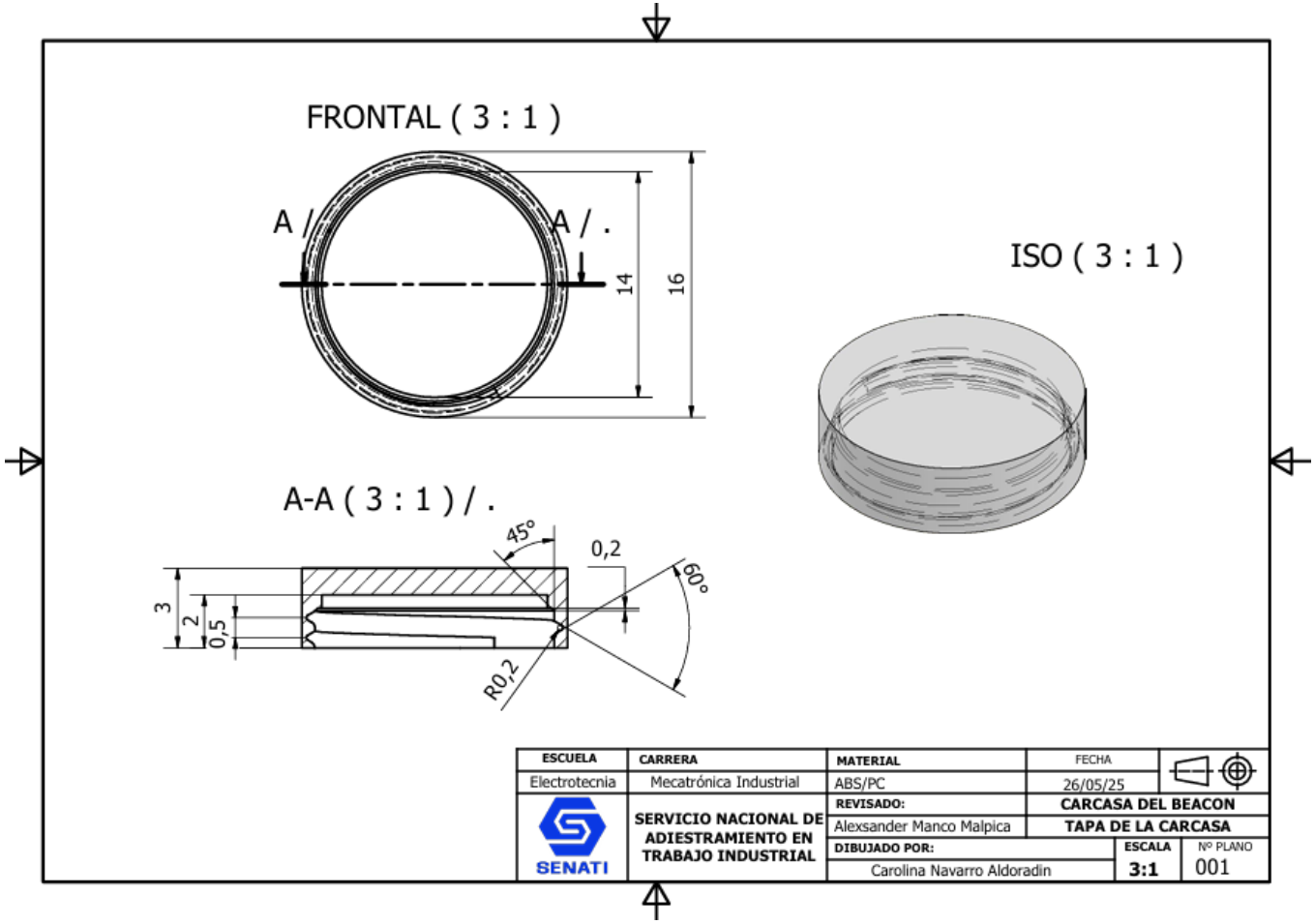


Figura 43

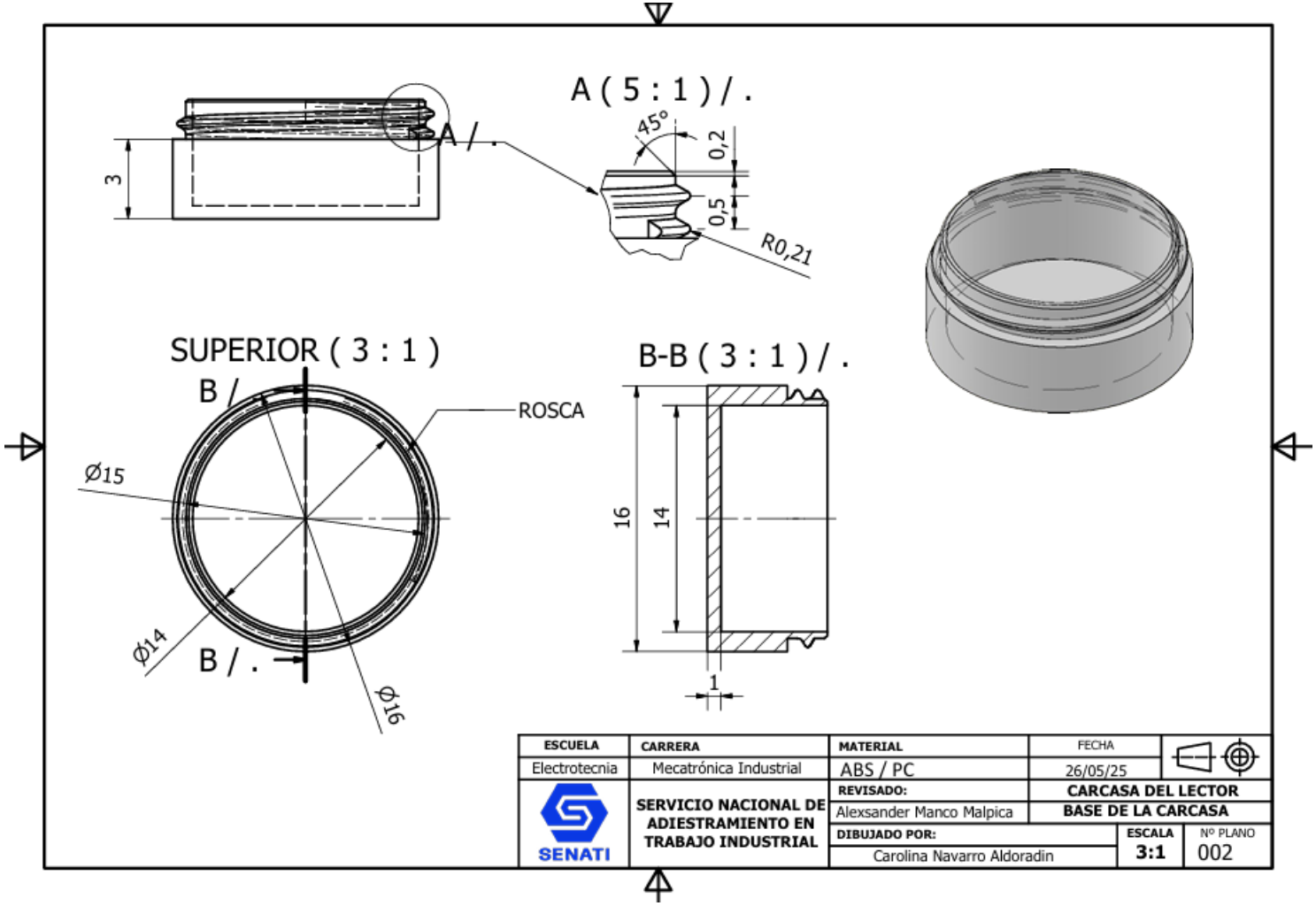
Plano mecánico de tapa de la carcasa del beacon



Nota: Tapa hecha a medida para la rosca de la base.

Figura 44

Base de carcasa del beacon

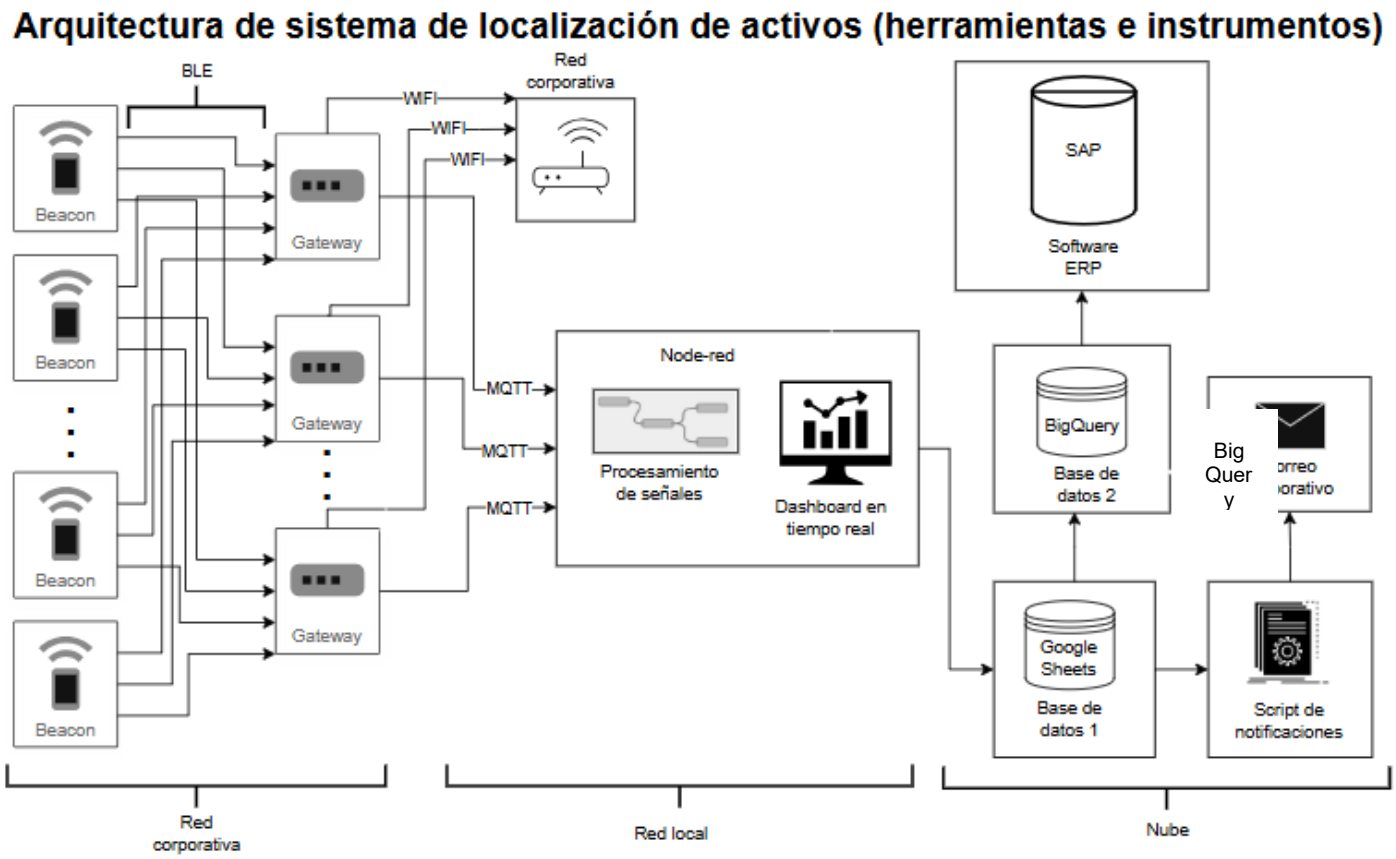


C. Planos

En esta sección se presentará los planos de conexión del módulo BLE, la placa PCB, el diagrama de arquitectura del sistema, el dashboard en node-red del sistema, código fuente de configuración de los módulos, código de configuración de integración entre las plataformas de software, y otros insumos técnicos para el desarrollo técnico de la mejora.

Figura 45

Diagrama de arquitectura del sistema



Nota: Los lectores y tags pertenecen al nivel de campo. El resto de los elementos tienen como función el procesamiento, envío, integración y sincronización de bases de datos.

Figura 46

Esquemático electrónico para el lector BLE

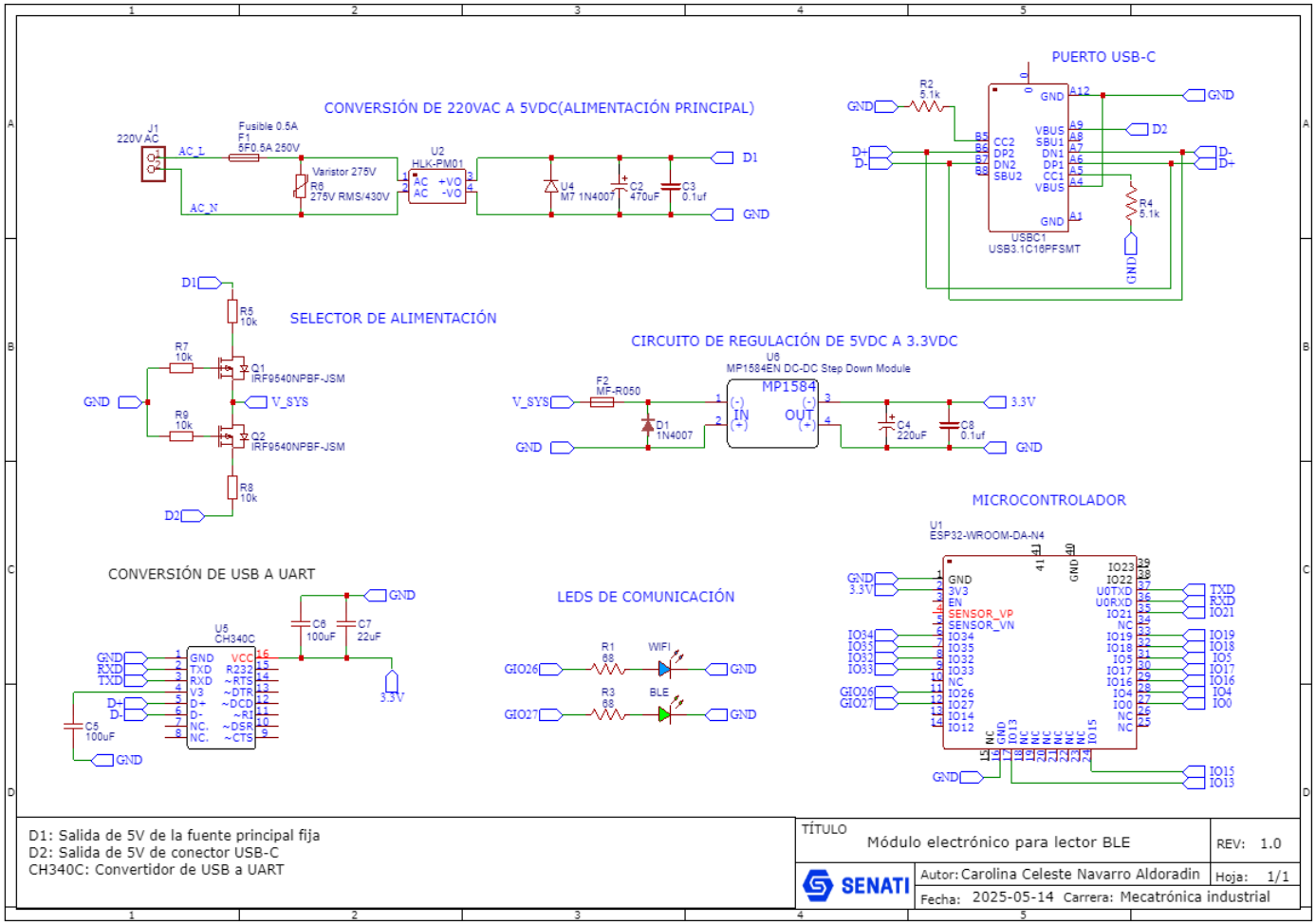


Figura 47

Diseño PCB para lector BLE

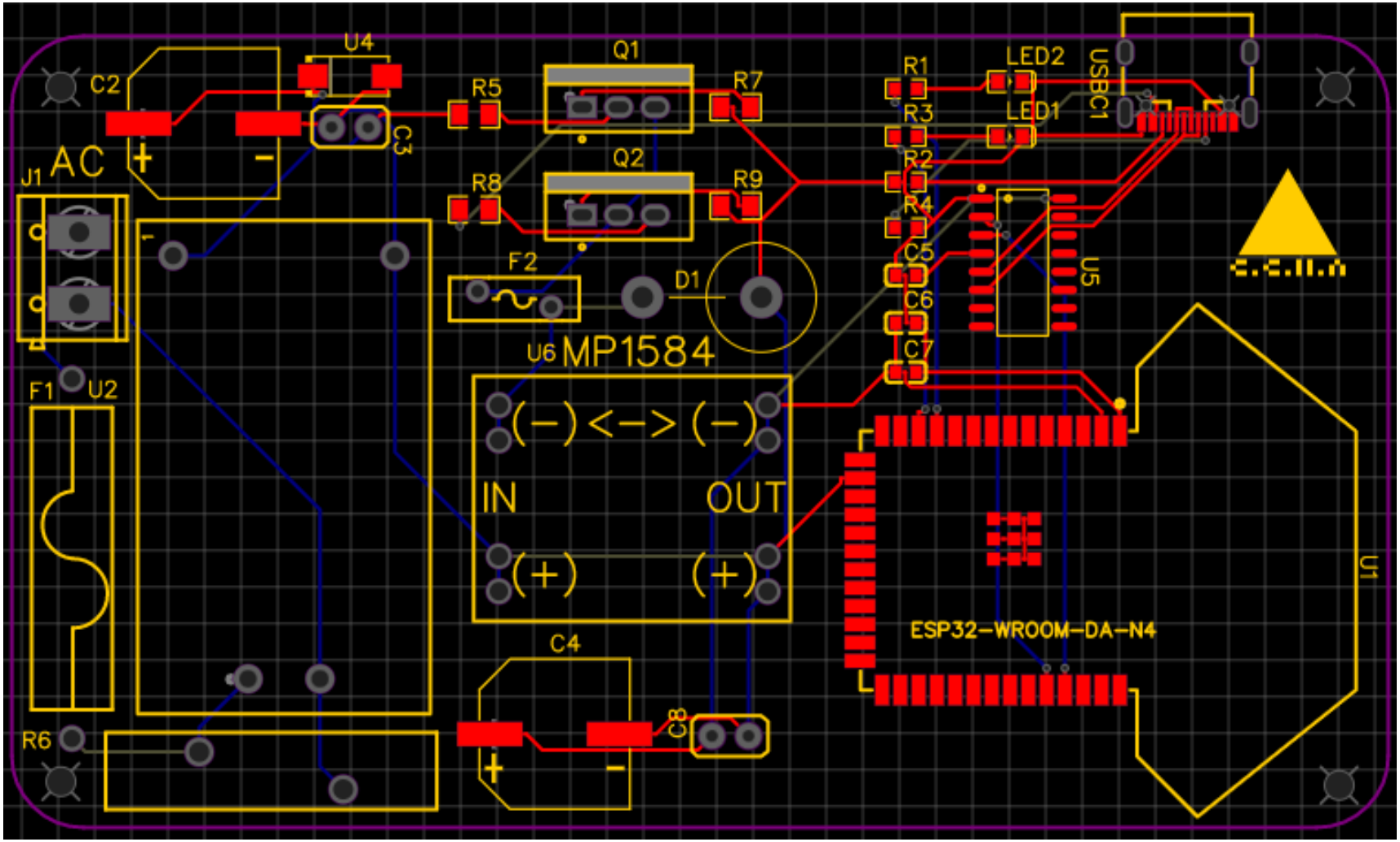


Figura 48

Vista blanco y negro de diseño PCB de lector BLE

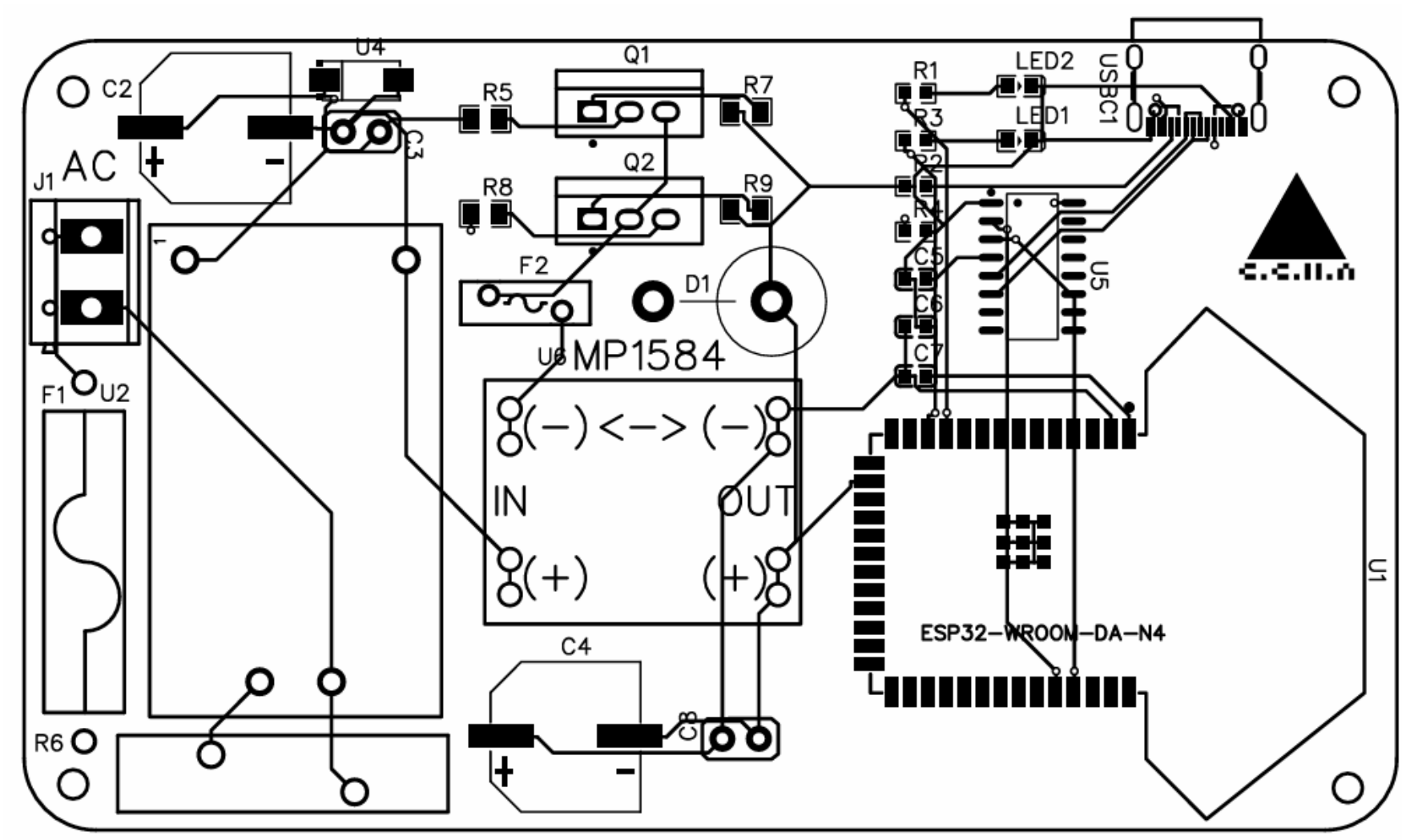


Figura 49

Vista 3D de la placa PCB del lector

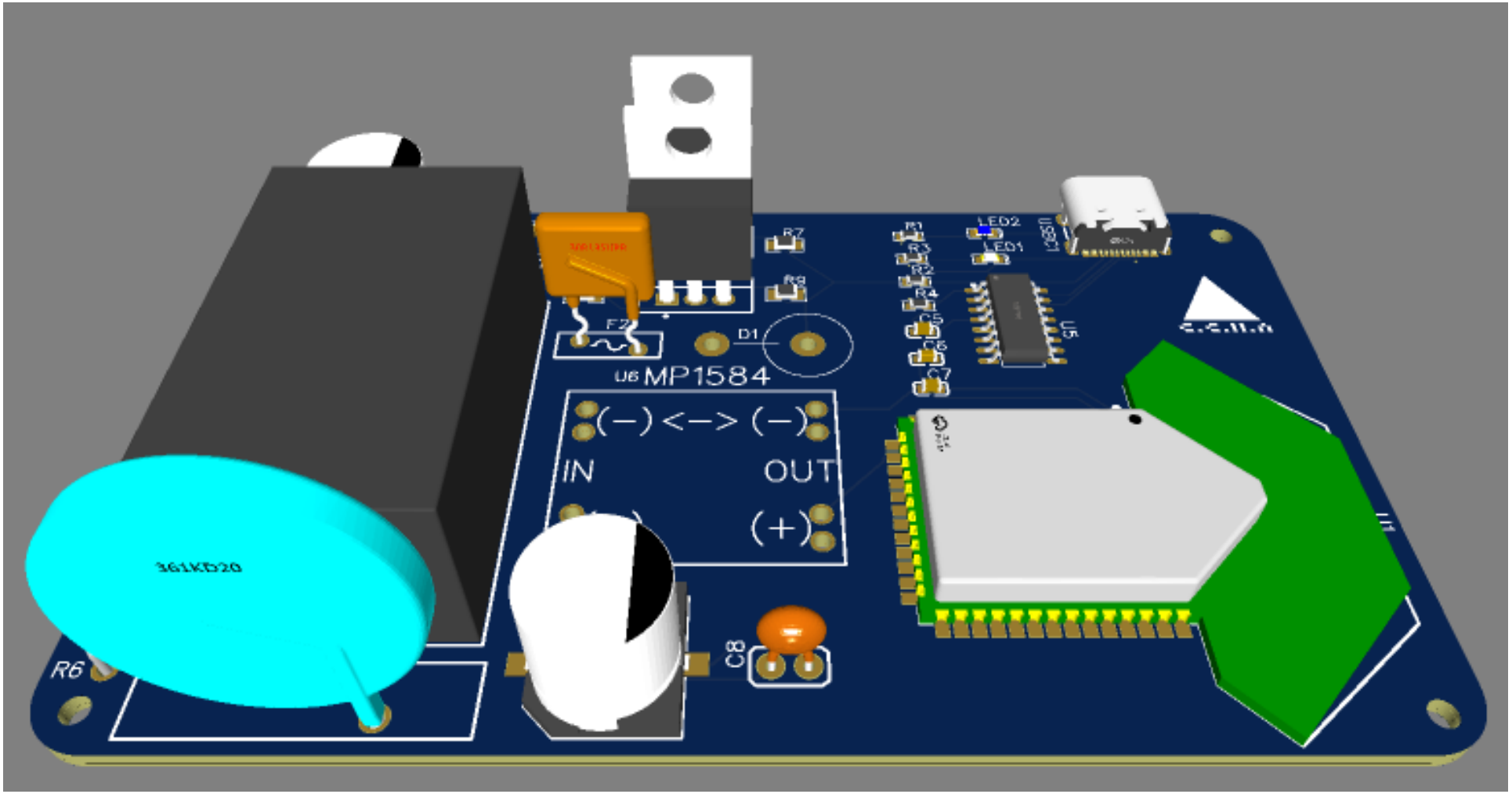


Figura 50

Esquemático electrónico de beicon BLE

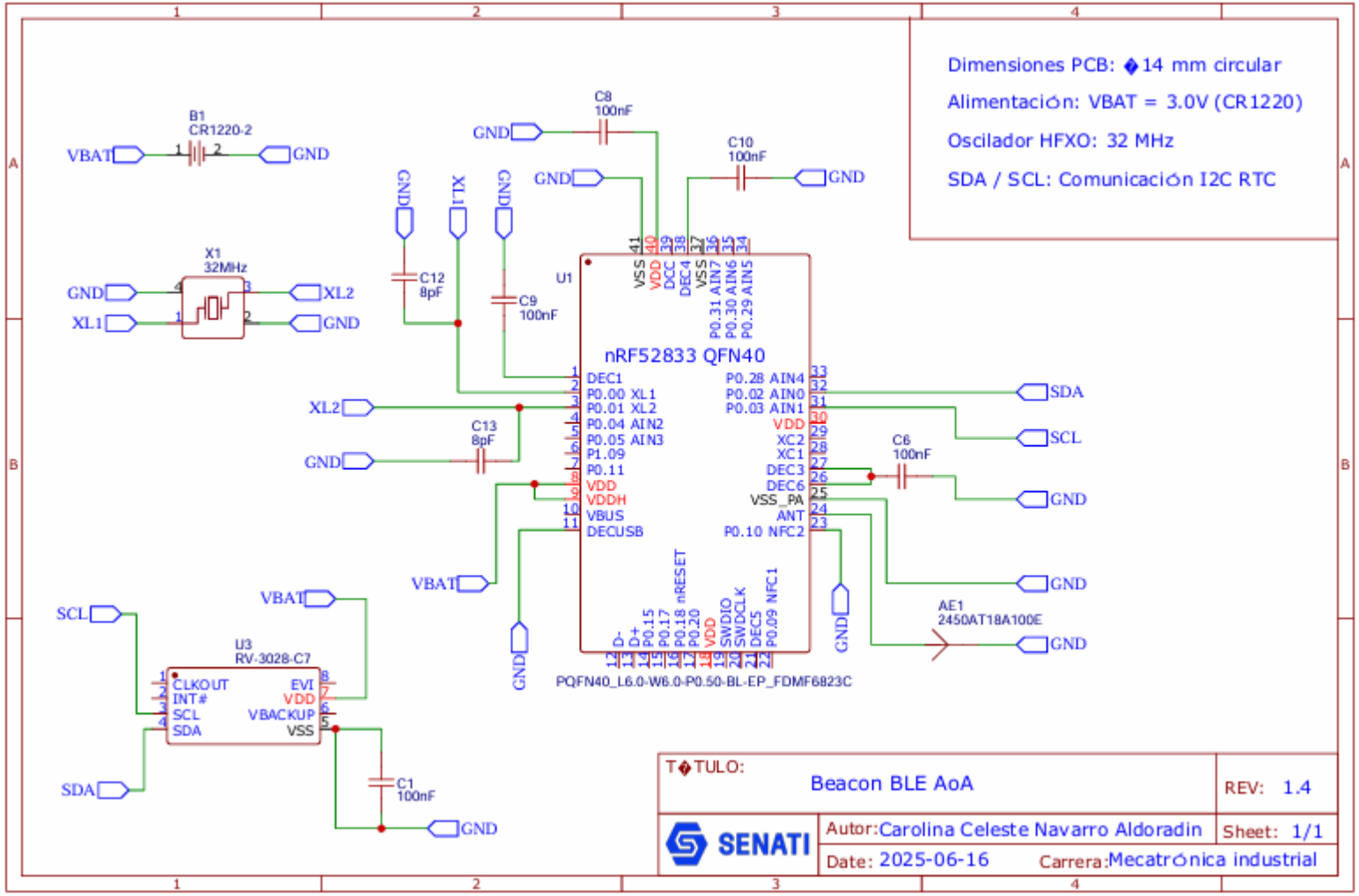


Figura 51
Diseño PCB de beacon BLE

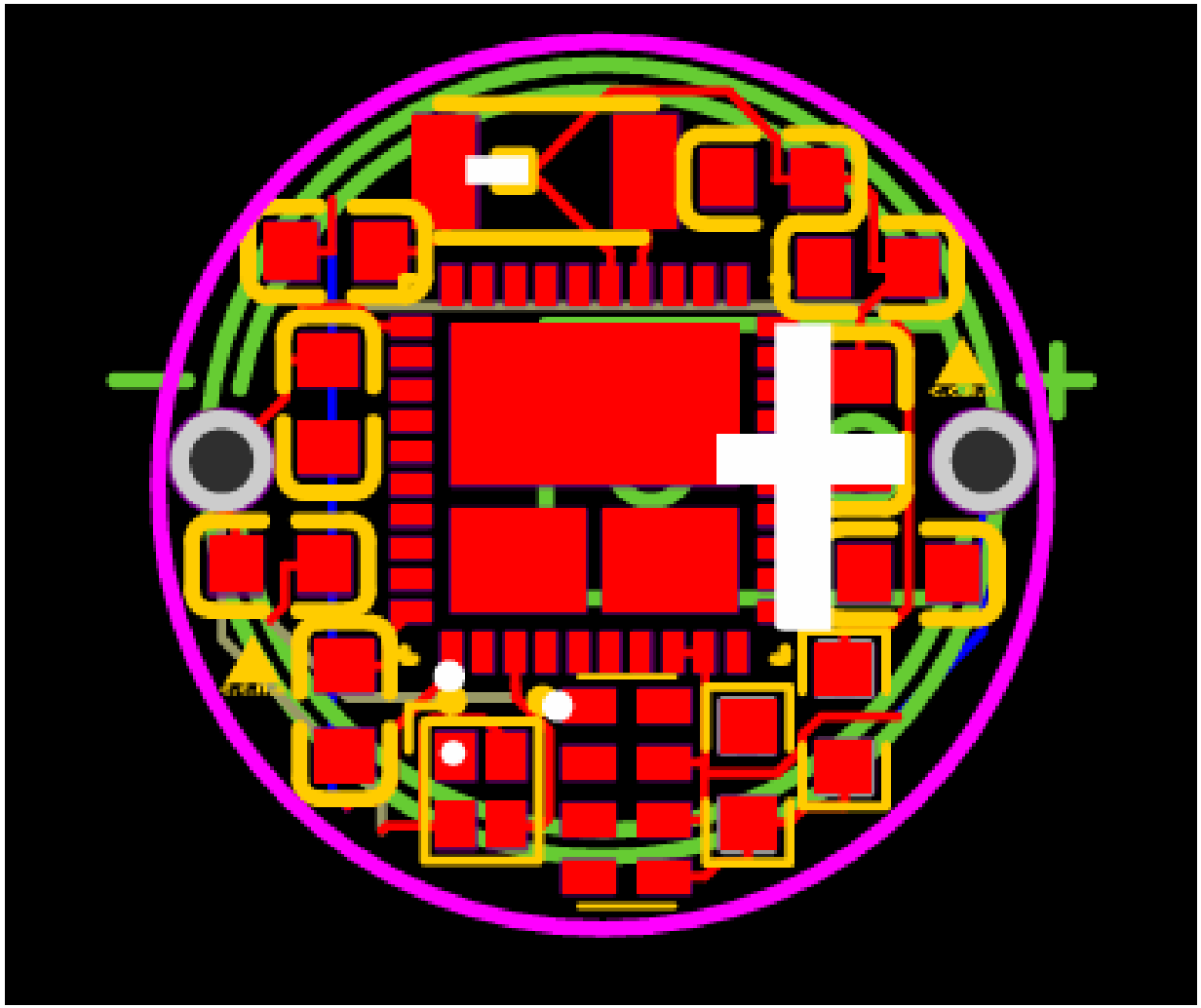
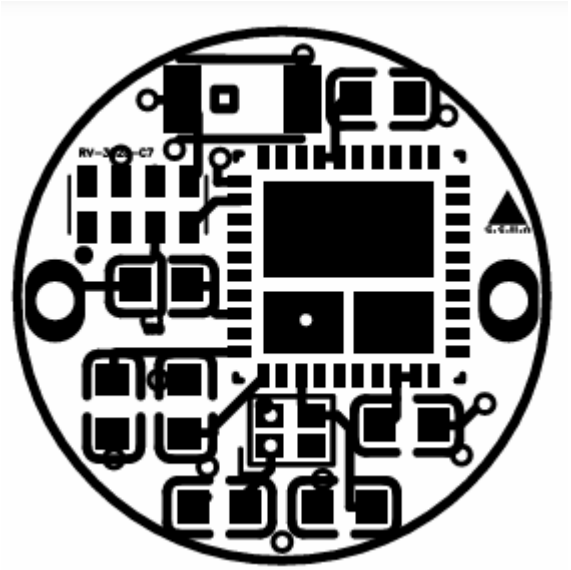
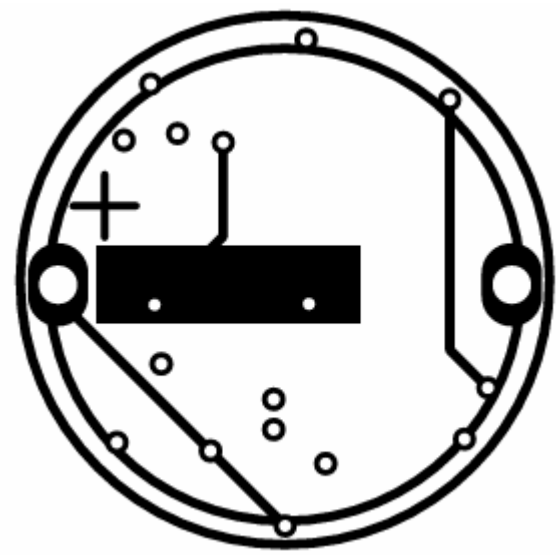


Figura 52
Vista blanco y negro de diseño PCB para beacon BLE





D. Códigos

A continuación, se presenta el flujo general de los códigos donde cada dispositivo tiene una función en el sistema. Por ejemplo, hacemos que el microcontrolador ESP32-WROOM-DA escanee los dispositivos BLE cercanos, filtre solo los permitidos, es decir los que nosotros hemos programado como beacons (los basados en el QFN40 nRF5283), y publica su información en un bróker MQTT. Los códigos completos se ubican en la sección de Anexos.

Figura 53

Flujo de datos

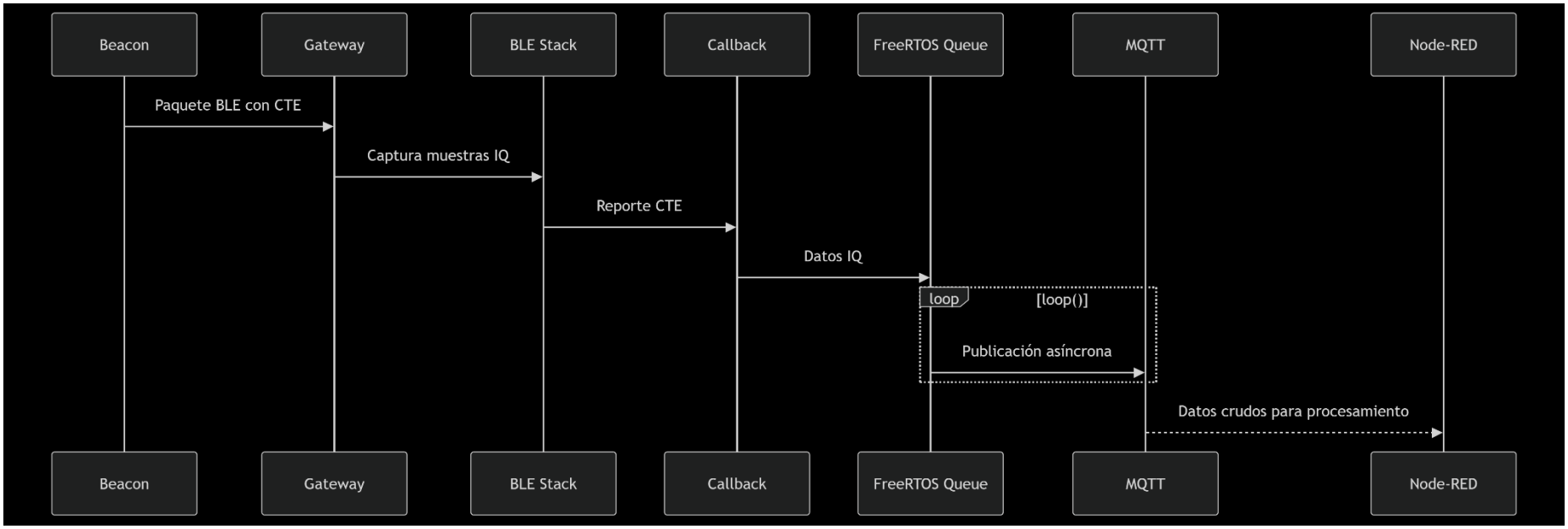


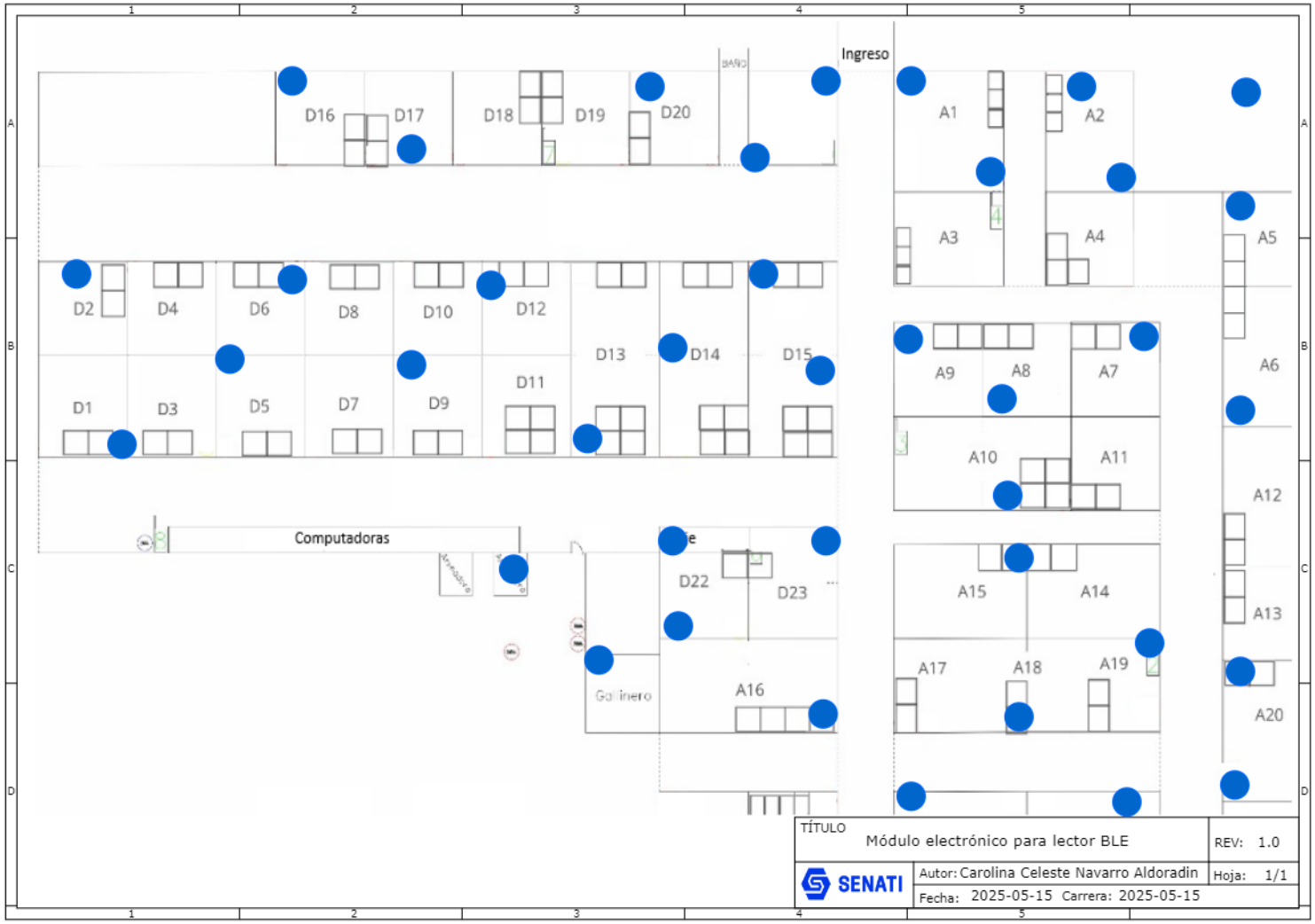
Figura 54

Dashboard de referencia del sistema RTLS para uso del personal técnico y administrativo

E. Distribución de espacios para los nuevos equipos

El sistema de localización de activos cuenta tanto con elementos de hardware como de software. Los elementos de hardware se encontrarán en el nivel de campo, de los cuales, los módulos lectores serán instalados en puntos específicos por toda el área del CRC para su localización según los procesos de calibración correspondientes. A continuación, se presenta un plano de potenciales ubicaciones de los módulos para una correcta lectura de los tags.

Figura 55
Ubicaciones de los lectores



4.2.2. Consideraciones previas

A. **Capacitación del personal.** Se capacitará a los técnicos y personal administrativo para el uso de la herramienta de búsqueda, además de los cuidados con los equipos del sistema.

B. **Implementación de métodos de trabajo.** El proceso que desarrolla el proyecto es de utilizar el dashboard o la hoja de Google sheets como forma de consulta de la ubicación de las herramientas, ayudando en un mejor control y menor tiempo de inventariado, ya que se automatizaría todo ese proceso.

C. **Manual de procedimientos.**

a. Registro:

- Asignar un tag único a cada herramienta
- Registrar el ID del tag y la descripción de la herramienta en la base de datos (Firestore).

Monitoreo en tiempo real

- Ingresar al dashboard de Node-RED desde una PC o dispositivo móvil autorizado.
- Visualizar en el mapa o lista la posición actual de cada herramienta.
- Consultar detalles como: ID del tag, nombre de herramienta, última ubicación detectada y estado (activo/inactivo).

b. Actualización de inventario

- El sistema actualiza automáticamente la base de datos cuando detecta movimientos de herramientas.

- Si se detecta una herramienta fuera de su zona asignada o sin señal durante un tiempo, se genera una alerta en el dashboard.

c. Mantenimiento básico

- Revisar semanalmente el estado de la batería de los tags.
- Verificar que los lectores ESP32 estén operativos y actualizados.

4.2.3. Consideraciones de seguridad

- Acceder al sistema solo mediante usuarios autorizados
- No retirar ni modificar los tags de las herramientas sin actualizar la base de datos.
- No manipular conexiones eléctricas o electrónicas sin la autorización y equipos de protección personal adecuados.

4.2.4. Consideraciones ambientales

Se deben considerar los siguientes puntos en la operación normal de la mejora.

- **Efectos de la Composición Material y Estructural del Entorno**
    - La presencia de superficies metálicas (estructuras, maquinaria) o materiales ferromagnéticos, que distorsionan el campo electromagnético y alteran la fase de la señal recibida.
    - La interferencia por objetos dieléctricos densos (hormigón armado, depósitos de agua o cuerpos humanos), causando dispersión (*scattering*) y atenuación de la señal en la banda de 2.4 GHz.
    - La geometría del espacio (ángulos agudos, pasillos estrechos o techos bajos), que generan reflexiones multicamino (*multipath*) y desvanecimientos rápidos (*fast fading*).

- La movilidad ambiental (personas en tránsito, vehículos o maquinaria operativa), que introduce variaciones dinámicas en la propagación de ondas.

- **Vulnerabilidad a Interferencias Electromagnéticas**
  - La saturación del espectro ISM 2.4 GHz por fuentes coexistentes: redes WiFi (802.11b/g/n), dispositivos Zigbee o hornos microondas, que degradan la integridad de la fase de la señal.
  - La inestabilidad de fase inducida por perturbaciones de origen industrial: motores eléctricos, equipos de soldadura o sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS).
  - Los requisitos de cumplimiento normativo estricto (FCC §15.249, ETSI EN 303 204), que limitan la densidad espectral de emisión y el ancho de banda utilizable.

- **Impacto en la Huella Operacional y Recursos**
  - El consumo energético elevado de los arreglos de antenas y procesadores de señales digitales (DSP) en gateways AoA, comparado con soluciones basadas en RSSI.
  - La complejidad en la gestión de residuos electrónicos derivada de componentes especializados: sustratos de PCBs multicapa, circuitos de RF y antenas de precisión.
  - La dependencia de condiciones climáticas en despliegues semi-exteriores: humedad alta (>80%) o temperaturas extremas (<0°C o >40°C) afectan la estabilidad de osciladores y antenas.

- La disponibilidad de espacio físico para instalación de arreglos de antenas, que requieren áreas despejadas y orientación específica para evitar obstrucciones.

4.3.Recursos técnicos para implementar la mejora propuesta

4.3.1. Materiales

A continuación, se detallan los materiales utilizados para el desarrollo del presente proyecto de mejora.

Tabla 16

Materiales para un beacon

Nombre	Código/Número de parte	Material	Fabricante	Unidad	Cantidad
ANT 2450AT18A100E	C89334		JOHANSON	pz	1
CR1220-2 Batería	C70381		Q&J	pz	1
Capacitor 100nF				pz	6
Capacitor 8pF				pz	2
Resistor 4.7kΩ	C99782		YAGEO(?)	pz	2

PQFN40 LGA Chip (NO)				pz	1
RV-3028-C7 RTC	C2829066			pz	1
Cristal 32MHz	C1986486		NDK	pz	1
Impresión PCB		Material PCB		pz	1
Molde herramienta aluminio		Aluminio		pz	1
Carcasa + tapa externa		ABS / PC blend		pz	1
Junta silicona		Silicona industrial		pz	1
Tornillos inoxidables fijación mecánica		Acero inoxidable		pz	1
Conformal coating protección		Silicona (ej. Dow)		pz	1

Tabla 17

Materiales para Gateway

Nombre	Código/Número de parte	Material	Fabricante	Unidad	Cantidad
Capacitor 470uF	C3445244		KNSCHA	pz	1
Capacitor 220uF	C3445244		KNSCHA	pz	1
Capacitor 0.1uF				pz	2
Capacitor 100uF				pz	2
Capacitor 22uF				pz	1
Diodo 1N4007				pz	1
Fusible 5F0.5A 250V	C140507		xcfuse	pz	1
Fusible MF-R050	C208476		BOURNS	pz	1
Terminal AC 220V				pz	1

LED verde BLE	C72043	EVERLIGHT	pz	1
LED azul WIFI	C72041	EVERLIGHT	pz	1
Transistor IRF9540NPBF-JSM	C18187958	JSMSEMI	pz	2
Resistor 68 Ω			pz	2
Resistor 5.1k Ω			pz	2
Resistor 10k Ω	C9900012715	null	pz	4
Varistor 275V RMS / 430V	C233149	RUILON	pz	1
ESP32-WROOM-DA-N4	C5689095	ESPRESSIF	pz	1
HLK-PM01 Power Module	C209903	HI-LINK	pz	1
Diodo M7 1N4007	C5337558	JUXING	pz	1
CH340C USB-UART	C84681	WCH	pz	1

MP1584EN DC-DC Step Down Module	MP1584EN		eBoot	pz	1
USB-C Conector	C167321		Genérico	pz	1
Impresión PCB		Material PCB	LCSC	pz	1
Caja ABS comercial		ABS / PC blend	Genérico	pz	1
Junta de silicona		Silicona industrial	Genérico	pz	1
Tornillos acero inoxidable		Acero inoxidable	Genérico	pz	1

4.3.2. Mano de obra

La mano de obra incluirá personal cualificado para el trabajo, y con los requerimientos de seguridad necesarios, como EEPs, procedimientos específicos e inducción de las medidas de seguridad del área de trabajo.

Tabla 18

Mano de obra involucrada en la implementación

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TIEMPO (H)
1	Técnico mecatrónico	1	80
2	Monitor de planta	1	10

Nota: Las horas del técnico mecatrónico incluyen instalación de los elementos del sistema, pruebas y ajuste del algoritmo de localización, integración con Big Query y pruebas de comunicación, diseño e implementación del dashboard en Node-RED y correcciones.

4.3.3. Máquinas, instrumentos, herramientas y equipos

En la presente sección se especifican las herramientas e instrumentos a utilizar en el proyecto.

N°	Descripción	Marca	Cantidad
1	Multímetro digital	Fluke	1
2	Laptop	HP	1

4.3.4. Otros recursos

A continuación, se describen otros recursos necesarios para la implementación de la mejora, como los programas para el diseño y la programación.

Tabla 19

Lista de programas usados en el diseño y la implementación de la mejora

ITEM	DESCRIPCIÓN	DETALLE	CANTIDAD	TIEMPO
1	Inventor	Diseño	1	2 días
2	EasyEDA	Conexión y diseño	1	3 día
3	Arduino IDE	Programación	1	3 días

4	Visual Studio 2022	Programación	1	5 días
5	Node-RED	Programación y diseño	1	5 días
6	Google App Script	Programación	1	1 día
7	Nordic SDK	Programación	1	3 días
8	BigQuery	Programación	1	1 día

4.4.Mapa de flujo de valor de la situación mejorada o diagrama de proceso mejorado

A continuación, se muestra el resultado del análisis que se realizó en base al proceso de inventariado y búsqueda de herramientas con el DAP, para hacer una comparación más precisa de los beneficios de la mejora/innovación.

Figura 56

DAP del proceso mejorado de inventariado de herramientas

DIAGRAMA DE ANÁLISIS DEL PROCESO DE INVENTARIADO Y BÚSQUEDA DE HERRAMIENTAS MEJORADO (DAP)								
EMPRESA:			FERREYROS S.A.					
DEPARTAMENTO / ÁREA:			GERENCIA DE SOPORTE AL PRODUCTO					
SECCIÓN:			CENTRO DE REPARACIÓN DE COMPONENTES (CRC)					
ACTIVIDAD	Método Actual	Método Mejorado	Diferencia	OBSERVADOR:	CAROLINA CELESTE NAVARRO ALDORADIN			
Operación	6	3	3	FECHA:	24/04/2025			
Inspección	3	0	3	MÉTODO	ACTUAL			
Transporte	3	2	1		MEJORADO			X
Demora	4	2	2	TIPO:	OPERARIO			
Almacenaje	1	1	0		MATERIAL			
Tiempo	**2192.0**	385	1807		MÁQUINA			X
N°	DESCRIPCIÓN					Distancia	Tiempo	Observaciones
1	Filtrado de base anterior						3.0	
2	Impresión de listas en físico						0.0	Todo el proceso de verificación es digital.
3	Traslado entre bahías					0	0.0	No se necesitaría buscar la herramienta bahía por bahía porque se

4	Inspección individual de herramientas							0.0	sabría su ubicación exacta.
5	Revisión del código SAP de la herramienta en listas impresas							0.0	No se necesitaría buscar la herramienta bahía por bahía porque se sabría su ubicación exacta.
6	Escritura de ubicación							0.0	La ubicación ya sería mostrada en el software
7	Consulta a técnico							140	
8	Dejar en bahía							50	
9	Poner herramientas en carrito							50	
10	Traslado a mantenimiento						100	5	
11	Verificación y escritura de lista de herramientas que se mandan a mantenimiento							0	Al perderse la señal BLE, se genera una lista en la que se elige los elementos que se enviarán a mantenimiento.
12	Mantenimiento correctivo o preventivo de herramienta							-	Depende de los tiempos de mantenimiento, no del CRC
13	Poner herramientas en carrito						20	15	
14	Traslado de mantenimiento a CRC							10	
15	Devolución de herramienta a técnico							100	
16	Ordenar herramientas en las husky							15	

4.5. Cronograma de ejecución de la mejora

A continuación, se presenta el cronograma de ejecución de la mejora, el cual servirá como guía para la selección de entregables y expectativas de resultados del proyecto a lo largo del tiempo.

Figura 57

Cronograma de ejecución de la mejora

Actividades	Tiempo (días)	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
1. Diseño detallado del RTLS	1	■									
2. Configuración Beacons nRF52833	1		■								
3. Configuración Gateways ESP32 DA N4	1			■							
4. Desarrollo Flujos Node-RED	1				■						

5. Config. Google Sheets y Apps Script	0.5					■					
6. Configuración BigQuery	1						■				
7. Algoritmo Trilateración Node-RED	1							■			
8. Dashboard Node-RED	0.5								■		
9. Pruebas de campo integrales	1.5									■	■
10. Documentación y capacitación	1										■

Comentario: El cronograma representa las actividades programadas para el desarrollo del proyecto.

4.6. Aspectos limitantes de la implementación de la mejora

4.6.1. Restricciones inherentes a la tecnología BLE AoA

La precisión angular del sistema depende críticamente de condiciones ambientales estables, donde la presencia de superficies metálicas, obstrucciones dinámicas (como personal en movimiento) o interferencias electromagnéticas en la banda de 2.4 GHz pueden degradar la exactitud de las mediciones. La complejidad del hardware requerido (arreglos de antenas calibradas, osciladores de alta estabilidad) incrementa significativamente los costos de despliegue masivo y limita la escalabilidad en entornos industriales extensos. Adicionalmente, la distancia efectiva de operación para garantizar precisión submétrica suele restringirse a ≤15 metros, imponiendo una densidad mínima de gateways por área.

4.6.2. Vulnerabilidades en la capa de comunicación MQTT

La dependencia del protocolo MQTT introduce limitaciones asociadas a la calidad del servicio de red: fluctuaciones de latencia (>100 ms) en redes WiFi industriales congestionadas pueden provocar desincronización en los datos de posición transmitidos. La ausencia de mecanismos nativos de priorización de mensajes dificulta el manejo eficiente de eventos críticos (como alertas de geofencing), especialmente cuando el broker gestiona múltiples tópicos simultáneamente. Además, la seguridad end-to-end depende exclusivamente de implementaciones TLS externas, añadiendo overhead computacional en dispositivos de borde con recursos limitados (como ESP32).

CAPÍTULO V

COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN DE LA MEJORA

5.1. Costo de materiales

Para la implementación del sistema de localización en tiempo real (RTLS) con uso de tecnología Bluetooth Low Energy (BLE), se requieren lectores y beacons, los cuales servirán para recibir y enviar las señales BLE respectivamente. Tanto los lectores como los beacons son de diseño personalizado, tanto a nivel electrónico como de protección externa. Los costos se calcularon en base a 52 lectores y 2000 beacons. Dada la extensión de los materiales para todo el sistema, se dividieron en dos tables, una para los materiales de los beacon y otra para los materiales de los lectores. Estos incluyen tanto la parte electrónica como de protección.

Tabla 20

Costos de materiales para un beacon

Nombre	Código/Número de parte	Material	Fabricante	Unidad	Precio Unitario (S/.)	Cantidad	Precio Total (S/.)
ANT 2450AT18A100E	C89334		JOHANSON	pz	0.1	1	0.1
CR1220-2 Batería	C70381		Q&J	pz	0.05	1	0.05
Capacitor 100nF				pz	0.0007	6	0.0042
Capacitor 8pF				pz	0.05	2	0.1
Resistor 4.7kΩ	C99782		YAGEO(?)	pz	0.001	2	0.002

PQFN40 LGA Chip (NO)				pz	7.13	1	7.13
RV-3028-C7 RTC	C2829066			pz	0.6	1	0.6
Cristal 32MHz	C1986486		NDK	pz	0.214	1	0.214
Impresión PCB		Material PCB		pz	0.9	1	0.9
Molde herramienta aluminio		Aluminio		pz	2.63	1	2.63
Carcasa + tapa externa		ABS / PC blend		pz	1.7	1	1.7
Junta silicona		Silicona industrial		pz	0.28	1	0.28

Tornillos inox fijación mecánica	Acero inoxidable	pz	0.21	1	0.21
Conformal coating protección	Silicona (ej. Dow)	pz	0.35	1	0.35

Tabla 21

Costos de materiales para un lector/gateway

Nombre	Código/Número de parte	Material	Fabricante	Unidad	Precio Unitario (S/.)	Cantidad	Precio Total (S/.)
Capacitor 470uF	C3445244		KNSCHA	pz	0.3	1	0.3
Capacitor 220uF	C3445244		KNSCHA	pz	0.2	1	0.2

Capacitor 0.1uF			pz	0.2	2	0.4
Capacitor 100uF			pz	0.2	2	0.4
Capacitor 22uF			pz	0.2	1	0.2
Diodo 1N4007			pz	0.2	1	0.2
Fusible 5F0.5A 250V	C140507	xcfuse	pz	0.3	1	0.3
Fusible MF-R050	C208476	BOURNS	pz	0.4	1	0.4
Terminal AC 220V			pz	0.7	1	0.7

LED verde BLE	C72043	EVERLIGHT	pz	0.3	1	0.3
LED azul WIFI	C72041	EVERLIGHT	pz	0.3	1	0.3
Transistor IRF9540NPBF-JSM	C18187958	JSMSEMI	pz	1.8	2	3.6
Resistor 68 Ω			pz	0.3	2	0.6
Resistor 5.1k Ω			pz	0.5	2	1
Resistor 10k Ω	C9900012715	null	pz	0.5	4	2
Varistor 275V RMS / 430V	C233149	RUILON	pz	0.9	1	0.9

ESP32-WROOM-DA-N4	C5689095		ESPRESSIF	pz	11.2	1	9.2
HLK-PM01 Power Module	C209903		HI-LINK	pz	6	1	6
Diodo M7 1N4007	C5337558		JUXING	pz	0.2	1	0.2
CH340C USB-UART	C84681		WCH	pz	3.8	1	3.8
MP1584EN DC-DC Step Down Module	MP1584EN		eBoot	pz	4.2	1	4.2
USB-C Conector	C167321		Genérico	pz	1.8	1	1.8
Impresión PCB		Material PCB	LCSC	pz	0.9	1	0.9

Caja ABS comercial	ABS / PC blend	Genérico	pz	5.5	1	5.5
Junta de silicona	Silicona industrial	Genérico	pz	0.8	1	0.8
Tornillos acero inoxidable	Acero inoxidable	Genérico	pz	0.3	1	0.3

Tabla 22

Costos total de materiales

Componente	Cantidad	Costo de fabricación unitario	Costo total
Beacon	2000	14.2702	28540.4
Gateway	52	44.5	2314
		TOTAL	30,854.4

Nota. Precios en soles.

5.2.Costo de mano de obra

En esta sección, se considera un estimado de horas invertidas:

Tabla 23

Costo de mano de obra de la mejora

N°	Descripción	Cantidad	Tiempo (H)	Costo por hora	Total
1	Técnico mecatrónico	1	80	S/ 10.00	S/ 800.00
2	Monitor de planta	1	10	S/ 25.00	S/ 250.00
				TOTAL	S/. 1050

Nota: La mano de obra se enfocará directamente en la implementación ya que el diseño de los planos fue realizado en la presente entrega.

5.3.Costo de máquinas, herramientas y equipos

Tabla 24

Costo de máquinas, herramientas y equipos

N°	Descripción	Marca	Cantidad	Costo Unitario	Total
1	Multímetro digital	Fluke	1	S/ 30.00	S/ 30.00
2	Laptop	HP	1	S/ 25.00	S/ 25.00
				SUMA TOTAL	S/ 55.00

Nota: Se muestra el costo total de las herramientas e instrumentos que se requiere para implementar la mejora. Se les dio en su totalidad un monto reducido ya que se está considerando como alquiler debido a que la empresa ya cuenta con estas.

5.4. Otros costos de implementación

A continuación, se detallan otros costos asociados a la implementación del sistema, incluyendo los gastos relacionados con el uso de software, conectividad y consumo eléctrico, los cuales son fundamentales para el funcionamiento continuo de la mejora.

Tabla 25

Programas utilizados

N°	Descripción	Cantidad	Costo unitario	Total
1	Autodesk Inventor	1	Gratis	S/. 0
2	EasyEDA	1	Gratis	S/. 0
3	Canva	1	Gratis	S/. 0
4	Google Sheets	1	Gratis	S/. 0
5	Draw.io	1	Gratis	S/. 0
6	VSCode	1	Gratis	S/. 0
7	Node Red	1	Gratis	S/. 0
8	Mosquitto	1	Gratis	S/. 0
9	Google BigQuery	1	Gratis	S/. 0
10	Nordic SDK	1	Gratis	S/. 0

Nota: Se incluyen los programas de diseño, programación, almacenamiento, visualización y otros rubros que la mejora utiliza o con la que fue diseñada.

Tabla 26

Otros costos de implementación

N°	Descripción	Cantidad	Costo unitario	Total
1	Consumo de Electricidad	35 kWh	S/ 0.60	S/ 21.00
2	Consumo de Wifi	100GB	S/ 150.00	S/ 150.00
			TOTAL	S/. 171.00

Nota: Los costos fueron asignados de acuerdo con el precio de los servicios en el mercado. Sin embargo, la empresa ya cuenta con estos.

5.5.Costo total de la implementación de la Mejora

Tabla 27

Costo total de la mejora

Rubro	Costo Total (S/)
Materiales	S/ 30854.40
Mano de obra	S/ 1050.00
Equipos, instrumentos y herramientas	S/ 55.00
Software	S/ 0.00
Otros costos	S/ 171.00
SUMA TOTAL	**S/ 32130.4**

CAPÍTULO VI
EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA MEJORA

6.1 Análisis cuantitativo

En la presente sección, se realizarán los cálculos necesarios para evaluar la viabilidad del proyecto, para ello se dará alusión a las principales causas del problema, las cuales fueron analizadas en la sección 3.5. del presente documento. Luego se presentarán indicadores con los que se medirán y se incluirán datos cuantitativos de la empresa que nos sirvan para la medición correcta del costo actual (en términos tanto de mano de obra, pérdidas económicas, y otros factores) del problema.

Tabla 28

Causas principales del problema

Número de prioridad	**Denominación de causa**	**Descripción**
Causa 01	C6	Dependencia total de hojas de cálculo y registro manual
Causa 02	C10	El inventario no se actualiza en tiempo real, lo que impide identificar discrepancias a tiempo.
Causa 03	C2	Inventariado manual y esporádico.

Conforme al análisis realizado en la sección 3.5. del presente documento, se puede rescatar nuevamente, que los principales indicadores a medir son, por un lado, la mano de obra utilizada en el proceso de inventariado, ya que se trata de un procedimiento que se

realiza de manera manual, sin personal especializado en estas herramientas, y, además, por la naturaleza del trabajo repetitivo con una gran cantidad de herramientas, propenso a errores. Por otro lado, como resultado de la pérdida de herramientas, se producen costos adicionales por la necesidad de las herramientas de ser reemplazadas.

A continuación, se presenta una comparación a nivel de tiempo entre el proceso actual y una proyección del proceso con la mejora implementada.

Tabla 29

Diagrama de análisis de proceso de inventario

DAP ACTUAL	DAP MEJORADO	DIFERENCIA
2192	385	1807

Nota: Se tomaron los datos de los diagramas de análisis de proceso actual de la sección 3.1 y mejorado de la sección 4.4. Los valores se encuentran en minutos.

A partir de la Tabla 21, se puede concluir que, de no implementarse la mejora, se estarían perdiendo 1807 minutos (alrededor de 30 horas), en cada inventario. Este tiempo debe ser multiplicado por la frecuencia anual, es decir, la cantidad de veces que este proceso se repite al año.

Tabla 30

Tiempo perdido en el proceso de inventariado

DIFERENCIA	FRECUENCIA	TOTAL
1807	6	10842

Por consiguiente, para finalizar con el proceso de análisis del costo de mano de obra es necesario realizar cálculos con los sueldos del personal involucrado. Este proceso

suele ser realizado tanto por técnicos como por practicantes según designación del personal administrativo o el monitor de planta con permiso de los supervisores de área.

A continuación, se presenta una tabla con este análisis, hasta calcular el costo total por minuto en el proceso de inventario.

Tabla 31

Costo temporal del proceso de inventariado de herramientas

PERSONAL	SUELDO	POR DÍA	POR HORA	POR MINUTO
Técnico	S/. 2500	S/. 83.33	S/. 10.42	S/. 0.17
Técnico	S/. 2500	S/. 83.33	S/. 10.42	S/. 0.17
Practicante	S/. 1200	S/. 40.00	S/. 5.00	S/. 0.08
Practicante	S/. 1200	S/. 40.00	S/. 5.00	S/. 0.08
PÉRDIDAS POR INTERVALO		**S/. 246.67**	**S/. 30.83**	**S/. 0.51**

Nota: Los sueldos se abonan a los técnicos tanto cada "quincena" como cada fin de mes. Sin embargo, se está teniendo en cuenta el sueldo promedio de un técnico mecánico del CRC con menos de 2 años en el área.

En la tabla 23 se puede observar que se pierden S/. 0.51 por cada minuto que se realiza el inventario, esto multiplicado por los minutos que toma el inventario anualmente nos resultará en el monto que se pierde anualmente en mano de obra como consecuencia del proceso.

Tabla 32

Costo de mano de obra por proceso de inventariado anualmente

MINUTOS	MONTO POR MINUTO	MONTO TOTAL
10842	S/. 0.51	S/ 5,571.58

A continuación, se realizará un análisis de costos de herramientas, el cual tuvo como insumos la cantidad de herramientas no ubicadas en el penúltimo inventario de 2024. Para ello, se realizó un análisis de las herramientas no ubicadas, entre ellas manómetros, relojes comparadores, grilletes y otros. Se promediaron los precios de herramientas de calidad industrial como las que se compran en la empresa, y finalmente, se dividió en la antigüedad de la lista de herramientas a buscar.

Tabla 33

Análisis de costos de herramientas

Precio promedio	Cantidad de herramientas no ubicadas	Monto total	Años	Pérdidas por año
S/ 1,407.41	166	S/ 233,630.06	5	S/ 46,726.01

Nota: Resultado de procesamiento de data de penúltimo inventario del 2024 en la que se realizó la búsqueda de herramientas no ubicadas en el anterior inventario en el área de armado de motores.

A partir de los dos análisis anteriores, podemos concluir el monto final de pérdidas anuales por el proceso lento de inventariado y sus consecuencias posteriores medibles cuantitativamente.

Tabla 34

Resumen de pérdidas totales

Mano de obra	Costos de herramientas	Pérdidas totales
S/ 5,571.58	S/ 46,726.01	S/ 52,297.60

Nota: Montos calculados por año.

Tabla 35

Pérdida anual

	Tipo de análisis	Anual
Análisis N°1	Mano de obra	S/ 5,571.58
Análisis N°2	Costo de herramientas	S/ 46,726.01
	Suma Total	**S/ 52,297.60**

Nota: Resumen de los análisis anteriores

Tabla 36

Inversión anual de la mejora

Descripción	Costo Anual
Costo de materiales	S/ 30,854.40
Costo de mano de obra	S/ 1,050.00
Costo de instrumentos y herramientas	S/ 55.00
Otros costos	S/ 171.00
Costo total de inversión	**S/ 32,130.40**

Nota: Montos iniciales de inversión. Estos montos no se repiten anualmente, ya que la mejora solo requeriría mantenimiento.

Tabla 37

Pérdidas y ahorro según mejora

Pérdidas Anuales	**S/ 52,297.60**
Pérdidas después de la mejora	**S/ 0.00**
Total de ahorro	**S/ 52,297.60**

6.2 Relación Beneficio/Costo

A continuación, con los montos presentados en la sección anterior, se realizarán los cálculos de índice de beneficio/costo de la mejora y el tiempo de recuperación.

Ecuación 13

Beneficio/Costo

$$\frac{Beneficio}{Costo\ de\ Inversión} = \frac{52297.6}{32130.40} = 1.627$$

Ecuación 14

Relación Costo Beneficio

$$\frac{Costo\ de\ inversión}{Beneficio} = \frac{32130.40}{52297.6} = 0.614$$

Ecuación 15

Tiempo de recuperación de inversión en meses

$$0.614 * 12\ meses = 7.368\ meses$$

Ecuación 16

Conversión de mes incompleto a días

$$(7.368 - 7) * 30\ días = \ 11\ días$$

Dados los anteriores cálculos y análisis, la inversión está destinada a ser recuperada en un periodo de 7 meses y 18 días.

CAPÍTULO VII
CONCLUSIONES

7.1 Conclusiones respecto a los objetivos del Proyecto de Innovación y/o Mejora

El desarrollo e implementación del sistema de localización de activos en tiempo real permitió alcanzar satisfactoriamente los objetivos planteados al inicio del proyecto, resolviendo de manera integral las principales problemáticas relacionadas con la gestión de herramientas en la empresa Ferreyros.

En primer lugar, se cumplió el objetivo de establecer un mecanismo de localización en tiempo real, logrando que la ubicación de las herramientas pueda ser consultada de forma continua y automatizada. Esto permitió reemplazar los inventarios esporádicos y manuales, brindando una trazabilidad constante que reduce la incertidumbre y las discrepancias en las bases de datos.

Asimismo, se logró optimizar la integración de datos entre el área de mantenimiento y el Centro de Reparación de Componentes (CRC), consolidando la información en una única fuente de consulta. Esta mejora redujo significativamente los errores humanos derivados del cruce de múltiples bases de datos, facilitando la toma de decisiones operativas con información precisa y en tiempo real.

En relación con la eficiencia del proceso, se superó el objetivo de reducir en al menos un 75% el tiempo total del inventario, pasando de 2192 minutos a solo 385 minutos por ciclo, lo que representa una reducción del 82%. Esta mejora refleja un cambio sustancial en la productividad del personal encargado de la gestión logística, liberando recursos para tareas de mayor valor añadido.

Finalmente, se implementó con éxito un sistema de alarmas para el control de herramientas vencidas en uso, el cual permite identificar automáticamente aquellas que han superado su periodo de vida útil o requieren mantenimiento preventivo. Este sistema mejora la seguridad operativa y garantiza la disponibilidad de herramientas en óptimas condiciones.

En conjunto, los resultados del proyecto confirman que cada uno de los objetivos ha sido alcanzado de manera medible y sostenible, contribuyendo a una gestión moderna, eficiente y automatizada de los activos en la empresa.

CAPÍTULO VIII
RECOMENDACIONES

8.1 Recomendaciones para la empresa respecto del Proyecto de Innovación y Mejora

Con base en los hallazgos, resultados y conclusiones obtenidas a lo largo del desarrollo del presente proyecto de innovación y mejora, se plantean las siguientes recomendaciones con el fin de asegurar la sostenibilidad, escalabilidad e impacto efectivo de la solución implementada:

- **Mejorar la precisión del posicionamiento mediante técnicas híbridas:**
  Se recomienda complementar el posicionamiento basado en RSSI con otros métodos como filtros de Kalman, fingerprinting o incluso sensores inerciales, con el fin de reducir el margen de error en la estimación de coordenadas. Esto es especialmente importante en espacios con muchas superficies metálicas o barreras físicas.
- **Asegurar la capacitación del personal involucrado:**
  Es fundamental brindar talleres o capacitaciones al personal técnico y operativo que interactuará con el sistema, tanto en el uso del dashboard como en la manipulación de los dispositivos. La apropiación de la tecnología por parte del equipo es clave para su correcta implementación y mantenimiento.
- **Establecer un plan de mantenimiento y reposición de dispositivos:**
  Dado que los dispositivos utilizados funcionan con baterías y están sujetos a desgaste, se recomienda definir un cronograma de revisión y reemplazo periódico, así como mantener un stock mínimo de ESP32 o balizas en caso de fallas o pérdidas.

- **Considerar la escalabilidad modular del sistema:**

  En caso de que se decida extender la solución a otras áreas o sedes, es importante asegurar que el diseño del sistema permita una expansión modular, es decir, que puedan añadirse nuevos lectores, zonas o herramientas sin tener que rediseñar la arquitectura completa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

accent systems. (s.f.). *8 cosas que deberías saber sobre los beacons*. Obtenido de accent systems Web site: https://accent-systems.com/es/8-cosas-que-deberias-saber-sobre-los-beacons/#:~:text=Un%20beacon%20es%20un%20dispositivo,pasen%20a%20una%20distancia%20corta.

Acharya, R. (2017). Satellite Signal Propagation, Impairments and Mitigation. En R. Acharya, A. Press, & A. Rajat (Edits.), *Satellite Signal Propagation, Impairments and Mitigation* (págs. 247-278). doi:10.1016/B978-0-12-809732-8.00008-9

Alexandria Engineering Journal. (2018). *Ángulo de Llegada*. Obtenido de ScienceDirect: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/angle-of-arrival#:~:text=%C3%81ngulo%20de%20llegada-,La%20t%C3%A9cnica%20de%20%C3%A1ngulo%20de%20llegada%20(AOA)%20se%20basa%20en,un%20peque%C3%B1o%20error%20de%20medici%C3%B3n.

Amazon Web Services (AWS). (s.f.). *What is IoT?* Obtenido de AWS: https://aws.amazon.com/what-is/iot/

An, I., Son, M., Manocha, D., & Yoon, S. (2018). Reflection-Aware Sound Source Localization. (págs. 66-73). Brisbane, QLD, Australia,: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). doi:0.1109/ICRA.2018.8461268

App2u. (s.f.). *¿Qué es un beacon?* Obtenido de App2u: https://www.app2u.es/es/que-es-un-beacon/#:~:text=Los%20beacons%20son%20dispositivos%20de,y%20la%20recopilaci%C3%B3n%20de%20datos.

Asociación Española de Normalización (UNE). (s.f.). *Estandarización.* Obtenido de https://www.une.org/normalizacion_documentos/Estandarizacion-para-la-industria-4_0.pdf

AWS (Amazon Web Services). (2025). *¿Qué es MQTT?* Obtenido de AWS: https://aws.amazon.com/es/what-is/mqtt/

Basheer, M. R., & Jagannathan, S. (Octubre de 2014). Localization and Tracking of Objects Using Cross-Correlation of Shadow Fading Noise. *IEEE Transactions on Mobile Computing, 13*(10), 2293-2305. doi:10.1109/TMC.2013.34

Chen, L. Y. (2024). Analysis of multipath effects in GNSS signal reception under urban canyon environments. *Remote Sensing, 16*(1), 189. doi:10.3390/rs16010189

Corral, R. (s.f.). *KPIs útiles. Diseña indicadores operativos que realmente sirvan para mejorar.*

EDICOM. (s.f.). *Tipos de dashboards y ejemplos de KPIs*. Obtenido de EDICOM Blog: https://edicom.co/blog/tipos-dashboards-ejemplos-kpis

ela Innovation. (s.f.). *What is a BLE Gateway?* Obtenido de ela INNOVATION: https://elainnovation.com/en/iot-ble-gateway/#:~:text=Una%20puerta%20de%20enlace%20BLE,y%20el%20entorno%20de%20software.

ElectronicWings. (s.f.). *Introduction to nRF52 Series*. Obtenido de ElectronicWings: https://www.electronicwings.com/nordic-nrf52-series/introduction-nrf52-series

EMQ Technologies. (2025). *Mosquitto MQTT Broker: Pros, Cons, Tutorial, and Modern Alternatives*. Obtenido de EMQX Blog: https://www.emqx.com/en/blog/mosquitto-mqtt-broker-pros-cons-tutorial-and-modern-alternatives

EMQ Technologies. (2025). *The Ultimate Guide to MQTT Broker Comparison*. Obtenido de EMQX Blog: https://www.emqx.com/en/blog/the-ultimate-guide-to-mqtt-broker-comparison

F5. (2025). *MQTT*. Obtenido de F5 Glossary: https://www.f5.com/es_es/glossary/mqtt

Federal Communications Commission (FCC). (s.f.). *Interferencia de señales de radio, TV y telefónicas*. Obtenido de FCC: https://www.fcc.gov/consumers/guides/interferencia-de-senales-de-radio-tv-y-telefonicas

Ferreyros S. A. (20 de Agosto de 2024). *FERREYROS REALIZA TALLERES DE SOLUCIONES DIGITALES A NIVEL NACIONAL*. Obtenido de Novedades Artículos de Interés:

https://www.ferreyros.com.pe/articulo/ferreyros-realiza-talleres-de-soluciones-digitales-a-nivel-nacional/#:~:text=Su%20propuesta%20de%20valor%20incluye,la%20experiencia%20de%20los%20clientes.

Gan, T. P. (2023). Influence of Smart Sensors on Structural Health Monitoring Systems and Future Asset Management Practices. *Sensors (Basel, Switzerland), 23*. doi:10.3390/s23198279

GAO RFID Inc. (s.f.). *FAQ for BLE Gateways*. Obtenido de GAO RFID Web site: https://gaorfid.com/faq-for-ble-gateways/#:~:text=What%20is%20a%20BLE%20Gateway,reliable%20performance%20across%20various%20industries.

Gao, W., Kim, S., Bosse, H., Haitjema, H., Chen, Y., Lu, X., . . . Kunzmann, H. (2015). Measurement technologies for precision positioning. *CIRP Annals, 64*(2), 773-796. doi:10.1016/j.cirp.2015.05.009

Gobierno de Argentina. (s.f.). *¿Qué es la Internet de las Cosas?* Obtenido de Argentina.gob.ar: https://www.argentina.gob.ar/justicia/convosenlaweb/situaciones/que-es-la-internet-de-las-cosas

Google. (s.f.). *AppSheet*. Recuperado el Mayo de 2025, de Google Cloud: https://cloud.google.com/appsheet?hl=es

GPS.GOV. (25 de Noviembre de 2014). *Trilateration Exercise*. Obtenido de GPS.GOV U. S. flag Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics: https://www.gps.gov/multimedia/tutorials/trilateration/#:~:text=Trilateration%20is%20determining%20a%20position,process%20of%20GPS%20positioning%20works.

Hernández. (2005). Apendice II de Teoría de errores . *Tratamiento de datos experimentales. Teoría de errores*. Universidad de Granada. Obtenido de https://www.ugr.es/~jnieves/web_labdocencia/index_archivos/Apendice%20II%20de%20Teo

ria%20de%20errores_rev02Feb.pdf#:~:text=Por%20tanto%20un%20dispositivo%20ser%C3%A1%20m%C3%A1s%20preciso,proximidad%20al%20valor%20verdadero%20(si%20fuese%20conocido).

HiveMQ. (2025). *How to Get Started with MQTT*. Obtenido de HiveMQ Blog: https://www.hivemq.com/blog/how-to-get-started-with-mqtt/

HiveMQ. (2025). *MQTT Brokers: A Beginner's Guide*. Obtenido de HiveMQ Blog: https://www.hivemq.com/blog/mqtt-brokers-beginners-guide/

HiveMQ. (2025). *MQTT Essentials Part 3: Client Broker Connection Establishment*. Obtenido de HiveMQ Blog: https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part-3-client-broker-connection-establishment/

INCIBE. (s.f.). *Inventario de activos y gestión de seguridad SCI*. Obtenido de Blog de INCIBE-CERT: https://www.incibe.es/incibe-cert/blog/inventario-activos-y-gestion-seguridad-sci

International Society of Automation (ISA). (2016). *Industria 4.0: Producción inteligente y flexible*. Obtenido de ISA Org: https://www.isa.org/intech-home/2016/may-june/features/industry-4-0-intelligent-and-flexible-production

Juniper. (01 de Mayo de 2024). *Juniper Networks*. Obtenido de Juniper.net: https://www.juniper.net/documentation/mx/es/software/mist/mist-wireless/topics/concept/signal-strength.html#:~:text=El%20indicador%20de%20intensidad%20de,90%20dBm%20a%20%2D25%20dBm.

Law Insider. (s.f.). *Industrial Setting - Definición en el diccionario.* Recuperado el 5 de Mayo de 2025, de Law Insider: https://www.lawinsider.com/dictionary/industrial-setting

Logicbus. (2025). *Mosquitto MQTT: Presentación y Guía Básica de Uso*. Obtenido de Logicbus Blog: https://www.logicbus.com.mx/blog/mosquitto-mqtt-presentacion-y-guia-basica-de-uso/

Martínez, M. A., Jáuregui, D. C., & Urrutia, E. A. (2014). Interferencias en sistemas de radiodifusión en zonas de frontera colombiana. *15(30)*, 50-66. Ingenium. Obtenido de https://revistas.usb.edu.co/index.php/Ingenium/article/view/1358

Mecalux. (s.f.). *Sistema de trazabilidad*. Obtenido de Blog de Mecalux: https://www.mecalux.es/blog/sistema-trazabilidad

Mendoza-Silva, G. M., Torres-Sospedra, J., & Huerta, J. (2019). A Meta-Review of Indoor Positioning Systems. *Sensors, 19*(20). doi:10.3390/s19204507

Nabto. (2025). *A Guide to IoT ESP32*. Obtenido de Nabto: https://www.nabto.com/guide-to-iot-esp-32/#:~:text=ESP32%20is%20a%20chip%20that%20provides%20Wi%2DFi%20and%20(in, %E2%80%9CESP32%E2%80%9D%20by%20the%20manufacturer.

Naha, A. (25 de Julio de 2024). *Understanding Time Difference of Arrival (TDoA) and its Advantages.* Obtenido de beCompap Indoor Navigation: https://becomap.com/blog/time-difference-of-arrival-tdoa-and-advantages/

Nordic Semiconductor. (s.f.). *nRF52 DK — Development hardware for nRF52 Series*. Obtenido de Nordic Semiconductor: https://www.nordicsemi.com/Products/Development-hardware/nRF52-DK

Nordic Semiconductor. (s.f.). *nRF52832 Product Brief (PDF)*. Obtenido de Mouser Electronics: https://www.mouser.com/datasheet/2/297/nRF52832_Product_Brief_v1.2-890472.pdf

OpenJS Foundation. (2025). *About Node-RED*. Obtenido de Node-RED Official Website: https://nodered.org/about/

Paessler AG. (2025). *MQTT*. Obtenido de Paessler IT Explained: https://www.paessler.com/it-explained/mqtt

Patwari, N., & Agrawal, P. (2008). Effects of correlated shadowing: Connectivity, localization, and RF tomography. *2008 International Conference on Information Processing in Sensor Networks* (págs. 82-93). St. Louis, MO, USA: IEEE. doi:10.1109/IPSN.2008.7

PennState College of Earth and Mineral Sciences. Department of Geography. (s.f.). *11. Trilateration*. Obtenido de The Nature of Geographic Information: https://www.e-education.psu.edu/natureofgeoinfo/c5_p12.html#:~:text=La%20trilateraci%C3%B3n%20es%20una%20alternativa,rentable%20para%20levantamientos%20de%20control.

Petchrompo, S. &. (2019). A review of asset management literature on multi-asset systems. *Reliability Engineering & System Safety., 181*, 181-201. doi:10.1016/j.ress.2018.09.009

Petchrompo, S., & Parlikad, A. K. (2019). A review of asset management literature on multi-asset systems. *Reliability Engineering & System Safety, 181*, 181-201.

Pointr. (24 de Enero de 2025). *Pointr*. Obtenido de pointr.tech: https://www.pointr.tech/blog/location-fingerprinting-what-is-it-should-you-choose-it#:~:text=The%20online%20matching%20phase%20measures,is%20called%20a%20location%20fingerprint.

Samsung. (03 de Agosto de 2022). Obtenido de Samsung: https://www.samsung.com/sg/support/mobile-devices/what-is-bluetooth-low-energy-ble-technology/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20la%20tecnolog%C3%ADa%20Bluetooth%20Low%20Energy%20(BLE)?&text=Bluetooth%20de%20bajo%20consumo%20(Bluetooth,Bluetooth%20de%20bajo%2

SAP. (s.f.). *¿Qué es IoT?* Obtenido de SAP España: https://www.sap.com/spain/products/technology-platform/what-is-iot.html

SBG SYSTEMS. (s.f.). *Effect of atmospheric errors on RTK-PPK*. Obtenido de SBG SYSTEMS : https://www.sbg-systems.com/es/technology/effect-of-atmospheric-errors-on-rtk-ppk/#:~:text=Y%20como%20el%20GNSS%20se%20basa%20fundamentalmente,gran%20impacto%20en%20la%20precisi%C3%B3n%20del%20GNSS.

Schmitt, S., Adler, S., & Kyas, M. (2014). The effects of human body shadowing in RF-based indoor localization. *2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)* (págs. 307-313). Busan, Korea (South): IEEE. doi:10.1109/IPIN.2014.7275497

ScienceDirect. (s.f.). *Electromagnetic Interference*. Obtenido de ScienceDirect Topics: https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/electromagnetic-interference

SCM Logística. (s.f.). *¿Qué es la trazabilidad en almacén?* Obtenido de SCM Logística: https://www.scmlogistica.es/que-es-trazabilidad-almacen/

Senthamil Selvi, M., Deepa, K., Balamurugan, S., Jansi Rani, S., & Mohamed UvazeAhamed, A. (2022). *Cyber-Physical Systems and Industry 4.0* (Primera ed.). Apple Academic Press. Obtenido de https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003129790-7/rtls-introduction-senthamil-selvi-deepa-balamurugan-jansi-rani-mohamed-uvazeahamed

SMF-SDO. (2019). *Normas para la Industria 4.0*. Obtenido de standardsi40: https://www.standardsi40.sg/

Sound Devices. (31 de Marzo de 2021). *Multipath interference and diversity switching*. Obtenido de Sound Devices LLC: https://www.sounddevices.com/multipath-interference-and-diversity-switching/#:~:text=Multipath%20interference%20occurs%20when%20an,room%20can%20cause%20reflections%20indoor.

Splashtop. (s.f.). *What is IoT?* Obtenido de Splashtop Blog: https://www.splashtop.com/es/blog/what-is-iot

Tableau Software. (2023). *Dashboards*. Obtenido de Tableau Help: https://help.tableau.com/current/pro/desktop/es-es/dashboards.htm

Tan, W., Yu, G., & Rao, D. (2023). Influence of first-order lateral reflections on the localization of virtual source reproduced by crosstalk cancellation system. *Applied Acoustics, 202*. doi:10.1016/j.apacoust.2022.109165

TechTarget. (s.f.). *¿Qué es una interferencia electromagnética?* Obtenido de SearchMobileComputing (TechTarget): https://www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/electromagnetic-interference

Teltonika. (s.f.). *Teltonika*. Obtenido de Teltonika Networks Wiki: https://wiki.teltonika-networks.com/view/RSSI#:~:text=En%20telecomunicaciones%2C%20el%20indicador%20de,la%20torre%20hasta%20el%20m%C3%B3dem.

The Things Industries. (2025). *Eclipse Mosquitto*. Obtenido de The Things Industries Documentation: https://www.thethingsindustries.com/docs/integrations/other-integrations/mqtt/mqtt-clients/eclipse-mosquitto/

TINSA México. (s.f.). *¿Qué es un inventario de activos y para qué sirve?* Obtenido de LinkedIn: https://es.linkedin.com/pulse/qu%25C3%25A9-es-un-inventario-de-activos-y-para-sirve-tinsa-mexico-1h4cc

Toptal. (2025). *Programación visual con Node-RED: Conectando el Internet de las Cosas con facilidad*. Obtenido de Toptal Engineering Blog: https://www.toptal.com/nodejs/programacion-visual-con-node-red-conectando-el-internet-de-las-cosas-con-facilidad

TupuNATRON. (2025). *Node-RED: Software de desarrollo*. Obtenido de TupuNATRON: https://tupunatron.com/producto/node-red-software-de-desarrollo/

Ugarelli, R. &. (2022). Infrastructure Asset Management: Historic and Future Perspective for Tools, Risk Assessment, and Digitalization for Competence Building. Water, 14, 1236. https://doi.org/10.3390/w14081236. *Water, 14*(8), 1236. doi:10.3390/w14081236

Ugarelli, R., & Sægrov, S. (2022). Infrastructure asset management: Historic and future perspective for tools, risk assessment, and digitalization for competence building. *Water, 14*(8). Obtenido de https://www.mdpi.com/2073-4441/14/8/1236

Uniqo. (s.f.). *Precisión de los dispositivos GPS en logística*. Obtenido de Ubiqo: https://www.ubiqo.net/logistica/precision-dispositivos-gps-logistica/

Varshney, P. S. (2020). Real-time Asset Management and Localization with Machine Learning and Bluetooth Low Energy Tags. *International Conference on Computational Science and*

Computational Intelligence (CSCI) (págs. 1120-1125). IEEE. doi:10.1109/CSCI51800.2020.00208

Varshney, P., Saini, H., & Erickson, V. L. (2020). Real-time Asset Management and Localization with Machine Learning and Bluetooth Low Energy Tags. *2020 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI).* Las Vegas, NV, USA,. doi:10.1109/CSCI51800.2020.00208

Wahab, N. H. (2022). Indoor positioning system: A review. *(IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 13*(6).

Yang, Z. Z. (2016). RFID-enabled indoor positioning method for a real-time manufacturing execution system using OS-ELM. *Neurocomputing, 174*, 121-133. Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231215011352?casa_token=caIAp2hYi9sAAAAA:mbSDdYSJ-DdjGNcPm3qT47zYFglKjYlJv14n2Ysv5FcRpfFdkjPKeNvinTswLtG6zjR1u0781S0

Zebra. (s.f.). *What Are Bluetooth Beacons and Bridges?* Obtenido de Zebra: https://www.zebra.com/ap/en/resource-library/faq/what-are-bluetooth-beacons-and-bridges.html#:~:text=A%20Bluetooth%20beacon%20is%20essentially,mobile%20devices%20or%20other%20devices.

Zhang, D. Y. (2016). Real-Time Locating Systems Using Active RFID for Internet of Things. *IEEE Systems Journal, 10*, 1226-1235. doi:Zhang, D., Yang, L., Chen, M., Zhao, S., Guo, M., & Zhang, Y. (201610.1109/JSYST.2014.2346625

ANEXOS

Tabla 38
Comparación de procesadores de beacon

Modelo	Consumo	Precisión	Ventajas	Desventajas
nRF52833	~15 µA (sleep)	±1-2 m (AoA)	Soporta AoA, bajo costo	Requiere antena array para AoA
DA14531	**0.9 µA** (sleep)	±3-5 m (RSSI)	Ultra bajo consumo	No soporta AoA
nRF5340	1.5 µA (sleep)	±0.5-1 m (AoA)	Mayor potencia de cálculo	Costo elevado

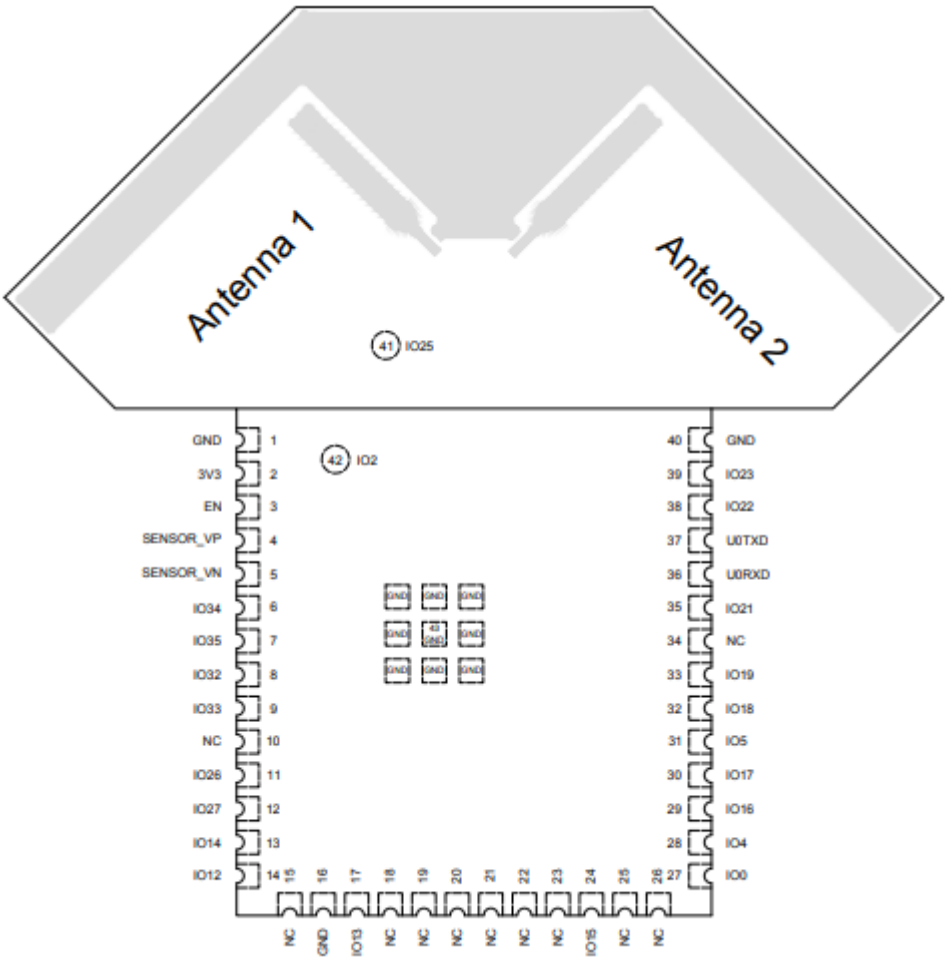
Tabla 39

Comparativa de Baterías para Beacon con SoC nRF52833

Batería	Tamaño (mm)	Capacidad (mAh)	Química	Duración (TX 5s + 6h sleep)	Ventajas	Desventajas
CR2450	24.5 × 5.0	620 mAh	Li-MnO_2	~5.4 años	Máxima duración, estable	Voluminosa (no compacta)
CR2032	20.0 × 3.2	225 mAh	Li-MnO_2	~1.8 años	Balance tamaño/duración	Menor capacidad que CR2450
CR2025	20.0 × 2.5	170 mAh	Li-MnO_2	~1.4 años	Más delgada que CR2032	Duración reducida
CR1632	16.0 × 3.2	120 mAh	Li-MnO_2	~1.0 año	Compacta	Autonomía limitada
LR44 (Alcalina)	11.6 × 5.4	120 mAh	Alcalina	~0.8 años	Pequeña, barata	Mal rendimiento en frío, auto-descarga alta
LIR2032 (Li-Ion)	20.0 × 3.2	40 mAh	Li-Ion	~0.3 años (4 meses)	Recargable	Muy poca capacidad, requiere circuito de carga

Figura 58

Definición de pines del ESP32-WROOM-DA-N4



Nota: Extraído de

Figura 59

Vista 2D de la placa PCB del lector BLE

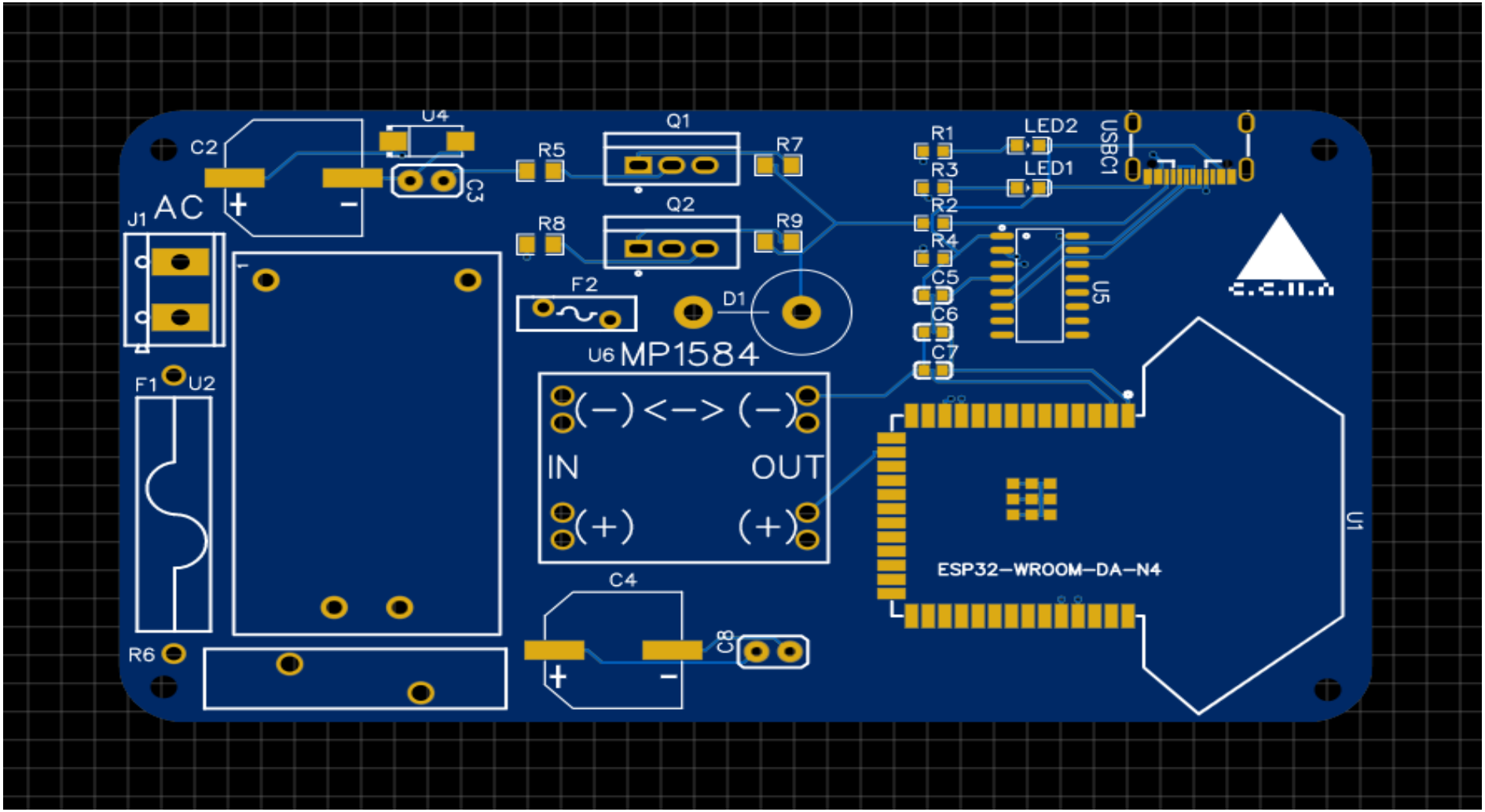


Figura 60

Visualización de RSSI en prueba con ESP32

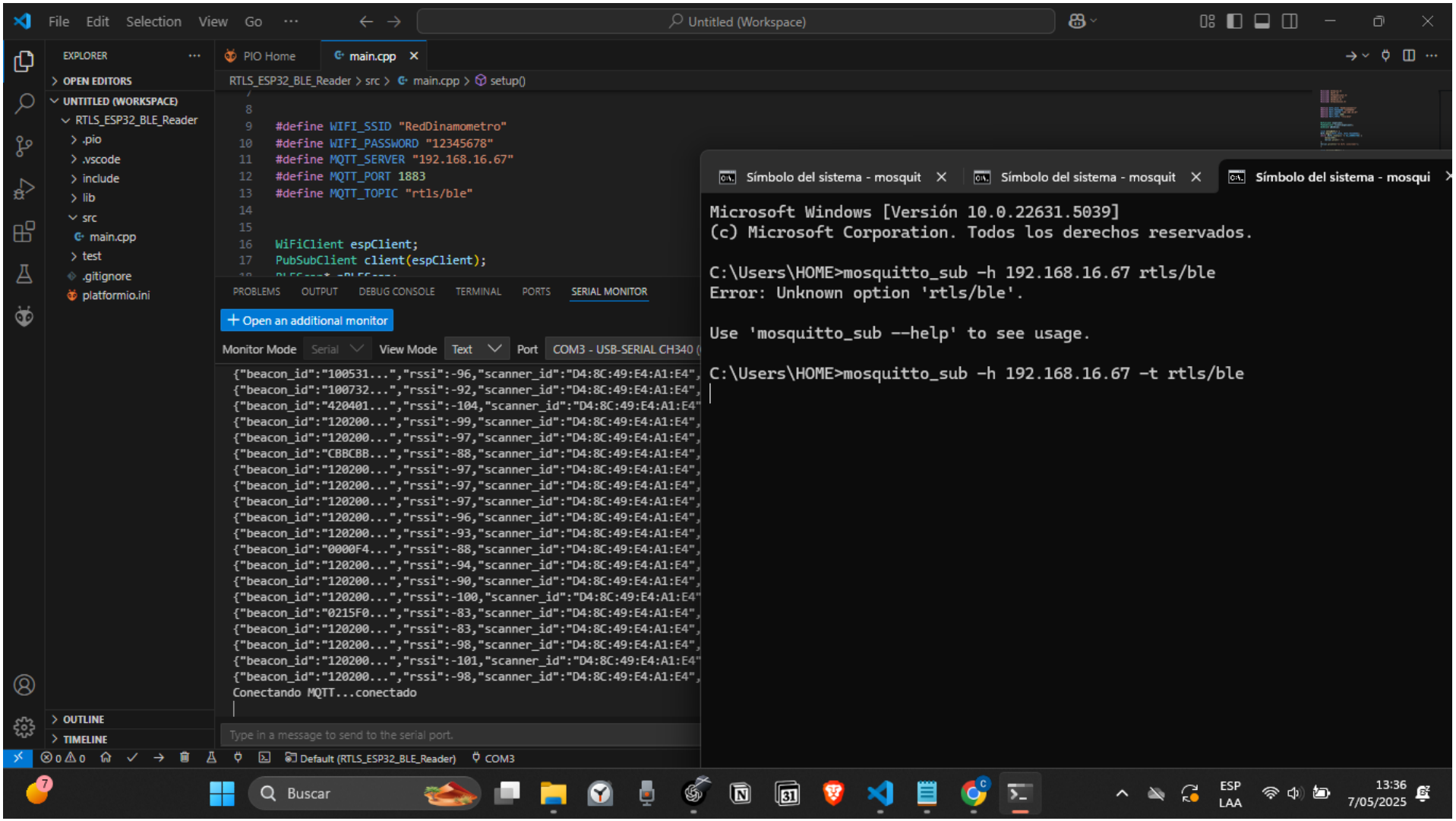


Figura 61
Flujo básico de prueba en node-red

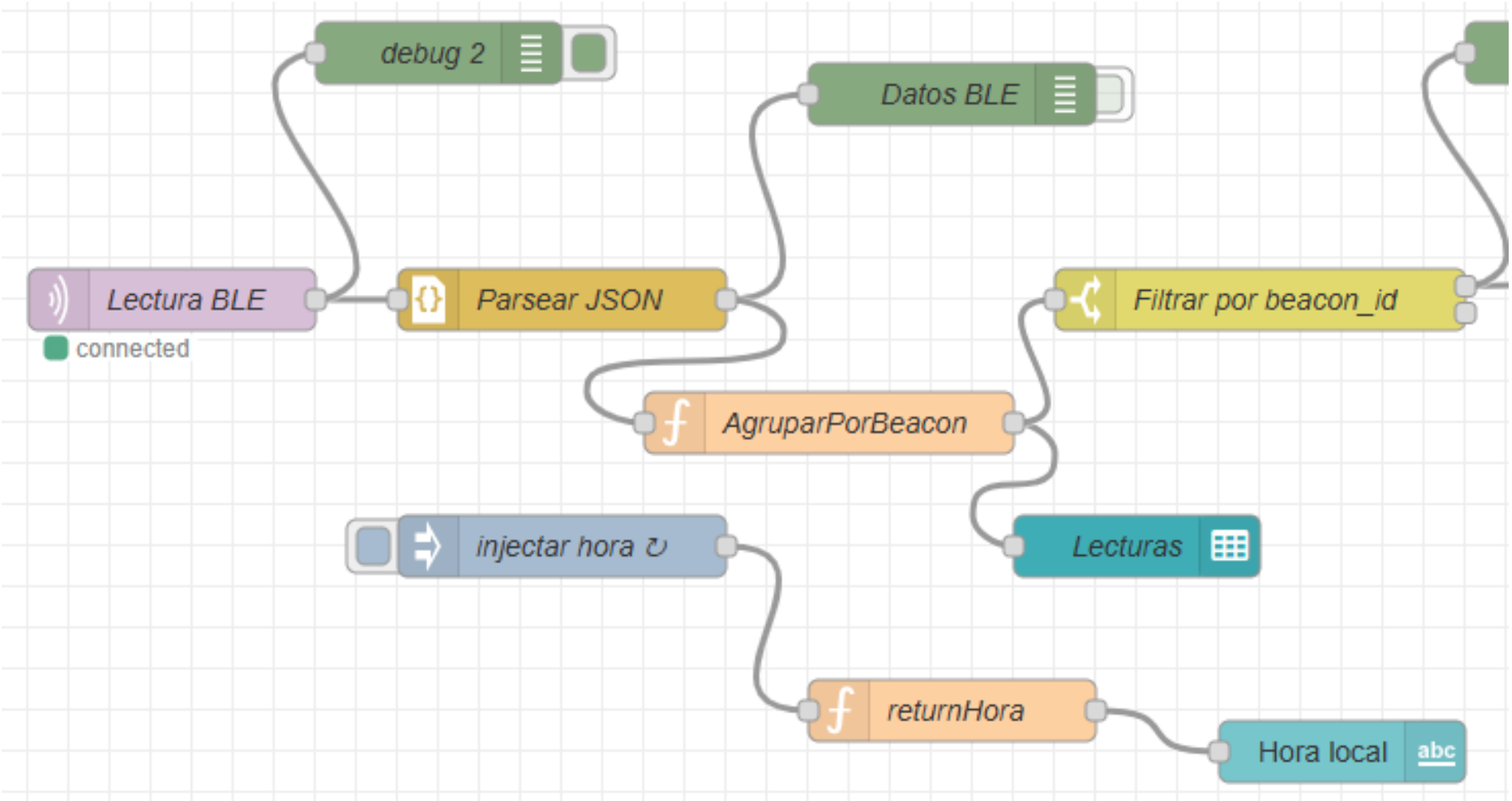
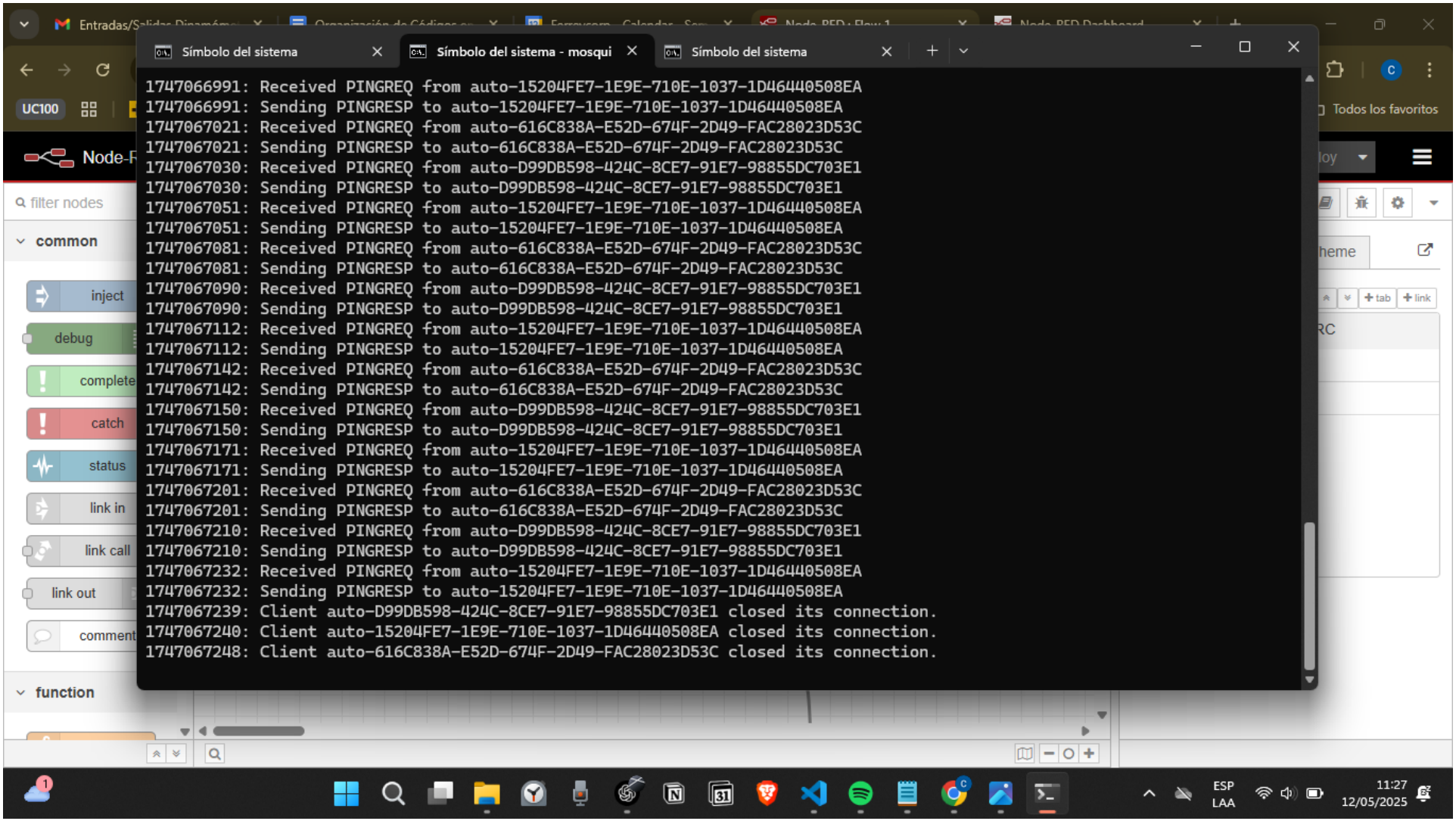


Figura 62

Resultados en terminal de respuesta de broker



Símbolo del sistema | Símbolo del sistema - mosquit | node-red | Símbolo del sistema - mosqui

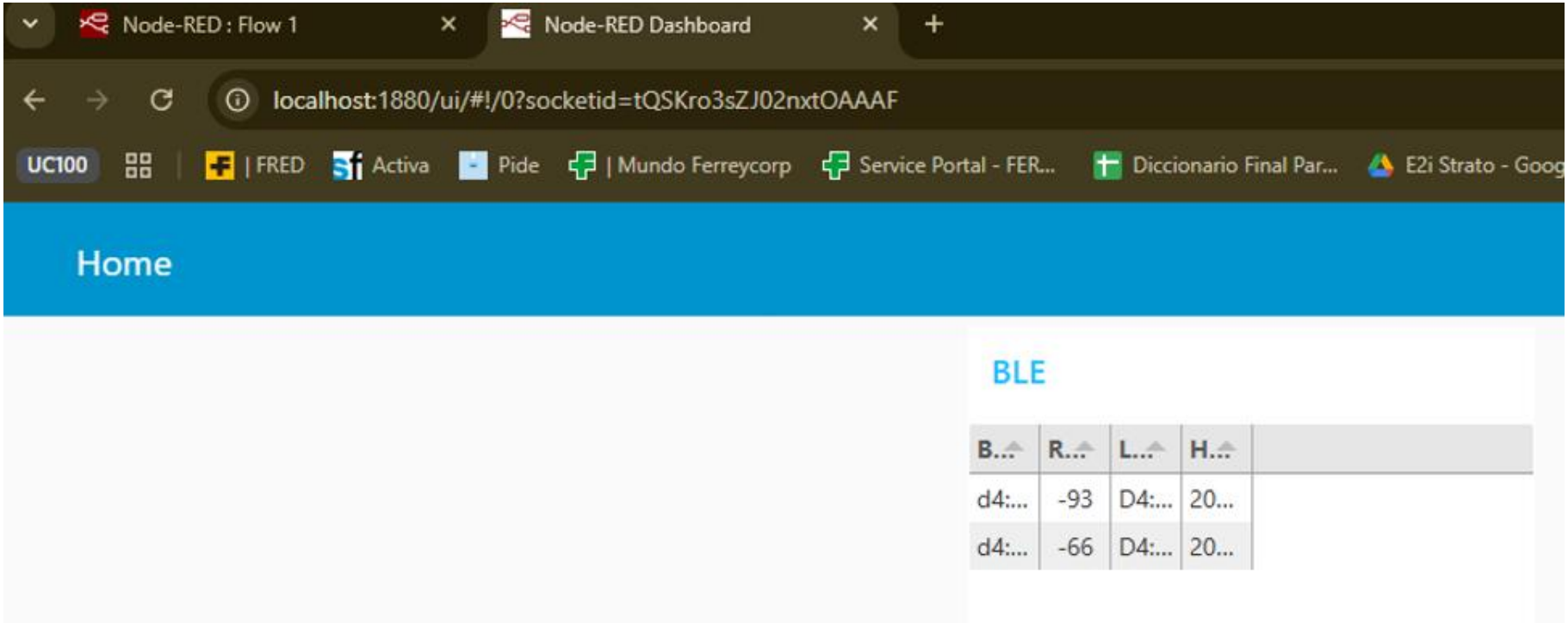
```
Microsoft Windows [Versión 10.0.22631.5039]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

C:\Users\HOME>msoquitto_sub -h localhost -t rtls/ble/reader1
"msoquitto_sub" no se reconoce como un comando interno o externo,
programa o archivo por lotes ejecutable.

C:\Users\HOME>mosquitto_sub -h localhost -t rtls/ble/reader1
{"timestamp":"2025-05-12 07:58:23","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-56,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 07:59:03","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-49,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 07:59:07","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-56,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 07:59:11","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-69,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 07:59:15","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-50,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 07:59:19","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-60,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 07:59:24","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-52,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 07:59:28","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-56,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 07:59:32","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-52,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 07:59:36","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-58,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 07:59:40","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-56,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 07:59:44","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-64,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 07:59:48","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-59,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 07:59:52","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-67,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 07:59:56","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-60,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 08:00:00","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-66,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 08:00:04","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-57,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 08:00:08","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-65,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 08:00:12","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-60,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 08:00:16","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-60,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 08:00:20","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-65,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 08:00:24","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-64,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 08:00:28","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-63,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 08:00:32","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-66,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 08:00:36","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-63,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 08:00:40","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-67,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
{"timestamp":"2025-05-12 08:00:45","beacon_id":"d4:8c:49:e4:a1:e6","rssi":-58,"scanner_id":"D4:8C:49:E4:68:10","x":0,"y":0,"n":2}
```

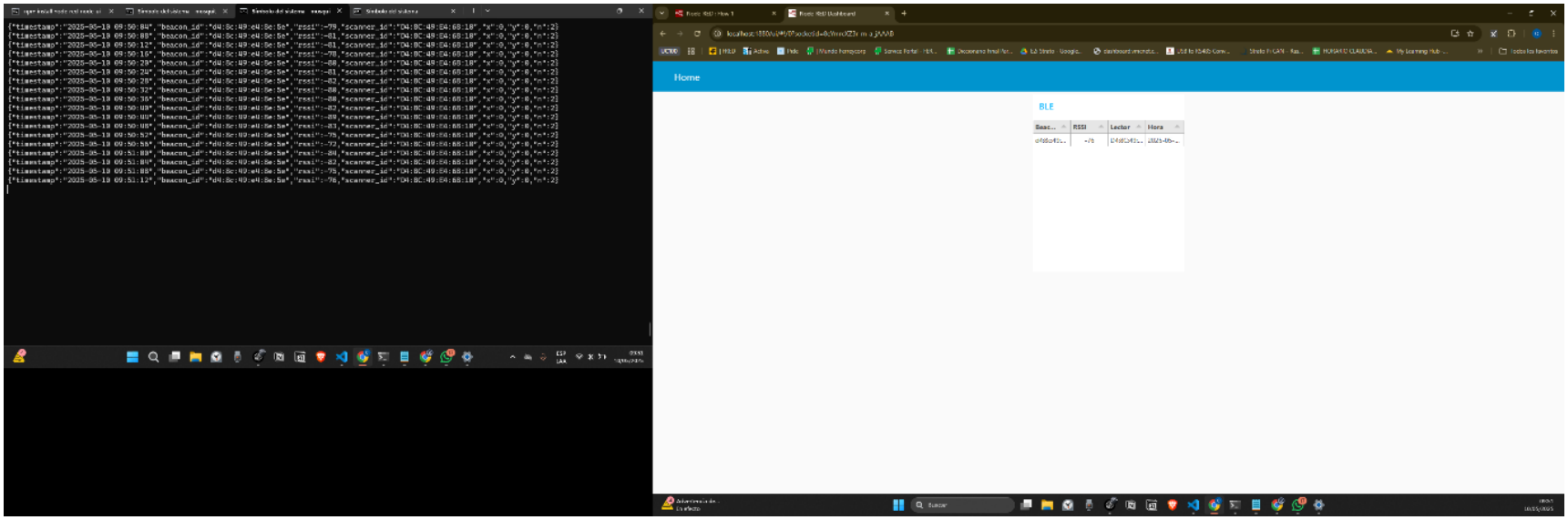
Buscar

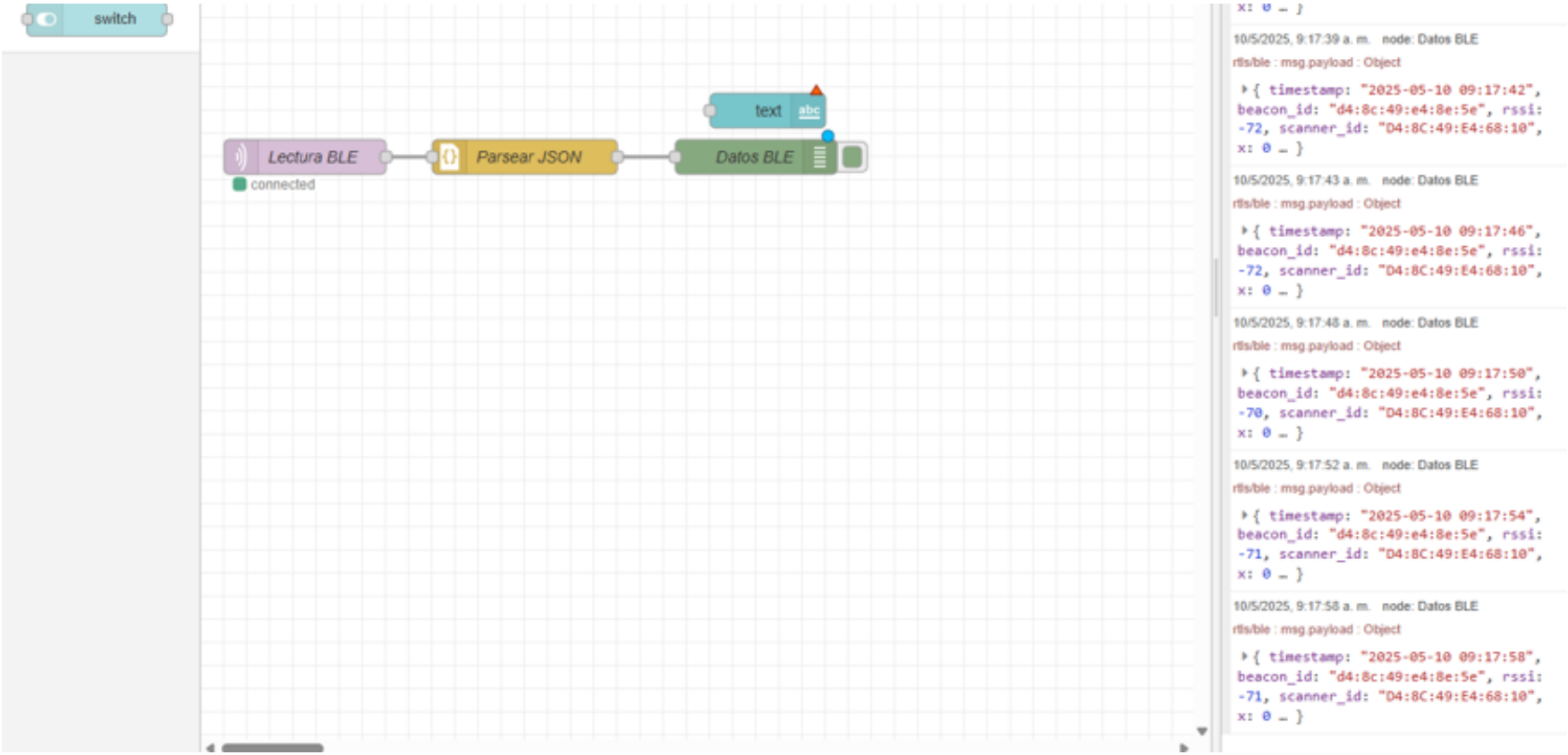
ESP LAA 08:03 12/05/2025

Figura 63

Tabla de RSSI




Home
BLE
Beac...
RSSI
Lector
Hora


switch
text
Lectura BLE
connected
Parsear JSON
Datos BLE
10/5/2025, 9:17:39 a. m. node: Datos BLE
rtls/ble : msg.payload : Object
{ timestamp: "2025-05-10 09:17:42", beacon_id: "d4:8c:49:e4:8e:5e", rssi: -72, scanner_id: "D4:8C:49:E4:68:10", x: 0 … }
10/5/2025, 9:17:43 a. m. node: Datos BLE
rtls/ble : msg.payload : Object
{ timestamp: "2025-05-10 09:17:46", beacon_id: "d4:8c:49:e4:8e:5e", rssi: -72, scanner_id: "D4:8C:49:E4:68:10", x: 0 … }
10/5/2025, 9:17:48 a. m. node: Datos BLE
rtls/ble : msg.payload : Object
{ timestamp: "2025-05-10 09:17:50", beacon_id: "d4:8c:49:e4:8e:5e", rssi: -70, scanner_id: "D4:8C:49:E4:68:10", x: 0 … }
10/5/2025, 9:17:52 a. m. node: Datos BLE
rtls/ble : msg.payload : Object
{ timestamp: "2025-05-10 09:17:54", beacon_id: "d4:8c:49:e4:8e:5e", rssi: -71, scanner_id: "D4:8C:49:E4:68:10", x: 0 … }
10/5/2025, 9:17:58 a. m. node: Datos BLE
rtls/ble : msg.payload : Object
{ timestamp: "2025-05-10 09:17:58", beacon_id: "d4:8c:49:e4:8e:5e", rssi: -71, scanner_id: "D4:8C:49:E4:68:10", x: 0 … }

```
npm install node-red-cor        Símbolo del sistema - m

Microsoft Windows [Versión 10.0.22631.5039]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

C:\Users\HOME>mosquitto -c C:\Users\HOME\mosquitto_dev.conf -v
1746886427: mosquitto version 2.0.21 starting
1746886427: Config loaded from C:\Users\HOME\mosquitto_dev.conf.
1746886427: Opening ipv6 listen socket on port 1883.
1746886427: Opening ipv4 listen socket on port 1883.
1746886427: mosquitto version 2.0.21 running
1746886433: New connection from 192.168.102.5:60495 on port 1883.
1746886433: New client connected from 192.168.102.5:60495 as ESP32Client
 (p2, c1, k15).
1746886433: No will message specified.
1746886433: Sending CONNACK to ESP32Client (0, 0)
1746886437: Received PUBLISH from ESP32Client (d0, q0, r0, m0, 'rtls/ble
', ... (129 bytes))
1746886441: Received PUBLISH from ESP32Client (d0, q0, r0, m0, 'rtls/ble
', ... (129 bytes))
1746886445: Received PUBLISH from ESP32Client (d0, q0, r0, m0, 'rtls/ble
', ... (129 bytes))
1746886449: Received PUBLISH from ESP32Client (d0, q0, r0, m0, 'rtls/ble
', ... (129 bytes))
1746886450: Received PINGREQ from ESP32Client
1746886450: Sending PINGRESP to ESP32Client
```

```
#include <Arduino.h>

// Definiciones para el Wifi y el MQTT
#define WIFI_SSID "RedDinamometro"
#define WIFI_PASSWORD "12345678"
#define MQTT_SERVER "192.168.102.67"
#define MQTT_PORT 1883
#define MQTT_TOPIC "rtls/ble"


// Definiciones de variables para el tiempo
#define NTP_UPDATE_INTERVAL 60*60 //actualizar cada hora
const char* timezone = "CST5CDT,M3.2.0/2,M11.1.0/2";
```

```
ndo MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Con
ectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-
2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo,
rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fal
lo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT..
.Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQ
TT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectand
o MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conectando MQTT...Fallo, rc=-2Conec
tando MQTT...Fallo, rc=-2
---- Closed the serial port COM7 ----
---- Opened the serial port COM7 ----
---- Closed serial port COM7 due to disconnection from the machine ----
---- Opened the serial port COM7 ----
..............WiFi conectado
Esperando sincronización de hora...
¡Hora sincronizada!
2025-05-08 12:58:59
Conectando MQTT...Conectado con MQTT
```

Anexo A

Selección de MCU para beacon

En esta sección se muestra el análisis que se realizó para la selección del principal componente para el hardware del beacon BLE, el MCU. Principalmente la comparación entre módulos, nomenclatura de encapsulados, y otros detalles, recalcando que se priorizó el tamaño reducido, la durabilidad, y la disponibilidad de tecnologías BLE para localización.

Tabla 40

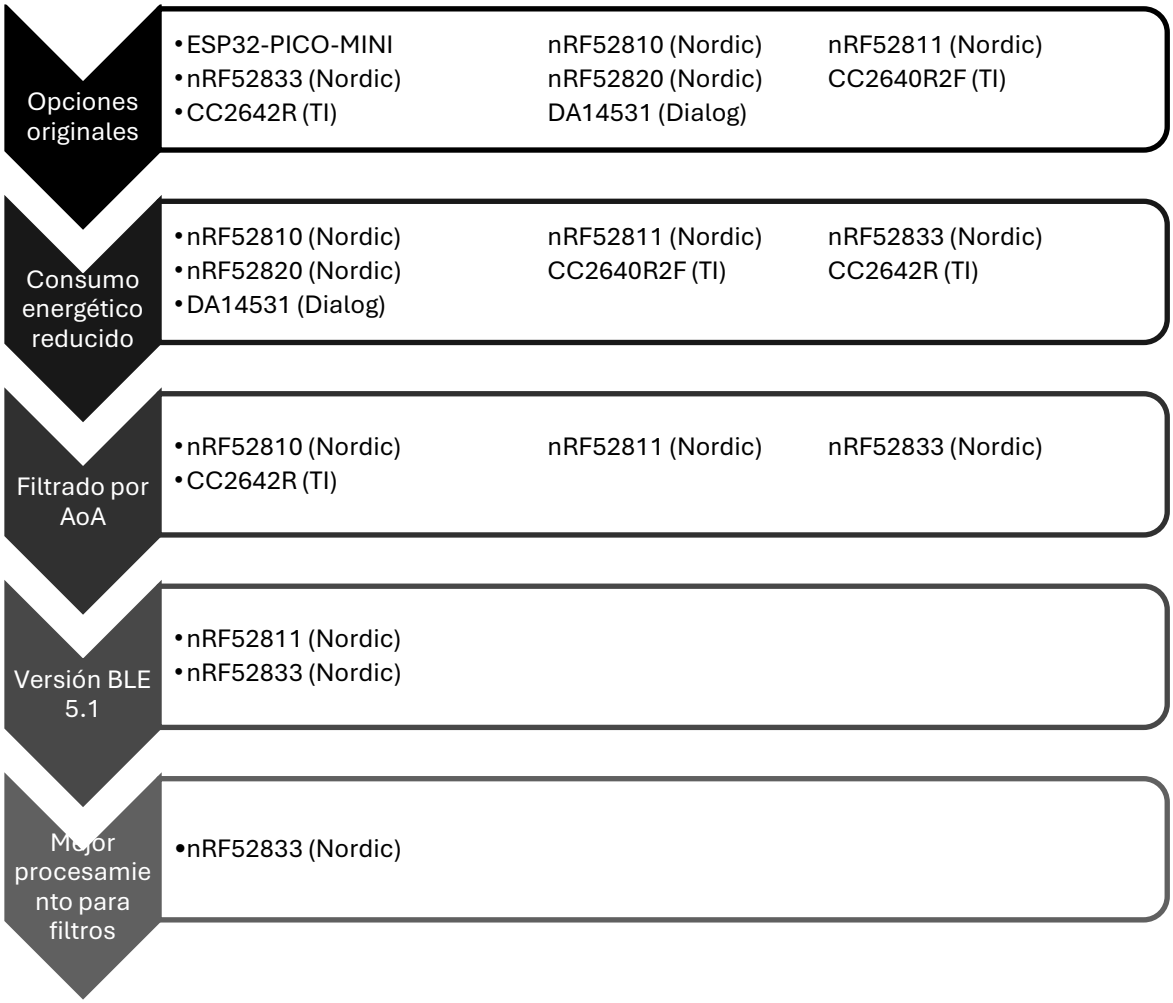
Tabla Comparativa de Módulos BLE Ultracompactos (< 2 cm)

Modelo	Tamaño (mm)	BLE	Núcleo	Flash	Localización (RSSI/AoA/ToF)	Consumo (Tx @ 0dBm)	Notas
ESP32-PICO-MINI	12 × 12	4.2	Dual-core Xtensa	4 MB	Solo RSSI	~80 mA	Wi-Fi + BLE, pero alto consumo.
nRF52810 (Nordic)	6 × 6	5.0	Cortex-M4	192 KB	**RSSI + AoA** (con firmware)	~4.3 mA	Muy bajo consumo, ideal para wearables.
nRF52811 (Nordic)	6 × 6	5.1	Cortex-M4	192 KB	**RSSI + AoA + ToF**	~5 mA	Soporte avanzado para localización.
nRF52833 (Nordic)	7 × 7	5.1	Cortex-M4	512 KB	**RSSI + AoA + ToF**	~5.5 mA	Más memoria y mejor rendimiento.
nRF52820 (Nordic)	5 × 5	5.0	Cortex-M4	256 KB	Solo RSSI	~4.5 mA	Excelente balance tamaño/consumo.
CC2640R2F (TI)	5 × 5	5.1	Cortex-M3	128 KB	Solo RSSI	~5.1 mA	Bajo consumo, buen alcance.
CC2642R (TI)	7 × 7	5.1	Cortex-M4F	352 KB	**RSSI + AoA** (con firmware)	~6.1 mA	Mejor rendimiento que CC2640.
DA14531 (Dialog)	2.5 × 2.5	5.1	Cortex-M0+	48 KB	Solo RSSI	~3.4 mA	El más pequeño del mercado (solo BLE).

La selección de la tecnología para el sistema de localización en el Centro de Reparación de Componentes debido a su condiciones industriales e instalaciones es principalmente una basada en AoA, debido a que el RSSI se puede alterar con mayor facilidad en un entorno con alta densidad metálica, como se mencionó en el Marco Teórico. A su vez, debido a que el beacon será colocado en las herramientas e instrumentos del centro, se priorizaron variables como tamaño, para su no interferencia en el uso de la herramienta/instrumento, y su consumo energético reducido por su dependencia de alimentación por batería.

Figura 1

Filtrado de módulos BLE para beacon por criterios establecidos



Nota: Se concluye que el beacon que diseñaremos será basado en nRF52833 (Nordic).

Dadas las similitudes entre el nRF52811 y el nRF52833, a continuación, se incluyen las principales diferencias entre los módulos para su selección.

Figura 64

Comparación de soporte de protocolo inalámbrico entre modelos de la serie nRF52

	nRF52805	nRF52810	nRF52811	nRF52820	nRF52832	nRF52833	nRF52840	nRF5340
Bluetooth 5.3	X	X	X	X	X	X	X	X
Bluetooth 2 Mpbs	X	X	X	X	X	X	X	X
Bluetooth Long Range			X	X		X	X	X
Bluetooth Direction Finding			X	X		X		X
Bluetooth LE Audio								X
Bluetooth mesh				X	X	X	X	X
Thread			X	X		X	X	X
Zigbee				X		X	X	X
Matter							X	X

Nota: Recuperado de Nordic Semiconductors (s.f.). *nRF52833-SoC-Product-Brief.* *https://www.nordicsemi.com/-/media/Software-and-other-downloads/Product-Briefs/nRF52833-SoC-Product-Brief.pdf*

Tabla 41

Principales diferencias entre el nRF52811 y el nRF52833

Parámetro	nRF52811	nRF52833	Impacto en tu Proyecto
Precisión AoA	Soporta AoA, pero con limitaciones de RAM (solo 24 KB). Menos muestras IQ → Error angular ~ ±25°	Mayor RAM (128 KB) para promediar más muestras → Error angular ~±8°-15°	El nRF52833 distingue mejor entre áreas de 4x8 m
GPIO Disponibles	17 GPIO (muy limitado)	31 GPIO (QFN40)	Se necesita GPIO para RTC externo, sensores futuros, y modo hibernación.
Paquete	Solo WLCSP (1.9x2.0 mm). Difícil de soldar sin equipo profesional.	QFN40 (5x5 mm) o QFN48. Ideal para prototipos.	Soldabilidad y costo de fabricación más bajos con QFN.
Flash	192 KB (límite para firmware + OTA updates)	512 KB (espacio para funciones avanzadas)	Futuras actualizaciones de firmware sin preocupaciones.
Periféricos	Sin USB, sin NFC	Soporta USB y NFC (aunque no los uses, muestra mayor flexibilidad)	Robustez para escalar el proyecto.

Nota: Se muestran las principales razones de la selección del nRF52833.

Los sistemas en Chip (SoC) nRF52833 tienen diferentes variedades, a continuación, se muestran los tipos de encapsulado que tienen y la nomenclatura que usan.

Tabla 1

Códigos Nordic

Parte Completa	Significado
nRF52833	Chip base (BLE 5.1, Cortex-M4)
Q	Calificación Industrial (-40°C a +85°C)
DAA / IAA	Tipo de encapsulado (no tamaño)
R7	Revisión de silicio (la más reciente)

Nota: Tanto el encapsulado DAA como IAA cuentan con la R7.

La selección de SoC nRF52833 no es suficiente, ya que los chips de Nordic tienen diferentes tipos encapsulado. La ‘Q’ nos indica que el encapsulado que elegimos es de Calificación Industrial, y entre las variantes de encapsulado ‘Q’ tenemos al DAA y al IAA. A continuación, se especifican las diferencias.

Tabla 2

Tipos de encapsulado

Código	Encapsulado	Tamaño	Pines

QDAA	QFN40	5x5 mm	40
QDAA	QFN48	6x6 mm	48
QIAA	aQFN73	3.5x3.5 mm	73

Nota: El código "QDAA" puede venir en dos encapsulados físicos distintos: QFN40 (5x5 mm) y QFN48 (6x6 mm). Basado en la hoja de datos de nRF52833 (Nordic Semiconductors).

Tabla 2

Diferencias prácticas entre encapsulados para el beacon

Parámetro	**QFN40 (5x5 mm)**	**QFN48 (6x6 mm)**	**Conclusión**
Área PCB	25 mm²	36 mm² (+44%)	QFN40
Pines GPIO	31	38 (+7)	=
Disponibilidad	Limitada	Alta	Verificar stock
RF Performance	Idéntica	Idéntica	=
Costo	~$3.50	~$3.20	=

Nota: La única desventaja en el contexto de la presente implementación es la disponibilidad limitada del SoC del QFN40.

Se verificó el stock del encapsulado QFN40 y se dispone de estos en distribuidores internacionales como DigiKey. Por otro lado, los costos son bastante similares, y debido a su menor tamaño, concluimos que el más conveniente para el presente proyecto es el encapsulado QFN40.

Anexo B

Selección de batería y estrategia de optimización energética para beacon BLE

En la presente sección, se especifican las medidas que se tomaron para reducir al mínimo el consumo energético de los componentes del beacon BLE, esto con la principal finalidad de reducir la capacidad que se requiere para la batería elegida, ya que a mayor capacidad la batería debe tener un mayor tamaño, lo cual impide al beacon ser compacto. Esta sección incluye tanto las opciones de batería preliminares y su eliminación progresiva, así como la justificación entre las medidas, ya que buscar un SoC de tamaño reducido, pero usar una batería de tamaño no compacto sería carente de sentido. Asimismo, manteniendo la precisión de localización mediante AoA (Angle of Arrival).

Por otro lado, debemos especificar los requisitos clave con los que deben cumplir la batería elegida.

- El sistema, al tener como principal objetivo localizar las herramientas dentro del taller, y la interfaz del sistema al solo ser manipulada en el horario de los técnicos, nos indica que debe estar disponible al menos en los 2 turnos de los técnicos del CRC. El turno de la mañana comienza a las 7 a.m. y termina a las 3:30 p.m., mientras que el segundo turno comienza a las 3:30 p.m. y termina a las 7 p.m. Esto nos da una ventana de 8 horas en las que el sistema no necesita estar funcionando.
- El mantenimiento preventivo de las herramientas e instrumentos se realiza anualmente, lo cual nos indica que la batería debe durar mínimo un año, para no tener la necesidad de reemplazarla antes de su mantenimiento y evitar procesos adicionales para el área de mantenimiento. Es preferible apuntar a 14 meses de duración de la batería para evitar imprevistas.

- El sistema, al ser en tiempo real y los usuarios no pueden esperar mucho tiempo a una ubicación actual, se requiere una frecuencia de transmisión de menos de 10 segundos.
- El hardware del sistema, específicamente los beacons serán colocados en las herramientas e instrumentos, algunas de estos, como ya se mencionó con anterioridades son relojes comparadores y vernier's, lo que nos da una restricción en cuanto a tamaño, por lo que, el beacon debe ser de máximo 1.5cm, incluyendo protección del hardware.

Tabla 42

Lista resumida de requisitos de batería

N°	Requisito	Mínimo/Máximo	Preferencia
1	Horas activas	16 h	18 h
2	Duración de batería	12 meses	14 meses
3	Frecuencia de transmisión.	10 segundos	5 segundos
4	Tamaño ultracompacto	15mm	10mm
5	Precisión de localización	Permite AoA avanzado	

Se analizaron las siguientes baterías de botón, considerando su capacidad, dimensiones y viabilidad para el proyecto:

Tabla 43

Baterías evaluadas inicialmente

Batería	Capacidad (mAh)	Voltaje (V)	Diámetro (mm)	Grosor (mm)	Autonomía Estimada (TX/5s)
CR2450	620	3.0	24.5	5.0	~14.2 meses
CR2032	220	3.0	20.0	3.2	~14.5 meses
CR1632	120	3.0	16.0	3.2	~7.8 meses
CR1220	35	3.0	12.5	2.0	~4 meses (sin optimización)
LIR2032	40	3.7	20.0	3.2	~11.5 meses
LR44	120	1.5	11.6	5.4	~5 meses

Criterios de filtrado inicial

- Diámetro ≤20 mm (para no interferir con el manejo de herramientas).
- Capacidad suficiente para >14 meses (considerando consumo por defecto).
- Estabilidad de voltaje (evitar baterías alcalinas como LR44).

Primera conclusión: Las CR2032 y CR2450 eran las más prometedoras, pero se exploraron alternativas más compactas.

Análisis por consumo y autonomía

Análisis de consumo según modo energético. Se modeló el consumo energético del nRF52833 en diferentes modos.

Tabla 44

Modos de Sueño en nRF52833

Modo	Consumo típico	Qué hace el CPU/RAM	Cómo despierta	Tiempo de despertar
Active Mode	~4-8 mA	Ejecuta código (TX/RX BLE)	-	Instantáneo
Light Sleep	~1-5 µA	RAM retenida, periféricos seleccionados ON	Eventos (GPIO, timers)	~2 µs

Deep Sleep (System OFF)	0.3-1 µA	RAM *no* retenida (solo retención de 8KB)	Reset o eventos específicos	~1-3 ms
Shutdown	~0.1 µA	Solo dominio permanente (GPIO wakeup)	Reset completo	~10 ms

Modelo General de Autonomía para Beacon BLE. A continuación, aplicaremos un modelo de cálculo de autonomía de una batería para beacon BLE basándonos en los diferentes consumos en los diferentes tipos de modos energéticos. Se introducirán fórmulas para realizar este cálculo.

Tabla 45

Variables del sistema

Símbolo	**Descripción**	**Unidad**
C	Capacidad de la batería	mAh
$\boldsymbol{I_{tx}}$	Corriente durante TX	mA
$\boldsymbol{t_{tx}}$	Duración de cada TX	segundos
T	Período entre TX	segundos
$\boldsymbol{H_{act}}$	Horas activas por día	horas

$\boldsymbol{I_{ds}}$	Corriente en deep sleep	µA
$\boldsymbol{I_{hib}}$	Corriente en hibernación	µA
$\boldsymbol{H_{hib}}$	Horas de hibernación por día	horas
K	Factor de seguridad (fugas PCB, tolerancias)	adimensional

Fórmulas fundamentales

Ecuación 17
Eventos de TX por día

$$N_{tx} = \frac{H_{act} \times 3600}{T}$$

Ecuación 18

Energía Diaria en TX

$$E_{tx} = \frac{I_{tx} \times t_{tx} \times N_{tx}}{3600}$$

Nota: E_{tx} está en mAh.

Ecuación 19

Energía Diaria en Deep Sleep

$$E_{ds} = I_{ds} \times 10^{-3} \times H_{act}$$

Nota: E_{ds} está en mAh (microamperios).

Ecuación 20

Energía Diaria en Hibernación

$$E_{hib} = I_{hib} \times 10^{-3} \times H_{hib}$$

Nota: E_{hib} está en mAh

Ecuación 21

Consumo Total Diario Ajustado

$$E_{total} = k \times (E_{tx} + E_{ds} + E_{hib})$$

Nota: E_{total} está en mAh

Ecuación 22

Autonomía (días)

$$A = \frac{C}{E_{total}}$$

Ecuación 23

Autonomía (meses)

$$A_{meses} = \frac{A}{30.44}$$

Nota: Mes promedio = 30.44 días.

Parámetros de Seguridad. Es importante añadir un factor de seguridad (k) para considerar pérdidas no ideales (por ejemplo, fugas de corriente, tolerancias, etc.). Este factor se aplica al consumo total diario

.

Tabla 46

Parámetros de seguridad

Parámetro	Valor Típico	Explicación
K	1.10 - 1.20	Incluye fugas de PCB, tolerancia de componentes y autodescarga de batería
$\boldsymbol{I_{tx}}$	$I_{tx_real} + 20\%$	Margen para picos de corriente no ideales
C	$C_{nominal} \times 0.95$	Considera degradación por temperatura/ciclos

Estrategia de Optimización Energética. Para lograr que las baterías compactas puedan funcionar correctamente, se implementaron las siguientes tácticas:

Hardware

- RTC Externo (RV-3028-C7). Permite un consumo de 0.25 µA en hibernación y apagar el nRF52833 (System OFF) cuando el taller está inactivo.

Firmware.

- Configuración AoA Optimizada. Se usan 2 slots IQ (en lugar de 4), lo cual reduce tiempo de TX en 50%. Además, el PHY se reduce a 1Mbps, lo que genera un menor consumo que 2 Mbps.

- Gestión Dinámica de Energía. Se realiza TX cada 7s, en horario laboral, y fuera de este, en estado de hibernación (System OFF + RTC), 6 horas al día. Adicionalmente, si la batería está baja ($V_{bat} < 2.9V$, aumentar intervalo a TX cada 15s.

PCB. Se diseñó la pcb para tener un layout de 6 capas para minimizar pérdidas, una antena aislada con zona keep-out en GND y trazados cortos para reducir resistencia parásita.

El proceso permitió seleccionar la CR1220 como la mejor opción, equilibrando:

- Tamaño mínimo (12.5 mm ⌀ × 2.0 mm).
- Vida útil garantizada (12.2 meses con optimizaciones).

Asimismo, es importante aclarar las equivalencias entre los diferentes modos energéticos del nRF52833.

Figura 65

Corriente empleada según nRF52833

Radio current consumption DC/DC at 3 V	15.50 mA at +8 dBm TX power, 6 mA at 0 dBm TX power, 6 mA in RX at 1 Mbps
Oscillators	64 MHz from 32 MHz external crystal or internal 32 kHz from crystal, RC or synthesized
System current consumption DC/DC at 3 V	0.6 µA in System OFF, no RAM retention 1.3 µA in System OFF, full RAM retention 1.1 µA in System ON, no RAM retention 1.8 µA in System ON, full RAM retention 2.6 µA in System ON, full RAM retention and RTC

Tabla 47

Mapeo de modos operativos vs. Términos técnicos

Terminología general	Terminología nRF52833	Consumo (3V)	¿Mantiene Configuraciones?
TX	Active Mode (Radio ON)	6 mA (0 dBm)	-
Deep Sleep	System ON + RAM Retention + RTC	2.6 µA	Sí (todo preservado)
Hibernación	System OFF + Full RAM Retention	1.3 µA	Sí* (con restauración)

A continuación, se resumen los parámetros encontrados en la datasheet del módulo.

Tabla 48

Parámetros completados

Parámetro	Valor	Fuente/Justificación
Corriente TX (I_tx)	7.2 mA	6 mA (0 dBm en datasheet) × 20% margen = 7.2 mA
I_ds (Deep Sleep)	2.6 µA	System ON + RAM Retention + RTC (datasheet p. 58)

I_hib (Hibernación)	1.55 µA	System OFF (0.6 µA) + RTC externo AB1815 (0.25 µA) + RAM retention (0.7 µA) = 1.55 µA
Capacidad ajustada	C × 0.90	Degradación por temperatura/ciclos (conservador)

Asimismo, se completaron los datos para usar las fórmulas anteriormente planteadas para las 3 baterías más compactas.

Parámetro	**CR2032**	**CR1632**	**CR1220**
Capacidad nominal (mAh)	235	130	37
Capacidad ajustada	211.5	117	33.3
I_tx (mA)	7.2	7.2	7.2
t_tx (s)	0.001	0.001	0.001
T (s)	6	6	6
H_act (h)	18	18	18
I_ds (µA)	2.6	2.6	2.6
I_hib (µA)	1.55	1.55	1.55
H_hib (h)	6	6	6
Factor k	1.20	1.20	1.20

Realizando los cálculos correspondientes tenemos como resultado que la CR1220 no alcanzaría al mínimo 12 meses necesarios con un periodo T de 6 segundos.

Tabla 49

Resultados preliminares para las 3 baterías

Batería	Autonomía (meses)	¿Cumple 14 meses?
CR2032	25.6	Sobrado
CR1632	14.2	Justo
CR1220	11.7	Falla por 2.3 meses

Es por ello por lo que, para solucionar el problema de la durabilidad, se recalculó la duración de la CR1220 para TX cada 7 segundos.

Ecuación 24

Cálculos para CR1220 (TX cada 7s)

$$C = 37 \times 0.90 = 33.3\, mAh$$

$$N_{tx} = \frac{18 \times 3600}{7} = 9257.1429$$

$$E_{tx} = \frac{7.2 \times 0.001 \times 9257.1429}{3600} = 0.018514\, mAh$$

$$E_{ds} = \left(\frac{2.6}{1000}\right) \times 18 = 0.0468\, mAh$$

$$E_{hib} = \left(\frac{1.55}{1000}\right) \times 6 = 0.0093\, mAh$$

$$E_{sink} = 0.018514 + 0.0468 + 0.0093 = 0.074614 mAh$$

$$E_{total} = 0.074614 \times 1.20 = 0.0895368mAh$$

$$A_{días} = \frac{33.3}{0.0895368} = 371.91$$

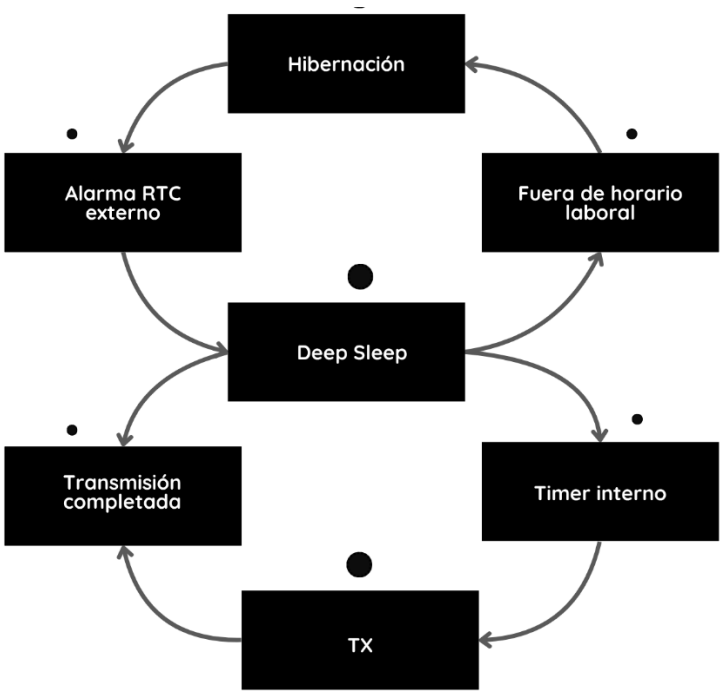
$$A_{meses} = \frac{371.91}{30.44} = 12.2\ meses$$

Nota: Con este nuevo cálculo no se sacrifican horas activas, ya que siguen siendo 18 horas, y se pasa del mínimo establecido de 12 meses. Además, se está teniendo en cuenta que este es un cálculo conservador, ya que se está usando un factor k de 1.20, lo cual incluye otros márgenes.

El flujo completo optimizado de modos de energía para el nRF52833 con la batería CR1220 sería el siguiente.

Figura 66

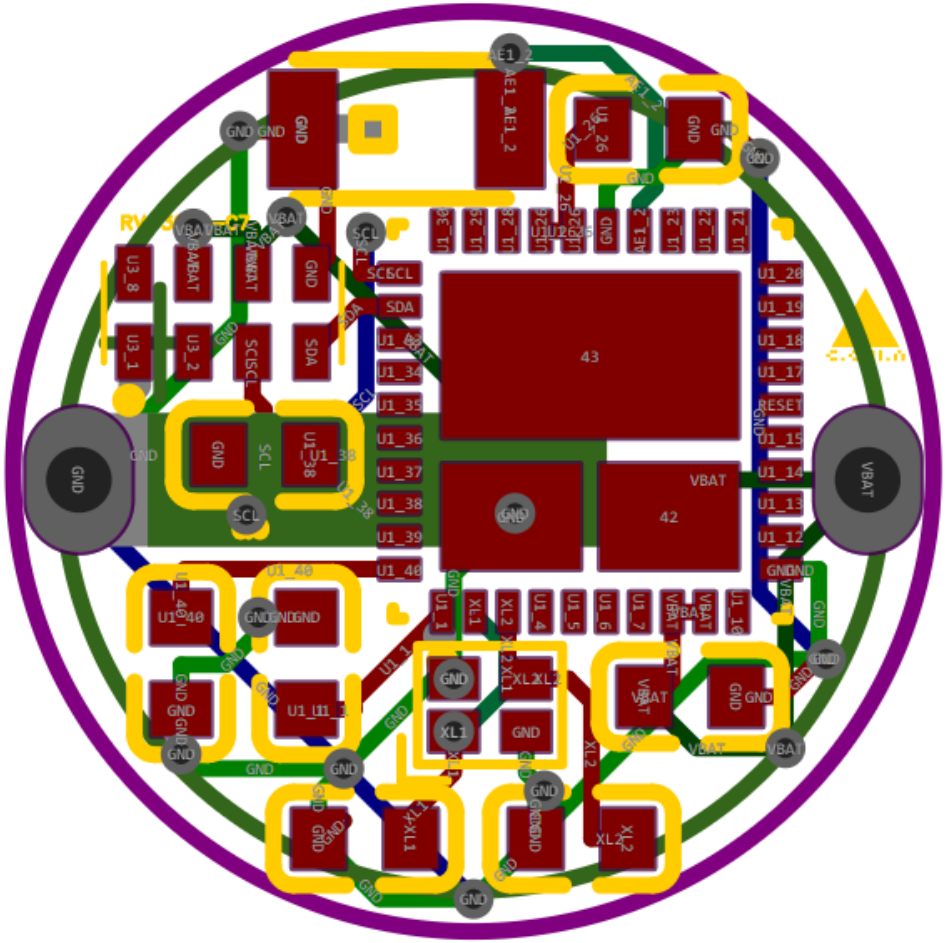
Flujo Operativo Optimizado



Nota: La fase “TX” dura milisegundos, y el periodo en Deep sleep es contado por lel timer interno. Por otro lado, el tiempo fuera de horario laboral es contado por el RTC externo.

Figura 67

PCB



Nota: Se separaron las conexiones en las capas de la PCB para mejor organización del circuito.

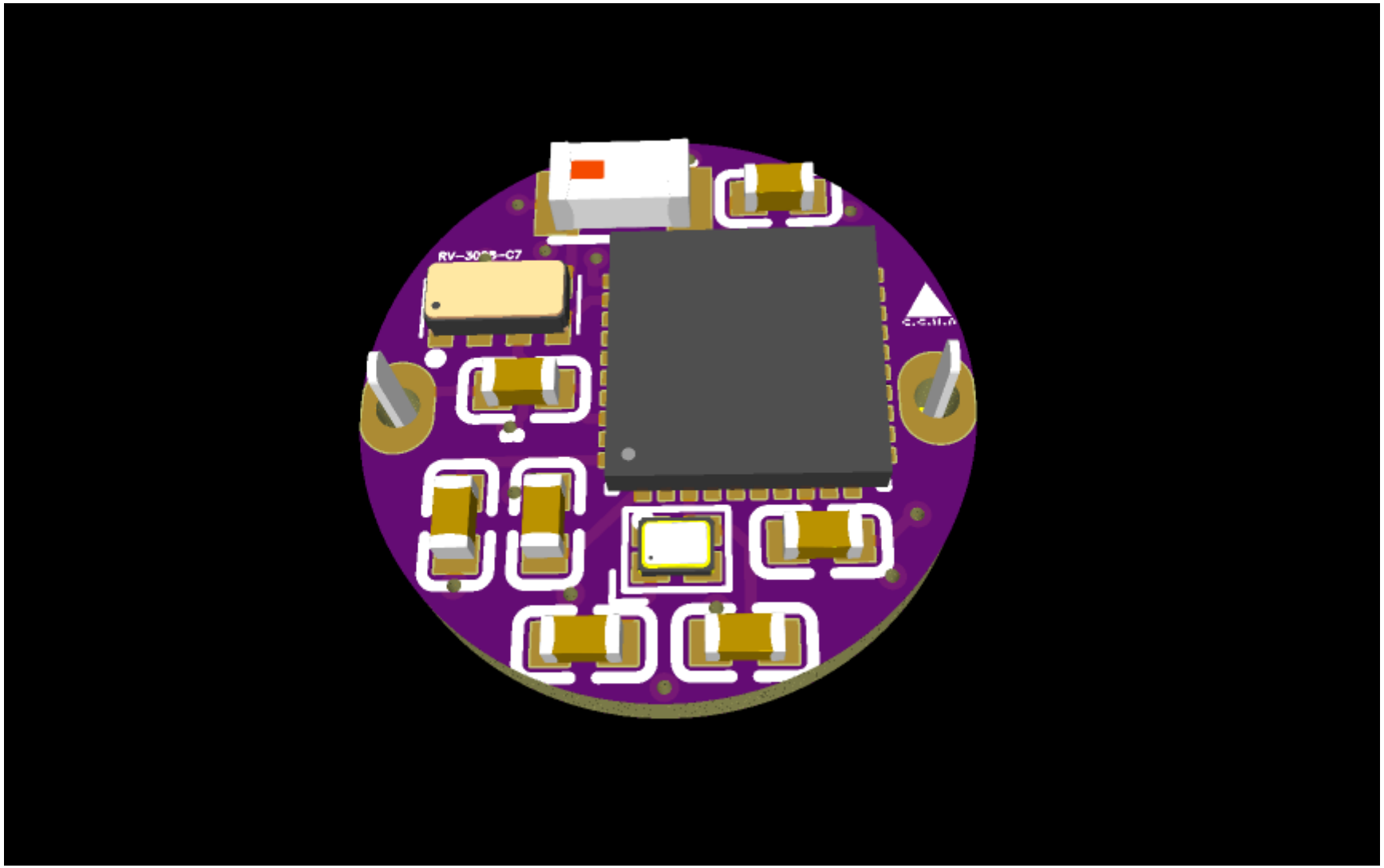
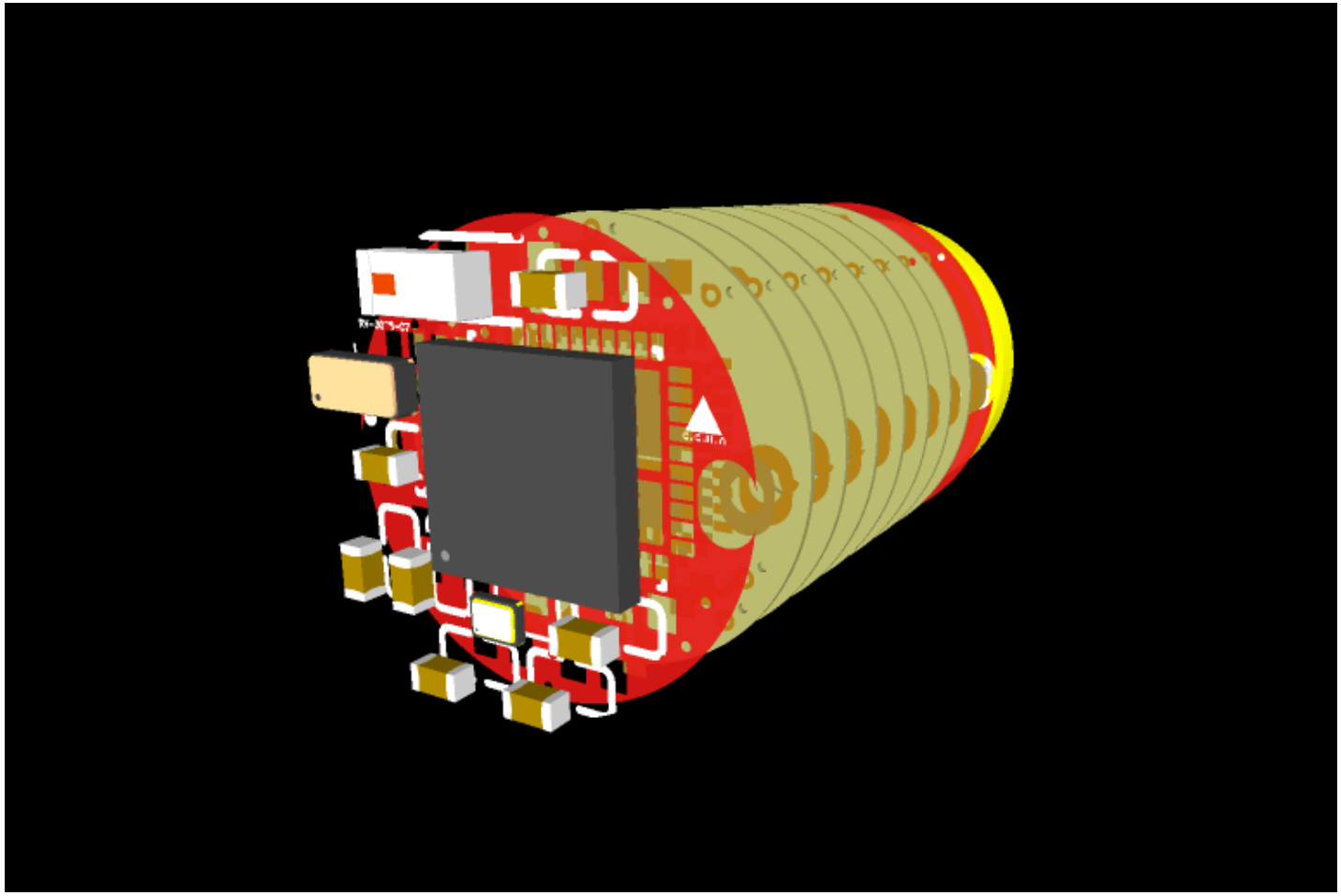

RV-3025-C7

Figura 68

Vista 3D del PCB del beacon con capas separadas



Nota: La separación entre capas en esta vista es de 1.2mm.

Anexo C

Código del sistema

En esta sección se incluye el código fuente del sistema diseñado en el presente proyecto. Esta sección incluye el código de configuración de los beacons y los gateways, así como el flujo de nodos de envío y limpieza de datos en Node-RED, el envío y ordenamiento de datos en Google Sheets, los comandos de envío por MQTT y el script de notificaciones a correo electrónico, la estructura del proyecto, la estructura de la base de datos en Big Query y los comandos más útiles para consulta.

Figura 69

Código para el beacon

```
//librerías necesarias

#include <stdint.h>

#include <string.h>

#include <stdlib.h>

#include "nrf.h"

#include "nrf52833.h"

#include "nrf_delay.h"

#include "nrf_gpio.h"

#include "nrf_drv_twi.h"

#include "nrf_drv_clock.h"

#include "nrfx_gpiote.h"

#include "ble.h"

#include "ble_advdata.h"

#include "ble_advertising.h"
```

```
#include "nrf_sdh_ble.h"

#include "nrf_sdh_soc.h"

#include "nrf_pwr_mgmt.h"

#include "nrfx_saadc.h"


// --- Configuración RTC Externo (DS3231) ---

#define TWI_INSTANCE_ID     0

#define RTC_ADDR            0x68

#define SDA_PIN             32

#define SCL_PIN             31


static const nrf_drv_twi_t m_twi = NRF_DRV_TWI_INSTANCE(TWI_INSTANCE_ID);


// --- Parámetros del Sistema ---

#define DEVICE_NAME         "AoA_Beacon"

#define ADV_INTERVAL_ACTIVE 7000    // 7 segundos (modo activo)

#define ADV_INTERVAL_LOWBAT 15000   // 15 segundos (batería baja)

#define TX_POWER_DBM        0       // 0 dBm

#define CTE_LENGTH_US       20      // 20 µs

#define CTE_SLOT_DURATION   2       // 2 µs por slot

#define BATTERY_MIN_V       2900    // 2.9V (2900 mV)

#define ACTIVE_HOUR_START   6       // 6:00 AM
```

```
#define ACTIVE_HOUR_END     24      // 12:00 AM (24:00)


// Estructura jerárquica del beacon
typedef struct {
    char taller[32];
    char bahia[32];
    char herramienta[32];
    uint32_t codigo;
} beacon_identity_t;


static beacon_identity_t beacon_id = {
    .taller = "taller crc",
    .bahia = "bahia A20 Motores",
    .herramienta = "Torquimetro",
    .codigo = 6000594
};


// Variables globales
static uint16_t battery_voltage = 0;
static bool is_active_mode = false;
static bool low_battery_mode = false;
```

```
// --- Prototipos de funciones ---

static void twi_init(void);

static void rtc_get_time(uint8_t *hours, uint8_t *minutes);

static void advertising_init(void);

static void advertising_start(void);

static void cte_config(void);

static void battery_monitor_init(void);

static void battery_measure(void);

static void sleep_mode_enter(void);

static void check_operational_mode(void);

static void set_adv_interval_with_jitter(void);


/**@brief Inicialización del TWI (I2C) para RTC */

static void twi_init(void) {

    const nrf_drv_twi_config_t twi_config = {

        .scl                = SCL_PIN,

        .sda                = SDA_PIN,

        .frequency          = NRF_DRV_TWI_FREQ_100K,

        .interrupt_priority = APP_IRQ_PRIORITY_LOW,

        .clear_bus_init     = false

    };

    nrf_drv_twi_init(&m_twi, &twi_config, NULL, NULL);
```

```
    nrf_drv_twi_enable(&m_twi);
}

/**@brief Leer hora del RTC */
static void rtc_get_time(uint8_t *hours, uint8_t *minutes) {
    uint8_t reg = 0x00; // Registro de segundos
    uint8_t data[3];

    nrf_drv_twi_tx(&m_twi, RTC_ADDR, &reg, 1, true);
    nrf_drv_twi_rx(&m_trv_twi, RTC_ADDR, data, 3);

    // Convertir BCD a decimal
    *minutes = (data[1] & 0x0F) + ((data[1] >> 4) * 10);
    *hours = (data[2] & 0x0F) + (((data[2] & 0x30) >> 4) * 10);
}

/**@brief Configurar CTE para AoA */
static void cte_config(void) {
    ble_opt_t opt = {
        .common_opt = {
            .conn_evt_ext_enable : {
                .enable = 1,
```

```
            .pa_lna = 0,
            .cte = 1
        }
    }
};
sd_ble_opt_set(BLE_COMMON_OPT_CONN_EVT_EXT, &opt);

ble_conn_cte_tx_param_t cte_params = {
    .cte_types = BLE_CONN_CTE_TYPE_AOA,
    .cte_len   = CTE_LENGTH_US,
    .cte_count = 5,
    .slot_dur  = CTE_SLOT_DURATION
};
sd_ble_gap_conn_cte_tx_param_set(0, &cte_params);
}

/**@brief Inicializar monitor de batería */
static void battery_monitor_init(void) {
    nrfx_saadc_config_t saadc_config = NRFX_SAADC_DEFAULT_CONFIG;
    nrfx_saadc_init(&saadc_config, NULL);

    nrf_saadc_channel_config_t channel_config = {
```

```
        .resistor_p = NRF_SAADC_RESISTOR_DISABLED,
        .resistor_n = NRF_SAADC_RESISTOR_DISABLED,
        .gain       = NRF_SAADC_GAIN1_6,
        .reference  = NRF_SAADC_REFERENCE_INTERNAL,
        .acq_time   = NRF_SAADC_ACQTIME_10US,
        .mode       = NRF_SAADC_MODE_SINGLE_ENDED,
        .burst      = NRF_SAADC_BURST_DISABLED,
        .pin_p      = NRF_SAADC_INPUT_VDD,
        .pin_n      = NRF_SAADC_INPUT_DISABLED
    };
    nrfx_saadc_channel_init(0, &channel_config);
}

/**@brief Medir voltaje de batería */
static void battery_measure(void) {
    nrf_saadc_value_t adc_value;
    nrfx_saadc_sample_convert(0, &adc_value);

    // Convertir a mV: (adc_value * 3600 * 6) / 1024 / 1.6
    battery_voltage = (adc_value * 3600 * 6) / (1024 * 1.6);

    // Verificar modo baja batería
```

```
    low_battery_mode = (battery_voltage < BATTERY_MIN_V);
}

/**@brief Configurar intervalo de publicidad con jitter */
static void set_adv_interval_with_jitter(void) {
    uint32_t base_interval = low_battery_mode ? ADV_INTERVAL_LOWBAT :
ADV_INTERVAL_ACTIVE;

    // Añadir jitter aleatorio (±500ms)
    uint32_t jitter = (rand() % 1000) - 500;
    uint32_t final_interval = base_interval + jitter;

    ble_adv_params_t adv_params = {
        .properties.type =
BLE_GAP_ADV_TYPE_EXTENDED_NONCONNECTABLE_NONSCANNABLE_UNDIRECTE
D,
        .primary_phy = BLE_GAP_PHY_1MBPS,
        .interval = MSEC_TO_UNITS(final_interval, UNIT_0_625_MS),
        .tx_power = TX_POWER_DBM
    };

    sd_ble_gap_adv_set_configure(NULL, &adv_params);
}
```

```
/**@brief Verificar modo operacional basado en hora RTC */
static void check_operational_mode(void) {
    uint8_t current_hour, current_minute;
    rtc_get_time(&current_hour, &current_minute);

    is_active_mode = (current_hour >= ACTIVE_HOUR_START && current_hour <
ACTIVE_HOUR_END);
}

/**@brief Entrar en modo hibernación */
static void sleep_mode_enter(void) {
    // Preparar RTC para despertar a las 6:00 AM
    uint8_t alarm_data[4] = {
        0x00,           // Segundos
        0x00,           // Minutos
        ACTIVE_HOUR_START,  // Hora
        0x80            // Máscara: activar solo por hora
    };

    nrf_drv_twi_tx(&m_twi, RTC_ADDR, alarm_data, 4, false);

    // Configurar interrupción de despertador
```

```
    nrf_gpio_cfg_sense_input(RTC_INT_PIN, NRF_GPIO_PIN_PULLUP,
NRF_GPIO_PIN_SENSE_LOW);

    // Entrar en modo System OFF con retención de RAM
    sd_power_system_off();
}

/**@brief Inicializar publicidad con datos personalizados */
static void advertising_init(void) {
    // Crear payload personalizado
    uint8_t adv_data[50];
    uint8_t index = 0;

    // Flags BLE
    adv_data[index++] = 0x02;  // Longitud
    adv_data[index++] = 0x01;  // Tipo: Flags
    adv_data[index++] = 0x06;  // Flags: LE General, BR/EDR no soportado

    // Datos personalizados (estructura jerárquica)
    adv_data[index++] = sizeof(beacon_id) + 2;
    adv_data[index++] = 0xFF;  // Tipo: Manufacturer Specific Data
    adv_data[index++] = 0xFE;  // ID Compañía (custom)
    adv_data[index++] = 0xFE;
```

```
    memcpy(&adv_data[index], &beacon_id, sizeof(beacon_id));
    index += sizeof(beacon_id);

    // Configurar parámetros de publicidad
    ble_advdata_t advdata = {
        .include_appearance = false,
        .flags = BLE_GAP_ADV_FLAGS_LE_ONLY_GENERAL_DISC_MODE,
        .p_manuf_specific_data = {
            .data = adv_data,
            .size = index
        }
    };

    ble_adv_params_t adv_params = {
        .properties.type =
BLE_GAP_ADV_TYPE_EXTENDED_NONCONNECTABLE_NONSCANNABLE_UNDIRECTE
D,
        .primary_phy = BLE_GAP_PHY_1MBPS,
        .tx_power = TX_POWER_DBM
    };

    set_adv_interval_with_jitter();
    ble_advertising_init(&adv_params, &advdata);
```

```
}

/**@brief Función principal */
int main(void) {
    // 1. Inicializaciones básicas
    nrf_drv_clock_init();
    nrf_drv_clock_lfclk_request(NULL);
    nrf_pwr_mgmt_init();
    twi_init();
    battery_monitor_init();

    // 2. Verificar modo operacional
    check_operational_mode();

    if (!is_active_mode) {
        sleep_mode_enter();
    }

    // 3. Inicializar BLE y publicidad
    ble_stack_init();
    cte_config();
    advertising_init();
```

```
    // 4. Bucle principal
    while (true) {
        battery_measure();
        set_adv_interval_with_jitter();
        advertising_start();

        // Esperar hasta próximo ciclo
        uint32_t sleep_time = low_battery_mode ? ADV_INTERVAL_LOWBAT :
ADV_INTERVAL_ACTIVE;
        nrf_delay_ms(sleep_time);

        // Re-verificar modo operacional cada hora
        static uint8_t hour_counter = 0;
        if (++hour_counter >= 60) {
            check_operational_mode();
            hour_counter = 0;

            if (!is_active_mode) {
                sleep_mode_enter();
            }
        }
    }
```

}

Figura 70

Algoritmo del Firmware del Beacon

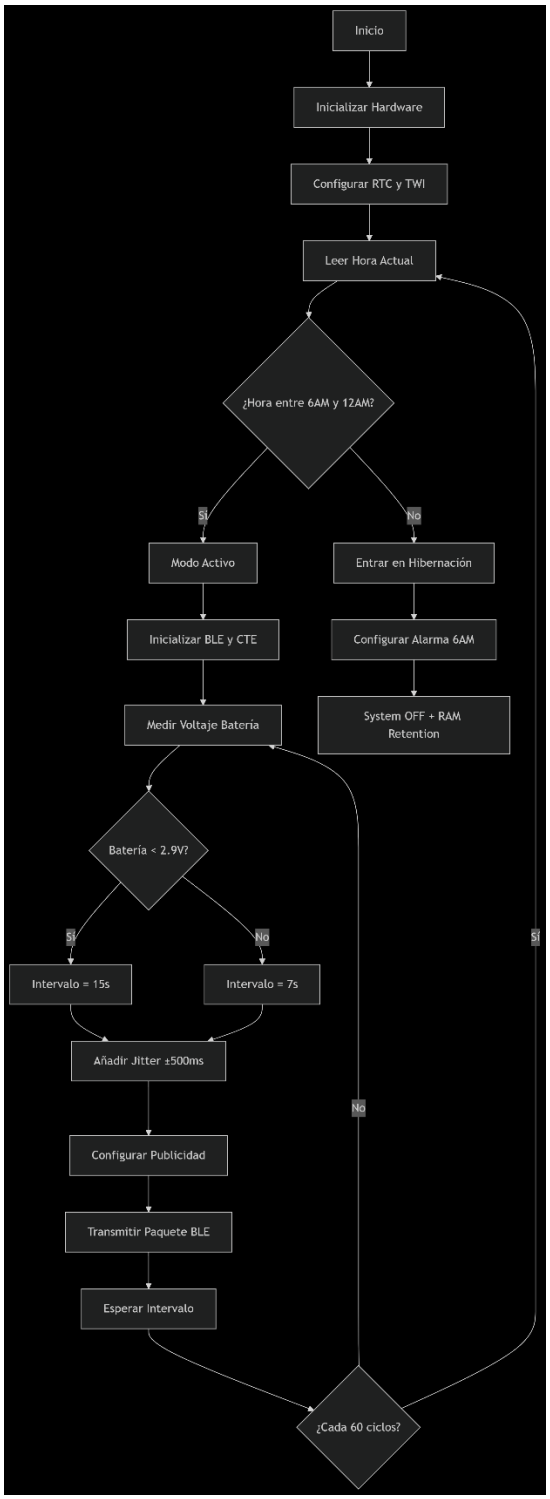


Figura 71

Código de gateway

```
#include <WiFi.h>

#include <PubSubClient.h>

#include <BLEDevice.h>

#include <BLEUtils.h>

#include <BLEScan.h>

#include <BLEAdvertisedDevice.h>

#include <ArduinoJson.h>

#include "time.h"

#include <esp_bt.h>

#include <esp_bt_main.h>

#include <esp_gap_ble_api.h>


//=================== CONFIGURACIÓN CONSTANTES ===================

#define GATEWAY_ID "ESP32_AoA_Gateway_1"

#define ANTENNA_COUNT 4  // Número de antenas en el arreglo físico


// WiFi y MQTT

#define WIFI_SSID "RedDinamometro"

#define WIFI_PASSWORD "12345678"
```

```
#define MQTT_SERVER "192.168.50.67"

#define MQTT_PORT 1883

#define MQTT_TOPIC "rtls/aoa/raw_iq"


// NTP

const char* ntpServer = "pool.ntp.org";

const long gmtOffset_sec = -5 * 3600;

const int daylightOffset_sec = 0;


//==================== VARIABLES GLOBALES ====================

WiFiClient espClient;

PubSubClient client(espClient);

QueueHandle_t iqQueue;  // Cola para manejar muestras IQ


//==================== PROTOTIPOS ====================

void setupBLEAoA();

void gapCallback(esp_gap_ble_cb_event_t event, esp_ble_gap_cb_param_t* param);

void processCTEReport(const esp_ble_gap_cte_report_t* report);

void publishIQData(const char* beacon_mac, int rssi, const esp_ble_aoa_iq_sample_t* iq_samples,
uint16_t sample_count);


//==================== SETUP ====================

void setup() {
```

```
  Serial.begin(115200);


  // 1. Conectar WiFi
  WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASSWORD);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("\n🟢 WiFi conectado");


  // 2. Configurar NTP
  configTime(gmtOffset_sec, daylightOffset_sec, ntpServer);


  // 3. Configurar MQTT
  client.setServer(MQTT_SERVER, MQTT_PORT);


  // 4. Crear cola para muestras IQ
  iqQueue = xQueueCreate(10, sizeof(esp_ble_aoa_iq_sample_t) * 100);


  // 5. Inicializar BLE para AoA
  setupBLEAoA();
}
```

```
//=================== LOOP ===================

void loop() {

  // Mantener conexión MQTT

  if (!client.connected()) {

    if (client.connect(GATEWAY_ID)) {

      Serial.println("🟢 MQTT conectado");

    }

  }

  client.loop();


  // Procesar cola de muestras IQ

  static esp_ble_aoa_iq_sample_t iq_samples[100];

  static char beacon_mac[18] = {0};

  static int rssi = 0;

  static uint16_t sample_count = 0;


  if (xQueueReceive(iqQueue, &iq_samples, 0) == pdTRUE) {

    publishIQData(beacon_mac, rssi, iq_samples, sample_count);

  }


  delay(10);
```

```
}

//==================== BLE AoA SETUP ====================
void setupBLEAoA() {
  // Inicializar controlador BLE
  esp_bt_controller_mem_release(ESP_BT_MODE_CLASSIC_BT);
  esp_bt_controller_init();
  esp_bt_controller_enable(ESP_BT_MODE_BLE);

  // Registrar callback
  esp_ble_gap_register_callback(gapCallback);

  // Configurar parámetros CTE
  esp_ble_gap_cte_rx_param_t cte_rx_param = {
    .cte_type = ESP_BLE_CTE_TYPE_AOA,
    .slot_durations = 2,  // 2us por slot
    .num_ant_ids = ANTENNA_COUNT,
    .ant_ids = {0, 1, 2, 3}  // IDs de antenas
  };
  esp_ble_gap_set_cte_rx_param(0, &cte_rx_param);
  esp_ble_gap_set_cte_rx_enable(true, 0, 0, 0);
```

```
  Serial.println("🔵 Escaneo AoA activado");
}

//==================== BLE CALLBACK ====================
void gapCallback(esp_gap_ble_cb_event_t event, esp_ble_gap_cb_param_t* param) {
  if (event == ESP_GAP_BLE_CTE_REPORT_EVT) {
    processCTEReport(&param->cte_report);
  }
}

//==================== PROCESAMIENTO DE DATOS CTE ====================
void processCTEReport(const esp_ble_gap_cte_report_t* report) {
  // Solo procesar si los datos son válidos
  if (report->packet_status != 0) return;

  // Extraer MAC del beacon
  char beacon_mac[18];
  snprintf(beacon_mac, 18, "%02X:%02X:%02X:%02X:%02X:%02X",
           report->bda[0], report->bda[1], report->bda[2],
           report->bda[3], report->bda[4], report->bda[5]);

  // Preparar datos para publicación
```

```
  esp_ble_aoa_iq_sample_t iq_samples[report->num_iq_samples];
  memcpy(iq_samples, report->iq_samples,
         sizeof(esp_ble_aoa_iq_sample_t) * report->num_iq_samples);

  // Enviar a la cola para procesamiento asíncrono
  xQueueSend(iqQueue, iq_samples, portMAX_DELAY);
}

//================== PUBLICACIÓN MQTT ==================
void publishIQData(const char* beacon_mac, int rssi,
                   const esp_ble_aoa_iq_sample_t* iq_samples,
                   uint16_t sample_count) {
  // Crear documento JSON
  DynamicJsonDocument doc(2048);

  // Agregar metadatos
  doc["gateway"] = GATEWAY_ID;
  doc["mac"] = beacon_mac;
  doc["rssi"] = rssi;
  doc["timestamp"] = time(nullptr);
  doc["sample_count"] = sample_count;
```

```
  // Agregar muestras IQ
  JsonArray iq_array = doc.createNestedArray("iq_samples");
  for (int i = 0; i < sample_count; i++) {
    JsonObject sample = iq_array.createNestedObject();
    sample["i"] = iq_samples[i].i;
    sample["q"] = iq_samples[i].q;
    sample["ant_id"] = iq_samples[i].ant_id;
  }

  // Serializar y publicar
  char jsonBuffer[2048];
  serializeJson(doc, jsonBuffer);

  if (client.connected()) {
    client.publish(MQTT_TOPIC, jsonBuffer);
  }
}
```

Figura 72

Diagrama del flujo del gateway ESP32

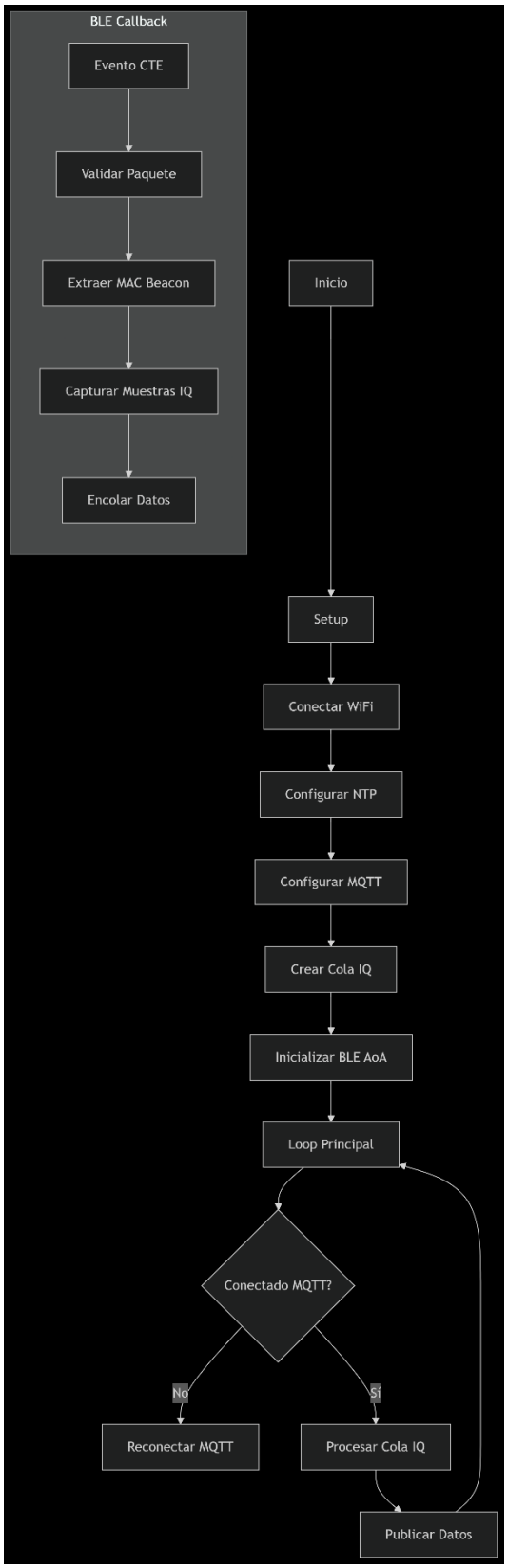


Figura 73

Flujo de Node-RED


```
[
  {
    "id": "mqtt_input_iq",
    "type": "mqtt in",
    "z": "1",
    "name": "Suscripción MQTT IQ",
    "topic": "rtls/aoa/raw_iq",
    "qos": "0",
    "datatype": "auto",
    "broker": "mqtt_broker_config",
    "x": 150,
    "y": 80,
    "wires": [["json_parser"]]
  },
  {
    "id": "json_parser",
    "type": "json",
    "z": "1",
    "name": "Parsear JSON",
    "property": "payload",
```

"action": "",

"pretty": false,

"x": 350,

"y": 80,

"wires": [["iq_processing"]]

},

{

"id": "iq_processing",

"type": "function",

"z": "1",

"name": "Procesar muestras IQ",

"func": "// Simulación simple de posición X/Y a partir de IQ\nconst iq = msg.payload.iq_samples;\nconst rssi = msg.payload.rssi;\nconst mac = msg.payload.mac;\n\nlet x = 0;\nlet y = 0;\n\nfor (let i = 0; i < iq.length; i++) {\n x += iq[i].i * Math.cos(iq[i].ant_id);\n y += iq[i].q * Math.sin(iq[i].ant_id);\n}\n\nx = x / iq.length;\ny = y / iq.length;\n\n// Guardar timestamp por MAC\nflow.set(\"beacon_\" + mac, Date.now());\n\nmsg.payload = {\n mac: mac,\n x: x.toFixed(2),\n y: y.toFixed(2),\n rssi: rssi\n};\nreturn msg;",

"outputs": 1,

"noerr": 0,

"x": 570,

"y": 80,

"wires": [["position_dashboard"]]

},

```
{
  "id": "position_dashboard",
  "type": "ui_gauge",
  "z": "1",
  "name": "Posición Beacon",
  "group": "dashboard_group",
  "order": 1,
  "width": 6,
  "height": 2,
  "gtype": "compass",
  "title": "Beacon {{payload.mac}}",
  "label": "Posición X,Y",
  "format": "{{payload.x}}, {{payload.y}}",
  "min": 0,
  "max": 100,
  "colors": ["#00b500", "#e6e600", "#ca3838"],
  "x": 800,
  "y": 80,
  "wires": []
},
{
  "id": "beacon_timeout",
```

"type": "inject",

"z": "1",

"name": "Verificar beacons cada 30s",

"props": [{"p": "payload"}],

"repeat": "30",

"once": true,

"onceDelay": "10",

"x": 180,

"y": 200,

"wires": [["check_beacons_presence"]]

},

{

"id": "check_beacons_presence",

"type": "function",

"z": "1",

"name": "Revisar beacons activos",

"func": "let beacons = ['AA:BB:CC:DD:EE:01', 'AA:BB:CC:DD:EE:02']; // personalizar\nlet now = Date.now();\nlet lost = [];\n\nfor (let mac of beacons) {\n let lastSeen = flow.get(\"beacon_\" + mac);\n if (!lastSeen || (now - lastSeen > 60000)) {\n   lost.push(mac);\n }\n}\n\nif (lost.length > 0) {\n msg.payload = \"Beacons fuera de rango: \" + lost.join(\", \");\n return msg;\n}\nreturn null;",

"outputs": 1,

"x": 470,

"y": 200,

"wires": [["ui_alert"]]

},

{

"id": "ui_alert",

"type": "ui_text",

"z": "1",

"group": "dashboard_group",

"order": 2,

"width": 6,

"height": 1,

"name": "Alerta de pérdida",

"label": "⚠ Alerta:",

"format": "{{msg.payload}}",

"layout": "row-spread",

"x": 720,

"y": 200,

"wires": []

},

{

"id": "mqtt_broker_config",

"type": "mqtt-broker",

"name": "Broker Local",

"broker": "192.168.50.67",

"port": "1883",

"clientid": "",

"usetls": false,

"protocolVersion": "4",

"keepalive": "60",

"cleansession": true,

"birthTopic": "",

"birthQos": "0",

"birthPayload": "",

"closeTopic": "",

"closePayload": "",

"willTopic": "",

"willQos": "0",

"willPayload": ""

},

{

"id": "dashboard_group",

"type": "ui_group",

"name": "RTLS Monitor",

"tab": "dashboard_tab",

```
    "order": 1,
    "disp": true,
    "width": "6",
    "collapse": false
  },
  {
    "id": "dashboard_tab",
    "type": "ui_tab",
    "name": "RTLS Dashboard",
    "icon": "dashboard",
    "order": 1
  }
]
```

Figura 74

Google Apps Script para Notificaciones Automáticas de Vencimientos

```
function checkExpirationsAndSendEmails() {

  // Configuración

  const SPREADSHEET_ID =
'https://docs.google.com/spreadsheets/d/1Nhuh8FCcVPjRaVg6oCat_sHnUdYsTDMtHTY3TKsbaY
M/edit?gid=0#gid=0';

  const SHEET_NAME = 'Hoja1';

  const EMAIL_COL = 2; // Columna B (correos)

  const DATE_COL = 3;  // Columna C (fechas de vencimiento)

  const STATUS_COL = 4; // Columna D (estado de notificación)



  // Acceder a la hoja de cálculo

  const ss = SpreadsheetApp.openById(SPREADSHEET_ID);

  const sheet = ss.getSheetByName(SHEET_NAME);

  const data = sheet.getDataRange().getValues();



  // Fecha actual (sin hora)

  const today = new Date();

  today.setHours(0, 0, 0, 0);



  // Saltar encabezados (fila 1)

  for (let i = 1; i < data.length; i++) {
```

```
const row = data[i];

const email = row[EMAIL_COL - 1];

const date = new Date(row[DATE_COL - 1]);

const status = row[STATUS_COL - 1];


// Validar si es una fila válida

if (!email || !date || status === 'Notificado') continue;


// Comparar fechas (ignorando horas)

date.setHours(0, 0, 0, 0);


if (date < today) {

  // Enviar correo

  MailApp.sendEmail({

    to: email,

    subject: '⚠️ Aviso: Elemento Vencido',

    htmlBody: `

      <h2>Notificación de Vencimiento</h2>

      <p>El elemento en la fila ${i + 1} ha vencido.</p>

      <p><strong>Fecha de vencimiento:</strong> ${date.toLocaleDateString()}</p>

      <p>Por favor, tome las acciones necesarias.</p>

      <hr>
```

```
        <p><em>Este es un mensaje automático. No responder.</em></p>
      `
    });

    // Marcar como notificado
    sheet.getRange(i + 1, STATUS_COL).setValue('Notificado');

    // Pequeña pausa para evitar límites de cuota
    Utilities.sleep(1000);
  }
}
}
```

Figura 75

Diagrama de flujo del AppScript

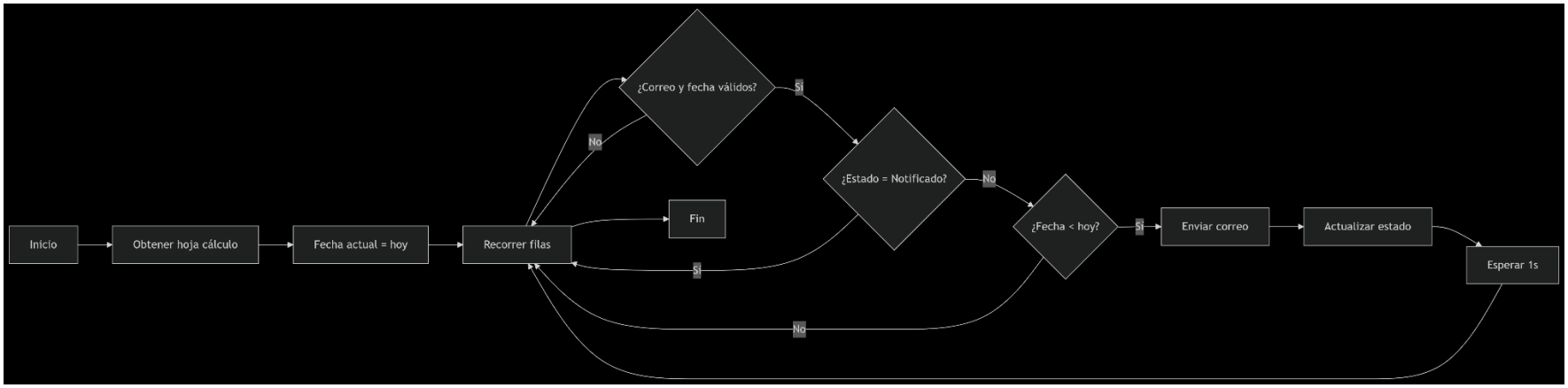
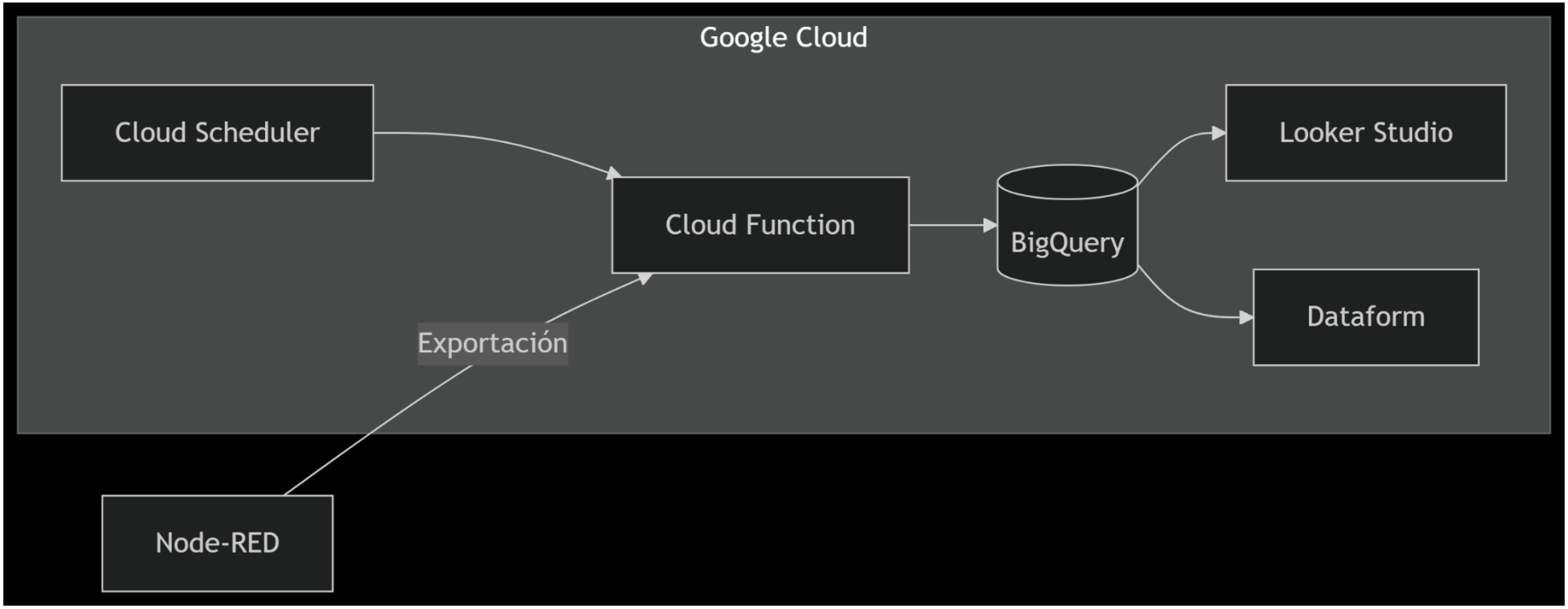


Figura 76

Flujo de entrada a BigQuery