

**Diseño y Construcción de Sistema de Medición Múltiple de Manera Inalámbrica Aplicado
al Diagnóstico de Maquinaria de Construcción**

Sergio Armando Reyes Medina

Tutor

Adriana Noguera

Universidad Nacional Abierta Y A Distancia
Escuela De Ciencias Básicas, Tecnología E Ingeniería
Ingeniería Electrónica

2022

Dedicatoria

A Dios que me da la fortaleza cada día, a mi familia que me ha apoyado de manera incondicional durante mi formación y a mi hija María del Mar que me impulsa a dar lo mejor de mí todos los días.

Resumen

El diagnóstico de sistemas electrónicos en maquinaria de construcción específicamente en el caso de maquinaria de movimiento de tierra y maquinaria de levantamiento de cargas es un reto debido a la alta integración de componentes, computadores, sensores y actuadores presentes en sistemas electrónicos modernos por lo cual el objetivo principal es desarrollar un prototipo de sistema de medición inalámbrico de múltiples canales que permita crear una red de medición en diferentes puntos de la máquina a intervenir de manera simultánea, en donde varios módulos de medición envían datos a un módulo central o master que los procesa y a su vez envía a un dispositivo de visualización. Se fabrican dos prototipos en donde en el segundo se aplican técnicas de integración de componentes mejorando sus características de medición, visualización y tamaño, en la etapa de diseño se hace uso de herramientas de software libres en donde se concluye como estas nos permiten obtener resultados de alta calidad en el proceso de desarrollo de dispositivos electrónicos. Finalmente se realizan tanto pruebas de laboratorio como de campo en donde se evalúan los prototipos y su potencial en el diagnóstico de maquinaria de construcción.

Palabras clave: Medición, Instrumentación, Maquinaria de construcción, Diagnóstico, Red de medición.

Abstract

The diagnosis of electronic systems in construction machinery is a challenge due to the high integration of components, computers, sensors and actuators present in modern equipment, for which the main objective is to develop a prototype of a multi-channel wireless measurement system that allows creating a measurement network at different points of the equipment to intervene simultaneously, where several measurement modules send data to a central or master module that processes them and in turn sends them to a display device. Two prototypes are manufactured where in the second component integration techniques are applied improving their measurement, visualization and size characteristics, in the design stage free software tools are used where it is concluded how these allow us to obtain results of high quality in the development process of electronic devices. Finally, both laboratory and field tests are carried out where the prototypes and their potential in the diagnosis of construction machinery are evaluated.

Keywords: Measurement, Instrumentation, Construction machinery, Diagnosis, Measurement network.

Contenido

Lista de tablas	7
Lista de figuras.....	8
Introducción	11
Planteamiento del problema.....	12
Problema	12
Justificación	15
Estado del Arte.....	18
Analysis of Losses due to Breakdown of Equipment in Construction	18
The seven-step failure diagnosis in automotive industry.....	19
Study condition monitoring of construction equipment based on Wireless sensor networks. .	21
Dynamic Performance of Electrical Connector Contac Resistance and Intermittent Fault Under Vibration.	22
On board diagnosis system for intermittent fault: Application in automotive industry	23
Metodología	24
Líneas de Investigación.....	26
Desarrollo.....	27
Especificaciones técnicas.....	27
Desarrollo primer prototipo	28
Desarrollo de Hardware	28

Desarrollo segundo prototipo.....	39
Desarrollo de hardware modulo medición inalámbrica	39
Desarrollo de software del módulo inalámbrico	58
Desarrollo de hardware modulo master	59
Desarrollo software modulo master	65
Ensamble de Modulo Master y Módulos de Medición.....	67
Desarrollo de aplicación Android	74
Análisis de resultados	79
Desarrollo de los prototipos	79
Primer Prototipo.....	79
Segundo Prototipo.....	81
Uso del Sistema Desarrollado en el Diagnostico de Maquinaria de Construcción.....	89
Comparativa con sistema comercial	89
Prueba de laboratorio de Sistema de medición inalámbrico	90
Prueba de campo en diagnóstico de Grúa Telescópica	90
Mejoras	91
Conclusiones	92
Referencias.....	93

Lista de tablas

Tabla 1 Líneas de investigación.....	26
Tabla 2 Mediciones en circuito de acondicionamiento y referencia de voltaje.....	47
Tabla 3 Relación de costos módulo master.....	85
Tabla 4 Relación de costos módulo de medición inalámbrico.....	87

Lista de figuras

Figura 1 Árbol Causa Efecto	12
Figura 2 Red CAN (Controller Area Network) Grúa Telescópica	16
Figura 3 Red CAN Super Estructura Grúa	17
Figura 4 Modelo Cascada Retroalimentada del Desarrollo Secuencial de Software	24
Figura 5 Etapas de Desarrollo del Proyecto.....	25
Figura 6 Diagrama de Bloques del Módulo de Medición Inalámbrico	28
Figura 7 Diagrama de bloques ADS1115.....	30
Figura 8 Resolución de Medición de Voltaje	31
Figura 9 Conexión Recomendada Bus I2C.....	32
Figura 10 Modulo NRF24L01 con Antena Integrada.....	33
Figura 11 Modulo NRF24L01+PA con Amplificador y Antena Externa	34
Figura 12 Diagrama de Bloques Modulo NRF24L01	35
Figura 13 Modo PRX para Conexión en Red de hasta 6 Transceptores.....	35
Figura 14 Diseño PCB del Módulo Inalámbrico Prototipo 1	36
Figura 15 Visualización 3D PCB Modulo Inalámbrico.....	37
Figura 16 PCB del Módulo Master y Modulo Inalámbrico de Medición.....	38
Figura 17 Modulo Master y de Medición Ensamblados.....	38
Figura 18 Diagrama de Bloques del Módulo de Medición Inalámbrica.....	40
Figura 19 Diagrama de Bloques TPS61200	41
Figura 20 Aplicación Típica del Regulador TPS61200.....	42
Figura 21 Fuente de Alimentación de 3.3v Basada en Circuito Integrado TPS61201	43
Figura 22 Circuito de Acondicionamiento y Protección de Entradas de Medición.....	44

Figura 23	Simulación en MicroCap del Circuito Divisor.....	45
Figura 24	Montaje de Circuito de Acondicionamiento y Amplificador Operacional MCP603245	
Figura 25	Medición de voltajes en Circuito de Acondicionamiento	46
Figura 26	Convertidores Análogo-Digital ADS1115	48
Figura 27	Circuitos Voltaje de Referencia	49
Figura 28	Microcontrolador Atmega328	50
Figura 29	Detalle de Planos de Cobre en Conexiones del TPS61202	52
Figura 30	Calculadora KiCad basada en Norma IPC2221	53
Figura 31	Inicio de la Captura del Esquemático.....	54
Figura 32	Captura de esquemático terminado	54
Figura 33	Inicio del diseño del PCB del Módulo de Medición Inalámbrico	55
Figura 34	Diseño del PCB del Módulo de Medición Inalámbrico Terminado.....	55
Figura 35	Visualización 3D Modulo Medición Capa Superior	56
Figura 36	Visualización 3D del Módulo de Medición Capa Inferior	56
Figura 37	Caja Alojamiento Modulo Medición Inalámbrico	57
Figura 38	Diagrama de Bloques del Código Modulo Medición Inalámbrico	58
Figura 39	Diagrama de Bloques del Módulo Master.....	59
Figura 40	Fuente de Alimentación del Módulo Master basada en Regulador TPS61201	60
Figura 41	Microcontrolador y Circuitos Asociados del Módulo Master.....	61
Figura 42	Comunicaciones Inalámbricas del Módulo Master	62
Figura 43	PCB del Módulo Master.....	63
Figura 44	Visualización 3D del Módulo Master Capa Superior	64
Figura 45	Visualización 3D Modulo Master Capa Inferior.....	64

Figura 46	Diagrama de Bloques del Código Modulo Master	66
Figura 47	PCB del Módulo Master y Módulos de Medición	67
Figura 48	Proceso de Soldadura Regulador Encapsulado QFN10	69
Figura 49	Proceso de Soldadura con Aire Caliente y Control de Temperatura Manual.....	69
Figura 50	Perfil de Temperatura Recomendado por el Fabricante	70
Figura 51	Proceso de Soldadura Procesadores ATMEGA328	71
Figura 52	PCB con todos los componentes instalados	72
Figura 53	Detalle del Compartimiento de las Baterías	73
Figura 54	Tarjeta del Módulo Medición Instalada en Caja de Alojamiento	73
Figura 55	Pestaña Diseñador AppInventor.....	75
Figura 56	Diagrama de Bloques Diseño de App Android.....	76
Figura 57	Pestaña Bloques AppInventor	77
Figura 58	Diagrama de Bloques Programación App Android.....	78
Figura 59	Comparativa de Sistema de Medición Inalámbrico vs Versión Comercial Fluke	89

Introducción

Se define como maquinaria pesada al conjunto de máquinas utilizadas para realizar actividades de construcción en donde se requiere retirar capas del suelo, carga de material, conformación del suelo, transporte de material, estas pueden ser excavadoras sobre orugas, retrocargadores, bulldozer, motoniveladoras, tracto volquetas, cargadores, grúas telescópicas, grúas celosías. La maquinaria de construcción moderna cuenta con sistemas electrónicos de gran complejidad que han permitido el desarrollo de equipos más eficientes, amigables con el medio ambiente, que brindan mayor comodidad a quienes los operan y mejores resultados en las labores que realizan, sin embargo, este desarrollo acarrea una mayor dificultad en el diagnóstico sobre todo de fallas intermitentes que requieren condiciones específicas en donde estas se reproducen.

En el presente documento se presenta el desarrollo de dos prototipos de medición inalámbrica que tienen como objetivo ayudar en el diagnóstico de complejos sistemas electrónicos presentes en maquinaria de construcción, tanto en maquinaria de movimiento de tierra como en maquinaria de levantamiento de cargas, se presentan cada una de las etapas en el desarrollo de los dos prototipos, las mejoras que se llevaron a cabo en el segundo prototipo y las conclusiones de su aplicación en situaciones reales de diagnóstico.

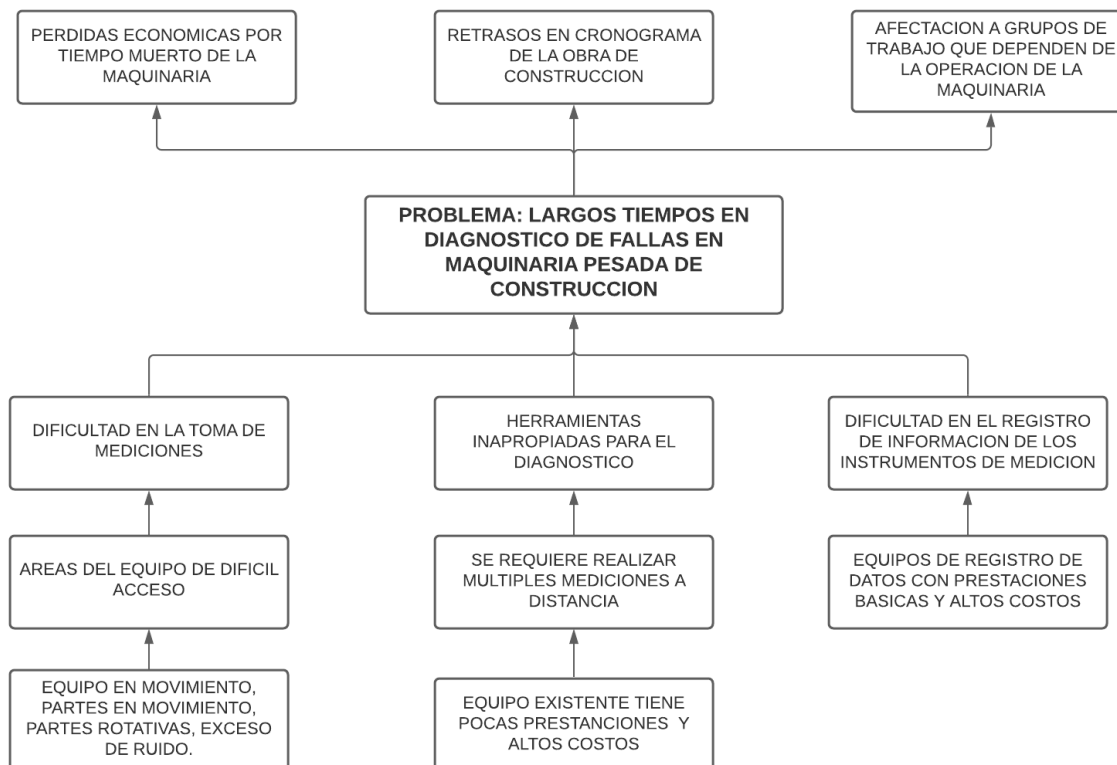
Planteamiento del problema

Problema

Largos tiempos en diagnósticos de fallas en maquinaria de construcción asociados al uso de instrumentos de medición poco eficientes.

Figura 1

Árbol Causa Efecto



Fuente: Elaboración propia

La maquinaria pesada constituye entre un 25 y 40 por ciento de los costos en una obra de construcción (Mr. Patrick Adik, Prof Mrs Snehal Bobade) el funcionamiento correcto es vital para el avance general de la obra, del trabajo de cada máquina dependen trabajos en otras áreas

como tareas de excavación manuales, fundición de cimientos, ensamble de componentes estructurales, suministro de materiales, procesos de interventoría, entre otros (Galabré (1964), Ibáñez (2012)), las fallas en maquinaria producen graves problemas en las obras de construcción, se ha documentado como se deben reducir estas fallas mediante programas de mantenimiento preventivo (Tiktin (1997)), entrenamiento de operadores y entrenamiento de técnicos, sin embargo existen gran cantidad fallas que se producen por deficiencias en los planes de mantenimiento, alto costo de componentes en nuestro país, largos procesos de importación y dificultad para adquirir determinados componentes, en donde entre las razones de alto mantenimiento correctivo también se encuentra la falta de diagnóstico acertado (Palencia (2006)), todo esto conlleva a falla en el funcionamiento de la maquinaria en donde se requiere la atención inmediata y eficiente de técnicos especialistas en sistemas electrónicos, mecánicos e hidráulicos que mediante la información adecuada y el uso de diferentes herramientas deben diagnosticar y reparar rápidamente la maquinaria afectada, estas tareas en muchos casos tienen altos grados de dificultad que se ven incrementados por herramientas poco prácticas para esta labor, en donde se requieren mediciones de voltaje, corriente y presión en diferentes puntos de la máquina, para mediante los datos recolectados identificar las fallas, en algunas ocasiones cuando se presentan fallas intermitentes se requiere tomar mediciones con la maquinaria en movimiento en donde se dificulta la instalación de instrumentos, visualización de datos y se ve afectada la seguridad del técnico involucrado en el diagnóstico, todo esto lleva a que los tiempos de diagnóstico y consecuente reparación aumenten en gran medida afectando directamente los proyectos de construcción y los propósitos de estos.

Concluimos que nuestro problema es el largo tiempo en diagnóstico de fallas en maquinaria pesada de construcción asociadas al uso de instrumentos de medición poco eficientes en empresas del Casanare.

Justificación

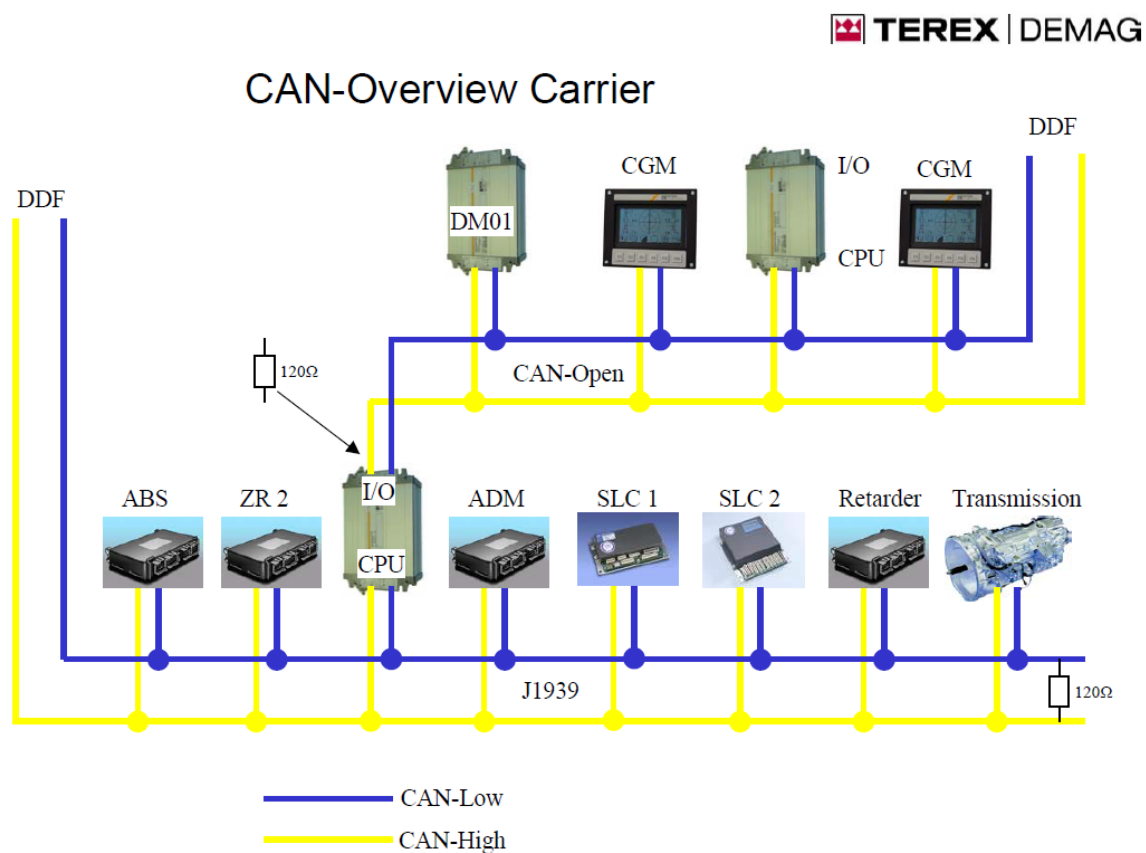
Facilitar el diagnóstico de fallas y subsecuente reparación en maquinaria pesada de construcción lo cual disminuye en gran medida todas las consecuencias negativas de los paros no programados en el funcionamiento de la maquinaria, las cuales son eje fundamental en el avance y proceso de construcción. Actualmente las mediciones de voltaje, corriente y presión se realizan con instrumentos independientes que requieren el monitoreo continuo para identificar cambios que puedan indicar fallas en sistemas electrónicos, mediante el uso del sistema de medición propuesto se toman mediciones en distintos puntos por medio de una red de módulos de medición que transmiten a un módulo master y se visualizan en un solo dispositivo permitiendo brindar una solución económica con respecto a sistemas comerciales de alto costo con características similares, con eso se beneficia directamente los diferentes proyectos de construcción y empresas que suministran maquinaria de movimiento de movimiento de tierra y levantamiento de cargas.

La maquinaria de construcción moderna cuenta con sistemas electrónicos de alta complejidad que se han ido integrando en todas las funciones que anteriormente solo usaban dispositivos mecánicos, en las figuras 2 y 3 se observan la red de interconexión de controladores del chasis y de la superestructura o parte superior de una grúa telescópica fabricada por Terex, esto nos da una idea de cómo todas las funciones son controladas por dispositivos electrónicos, cada computador o módulo de control se conecta con gran cantidad de sensores, transductores y actuadores, todos los módulos de control intercambian información por una red CAN (Controller Area Network), cada módulo de control se encuentra en diferentes ubicaciones a lo largo de la grúa según el sistema que controla, el intercambio de datos por medio de la red CAN permite que las señales medidas en un módulo de control sean transmitidas por toda la red a los

computadores que las requieran, de la misma forma el accionamiento de actuadores se puede solicitar desde un módulo diferente por medio de la red CAN. Sistemas de frenos, motor, transmisión automática, dirección en ejes traseros, suspensión, estabilizadores y todas las funciones hidráulicas de la grúa son controladas de manera electrónica. Esto nos lleva a la necesidad de sistemas de instrumentación adecuados que permitan la medición en múltiples puntos y su fácil visualización para realizar diagnósticos de manera eficiente.

Figura 2

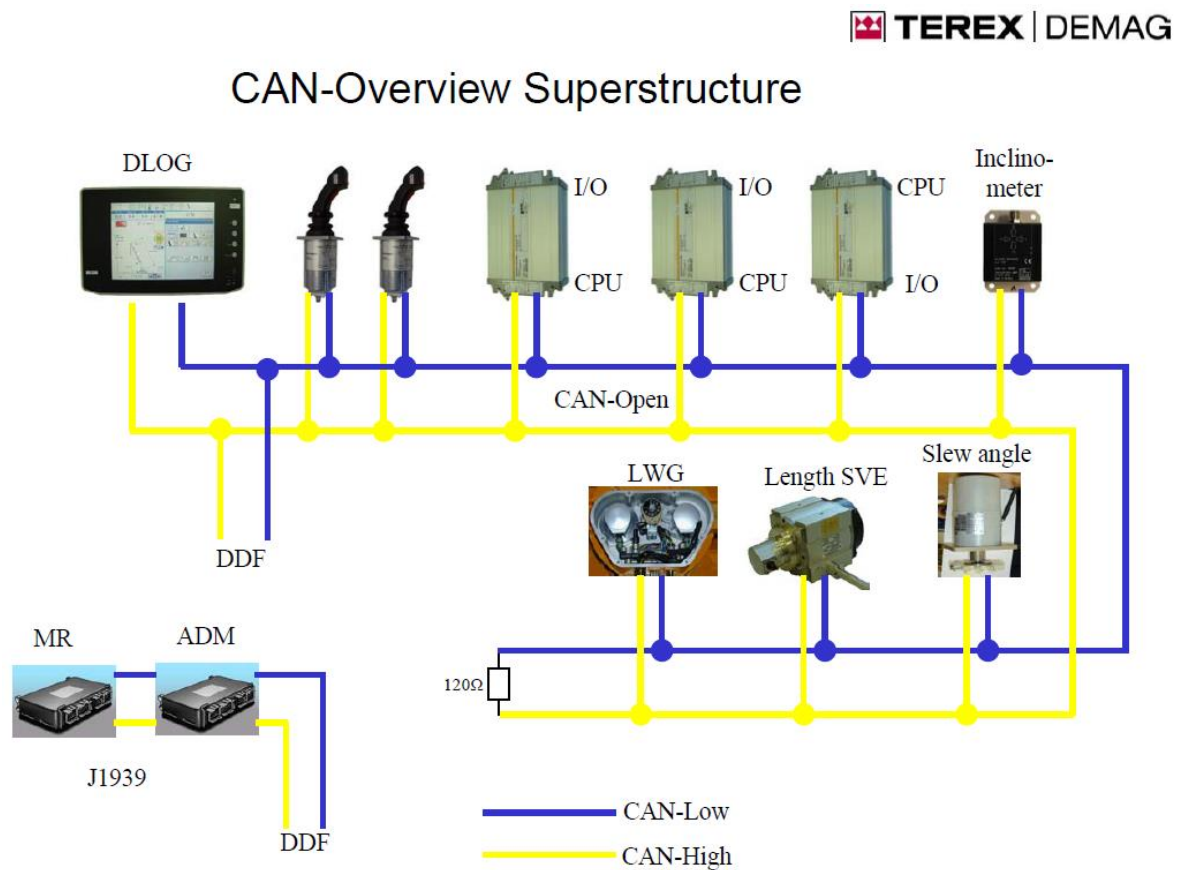
Red CAN (Controller Area Network) Grúa Telescópica



Nota: Adaptado de *AC120-1 Training Manual V1.4* (p 1015) Terex 2008

Figura 3

Red CAN Super Estructura Grúa



Nota: Adaptado de AC120-1 Training Manual V1.4 (p 1016) Terex 2008

Estado del Arte

Analysis of Losses due to Breakdown of Equipment in Construction

Una gran influencia en el costo de los proyectos de construcciones se encuentra en el frente del proyecto en donde ingenieros y diseñadores seleccionan la maquinaria que consideran correcta para las tareas a realizar, las políticas de los contratistas y los sistemas de administración de maquinaria tienen un gran impacto en la productividad de las empresas, en especial en contratistas con gran inversión en maquinaria de construcción (Adik. 2018; Bobade, 2018).

Durante la etapa de diseño es vital que los ingenieros conozcan los tipos de maquinaria de construcción, ya que esta hace parte integral del proceso de construcción, altas tasas de falla y competitividad en el negocio hace que los contratistas busquen nuevas formas de reducir costos, reduciendo mano de obra, costos en materiales, incrementando servicios y controlando pérdidas, en este sentido se ha encontrado en el sector de la industria como incrementar los márgenes de ganancia mediante un efectivo mantenimiento de la maquinaria de construcción (Adik. 2018; Bobade, 2018).

Dentro de las consideraciones a tener para aumentar la eficiencia en las obras de construcción se debe tener en cuenta la planeación de la maquinaria de construcción, la selección de la máquina adecuada, la consideración de las tareas a realizar, las restricciones del sitio de trabajo, la fiabilidad del equipo o maquinaria entre otras. El plan de mantenimiento se basa en una lista de tareas diseñadas por el fabricante que tienen como propósito asegurar el correcto funcionamiento del equipo o maquinaria, estas tareas se organizan mediante un cronograma y se van ejecutando a medida que la maquinaria completa las horas de trabajo correspondientes para cada una de las tareas de mantenimiento, adicional a esto se requieren los suministros adecuados

como filtros, aceites, componentes de reemplazo y el entrenamiento adecuado de los técnicos que ejecutan en mantenimiento.

La investigación de los autores indica que “El costo del equipo o maquinaria de construcción en un proyecto varía del 10-30% del costo total del proyecto dependiendo del alcance de mecanización” (Adik, 2018; Bobade, 2018, p. 1835). lo cual nos permite concluir la importancia del mantener operativo durante el desarrollo del proyecto con el objetivo de disminuir las pérdidas por averías en los equipos.

The seven-step failure diagnosis in automotive industry

“La resolución de problemas ha sido considerada como una llave competitiva para los fabricantes automotrices” (Altinisik, 2020; Hugul, 2020, p. 1). Un diagnóstico confiable es la base de la resolución de problemas, en el estudio realizado por los autores se propone un procedimiento de siete pasos para la resolución de problemas de los automotores, mediante el cual se pretende guiar a los expertos para optimizar sus propios procesos de diagnóstico, el método desarrollado se implementó durante un periodo de 3 años durante los cuales se obtuvieron mejoras en los procesos ya utilizados.

Uno de los métodos de resolución de problemas es Definir-Medir-Analizar-Mejorar-Controlar llamado (DMAIC) por sus siglas en inglés y desarrollado por Ford Motor Company, luego diferentes fabricantes desarrollaron sus propios procesos compuestos de más o menos pasos en donde el principal desafío era reducir los sub-factores sin reducir las causas potenciales básicas, la correcta definición de los fenómenos era la clave del desafío, sin embargo los procesos de diagnóstico son bastante complejos y tiene dificultades que deben ser manejadas (Altinisik, 2020; Hugul, 2020).

Los sistemas de diagnóstico han existido en diferentes grados de complejidad desde que se inventaron los primeros automotores, durante las últimas décadas ha mejorado la inspección visual gracias a la introducción de equipos modernos. La mayoría de los métodos tradicionales se centran en describir y eliminar la causa de la falla, sin embargo, hace falta un enfoque de diagnóstico de los solucionadores y especialistas en las plantas automotrices, las habilidades de diagnóstico son una importante competencia por lo que las empresas invierten una gran cantidad de recursos en capacitación (Altinisik, 2020; Hugul, 2020).

Los pasos se describen a continuación:

Paso 1: Descripción del problema

Paso 2: Verificación del fenómeno

Paso 3: Primer nivel de análisis

Paso 4: Segundo nivel de análisis

Paso 5: Verificación de los parámetros efectivos.

Paso 6: Conclusiones clave

Paso 7: Atribución de responsabilidades

En el paso 2; verificación del fenómeno, se indica que “Debido al incremento de la complejidad y la integración de los sistemas de los vehículos, los especialistas frecuentemente usan equipamiento y métodos avanzado para definir el fenómeno” (Altinisik, 2020; Hugul, 2020, p. 6).

Study condition monitoring of construction equipment based on Wireless sensor networks.

En este documento se analizan las razones de las fallas en maquinaria de construcción, proponiendo un sistema de monitoreo en línea de los parámetros como presión, temperatura, vibración, ruido, velocidad. Los datos obtenidos de cada uno de los nodos de la red son enviados a un instrumento virtual para su posterior análisis y toma de decisiones.

La maquinaria de construcción opera normalmente en al aire libre en donde es afectada por diferentes factores como el agua, sol, aire y la erosión, estas condiciones conllevan a que se presenten fallas de manera frecuente, adicionalmente las características de los trabajos en sitio hacen que existan grandes dificultades para resolver las fallas de manera oportuna. (Jia. Chunhua, Mingsong, Meiyun, 2010). Para realizar un monitoreo en tiempo real de las condiciones operativas del equipo o maquinaria, se debe determinar que parámetros medir de acuerdo con la ubicación y tipo de la falla además de escoger el sensor apropiado, la maquinaria de construcción produce vibración y ruido durante el trabajo, estos parámetros pueden estar relacionados con la ubicación y tipo de falla que se presenta. Otros parámetros como presión de aceite, temperatura de aceite, temperatura de líquido refrigerante, temperatura del aceite del convertidor de torque, temperatura de aceite hidráulico de la transmisión, presión del aceite hidráulico, velocidad del motor y cantidad de combustible son útiles para determinar fallas en cada uno de los sistemas relacionados.

Los sistemas de redes de sensores se componen de muchos nodos de sensores y un nodo central, cada uno de los nodos son ubicados en diferentes partes para monitorear los parámetros de interés, los datos obtenidos son enviados de nodo a nodo hasta llegar al nodo central el cual lo transmite por una conexión serial a un sistema de análisis mediante un instrumento virtual desarrollado en LabVIEW. En el documento los autores describen como diseñaron cada uno de

los nodos mediante módulos transceptores CC1000 que funcionan a una frecuencia de 433MHz y un procesador ATMEGA128 que cuenta con los recursos suficientes para la adquisición y transmisión de los datos al transceptor.

Dynamic Performance of Electrical Connector Contac Resistance and Intermittent Fault Under Vibration.

Diferentes tipos de conectores eléctricos son ampliamente usados en distintos tipos de maquinaria compleja, la degradación de la conexión es una de las principales causas de fallas, en los automóviles entre el 30-60% de las fallas en los sistemas eléctricos y electrónicos son causados por la degradación del contacto de los conectores. Esta degradación esa sujeta a las condiciones ambientales a las que se exponen los conectores y las fallas que producen en los equipos son muy difíciles de diagnosticar y probar por su naturaleza intermitente. Según los autores “la vibración induce el 28% de todas las fallas en productos electrónicos” (Shen, Lv, Liu, Qiu 2018).

En el documento se describen los cálculos de los modelos de la resistencia eléctrica de los contactos, la investigación en la intermitencia de los contactos y todo el proceso de medición, filtrado y análisis de los datos obtenidos en donde se concluye que las base de las frecuencias de la Resistencia de Contacto eléctricos incluye una y dos veces la frecuencia de vibración, la probabilidad de fallas intermitentes incrementa con el desplazamiento de la vibración, aunque también es afectado por la frecuencia. Esto nos muestra como la vibración presente en todos los equipos o maquinaria de construcción puede afectar el funcionamiento, la medición de sensores, la transmisión de información cuando estas señales deben ser enviadas a través de conectores a lo largo de la maquinaria de construcción.

On board diagnosis system for intermittent fault: Application in automotive industry

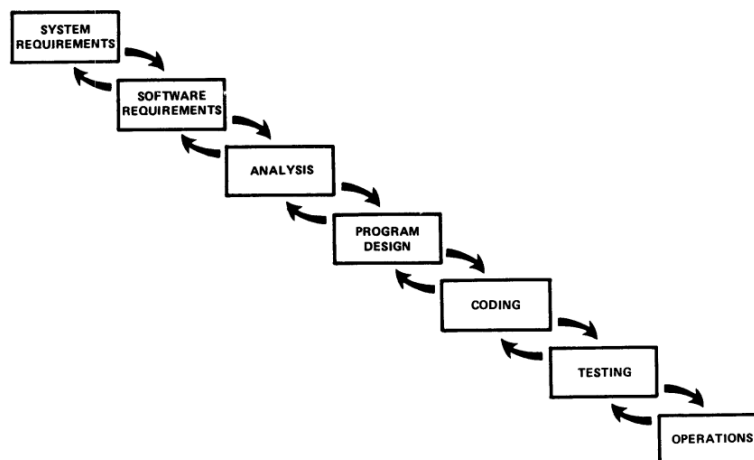
La detección de fallas y el diagnóstico de sistemas de eventos discretos ha sido sujeto de muchos estudios, proyectos de investigación de donde se han obtenido modelos de comportamiento para el diagnóstico de fallas intermitentes, esos acercamientos han dado buenos resultados al momento de predecir fallas, sin embargo, es necesario entender que no todas las fallas se pueden anticipar, esto se dificulta todavía más debido a la complejidad de los sistemas electrónicos de la actualidad. El propósito del estudio según los autores consiste en el desarrollo de tres pasos: el modelamiento del comportamiento de los sistemas, los métodos de detección de fallas intermitentes y las fallas fugitivas. Se concluye en la descripción del método para la localización de fallas intermitentes mediante un sistema de monitoreo a bordo basado en modelos de eventos discretos.

Metodología

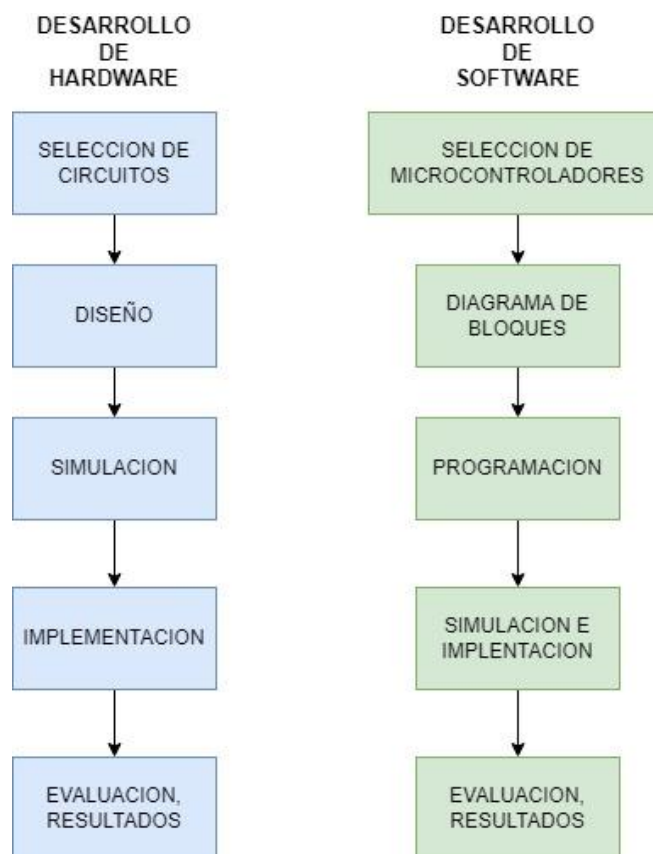
El desarrollo del proyecto aplicado soluciona un problema en el diagnóstico de fallas en sistemas electrónicos de maquinaria de construcción, el problema se aborda desde un enfoque empírico analítico en donde se propone la implementación de prototipos y se analizan los resultados mediante pruebas de laboratorio y de campo. Se inicia consultando la información correspondiente a investigaciones de otros autores relacionadas, esta información se plasma en el estado del arte, se desarrollan simulaciones de los diferentes circuitos tomados de un diagrama de bloques, si se requiere se realizan montajes en físico para pruebas en laboratorio, luego se reúne cada uno de los circuitos en un solo diagrama para dar paso al ensamble del prototipo final. Para el desarrollo del software se realiza un proceso análogo, además de tener en cuenta la metodología de cascada retroalimentada propuesta por el Dr Winston W. Royce que se describe de manera breve en el diagrama de la figura 4.

Figura 4

Modelo Cascada Retroalimentada del Desarrollo Secuencial de Software



Nota: Adaptado de *Managing the development of large software systems* (p 330) por Royce, Winston W. 1970

Figura 5*Etapas de Desarrollo del Proyecto*

Fuente: Elaboración propia

Finalmente se espera obtener un producto de instrumentación de bajo costo comparado con productos comerciales y con las características necesarias para el diagnóstico confiable, identificación de fallas y reparación de los diferentes sistemas de control electrónico de maquinaria de construcción.

Líneas de Investigación

Tabla 1

Líneas de Investigación

Intereses en ingeniería e investigación	Línea de investigación	Grupo de investigación
Sistemas embebidos	Robótica, automatización de procesos	GIDESTEC, DAVINCI, BYTE IN DESING
Control digital	Robótica, automatización de procesos	GIDESTEC, DAVINCI

Fuente: Elaboración propia

Desarrollo

Especificaciones técnicas

El prototipo a desarrollar debe cumplir con las siguientes especificaciones técnicas necesarias para cumplir con el propósito descrito.

Módulos de medición

- Medición de voltaje y corriente DC en un mismo modulo
- 4 canales de medición de voltaje por modulo
- 2 canales de medición de corriente por modulo mediante sensores de efecto hall no invasivos
- Rango de medición de voltaje: $\pm 50V$ DC
- Resolución mínima de medición de voltaje: 10mV
- Rango de medición de corriente: Dependiente del sensor utilizado, 0-10 A, 0-20 A, 0-30 A
- Resolución mínima de medición de corriente: 10mA

Modulo master

- Cantidad de módulos de medición soportados: 6
- Distancia de conexión a módulos de medición: 20 metros mínimo
- Distancia de conexión a unidad de visualización de datos: 10 metros máximo
- Actualización de datos a la unidad de visualización: 1 segundo máximo para 6 módulos de medición conectados.

Unidad de Visualización

- Múltiples pantallas de visualización de datos con diferentes combinaciones.

- Visualización de carga de batería de módulos de medición y alerta sonora por bajo nivel de batería.
- Actualización de datos: 1 segundo máximo

Desarrollo primer prototipo

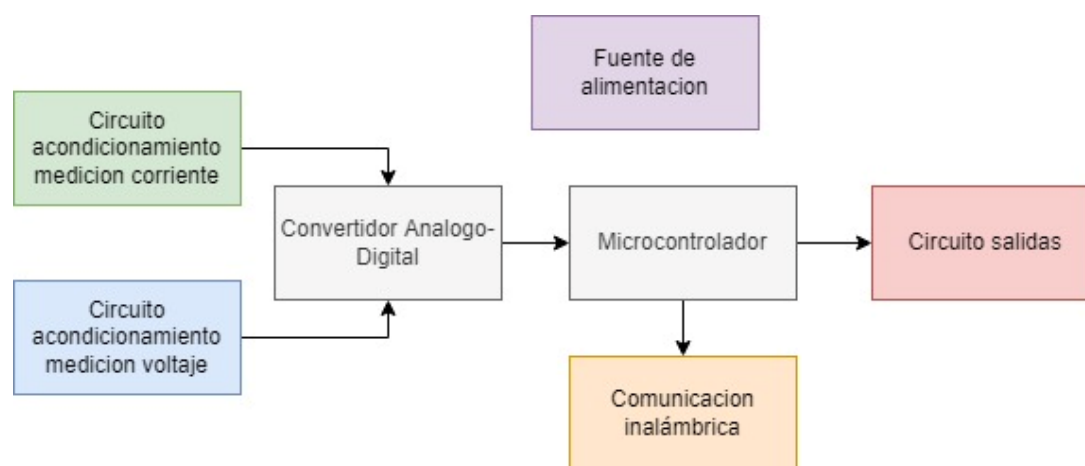
A continuación, se detalla el proceso mediante el cual se diseña y desarrolla un primer prototipo funcional del sistema de medición inalámbrico, este tiene como objetivo principal evaluar el funcionamiento del equipo en campo para determinar la viabilidad del proyecto, identificando todos los aspectos técnicos a replantear o mejorar, al final luego de analizar los resultados se obtienen todas las pautas necesarias para el desarrollo del prototipo final.

Desarrollo de Hardware

Se inicia con un diagrama de bloques para identificar los circuitos que componen cada uno de los módulos.

Figura 6

Diagrama de Bloques del Módulo de Medición Inalámbrico



Fuente: Elaboración propia

Microcontrolador: Se decide utilizar un módulo Arduino Nano que posee un ATME328, esto debido a que integra todos los componentes necesarios para su funcionamiento, existe amplia documentación por parte del fabricante y en foros acerca de su funcionamiento y programación, existe una gran variedad de librerías que permiten el uso de periféricos de otros fabricantes de una manera rápida. La capacidad de cómputo y memoria disponible es suficiente para la tarea a realizar, para las mediciones análogas se requiere el uso de un módulo ADC externo para lograr una mayor precisión. Dentro de sus principales características se destacan:

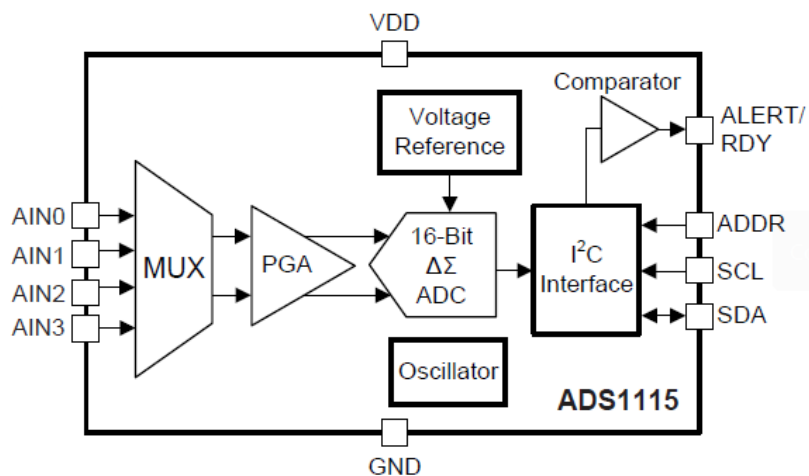
- Microcontrolador de 8-bit de alto rendimiento y bajo consumo AVR
- Arquitectura avanzada RISC
- Memoria flash de 32Kb
- Memoria EEPROM de 1Kb
- Memoria SRAM de 2Kb
- Hasta 16MIPS trabajando a 16MHz
- Dos contadores/temporizadores de 8 bits con diferentes modos de trabajo
- Un contador/temporizador de 16 bits con prescaler y diferentes modos de trabajo
- Convertidor ADC de 10 bits y 8 canales de medición
- Interface serial USART
- Interface serial SPI
- Interface serial I2C
- Voltaje de operación 2.7-5.5V
- Rango de temperatura de trabajo de -40 a 125 grados Celsius que aplica para uso automotriz.

- Consumo en modo activo: 1.5mA a 3V con un reloj de 4MHz

Convertidor análogo-digital: Se ha seleccionado el convertidor ADS1115 que cuenta con 4 canales de medición, 16 bits de resolución, permite capturar hasta 860 muestras por segundo, el valor de muestras se puede configurar desde 8 hasta 860, tiene un amplificador de ganancia programable (PGA) que permite medir diferentes niveles de voltaje para obtener mejores valores de resolución, la comunicación se realiza por medio del protocolo I2C, es posible configurar 4 direcciones para conectar hasta 4 módulos a un mismo bus de datos, cuenta con un pin de alerta que se puede ajustar para que genere un cambio de nivel de voltaje cuando la medición de determinado canal llegue a un nivel de voltaje previamente configurado, esto permite que el microcontrolador se encargue de realizar otras tareas, mientras el módulo convertidor monitorea las señales de entrada y genera la alerta cuando corresponda.

Figura 7

Diagrama de bloques ADS1115



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

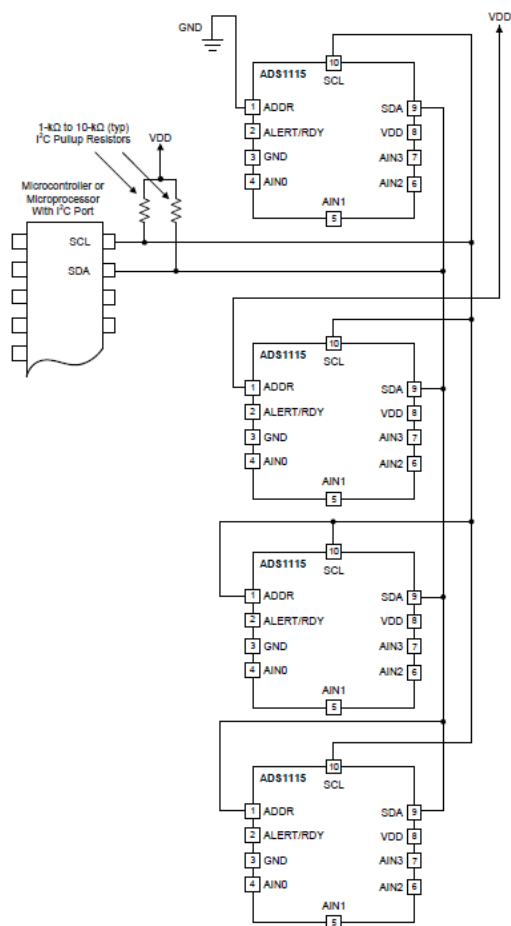
Nota: Adaptado de *SBAS444D* (p. 1), por Texas Instruments, 2009

Figura 8*Resolución de Medición de Voltaje*

FSR	LSB SIZE
$\pm 6.144 \text{ V}^{(1)}$	187.5 μV
$\pm 4.096 \text{ V}^{(1)}$	125 μV
$\pm 2.048 \text{ V}$	62.5 μV
$\pm 1.024 \text{ V}$	31.25 μV
$\pm 0.512 \text{ V}$	15.625 μV
$\pm 0.256 \text{ V}$	7.8125 μV

- (1) This parameter expresses the full-scale range of the ADC scaling. Do not apply more than $V_{DD} + 0.3 \text{ V}$ to the analog inputs of the device.

Nota: Adaptado de *SBAS444D* (p. 17), por Texas Instruments, 2009

Figura 9*Conexión Recomendada Bus I2C*

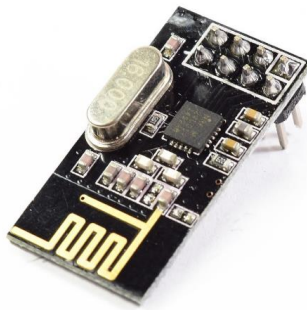
Nota: Adaptado de *SBAS444D* (p. 34), por Texas Instruments, 2009

Fuente de alimentación: Se propone el uso de dos baterías recargables tipo 18650 conectadas en serie para generar 7.4v, esto permite obtener una capacidad de almacenamiento suficiente para brindar una autonomía mínima de 8 horas de funcionamiento continuo, a partir del voltaje de 7.4 es posible generar voltajes de 5v y 3.3v mediante circuitos de regulación lineales con pocos elementos, evitando el uso de inversores o elevadores de voltaje requeridos si solo se utiliza una batería de 3.7v.

Transceptor inalámbrico: Se selecciona el módulo NRF24L01 para las comunicaciones inalámbricas, esto debido que proporciona el alcance suficiente para las especificaciones del proyecto, tiene bajo consumo de corriente y permite realizar conexiones en red con varios transceptores a la misma vez lo que facilita la transmisión de datos de varios módulos de medición de manera simultánea, esta característica se destaca en la aplicación de redes de sensores, la frecuencia de trabajo es de 2.4GHz que es de uso general y no requiere permisos especiales para su uso, permite velocidades de transmisión hasta de 1Mbps, el voltaje de alimentación es de 1.9 a 3.6v, en el mercado es posible encontrar principalmente dos modelos, uno con antena integrada sin amplificador y otro con amplificador y antena externa que permite una mayor distancia de transmisión.

Figura 10

Modulo NRF24L01 con Antena Integrada



Nota: Adaptado de *Tutorial básico de NRF24L01 con Arduino*

Figura 11

Modulo NRF24L01+PA con Amplificador y Antena Externa

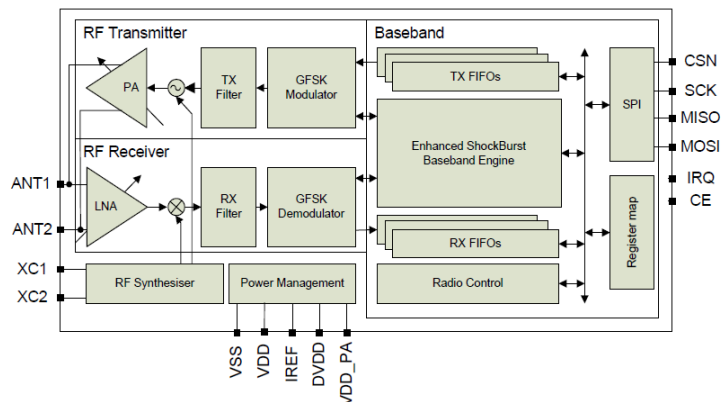


Nota: Adaptado de *Tutorial básico de NRF24L01 con Arduino*

La modulación es del tipo GFSK a una frecuencia de 2.4GHz en la banda ISM, es posible ajustar la potencia de salida a varios niveles, la conexión con el microcontrolador se realiza por medio de una interfaz SPI, el transceptor tiene dos modos de trabajo uno de los cuales permite el uso de seis canales de comunicación para la conexión en red con otros transceptores, a estos se les llama data pipe, los cuales funcionan de manera paralela y cada uno tiene una dirección física.

Figura 12

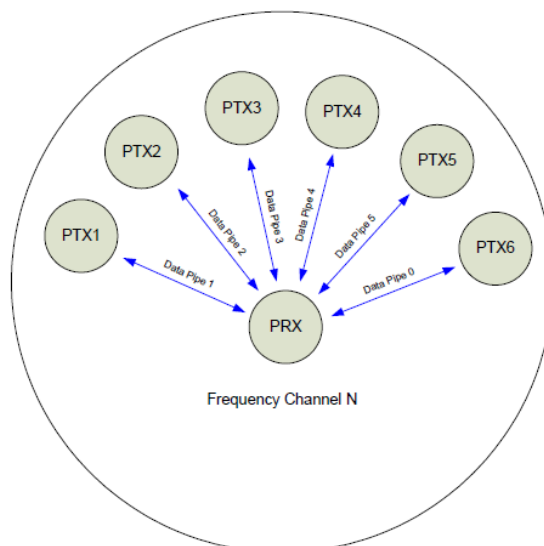
Diagrama de Bloques Modulo NRF24L01



Nota: Adaptado de *NRF24L01+ Preliminary Product Specification V1.0* (p. 9) por Nordic Semiconductor, 2008

Figura 13

Modo PRX para Conexión en Red de hasta 6 Transceptores

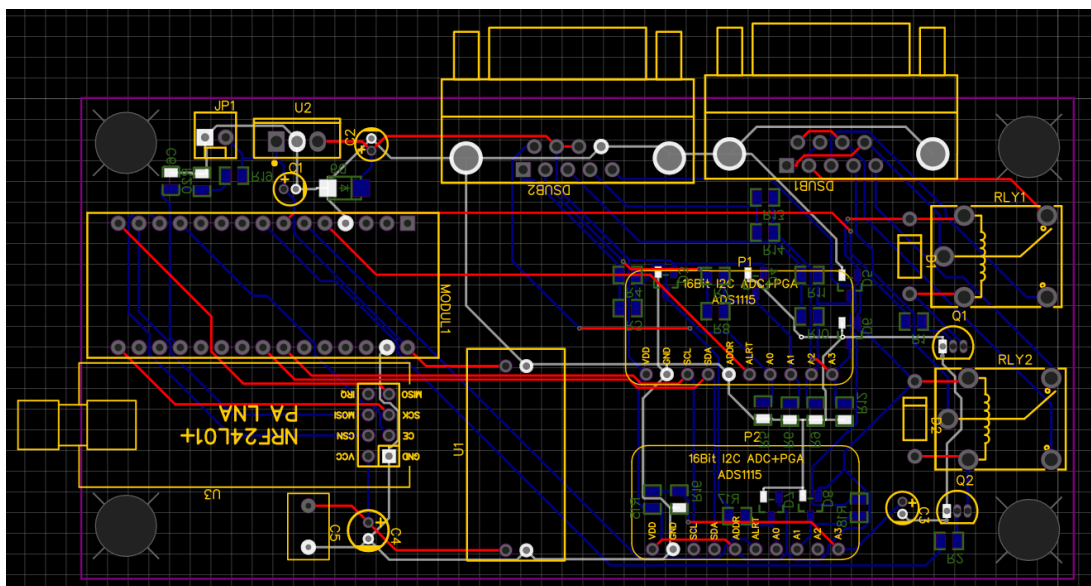


Nota: Adaptado de *NRF24L01+ Preliminary Product Specification V1.0* (p. 37) por Nordic Semiconductor, 2008

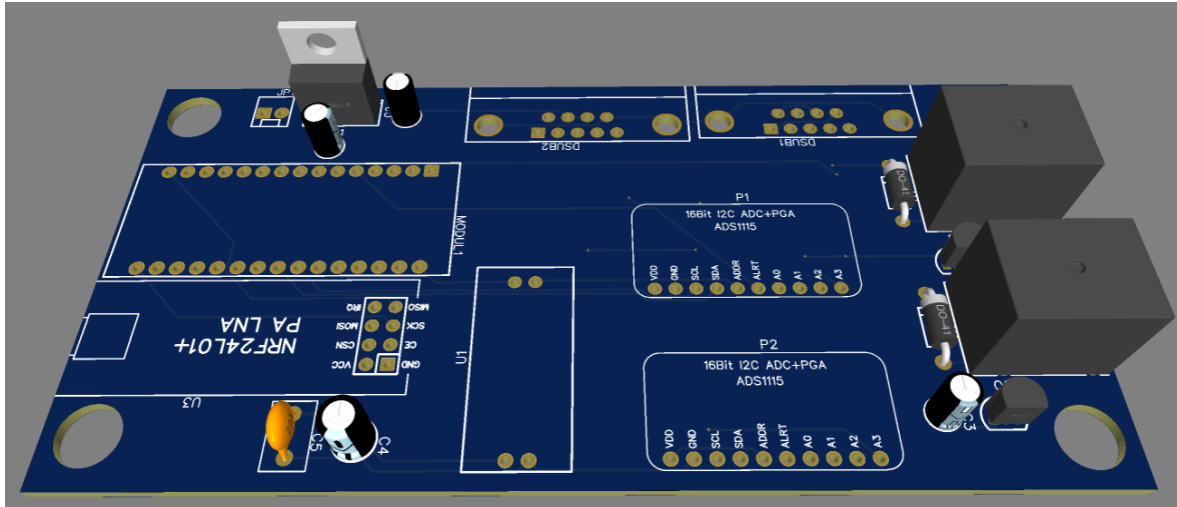
Diseño de PCB: El diseño del PCB se lleva a cabo en la plataforma EASYEDA la cual permite la captura de esquemático, el diseño de PCB y la fabricación del mismo en la compañía JLCPCB si se requiere.

Figura 14

Diseño PCB del Módulo Inalámbrico Prototipo 1



Fuente: Elaboración propia

Figura 15*Visualización 3D PCB Modulo Inalámbrico*

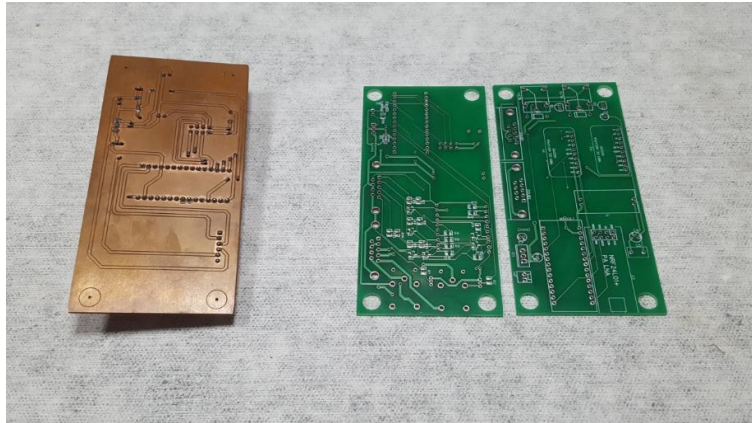
Fuente: Elaboración propia

Montaje y pruebas

Para el montaje se envía a fabricar los PCB con los archivos obtenidos de la plataforma EASYEDA, el PCB del módulo master se fabrica mediante el proceso de maquinado en CNC, el módulo inalámbrico se envía a fabrica en Colcircuitos en formato estándar de fabricación de dos capas, este permite el montaje de componentes SMD que reducen el espacio requerido y la integración de mayor cantidad de componentes.

Figura 16

PCB del Módulo Master y Modulo Inalámbrico de Medición



Fuente: Elaboración propia

Figura 17

Modulo Master y de Medición Ensamblados



Fuente: Elaboración propia

Luego de realizar el montaje completo de los componentes, conectores, baterías y cableado correspondiente en las cajas universales se procede a realizar pruebas de

funcionamiento, mediante las cuales se evidencia las ventajas del uso en el diagnóstico de sistemas electrónicos en maquinaria de construcción.

Desarrollo segundo prototipo

Luego de las pruebas realizadas en el primer prototipo se inicia con el desarrollo del segundo prototipo con las mejoras en el diseño de los circuitos de la fuente de alimentación, circuitos de acondicionamiento de las señales de entrada para la medición de voltajes tanto positivos como negativos, se eliminan los circuitos de activación de salidas, se cambia el voltaje de operación para todo el circuito a 3.3v, se rediseña la PCB utilizando el software libre de KiCad

Desarrollo de hardware modulo medición inalámbrica

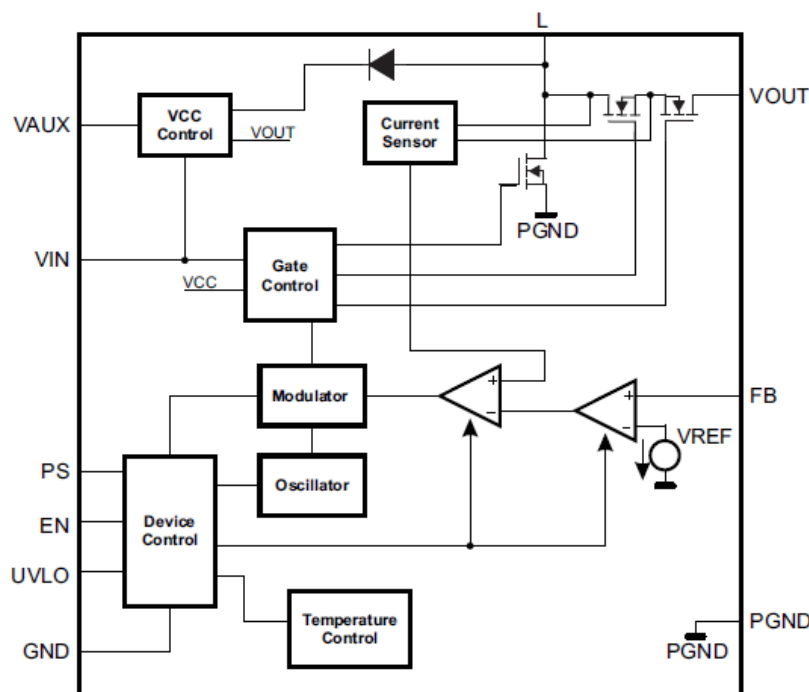
El siguiente diagrama de bloques evidencia los cambios realizados en el módulo de medición inalámbrico, entre estos se destaca que los circuitos de acondicionamiento, convertidores ADC, microcontrolador y transceptor trabajan a 3.3 voltios. El regulador de 5 voltios es utilizado para la alimentación de sensores externos de corriente o transductores de presión.

uso de baterías AA es posible utilizar el módulo solo con reemplazar las baterías descargadas lo cual da mayor versatilidad al trabajar con el sistema de medición en campo.

El circuito de regulación se basa en el circuito integrado TPS61201DRC de la empresa Texas Instruments, este regulador de alta eficiencia de montaje superficial con encapsulado QFN-10 de tan solo 3mm x 3mm permite obtener 3.3v con voltaje de entrada de hasta 0.5v en donde trabaja en modo step up, el siguiente es el diagrama de bloques.

Figura 19

Diagrama de Bloques TPS61200



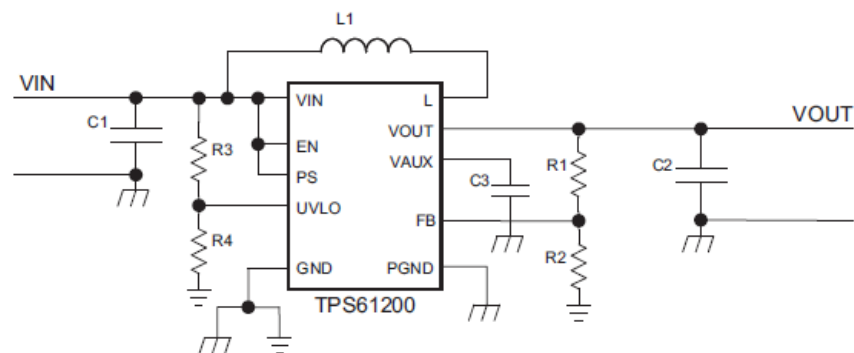
Nota: Adaptado de *SLVS577B* (p. 5), por Texas Instruments, 2008

Internamente cuenta con todos los circuitos necesarios para regular el voltaje de salida usando pocos componentes externos, la regulación de voltaje se realiza de manera eficiente

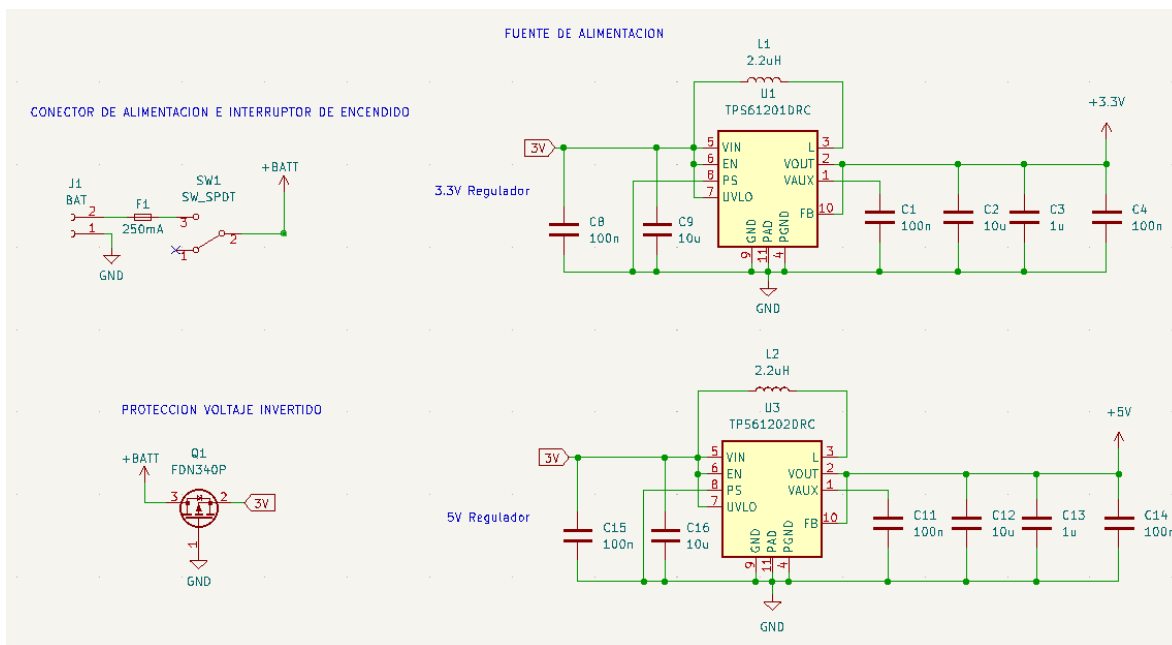
mediante el monitoreo de la línea de retroalimentación FB, usando un divisor de voltaje es posible controlar el voltaje de salida del regulador ajustable, en las versiones fijas el pin FB se conecta directamente a la salida debido a que el divisor se encuentra internamente para asegurar el voltaje de salida al nivel correcto, cuenta con arranque suave, protección de corto circuito en la salida, protección por bajo voltaje y protección por sobre temperatura. Es posible programar mediante el pin PS el modo de ahorro de energía, en donde el regulador cambia a modo lineal parando la operación del convertidor cuando el voltaje de entrada es mayor al voltaje de salida y la corriente de salida es menor a 300mA, si estas condiciones no se cumplen el convertidor se encarga de realizar la regulación, la protección por bajo voltaje UVLO es posible programarla mediante el uso de un divisor resistivo conectado la entrada a la alimentación y la salida al pin UVLO, la protección se activa cuando a la salida del divisor hay menos de 250mV.

Figura 20

Aplicación Típica del Regulador TPS61200



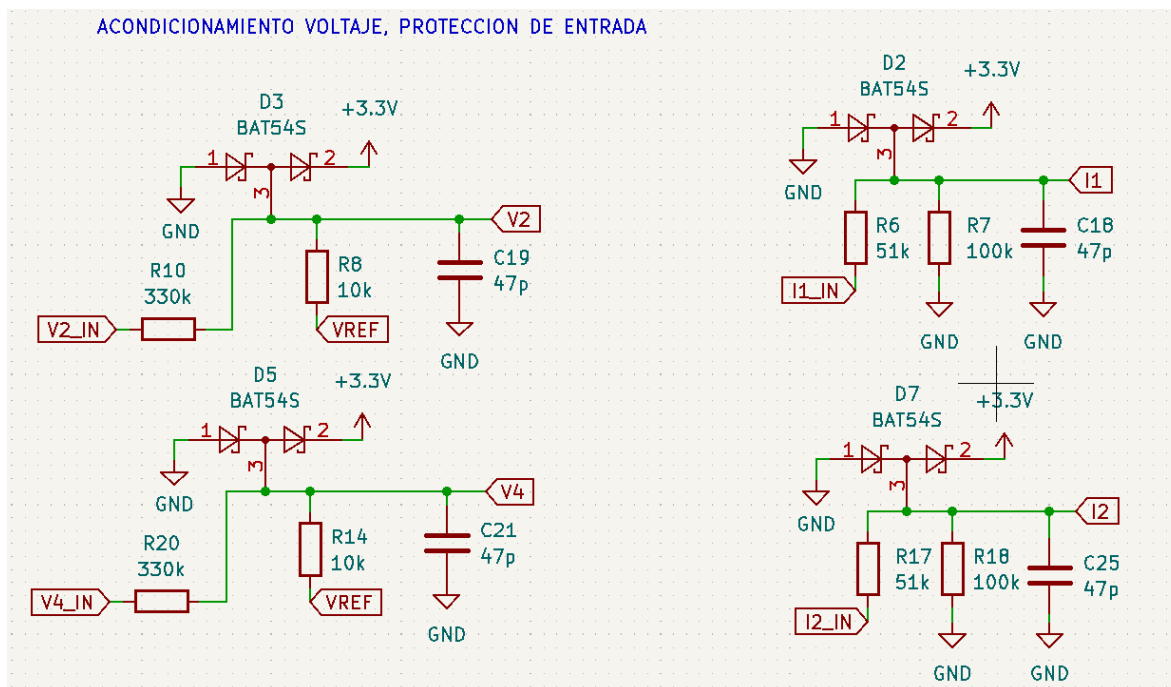
Nota: Adaptado de *SLVS577B* (p. 1), por Texas Instruments, 2008

Figura 21*Fuente de Alimentación de 3.3v Basada en Circuito Integrado TPS61201*

Fuente: Elaboración propia

En la figura 21 se observa la configuración utilizada del regulador TPS61201 y TPS61202 en el módulo de medición inalámbrico, se protege por sobre corriente mediante un fusible y por inversión de voltaje de entrada mediante un transistor mosfet de canal P que alimenta los dos reguladores, varios condensadores son utilizados en la entrada y salida para mejorar la eficiencia y filtración de voltaje a la salida.

Circuito de protección y acondicionamiento: Este circuito se compone de un divisor resistivo y dos diodos conectados a cada línea de la fuente de alimentación como se observa en la figura 22.

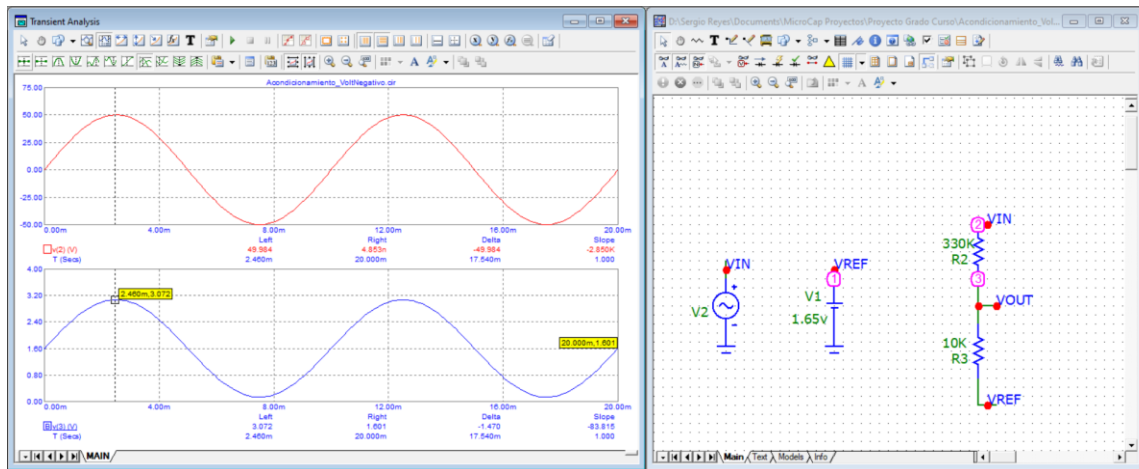
Figura 22*Circuito de Acondicionamiento y Protección de Entradas de Medición*

Fuente: Elaboración propia

Las 4 entradas de voltaje y las 2 entradas de corriente son protegidas mediante diodos Schottky de alta velocidad, estos diodos tienen como principal característica el bajo voltaje de conducción lo que permite que la señal luego del divisor permanece dentro de los límites seguros para enviarla a los convertidores analógico-digital, los divisores de voltaje se encuentran referenciados a la mitad del voltaje de alimentación de 3.3v, de esta forma es posible la medición de voltajes tanto positivos como negativos dentro de un rango de $\pm 50v$, en la figura 23 se puede apreciar el comportamiento de esta configuración mediante una simulación en MicroCap.

Figura 23

Simulación en MicroCap del Circuito Divisor

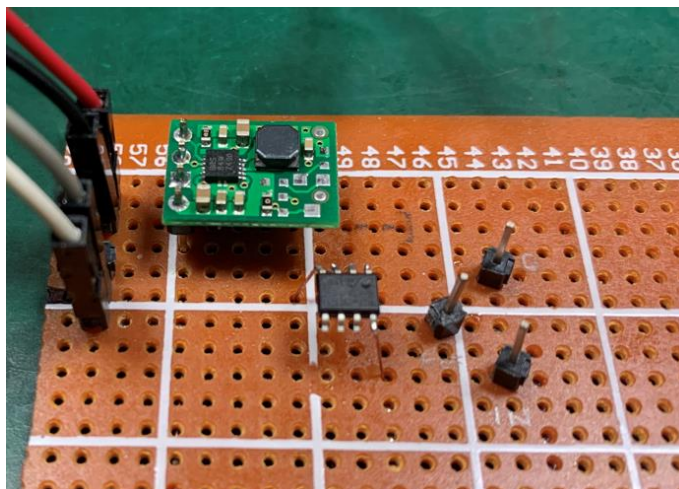


Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente se realiza el montaje del circuito de acondicionamiento incluyendo el circuito que genera el voltaje de referencia para observar el comportamiento al ingresar diferentes voltajes.

Figura 24

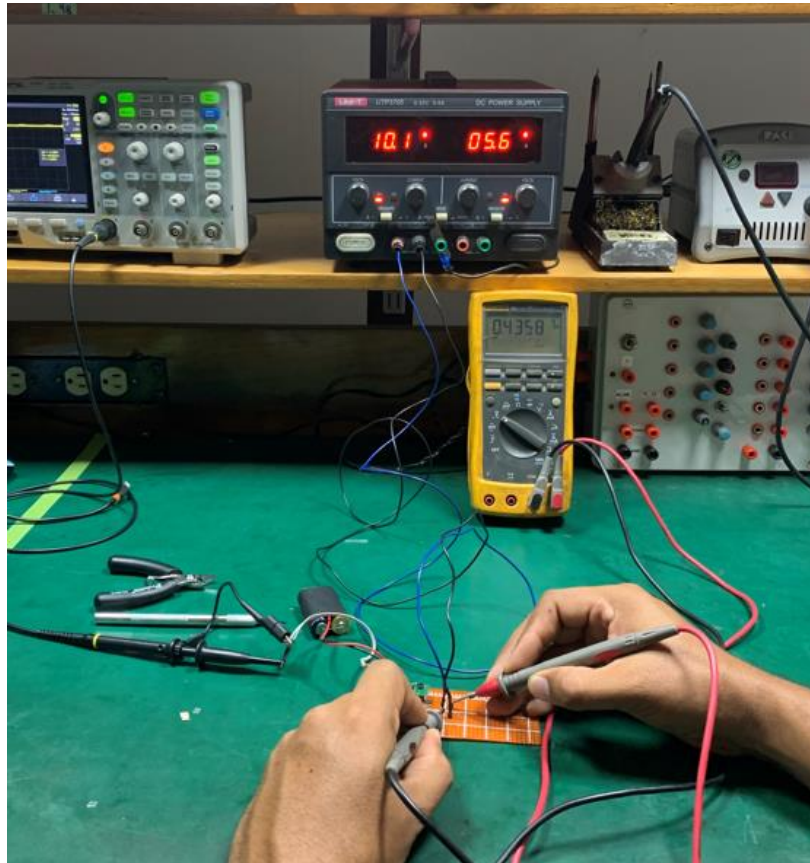
Montaje de Circuito de Acondicionamiento y Amplificador Operacional MCP6032



Fuente: Elaboración propia

Figura 25

Medición de voltajes en Circuito de Acondicionamiento



Fuente: Elaboración propia

Se envían diferentes voltajes tanto negativos como positivos para probar el comportamiento de la referencia de voltaje y del divisor, observando que funciona de manera correcta de acuerdo a las simulaciones realizadas, los datos obtenidos se detallan en la tabla 2

Tabla 2*Mediciones en Circuito de Acondicionamiento y Referencia de Voltaje*

Medición	VIN-VREF	VREF-GND	VOUT-VREF	VOUT-GND
1	0	1.687	0	1.691
2	10.03	1.687	0.436	2.122
3	-10.01	1.685	-0.436	1.255
4	20.04	1.685	0.871	2.559
5	-20.04	1.684	-0.872	0.815
6	30	1.672	1.302	2.974
7	-30	1.672	-1.303	0.369

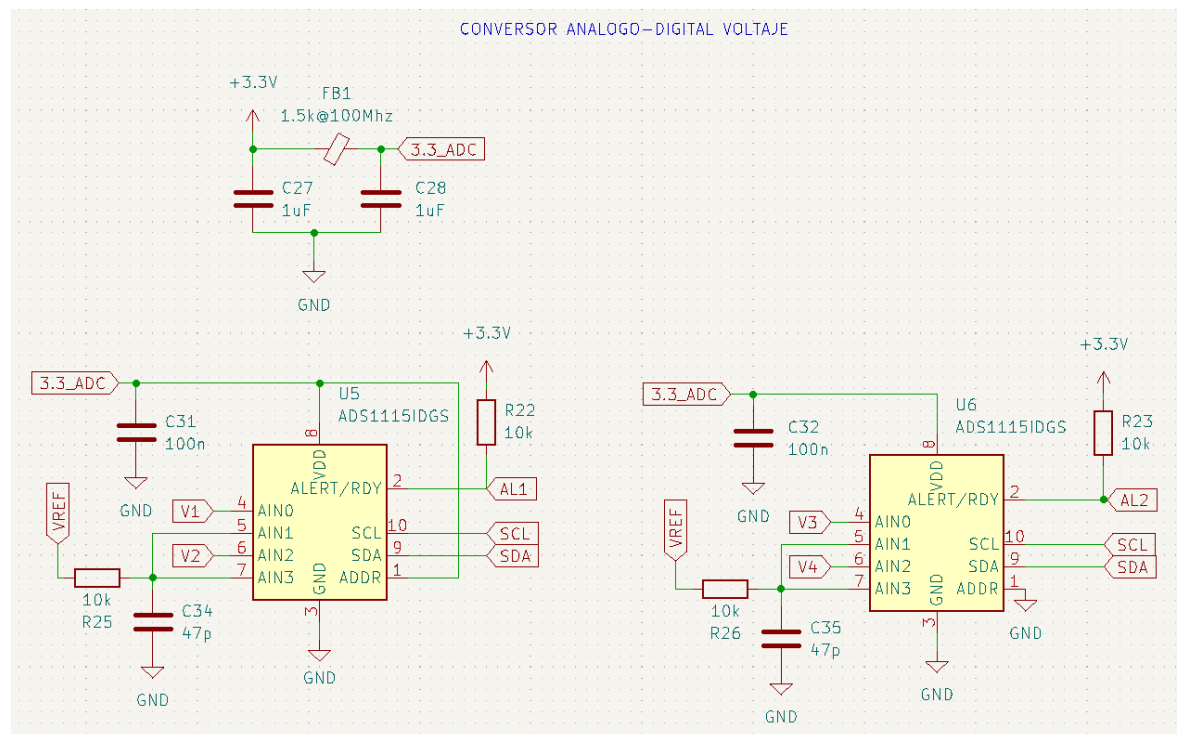
Nota: El voltaje de alimentación del circuito es de 3.34v, la referencia es la mitad, las resistencias utilizadas en el divisor son de 220kohm y de 10kohm.

Fuente: Elaboración propia

Circuito conversión análogo digital: Mediante este circuito se realiza la medición de voltaje de 4 canales de medición de voltaje y dos canales de medición de corriente mediante sensores externos no intrusivos de efecto hall.

Figura 26

Convertidores Análogo-Digital ADS1115



Fuente: Elaboración propia

Para la etapa de conversión se utilizan 3 convertidores análogo digital ADS1115, dos para la medición de voltaje y uno para la medición de corriente, todos se conectan al microcontrolador mediante el protocolo I2C cada uno con una dirección diferente configurada con el pin ADDR de los convertidores. La fuente de alimentación de 3.3v es filtrada mediante un núcleo de ferrita de montaje superficial y dos capacitores, el pin de ALERT/READY de cada convertidor es conectado al microcontrolador para monitorear alertas por nivel de voltaje previamente configurados.

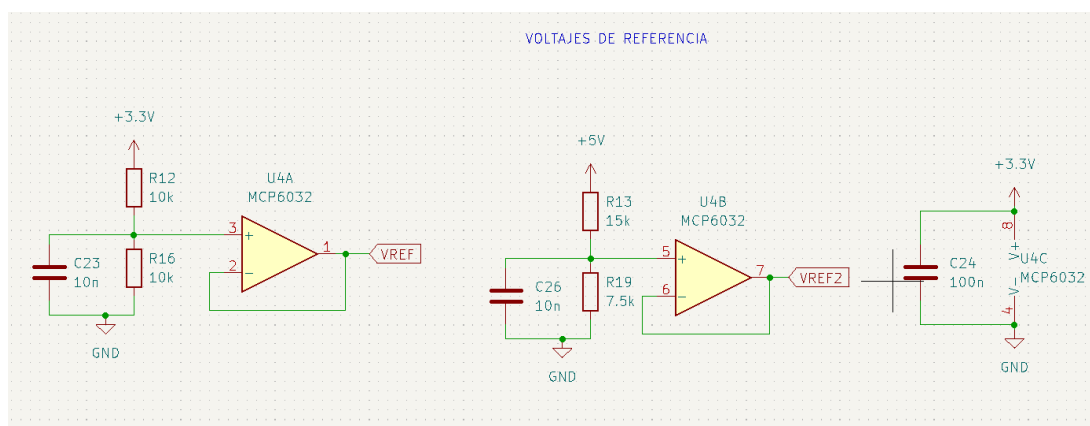
Todos los convertidores son conectados en el modo diferencial, en donde se utilizan dos entradas, una conectada al voltaje de referencia de 1.65v y la otra a la salida del circuito de

acondicionamiento que también se encuentra referenciado a 1.65v, de esta manera se logra medir de manera precisa tanto voltajes positivos como negativos.

Circuito de voltaje de referencia: Los dos voltajes de referencia se obtienen que dos divisores de voltaje conectados y la fuente de alimentación de 3.3v, en donde la salida de cada divisor es conectada a un amplificador operacional configurado en modo de seguidor de voltaje logrando disminuir la impedancia de salida de cada divisor.

Figura 27

Circuitos Voltaje de Referencia



Fuente: Elaboración propia

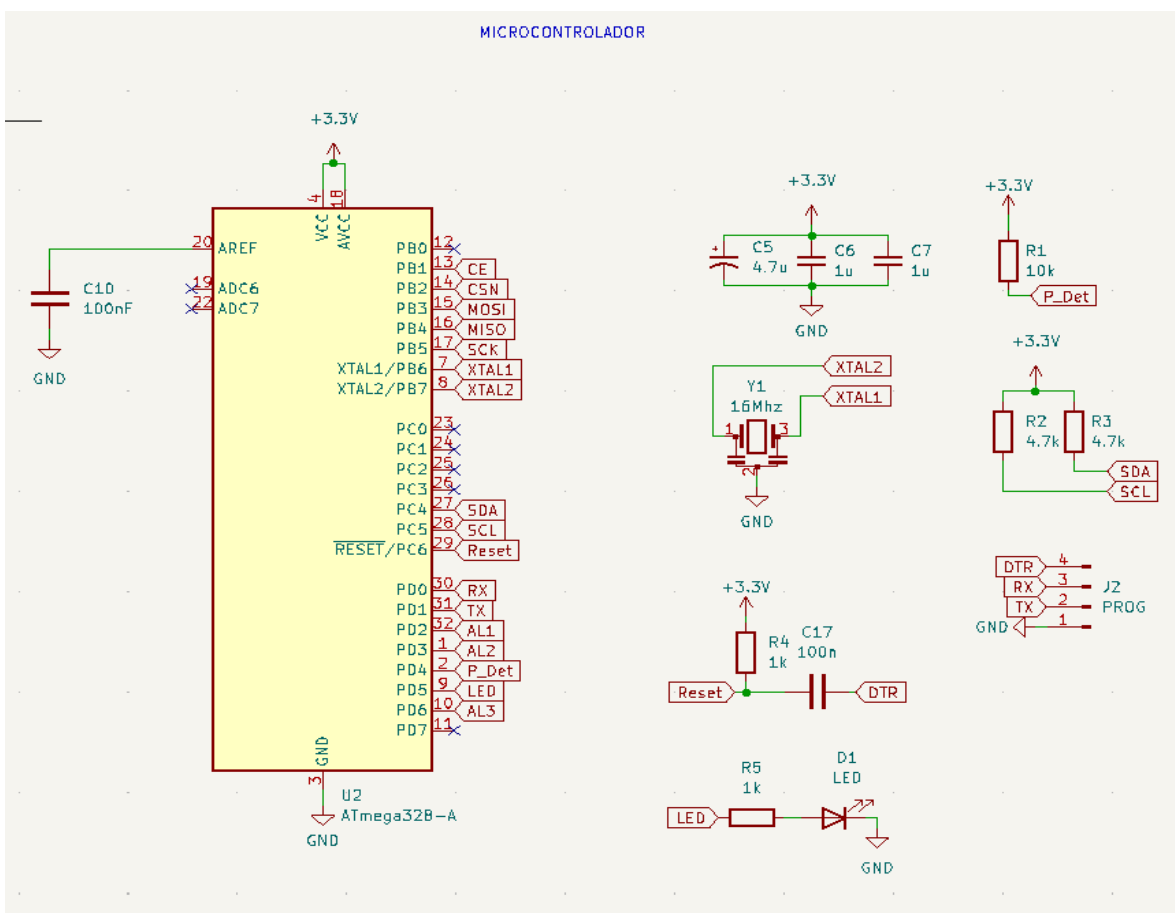
El amplificador operación utilizado es el MCP6032 que destaca entre sus características la capacidad de generar voltajes de salida muy cercanos a la fuente de alimentación positiva y negativa, este tipo de amplificadores se les conoce como “rail to rail”.

Comunicación inalámbrica: Al igual que la primera versión se utilizan módulos NRF24L01 como parte central del proyecto, recalcando su principal característica de permitir conectar en red gran cantidad de nodos, razón por la cual fue seleccionado para los dos prototipos. Todos los detalles de operación fueron descritos en la versión 1.

Microcontrolador: Se continua con el uso del Atmega328, en la segunda versión se observan dos cambios principalmente, ahora es alimentado con una fuente de 3.3v, la programación se realiza con un adaptador serial externo.

Figura 28

Microcontrolador Atmega328



Fuente: Elaboración propia

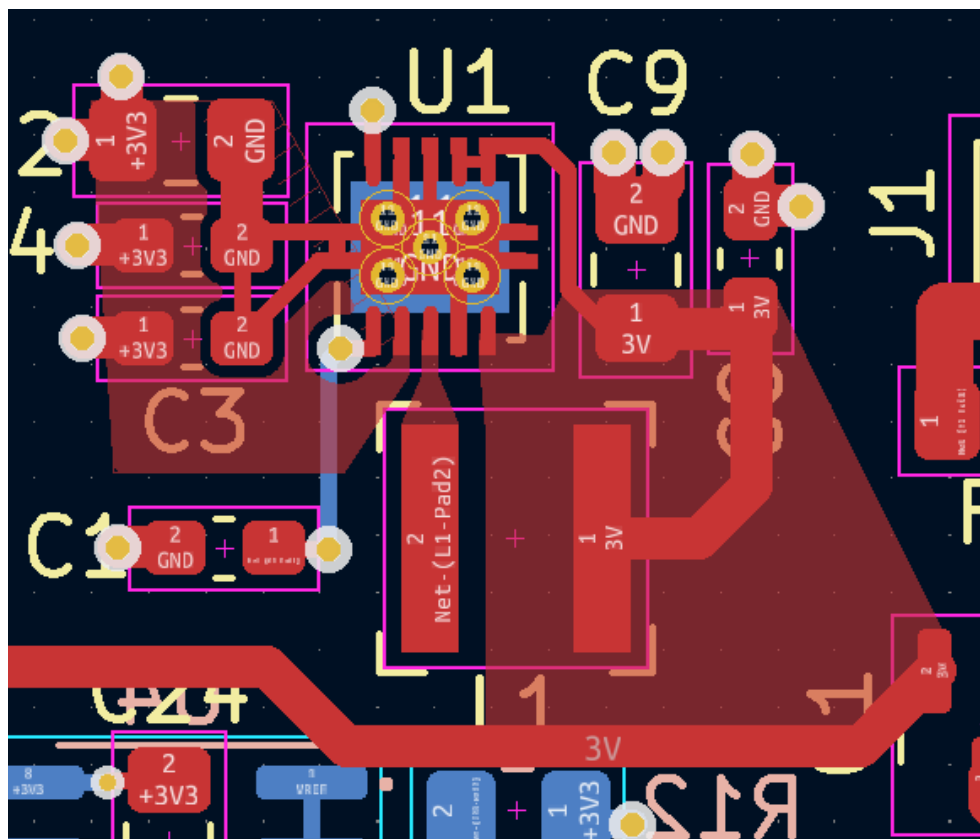
Diseño del PCB: La captura de esquemático y el diseño del PCB se realizan en KiCad utilizando la versión 6, este software libre permite el desarrollo de PCBs de alta calidad con características profesionales, es ampliamente documentado en su página web y en foros, tiene

gran cantidad de librerías de componentes, su principal diferencia EASYEDA es que nos depende de un servicio en la nube para su funcionamiento, además de que tiene gran cantidad de características adicionales.

Todos los componentes utilizados a excepción de los conectores son de montaje superficial, gracias a esto y al uso de 4 capas en el diseño del PCB se logra integrar todo el circuito en un espacio de 50mmx50mm, obteniendo una reducción del 66% en tamaño con respecto a la versión anterior a pesar de aumentar la cantidad de componentes. La capa superior e inferior se utilizan para el montaje de componentes pistas de señales, la capa In1.Cu. interna es utilizada como plano de tierra, la capa In2.Cu interna es utilizada como plano de potencia conectado a la fuente de 3.3v, el uso de estas dos capas permite disminuir la impedancia de la fuente de alimentación a cada uno de los componentes que se conectan a esta. Para obtener un rendimiento óptimo de los reguladores se utilizan planos de cobre como lo recomienda el fabricante en la guía de usuario SLVA773 en lugar de pistas individuales, esto reduce la impedancia en las líneas de conexión críticas para el funcionamiento del regulador, la figura 29 muestra los planos de cobre en detalle.

Figura 29

Detalle de Planos de Cobre en Conexiones del TPS61202



Fuente: Elaboración propia

Para el trazado de pistas, tamaño de vías y el espaciado se utiliza la norma IPC-2221 que nos indica el tamaño de las pistas a utilizar dependiendo de la capacidad de corriente requerida, KiCad cuenta con una calculadora de trazos, vías y espaciado basado en la norma indicada, esta es utilizada para realizar los cálculos correspondientes.

Figura 30

Calculadora KiCad basada en Norma IPC2221

The screenshot shows the PCB Calculator application window with the following data:

Parameters	
Current (I):	1.94134 A
Temperature rise (ΔT):	10 °C
Conductor length:	100 mm
Copper resistivity:	1.72e-08 Ω·m

External Layer Traces

Trace width (W):	0.750001 mm
Trace thickness (H):	0.035 mm
Cross-section area:	0.02625 mm ²
Resistance:	0.0655237 Ω
Voltage drop:	0.127204 V
Power loss:	0.246946 W

Internal Layer Traces

Trace width (W):	1.95108 mm
Trace thickness (H):	0.035 mm
Cross-section area:	0.0682879 mm ²
Resistance:	0.0251875 Ω
Voltage drop:	0.0488975 V
Power loss:	0.0949266 W

The formula, from IPC 2221, is $I = K \Delta T^{0.44} (W \square H)^{0.725}$

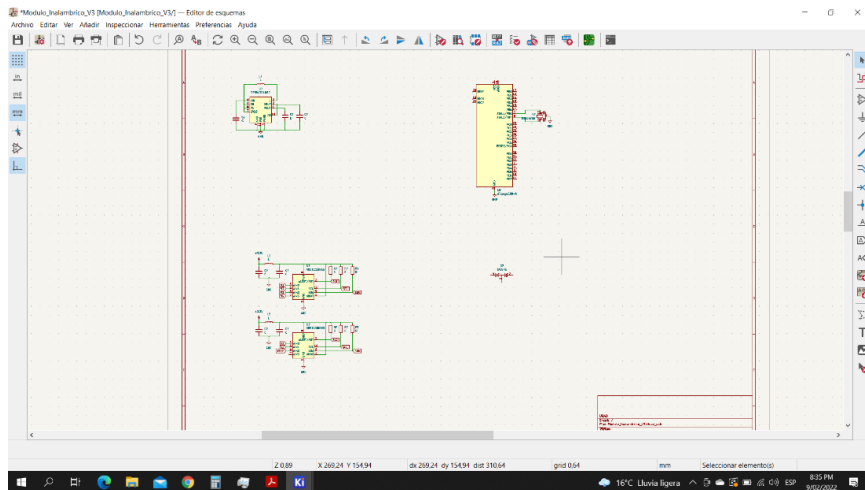
where:
I is maximum current in A
ΔT is temperature rise above ambient in °C
W is width in mils
H is thickness (height) in mils
K is 0.024 for internal traces or 0.048 for external traces

Fuente: Elaboración propia

En las figuras 31 y 32 se muestra el proceso de captura de esquemático, es necesario crear el símbolo del amplificador operacional del circuito de referencia de voltaje no presente en la librería, el proceso es rápido e intuitivo ya que se cuenta la información suficiente en la documentación del programa.

Figura 31

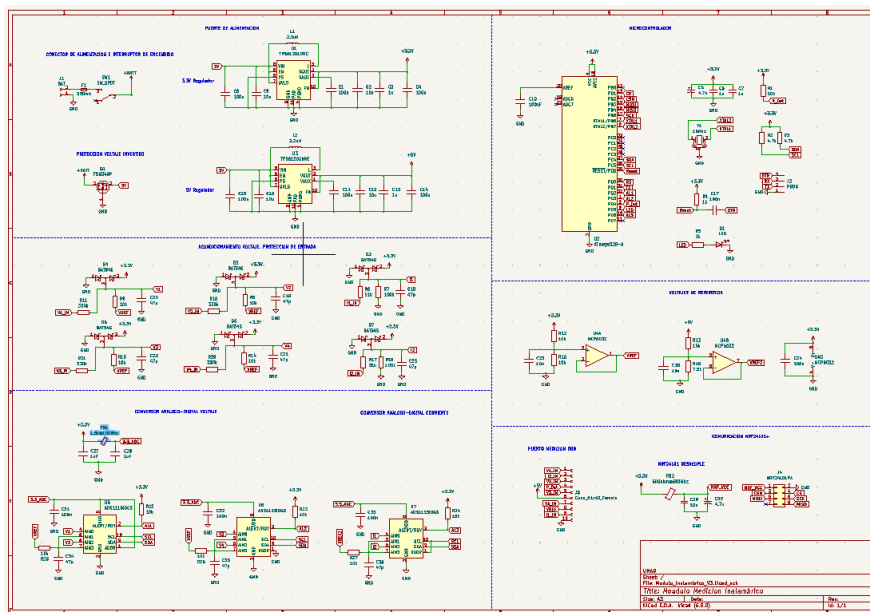
Inicio de la Captura del Esquemático



Fuente: Elaboración propia

Figura 32

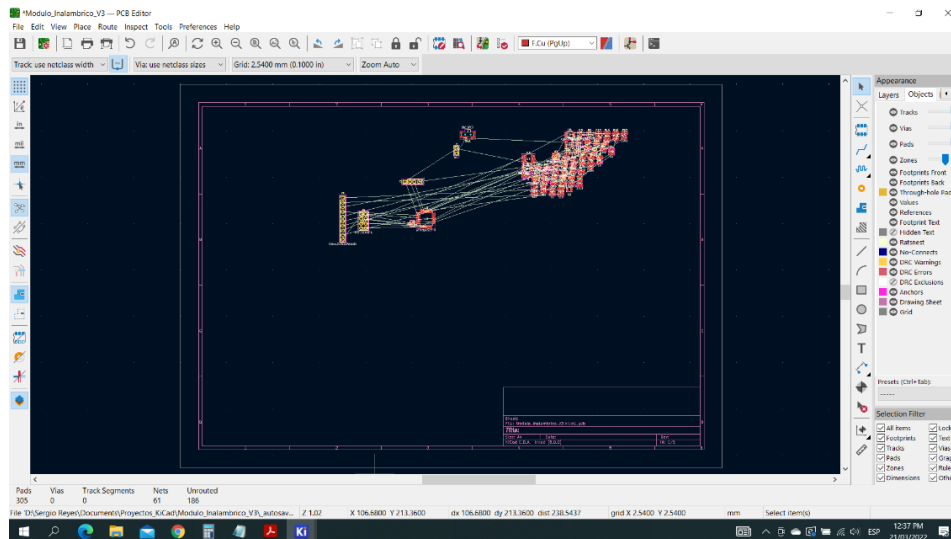
Captura de esquemático terminado



Fuente: Elaboración propia

Figura 33

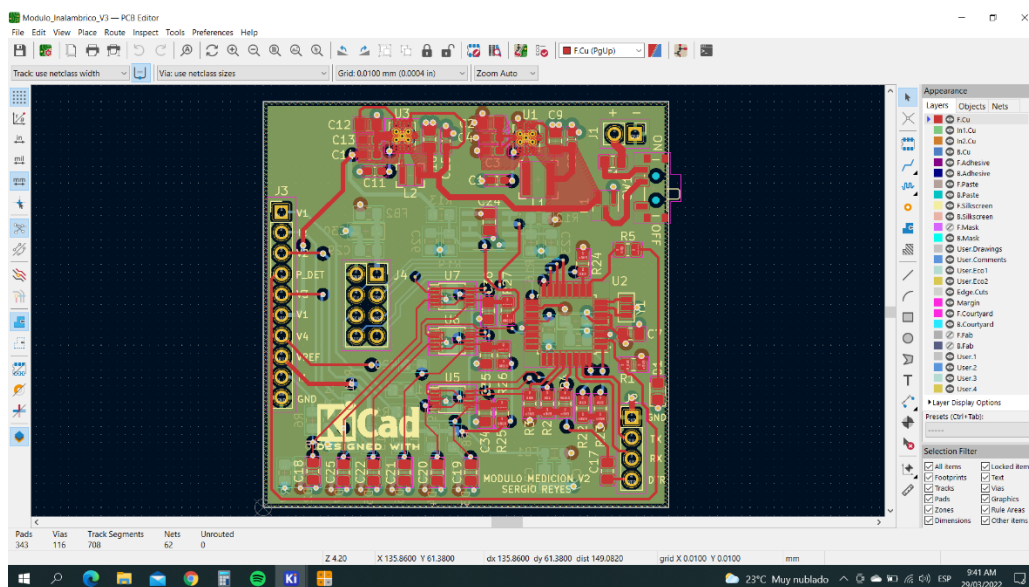
Inicio del diseño del PCB del Módulo de Medición Inalámbrico



Fuente: Elaboración propia

Figura 34

Diseño del PCB del Módulo de Medición Inalámbrico Terminado

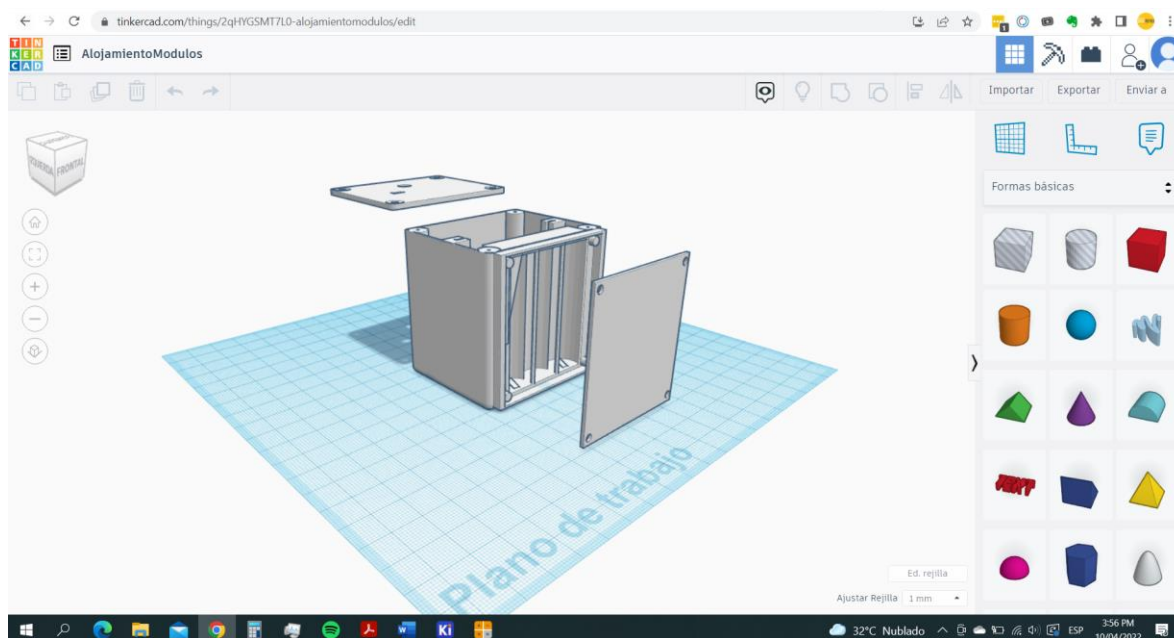


Fuente: Elaboración propia

Desarrollo de caja de alojamiento: El desarrollo se lleva a cabo en la plataforma de Tinkercad, el alojamiento se compone de dos compartimientos cada uno con su respectiva tapa, el compartimiento principal aloja la tarjeta o PCB la cual es deslizada en medio de dos ranuras tipo U en las paredes laterales, al fondo de la caja se encuentra el conector DB9, la tapa superior es asegurada con tornillos en los 4 postes ubicados en las esquinas internas y tiene dos agujeros para el interruptor de encendido y la salida de la antena del módulo transceptor NRF24L01. El compartimiento secundario es para alojar 3 baterías AA que suministran la alimentación para la tarjeta. El diseño del modelo se envía a impresión 3D.

Figura 37

Caja Alojamiento Modulo Medición Inalámbrico



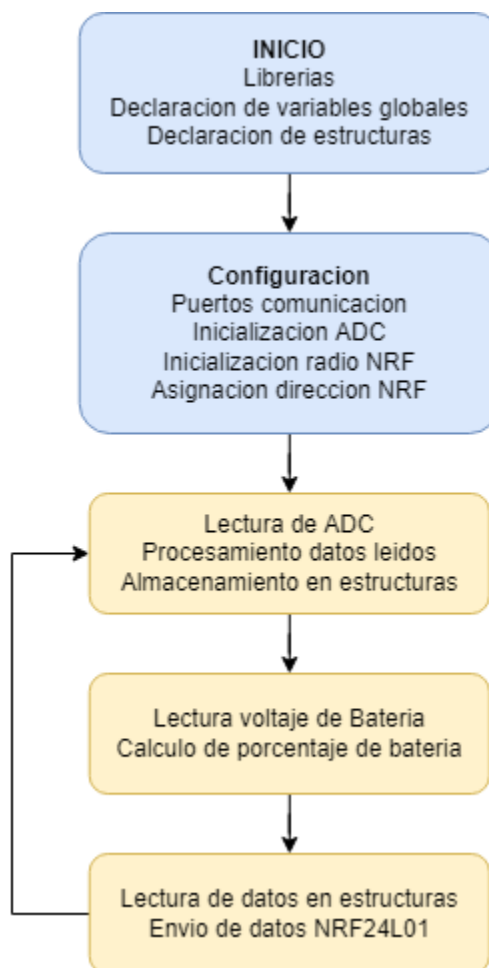
Fuente: Elaboración propia

Desarrollo de software del módulo inalámbrico

El desarrollo del software se migra del IDE de Arduino a la plataforma de Platformio la cual funciona en base al editor de código Visual Studio Code, debido a la cantidad avanzada de características disponibles en este editor, se utiliza para el desarrollo del código para la segunda versión de los dos módulos.

Figura 38

Diagrama de Bloques del Código Modulo Medición Inalámbrico



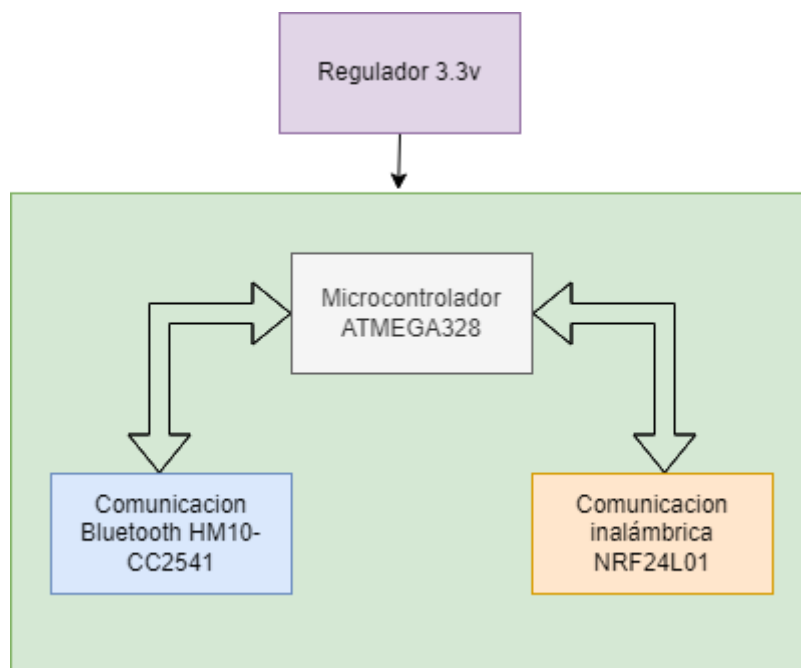
Fuente: Elaboración propia

Desarrollo de hardware modulo master

En el siguiente es el diagrama de bloques del módulo master, se observan dos cambios principalmente, el cambio en la fuente de alimentación en donde se utiliza una única fuente de 3.3v utilizando el regulador TPS61201 y el cambio del módulo bluetooth en donde se reemplaza el módulo HC05 por el módulo HM10-CC2541.

Figura 39

Diagrama de Bloques del Módulo Master



Fuente: Elaboración propia.

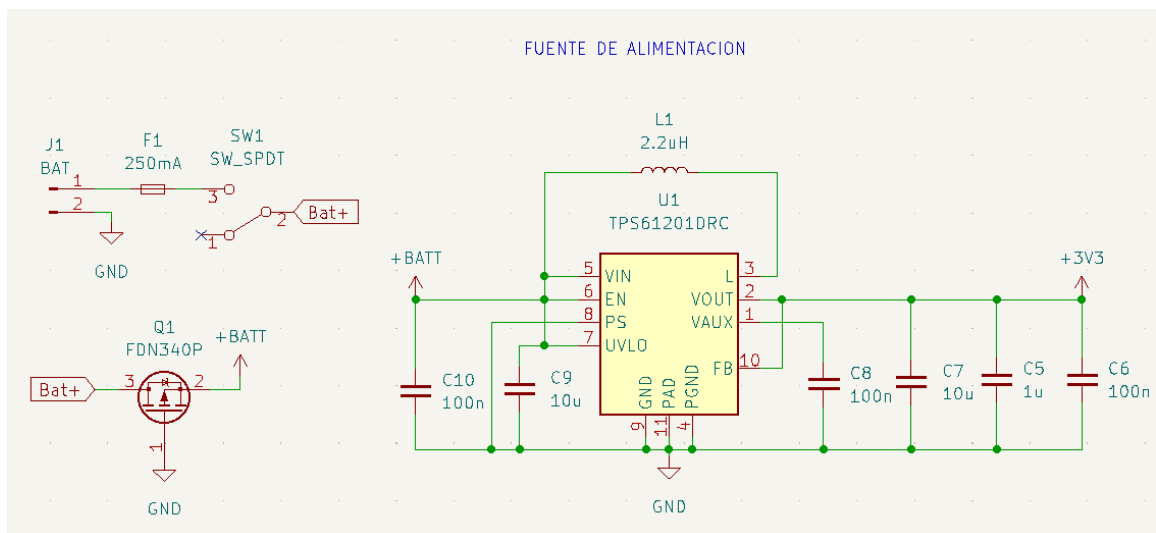
El módulo HM10-CC2541 presenta varias ventajas frente al módulo HC05, es una actualización importante en cuanto a la comunicación bluetooth, el módulo HM10 usa el protocolo 4.0 introducido en el 2010 frente al protocolo 2.0 introducido en el 2004 utilizado por el módulo HC05. El protocolo 4.0 hace uso de la tecnología BluetoothLowEnergy o BLE

desarrollado con el objetivo de reducir el consumo de energía, es ampliamente utilizado en sensores que envían datos a bajas tasas de refresco.

Fuente de alimentación: En la segunda versión se actualiza la fuente de alimentación en donde todos los componentes se conectan a 3.3v suministrados por el regulador TPS61201 utilizando en el módulo de medición inalámbrico, su funcionamiento se describe en el capítulo del desarrollo de hardware del segundo prototipo del módulo de medición inalámbrico, la protección por sobre corriente e inversión de voltaje es realizada por un fusible y un mosfet de canal P respectivamente, el regulador es alimentado por 3 baterías AA de 1.5v, también es posible utilizar baterías recargables AA de 1.2v.

Figura 40

Fuente de Alimentación del Módulo Master basada en Regulador TPS61201



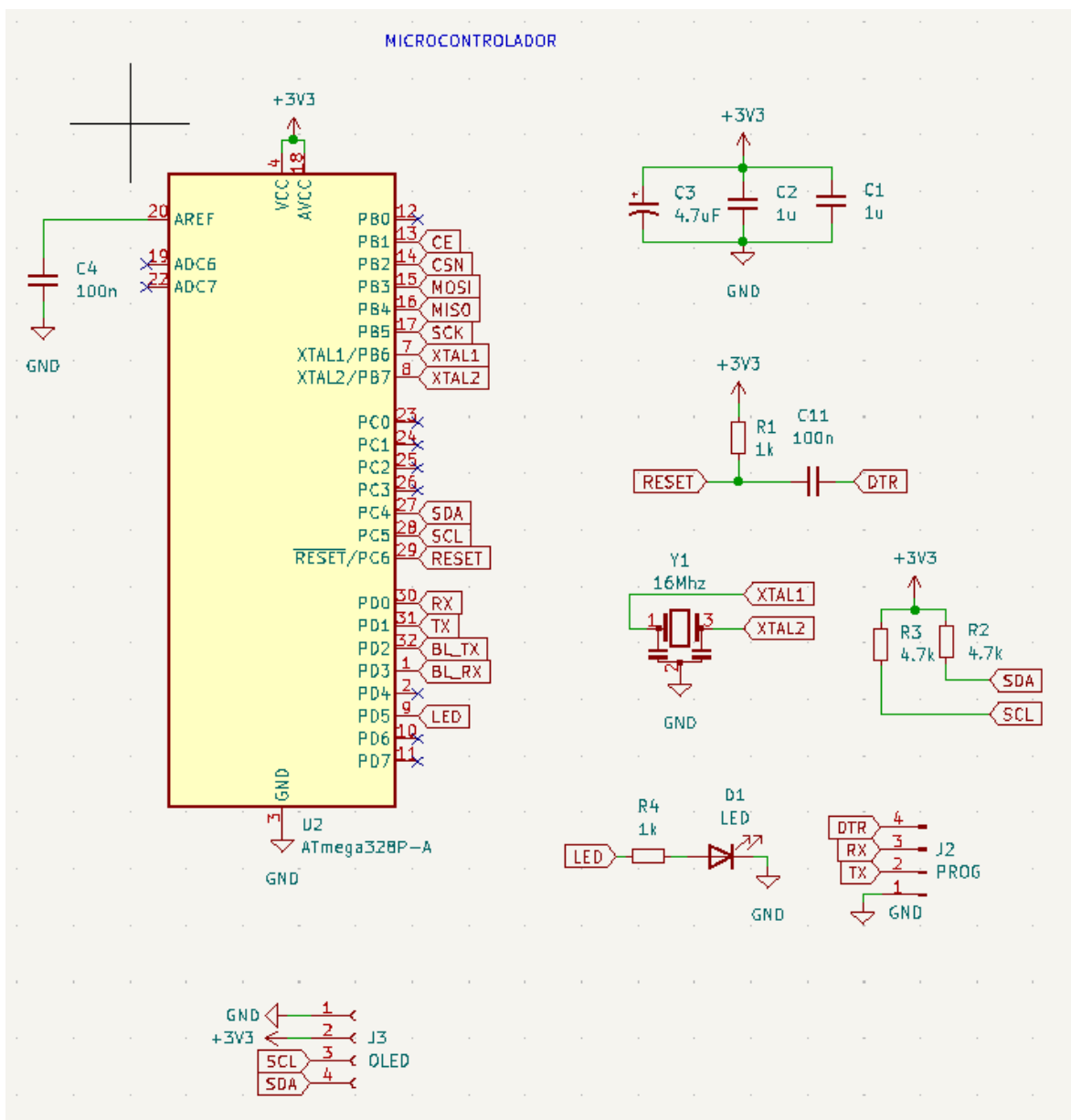
Fuente: Elaboración propia

Microcontrolador: Se utiliza el microcontrolador Atmega328 como en la primera versión, adicionalmente se incluyen un led de estado y una pantalla OLED para visualizar información correspondiente al estado de conexión de los módulos utilizados, esto debido a que

en la primera versión no era posible conocer que módulos se encuentran conectados y cuál es el estado de la conexión. La conexión de la pantalla OLED se realiza por I2C.

Figura 41

Microcontrolador y Circuitos Asociados del Módulo Master

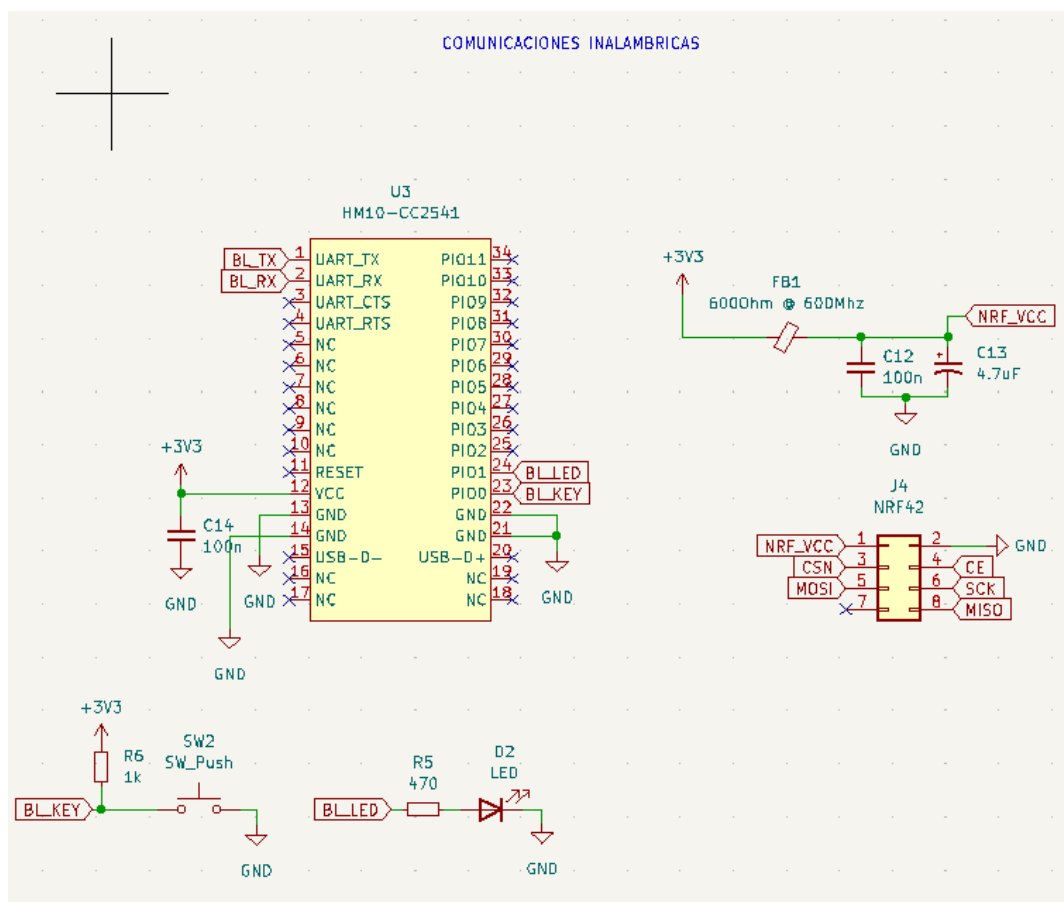


Fuente: Elaboración propia

Comunicación inalámbrica: El módulo master cuenta con dos sistemas de comunicación inalámbrica, un módulo bluetooth HM10 basado en el circuito integrado CC2541 y un módulo NRF24L01+PA que se utiliza para conectarse a los módulos de medición inalámbrica, el módulo HM10 se conecta al microcontrolador por el protocolo UART, debido a que el microcontrolador solo cuenta con un puerto UART, se realiza la conexión a un puerto simulado para no interferir con el puerto utilizado para programar el microcontrolador, el módulo NRF24L01+PA utiliza el protocolo SPI.

Figura 42

Comunicaciones Inalámbricas del Módulo Master

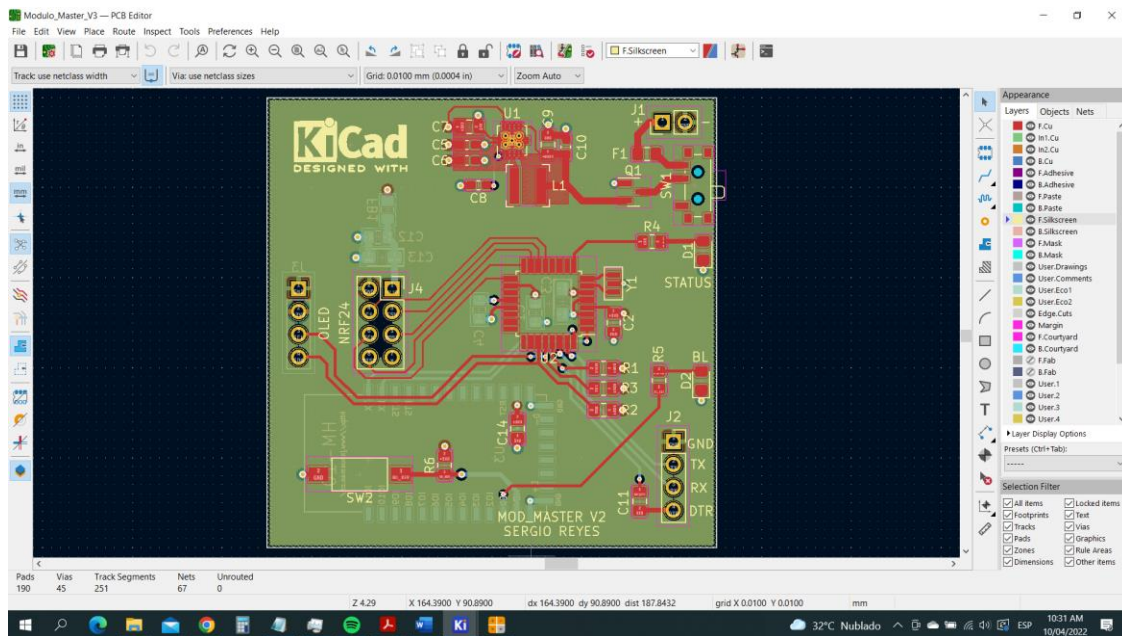


Fuente: Elaboración propia

Diseño del PCB: La captura del esquemático y el diseño del PCB se realizan en KiCad, se crean los símbolos y las huellas necesarias que no se encuentran disponibles en las librerías, el proceso de creación de símbolos o huellas se puede realizar desde cero o se pueden utilizar elementos similares, los cuales se editan y se guardan con la nueva identificación. Se utiliza una placa de 4 capas, en donde las dos capas internas se conectan a las líneas de alimentación y las capas exteriores se usan para el montaje de componentes y líneas de conexión de señales. Para el diseño del PCB se utiliza la norma IPC-2221.

Figura 43

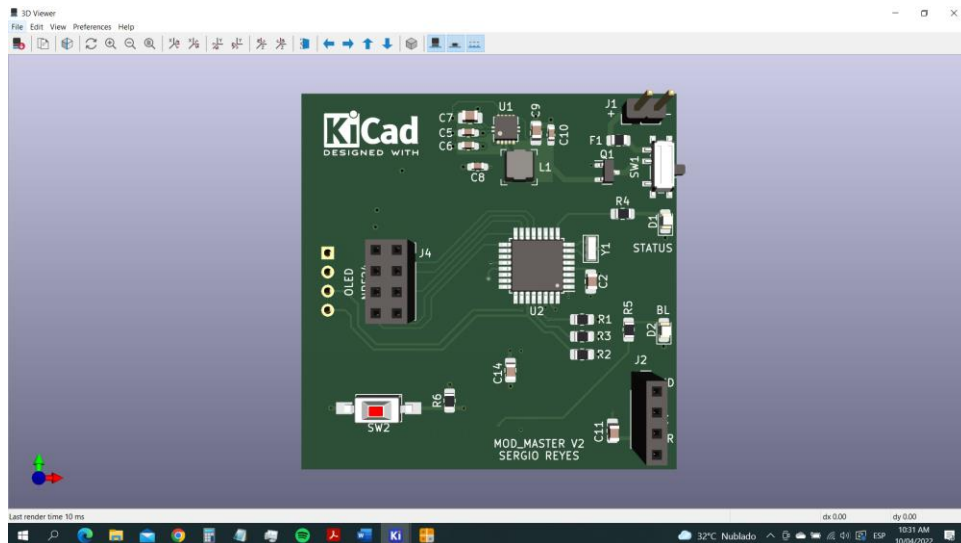
PCB del Módulo Master



Fuente: Elaboración propia

Figura 44

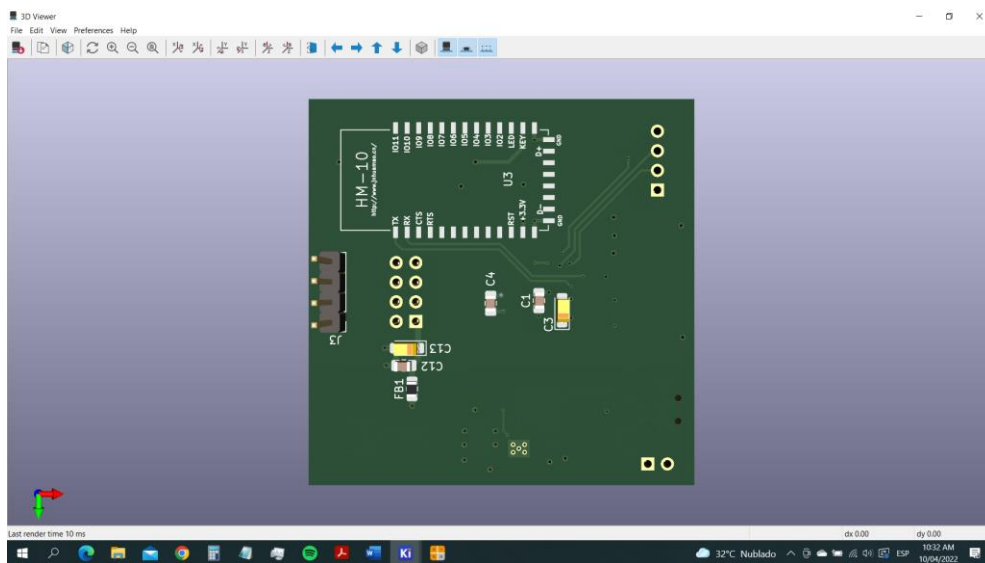
Visualización 3D del Módulo Master Capa Superior



Fuente: Elaboración propia

Figura 45

Visualización 3D Modulo Master Capa Inferior



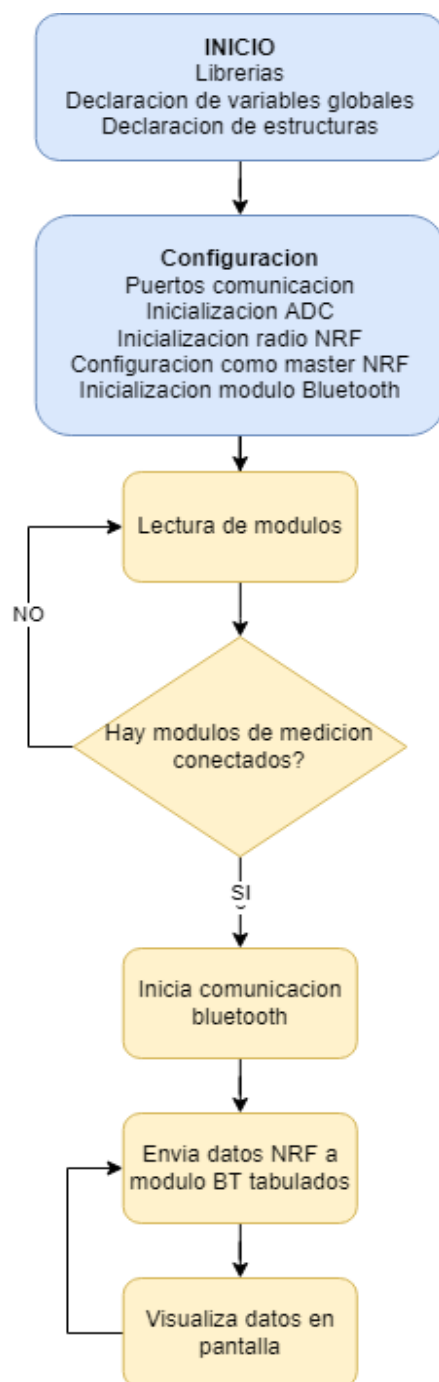
Fuente: Elaboración propia

Desarrollo software modulo master

El desarrollo del software se realiza en el editor Visual Studio Code utilizando el plugin de Platformio. En la figura 46 se observa un diagrama general de la estructura del código, se utilizan librerías para la conexión SPI, lectura de datos de los convertidores ADS115, comunicación I2C, administración del módulo NRF24 y administración de la conexión en red de los módulos NRF24. El envío de los datos entre los módulos NRF24 se realiza por medio de estructuras de datos que se declaran al principio del programa, esto permite mediante una única instrucción el envío de un paquete de datos que contiene todas las mediciones realizadas por cada módulo de medición, el módulo master las recibe, almacena y luego envía de forma tabulada mediante bluetooth al dispositivo Android que contiene la aplicación para su visualización, esta recibe los datos y los separa mediante las tabulaciones enviadas por el módulo master.

Figura 46

Diagrama de Bloques del Código Modulo Master



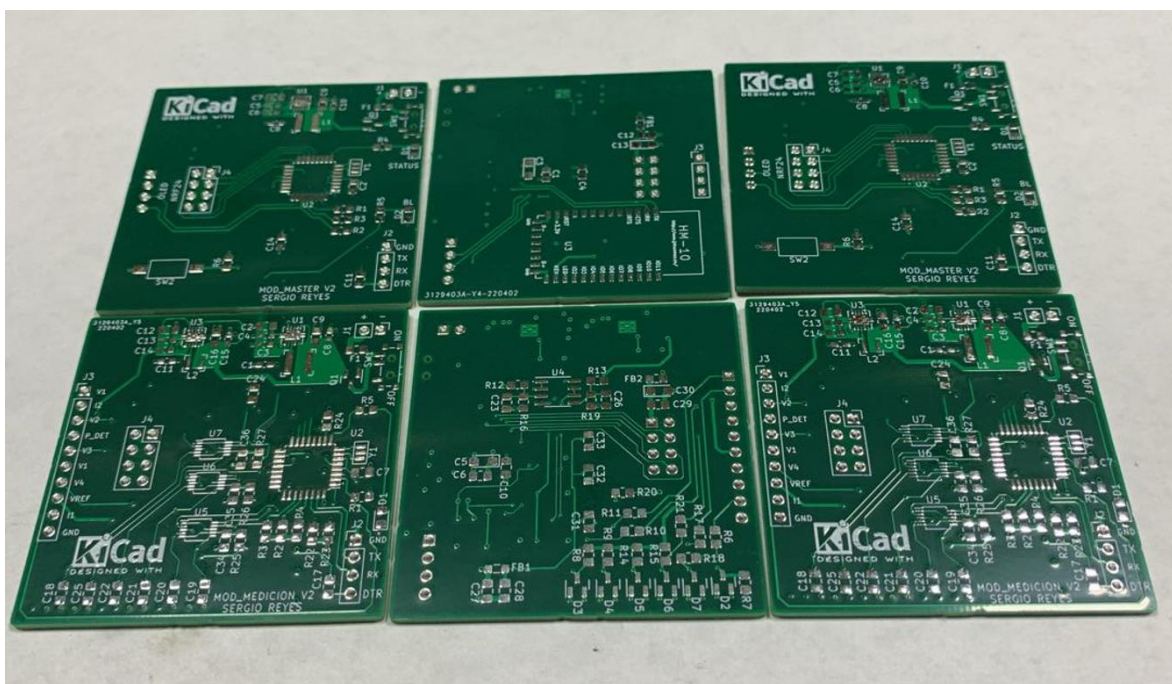
Fuente: Elaboración propia

Ensamble de Modulo Master y Módulos de Medición

El proceso del ensamble inicia con el envío de los archivos Gerber a JLCPCB para su correspondiente fabricación, no es posible realizar el proceso de fabricación usando el mercado local debido a que el diseño no se ajusta a las capacidades técnicas que ofrecen las empresas locales. Se realiza la adquisición de todos los componentes en las diferentes tiendas del mercado local, el diseño de las cajas en donde se alojan los módulos se realiza en Tinkercad y se envía a impresión 3D.

Figura 47

PCB del Módulo Master y Módulos de Medición



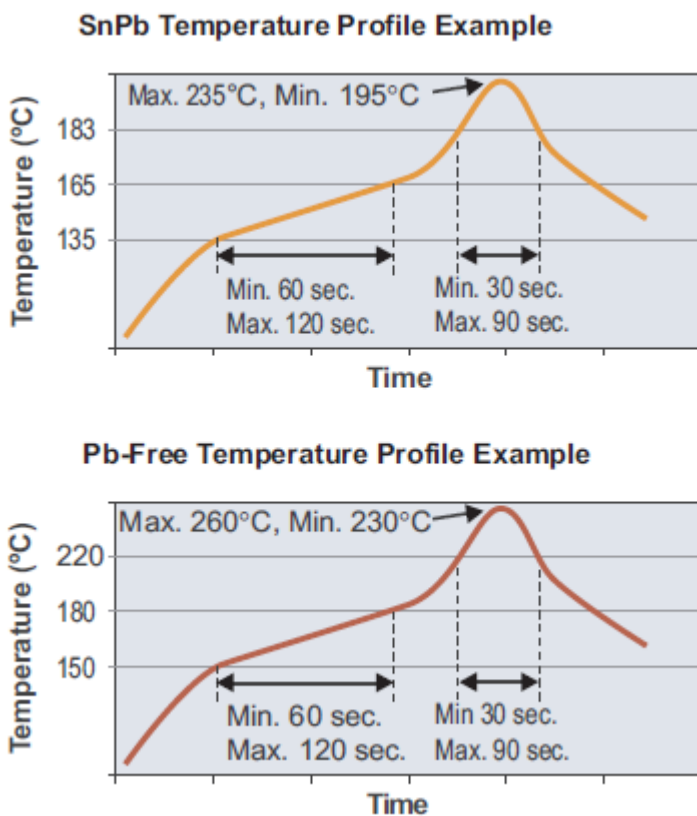
Fuente: Elaboración propia

En la figura 48 y 49 se observa el inicio del montaje de los componentes, el cual se realiza soldando cada componente por separado, la soldadura de los componentes en conjunto requiere un horno o bandeja de calentamiento, el estencil y soldadura especial, debido a eso se procede a instalar los componentes mediante técnicas convencionales. Los primeros componentes en ser instalados son los dos reguladores TPS61201 y TPS61202 que vienen en encapsulado QFN10, se sueldan junto con las bobinas de montaje superficial de cada regulador, se utiliza un proceso de soldadura con aire caliente en donde se controla la temperatura con una termocupla sobre la PCB, se realiza un proceso de precalentamiento de uno a dos minutos hasta llegar a una temperatura entre 150 y 180 grados y luego se aumenta la temperatura hasta 260 grados centígrados, entre los componentes y los pads de la PCB se aplica flux para eliminar impurezas, evitar que el estaño de la soldadura quede conectando dos pines contiguos y para fijar el componente mientras se aplica el aire caliente, luego de llegar a la temperatura de fusión se realiza un proceso en donde se retira enfriamiento controlado para evitar cambios bruscos que pueden provocar fisuras en los componentes, soldadura y pistas de la PCB. Luego de que la PCB se encuentra a temperatura ambiente se procede a realizar la limpieza de los restos de flux e inspección de cada uno de los pines de los componentes.

En la figura 50 se muestra el proceso de soldadura recomendado por el fabricante, la parte superior de la gráfica corresponde al perfil de temperatura para soldadura estaño-plomo, la parte inferior se detalla para soldadura libre de plomo

Figura 50

Perfil de Temperatura Recomendado por el Fabricante



Nota: Adaptado de “QFN and SON Pb and Pb-Free Example Reflow Profiles” (p.14) por K Steve, L Bernhard, N Dominic, 2002, Application Report SLUA271B Texas Instruments

Luego de realizar el proceso de soldadura en los reguladores se procede a continuar con los procesadores ATMEGA siguiendo el mismo proceso.

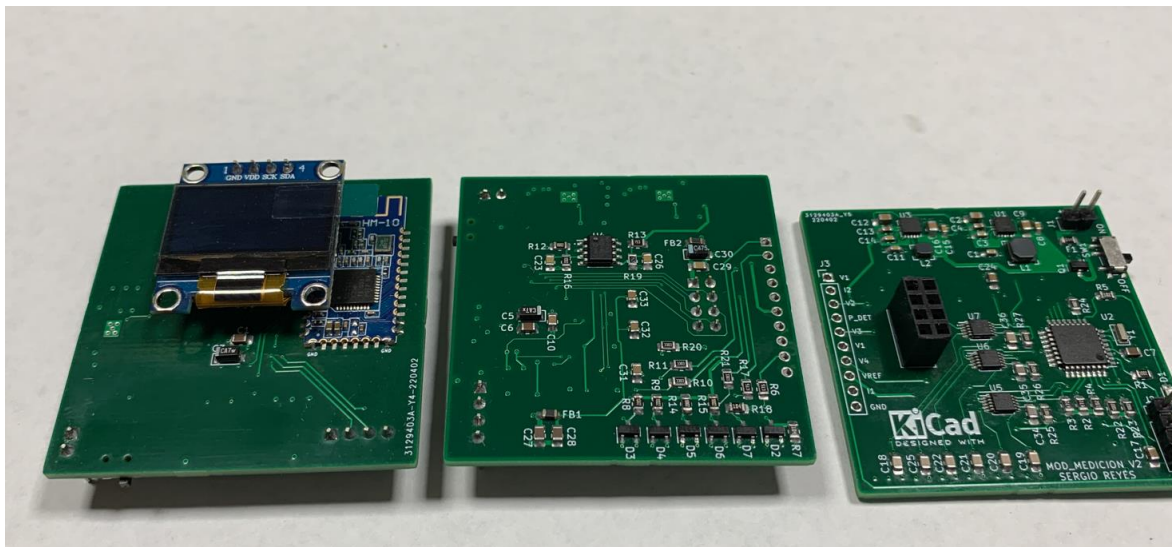
Figura 51*Proceso de Soldadura Procesadores ATMEGA328*

Fuente: Elaboración propia

Luego de instalar procesador, cristal y convertidores ADC, se procede a instalar el resto de componentes pasivos usando caudín a la temperatura adecuada de cada componente. En la figura 52 se muestran tres PCB con todos los componentes instalados.

Figura 52

PCB con todos los componentes instalados

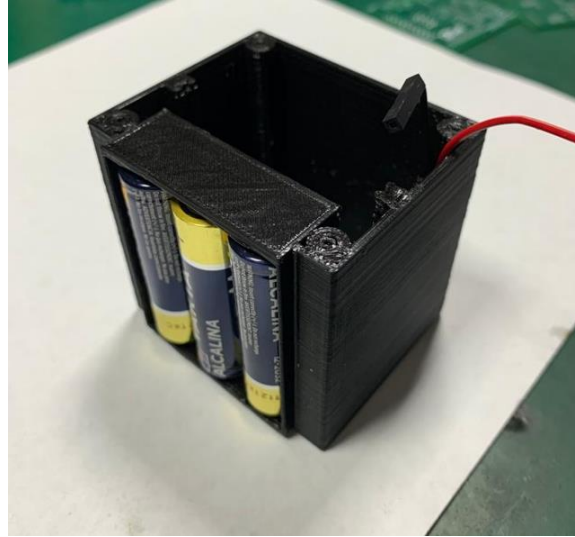


Fuente: Elaboración propia

Luego de terminar con el montaje se procede a programar cada tarjeta y realizar pruebas de funcionamiento para luego montarlas en sus respectivas cajas de alojamiento. En la figura 53 se muestra el compartimiento de las baterías utilizadas para alimentar los módulos, este queda separado de la tarjeta que se encuentra alojada en el compartimiento principal sujeta por dos rieles laterales por los cuales se desliza durante el proceso de ensamble, en el fondo se encuentra el conector DB9 el cual permite la conexión del arnés de medición.

Figura 53

Detalle del Compartimiento de las Baterías



Fuente: Elaboración propia

Figura 54

Tarjeta del Módulo Medición Instalada en Caja de Alojamiento



Fuente: Elaboración propia

EL módulo master y el módulo de medición cuentan con unas dimensiones de 5.3cmx6.05cmx5.9cm sin antena, lo cual es una mejora significativa con respecto al tamaño del primer prototipo y al tamaño de instrumentos de medición convencionales o con capacidad de transmitir mediciones de manera inalámbrica.

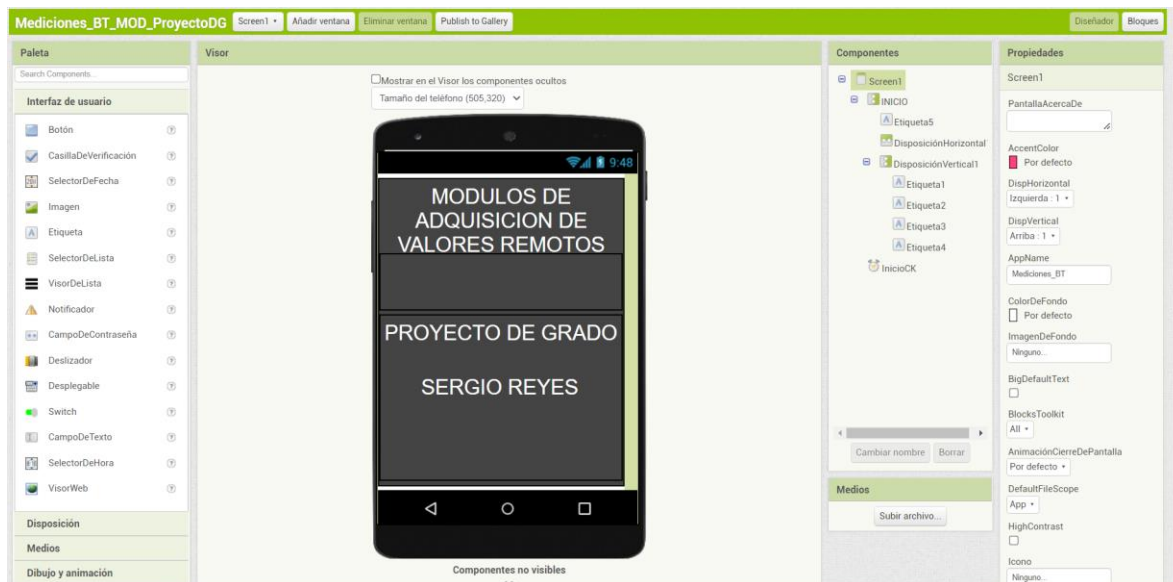
Desarrollo de aplicación Android

La aplicación se desarrolla en la plataforma AppInventor, la aplicación terminada se puede instalar en dispositivos Android como smartphones o tabletas. El uso de una aplicación Android permite flexibilidad al momento de mostrar la información, se pueden presentar múltiples datos en diferentes disposiciones, a futuro se puede implementar más funciones al sistema de medición, como presentación de datos mediante gráficos, estadísticas, valores máximos, mínimos, almacenar los datos recibidos en una base de datos local o en la nube para luego analizarlos o compartirlos a otro usuario. El desarrollo de la aplicación se divide principalmente en dos partes dentro del entorno de AppInventor, la pestaña de Diseñador y la pestaña de Bloques.

Pestaña diseñador

Figura 55

Pestaña Diseñador AppInventor



Fuente: Elaboración propia

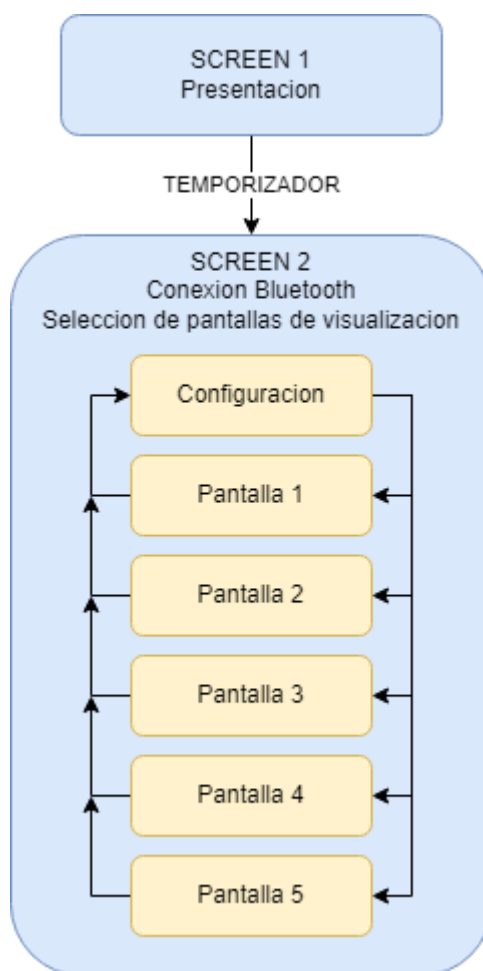
La pestaña de Diseñador es el lugar en donde se define la apariencia estética de la aplicación, botones, texto, colores. En la pestaña diseñador hay dos tipos de bloques los bloques visibles en los cuales hay etiquetas, bloques invisibles, disposiciones, iconos y listas, en los bloques invisibles tenemos componentes como Bluetooth o relojes. Esta aplicación cuenta con dos pantallas o Screen generadas con las opciones predeterminadas que ofrece App inventor, en la primera pantalla hay una presentación que dura dos segundos para luego dar paso a la visualización de la segunda pantalla. En la segunda pantalla tenemos seis pantallas creadas con disposiciones verticales, una de configuración y cinco de visualización de datos con diferentes configuraciones, cuando queremos cambiar de una pantalla a otra sólo es necesario hacer invisible la disposición en dónde se encuentra todo el contenido de la pantalla activa y hacer

visible la pantalla a la que uno se dirige. Fue necesario crear estas 6 pantallas mediante disposiciones dentro de la segunda pantalla o Screen2 debido a que la conexión bluetooth solo funciona en una pantalla generada de forma convencional en AppInventor.

En la figura 56 se observa la configuración de las pantallas, dos pantallas principales y seis pantallas creadas con disposiciones dentro de la pantalla 2, de esta forma la conexión bluetooth que se realiza en la pantalla 2 funciona para las 6 pantallas que esta aloja.

Figura 56

Diagrama de Bloques Diseño de App Android

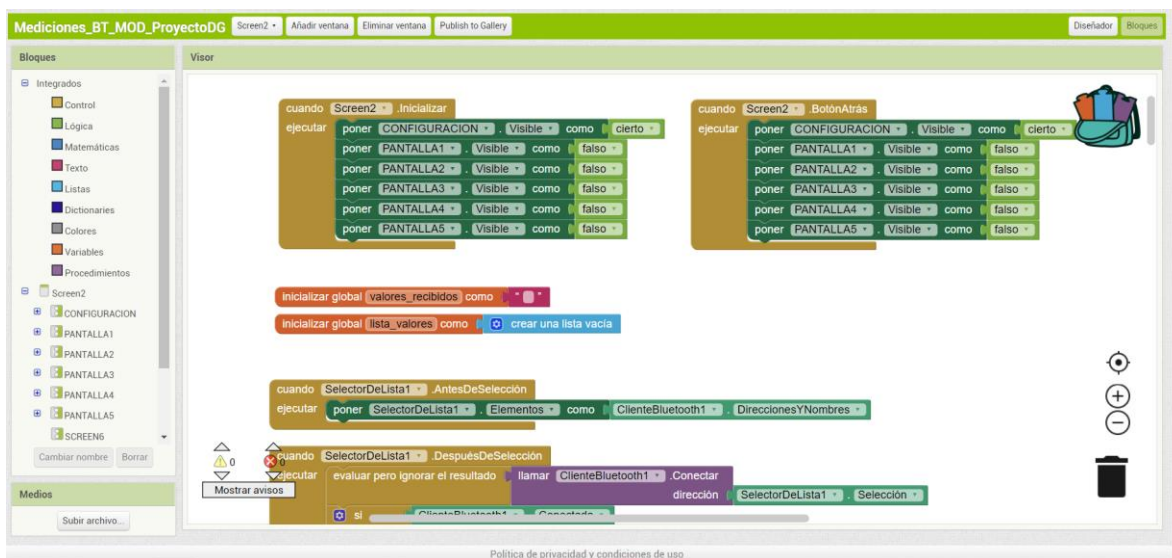


Fuente: Elaboración propia

Pestaña Bloques

Figura 57

Pestaña Bloques AppInventor



Fuente: Elaboración propia

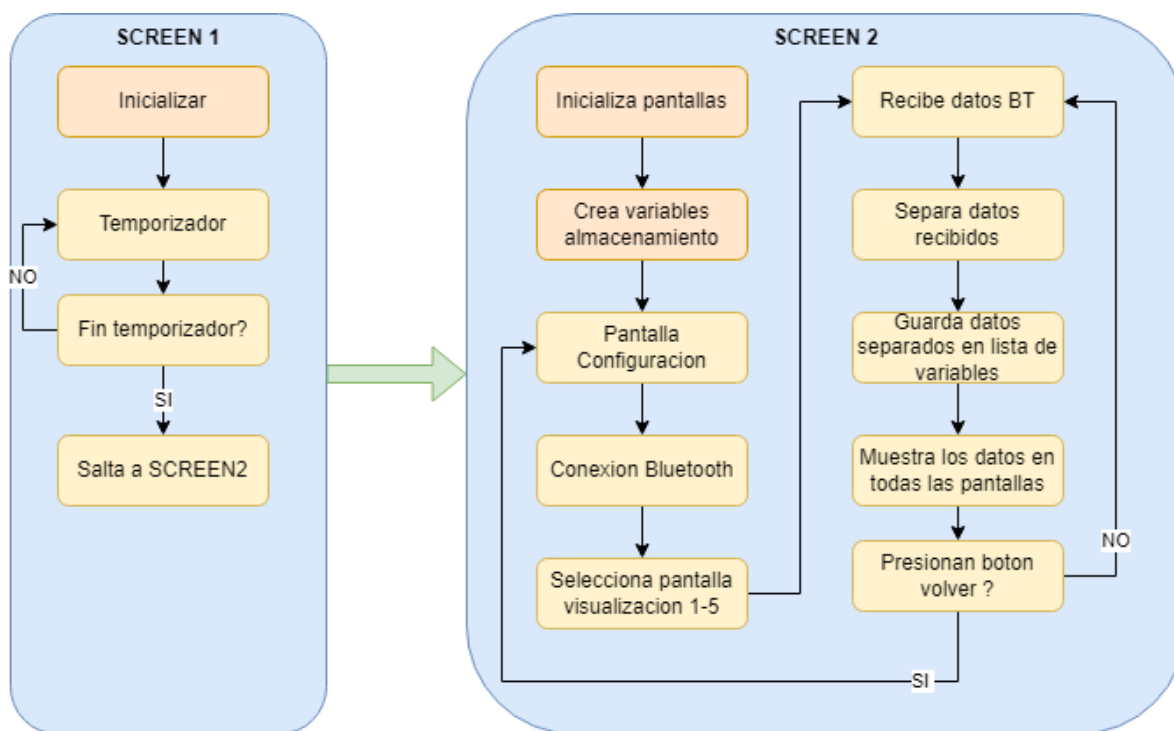
En la pestaña Bloques se programa el funcionamiento de la aplicación, se tienen disponibles bloques que realizan diferentes funciones y los elementos que se crearon en la pestaña Diseñador.

Inicialmente en la pantalla 1 se visualiza una presentación por 2 segundos, mediante un temporizador se contabiliza el tiempo y luego se abre la pantalla 2, en esta pantalla se inicia controlando la visibilidad de cada una de las 6 disposiciones o pantallas, se ajustan como invisibles las 5 pantallas de visualización de datos y se ajusta como visible la pantalla de configuración, en esta se encuentra el elemento que permite realizar la conexión bluetooth, se crean dos variables, una en donde se almacenan los datos recibidos y otra en donde se almacenan los datos ya separados. La actualización de recepción de datos se controla mediante un temporizador de 300ms, cada vez que se reciben datos estos se almacenan en una variable, luego

se procede a separar los datos recibidos, se utiliza un carácter especial entre cada dato para identificar su longitud, el módulo master envía un paquete de datos con 21 datos de 3 módulos de medición, esos 21 datos están separados por un carácter especial, cada vez que se lee el carácter se procede a guardar el dato en una casilla específica de la lista, luego los datos enviados a cada una de las etiquetas de las 5 pantallas de visualización, las cuales tienen distintas configuraciones para mostrar los datos. En la figura 58 se observa un diagrama de bloques del funcionamiento general de la programación realizada en la pestaña Bloques.

Figura 58

Diagrama de Bloques Programación App Android



Fuente: Elaboración propia.

Análisis de resultados

Desarrollo de los prototipos

Primer Prototipo

El análisis de los resultados obtenidos luego de realizar el proceso de diseño, montaje y pruebas de funcionamiento se divide de la siguiente forma:

Diseño: El desarrollo del diseño se complementa entre pruebas físicas y simulación de los diferentes circuitos que componen cada uno de los módulos. La simulación de circuitos digitales es realizada en Proteus en donde se cargan archivos hexadecimales en microcontroladores para depurar programas antes de realizar montajes físicos, la captura de esquemáticos es realizar de forma rápida en el software basado en la nube de EASYEDA debido a que este cuenta con una extensa librería basada en aportes de quienes lo utilizan, el software es libre y aunque cuenta una documentación básica por parte del propietario, se encuentran suficientes recursos en internet por su uso extendido.

La simulación de circuitos análogos es realizada en Micro-Cap, este es un potente software que en la actualidad es libre luego de un desarrollo de más de 40 años durante los cuales fue utilizado por las empresas con la capacidad de pagar los altos costos de la licencia, tiene una muy detallada documentación y gran cantidad de características que permiten realizar simulaciones avanzadas obteniendo gráficos de alta calidad con herramientas interactivas para la toma de mediciones.

Proceso de montaje: El tiempo de fabricación de los PCB es de 2 días para el PCB del módulo master fabricado mediante maquinado CNC y de 10 días para el PCB del módulo inalámbrico, el montaje de los componentes en el módulo master es sencillo, sin embargo, se debe tener especial cuidado en el proceso de soldadura debido a que la falta de la máscara de

soldadura (Solder mask) permite que las conexiones cercanas se unan fácilmente. El montaje de los componentes de modulo inalámbrico requiere mayor tiempo por la complejidad, pero el terminado del PCB permite obtener un mejor resultado, la máscara de componentes facilita la ubicación de estos y las conexiones de los componentes o pad tienen una capa de estaño aplicada en fabrica que permite un mejor proceso de soldadura

Proceso de conexión entre modulo master y modulo inalámbrico: La conexión entre el módulo master y los módulos inalámbricos se realiza sin problemas en el laboratorio, en pruebas de campo se conectan dos módulos inalámbricos al módulo master pero se presentan problemas en donde es necesario desmontar la antena del módulo NRF24L01 del módulo master para mantener la comunicación activa, se requiere realizar pruebas adicionales para determinar la causa de la falla en la conexión, controlar los canales de comunicación de los módulos NRF24L01 para evitar interferencias con el módulo Bluetooth el cual trabaja en el mismo espectro de frecuencias. Se dificulta conocer el estado de la conexión de los módulos debido a que no se cuenta con dispositivos de visualización que permita diagnosticar el estado de conexión.

Proceso de conexión entre modulo master y teléfono Android: Esta conexión se realiza mediante Bluetooth, para establecer la conexión es necesario realizar varios intentos, se requieren pruebas en donde se deshabiliten los módulos NRF24L01 que pueden causar interferencia como se describió en el punto anterior

Autonomía de modulo master y modulo inalámbrico: El consumo promedio de los módulos master es de 73mA y de los módulos inalámbricos es de 70mA lo cual con 2 baterías de 2000mA y 3.7V conectadas en serie, en teoría nos da una autonomía 54 horas de uso continuo en condiciones ideales.

Rango de alcance: El rango de alcance de los módulos NRF24L01+PA según el fabricante es de 1km en línea de vista directa, lo cual es más que suficiente para la aplicación en donde se estima distancias máximas de medición de 100m.

Características de medición de voltaje

Visualización de datos: La visualización de datos en el dispositivo Android, aunque permite observar de manera clara la tasa de refresco de los datos se ve afectada por problemas de sincronización de lectura del paquete de datos de la aplicación desarrollada en la plataforma APP Inventor, al leer los datos mediante un monitor serial la tasa de refresco aumenta considerablemente, se deben realizar cambios en la forma en que la aplicación recibe y procesa los datos para luego mostrarlos en pantalla, sin embargo los resultados obtenidos son suficientes para permitir un rápido diagnóstico en el equipo de prueba seleccionado en campo.

Segundo Prototipo

Para el análisis de los resultados obtenidos luego del desarrollo del segundo prototipo se utilizan los mismos parámetros utilizados para analizar el primer prototipo, de esta forma se pueden identificar de una mejor manera las mejoras realizadas y los puntos que requieren modificaciones adicionales.

Diseño: En el proceso de diseño del segundo prototipo se realizan cambios en el software de captura y diseño del PCB y en el software de edición de código y programación del microcontrolador. En el caso del software de captura y diseño del PCB el cambio se realiza de la plataforma de EASYEDA a KiCad, debido a mejores características que ofrece el software de KiCad sobre todo en el desarrollo de proyectos complejos que a futuro se planean desarrollar, la plataforma de EASYEDA funciona bien para proyectos en donde se necesita obtener resultados de manera rápida, se requiere trabajar en diferentes equipos o de manera colaborativa, para

proyectos que incluyen gran cantidad de archivos KiCad ofrece mejores características. La visualización 3D en KiCad funciona de manera fluida y con mejores resultados, las librerías de componentes y huellas son extensas, en donde además crear nuevos componentes o huellas no implica retos adicionales. El software de edición de código se migra del IDE de Arduino a Visual Code Studio con una extensión llamada Platformio, se destaca principalmente la característica de auto completado de código, que facilita en gran medida la escritura del mismo, otra característica importante es el manejo de librerías dedicadas para cada proyecto, es posible que existan problemas de compatibilidad entre diferentes versiones de librerías, Platformio permite asignar versiones específicas de una librería a cada proyecto de manera independiente. Es posible ir a las definiciones desde el archivo principal a los archivos de las librerías de manera rápida a diferencia del IDE de Arduino. Muchas otras características pueden ser activada en Visual Code Studio con solo instalar una extensión. En general el uso de estas dos nuevas herramientas permite obtener mejores resultados en el diseño y programación del segundo prototipo, además de generar nuevas habilidades para el desarrollo de proyectos a futuro.

Proceso de Montaje: El proceso de montaje de componentes es un reto debido a el tamaño de cada uno de los componentes utilizados, se evaluó realizar el proceso de soldadura utilizando estencil y horno o bandeja de calor, sin embargo estas opciones se descartaron por el aumento en presupuesto que suponían, para el montaje de los reguladores con QFN10, convertidores ADC, procesador y cristal se usa la técnica de soldadura aplicando flujo de aire caliente y controlando la temperatura de manera manual mediante el uso de una termocupla ubicada en la superficie de la PCB, el resto de los componentes se sueldan usando caudín con control de temperatura de acuerdo a las indicaciones de los fabricantes. Finalmente se realiza el ensamble de 3 tarjetas, dos módulos de medición y un módulo master, quedando tarjetas

disponibles para 3 módulos de medición adicionales. Se toma la decisión de utilizar componentes de montaje superficial y en encapsulados de tamaño reducido debido a que la industria actual los usa de manera extendida en el desarrollo de todos los nuevos productos, de esta manera se da un paso importante al uso de tecnologías actuales.

Proceso de conexión entre modulo master y modulo inalámbrico: El proceso de conexión se realiza de la misma forma que en el primer prototipo, en el segundo prototipo se añade una pantalla OLED en el módulo master para diagnosticar la conexión con los módulos de medición, esto es una mejora considerable debido a que los datos en el primer prototipo permanecían congelados cuando se producía una desconexión de alguno de los módulos de medición, lo cual puede ser interpretado de manera errónea en el diagnóstico del equipo intervenido, adicionalmente a la información que se presenta en la pantalla se implementó un algoritmo que verifica de manera continua los datos recibidos para borrar el buffer de almacenamiento de datos recibidos correspondientes al nodo que ha presentado la desconexión, de esta forma se garantiza que no se visualicen mediciones erróneas en la aplicación.

Proceso de conexión entre el módulo master y aplicación Android: Se realizan cambios en la velocidad de transmisión de datos y verificación de un dato de inicio de transmisión del paquete que permite una mejor sincronización de la visualización de datos en la aplicación Android.

Autonomía de modulo master y modulo inalámbrico: El cambio de batería de dos baterías 18650 a tres baterías alcalina

Rango de alcance de conexión modulo master y módulos de medición: El rango de alcance de los módulos NRF24L01+PA según el fabricante es de 1km en línea de vista directa,

lo cual es más que suficiente para la aplicación en donde se estima distancias máximas de medición de 100m, los datos son similares que en el primer prototipo

Características de medición de voltaje: La resolución de medición se mantiene en el mismo valor del primer prototipo, pero se incluye una mejora importante en donde se añade la capacidad de medir voltajes negativos.

Visualización de datos en la aplicación Android: La visualización de los datos se realiza en la misma aplicación desarrollada para el primer prototipo, las mejoras obtenidas en la visualización de datos se logran con cambios realizados en la velocidad de transmisión de datos y sistema de sincronización.

Costos: Se presenta un aumento en los costos de los componentes del segundo prototipo, esto se debe a dos razones, los componentes utilizados para la fuente de alimentación en específico los reguladores tienen características avanzadas y procesos de fabricación más complejos que los reguladores lineales utilizados en el primer prototipo, la segunda razón es los escasos de semiconductores en la actualidad lo cual ha incrementado en gran medida el precio de los componentes que se encuentran disponibles. El proceso de fabricación de las PCB realizado en JLCPCB para una tarjeta de 4 capas con dimensiones de 50mm x 50 mm con terminado en el que se aplica estaño libre de plomo en todos los pads es de 6.8 dólares americanos por 5 tarjetas, frente a 40 dólares por 5 tarjetas fabricadas en el mercado local para los módulos de medición del primer prototipo. En las tablas 3 y 4 se relacionan los costos detallados de cada módulo.

Tabla 3*Relación de Costos Modulo Master*

Ítem	Descripción	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
1	PCB	1	\$ 12.000	\$ 12.000
2	Reg. TPS61201	1	\$ 25.000	\$ 25.000
3	Atmega 328	1	\$ 25.000	\$ 25.000
4	Condensador 1uF	3	\$ 500	\$ 1.500
5	Condensador 4,7uF	2	\$ 500	\$ 1.000
6	Condensador 100nF	3	\$ 400	\$ 1.200
7	Condensador 10uF	2	\$ 600	\$ 1.200
8	LED SMD	2	\$ 2.000	\$ 4.000
9	Fuse SMD	1	\$ 2.000	\$ 2.000
10	Ferrita 600ohm	1	\$ 1.200	\$ 1.200
	Conector BAT	1	\$ 100	\$ 100
11				
12	Conector PROG	1	\$ 100	\$ 100
13	Conector OLED	1	\$ 100	\$ 100
14	Conector NRF24	1	\$ 600	\$ 600

Ítem	Descripción	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
15	Transistor FDN340P	1	\$ 4.000	\$ 4.000
16	Resistencia 0805	6	\$ 60	\$ 360
17	Interruptor encendido	1	\$ 2.500	\$ 2.500
18	Interruptor pulsador	1	\$ 2.000	\$ 2.000
19	Módulo BT	1	\$ 20.000	\$ 20.000
20	Módulo NRF24L01	1	\$ 15.000	\$ 15.000
21	Resonador 16MHz	1	\$ 2.500	\$ 2.500
22	Bobina 2.2uH	1	\$ 1.000	\$ 1.000
23	Caja 3D	1	\$ 30.000	\$ 30.000
24	Ensamble PCB	1	\$ 50.000	\$ 50.000
			TOTAL	\$ 202.360

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4*Relación de Costos Modulo de Medición Inalámbrico*

Ítem	Descripción	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
1	PCB	1	\$ 12.000	\$ 12.000
2	Reg. TPS61201	1	\$ 25.000	\$ 25.000
3	Reg. TPS61202	1	\$ 25.000	\$ 25.000
4	Atmega328	1	\$ 25.000	\$ 25.000
5	Condensador 100nF	12	\$ 400	\$ 4.800
6	Condensador 10uF	4	\$ 600	\$ 3.400
7	Condensador 1uF	6	\$ 500	\$ 3.000
8	Condensador 10nF	3	\$ 600	\$ 1.800
9	Condensador 47pF	9	\$ 500	\$ 4.500
10	LED SMD	1	\$ 2.000	\$ 2.000
11	Diodo BAT54S	6	\$ 500	\$ 3.000
12	Fuse SMD	1	\$ 2.000	\$ 2.000
13	Ferrita 1,5K	1	\$ 1.200	\$ 1.200
14	Ferrita 600ohm	1	\$ 1.200	\$ 1.200

Ítem	Descripción	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
15	Conector BAT	1	\$ 100	\$ 100
16	Conector PROG	1	\$ 100	\$ 100
17	Conector 10 pin	1	\$ 200	\$ 200
18	Conector DB9	1	\$ 900	\$ 900
19	Módulo NRF24	1	\$ 15.000	\$ 15.000
20	Bobina 2,2uH	2	\$ 1.000	\$ 2.000
21	Transistor FDN340	1	\$ 4.000	\$ 4.000
22	Resistencia 0805	27	\$ 60	\$ 1.620
23	Interruptor encendido	1	\$ 2.500	\$ 2.500
24	Op amp MPC6032	1	\$ 7.200	\$ 7.200
25	ADS1115	3	\$ 28.000	\$ 84.000
26	Resonador 16MHz	1	\$ 2.500	\$ 2.500
27	Ensamble PCB	1	\$ 70.000	\$ 70.000
28	Caja 3D	1	\$ 30.000	\$ 30.000
			TOTAL	\$ 330.020

Fuente: Elaboración propia


Uso del Sistema Desarrollado en el Diagnostico de Maquinaria de Construcción

Comparativa con sistema comercial

Figura 59

Comparativa de Sistema de Medición Inalámbrico vs Versión Comercial Fluke

**COMPARATIVA DE SISTEMA DE MEDICION
INALAMBRICO VS VERSION COMERCIAL FLUKE**




2.741.000COP
SUCONEL

- Medicion de 2 variables de manera simultanea
- Rango de alcance de hasta 20m
- Rango medicion corriente de 0.5-400A
- Rango de medicion de voltaje de 0.1mV-1000V
- Medicion voltaje DC, AC, resistencia, continuidad.



2.472.000COP
MERCADOLIBRE



Modulo Master:202.360COP
Modulo Medicion:333.020COP

- Medicion de 6 variables de manera simultanea por Modulo de medicion conectado
- Rango de alcance de hasta 100m
- Rango de medicion de corriente dependiente de sonda utilizada.
- Rango de medicion de voltaje de 10mV a 50v
- Medicion de voltaje DC, corriente mediante sonda externa, presion mediante transductor externo.

Nota: Adaptado de *Multímetro Fluke FC3000 por Fluke, 2022* [imagen], Fluke

(<https://www.fluke.com/es-co/producto/comprobacion-electrica/multimetros-digitales/fluke-3000-fc>)

Prueba de laboratorio de Sistema de medición inalámbrico

<https://youtu.be/WRe9DAHzWZY>

Prueba de campo en diagnóstico de Grúa Telescópica

En el video adjunto se realiza una prueba de campo en donde se exponen las ventajas del uso del sistema de medición inalámbrico, entre estas se resaltan:

- Posibilidad de tomar mediciones en sitios de difícil acceso, ubicaciones a gran altura, cerca de equipos rotativos, equipos que generan alta temperatura o ruido.
- Capacidad de tomar múltiples mediciones en una misma ubicación con un solo módulo de medición, este procedimiento con instrumentos comerciales requiere el uso de varios instrumentos por separado.
- Rango de medición a gran distancia comparado con instrumentos de medición comerciales.
- Tamaño reducido, se presenta una disminución de tamaño de un 79.3% de un módulo de medición comparado con un multímetro Fluke 3000FC, esto permite utilizar módulos de medición en espacios reducidos, también se facilita el transporte del sistema de medición.

Video prueba de campo

<https://youtu.be/NKxAtoAIdSY>

Mejoras

En este capítulo se enumeran una serie de mejoras basadas en los resultados obtenidos luego de las pruebas realizadas en laboratorio del segundo prototipo.

Para mejorar el consumo de energía se propone el uso de un método para cambiar la potencia de transmisión de los módulos NRF24L01+PA, debido a que este parámetro guarda en el módulo en el momento de la programación, durante la operación del módulo de medición no es posible realizar cambios al valor de potencia entregada, una posible solución es realizar el cambio de potencia en función de la medición de la señal recibida en el módulo master de los módulos de medición, si la potencia excede determinado valor al momento de realizar la medición se procede a enviar un dato en el que se indica al módulo de medición si debe aumentar o disminuir la potencia de transmisión.

Con el objetivo de mejorar la velocidad en la transmisión de datos es posible implementar un sistema de escaneo de señal RF que realice un barrido en cada uno de los 125 canales disponible para identificar el nivel de ruido en cada canal, de esta forma poder seleccionar el canal que menor cantidad de interferencia tenga según el ambiente en el que se esté utilizando el sistema de medición, al seleccionar el canal más eficiente en el módulo master se inicia un proceso de emparejamiento entre de los módulos de medición para encontrar la frecuencia a la que se ha ajustado el módulo master y poder iniciar con la transmisión de datos.

Sistema de montaje magnético para asegurar en la maquinaria en donde se dispone a realizar las mediciones, se propone modificar el diseño de la caja para incluir un sistema de soporte o anclaje a la estructura metálica de la maquina intervenida.

Conclusiones

Luego de todas las etapas que se requirieron para el desarrollo del proyecto en donde se finaliza con dos prototipos de un sistema de medición inalámbrico se concluye:

El sistema desarrollado permite realizar diagnósticos de manera más rápida y acertada en maquinaria de construcción, principalmente en fallas que se producen de manera intermitente.

Los prototipos obtenidos brindan una opción de sistema de medición de bajo costo comparado con sistemas de medición comerciales que tienen la capacidad de enviar información de manera inalámbrica.

Con respecto al proceso de diseño, fabricación y montaje se comprueba que es posible el desarrollo de dispositivos electrónicos que ofrecen soluciones puntuales para la industria de la región.

Referencias

- Adik P. & Bobade S (2018) *Analysis of Losses due to Breakdown of Equipment in Construction. International Research Journal of Engineering and Technology.*
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwivmsWx6czvAhXqzVkKHUU5Du4QFjAAegQIBBAD&url=https%3A%2F%2Fwww.irjet.net%2Farchives%2FV5%2Fi6%2FIRJET-V5I6346.pdf&usg=AOvVaw31Lx2gU1JoD0ozRcpTy7Fs>
- Andreas Spiess. (2015, 28 julio). *#18 ADS1115 Analog-to-Digital Converter Tutorial* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=tnfBslyfLRQ>
- Bitwise Ar. (2019, 2 noviembre). *Arduino desde cero en Español - Capítulo 51 - Enlace RF 2.4 Ghz con NRF24L01 (entre dos Arduinos)* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=S4hNuRQiDcU&t=1476s>
- Electronic Clinic. (2021, 15 enero). *NRF24L01 Multiple Transmitters and Single Receiver for Sensor Monitoring using Arduino* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=h-fS232p5H8&t=727s>
- Fluke. (2022). *Multímetro inalámbrico Fluke 3000 Serie FC*. <https://www.fluke.com/es-co/producto/comprobacion-electrica/multimetros-digitales/fluke-3000-fc>
- Nordic Semiconductor. (2008). *Semiconductor. nRF24L01Plus Preliminary Product Specification v1.0*
https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Plus_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf

Palencia, O, (2006). *El mantenimiento general Administración de empresas,*

<https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/1297/1/RED-70.pdf>

Ralph S Bacon. (2017, 5 febrero). #73 nRF24L01 Send (and receive) data with your Arduino!

[Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=JSHJ-RLbNjK&t=758s>

Saiz Adalid, LJ. (2015). *Fallos intermitentes: análisis de causas y efectos, nuevos modelos de fallos y técnicas de mitigación* [Tesis doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de

València. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/59452>

Shen, Q., Lv, K., Liu, G., & Qiu, J. (2018). Dynamic Performance of Electrical Connector Contact Resistance and Intermittent Fault Under Vibration. *IEEE Transactions on*

Components, Packaging & Manufacturing Technology, 8(2), 216–225. [https://doi-](https://doi.org/bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1109/TCPMT.2017.2771157)

[org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1109/TCPMT.2017.2771157](https://doi.org/bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1109/TCPMT.2017.2771157)

Texas Instruments. (2018). *SBAS444D*.

<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1114.pdf?ts=1653310764979>

Texas Instruments. (2008). *SLVS577B*. [https://datasheet.octopart.com/TPS61202DRCRG4-](https://datasheet.octopart.com/TPS61202DRCRG4-Texas-Instruments-datasheet-10255900.pdf)

[Texas-Instruments-datasheet-10255900.pdf](https://datasheet.octopart.com/TPS61202DRCRG4-Texas-Instruments-datasheet-10255900.pdf)

K Steve, L Bernhard y N Dominic (2002) *Application Report SLUA271B*. Texas Instruments.

<https://www.ti.com/lit/an/sl原因271b/sl原因271b.pdf?ts=1653281489844>

Tiktin, J (1997). *Procedimientos generales de construcción: Movimiento de tierras: utilización de la maquinaria: producciones y casos prácticos: compactación de materiales:*

utilización de compactadores. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales

y puertos. Servicio de Publicaciones

Zeng Jia, Zhao Chunhua, Zhang Mingsong, & Zhao meiyun. (2010). *Study condition monitoring of construction equipment based on wireless sensor networks*. 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010), Computer Application and System Modeling (ICCASM), 2010 International Conference On, 5.
<https://doi-org.bibliotecavirtual.unad.edu.co/10.1109/ICCASM.2010.5620245>

Royce, W. W. (1970). *Managing the Development of Large Software Systems*. *Technical Papers of Western Electronic Show and Convention*.
<https://www.praxisframework.org/files/royce1970.pdf>