



**Ciencia Latina**  
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.  
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), marzo-abril 2024,  
Volumen 8, Número 2.

[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v8i2](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i2)



**SISTEMA BASADO EN IOT PARA  
MONITOREAR Y DETECTAR ANOMALÍAS  
EN LA VÍA DEL FERROCARRIL**

**IOT-BASED SYSTEM TO MONITORING AND DETECT  
ANOMALIES ON THE RAILWAY TRACK GAUGE**

**Ariel Ramiro Mamani Tola**

Universidad Privada Domingo Savio Potosí, Bolivia

DOI: [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v8i2.10882](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i2.10882)

## Sistema Basado en IoT para Monitorear y Detectar Anomalías en la Vía del Ferrocarril

**Ariel Ramiro Mamani Tola<sup>1</sup>**[arielr.mat@gmail.com](mailto:arielr.mat@gmail.com)<https://orcid.org/0009-0009-4304-738X>Universidad Privada Domingo Savio Potosí  
Bolivia

### RESUMEN

El presente artículo propone una aplicación basada en IoT (Internet de las cosas) para monitorear la distancia de la separación entre los rieles de una vía de ferrocarril, esta distancia es conocida como trocha y cuando la trocha es abierta o de un valor superior al permitido, representa uno de los principales factores de riesgo para los descarrilamientos de los trenes. La trocha abierta llega a producirse debido a la fuerza y el peso con el que circulan los trenes sumados al desgaste de los rieles y también a factores climatológicos (altas temperaturas que dilatan los rieles); el sistema propuesto pretende identificar la distancia de la trocha mediante sensores especializados los cuales apoyados con un servidor en la nube y un módulo GPS permitirán recolectar información respecto a la longitud de la trocha. Esta información, recolectada a tiempo, permitirá aplicar mecanismos de corrección y mantenimiento en la vía férrea para reducir los riesgos de descarrilamientos que puedan llegar a producirse cuando la trocha presenta anomalías (trocha abierta) o cuando los rieles han sufrido un desgaste considerable. En ese sentido, se presenta también un entorno experimental construido mediante tecnología Arduino para verificar los resultados del sistema propuesto.

**Palabras Clave:** internet de las cosas, Arduino mega, rectificación de curvas de ferrocarril, descarrilamiento

---

<sup>1</sup> Autor principal

Correspondencia: [arielr.mat@gmail.com](mailto:arielr.mat@gmail.com)

# IoT-based System to Monitoring and Detect Anomalies on the Railway Track Gauge

## ABSTRACT

This article proposes an application based on IoT (Internet of Things) to monitor the distance of the separation between the rails of a railway track, this distance is known as gauge and when the gauge is open or its value is greater than allowed represents one of the main risk factors for train derailments. The open gauge occurs due to the force and weight which trains transit the railway, added to the wear of the rails and also to climatic factors (high temperatures that expand the rails); The proposed system aims to identify the distance of the rail through specialized sensors which, supported by a cloud server and a GPS module, will allow information to be collected regarding the length of the rail. This information, collected in time, will allow correction and maintenance mechanisms to be applied to the railway to reduce the risks of derailments that may occur when the gauge presents anomalies (open gauge) or when the rails have suffered considerable wear. In this sense, is also presented an experimental environment built with Arduino technology to verify the results of the proposed system.

**Keywords:** internet of things, Arduino mega, track gauge correction, derailment

*Artículo recibido 20 febrero 2024*

*Aceptado para publicación: 28 marzo 2024*



## INTRODUCCIÓN

El ferrocarril en Bolivia ha sido (y es aún hoy en día) uno de los pilares fundamentales en su desarrollo, incluso hoy en día donde los sistemas de transporte son tan diversos y el ferrocarril pareciese relegado solamente al transporte de carga, es en este rubro donde se produce su mayor aporte al país ya que el servicio de carga provisto por los ferrocarriles es parte vital en el proceso de exportación de minerales. El sistema ferroviario en Bolivia está compuesto por dos redes ferroviarias, la red occidental y la red oriental, administradas por las empresas Ferroviaria Andina y Ferroviaria Oriental respectivamente. Es precisamente en el sector occidental de los ferrocarriles administrado por la empresa Ferroviaria Andina S.A. donde el mayor volumen de carga es transportado, ya que una de las principales actividades de la mencionada empresa es el transporte de cargas de minerales, pilar de la exportación de minerales que es una de las principales actividades económicas de nuestro país. Según datos de la empresa Ferroviaria Andina S.A. en la gestión 2022, llegó a transportar 721,398 toneladas de carga mineral contribuyendo a la recaudación de más de 13.653 millones de dólares por concepto de exportación de minerales (FCA, 2022).

Siendo evidente el aporte del transporte ferroviario para la economía boliviana, se hace necesario garantizar el buen funcionamiento del sistema de transporte ferroviario evitando en lo posible descarrilamientos que tienen como consecuencia inmediata el retraso en el transporte de carga y a un plazo mayor la reducción de volumen de carga transportada lo que significaría una reducción en las recaudaciones por exportaciones mineras. Una de las principales razones para los descarrilamientos es el estado de la vía, en ese sentido, el tráfico de los trenes de carga genera una cantidad significativa de fuerza causando que la trocha o distancia entre las rieles sea mayor a los límites permitidos convirtiéndose en un riesgo para posibles descarrilamientos, este inconveniente se produce generalmente en curvas donde, debido a la fuerza centrífuga producto de la inercia del movimiento del tren, la riel exterior en la curva es la que recibe la mayor carga de fuerza y como consecuencia esta riel tiende a salir de su posición original generando el incremento de la trocha, a pesar de que el peralte (ligera inclinación de la riel externa por sobre la riel interna) es un elemento de diseño pensado en contrarrestar la fuerza centrífuga, el desgaste que sufre la vía férrea, en especial en los sectores de curvas, es constante por lo que se requiere un mantenimiento constante. En ese sentido, existen diversas

herramientas construidas para en un principio medir el ancho de la trocha de las vías férreas y luego tomar las acciones correctivas necesarias, la regla analógica es una de ellas, es una herramienta de uso manual que debe ajustarse entre las rieles de la vía y se debe registrar de forma manual la distancia de la trocha, esta herramienta es la forma básica de medir la distancia de la trocha, sin embargo su utilización, supone un arduo trabajo manual de parte del operador, ya que debe recorrer toda la vía y medir la trocha en tramos equidistantes (flechas). Así mismo, gracias a la experiencia de los trabajadores ferroviarios se ha ideado formas prácticas de medir la trocha para un trabajo más eficiente, la siguiente figura 1 muestra un carro adaptado a partir de partes de vehículos de ferrocarril en desuso y construido con un ancho fijo entre sus ruedas que mide el ancho exacto que debe tener una trocha, este vehículo debe ser empujado y si alguno de los lados (las ruedas) se cae del riel, significa que ese lado de la vía es el que se ha desviado de su posición generando una trocha abierta.

**Figura 1.** Carro adaptado para medir la trocha de la vía férrea



Nota. Adaptado del informe de gestión del Ing. Adrián Mamani, supervisor de distrito Potosí, 2015

Algunas otras soluciones implican tecnologías mucho más complejas a partir de empresas dedicadas a construir maquinaria especializada en resolver la problemática de la trocha abierta, por ejemplo, la empresa Matisa (<https://www.matisaesp.com/>) es una empresa suiza dedicada a la reparación y mantenimiento de maquinaria de vía férrea, sin embargo no es una tecnología de fácil acceso para el medio local ya que dicha empresa opera principalmente en países Europeos y traer un equipo de esas características implicaría un gasto extra debido a temas de importación. Es en ese sentido que surge la necesidad de plantear mecanismos que permitan primero recolectar información del estado actual de

las vías férreas para luego plantear acciones correctivas garantizando el buen funcionamiento de los servicios de transporte por ferrocarril. Los diversos avances tecnológicos en ciencias de la computación, así como en redes y telecomunicaciones y la electrónica han permitido contar hoy en día con herramientas capaces de automatizar procesos que hasta hace unos años atrás solamente se podían realizar de forma manual, sumado a esto, la gran capacidad de conexión que ofrecen las tecnologías de telecomunicaciones permite dotar de conectividad a prácticamente cualquier dispositivo o herramienta. Es el campo del IoT (Internet of Things) o Internet de las cosas el cual se ha encargado de proporcionar los pilares para permitir crear herramientas de automatización con capacidad de conexión a Internet. Es en ese sentido que el presente artículo tiene como objetivo, presentar una propuesta basada en IoT para monitorear el estado de la trocha en vías férreas a partir de una placa Arduino, un Sensor ultrasónico y un módulo GPS/GPRS que permita recolectar la información en tiempo real de la vía y enviarlo a un servidor por medio de una conexión a Internet. Al respecto, habiendo revisado bibliografía y trabajos similares, se encontraron antecedentes como el de Chellaswamy et al. que propusieron un sistema basado en IoT pensado en diagnosticar el estado general de la vía férrea a partir de la aplicación de un acelerómetro (Chellaswamy, Geetha, Vanathi, & Venkatachalam, 2021) y el trabajo de Ramos Castañeda et al. que presentaron el diseño de un equipo de medición del desnivel en una línea ferroviaria (Ramos Castañeda, Panesso Narváez, Gil Peláez, & Claros Lamus, 2015). Los alcances propuestos en el presente trabajo se delimitan a partir de la configuración y codificación de los módulos Arduino Mega 2560 R3, Sensor Ultrasónico HC SR04, Módulo SIM 808 GPS/GPRS.

## **METODOLOGÍA**

La presente investigación tiene un enfoque mixto ya que incluye características de los enfoques cualitativo y cuantitativo. (Grinnell, 1997), citado por (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014) menciona al respecto que ambos enfoques (cualitativo y cuantitativo) utilizan cinco etapas similares:

1. Llevan a cabo la observación y evaluación de fenómenos.
2. Establecen suposiciones o ideas como consecuencia de la observación y evaluación realizadas.
3. Demuestran el grado en que las suposiciones o ideas tienen fundamento.
4. Revisan tales suposiciones o ideas sobre la base de las pruebas o del análisis.

5. Proponen nuevas observaciones y evaluaciones para esclarecer, modificar y fundamentar las suposiciones e ideas o incluso para generar otras.

En tal sentido, el presente trabajo realiza en principio una descripción del problema del monitoreo y detección de anomalías en la vía férrea, de forma específica las anomalías en la trocha de la vía, posteriormente se plantea una propuesta de solución a partir de herramientas IoT mediante un prototipo que podría ofrecer una alternativa de solución al monitoreo y detección de anomalías en la trocha de la vía férrea

## **DESARROLLO**

El sistema propuesto para la monitorización de vías férreas basa su funcionamiento en los principios de mantenimiento del ferrocarril de los cuales se obtiene el conocimiento necesario para plantear en principio el armado y configuración de la placa Arduino y de los sensores necesarios para recolectar la información necesaria y posteriormente plantear el diseño de la herramienta de medición que debería funcionar en la vía férrea para monitorearla. En ese sentido, se presenta primero los fundamentos necesarios relacionados al diseño de vías férreas y su mantenimiento, y a continuación se describen las tecnologías requeridas para construir el sistema de monitoreo basado en IoT, su configuración, armado y también el diseño de la herramienta de medición sobre la cual se tiene pensado su funcionamiento.

### **Características de la vía férrea**

El ferrocarril es un sistema de transporte en el que los vehículos se transportan en un solo sentido por sobre la vía por medio de la interacción de dos elementos metálicos, la rueda y el riel, debido a esta interacción es que la adherencia de la rueda a los rieles juega un papel importante para poder transmitir los esfuerzos de tracción adecuadamente. La vía férrea está constituida por la infraestructura, formada por la plataforma y por la superestructura, formada por el riel, los durmientes, fijaciones y el balasto (Viceministerio de transportes, Estado plurinacional de Bolivia, 2020).

Las anomalías que se producen en la vía férrea afectan principalmente a la superestructura que es la parte de la vía férrea que mantiene un contacto directo con la locomotora del tren y los vagones que transportan la carga, específicamente, son los rieles quienes llegan a recibir todo el impacto de la fuerza

del movimiento del tren y el peso de su carga. Los rieles se encuentran montados sobre una superestructura que se compone también de:

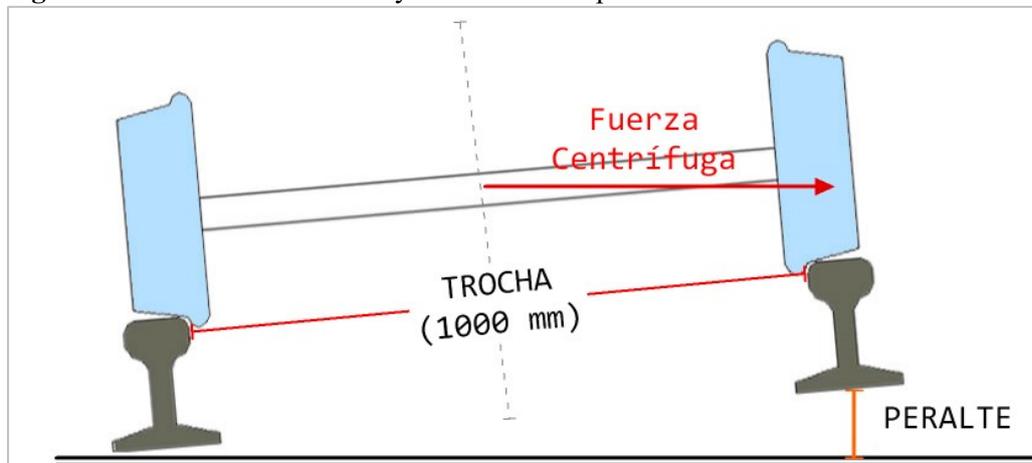
- Balasto que es la capa de material sobre la que se arma la estructura de la vía, generalmente lleva un espesor de 10 a 30 cm compuesto de piedra partida ripios arenosos y tierra, aunque en muchos casos solamente se prepara el terreno en el cual se armara la estructura de las Rieles.
- Durmientes, es uno de los componentes fundamentales en la estructura de vía, construido generalmente a partir de madera dura, es una pieza rectangular paralelepípeda sobre la cual descansan los rieles de la vía
- Rieles, es elemento principal de la vía férrea ya que cumple simultáneamente las funciones de guiar al tren (camino) y sostener su carga, considerando que los trenes de carga pueden llegar a transportar hasta 35 toneladas por eje. En función a la topografía del lugar donde se arme la superestructura de la vía, los rieles pueden verse exigidos a cargas elevadas lo cual produce un inminente desgaste en su estructura y también una deformación en su armado.
- Fijaciones, son los materiales que se encargan de fijar los rieles a los durmientes

Al momento de armar los rieles en la superestructura, se consideran varios aspectos, pero los más importantes son la trocha y el peralte que se encargan de evitar que las ruedas del tren y los vagones de carga se descarrilen. La norma para ferroviarias NB 192:1977 plantea un ancho de trocha de 1000mm para vehículos con ejes de acero (trenes y vagones) (IBNORCA, 1977), también se define como trocha al ancho de vía o la distancia entre los dos rieles o carriles de una vía férrea. Todos los vehículos de una red ferroviaria deben tener juegos de ruedas compatibles con el ancho de vía, ya que existen diferentes anchos de vía que se aplican en todo el mundo. El ancho de trocha de 1000mm corresponde al estándar de ancho métrico que es uno de los más usados en el mundo. El peralte en una carretera, circuito o vía férrea, es una elevación mayor de la parte exterior de una curva en relación con la parte interior (Morales Sosa, 2006). Esa diferencia de cota entre los dos rieles de la vía en curva se produce mediante la elevación gradual del riel exterior sobre el interior, manteniendo éste a su nivel original en la recta con el objetivo de:

- Producir una mejor distribución de cargas en ambos rieles.
- Reducir la degradación y desgaste de los rieles y del material rodante.

- Compensar parcial o totalmente el efecto de la fuerza centrífuga con la consiguiente reducción de sus consecuencias.

**Figura 2.** Relación entre Trocha y Peralte en la superestructura de la vía férrea



Nota. La figura muestra como la fuerza centrífuga puede afectar la trocha de la vía llegando a generar anomalías

A pesar de que el peralte tiene como objetivo reducir el desgaste del riel y compensar el efecto de la fuerza centrífuga, con el transcurrir del tiempo y el paso de los trenes de carga, la trocha siempre tiende a presentar anomalías (trocha abierta) lo cual debe corregirse lo más antes posible para evitar que sea un factor de riesgo para los descarrilamientos. Es necesario aclarar que la trocha o ancho de vía tiene dos distancias, una estática y otra dinámica, la trocha estática es medida cuando sobre la vía férrea no circula ningún tren por lo tanto no hay ninguna fuerza que se ejerce sobre los rieles, por otro lado, esta la trocha dinámica que es medida cuando el riel está sujeta a la fuerza producida por la velocidad y el peso del tren y sus vagones de carga (Civil Engineering Conference, 2001). Esta fuerza aplicada sobre los rieles es la que produce desgaste en los rieles y va ensanchando la trocha, lo que es inevitable con el paso del tiempo y la constante circulación de los trenes. Para corregir estos desfase en la trocha, es importante que en el trabajo de mantenimiento de la vía férrea se logre detectar lo más antes posible esas anomalías en la trocha y repararlas, en ese sentido, se plantea un escenario donde es posible detectar anomalías en la trocha de forma rápida y eficiente ofreciendo alternativas a los mecanismos ya descritos que tienen como común denominador un desarrollo lento de sus actividades además de los posibles errores que puedan suceder debido a la naturaleza manual del trabajo de detección. La figura 2 refleja la relación entre los conceptos presentados acerca de la superestructura del ferrocarril.

## **Tecnologías IoT**

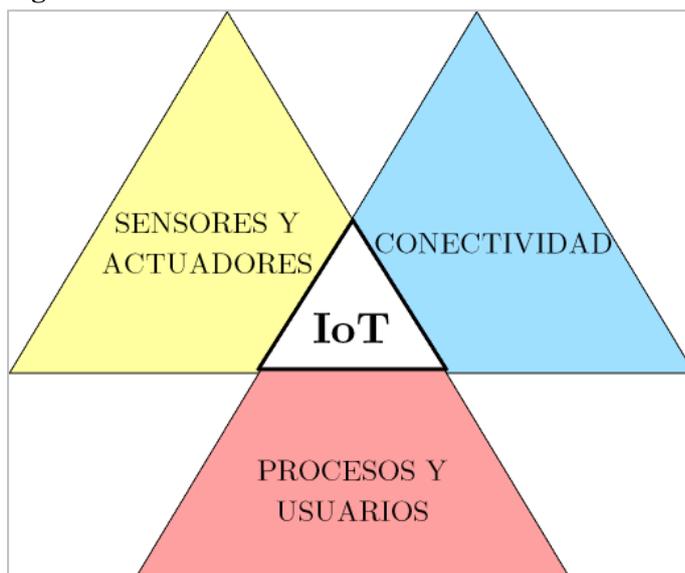
En la actualidad, por más increíble que parezca, hay más dispositivos inteligentes que personas, cada día, un número cada vez mayor de personas está conectada a Internet prácticamente las 24 horas del día. Cada persona puede llegar a tener entre tiene dos, tres, o incluso más dispositivos inteligentes, entre ellos están los teléfonos inteligentes, monitores de ejercicio y salud, lectores electrónicos y tabletas, entre los más destacados, todo esto es posible gracias a que las redes digitales modernas hacen todo esto posible. Esta capacidad de conexión permite que los dispositivos digitales se interconecten y transmitan constantemente, en este sentido, se abre la posibilidad de agregar a este ecosistema dispositivos que no hayan sido necesariamente diseñados para ofrecer características de conectividad, pero que de tenerlas se convertirían en herramientas mucho más útiles para el ser humano e.g. refrigeradores que sean capaces de monitorear el estado de sus suministros, puertas inteligentes que sean capaces de detectar quienes circulan, tanques de agua que monitorean de forma constante la calidad del agua que almacenan y sean capaces de informar vía Internet de las cualidades del agua. Las posibilidades son infinitas y gracias a la gran capacidad de las redes digitales es que ha surgido un nuevo campo de estudio llamado Internet de las cosas o IoT (del inglés Internet of Things) donde se pueden desarrollar todas las herramientas descritas gracias a que en la actualidad, los sensores electrónicos están presentes en todas partes y se integran en infinidad de dispositivos que se han vuelto inteligentes y están conectados en redes cableadas e inalámbricas, y a su vez a Internet, constituyendo una red global de conectividad total (Joyanes Aguilar, 2021).

La automatización de procesos ha sido por mucho tiempo un área de estudio aplicado a partir de la domótica incluso antes de Internet, ya habían empezado a aparecer en el mercado productos domóticos pensados en automatizar ciertas tareas cotidianas del ser humano, aunque todavía limitadas en sus cualidades debido a la capacidad de procesamiento de los dispositivos y las limitantes en la capacidad de las redes digitales. A finales de los años 90 del siglo pasado, las herramientas de automatización estaban limitadas a sectores industriales debido a los costos que implicaba construir estas herramientas, posteriormente ya en la década de 2000, nuevos conceptos y técnicas hicieron posible las redes inalámbricas de sensores/actuadores (WSAN o WSN): como ser pequeñas computadoras alimentadas por baterías que colaboran para establecer redes inalámbricas (de múltiples saltos) y luego usan dichas



redes para transportar los datos de sus sensores, o para distribuir los comandos del actuador (Baccelli, 2021). El Internet de las cosas (IoT) es un concepto que permite la comunicación entre dispositivos y aplicaciones de interconexión en red, mediante la cual objetos físicos o "cosas" se comunican a través de Internet (Kamal, 2017). Se puede entender como una combinación de sensores y actuadores proveyendo y recibiendo información por medio de una conexión a una red, se pueden conectar varios sensores a un objeto o dispositivo para medir una amplia gama de variables o fenómenos físicos y luego transmitir todos los datos por medio de una red digital. La detección puede entenderse como un modelo de servicio, esta tecnología permite que hoy en día, dispositivos domésticos convencionales como refrigeradores o televisores, comprendan capacidades de comunicación y detección. Estas capacidades aumentarán constantemente mediante la incorporación de herramientas de detección y comunicación más inteligentes. La siguiente figura refleja la interacción de los pilares del IoT.

**Figura 3.** Pilares fundamentales de la IoT



Para diseñar una herramienta IoT, se recomienda seguir una arquitectura de 4 capas: Capa de detección de objetos, capa de intercambio de datos, capa de integración de información y capa de servicio de aplicaciones (Ma, 2011)

- La capa de detección de objetos, contiene los sensores necesarios para detectar objetos físicos y adquirir información de dichos objetos
- En la capa de intercambio de datos ocurre la transmisión de datos a través de una red de comunicación.

- La capa de integración de información es la encargada de procesar la información adquirida, filtrar los datos no deseados y principalmente integrar la información en conocimiento utilizable para los servicios y usuarios finales.
- La capa de servicio de aplicaciones es la que provee los servicios de contenido a los usuarios

Si bien, los dispositivos inteligentes (e.g. smartphones) ya pueden conectarse a través de Internet de forma tradicional, dispositivos IoT incorporan la capa de detección que reduce los requisitos sobre la capacidad de esos dispositivos y permite la interconexión entre ellos. Los sensores se comunican con otros dispositivos por medio de la capa de integración de información que es responsable de todas las comunicaciones y transacciones. En este escenario, surgen nuevos requisitos y desafíos para el intercambio de datos, filtrar e integrar la información, así como la complejidad de la arquitectura de red. El uso de tecnologías en la nube está creciendo exponencialmente. En el marco del IoT se ofrecen nuevas plataformas de infraestructura y aplicaciones de software permitiendo la creación de nuevos servicios con un rendimiento mejorado y soluciones de valor agregado reduciendo el costo de adquirir datos por medio de los servicios existentes y la oportunidad de crear nuevas tecnologías en un nuevo contexto de funcionamiento. Estas aplicaciones pueden orientarse a consumidores, empresas, comerciales y actividades de toda índole, así como la comunidad científica generando nuevas oportunidades para los desarrolladores de estas tecnologías. Es evidente que el desarrollo de herramientas IoT depende en gran medida de los componentes elegidos, los microcontroladores han sido por mucho tiempo el componente central de la automatización de procesos, sin embargo, los microcontroladores se ven limitados por muchos aspectos entre los que destacan la limitada capacidad de procesamiento de los mencionados dispositivos frente a las necesidades que plantean las herramientas IoT, así mismo, los microcontroladores son dispositivos que no se rigen a un estándar único de desarrollo lo que dificulta aplicar una metodología única para construir herramientas de automatización con capacidades IoT. El mismo avance tecnológico ha posibilitado también el desarrollo de herramientas con mayores capacidades para construir aplicaciones IoT, una de esas herramientas es la Arduino, una plataforma electrónica de código abierto basada en hardware y software fáciles de usar. Las placas Arduino pueden leer entradas (luz en un sensor, un dedo en un botón o un mensaje de texto vía SMS) y convertirlas en una salida: activar un motor, encender un LED o publicar algo en línea. Con

Arduino, se puede construir objetos que pueden responder y/o controlar luces, sonido, gestos y movimientos. Arduino ha sido usado para crear una sorprendente variedad de cosas, incluyendo instrumentos musicales, robots, luces, esculturas, juegos, muebles interactivos e incluso ropa interactiva (Margolis, 2011).

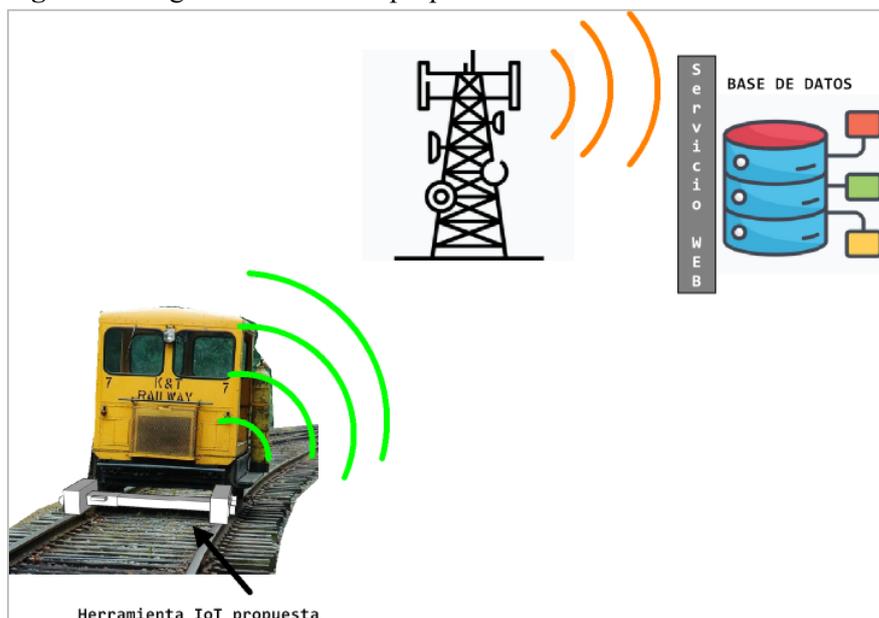
Una de las principales características de Arduino es su facilidad y su bajo costo, existen muchos otros microcontroladores y plataformas de microcontroladores similares, sin embargo, Arduino simplifica el proceso de trabajo con microcontroladores a través de una plataforma simple de programación y una integración con varios otros módulos que ofrecen funcionalidades adicionales. Esta tecnología facilita el construir aplicaciones de IoT ya que simplifica bastante la complejidad detrás de la automatización de procesos por medio de componentes electrónicos centrando el proceso de desarrollo a implementar los servicios solicitados, debido a estas características, esta tecnología es la escogida para proponer un sistema de monitorización del estado de vías férreas para detectar anomalías en la trocha basado en IoT.

### **Detección de anomalías en la trocha con tecnología IoT**

El sistema propuesto fundamenta su desarrollo a partir de la aplicación de tecnología Arduino y módulos que ofrecen servicios de conexión a la red que convierten la aplicación propuesta en una aplicación IoT, así como el módulo necesario para obtener la distancia entre la trocha. El diseño propuesto sigue los lineamientos de la arquitectura de 4 capas analizada en el anterior epígrafe, donde cada capa esta implementada a partir de los diferentes componentes elegidos, finalmente se propone recolectar la información a partir de un servicio web implementado en la nube donde la aplicación IoT debe recolectar la información de la trocha medida en la vía férrea y la ubicación donde fue obtenida a partir de la utilización de servicios GPS. El presente trabajo muestra el estado del arte de la propuesta descrita a partir de la configuración y la programación de los componentes mencionados, así como los detalles del servicio web encargado de recolectar la información, para tal efecto las tecnologías utilizadas para construir el servicio web son el lenguaje de programación PHP y la base de datos MySQL por ser las tecnologías sencillas y fáciles de usar además de ofrecer alto rendimiento, bajo costo tanto en desarrollo como en implementación, portabilidad e independencia de plataforma de sistema operativo (Welling & Thomson, 2003)

En base a la tecnología descrita se implementara un servicio en un servidor web en la nube que será capaz de consumir la información generada por la aplicación IoT, ambas tecnologías (el servicio Web construido en PHP-MySQL y la aplicación IoT construida con Arduino) interactuaran la una con la otra para recolectar la información del estado de la vía férrea permitiendo detectar posibles anomalías en el ancho de la vía (trocha), la figura 4 presenta un esquema del funcionamiento de las mencionadas tecnologías.

**Figura 4.** Diagrama del sistema propuesto

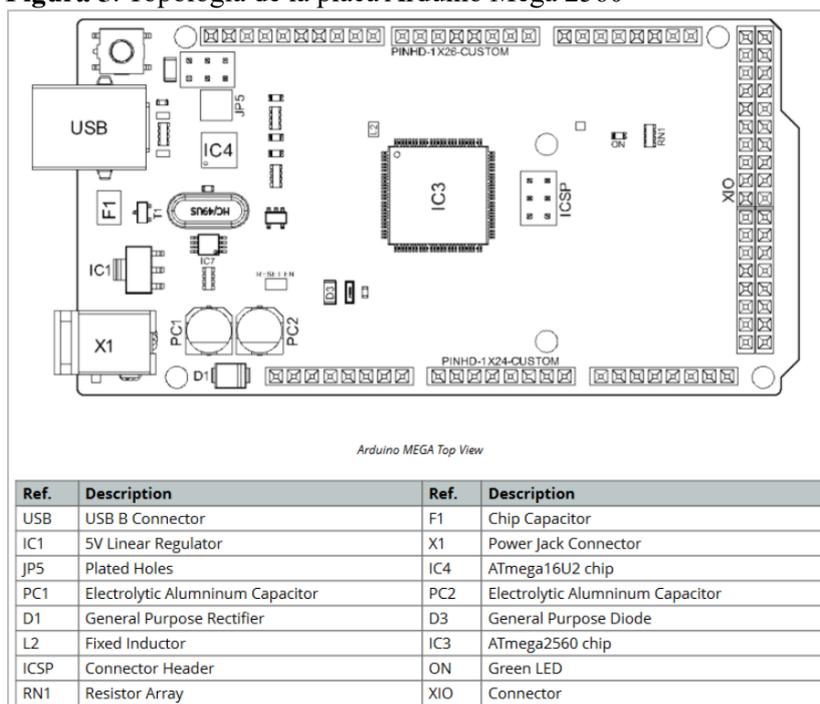


Como se puede apreciar en la figura anterior, se propone integrar el sistema propuesto a los vehículos de inspección de vía conocidos como ‘carriles’ o ‘zorras’ anexados a su parte trasera, a partir de ahí se ira recolectando información de la trocha de la vía recorrida enviando por medio de conexión GPRS (red de datos telefónica) la información recolectada más la ubicación GPS. Un servicio Web será el encargado de recibir la información recolectada y almacenarlo en una base de datos para su análisis y procesamiento. Para la construcción de la herramienta IoT propuesta se propone utilizar los siguientes elementos:

- Arduino Mega 2560 R3
- Sensor Ultrasónico HC SR04
- Módulo SIM 808 GPS/GPRS

Arduino Mega 2560 R3, la placa Arduino Mega 2560 es una placa de desarrollo dedicada a crear aplicaciones extensas en comparación con otras placas similares, destaca por su gran rendimiento y durabilidad. La placa alberga el microcontrolador ATmega2560, que funciona a una frecuencia de 16 MHz, contiene 54 pines de entrada/salidas digitales, 16 entradas analógicas, 4 UART (puertos serie de hardware), una conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP y un botón de reinicio. Así mismo, esta placa viene con un conjunto mucho más grande de entradas y salidas en comparación con las placas Arduino tradicionales integrando funcionalidades de conexión por medio de módulos de conexión inalámbrica. Respecto a su rendimiento, la placa Arduino Mega 2560 puede operar en temperaturas que oscilen entre el rango de  $-40^{\circ}\text{C}$  y  $85^{\circ}\text{C}$  como máximo, respecto a su consumo de energía, tiene un voltaje de trabajo de 5V y su voltaje de entrada esta entre 7.5 a 12 V. La siguiente figura muestra el detalle de la topología de la placa Arduino Mega 2560

**Figura 5.** Topología de la placa Arduino Mega 2560



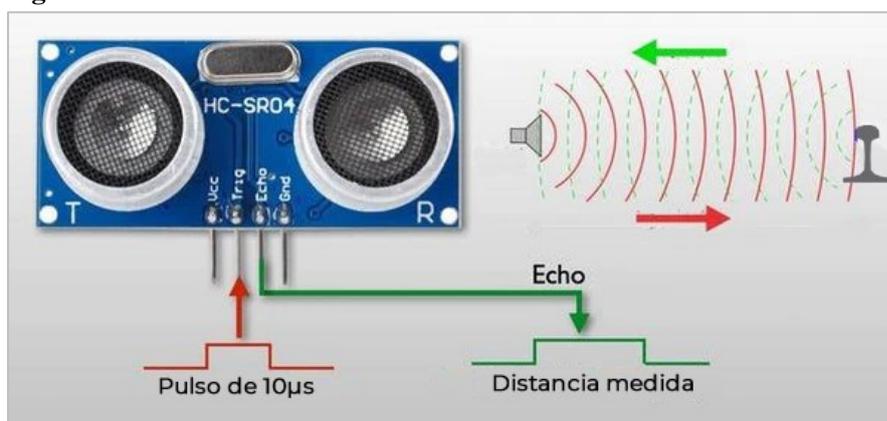
Nota. La figura fue adaptada de la documentación oficial de la placa Arduino Mega

Sensor Ultrasónico HC SR04, para verificar la distancia de la trocha es necesario un mecanismo que sea capaz de funcionar en las condiciones donde se encuentra la vía férrea y además debe proporcionar datos que sean confiables, al respecto existen varias tecnologías sin embargo consideramos aquellas que son compatibles con la tecnología Arduino, en ese sentido las tecnologías de sensores de distancia a considerar son los sensores ópticos y los sensores ultrasónicos. Los sensores ópticos o fotoeléctricos

son capaces de detectar objetos a distancia, a través del cambio de intensidad de luz, sin embargo, su rango de detección está limitado a 1000mm lo que significa una desventaja ya que la distancia de la trocha puede llegar a medir una distancia mayor cuando experimenta anomalías (trocha abierta), así mismo, los sensores ópticos se ven afectados por condiciones de polvo y agua. Por otro lado, los sensores ultrasónicos miden la distancia por medio de ondas ultrasónicas, están compuestos por 2 componentes, un cabezal que emite una onda ultrasónica y el segundo cabezal que se encarga de recibir la onda reflejada que retorna desde el objeto, esta técnica permite medir la distancia al objeto contando el tiempo entre la emisión y la recepción. Para obtener la distancia, estos sensores utilizan la siguiente fórmula  $L = \frac{1}{2}TC$ , donde L es la distancia, T es el tiempo entre la emisión y la recepción, y C es la velocidad del sonido, el valor se multiplica por 1/2 ya que T es el tiempo de recorrido de ida y vuelta (Chellaswamy, Geetha, Vanathi, & Venkatachalam, 2021)

El sensor ultrasónico es la tecnología elegida para detectar el ancho de la trocha debido a que puede detectar distancias mayores a 1000mm así mismo, es una tecnología capaz de tolerar las condiciones donde se encuentran las vías del ferrocarril, en tal sentido se propone usar el sensor ultrasónico HC-SR04 que es un módulo para detección de distancias compatible con tecnología Arduino, este sensor tiene una longitud de 4.3 cm y una altura de 2 cm, está compuesto por 2 componentes un emisor y un receptor ultrasónicos. La figura a continuación muestra los detalles del funcionamiento del sensor ultrasónico HC-SR04.

**Figura 6** Funcionamiento del sensor HC-SR04



De forma más específica, este sensor opera bajo las siguientes características:

- Funciona con corriente continua a un voltaje de 5V DC (mínimo 4'5 y máximo 5'5).

- Su corriente de trabajo está en torno a los 15mA (como mínimo 1mA y máximo 20mA).
- La frecuencia de las ondas ultrasónicas que emite es de 40kHz.
- El rango de detección de distancia esta entre 2cm a 4.5m, aunque a más de cuatro metros no se garantiza una buena medición.
- Su precisión puede variar entre los 2mm o 3mm.

Todas las aplicaciones IoT requieren un mecanismo para enviar y recibir datos. Hay numerosas opciones disponibles para conectar estas aplicaciones a Internet incluyendo medios cableados, inalámbricos, bluetooth y también red celular (Javed, 2016). En tal sentido la tecnología escogida para la aplicación IoT propuesta es la conexión por red celular debido a que ofrece la mayor cobertura respecto a la conectividad Internet, en tal sentido, se ha escogido el módulo SIM 808 GPS/GPRS, para posibilitar la conexión a Internet por medio de la red de datos telefónica mediante un chip SIM, así mismo, ofrece la capacidad de obtener coordenadas de posicionamiento GPS, este módulo es el ideal para el presente trabajo ya que incluye en su funcionamiento dos de las funcionalidades necesarias para cumplir con los objetivos de la aplicación IoT propuesta, es decir, permitir una conexión a Internet y capturar información de la ubicación donde se realizó la medición por medio del sensor ultrasónico. La conectividad ofrecida por este módulo permite una conectividad GSM de cuatro bandas (850/900/1800/1900 MHz), su consumo de energía es bajo y su rango de tensión esta entre los 3.3V los 4.4V. Respecto a la detección de coordenadas GPS, cuenta con un receptor GPS con 66 canales de adquisición de datos y 22 canales de seguimiento.

La figura a continuación muestra el módulo SIM808 junto con sus 2 antenas, una para la red GSM y otra para los servicios GPS.

**Figura 7.** Módulo SIM 808 con sus dos antenas

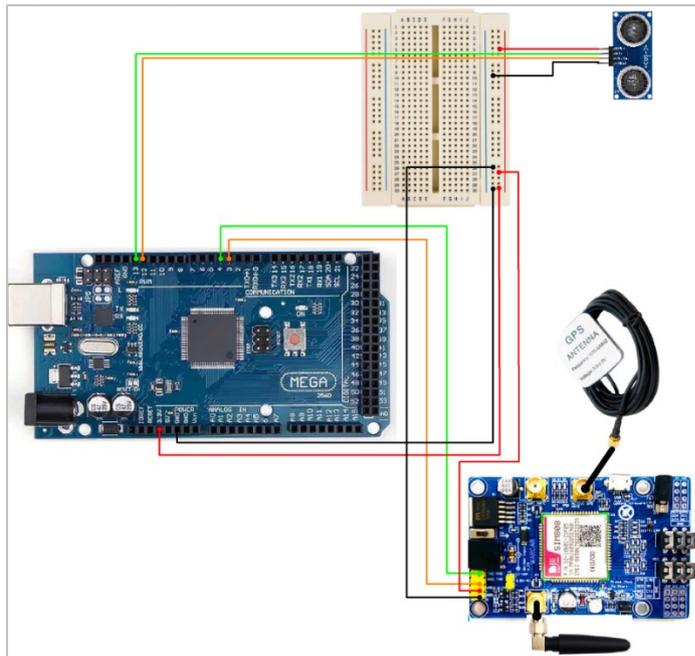


Una vez presentados los módulos y la tecnología necesaria para el sistema de monitoreo propuesto en el presente artículo, se plantea a continuación los detalles a considerar para su construcción.

### **Sistema de monitoreo propuesto**

El sistema propuesto tiene como parte central a la placa Arduino Mega 2560 a la cual se implementó el código necesario para controlar el sensor HC-SR04 del cual se requiere medir la distancia cada 10 segundos, este sensor está conectado a los pines de datos y energía que proporciona la placa Arduino la cual envía la señal para que el sensor obtenga la distancia requerida. La placa Arduino al tiempo de recibir la información de la distancia, solicita al módulo SIM 808 la ubicación GPS, combina la información de la distancia y la posición GPS, para enviar la información utiliza el formato de datos JSON donde prepara una cadena con tres campos e.g. *distancia: 1015, latitud: -19.594842, longitud: -65.765092*. Esa información es enviada a un servidor web en la nube configurado con lenguaje PHP y preparado con una base de datos MySQL para almacenar la información. Para la construcción del sistema de monitoreo se realizó un prototipo para verificar la captura de información tanto de la distancia y del posicionamiento GPS, este prototipo fue diseñado utilizando los componentes mencionados en los anteriores epígrafes, dichos componentes se configuraron de acuerdo el esquema que se muestra en la figura 8.

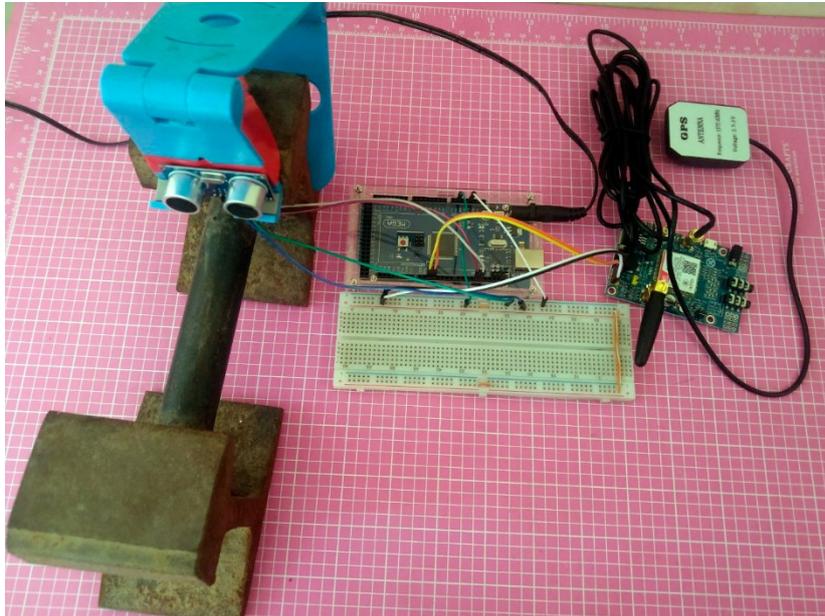
**Figura 8.** Diagrama de conexión propuesto



Para tal efecto se utilizó el apoyo de una placa protoboard para enviar energía en serie al sensor y al módulo SIM 808 y también para la conexión tierra de ambos módulos, para la programación de la placa Arduino se utilizó la herramienta Arduino IDE que es la plataforma de desarrollo para esa tecnología. El lenguaje de programación que utiliza Arduino es bastante simple ya que es una adaptación del lenguaje de programación C++ con particularidades propias para la placa Arduino. Respecto a la energía, se utilizó el sistema de alimentación por medio de un transformador de 5V para dotar de energía a la placa Arduino y que esta a su vez entregue energía al sensor ultrasónico y al módulo SIM 808. Respecto a la conectividad se utilizó un chip SIM Entel con red de datos habilitada dotando de conexión a Internet al sistema de monitorización armado. En una primera versión el prototipo del sistema propuesto fue armado para verificar la distancia entre 2 rieles las cuales están a una distancia fija para verificar el funcionamiento del sensor ultrasónico y la capacidad de conectividad del módulo SIM 808 con el programa construido en Arduino IDE. Si bien el prototipo representa una primera etapa en la construcción del sistema para monitorear el estado de las vías férreas, es evidente que para convertirse en una aplicación IoT, debe tener una estructura acorde a las exigencias del trabajo de mantenimiento que se da en el ferrocarril, en ese sentido, el prototipo tal como es presentado es muy frágil para llevar a cabo pruebas de rendimiento en la vía férrea, es así que se propone una estructura con elementos

propios de un vehículo de ferrocarril y con características de una aplicación IoT, La figura 9 muestra el entorno de pruebas del prototipo base.

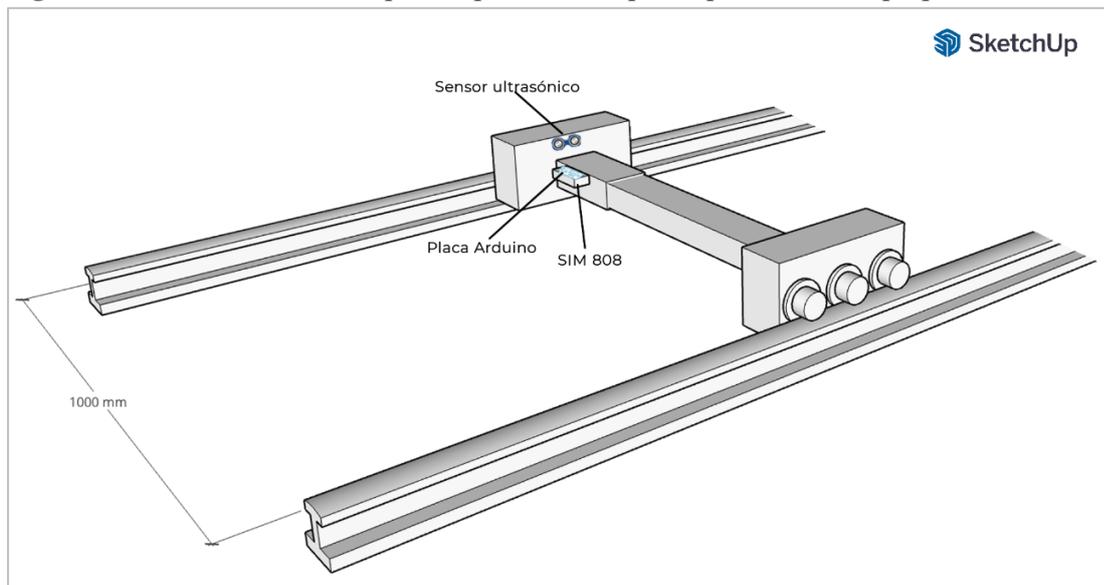
**Figura 9.** Prototipo básico del sistema de monitoreo propuesto



Si bien el prototipo representa una primera etapa en la construcción del sistema para monitorear el estado de las vías férreas, es evidente que para convertirse en una aplicación IoT, debe tener una estructura acorde a las exigencias del trabajo de mantenimiento que se da en el ferrocarril, en ese sentido, el prototipo tal como es presentado es muy frágil para llevar a cabo pruebas de rendimiento en la vía férrea, es así que se propone una estructura con elementos propios de un vehículo de ferrocarril y con características de una aplicación IoT. Para tal efecto se presenta un modelo conformado por un eje apoyado en ruedas de riel con pestaña de un diámetro de 150mm armados en una estructura con un eje móvil de metal unido por medio de resortes, esta estructura permitirá que ambos lados de la estructura se mantengan siempre pegados a los lados laterales del riel y de esta forma se puede obtener de forma más exacta la longitud de la trocha. Así mismo, se ha considerado esta estructura con diseño de eje con resortes para ubicar a los sensores en una parte que ofrezca mayor confiabilidad en los datos recolectados, ya que al intentar leer la distancia directamente en el perfil de las rieles, es posible encontrar daños en la riel o desgaste y esto puede variar los datos leídos, en cambio si se utiliza un eje con resortes, se puede ubicar los sensores para medir el desplazamiento del eje y a partir de ahí calcular la distancia real de la trocha. Otra característica del diseño del vehículo propuesto es el compartimento

para ubicar los circuitos y la placa considerando que, a pesar de su resistencia debe ser protegido de los riesgos inherentes al ambiente de trabajo, en este compartimento también se ubica la antena GPS siendo un lugar apto para una buena recepción de la señal satelital y evitar así lecturas erróneas de las coordenadas GPS. La figura 10 muestra el diseño propuesto de un vehículo que contenga el prototipo del sistema propuesto. Dicho modelo fue construido con la herramienta de modelado en 3D SketchUp en su versión gratuita.

**Figura 10.** Diseño del vehículo para implementar el prototipo del sistema propuesto



Nota. Diseñado en la versión gratuita y online de SketchUp

Es necesario recalcar que el estado del arte del presente trabajo abarca hasta el prototipo construido y las pruebas de recolección de datos en un servidor en la nube, el diseño del vehículo propuesto es una forma de implementar la solución en un entorno de pruebas real.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las pruebas realizadas en el prototipo construido muestran que los dispositivos electrónicos configurados para armar el sistema de monitoreo del estado de la vía para detectar anomalías en la trocha cumplen con la función para la cual fueron armados y programados, los datos recolectados a pesar de no ser datos de una vía de ferrocarril, son datos que reflejan el buen funcionamiento del sistema propuesto. Para tal efecto se realizó pruebas de los sensores en desplazamiento y sin movimiento para verificar la exactitud de los datos medidos por el sensor ultrasónico y también por el comportamiento de la antena GPS. Respecto a la medición estática se

construyo una estructura de dos pedazos de riel unidos por un eje fijo soldado a ambos extremos con una longitud de 150 mm, como se puede apreciar en la figura 9. Los resultados se muestran en el cuadro siguiente.

**Tabla 1.** Resultados de la prueba del prototipo sin movimiento

Longitud real (mm)	Longitud medida (mm)	Datos GPS
150	150	-19.5756516,-65.75531723

Para la prueba en movimiento se aplicó el prototipo en una estructura de provisional la cual fue desplazada por 60 segundos habiendo configurado la placa Arduino para tomar una muestra de la distancia cada 10 segundos, para tal efecto se desplazó de forma manual la mencionada estructura a lo largo de la vía de ferrocarril que se encuentra en proximidades de la salida del ferrocarril en la avenida Sevilla y la calle Boquerón. Los datos obtenidos son los siguientes:

**Tabla 2.** Resultados de la prueba del prototipo en movimiento

Longitud real (mm)	Longitud medida (mm)	Datos GPS
1006	1004	-19.5752577,-65.7541657
1006	1005	-19.575263, -65.754181
1007	1006	-19.575269, -65.754191
1007	1008	-19.575274, -65.754203
1007	1009	-19.575286, -65.754209
1008	1009	-19.575288, -65.754212

Los datos obtenidos muestran que el prototipo logra una lectura de la distancia de la trocha bastante aceptable variando con muy poco de los datos reales, esto muestra que el sensor ultrasónico cumple con su función y los datos obtenidos podrían ser utilizados para plantear medidas correctivas cuando sea necesario.

Las nuevas tecnologías han permitido lograr obtener herramientas que mejoran las actividades de los seres humanos desde múltiples puntos de vista, y el Internet de las Cosas es producto de ese avance tecnológico, sin embargo, es necesario recalcar que para plantear herramientas que brinden soluciones reales a las diversas problemáticas de la realidad es necesario conjunciones conocimiento de diferentes áreas de estudio. Los diferentes elementos considerados para la propuesta del presente trabajo, es decir

los sensores ultrasónicos y el sensor GPS SIM 808, han arrojado resultados cercanos a los parámetros de medición planteados en el entorno de pruebas, su aplicación muestra su alta capacidad para recolectar información en diferentes entornos y representan una alternativa para soluciones comerciales similares ya que los datos obtenidos muestran que el error obtenido en las capturas es mínimo, así mismo, los dispositivos presentados, han sido integrados en una placa capaz de manejar la información recolectada y enviarla aun servidor en la nube. La placa Arduino Mega 2560 utilizada en el presente trabajo demuestra un gran rendimiento para apoyar la problemática propuesta, si bien en el presente trabajo se ha implementado una aplicación IoT a partir de los dispositivos mencionados, es posible aplicar estos conocimientos a diferentes áreas de aplicación.

El prototipo construido es en primera instancia una forma de recolectar información y verificar la aplicabilidad del IoT a la detección de anomalías en la trocha de una vía de ferrocarril, así mismo, muestra la capacidad de los sensores, la placa Arduino, la configuración y el código implementado, sin embargo, es necesario mencionar que en las diferentes pruebas, el prototipo armado fue manipulado con precaución esto debido a que las conexiones son provisionales, y es evidente que en un entorno real de trabajo, se debe contar con una estructura y un armado sólido acorde a los desafíos del ambiente donde esta armada la superestructura del ferrocarril, es en ese sentido que también se propone el diseño de un vehículo capaz de contener el sistema de monitoreo y que sea capaz de circular por las vías férreas cumpliendo su propósito. En términos generales los datos recolectados son alentadores ya que proporcionan un mínimo de error, sin embargo, aún no podrían tomarse como definitivos ya que es necesario enfrentar el prototipo a pruebas más cercanas al real funcionamiento del tráfico en el ferrocarril.

## **CONCLUSIONES**

Los ferrocarriles han sido por mucho tiempo (y aun lo son) un pilar fundamental en la economía Boliviana, por lo que se hacen necesarios mecanismos que garanticen su buen funcionamiento, en ese sentido, el mantenimiento de la trocha en la vía férrea es de gran importancia para el buen funcionamiento de los trenes, evitar descarrilamientos y que estos cumplan su itinerario. Al respecto, existen diferentes soluciones comerciales sin embargo están alejadas de nuestra realidad por lo que es necesario plantear alternativas adecuadas para el medio local.



El Internet de las Cosas (IoT) es un campo relativamente nuevo en el desarrollo tecnológico, es posible gracias a los avances en informática y redes de computadoras que permiten construir herramientas de toda índole, capaces de ayudar a resolver diversas problemáticas de la sociedad desde diferentes enfoques. A pesar de ser un campo emergente, el IoT presenta múltiples oportunidades para construir aplicaciones en base a sus principios de conectividad completa que permitan lograr conectividad y procesamiento de datos en lugares antes impensados e.g. obtener datos de la trocha de la vía del ferrocarril.

El análisis realizado a los diferentes fundamentos teóricos relacionados al IoT y también a los fundamentos del mantenimiento del ferrocarril, así como sus características, brinda el conocimiento necesario para plantear una solución al problema de la detección de anomalías en la trocha de la vía férrea. El prototipo construido permitió obtener resultados que muestran que es posible plantear una solución al problema de monitoreo de vías férreas a partir del campo IoT. Sin embargo, es necesario recalcar que para lograr obtener un reporte real de funcionamiento, es necesario aplicar la solución planteada a un entorno real de pruebas.

Para lograr aplicar una herramienta real de detección de anomalías en la trocha es necesario contar con un vehículo como el propuesto para implementar adecuadamente el sistema propuesto y llevar a cabo pruebas más cercanas al funcionamiento real del ferrocarril y validar la solución propuesta.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baccelli, E. (2021). *Internet of things (IoT): Societal Challenges and Scientific Research Fields for IoT*.

HAL Open Science.

Chellaswamy, C., Geetha, T. S., Vanathi, A., & Venkatachalam, K. (2021). An IoT based rail track condition monitoring and derailment prevention system. *International Journal of RF Technologies*, 11, 81-107. doi:10.3233/rft-190210

Civil Engineering Conference. (2001). Maintenance of track gauge guidelines. Heron Press.

FCA. (2022). *Memoria Anual 2022*.

Flores, X., Jimenez, M., & Navarrete, F. (2011). *Sistema de proximidad ultrasónico*. Master's thesis, Instituto Politécnico Nacional, México.

- Grinnell, R. (1997). *Social work research & evaluation: Quantitative and qualitative approaches*. Peacock publishers.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación*. McGrawHill Education.
- IBNORCA. (1977). *Norma Boliviana NB 192:1977 Vía - Trocha*.
- Javed, A. (2016). *Building Arduino Projects for the Internet of Things*. Apress.
- Joyanes Aguilar, L. (2021). *Internet de las cosas*. Marcombo.
- Kamal, R. (2017). *INTERNET OF THINGS Architecture and Design Principles*. McGraw Hill.
- Ma, H.-D. (2011). Internet of Things: Objectives and Scientific Challenges. *J. Comput. Sci. Technol.*, 26, 919–924. doi:10.1007/S11390-011-1189-5
- Margolis, M. (2011). *Arduino cookbook*. O'Reilly.
- Morales Sosa, H. (2006). *Ingeniería Vial I*. Editora Búho.
- Ramos Castañeda, K. C., Panesso Narváez, J. F., Gil Peláez, J. J., & Claros Lamus, R. (2015). Diseño de un equipo de medición del desnivel en una línea ferroviaria. *ITECKNE*.
- Viceministerio de transportes, Estado plurinacional de Bolivia. (2020). *Manual ambiental para la construcción de vías férreas*. La Paz: Ministerio de Obras Públicas servicios y vivienda.
- Welling, L., & Thomson, L. (2003). *PHP and Mysql Web Development*. Sams.