UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR

POSGRADOS

MAESTRÍA EN
# INGENIERÍA AUTOMOTRIZ CON MENCIÓN EN NEGOCIOS AUTOMOTRICES

RPC-SO-36-NO.825-2021

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

PROYECTO DE TITULACIÓN CON COMPONENTES DE INVESTIGACIÓN APLICADA Y/O DE DESARROLLO

TEMA:

## ANÁLISIS DE LA SEGURIDAD DEL TRANVÍA "CUATRO RÍOS" MEDIANTE LA NORMA UNE-EN 14363


AUTORES:

JORGE LUIS CHUCHUCA ZHIZHPON
DANNY LEONARDO MOROCHO FERNÁNDEZ

DIRECTOR:

NÉSTOR DIEGO RIVERA CAMPOVERDE



CUENCA – ECUADOR
2025

**Autores:**

**Jorge Luis Chuchuca Zhizhpon**
Ingeniero Mecánico Automotriz.
Candidato a Magíster en Ingeniería Automotríz con Mención en Negocios Automotrices por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.
Jchuchucaz@est.ups.edu.ec

**Danny Leonardo Morocho Fernández**
Ingeniero Mecánico Automotriz.
Candidato a Magíster en Ingeniería Automotríz con Mención en Negocios Automotrices por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.
dmorochof@est.ups.edu.ec

**Dirigido por:**

**Néstor Diego Rivera Campoverde**
Ingeniero Mecánico Automotriz.
Magister en Sistemas Automotriz.
Doctor en Ingeniería Mecánica.
nrivera@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS
2025 © Universidad Politécnica Salesiana.
CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA
JORGE LUIS CHUCHUCA ZHIZHPON
DANNY LEONARDO MOROCHO FERNÁNDEZ
Análisis de la seguridad del tranvía "Cuatro Ríos" mediante la norma UNE-EN 14363

***DEDICATORIA***

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mis padres Manuel Cruz y María Rosa, quienes, con su ejemplo de vida, apoyo incondicional y ardua motivación, me han guiado en cada paso de mi formación académica y personal para seguir en adelante, sin su sacrificio y amor, este logro no habría sido posible. A mis profesores y mentores, especialmente al Ing. Néstor Rivera cuyo conocimiento, paciencia y orientación han sido fundamentales para la realización de este proyecto de titulación. Sus valiosas enseñanzas permanecerán conmigo a lo largo de mi vida profesional.

Jorge Luis Chuchuca Zhizhpon

Le dedico el resultado de este trabajo a toda mi familia. Principalmente, a mis padres Lucho y Julita que me apoyaron y contuvieron los momentos malos y en los menos malos. Gracias por enseñarme a afrontar las dificultades sin perder nunca la cabeza ni morir en el intento. Me han enseñado a ser la persona que soy hoy, mis principios, mis valores, mi perseverancia y mi empeño. Todo esto con una enorme dosis de amor y sin pedir nada a cambio.

Danny Leonardo Morocho Fernández

***AGRADECIMIENTO***

Queremos agradecer primeramente a Dios por darnos la sabiduría y guiarnos durante las cátedras de la Maestría. Expresamos nuestra gratitud a todos quienes nos proporcionaron un gran aliento para culminar con este trabajo de Investigación.

Un agradecimiento especial al docente tutor Ing. Néstor Rivera quien, con su conocimiento, enseñanza y paciencia supo indicarnos las pautas correctas para la realización y finalización de este proyecto. Así también queremos agradecer al grupo de Investigación VTS de la Universidad Politécnica Salesiana por brindarnos las herramientas y equipos necesarios para la toma de datos.

Finalmente damos las gracias infinitas a nuestros familiares y amigos por brindarnos todo el apoyo, confianza y consejos que nos motivaron a culminar con el trabajo de investigación previo a la obtención de la Maestría.

Jorge Luis Chuchuca Zhizhpon

Danny Leonardo Morocho Fernández

# Tabla de Contenido


Resumen ..... 7
Abstract ..... 9
1. Introducción ..... 11
2. Determinación del Problema ..... 13
3. Marco teórico referencial ..... 15
3.1 Impactos del desarrollo urbano en la movilidad ..... 15
3.2 Transporte urbano ecológico ..... 15
3.3 Infraestructura sustentable ..... 16
3.4 Canales de transporte Continental ..... 17
3.5 Tranvía de Cuenca ..... 18
3.5.1 Características del sistema ..... 19
3.5.2 Ficha técnica citadis 302 ..... 21
3.5.3 Caja de grasa ..... 21
3.6 Norma Española UNE-EN 14363 ..... 22
3.6.1 Métodos de Medición ..... 23
3.6.2 Parámetros de medición con el método simplificado. ..... 23
3.6.3 Criterios para la utilización del método simplificado ..... 24
4. Materiales y metodología ..... 28
4.1 Freematics one + ..... 28
4.2 Preparación de los equipos ..... 29
4.3 Ubicación de los Freematics One + en el tranvía ..... 30
4.4 Toma de datos en el tranvía ..... 31
4.5 Filtrado de los datos ..... 32
4.6 Evaluación de la seguridad ..... 37
4.6.1 Seguridad en circulación ..... 37
4.6.1 Calidad de circulación ..... 38
5. Resultados y discusión ..... 43
5.1 Seguridad en circulación ..... 43
6. Conclusiones ..... 49
Referencias ..... 50

# ANÁLISIS DE LA SEGURIDAD DEL TRANVÍA "CUATRO RÍOS" MEDIANTE LA NORMA UNE-EN 14363


AUTOR(ES):

JORGE LUIS CHUCHUCA ZHIZHPON

DANNY LEONARDO MOROCHO FERNANDEZ

# Resumen

El tranvía representa un importante paso hacia la movilidad sostenible en la Ciudad de Cuenca, de tal manera que ha tenido un impacto positivo del desarrollo urbano al conectar diferentes áreas de la ciudad, además el sistema del tranvía ha demostrado ser eficiente y puntual en su operación. Por lo tanto, esta investigación presenta el proceso para el análisis de la seguridad del tranvía mediante la Norma UNE-EN 14363 con el procesamiento de señales obtenidas por el Data Logger OBD-GPS Freematics One+.

En primer lugar, se realiza la recopilación de las señales de velocidad, altitud, latitud y aceleración en cada bogie, de tal manera que el dispositivo freematics se coloque en la parte delantera y posterior del tranvía para establecer una base de datos de las diferentes rutas. Como principales variables de interés para el estudio de la seguridad es la aceleración y la fuerza transversal como lo indica la normativa UNE-EN14363. Posteriormente se digita la información en el software MATLAB para generar las gráficas de aceleración y de la fuerza transversal, existe dos métodos de análisis; método normal y simplificado, para ello utilizamos el método simplificado donde se analiza las fuerzas transversales; con el tranvía vacío, el valor permitido es de 132.38 kN y con el tranvía lleno el valor permitido es de 186.10 kN, así mismo para el análisis de las aceleraciones, la normativa indica una aceleración de $3m/s^2$.

Los resultados obtenidos para las fuerzas transversales cumplen con los requisitos establecidos en la norma UNE-EN 14363. En el caso del tranvía vacío, se registra un valor de 55.31 kN, mientras que con carga de pasajeros el valor asciende a 79.40 kN. Ambos resultados se encuentran por debajo del límite máximo permitido por la normativa, garantizando así un nivel de seguridad adecuado.

Adicionalmente, los valores de aceleración son igualmente satisfactorios, con un promedio de $1.8\ m/s^2$, situándose dentro del rango permitido. Estos resultados confirman que la calidad y seguridad de la circulación del tranvía es óptima.

**Palabras clave:**

Tranvía, Seguridad, Freematics, Normativa, Matlab.

# ABSTRACT

The tramway represents an important step towards sustainable mobility in the city of Cuenca, in such a way that it has had a positive impact on urban development by connecting different areas of the city, in addition the tramway system has proven to be efficient and punctual in its operation. Therefore, this research presents the process for the safety analysis of the tramway using the UNE-EN 14363 Standard with the processing of signals obtained by the OBD-GPS Data Logger Freematics One+.

First, the collection of speed, altitude, latitude and acceleration signals in each bogie is performed, so that the freematics device is placed in the front and rear of the streetcar to establish a database of the different routes. The main variables of interest for the safety study are acceleration and transverse force as indicated in the UNE-EN14363 standard. Subsequently the information is typed in MATLAB software to generate the acceleration and transverse force graphs, there are two methods of analysis; normal and simplified method, for this we use the simplified method where the transverse forces are analyzed; with the empty streetcar, the allowed value is 132.38 kN and with the full streetcar the allowed value is 186.10 kN, likewise for the analysis of the accelerations, the regulation indicates an acceleration of $3m/s^2$.

The results obtained for the transverse forces comply with the requirements established in the UNE-EN 14363 standard. In the case of the empty tram, a value of 55.31 kN is recorded, while with passenger load the value rises to 79.40 kN. Both results are below the maximum limit permitted by the regulations, thus guaranteeing an adequate level of safety.

In addition, the acceleration values are equally satisfactory, with an average of $1.8\ m/s^2$, which is within the permitted range. These results confirm that the quality and safety of the tram's movement is optimal.

**Keywords:**
Tramway, Safety, Freematics, Normative, Matlab.

# 1. INTRODUCCIÓN

El tranvía se presenta como una opción de transporte ecológica. No obstante, las rutas del tranvía suelen ser compartidas con participantes más susceptibles en el entorno vial, tales como peatones y ciclistas, lo que aumenta el riesgo de posibles incidentes (Tzouras et al., 2020). Analizar la seguridad del tranvía permite identificar las posibles vulnerabilidades en su diseño y operación, contribuyendo así a prevenir accidentes y proteger la integridad de los usuarios.

En la Ciudad de Cuenca, está el medio de transporte publico denominado tranvía "Cuatro Ríos", desde sus inicios de operación en el año 2020 hasta la actualidad se han presenciado diferentes accidentes en ruta, es por ello la importancia de estudiar el nivel de seguridad que presentan los tranvías mediante la evaluación de la norma UNE EN 14363 que ayuda a analizar tanto la seguridad del bogie como de la caja, proporciona valores máximos de seguridad mediante las diferentes aceleraciones que presente el tranvía.

El desarrollo de la evaluación del nivel de seguridad del tranvía se realiza mediante un dispositivo de adquisición de datos Freematics one plus donde proporciona datos de las aceleraciones durante el trayecto, posteriormente mediante un software (Matlab) se procesa los parámetros obtenidos.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. Objetivo General

- Analizar la seguridad del tranvía “Cuatro Ríos” mediante la norma UNE-EN 14363.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Establecer el marco normativo mediante una investigación bibliográfica determinando la información requerida que conlleve a la observación del nivel de seguridad del tranvía.
- Realizar la toma de datos mediante un dispositivo de adquisición de datos de aceleración para la verificación del cumplimiento de la seguridad del tranvía.
- Analizar los resultados obtenidos por el dispositivo de adquisición de datos mediante el desarrollo de gráficas para la validación de la seguridad de un tranvía.

# 2. Determinación del Problema

Desde el año 2020, la ciudad de Cuenca dispone del sistema de transporte público denominado Tranvía de los “Cuatro Ríos”. De acuerdo con Montesdeoca y Vásconez, aproximadamente el 70% de la población utiliza el transporte público, lo que pone de manifiesto la elevada dependencia de este medio para la movilidad urbana. No obstante, al tratarse de un sistema relativamente reciente e innovador, aún no se cuenta con un análisis técnico integral que permita evaluar su nivel de seguridad operativa de manera exhaustiva. (Montesdeoca & Vásconez, 2015).

La Norma UNE EN 14363 establece los requisitos técnicos y las pautas de seguridad aplicables a sistemas de tranvía. Su adopción es esencial para garantizar que los tranvías cumplan con los estándares internacionales de seguridad, lo que a su vez aumenta la confianza de los usuarios. Los tranvías operan en entornos urbanos complejos y densamente poblados, donde la seguridad es de suma importancia debido a las interacciones con peatones, vehículos y otros elementos urbanos.

La seguridad en la operación y el diseño de tranvías es un objetivo constante y un compromiso hacia la prevención de incidentes y accidentes. La Norma UNE EN 14363 proporciona un marco sólido para la mejora continua de la seguridad. La seguridad en el transporte público es un tema de importancia mundial. En el contexto local, la ciudad de Cuenca ha invertido significativamente en la implementación del tranvía "Cuatro Ríos" para mejorar la movilidad urbana (Diego Rodríguez-Maldonado et al., 2021). Garantizar la seguridad de los pasajeros y la integridad de la ciudadanía en general es una prioridad fundamental. En este contexto, la norma UNE-EN 14363 se presenta como una referencia internacional clave, al establecer estándares rigurosos para la seguridad en sistemas de transporte tranviario. La aplicación de esta normativa no solo resulta esencial para evaluar y mejorar las condiciones de seguridad del tranvía, sino que también adquiere relevancia en cualquier lugar que utilice este medio de transporte como parte de su sistema de movilidad urbana.

La operación de un tranvía implica diversos riesgos, como colisiones, descarrilamientos, fallos técnicos, y situaciones de emergencia. Es fundamental analizar y reducir estos riesgos para asegurar la protección de los pasajeros y de la población en general.

El análisis de las medidas de protección resulta crucial para asegurar la confianza y aceptación por parte del público. La percepción de seguridad del tranvía como medio de transporte público incide directamente en la decisión de los usuarios de utilizarlo, lo cual impacta a su vez en su viabilidad y éxito como una alternativa sostenible de movilidad. Del mismo modo, un enfoque proactivo en cuanto a la seguridad del tranvía refuerza la reputación del sistema de transporte y promueve su adopción generalizada.

Esta investigación propone contribuir al campo de la seguridad en sistemas del tranvía al proporcionar un análisis riguroso en conformidad con la Norma UNE EN 14363. Los resultados de este trabajo se aplicarán para incrementar la seguridad de los sistemas del tranvía "Cuatro Ríos", fomentando así una movilidad más segura y sostenible en la ciudad de Cuenca.

# 3. Marco teórico referencial

## 3.1 Impactos del desarrollo urbano en la movilidad

El desarrollo urbano tiene un impacto significativo en la movilidad, y estos efectos pueden ser positivos o negativos dependiendo de la planificación y gestión adecuada. Los beneficios incluyen la mejora de la accesibilidad y la adopción de modos de transporte más sostenibles mientras que los desafíos incluyen la congestión y los efectos ambientales negativos. En las grandes localidades, la población de bajos recursos tienden a residir en zonas suburbanas, donde el bajo costo de la tierra o la posibilidad de acceder a terrenos libres y sin costo ha facilitado la construcción de viviendas.

En dichas áreas, la oferta de servicios públicos como escuelas, centros de salud y transporte colectivo es precaria y a ello se suma una limitada oferta de oportunidades de trabajo, tanto en cantidad como en variedad (Alcántara Vasconcellos, 2010). La movilidad Urbana en Medellín exactamente el Valle de Aburra y el área Metropolitana, se puede decir que la solución a la problemática que presenta San José en Costa Rica debe concebirse desde su inicio bajo el ideal de integración modal de transporte como se ha ido consolidando en Medellín-Colombia (Montenegro, 2019). Un enfoque equilibrado, que integre infraestructuras adecuadas, políticas de transporte sostenible y una planificación inclusiva, es esencial para maximizar los beneficios y mitigar los problemas asociados con el desarrollo urbano.

## 3.2 Transporte urbano ecológico

La ciudad contemporánea está diseñada de manera que ciertos usos y grupos sociales queden aislados en áreas específicas, organizadas mediante planos urbanos. Estos planes, con diferentes ejes, promueven el tránsito de vehículos privados, situando al automóvil como el elemento principal de movilidad. El espacio

público tiene un solo objetivo facilitar el desplazamiento de personas o mercancías, con una velocidad que variara dependiendo de la distancia y el tiempo, por lo tanto, la relación espacio-tiempo tiende a ser estable (Velásquez, 2015).

La movilidad en la ciudad de Cuenca es un tema prioritario en la agenda de la administración pública, en los últimos años se ha evidenciado la necesidad de un enfoque holístico al transporte público que integre los diversos tipos de movilización, considerando el impacto ambiental (Medina et al., 2016). Los sistemas de tranvía, en ciertos casos, representan una optimización en la implementación y operación de los sistemas del transporte tranviario.

Se reconocen ampliamente las características de los sistemas de metro ligero como solución a los problemas de transporte en ciudades de tamaño intermedio, fundamentadas principalmente en los beneficios que ofrece el uso de plataformas reservadas. La velocidad comercial que se puede alcanzar (20-25 km/h con prioridad semafórica frente a los 10-15 km/h de los sistemas de autobús) además, las frecuencias que se pueden admitir, al disponer el sistema de transporte público de una plataforma segregada del resto del tráfico urbano (Botella et al., 2021).

## 3.3 Infraestructura sustentable

Evaluando la sostenibilidad de la densificación urbana, indicadores para el caso de Cuenca, se conoce que, en la ciudad pese a los intentos por mejorar el sistema de transporte público, aún persisten limitaciones en temas de densidad, ocupación, calidad del espacio público y peatonales, por lo tanto, se evidencian limitaciones en el ámbito político (Botella et al., 2021).

En la tabla 1 se observa los acontecimientos generados al crear un proyecto de movilidad sostenible en diferentes ciudades, que parte de una necesidad abarcando el campo político para satisfacer la problemática que tiene una ciudad (Fernandez, 2012).

Tabla 1 Experiencias del tranvía en Medellín, Zaragoza y Cuenca

| Propuesta | Requerimiento | Estructura | Elementos | Estimación general |
|---|---|---|---|---|
| **Medellín** | Nace para mejorar el transporte público. | Toda persona tiene derecho a la libre circulación. | Cambio de infraestructura y mejora de las calles. | El tranvía responde a resultados claros manejables como la economía y el cuidado al planeta. |
| **Zaragoza** | Se da ante la necesidad de iniciar nuevos métodos de desplazamiento público. | Tener en cuenta la demanda de transporte para mejorar el servicio. | Animar a crear un transporte excelente y sostenible desde lo accesible y ambiental. | Minimiza los accidentes provocados por vehículos, la propuesta es aceptable y genera buenas ganancias por parte de los usuarios. |
| **Cuenca** | Movilizar y desarrollar la movilidad vehicular. | Solucionar la movilidad y mejorar la calidad de aire con nuevos sistemas de transporte. | Desarrollo de nuevos tipos de movilidad amigables con el medioambiente. | Existe acogida por parte de los ocupantes y los tiempos de llegada a cada destino a reducido, además el tráfico vehicular ha mejorado. |

Fuente: (Fernandez, 2012).

## 3.4 Canales de transporte Continental

Hoy en día, cada región cuenta con un sistema tranviario tanto moderno como antiguo. Existe países que actualizaron el transporte debido a la demanda de pasajeros, a su vez han mejorado las condiciones y prestaciones de los bogies. Siendo puntuales Alemania ha cambiado por completo tanto en la tecnología como la ergonomía de sus vagones, pero en otros países de Europa la realidad no es así los cambios fueron en menor magnitud.

Los países como España, Reino Unido o Francia fueron los artífices de la desaparición del tranvía, paradójicamente, en la actualidad son los máximos impulsadores del nuevo tranvía renovado y donde se están realizando el mayor número de proyectos, en la tabla 2 se observa la cantidad de tranvías que cuenta con el servicio del tranvía moderno (Fernandez, 2012).

Tabla 2 Países y sus redes tranviarias

| País | Localidades | Puntos | Canales | Bogies | Distancia de recorrido |
|---|---|---|---|---|---|
| **Portugal** | 4 | 5 | 17 | 117 | 214 |
| **España** | 18 | 21 | 32 | 256 | 275 |
| **Francia** | 20 | 23 | 43 | 424 | 860 |
| **Italia** | 13 | 16 | 51 | 434 | 1165 |
| **Suiza** | 7 | 10 | 38 | 238 | 812 |
| **Australia** | 5 | 9 | 47 | 324 | 1199 |
| **Alemania** | 6 | 67 | 376 | 3136 | 5838 |

Fuente: (Fernandez, 2012)

## 3.5 Tranvía de Cuenca

El 25 de mayo de 2020 empezó a brindar servicio de transporte público el Tranvía de la ciudad de Cuenca en Ecuador. Después de un periodo de 7 años desde el comienzo de los primeros trabajos, se implementó este avanzado sistema de transporte que brindará beneficios diarios a alrededor de 130 mil personas. Tiene un recorrido de 10,2 km desde el control sur Avenida de las américas y finaliza en el parque industrial (Municipalidad, 2008).

Figura 1 Tranvía de la ciudad de Cuenca (Alstom, 2020).

El tranvía de la ciudad de Cuenca es de la marca Alstom Citadis 302 tiene la capacidad de 290 pasajeros y una longitud de 33 metros, están equipados con puertas grandes y pisos bajos que facilitan el acceso de los usuarios, específicamente a ciudadanos con problemas de movilidad, alcanza una velocidad de 70 km/h. En la figura 2 se aprecia las 27 paradas que tiene el tranvía, el trayecto es realizado alrededor de 40 minutos aproximadamente dependiendo del tráfico.

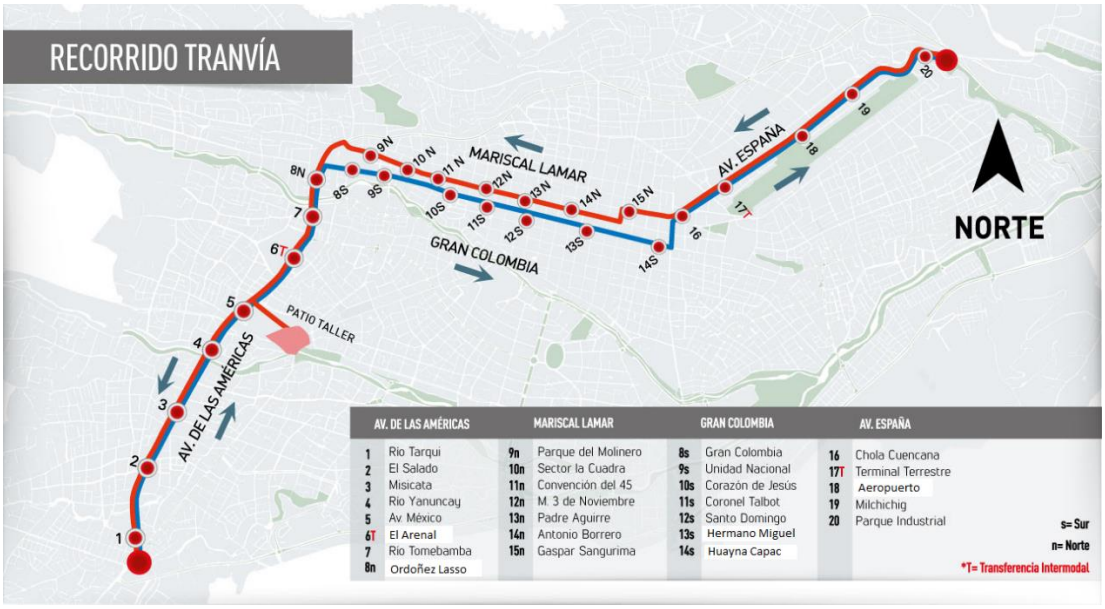


Figura 2 Paradas del Tranvía (Tranvía, 2024)

### 3.5.1 Características del sistema

Debido a las vibraciones que puede causar el tranvía en el Centro Histórico tienen instalado una malla anti vibratoria, y también su sistema de alimentación es por catenaria y por suelo (APS). El vagón se alimenta con una línea de 700 Vcc, y dentro del tranvía se almacena un sistema de baterías en caso de una falla del sistema de alimentación (Medina et al., 2016). Las dimensiones del vagón son de 33 metros de largo y 3,28 metros de alto, consta de 5 módulos, cuatro motores, una góndola transportadora y dos cajas (Cabrera & Sánchez, 2022).

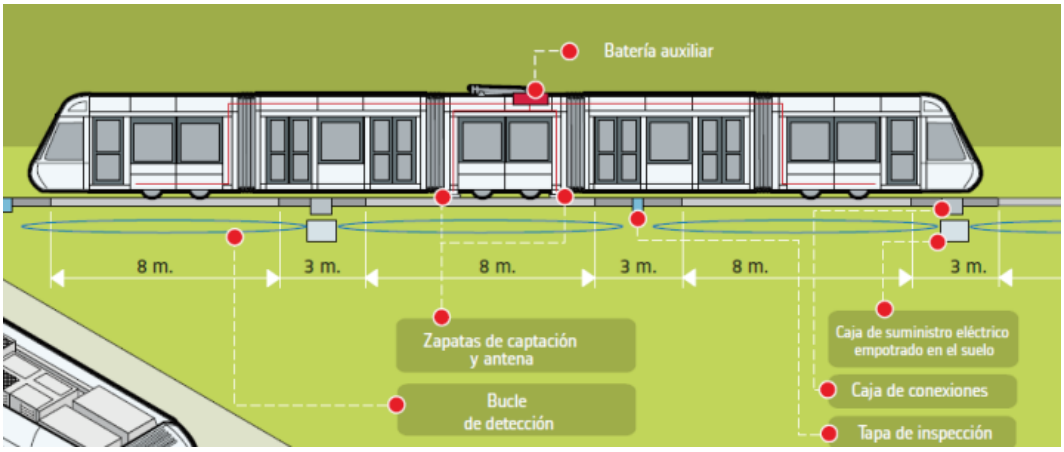


Figura 3 Dimensiones del Tranvía (Medina et al., 2016)

El Citadis de Alstom 302 es el modelo que circula por los rieles en la región del Azuay dado por el Municipio de Cuenca (Municipalidad, 2016), las unidades son bidireccionales. En cuanto a su composición, los vehículos disponen de 5 módulos. Los dos módulos extremos están equipados con cabina, poseen una puerta simple y cuentan con un bogie motor de dos ejes, designados como M1 y M2. Siguiente a estos módulos, se encuentran dos módulos suspendidos, denominados remolques, los cuales disponen de dos puertas dobles cada uno, designados como C1 y C2. Finalmente, en el centro, un módulo son puerta sobre un bogie portador y con el pantógrafo (denominado NP), esto se evidencia en la figura 4 (Fernandez, 2012).

Figura 4 Citadis 302 (Parra, 2019).

El tranvía obtiene una velocidad máxima de 70 km/h, pero al estar en servicio llega hasta los 50 km/h y a una aceleración de $1.2\ m/s^2$. Tiene una desaceleración emergente de $3\ m/s^2$. La velocidad comercial media se estima de 20 km/h (Parra, 2019).

### 3.5.2 Ficha técnica citadis 302

En la tabla 3 se presenta la ficha técnica del tranvía de la ciudad de Cuenca, el Citadis 302 que brinda el servicio a la población de Cuenca.

Tabla 3 Ficha técnica Citadis 302

| | |
|---|---|
| Marca | ALSTOM |
| Prototipo | Citadis 302 |
| Vida operativa | 30 años |
| Estructura | Bidireccional, 5 módulos articulados y dos cabinas deconducción |
| Aforo | 300 personas |
| Alimentación | 750 V en corriente continua |
| Motores | 4 motores de 120 kW de potencia |
| Velocidad | máxima 70 km/h y media 20 km/h |
| Tamaño | Largo: 32,55 m, Ancho: 2,65 m, Altura: 3,47 m |
| Medidas de las ruedas | 590 mm nuevas y 530 mm desgastadas |
| Peso | 41,939 T (41939 Kg) vacío y 60,2 T (60200 Kg) cargado |
| Composición | 3 bogíes, 5 módulos |
| Piso | Piso bajo integral |
| Puertas | Seis puertas a cada lado |
| Frenos | Freno de emergencia |
| | Freno de estacionamiento |
| | Anti-patinaje y antideslizamiento |
| | Freno eléctrico y mecánico |

Fuente: (Alstom, 2020)

### 3.5.3 Caja de grasa

En la actualidad, la mayoría de los trenes están compuestas con la mejor tecnología en cajas de grasas, son beneficiosos para el ahorro de energía y la lubricación, tiene la función de soportar los bogíes y permitir el giro de los ejes con ayuda de los rodamientos, la caja de grasa es un elemento importante para la seguridad de los trenes (Benitez, 2020).

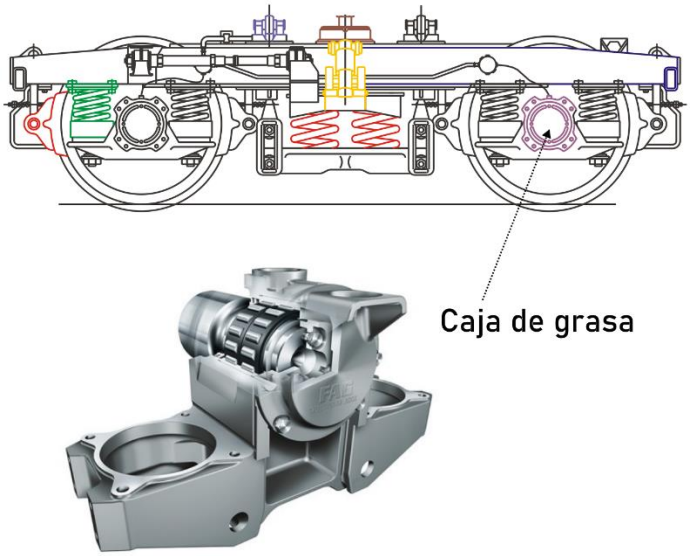


Figura 5 Caja de grasa (Benitez, 2020).

## 3.6 Norma Española UNE-EN 14363

La norma 14363 analiza la seguridad del bogie y de la caja de un vehículo ferroviario, mediante valores de seguridad según las aceleraciones que presente el vehículo bajo condiciones de operación e infraestructura.

A continuación, se presenta los métodos que permiten la evaluación:

1. **Seguridad ante descarrilamiento en vías curvas;** La presencia de tramos de vías con curvas es esencial, ya que, en estas curvas, el carril externo se eleva por encima del interno, generando el fenómeno denominado peralte. Este ajuste disminuye las fuerzas y mejora la comodidad de los pasajeros al tomar la curva. Asimismo, el peralte puede encontrarse en cambios de vía en intersecciones. Se trata de una medida que requiere una evaluación significativa, dado que, al transitar por tramos de vía curva, aumenta el riesgo de descarrilamiento.
2. **Seguridad en circulación bajo fuerzas de compresión longitudinales en curva;** El riesgo de descarrilamiento ocasionado por fuerzas longitudinales al atravesar una curva con configuración de "s" se estima como reducido en el caso de trenes convencionales. Sin embargo, para determinados trenes

de carga, este riesgo puede ser más elevado, por lo que resulta crucial realizar una evaluación específica en tales situaciones.

### 3.6.1 Métodos de Medición

Los métodos de medición que presenta la norma 14363 son; método de medición normal y simplificado.

El método de medición normal en la vía contiene la evaluación de:

- Seguridad de circulación.
- Carga sobre la vía.
- Calidad de circulación.

Con medidas de fuerzas entre la rueda y el carril y de la aceleración en la rodadura y en la caja del vehículo.

El método de medición simplificado contiene la evaluación de:

- Seguridad de circulación.
- Calidad de circulación.

Con medidas de aceleraciones obtenidas desde el bastidor del bogie y de aceleraciones en la caja del vehículo ferroviario. En algunas ocasiones también se cuantifica las fuerzas transversales entre el eje y la caja de grasa, en el método simplificado se asimila que el vehículo tendrá valores límite de carga sobre la vía, sin la necesidad de una evaluación de los parámetros (Norma UNE-EN 14363, 2019).

### 3.6.2 Parámetros de medición con el método simplificado.

Para la evaluación de la seguridad y calidad de la marcha del vehículo ferroviario se debe medir los siguientes parámetros.

1. **Seguridad de circulación;**
    a. Suma máxima de las fuerzas laterales de la caja de grasa ($H_{max}$).

b. Valor eficaz (RMS) deslizante de las fuerzas laterales de caja de grasa ($H_{rms}$).

c. Aceleración máxima en el bastidor del bogie ($\ddot{y}^{+}{}_{Smax}$).

d. Aceleración máxima en la caja del vehículo

e. ($\ddot{y}^{*}{}_{Smax}$), ($\ddot{z}^{*}{}_{Smax}$).

f. Valor eficaz (RMS) deslizante de aceleración lateral en el bastidor del bogie ($\ddot{y}^{+}{}_{Srms}$).

**2. Calidad de circulación;**

a. Aceleraciones máximas en la caja del vehículo ($\ddot{y}^{*}{}_{qmax}$), ($\ddot{z}^{*}{}_{qmax}$).

b. Valor eficaz de aceleraciones en la caja del vehículo ($\ddot{y}^{*}{}_{qrms}$), ($\ddot{z}^{*}{}_{qrms}$).

### 3.6.3 Criterios para la utilización del método simplificado

Para implementar el método simplificado y registrar las fuerzas transversales en una caja de grasa, especialmente en el ámbito de sistemas ferroviarios como el tranvía, es fundamental cumplir con una serie de condiciones básicas. Estas condiciones, especificadas en la tabla 4, garantizan que las mediciones sean precisas, repetibles y pertinentes para la evaluación del rendimiento y la seguridad del sistema.

Tabla 4 Condiciones para el método simplificado

| | |
|---|---|
| **Tipos de órgano de rodadura,** uno de los siguientes: | |
| -Ejes aislados;<br>-Bogie con dos ejes $2a^+ \leq 3.3$ m;<br>-Bogie con tres o más ejes con distancia entre ejes exteriores $\leq 4.5$ m con medición adicional de las fuerzas transversales en caja de grasa H. | |
| **Configuración del vehículo,** una de las siguientes: | |
| -Con dos ejes aislados;<br>-Con dos bogíes. | |
| Vehículos articulados formados por dos o más cajas, con las siguientes posibles configuraciones de órganos de rodadura, por caja del vehículo<br>-Hasta dos ejes aislados<br>-Hasta dos bogíes. | |
| **Carga vertical estática estándar por eje $P_{FD}$ (**para todos los vehículos**)** | $\leq$ 200 kN |
| **Velocidad máxima permitido del vehículo $V_{adm}$** | |
| Con ejes individuales | $\leq$ 100 km/h |
| Vagones de mercancía con bogíes | $\leq$ 120 km/h |
| Otros vehículos con masa de bogie $m^+ > 10t$ | $\leq$ 120 km/h |
| Otros vehículos con masa de bogie $m^+ > 10t$ y medición adicional de fuerzas transversales en caja de grasa H | $\leq$ 160 km/h |
| Otros vehículos con masa de bogie $m^+ > 10t$ y $(P_{FD} * V_{adm}) \leq 34000$ (kN km/h) | $\leq$ 200 km/h |
| **Insuficiencia de peralte admisible $I_{adm}$** | |
| Vagones de mercancías | $\leq$ 130 mm |
| Unidades múltiples con carga vertical estática nominal por eje $P_{FD} \leq 170\ kN$ y $V_{adm} \leq 160\ km/h$ | $\leq$ 165 mm |
| Otros vehículos | $\leq$ 150 mm |
| $P_{FD}$ Es la carga vertical estática nominal del eje con mayor carga del vehículo en la configuración de carga elevada | |

Fuente: (Norma UNE-EN 14363, 2019).

La tabla 5 especifica los parámetros y puntos de medición establecidos en la normativa, considerando las aceleraciones tanto en la caja de grasa como en el bastidor del bogie. El análisis de las aceleraciones en los ejes del bogie es fundamental para asegurar la estabilidad, la seguridad y el confort operativo de un tranvía. Además, este análisis contribuye a reducir el desgaste de los componentes, optimizar el rendimiento del tranvía y garantizar la seguridad de los pasajeros.

Tabla 5 Parámetros y puntos de medición

| Punto de medición de referencia | Dirección | Símbolo | Unidad | Propósito de la medición |
|---|---|---|---|---|
| **Aceleraciones** | | | | |
| Aceleraciones de eje $\ddot{y}$ | | | | |
| Caja de grasa de la rueda 11 (o 12) | Transversal | $\ddot{y}_{11}$ | $m/s^2$ | Método de medición simplificado (solo órganos de rodadura con ejes aislados): Seguridad de marcha (incluyendo estabilidad de marcha) |
| Caja de grasa de la rueda 21 (o 22) | Transversal | $\ddot{y}_{21}$ | $m/s^2$ | |
| Aceleraciones en el chasis del bogie en los ejes extremos $\ddot{y}^+$ | | | | |
| Bastidor del bogie, sobre la rueda 11 (o 12) | Transversal | $\ddot{y}_{11}^+$ | $m/s^2$ | Método de medición simplificado (solo vehículos de bogíes): Seguridad de marcha (incluyendo estabilidad de marcha) |
| Chasis del bogie, sobre la rueda 21 (o 22) | Transversal | $\ddot{y}_{21}^+$ | $m/s^2$ | |
| Aceleraciones en el suelo de la caja del vehículo $\ddot{y}^*$, $\ddot{z}^*$ | | | | |
| Caja del vehículo, sobre el órgano de rodadura I | Transversal | $\ddot{y}_I^*$ | $m/s^2$ | Método de medición simplificado sin medición de la fuerza H: Seguridad de marcha Todos los métodos de medición: calidad de marcha |
| Caja del vehículo, por encima del órgano de rodadura II | Transversal | $\ddot{y}_{II}^*$ | $m/s^2$ | |
| Caja del vehículo, sobre el órgano de rodadura I | Vertical | $\ddot{z}_I^*$ | $m/s^2$ | Método de medición simplificado Seguridad de marcha Todos los métodos de medición: Calidad de marcha |
| Caja del vehículo, sobre el órgano de rodadura II | Vertical | $\ddot{z}_{II}^*$ | $m/s^2$ | |
| Centro de la caja del vehículo (solo recomendado) | Transversal | $\ddot{y}_M^*$ | $m/s^2$ | Todos los métodos de medición: Calidad de marcha (Se recomienda solo para vehículos largos y vehículos de dos pisos, donde se pueden observar niveles altos de aceleración |
| | Vertical | $\ddot{z}_M^*$ | $m/s^2$ | |
| **Parámetros de influencia** | | | | |
| Velocidad | - | V | Km/h | |
| Influencia de Peralte | - | I | mm | |

Fuente: (Norma UNE-EN 14363, 2019).

La tabla 6 presenta los valores permitidos para la evaluación de la calidad de marcha en vehículos ferroviarios, que generalmente corresponden a los niveles de aceleración. El cumplimiento de los rangos indicados asegura de manera automática que los parámetros de seguridad en el tranvía son adecuados.

Tabla 6 Valores máximos de la calidad de marcha

| | **Aceleraciones en la caja del vehículo ($^{m}/_{s^2}$)** | |
|---|---|---|
| **Parámetros de calidad de marcha, en vehículos a evaluar** | $\ddot{y}^{*}_{qmax}$ | $\ddot{z}^{*}_{qmax}$ |
| Locomotoras, cabezas motrices (Tractores de maniobras excluidos | 2.5 | 2.5 |
| Tractores de maniobras | Por definir | Por definir |
| Unidades autopropulsadas, coches viajeros | 1.5 | 2.0 |
| Vagones de mercancías con bogíes, vacíos | <3 (Preliminar) | <5(Preliminar) |
| Vagones de mercancías con bogíes, con carga | 3.5 | 5 |
| Vagones de mercancías sin bogíes, vacíos | Por definir | Por definir |
| Vagones de mercancías sin bogíes, con carga | Por definir | Por definir |

Fuente: (Norma UNE-EN 14363, 2019).

# 4. Materiales y metodología

## 4.1 Freematics ONE +

Freematics ONE+ es una plataforma versátil de prototipado para la telemetría de vehículos, siendo un dispositivo programable Arduino. Este se conecta al puerto OBD de un vehículo y opera de manera autónoma como un dispositivo inteligente capaz de establecer comunicación con la Unidad de Control del Motor (ECU). Incorpora un sensor de movimiento y tiene la capacidad de expansión mediante la incorporación de un receptor GNSS o la conexión de sensores externos. Los datos recolectados pueden ser procesados en tiempo real mediante su CPU de doble núcleo, almacenados en una tarjeta de almacenamiento, y transmitidos a través de Wifi o red telefónica. Además, incluye una biblioteca de Arduino en constante actualización, así como bocetos de Arduino listos para su utilización (Frematics, 2023).

Figura 6 One Plus Fuente: (Frematics, 2023)

A continuación, en la tabla 4 se indica las funciones del freematics One plus, previo al uso del dispositivo se requiere realizar la programación adecuada mediante el freematics Builder para la recolección de datos.

Tabla 7 Funciones Freematics One Plus.

| | |
|---|---|
| **SoC de doble núcleo programable por Arduino** | Medición fuerza G y del movimiento |
| **Interpretación de los datos PID, VIN, DTC desde el puerto OBD.** | Lectura del voltaje |
| **Rastreo de datos de bus CAN.** | Recopilación de datos por microSD de hasta 32 GB |
| **Geolocalización de alta precisión** | Transmisión de datos en tiempo real |

Fuente: (Frematics, 2023).

## 4.2 Preparación de los equipos

Para obtener los datos indispensables para el análisis, conforme a lo establecido en la Norma UNE EN-14363, es inevitable el uso de dos dispositivos Freematics One+, conectados a una batería externa y a un dispositivo GPS. Estos componentes se ensamblan conjuntamente en una caja para asegurar su correcto funcionamiento, como se observa en la figura 7.

Figura 7 Preparación del freematics. Fuente: Autores

El dispositivo Freematics One+ funciona conectado a un puerto OBD del vehículo ferroviario. Sin embargo, para este análisis, se realizó una conexión externa, ya que el dispositivo de medición debe ubicarse en puntos estratégicos del tranvía. Se utilizó una batería de ácido-plomo de 12V. La conexión del datalogger se efectuó en

el terminal 16 para el borne positivo de la batería, y en los terminales 4 y 5 para el borne negativo de la batería, como se muestra en la figura 8.

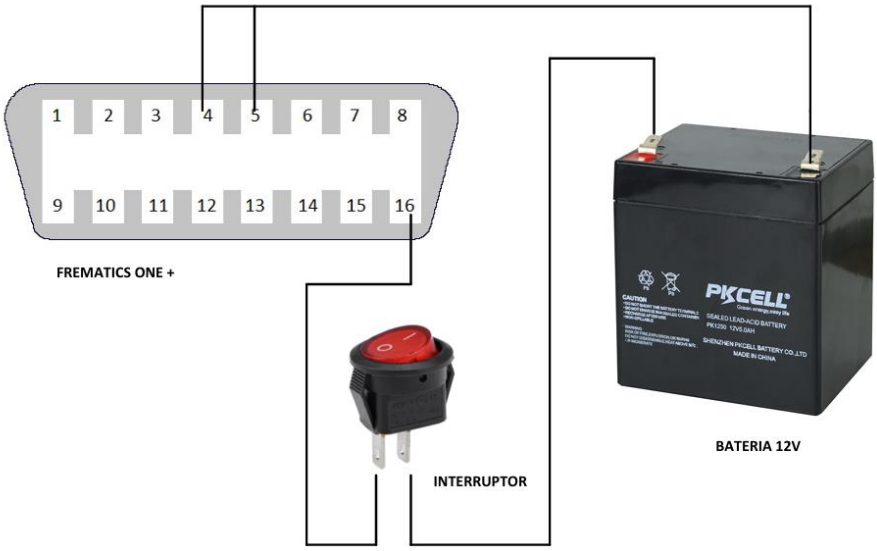


Figura 8 Conexión del datalogger. Fuente: Autores

Los dispositivos Freematics One+ se han seleccionado por su capacidad para proporcionar mediciones precisas de la aceleración. La conexión a una batería externa garantiza una fuente de energía constante y confiable, esencial para la obtención de datos continuos durante el trayecto del tranvía.

## 4.3 Ubicación de los Freematics One + en el tranvía

La norma UNE-EN 14363 establece los parámetros y los puntos de medición en vehículos ferroviarios para el análisis de seguridad. Según esta norma, los puntos de medición deben ubicarse donde exista el mayor número de órganos de rodadura, que en el caso del tranvía cuatro ríos corresponden a los tres bogies. Por lo tanto, se determinan diferentes posiciones de medición de acuerdo con el sentido de la marcha.

Los datos a medir son las aceleraciones del tranvía, y el equipo de medición se coloca en el piso, directamente sobre cada bogie. Los puntos de medición para los tramos de ida y regreso se muestran en la figura 9.

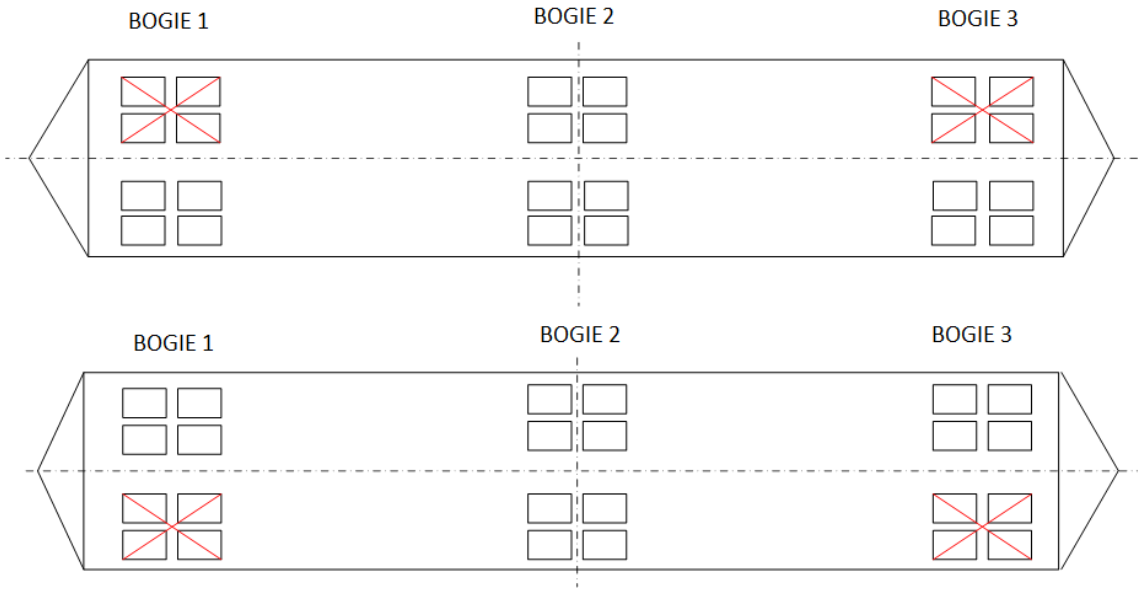


Figura 9 Ubicación del datalogger. Fuente: Autores

## 4.4 Toma de datos en el tranvía

Con los dispositivos de medición listos, se procede a colocar de acuerdo a los puntos de medición mencionados en el apartado 4.3, los datalogger van asentados en el piso del vehículo tranviario como se visualiza en la figura 10.

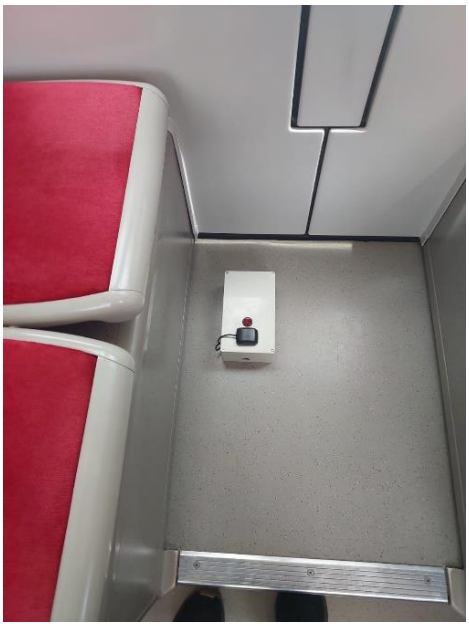

Figura 10 Colocación del datalogger. Fuente: Autores

Ambos dispositivos se colocan en las ubicaciones mencionadas y se activan mediante un interruptor al inicio de la ruta del vehículo ferroviario. Del mismo modo, se desactivan cuando el tranvía llega a su última parada.

## 4.5 Filtrado de los datos

La recopilación de datos por el dispositivo Freematics One se realiza a través de una memoria externa microSD, generando un archivo por cada ruta en formato .CSV (delimitado por comas). Posteriormente, la información se carga y se filtra mediante el software Matlab para su interpretación.

Tabla 8 Datos generados por Freematics One Plus.

| ts | date | time | lat | long | alt | kmh | sats | accx | accy | accz | gyrx | gyry | gyrz |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 209724 | 300524 | 16110890 | -2.912056 | -79.036385 | 2542 | 47 | 6 | 0 | -22 | 98 | 19 | -30 | -56 |
| 209924 | 300524 | 16110910 | -2.911964 | -79.036232 | 2563 | 47 | 6 | -1 | -22 | 100 | 64 | 0 | -51 |
| 210124 | 300524 | 16110930 | -2.911905 | -79.036156 | 2573 | 47 | 6 | 0 | -21 | 101 | 9 | -28 | -48 |
| 210324 | 300524 | 16110950 | -2.911861 | -79.036102 | 2580 | 47 | 6 | 0 | -21 | 99 | -32 | -56 | -56 |
| 210524 | 300524 | 16110970 | -2.911825 | -79.036064 | 2585 | 46 | 6 | -1 | -21 | 100 | -81 | 22 | -69 |
| 210724 | 300524 | 16110990 | -2.911790 | -79.036041 | 2588 | 46 | 6 | -2 | -22 | 99 | -33 | -7 | -55 |
| 210924 | 300524 | 16111010 | -2.911758 | -79.036018 | 2591 | 46 | 6 | -1 | -21 | 101 | 48 | -53 | -46 |
| 211123 | 300524 | 16111030 | -2.911730 | -79.036003 | 2592 | 46 | 6 | 0 | -19 | 104 | 51 | 0 | -70 |
| 211322 | 300524 | 16111050 | -2.911703 | -79.035980 | 2594 | 45 | 6 | -1 | -23 | 96 | 65 | -1 | -74 |
| 211521 | 300524 | 16111070 | -2.911678 | -79.035965 | 2595 | 45 | 6 | -1 | -19 | 99 | 0 | -38 | -36 |
| 211720 | 300524 | 16111090 | -2.911650 | -79.035950 | 2597 | 45 | 6 | 0 | -20 | 97 | -35 | -43 | -45 |
| 211919 | 300524 | 16111110 | -2.911625 | -79.035934 | 2598 | 45 | 6 | 0 | -20 | 99 | -99 | 5 | -50 |
| 212118 | 300524 | 16111130 | -2.911603 | -79.035927 | 2599 | 44 | 6 | -1 | -24 | 99 | -61 | -27 | -47 |
| 212317 | 300524 | 16111150 | -2.911581 | -79.035912 | 2599 | 44 | 6 | -1 | -22 | 96 | -26 | -25 | -67 |
| 212516 | 300524 | 16111170 | -2.911560 | -79.035896 | 2600 | 44 | 6 | 0 | -21 | 96 | 53 | -45 | -75 |
| 212715 | 300524 | 16111190 | -2.911540 | -79.035889 | 2600 | 44 | 6 | 1 | -21 | 101 | 95 | 14 | -70 |
| 212914 | 300524 | 16111210 | -2.911519 | -79.035873 | 2601 | 43 | 6 | 1 | -21 | 100 | 116 | -33 | -71 |
| 213113 | 300524 | 16111230 | -2.911496 | -79.035866 | 2601 | 43 | 6 | 2 | -21 | 98 | -16 | -45 | -50 |

Fuente: Autores.

Utilizando el software Matlab, los datos obtenidos son filtrados con el fin de eliminar el ruido y completar los datos que siguen una tendencia, lo que permite visualizar de manera más clara las aceleraciones y la información proporcionada por el GPS. Las rutas del tranvía se determinan mediante los resultados de latitud y longitud registrados por el datalogger y graficados en Matlab.

El uso de un dispositivo GPS permite la correlación de los datos de aceleración con la ubicación geográfica exacta, lo que facilita un análisis detallado de la interacción entre el tranvía y su entorno. En la figura 11 se presenta la ruta desde el Río Tarqui hacia el parque industrial, mientras que en la figura 12 se muestra la ruta desde el parque industrial hacia el Río Tarqui.

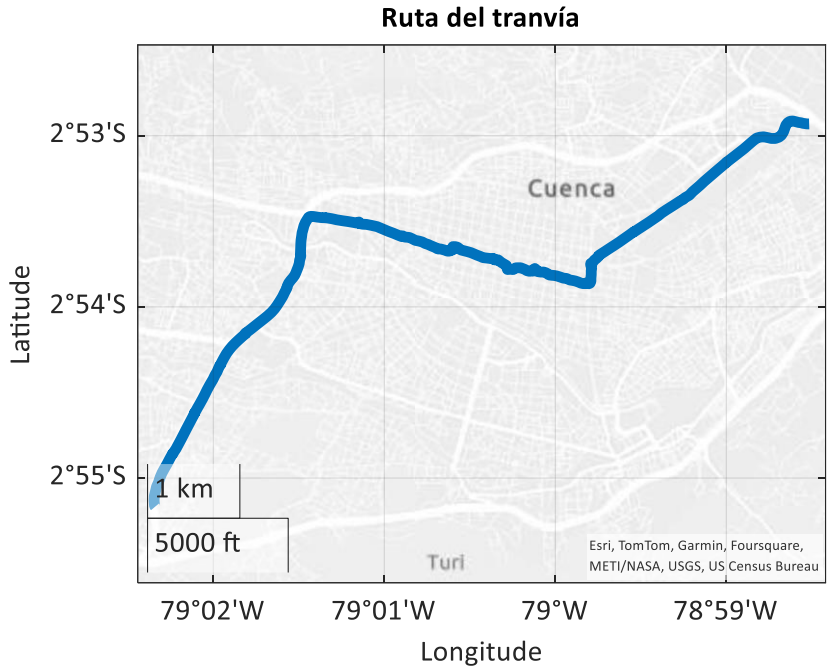


Figura 11 Ruta Ida por GPS. Fuente: Autores

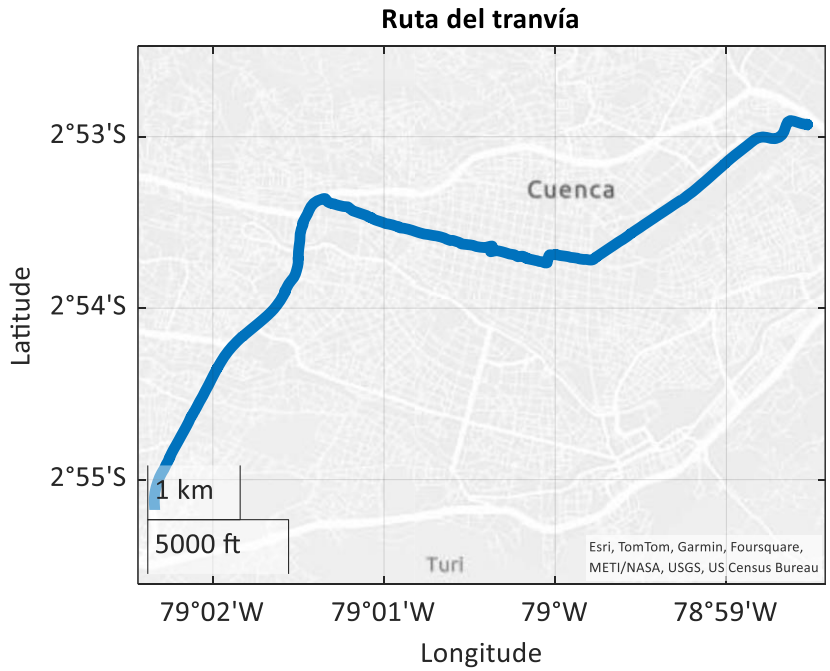


Figura 12 Ruta regreso por GPS. Fuente: Autores

La velocidad del tranvía, registrada por el datalogger en los puntos de medición delanteros y posteriores, se presenta en las figuras 13 y 14. La velocidad máxima del tranvía oscila alrededor de los 50 km/h. Cuando la velocidad se muestra en 0 km/h, esto indica que el vehículo tranviario se encuentra detenido en una estación de pasajeros.

El análisis de los datos de velocidad permite identificar patrones en la operación del tranvía, como los intervalos de aceleración y desaceleración entre estaciones. Esta información es importante para evaluar el nivel de transporte y detectar situaciones de mejora en la operación diaria del tranvía.

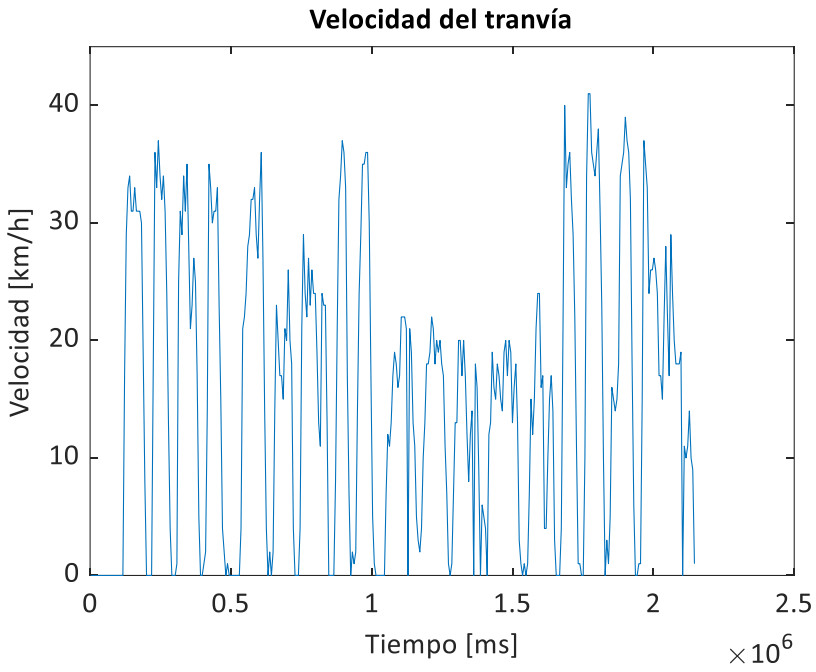


Figura 13 Velocidad Ida. Medición adelante. Fuente: Autores

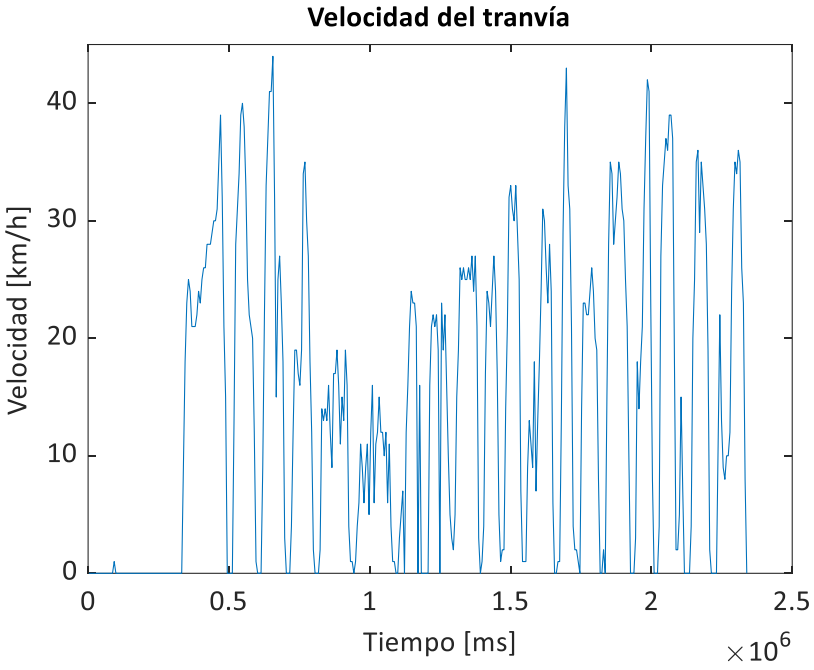


Figura 14 Velocidad Regreso. Medición adelante. Fuente: Autores

La velocidad del vehículo tranviario tomada con el datalogger ubicada en la parte posterior se observa en las figuras 15 y 16, velocidades de ida (Rio Tarqui – Parque Industrial) y de regreso (Parque Industrial – Rio Tarqui). En estas gráficas se observa un aumento en el número de vibraciones durante el regreso, lo que se debe a que la velocidad presenta un mayor número de picos en un periodo de tiempo determinado.

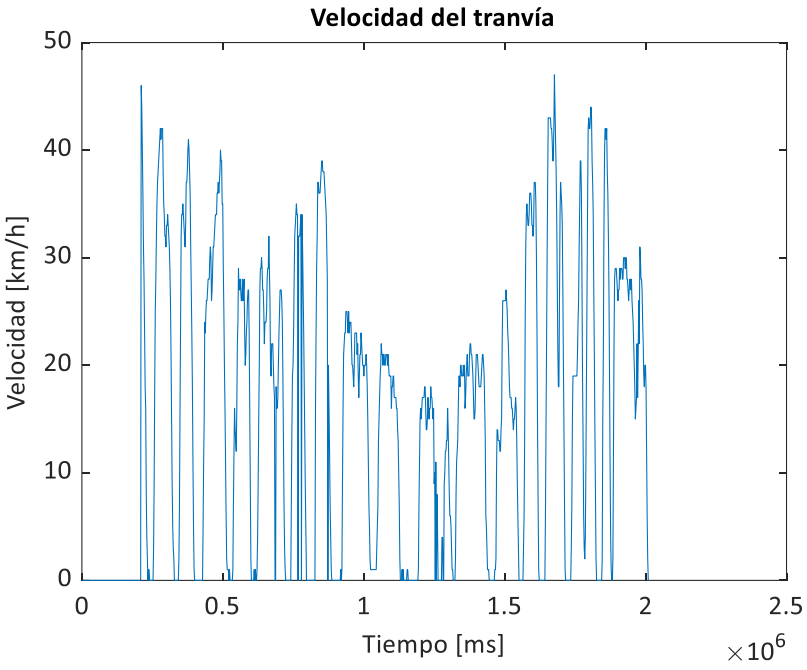


Figura 15 Velocidad Ida. Medición posterior. Fuente: Autores

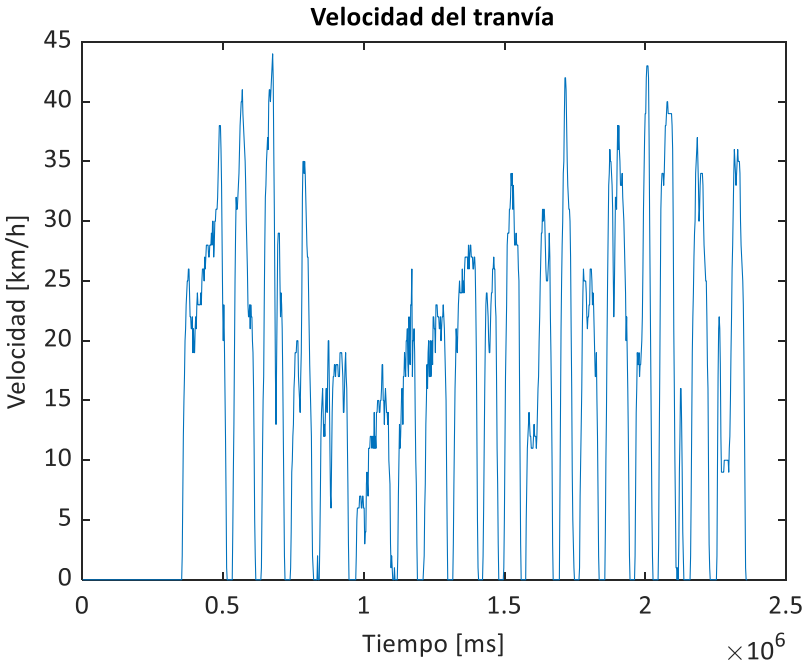


Figura 16 Velocidad Regreso. Medición posterior. Fuente: Autores

## 4.6 Evaluación de la seguridad

La norma UNE EN 14363 menciona los restrictivos y consideraciones para la evaluación de la seguridad del vehículo tranviario con el método de medición simplificado que se explica a continuación:

### 4.6.1 Seguridad en circulación

Para evaluar la seguridad en circulación se compara la fuerza transversal en la caja de grasa y las aceleraciones en la caja del vehículo tranviario, con los valores límites que menciona la normativa UNE EN 14363, esto se evidencia en la tabla 9.

Tabla 9 límites de las fuerzas transversales

| **Parámetro** | **Símbolo** | **Limites** |
|---|---|---|
| Fuerza transversal en caja de grasa | $H_{max}$ | $k_2(10\ KN + \frac{P_{F0}}{3})$<br><br>$k_2 = 0{,}90$<br><br>$P_{F0} =$<br>$< 200\ KN\ (segun\ normativa)$ |
| Aceleración transversal sobre la caja del vehículo | $\ddot{y}^*_{Smax}$ | $3\ m/s^2$ |
| $P_{F0} =$ carga vertical estatica nominal | | |

Fuente: (Norma UNE-EN 14363, 2019).

## 4.6.2 Calidad de circulación

En la tabla 10 se presentan los parámetros máximos de aceleraciones transversales y verticales utilizados para evaluar la calidad de la marcha según los diferentes tipos de vehículos tranviarios. En este caso, la evaluación se centra en los vehículos autopropulsados de pasajeros.

Tabla 10 Parámetros de la calidad de marcha

| **Evaluación, vehículo, condiciones de ensayo** | **Aceleraciones en la caja del tranvía ($^{m}/_{s^2}$)** | |
|---|---|---|
| **Parámetros de calidad de marcha** | $\ddot{y}^{*}_{qmax}$ | $\ddot{z}^{*}_{qmax}$ |
| Locomotoras, cabezas motrices (Tractores de maniobras excluidos | 2.5 | 2.5 |
| Tractores de maniobras | Por definir | Por definir |
| ***Unidades autopropulsadas, coches viajeros*** | *1.5* | ***2.0*** |
| Vagones de mercancías con bogíes, vacíos | <3 (preliminar) | <5(preliminar) |
| Vagones de mercancías con bogíes, con carga | 3.5 | 5 |

Fuente: (Norma UNE-EN 14363, 2019).

Las aceleraciones verticales en el tramo Río Tarqui – Parque Industrial, medidas en la parte delantera del tranvía "Cuatro Ríos", se muestran en la figura 17. Según la normativa UNE 14363, estas aceleraciones no deben superar los $2.0\,m/s^2$. Al aplicar el filtro de paso bajo, se observa que, dentro del espectro, los picos no superan los 2.0 m/s² de aceleración, lo que indica que las aceleraciones verticales se encuentran dentro de este límite.

Por lo tanto, la calidad de circulación es aceptable. Sin embargo, también se detecta la presencia de picos elevados, lo que sugiere a posibles daños en la infraestructura de la vía.

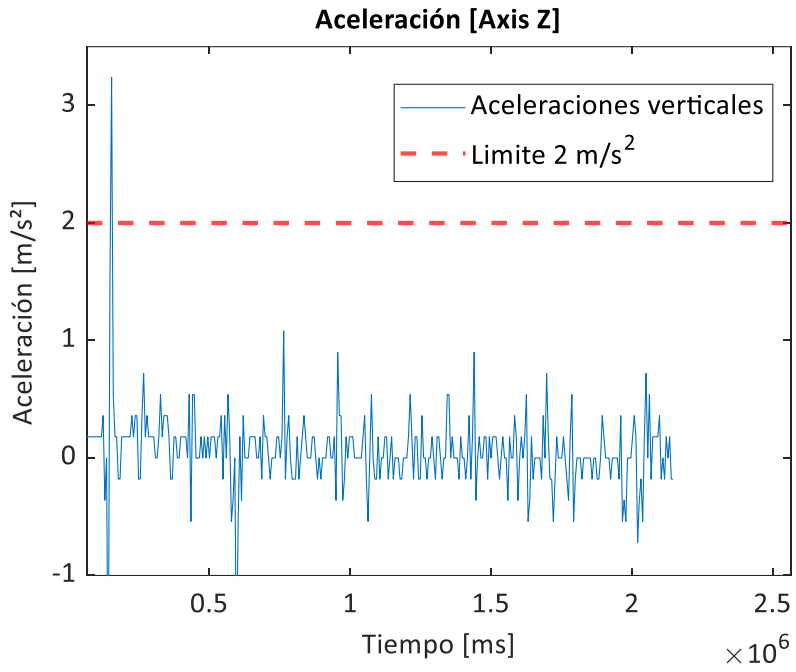


Figura 17 Aceleraciones verticales. Medición adelante Ida. Fuente: Autores

La calidad de la marcha medida en la parte delantera del tranvía en el tramo Parque Industrial – Río Tarqui se presenta en la figura 18. En esta figura se visualizan las aceleraciones verticales, las cuales no superan los $2.0\ m/s^2$. Según la normativa, esto permite concluir que la calidad de la circulación es satisfactoria. Además, se observa una gráfica descendente con picos ordenados, lo que indica que la infraestructura de la vía en este tramo se encuentra en óptimas condiciones.

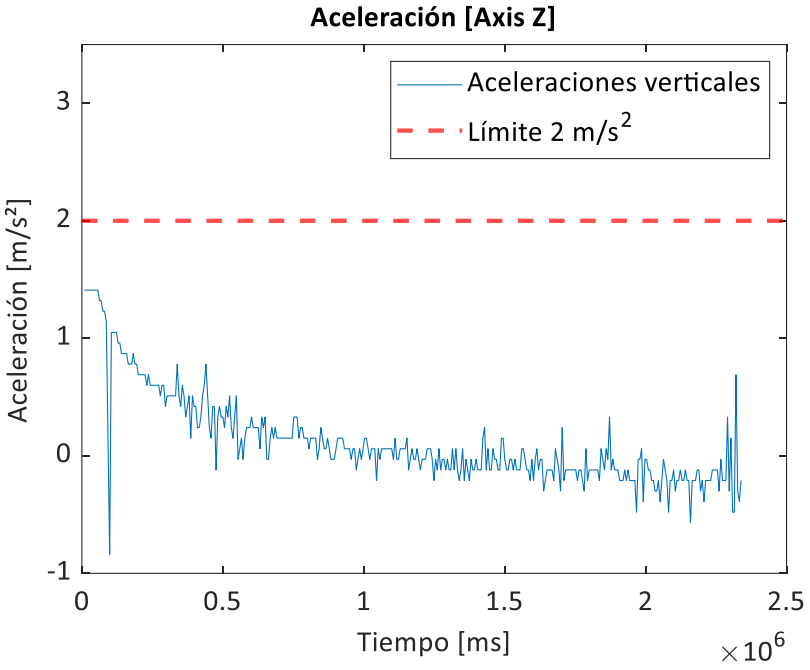


Figura 18 Aceleraciones verticales. Medición adelante Regreso. Fuente: Autores

En la figura 19 se muestra cómo el espectro de las aceleraciones verticales en la parte posterior no supera los $2.0\ m/s^2$, conforme a lo establecido por la normativa UNE-14363 para el tramo Río Tarqui-Parque Industrial. Esto permite concluir que la calidad de la circulación es satisfactoria. No obstante, también se observa una tendencia ligeramente descendente en la gráfica, junto con la presencia de varios picos altos, lo que sugiere que la infraestructura de la vía en este tramo presenta irregularidades o signos de desgaste.

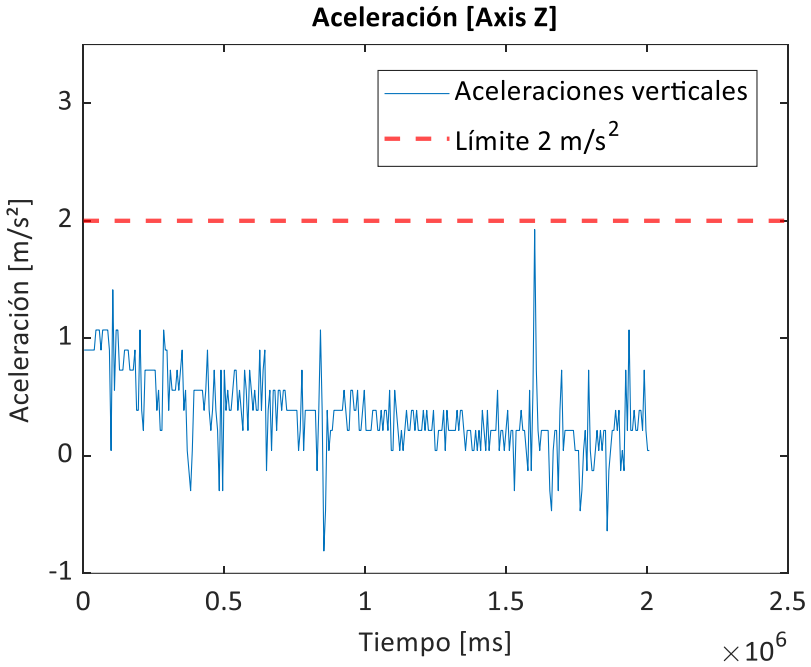


Figura 19 Aceleraciones verticales. Medición Atrás Ida. Fuente: Autores

En la figura 20 se observa que el espectro de las aceleraciones verticales en la parte posterior del tranvía no supera los $2.0\,m/s^2$ establecidos por la normativa UNE-14363 para el tramo Parque Industrial-Río Tarqui. Además, se detecta la presencia de picos altos, lo que sugiere a posibles daños en la infraestructura vial, como juntas desalineadas o desniveles. En conclusión, la calidad de la circulación en la parte posterior cumple con los valores normativos. No obstante, la calidad de marcha en la parte delantera del bogie sigue siendo aceptable.

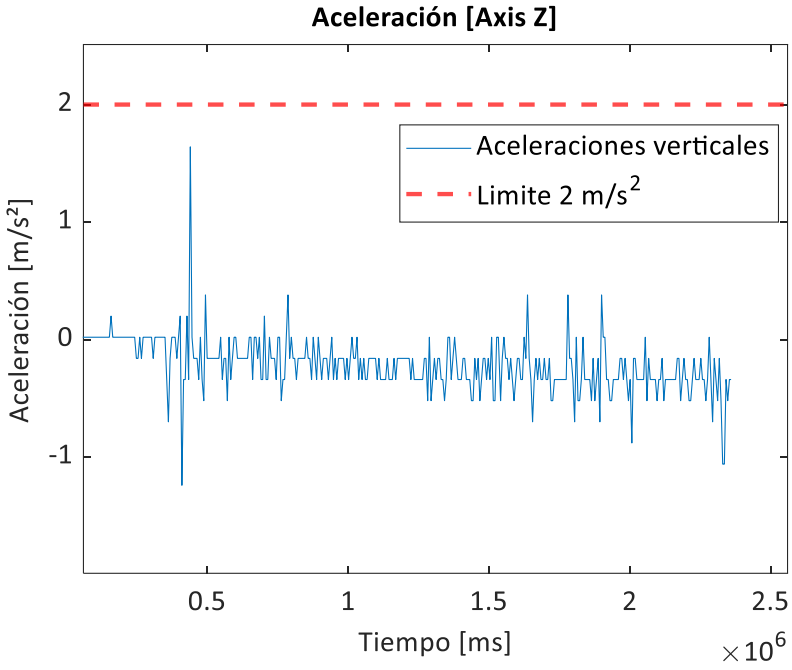


Figura 20 Aceleraciones verticales. Medición Atrás Regreso. Fuente: Autores

# 5. Resultados y discusión

## 5.1 Seguridad en circulación

En la normativa UNE EN 14363 establece una limitante de aceleración transversal del vehículo ferroviario para establecer el nivel de seguridad en circulación que brinda el mismo, los parámetros a evaluar es la fuerza transversal en la caja de grasa y las aceleraciones transversales en la caja del vehículo. En la tabla 11 se visualiza los resultados de las fuerzas transversales en diferentes condiciones del vehículo tranviario, es decir, en vacío y con pasajeros.

Tabla 11 Resultado de las fuerzas transversales

| **Resultado de las fuerzas transversales** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Análisis** | **Ubicación** | **Dirección de ruta** | **Fuerza transversal Normativa** | **Fuerza transversal Máxima del tranvía** |
| Tranvía Vacío **411.28 KN** | Adelante | Ida | 132.38 KN | 85.34 KN |
| | | Regreso | | 72.07 KN |
| | Atrás | Ida | | 9.09 KN |
| | | Regreso | | 54.76 KN |
| Tranvía con pasajeros **590.36 KN** | Adelante | Ida | 186.10 KN | 122.51 KN |
| | | Regreso | | 103.46 KN |
| | Atrás | Ida | | 13.05 KN |
| | | Regreso | | 78.61 KN |

Fuente: Autores

En la figura 21 se visualizan todas las fuerzas transversales generadas en la caja del vehículo tranviario, tanto en condiciones de vacío como con carga, según los límites establecidos por la normativa.

Se puede observar claramente que estas fuerzas se encuentran por debajo de los valores permitidos, lo que indica que la calidad de circulación del tranvía es segura.

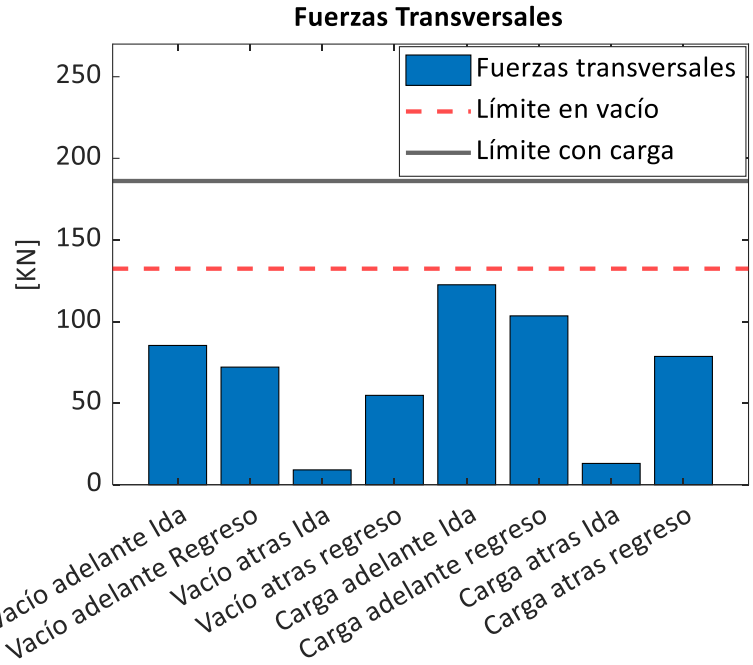


Figura 21 Fuerzas transversales. Fuente: Autores

La normativa establece con respecto a las aceleraciones transversales que no deben ser superiores a los $3\ m/s^2$ para que el vehículo sea seguro en la marcha, en la tabla 12 se muestra la media de las aceleraciones en la parte de adelante y posterior del tranvía.

Tabla 12 Resultado de las aceleraciones transversales

| **Resultado de las aceleraciones transversales** | | | |
|---|---|---|---|
| **Ubicación** | **Dirección de ruta** | **Aceleración transversal normativo** | **Aceleración transversal medido** |
| Adelante | Ida | $3\ m/s^2$ | $2.03\ m/s^2$ |
| | Regreso | | $1.71\ m/s^2$ |
| Atrás | Ida | | $0.21\ m/s^2$ |
| | Regreso | | $1.31\ m/s^2$ |

Fuente: Autores

En la figura 22 se muestran las aceleraciones transversales medidas en la parte delantera del vehículo tranviario en la ruta Río Tarqui hacia el Parque Industrial. Claramente, estas aceleraciones se encuentran en un rango de $1.5\,m/s^2$ a $2.5\,m/s^2$, estando por debajo del límite establecido. Por lo tanto, la calidad de la circulación al atravesar curvas, cambios de pendiente, aceleraciones y frenadas es aceptable.

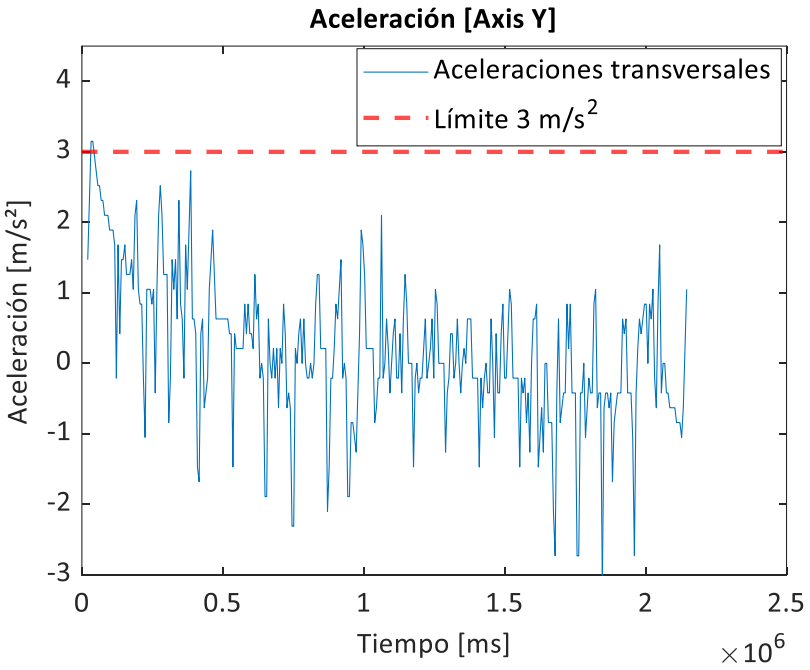


Figura 22 Aceleraciones transversales. Medición adelante. Fuente: Autores

En la figura 23 se presentan las aceleraciones transversales medidas en la parte delantera del tranvía, en la ruta Parque Industrial-Río Tarqui. En esta gráfica, el espectro se mantiene de manera constante por debajo del valor permitido por la normativa. Sin embargo, la repetición de valores pico sugiere que, aunque las fuerzas transversales en la parte delantera son aceptables, la calidad general de la marcha puede considerarse muy buena.

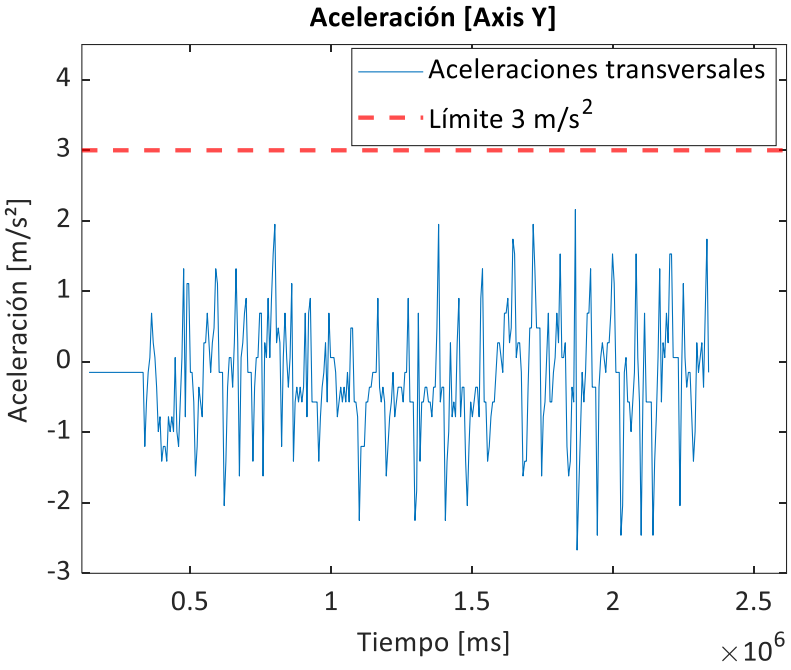


Figura 23 Aceleraciones transversales. Medición adelante. Fuente: Autores

En la figura 24, se muestran las aceleraciones transversales en la parte posterior del tranvía en la ruta Río Tarqui-Parque Industrial. El espectro presenta un comportamiento excelente, con valores bajos a los límites establecidos en la normativa UNE EN 14363, lo que indica que el vehículo tranviario se encuentra en perfectas condiciones durante el tiempo de circulación. En comparación con las gráficas anteriores, la fuerza transversal en esta sección es baja, lo que proporciona un índice de seguridad muy alto en la parte posterior del tranvía.

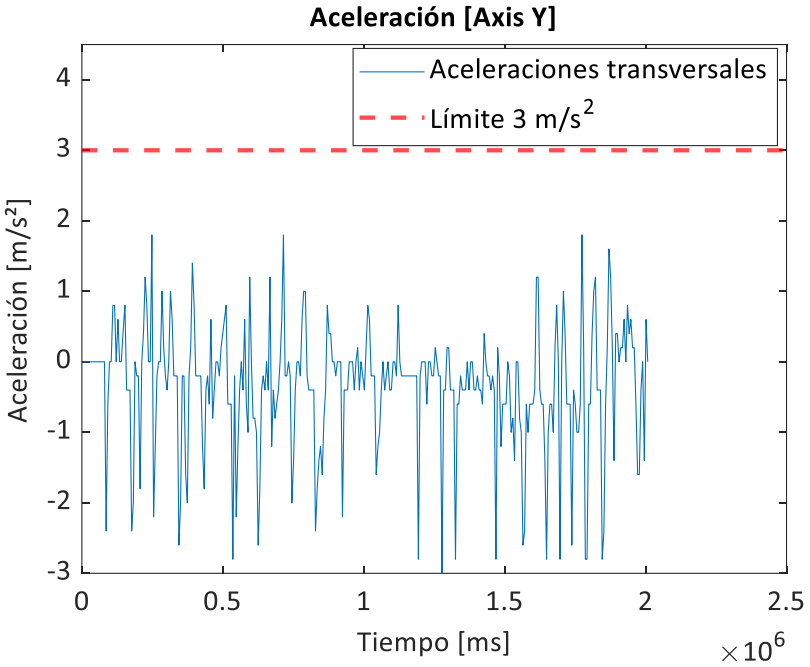


Figura 24 Aceleraciones transversales. Medición Posterior. Fuente: Autores

En la figura 25 se observan las aceleraciones del eje Y durante el retorno del tranvía en la ruta Parque Industrial-Control Sur. El espectro se mantiene dentro de los valores normales en relación con el límite de $3\ m/s^2$ establecido por la normativa, mostrando un rango de $0.5\ m/s^2$ a $2\ m/s^2$. Esto permite concluir que la circulación del tranvía es muy segura.

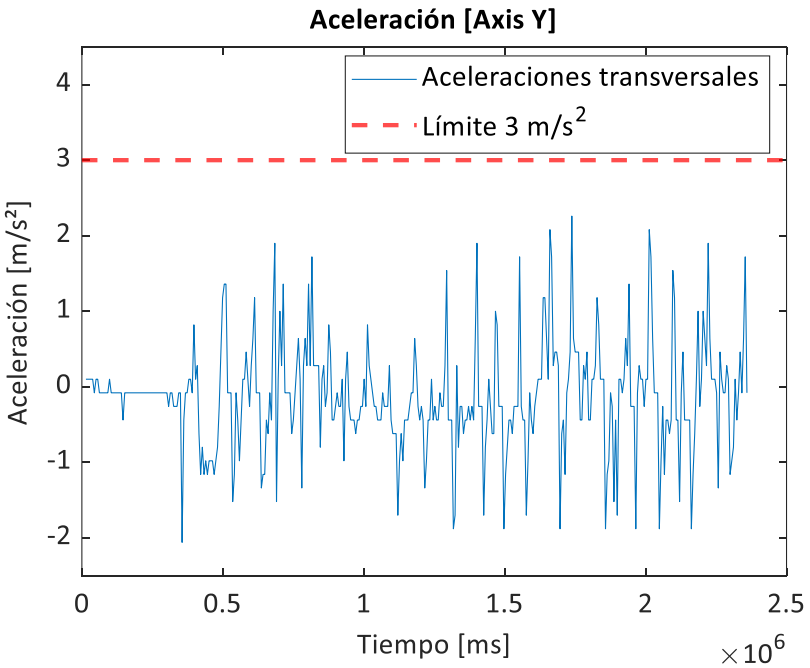


Figura 25 Aceleraciones transversales. Medición Posterior. Fuente: Autores

En la figura 26 se indica los resultados obtenidos mediante la barra de aceleraciones, donde verificamos que la aceleración transversal del tranvía se encuentra en una medida aceptada por la normativa, porque se encuentra entre los valores 0.5 a 2 m/s, siendo el límite máximo 3m/s. Además, se puede apreciar que las aceleraciones son el resultado de un diseño cuidadoso y una operación controlada para garantizar la seguridad de los pasajeros.

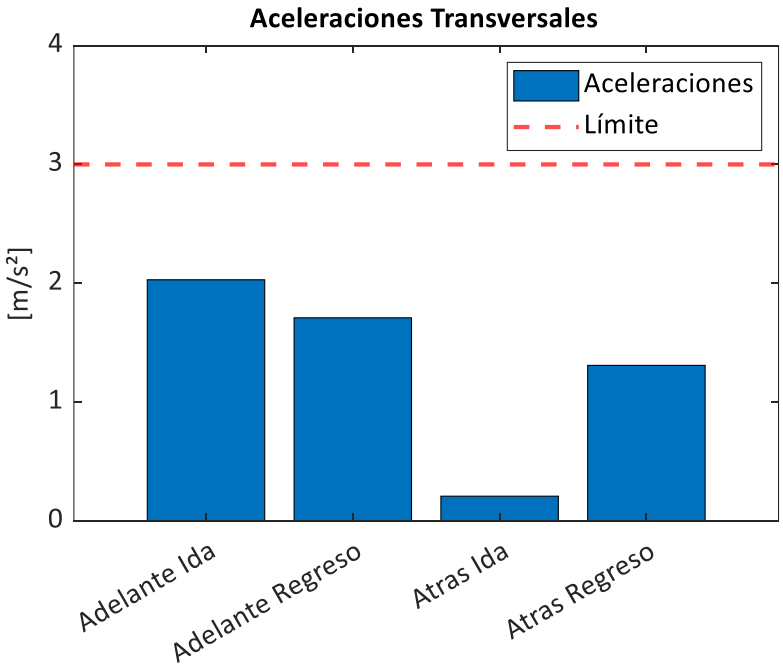


Figura 26 Aceleraciones transversales. Medición Posterior. Fuente: Autores

# 6. CONCLUSIONES

La seguridad del tranvía se analiza mediante la normativa UNE EN 14363, en este estudio realizado se visualiza dos tipos de metodología la medición normal y la simplificada. En el método normal se basa en el área de la dinámica mientras que en el método simplificado se analiza la seguridad y calidad de circulación, es así que la seguridad de un tranvía implica evaluar varios aspectos para garantizar que el transporte sea seguro tanto para pasajeros como peatones.

El análisis de seguridad en circulación del tranvía evidenció que los valores medidos cumplen con los rangos establecidos por la normativa. Las aceleraciones transversales se mantienen por debajo de $3\,m/s^2$, de igual manera las fuerzas transversales se mantienen por debajo de 186 kN con pasajeros y 136 kN sin pasajeros, lo que garantiza la satisfacción y seguridad de los usuarios. Además, se verificó que las condiciones de las vías en la ciudad son óptimas, con un diseño, uniformidad y mantenimiento adecuados que aseguran un funcionamiento seguro y confiable del sistema de transporte.

El análisis realizado al tranvía de la ciudad de Cuenca, mediante mediciones en ubicaciones específicas, determinó que la fuerza transversal del tranvía es de 60 kN cuando está vacío y de 80 kN con pasajeros, concluyendo que la seguridad en circulación en aceptable y esta por debajo de los límites de la normativa. Asimismo, se observó que las vibraciones y el ruido dentro del bogie son reducidos, lo cual mejora la experiencia del usuario. Además, la ergonomía de los asientos contribuye significativamente a la seguridad, especialmente en los tramos del trayecto que requieren mayores aceleraciones y fuerzas transversales. En conclusión, los resultados de este estudio confirman que el tranvía de la ciudad de Cuenca es un medio de transporte seguro y confiable.

# Referencias


Alcántara Vasconcellos, E. (2010). Análisis de la movilidad urbana. Espacio, medio ambiente y equidad. In *Bogotá, Colombia*. http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:An?lisis+de+la+movilidad+urbana+Espacio+,+medio+ambiente+y+equidad#0

Alstom. (2020). *Cuenca tramway came into operation* . *October*, 1999–2000. https://www.alstom.com/press-releases-news/2020/10/cuenca-tramway-came-operation

Benitez, R. A. (2020). *Estudio y propuesta de herramientas para el monitoreo de condición de cajas de grasa en bogies de locomotoras*. https://riunet.upv.es:443/handle/10251/134177

Botella, J., Rodríguez, M. & Novales, M. (2021). *Tranvitrén y tren-tranvía hacia una mejora del aprovechamiento de las infraestructuras ferroviarias*.

Cabrera, D. & Sánchez, L. (2022). *Análisis de los factores de accidentabilidad en la operación del Tranvía Cuatro Ríos de Cuenca* (pp. 27–28).

Diego Rodríguez-Maldonado, J. I., Carlos Ortega-Castro, J. I. & Elizabeth Parra-Suarez III, S. (2021). *Infraestructuras sustentables: Caso tranvía Cuenca Infraestructuras sustentables: Caso tranvía Cuenca Sustainable infrastructures: The case of the Cuenca Tramway Infra-estruturas sustentáveis: O caso do Eléctrico de Cuenca*. *7*, 1319–1333. http://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/index

Fernandez, O. (2012). *Modelización de la interacción vía-tranvía*. *April*.

Frematics. (2023). *Freematics – Freematics ONE+ Model A*. https://freematics.com/pages/products/freematics-one-plus/

Medina, R., Morales, D., Tapia, B., Criollo, D., Romero, J., Guamán, P. & Arévalo, P. (2016). Modelado del Tranvía Citadis-302 Implementado en la Ciudad de Cuenca Utilizando Matlab - Simulink. *Revista Técnica "Energía," 12*(1), 284–293. https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v12.n1.2016.53

Montenegro, M. (2019). Desarrollo de la Movilidad Urbana de Medellín, Colombia, un Ejemplo para Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 69–82. https://doi.org/10.18845/tm.v32i8.4565

Montesdeoca, R. & Vásconez, E. (2015). Análisis de los niveles de servicio mediante la implementación del tranvía en la ciudad de Cuenca. *Universidad Politécnica Salesiana*, 76. http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7642

Municipalidad. (2008). Material Rodante Tranvia Cuenca. *Anuario Del Ferrocarril*, 123–148.

Municipalidad, C. (2016). *Especificaciones técnicas Tranvia Cuenca*.

Norma UNE-EN 14363, E. (2019). *UNE-EN 14363:2017+A1 Aplicaciones ferroviarias: Ensayos y simulaciones para la aceptación de las características dinámicas de los vehículos ferroviarios.* https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0062688

Parra, S. (2019). Politicas publicas de sustentabilidad: caso de estudio Tranvia de Cuenca. *Universidad Católica de Cuenca*. https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/8578

Tranvía, C. (2024). *TranviaCuenca*. https://tranvia.cuenca.gob.ec/ruta-activa/#/ruta

Tzouras, P. G., Farah, H., Papadimitriou, E., van Oort, N. & Hagenzieker, M. (2020). Tram drivers' perceived safety and driving stress evaluation. A stated preference experiment. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, *7*, 100205. https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100205

Velásquez, C. (2015). *Espacio público y movilidad urbana Sistemas Integrados de Transporte Masivo (SITM)*.