

Development of a real-time geolocation and statistical processing prototype for detecting impacts and rollovers in automobiles

Desarrollo de un prototipo de geolocalización y procesamiento estadístico en tiempo real para la detección de impactos y volcaduras en automóviles

Sergio Daniel Rodríguez Suárez ^{*1}, Víktor Iván Rodríguez Abdalá ¹, Salvador Ibarra Delgado ¹, José Ricardo Gómez Rodríguez ¹, Cristian Eduardo Boyain y Goytia Luna ¹, and Fermín Marcelo Rubén Maciel Barboza ²

¹ Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica,
Posgrado en Ingeniería para la Innovación Tecnológica,
Carretera Guadalajara-Zacatecas, Campus Siglo XXI, La Escondida, Zacatecas, Zacatecas, México, 98160.

{sdanielrs,abdala,sibarra,jrgrodri,cristian.boyain}@uaz.edu.mx

² Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Carretera Colima-Coquimatlán, Coquimatlán, Colima, México, 28400.
fermin_maciel@uclm.mx

Abstract

Impact and rollover detection systems are essential for an immediate response to accidents, but not all vehicles incorporate them. This work presents a prototype based on descriptive statistics programmed in a microcontroller with sensors for geolocation and event detection. Laboratory tests were carried out under normal and impact conditions, which allowed to distinguish events. The results demonstrate that the system identifies them, offering a viable solution.

Keywords— Vehicle impacts, vehicle rollovers, descriptive statistics, embedded systems

Resumen

Los sistemas de detección de impactos y volcaduras son esenciales para una respuesta inmediata ante accidentes, pero no todos los vehículos los incorporan, este trabajo presenta un prototipo basado en estadística descriptiva programada en un microcontrolador con sensores de geolocalización y detección de eventos, se realizaron pruebas de laboratorio en condiciones normales y de impacto, lo que permitió distinguir los eventos, los resultados demuestran que el sistema los identifica, ofreciendo una solución viable.

Palabras clave— Impactos vehiculares, volcaduras vehiculares, estadística descriptiva, sistemas embebidos

I. Introducción

El incremento significativo del parque vehicular y el uso intensivo de los vehículos en las organizaciones, tanto en funciones administrativas como en actividades operativas, ha dado lugar también a tener

un mayor número de incidentes automovilísticos, desde fallas mecánicas, hasta accidentes durante los recorridos, los cuales deben ser atendidos de manera inmediata. En virtud de que la atención a los afectados es tardía, hace que las organizaciones realicen costosas erogaciones para atender las consecuencias, además de verse afectadas las funciones de la misma [1].

* Autor de correspondencia

En estudios sobre accidentes automovilísticos [2, 3, 4] se ha evidenciado que de 2010 a 2019, el número de personas fallecidas y heridas graves en accidentes ha disminuido, observándose que esto se atribuye a una atención más rápida y a las mejoras en los sistemas de seguridad vehicular con que están dotados. Para responder rápidamente a un incidente, se debe conocer la ubicación del vehículo, así como el estado en que se encuentra, para lo cual, estos sistemas proporcionan dicha información, siendo cada vez más comunes en los vehículos modernos, sin embargo, no todos los vehículos se encuentran equipados con ellos, siendo necesario equipar a los que no los tienen.

Los impactos vehiculares son aquellos eventos dinámicos resultantes de la colisión de un automóvil, con un objeto fijo u otro vehículo en movimiento, caracterizado por cambios abruptos de aceleración o desaceleración. Para una volcadura, el vehículo es considerado un cuerpo sólido con un marco de referencia, empleándose el marco de referencia vehicular ISO 8855 [5], que define un eje longitudinal X , un eje lateral Y , así como un eje vertical Z , como se muestra en la Fig. 1. Se considera una volcadura cuando el giro del vehículo en alguno de los ejes X o Y sobrepasa un umbral.

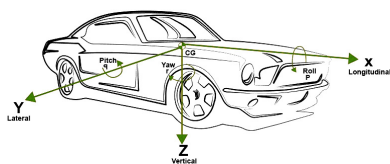


Figura 1: Vehículo sobre marco de referencia ISO 8855

La detección de impactos y volcaduras vehiculares es fundamental para agilizar la respuesta ante accidentes, los sistemas embebidos, que integran sensores inerciales y algoritmos en microcontroladores, ofrecen soluciones compactas y prácticas para esta tarea, además, su demanda crece constantemente debido a la necesidad de mejorar la seguridad.

Con la finalidad de integrar en un vehículo, que carece del sistema de detección, un sistema embebido de detección, que además no interfiera con los sistemas que ya posee, se diseñó un dispositivo embebido, de bajo costo, que detecta eventos de impacto y volcadura, mediante el análisis estadístico en tiempo real del comportamiento dinámico del vehículo, este se diferencia de los sistemas existentes al integrar en un solo dispositivo el procesamiento y el sensado.

Este artículo se estructura de la siguiente forma: la Sección II presenta el panorama de la investigación, la Sección III describe el desarrollo de un nodo de detección, la Sección IV muestra el modelo del sistema y finalmente las secciones V y VI exponen los resultados obtenidos y las conclusiones.

II. Panorama de investigación

De acuerdo con [6], la fabricación de automóviles en México se ha incrementado y por ende la necesidad de contar con dispositivos tecnológicos para mejorar la seguridad de los mismos [7], por lo cual, gracias a las capacidades de los sensores actuales y a un mayor procesamiento computacional en dispositivos de menor tamaño, se puede contar con sistemas embebidos para obtener la ubicación y detectar el comportamiento dinámico del vehículo.

La ubicación de los vehículos es importante para las organizaciones, la manera de realizarlo es diverso y se apoya de los avances tecnológicos existentes [8], entre los que se pueden observar: la Identificación por Radio Frecuencia (RFID, siglas en inglés de Radio Frequency Identification), la ubicación mediante Redes Móviles Celulares y el uso del Sistema de Navegación Global por Satélite (GNSS, siglas en inglés de Global Navigation Satellite System), siendo el sistema GNSS el de mayor tendencia.

La detección de impactos y volcaduras en automóviles es un aspecto de seguridad reconocido como un tema relevante [9], existiendo en la actualidad directivas y objetivos que las empresas armadoras de vehículos deben cubrir y los países deben supervisar que se adopten, a fin de apegarse a los objetivos mundiales para incrementar la seguridad en los automóviles y de esta manera disminuir los daños que las personas sufren en los accidentes [7].

En [10, 11, 12, 13, 14] se estudia el uso de GNSS para determinar la ubicación de un vehículo y en [15, 16, 17] se han estudiado los sensores inerciales para obtener el comportamiento de la dinámica del vehículo para determinar eventos como impactos y vuelcos.

A partir del análisis de las fuentes consultadas y el criterio de costo-beneficio, se seleccionó el microcontrolador ESP32, junto con el receptor satelital GPS NEO-6M, la unidad de medición inercial MPU-9250, además de un algoritmo de detección basado en estadística descriptiva, con los cuales es posible construir un nodo para determinar la ubicación de un vehículo y detectar eventos como impactos y volcaduras [18].

III. Diseño del Nodo de detección

La arquitectura propuesta para el nodo se basa en un microcontrolador ESP32, el receptor GPS NEO-6M y el sensor inercial MPU-9250. El ESP32 es el núcleo de procesamiento en un Sistema en Chip (SoC, siglas en inglés de System on a Chip) que incorpora un microprocesador Tensilica Xtensa LX6 de dos núcleos, es un dispositivo programable en múltiples plataformas de desarrollo, una de las presentaciones más utilizada es el ESP32 Devkit [19], la selección de este dispositivo destaca frente a

otros microcontroladores por su equilibrio entre potencia, conectividad y bajo costo.

El receptor satelital GPS NEO-6M es adoptado por su manejo sencillo y funcionalidad adecuada, incorpora un chip de posicionamiento u-blox 6 de 50 canales y antena, proporciona tramas NMEA (siglas en inglés de National Marine Electronics Association) con los datos de ubicación, se conecta al microcontrolador por el puerto UART.

El sensor inercial MPU-9250 es un sensor compuesto por un acelerómetro y giroscopio de 3 ejes, útil para aplicaciones de navegación inercial y medición de comportamiento dinámico, se conecta al microcontrolador por el puerto I2C [20].

El desarrollo del nodo comprende el obtener las coordenadas de ubicación en latitud y longitud, así como medir la aceleración lineal y velocidad angular en los ejes X , Y y Z , datos con los cuales se realiza el análisis estadístico para determinar los eventos de impacto y volcadura. En la Fig. 2 se muestra la interconexión de los dispositivos.

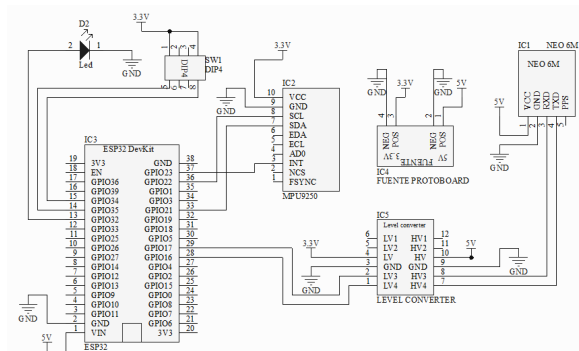


Figura 2: Diagrama de conexión

La programación del nodo se realiza utilizando FreeRTOS, el cual es un sistema operativo de tiempo real diseñado para sistemas embebidos, su gestión de procesos permite la ejecución concurrente de tareas, además de la comunicación entre procesos y manejo de recursos.

Para efectuar las pruebas y mediciones se utilizó un vehículo a escala 1:12, de radio control, con suspensión y control de dirección, como el que se muestra en la Fig. 3, con el cual, bajo condiciones controladas de laboratorio, se recrearon eventos de impacto y volcadura para observar el comportamiento del nodo, así como el desempeño de los algoritmos implementados.

En la Fig. 4 se describe el proceso general propuesto para llevar a cabo el procesamiento y análisis de los datos obtenidos de los sensores.



Figura 3: RC H1 Hurtle, vehículo de pruebas y simulación

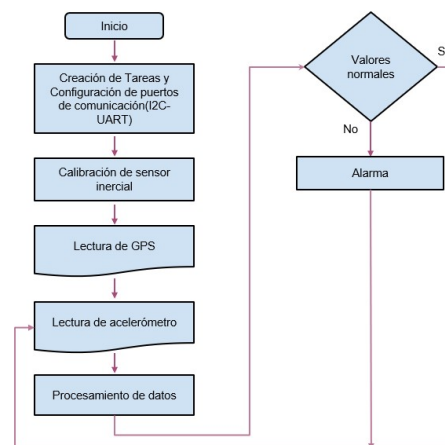


Figura 4: Diagrama de flujo para configuración y detección

IV. Modelo de sistema

IV.1. Detección de impactos

La duración de un impacto vehicular, esto es, desde que hace contacto con el objeto, hasta que se detiene por completo, se denomina Pulso de colisión, el cual varía de acuerdo a factores como la velocidad inicial, la masa del vehículo y el tipo de objeto contra el que se impacta [21], por lo cual no hay un valor fijo. Tomando en cuenta [22], donde se muestran diversos experimentos de impacto con varios tipos de vehículos, en este estudio se considera que el impacto tiene una duración promedio de 120 ms, y que durante este intervalo de tiempo el vehículo sufre cambios bruscos de aceleración, por lo que para detectar el impacto, se debe de ajustar la tasa de muestreo del sensor.

Configurando la tasa de muestreo del sensor inercial MPU9250 a 1,000 Hz, este proporciona $1,000 \frac{\text{muestras}}{\text{seg}}$, debido que estas muestras son datos crudos se aplica un filtro de promedio móvil para suavizar las fluctuaciones y el ruido, reduciéndose a $100 \frac{\text{muestras}}{\text{seg}}$, con este número de muestras se dispone de las 12 muestras que representan los 120 ms del pulso de colisión, de esta manera, con el fin de realizar la detección de cambios abruptos de aceleración, el algoritmo programado toma vectores de 10 muestras (100 ms) para analizarlos estadísticamente mediante la desviación estándar y el rango.

La primera etapa del proceso de análisis consistió en identificar, mediante la experimentación, un dominio de valores de aceleración en condiciones normales (sin impactos), con el fin de aplicarlo para establecer un umbral a partir del cual se pueda diferenciar una condición normal de una anormal (con impacto). Para este proceso se obtuvo una muestra de valores de la magnitud de aceleración, la cual se obtiene con la Ec. (1).

$$|a| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1)$$

En la Fig. 5 se muestra el comportamiento de la magnitud de la aceleración durante un experimento en condiciones normales.

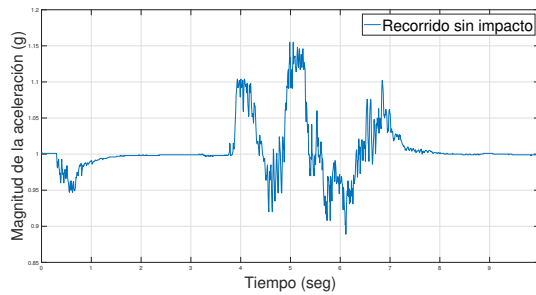


Figura 5: Comportamiento de la magnitud de la aceleración en experimento sin impacto

Posteriormente con los datos de magnitud de aceleración se realizó el siguiente proceso de análisis:

- 1) se forma un vector de 10 valores de magnitud de aceleración $x_1, x_2, \dots, x_{10}$,
- 2) se estima la media de este conjunto (Ec. (2)),

$$\bar{x} = \frac{1}{10}(x_1 + x_2 + \dots + x_{10}) \quad (2)$$

- 3) se estima la varianza (Ec. (3)),

$$\sigma^2 = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2 \quad (3)$$

- 4) se estima la desviación estándar (Ec. (4)),

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

- 5) se estima el máximo (Ec. (5)) y mínimo (Ec. (6)) del vector para obtener el rango (Ec. (7)),

$$\max(x_1, x_2, \dots, x_{10}) \quad (5)$$

$$\min(x_1, x_2, \dots, x_{10}) \quad (6)$$

$$\text{Rango} = \max(x_1, x_2, \dots, x_{10}) - \min(x_1, x_2, \dots, x_{10}) \quad (7)$$

Los datos obtenidos fueron analizados mediante la Ec. (8), para observar la densidad de probabilidad normal de los valores calculados de desviación estándar y de rango, conociendo de esta función, que el 99.73 % de probabilidad de aparición de los valores se concentra en el intervalo determinado por $\pm 3\sigma$, llamado intervalo de confianza, se estableció que los valores fuera de este intervalo se pueden interpretar como condiciones de anomalía.

$$f_{|a|}(a) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(a-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

Efectuándose experimentos en condiciones normales, se calculó la desviación estándar en el intervalo de 0.082 a 0.108, como se ve en la Fig. 6, mientras que para el Rango, en el intervalo de 0 a 0.10, como se observa en la Fig. 7.



Figura 6: Análisis de la desviación estándar

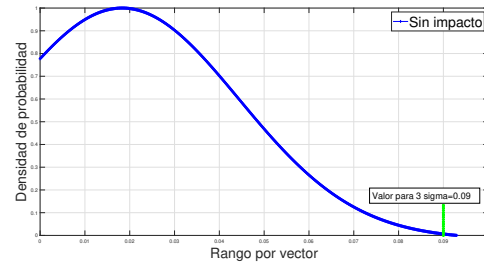


Figura 7: Análisis de rango

Los valores extremos del intervalo de confianza determinados en los experimentos anteriores son los valores de umbral programados en el algoritmo de detección.

Cuando se presentan condiciones de impacto, el comportamiento de la magnitud de la aceleración describe características singulares, las cuales se pueden observar gráficamente en la Fig. 8, donde se puede visualizar un cambio abrupto en los valores de la aceleración.

Aplicando el mismo proceso de análisis hecho para los datos en condiciones sin impacto, se obtienen los valores de desviación estándar y rango fuera de los intervalos determinados por 3σ para condiciones normales, observándose gráficamente estas variaciones en las mediciones

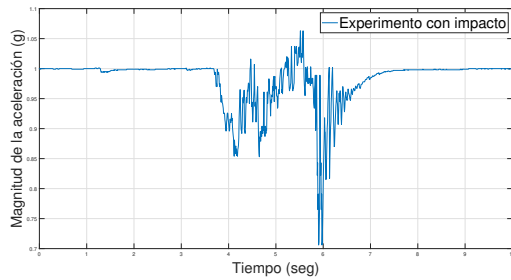


Figura 8: Comportamiento de la magnitud de aceleración en eventos sin y con impacto

sin impacto y con impacto en las gráficas de la Fig. 9 para la desviación estándar y en la Fig. 10 para el rango.

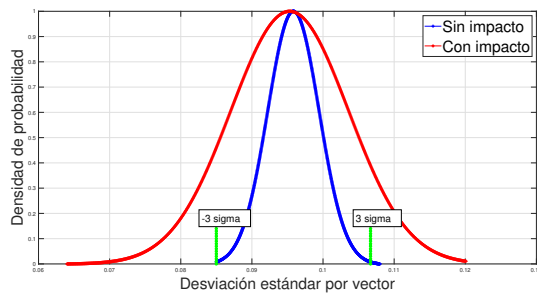


Figura 9: Comparación de la desviación estándar sin y con impacto

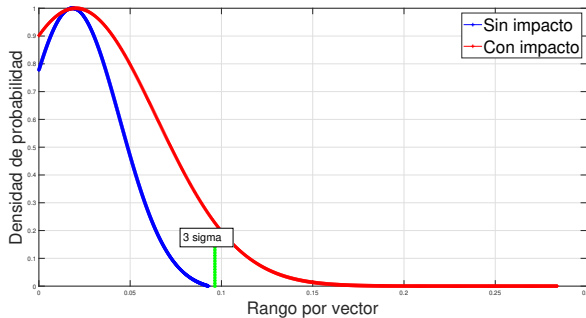


Figura 10: Comparación de rango sin y con impacto

IV.2. La detección de volcaduras

Para considerar la inclinación de riesgo de volcadura o a partir de la cual el vehículo se puede considerar volcado, se calcula el ángulo máximo de inclinación lateral (Θ_{max}) de acuerdo al tipo de vehículo, el cálculo se basa en la Ec. (9) [23], que indica un valor de inclinación de riesgo basado en la distancia entre llantas del mismo eje del vehículo y la altura del centro de masa. Para esta investigación se consideró un camión de carga unitario

de tipo C3 (tres ejes, delantero y 2 traseros), de acuerdo a la norma mexicana NOM-012-SCT-2-2017, para el cual la distancia entre llantas del mismo eje es 2 metros y la altura del centro de masa es 1.5 metros.

Los valores de los ángulos son aproximados debido a que el peso y dimensiones de la carga pueden variar.

$$\Theta_{max} = \arctan \frac{T}{2h} = \arctan \frac{2m}{2(1.5m)} = 33^\circ \quad (9)$$

Donde:

- T es la distancia entre ruedas del mismo eje,
- h es la altura del centro de masa del vehículo.

De esta manera cuando los ángulos de inclinación pitch y roll (ver Fig. 1) son superiores a ± 33 grados se considera que es una volcadura, este puede no ser un valor fijo, depende del vehículo, sin embargo el valor calculado en Ec. (9) se pueden tomar como umbral, programado en el algoritmo y a partir del cual el nodo genere una alerta.

Para medir los ángulos de inclinación, el nodo fue sometido a inclinaciones frontal y lateral, observándose en la Fig. 11 los valores de inclinación frontal y en la Fig. 12 los valores de inclinación lateral, hasta superar el umbral.

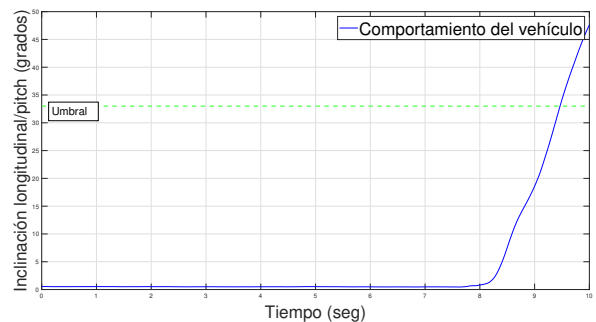


Figura 11: Inclinación longitudinal (Pitch)

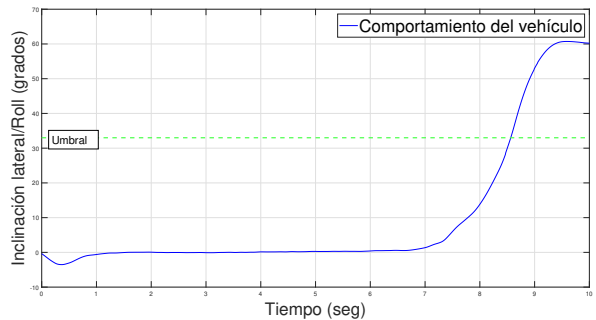


Figura 12: Inclinación lateral (Roll)

V. Resultados

Para la presentación de los resultados, se consideraron 5 experimentos de prueba en condiciones normales y 5 experimentos con impacto.

V.1. Experimentos en condiciones normales

Se realizó la gráfica de las aceleraciones para identificar su respuesta, observándose que coinciden en el comportamiento como se muestran en la Fig. 13.

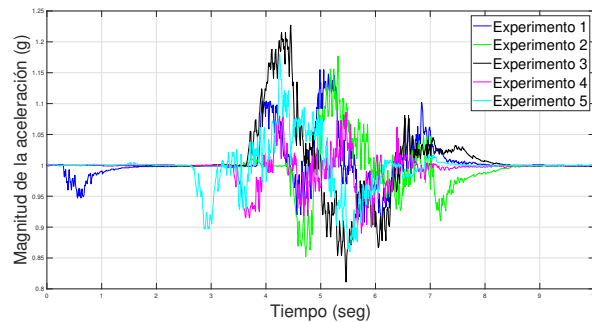


Figura 13: Aceleraciones en experimentos sin impacto

Posteriormente se procesaron los datos para obtener la desviación estándar y el rango de vectores de 10 muestras, graficándose los resultados con los umbrales encontrados para los valores en condiciones normales, observándose que la mayoría de las lecturas se encuentran dentro del intervalo $\pm 3\sigma$, como se muestra en la Fig. 14 para la desviación estándar y en la Fig. 15 para el rango.

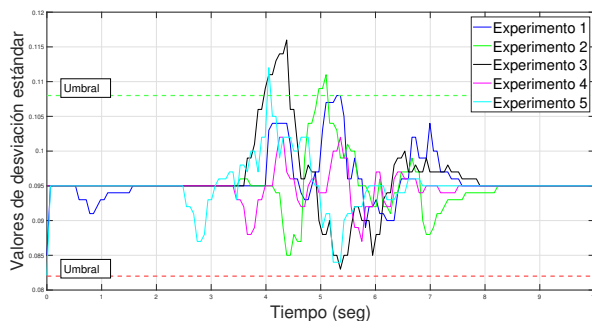


Figura 14: Desviación estándar en experimentos sin impacto

V.2. Experimentos en condiciones de impacto

Aplicando el mismo procedimiento se realizaron los experimentos con impacto, en la Fig. 16 se muestra el comportamiento de la aceleración, como se puede observar en las gráficas obtenidas se percibe un comportamiento diferente a los que se obtuvieron sin impactos,

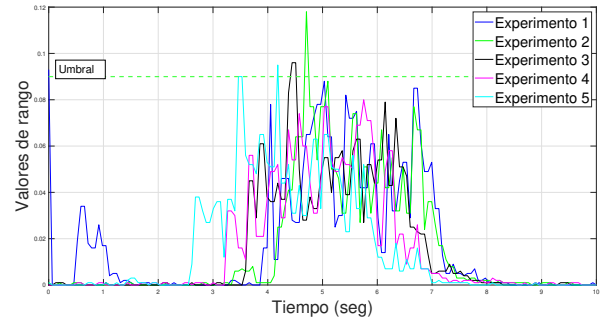


Figura 15: Rango en experimentos sin impacto

así mismo es posible advertir un comportamiento en el que se presentan cambios abruptos de aceleración con un cierto patrón, donde se deduce que el vehículo sufrió una desaceleración abrupta causada por el impacto.

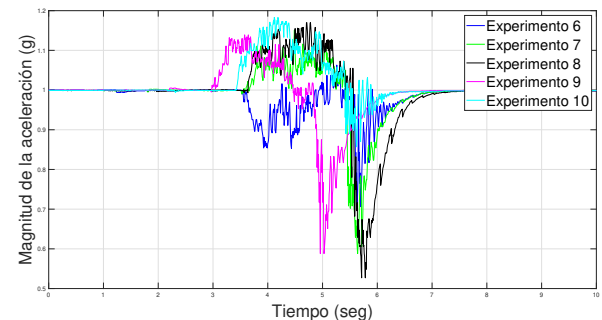


Figura 16: Aceleraciones en experimentos con impacto

En la Fig. 17 se muestra la gráfica de la desviación estándar de los experimentos, observándose que superan con mayor frecuencia los umbrales de condiciones normales.

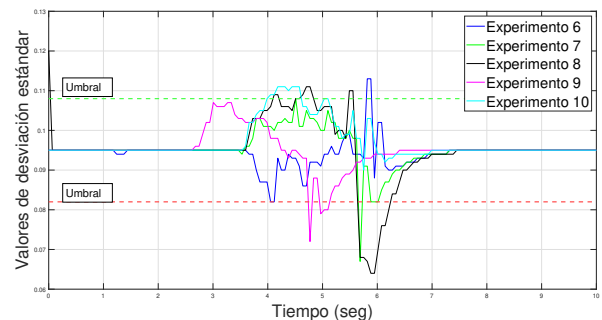


Figura 17: Desviación estándar en experimentos con impacto

En la Fig. 18, se grafican los valores de rango, observándose como las magnitudes pueden superar el umbral para condiciones normales.

Los valores de umbral para impacto y volcadura, deter-

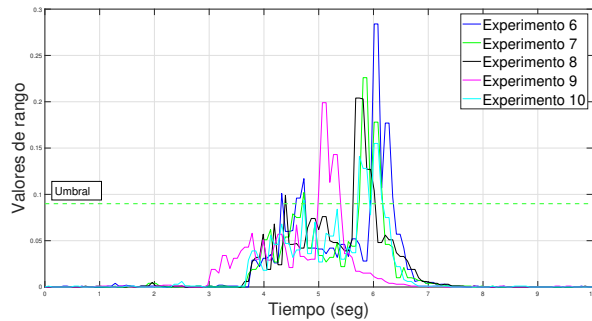


Figura 18: Rango en experimentos con impacto

minados en el análisis, fueron programados en el algoritmo del nodo, son valores fijos, y solo se deben actualizar si se cambia el tipo de vehículo, realizando el análisis y obtención de los nuevos umbrales se forma similar.

VI. Conclusiones

Durante el desarrollo del prototipo para la identificación de impactos y volcaduras, mediante análisis estadístico, se midió en tiempo real las aceleraciones que experimenta un vehículo durante su desplazamiento, los experimentos realizados mostraron que en condiciones normales de operación, –es decir, sin cambios bruscos de aceleración–, el comportamiento de las aceleraciones en los tres ejes (X , Y y Z) varía constantemente dentro de un intervalo, las variaciones que sufren durante el movimiento tienen dos características principales, la primera es que los cambios de magnitud son suaves en el tiempo y la segunda, que la magnitud se mantiene dentro de un intervalo determinado de valores la mayor parte del tiempo.

Al realizar los experimentos con condiciones de impacto, estos salen de los umbrales, por lo cual, para determinar el evento de siniestro se realiza un proceso de decisión basado en los siguientes aspectos: que exista un valor de desviación estándar fuera de los umbrales, que exista un valor de rango superior al umbral y que ocurran en el mismo vector de mediciones analizadas.

Los experimentos con impacto se realizaron utilizando un vehículo a escala, siendo necesario adecuar los valores de umbral en el caso de que sea factible instalar el nodo en un vehículo real, realizando el mismo proceso de análisis a fin de determinar los umbrales específicos para el vehículo utilizado.

Como trabajo futuro es la incorporación de un canal de radiocomunicación para la transmisión de la señal de alerta, de esta manera no solo se contemplaría para un uso en vehículos oficiales, se puede proyectar para uso en flotas de empresas o inclusive en autos particulares, en virtud que no es un sistema invasivo con los sistemas de

los vehículos y puede adaptarse como un accesorio, sin que afecte de ninguna manera a la operación y seguridad de vehículo.

Referencias

- [1] P. Huang et al. «Effect of emergency medical service response time on fatality risk of freeway crashes: Bayesian random parameters spatial logistic approach». En: *Frontiers in Public Health* 12 (2024), pág. 1453788. DOI: 10.3389/fpubh.2024.1453788.
- [2] Fuentes José de Jesús Galindo. «Perfil epidemiológico de los accidentes de tránsito en México, 2010-2019». En: *Horiz. sanitario [online]* 22.1 (mar. de 2023), págs. 45-52.
- [3] INEGI. *Accidentes de Tránsito Terrestre en Zonas Urbanas y Suburbanas (ATUS) 2020-2023*. <https://www.inegi.org.mx/programas/atus/>. 2023.
- [4] SATECH. *¿Cómo impacta un accidente vehicular en tu negocio?* <https://satech.mx/como-impacta-un-accidente-vehicular-en-tu-negocio/>. 2025.
- [5] de la Peña Nelson Arzola y Torres César Andrés Castro. «Análisis del comportamiento dinámico de una suspensión de vehículo independiente de doble horquilla.» En: *LogosCyT [online]* 11.2 (mar. de 2019), págs. 10-33.
- [6] Montoya Godínez et al. «Análisis del mercado interno y externo del sector automotriz en México». En: *Revista cartográfica* 106 (2020).
- [7] Wallbank Caroline et al. «El potencial de los estándares de seguridad vehicular para evitar muertes y lesiones en Argentina, Brasil, Chile y México: actualización 2018». En: *TRL The future of transport* (mar. de 2019).
- [8] Chindhe Gaurav et al. «A Survey on Various Location Tracking Systems». En: *International Research Journal of Engineering and Technology* 5.12 (dic. de 2018), págs. 671-675.
- [9] Noushin Behboudi, Sobhan Moosavi y Rajiv Ramnath. «Recent Advances in Traffic Accident Analysis and Prediction: A Comprehensive Review of Machine Learning Techniques». En: *arXiv preprint arXiv:2406.13968* (2024).
- [10] Andrew R Robinson, Michael Esty y Charles E Tilburg. *A Compact GPS Surface Drifter with LoRa Telemetry and Self-Contained Tracking System*. 2021.

- [11] Alejandro González, José Luis Olazagoitia y Jordi Vinolas. «A low-cost data acquisition system for automobile dynamics applications». En: *Sensors (Switzerland)* 18 (2 feb. de 2018). ISSN: 14248220. DOI: 10.3390/s18020366.
- [12] Norhafizah et al. «An open source LoRa based vehicle tracking system». En: *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics* 7 (2 jun. de 2019), págs. 221-228. ISSN: 20893272. DOI: 10.11591/ijeel.v7i2.1174.
- [13] Angie Paola y Marriaga Barroso. *Device design for vehicle tracking with Lora-IoT module oriented to public transport systems in smart cities*. 2021.
- [14] Alejandro Saniger et al. «Mobile data for studying public space, and trips in Mexico City: a study case of six suburban zones». En: *Data & Policy* (2024). URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/data-and-policy/article/mobile-data-for-studying-public-space-and-trips-in-mexico-city-a-study-case-of-six-suburban-zones/C913EF8166D0183E517349BF6D15EC24>.
- [15] F. Garcia et al. «Sensor Fusion Methodology for Vehicle Detection». En: *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 9.1 (mayo de 2017). doi: 10.1109/MITS.2016.2620398., págs. 123-133.
- [16] Ying Shuh Jing, Dubey Rajiv y Sundarrao Stephen. *Gyroscope for Robot to Sense the Balance*. Dic. de 2018. DOI: 10.35840/2631-5106/4112. URL: <https://doi.org/10.35840/2631-5106/4112>.
- [17] Mazhar Malik Kamal et al. «A Novel Roll and Pitch Estimation Approach for a Ground Vehicle Stability Improvement Using a Low Cost IMU». En: *Sensors* 20.2 (2020). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s20020340. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/2/340>.
- [18] Gabriel Pérez Campoy. «Estudio de la viabilidad de dispositivos IMU low-cost para usos de navegación y rastreo con Arduino/ESP32, y construcción de su prototipo». Tesis de mtría. Universitat Politècnica de Catalunya, oct. de 2023. URL: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/396584>.
- [19] Zerynth. *DOIT ESP32 DevKit v1*. Zerynth. 2017. URL: https://olddocs.zerynth.com/r2.3.3/official/board.zerynth.doit%5C_esp32/docs/index.html.
- [20] InvenSense. *Register Map and Descriptions MPU 9250*. 1.6. InvenSense. Jul. de 2015.
- [21] Joseph Olberding, Karla Petroskey y Tara Leipold. *Coefficient of Restitution and Collision Pulse Duration in Low-Speed Vehicle-to-Barrier Impacts*. Inf. téc. SAE Technical Paper 2023-01-0624. SAE International, 2023. DOI: 10.4271/2023-01-0624.
- [22] Tso-Liang Teng et al. «Application of Crash Pulse on the Car Crashworthiness Design». En: *Advances in Mechanical Engineering* 9.9 (2017), págs. 1-11. DOI: 10.1177/1687814017700096.
- [23] Thomas D. Gillespie. *Fundamentals of Vehicle Dynamics, Revised Edition*. Warrendale, PA: SAE International, 2021. ISBN: 978-1-4686-0176-3.