

Vibraciones generadas por tráfico: trabajo experimental en Montevideo, Uruguay

Traffic-induced vibrations: experimental work in Montevideo, Uruguay

Vibrações geradas pelo tráfego: trabalho experimental em Montevideu, Uruguai

Julian David Ortiz Umaña, Alice Elizabeth González

Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

Resumen: Este artículo tiene como finalidad ser un avance para la tesis de maestría en ingeniería ambiental, que está enfocada en los efectos en las personas y estructuras a causa de las vibraciones por tráfico ocasionados específicamente en buses de Montevideo-Uruguay. Se realizaron mediciones en varias calles de Montevideo con el fin de entender y establecer una base para el desarrollo de la tesis. En este documento se presentan algunos de los resultados encontrados durante el procesamiento y análisis de las mediciones, se hace especial énfasis en la gama de frecuencias dominantes en un rango de (1 a 100 Hz) como lo establecen en general las normas técnicas y normativas. A su vez, se analizan factores como la masa de la fuente y la distancia desde la fuente al receptor. También se evalúa y compara las vibraciones generadas por un bus eléctrico y un bus de combustión interna, utilizando como herramienta de análisis la máxima velocidad de vibración instantánea.

Palabras claves: Vibraciones, tráfico vehicular, buses

Abstract: This article aims to serve as a progress report for a master's thesis in environmental engineering, which focuses on the effects on people and structures caused by vibrations from traffic, specifically from buses in Montevideo, Uruguay. Measurements were conducted on several streets in Montevideo to understand and establish a foundation for the thesis development. This document presents some of the results found during the processing and analysis of the measurements, with a particular emphasis on the range of dominant frequencies between 1 and 100 Hz, as generally established by technical standards and regulations. Additionally, factors such as the mass of the source and the distance from the source to the receiver are analyzed. The vibrations generated by an electric bus and an internal combustion bus are also evaluated and compared, using the maximum instantaneous vibration velocity as an analytical tool.

Keywords: Vibrations, vehicular traffic, buses

Resumo: Este artigo tem como objetivo ser um avanço para a dissertação de mestrado em engenharia ambiental, que está focada nos efeitos em pessoas e estruturas causados pelas vibrações do tráfego, especificamente de ônibus em Montevideu, Uruguai. Foram realizadas medições em várias ruas de Montevideu com o objetivo de entender e estabelecer uma base para o desenvolvimento da dissertação. Este documento apresenta alguns dos resultados encontrados durante o processamento e análise das medições, com ênfase especial na faixa de frequências dominantes entre 1 e 100 Hz, conforme estabelecido geralmente pelas normas técnicas e regulamentações. Além disso, são analisados fatores como a massa da fonte e a distância da fonte ao receptor. As vibrações geradas por um ônibus elétrico e por um ônibus de combustão interna também são avaliadas e comparadas, utilizando a velocidade máxima instantânea de vibração como ferramenta de análise.

Palavras-chave: Vibrações, tráfego veicular, ônibus

1. INTRODUCCIÓN

El estrés y la incomodidad son sensaciones indeseables que, dependiendo de la frecuencia con la que se siente y el tiempo expuesto a esa sensación, pueden llevar a afectaciones más graves en la salud. Similar a los sonidos molestos, las vibraciones superiores a (RMS) aceleración¹ $0,8 \frac{m}{s^2}$ pueden causar incomodidad. En su momento, Watts (1990) realizó encuestas a una población local sobre las vibraciones de tráfico y arrojó que la mayoría de los residentes les molestaba las

vibraciones porque pensaban que podrían dañar sus propiedades.

Bronkhorst et al (2021), analizaron los datos de vibración de 326 edificios durante 5 años, en la provincia de Groningen, Países Bajos, en el encontraron que, para los edificios con un gran número de superaciones de umbrales, una de las fuentes más importantes parece ser el tráfico.

En Uruguay, no hay muchos estudios relacionados con las vibraciones de tráfico, y la normativa al respecto está en construcción. Por ello, este artículo tiene como finalidad servir como guía experimental que

¹ ISO 2631-1 (1997). Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole - body vibration

complemente el conocimiento sobre las vibraciones generadas por el tráfico vehicular.

1.1. Vibraciones

Las vibraciones de tráfico se generan cuando entra en contacto el pavimento y el neumático del vehículo. A partir de esta interacción bidireccional y mutuamente sostenido. Se generan unas ondas que están influenciada por la distancia desde el receptor, la topografía entre la fuente y el receptor y otras características geotécnicas del suelo (Astrauskas & Grubliauskas, 2017). Siendo las ondas Rayleigh la forma más importante para la propagación de la vibración inducida por el tráfico vehicular (Chilton et al., 1975), los vehículos más pesados son los que generan más vibración, y esta puede ser aún mayor si las condiciones del pavimento no son las mejores. Dada la cantidad y la frecuencia de uso, los buses serán el foco de este artículo.

Las vibraciones que se generan producto de esta interacción pueden atenuarse o amplificarse dependiendo de las condiciones del pavimento, la masa, la velocidad y aceleración del vehículo, (Watts,

1987; Zarei et al., 2022) y en menor medida el tipo de pavimento (Czech, 2016).

Los neumáticos son los puntos de contacto entre todo el vehículo y el pavimento, y es sobre ellos que actúan una cierta cantidad de fuerzas estáticas y dinámicas que influyen en la generación de la vibración por tráfico.

La fuerza vertical aplicada a la superficie de la carretera por cada neumático se puede separar en dos componentes: una es la componente de la carga estática, debida al peso, y la otra es una componente fluctuante conocida como la fuerza dinámica de la rueda.

La carga estática depende del propio peso del vehículo, siendo este valor constante, de la geometría y de las características de distribución de la carga estática sobre el sistema de suspensión (Cebon D., 1989).

Por otro lado, la componente dinámica es la fuerza variable que se debe a las condiciones de operación del vehículo y las características de la carretera. Existen tres tipos básicos de fuerzas dinámicas del neumático que actúan simultáneamente sobre la superficie del pavimento; en la Figura 1-1 se observa el esquema de los elementos en cuestión.

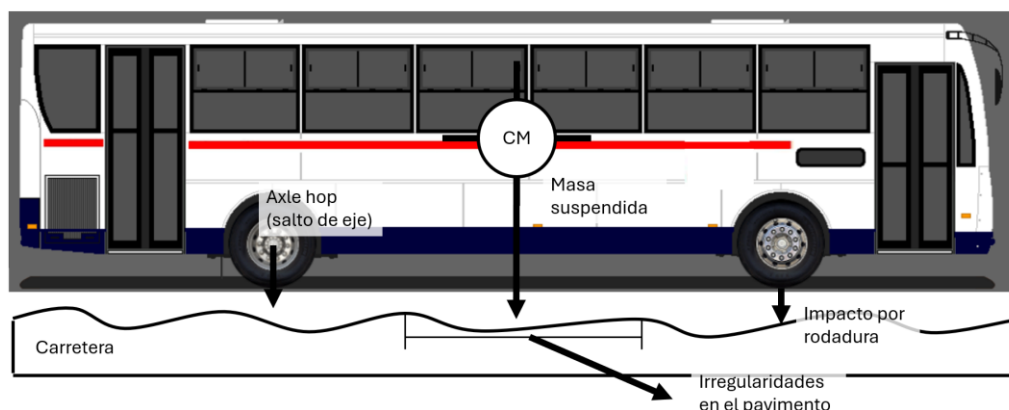


Figura 1-1. Fuerzas dinámicas que influyen en la generación de vibraciones. Fuente ([busuruguayos: agosto 2013 \(busuruguayos.blogspot.com\)](http://busuruguayos.blogspot.com))

Las fuerzas en cuestión son las fuerzas de la masa suspendida, fuerzas de impacto de rodadura y la fuerza de la masa no suspendida. A continuación, se describe cada una de las fuerzas:

Fuerzas generadas por el impacto de rodadura:

Estas se producen cuando los bloques de la banda de rodadura² de los neumáticos golpean el pavimento, causando vibraciones radiales (Bernhard & Wayson, 2005). Las irregularidades de la carretera y el peso del

vehículo acentúan estas vibraciones y añaden deformaciones en el neumático, propagándolas por toda su superficie (Ohiduzzaman et al., 2016; Rodríguez, 2023). La frecuencia de estas fuerzas suele estar por debajo de los 1000 Hz (Nilsson et al., 1980) y son afectadas principalmente por la macrotextura de la superficie y el dibujo de la banda de rodadura (Li, 2018; Dare et al., 2014).

² Las bandas de rodadura hacen referencia a la parte del neumático que entra en contacto con el pavimento.

Fuerzas de impacto generadas por la masa no suspendida del vehículo: Estos elementos incluyen ejes, ruedas y neumáticos, ubicados debajo del sistema de suspensión. Aunque no son la componente dominante de la carga dinámica, son la principal causa de vibraciones del suelo, con frecuencias generalmente en el rango de 10 a 15 Hz (Cebon, 1986; Al-Hunaidi et al.,1996).

Fuerzas de impacto generadas por la masa suspendida del vehículo: Estas fuerzas están asociadas a la parte suspendida del vehículo, que se eleva y desciende con el movimiento. Las suspensiones más comunes son la de ballesta y la neumática, cada una con sus propias características y efectos sobre la dinámica del vehículo. La suspensión de ballesta es rígida, mientras que la neumática proporciona mayor comodidad. Los niveles de vibración de la suspensión neumática son más bajos que los de la suspensión con ballestas. Las frecuencias predominantes para vehículos pesados con suspensión neumática están cercanas a 1,5 o 2 Hz, mientras que los sistemas de ballestas, de 4 Hz a 5 Hz (Singh et al., 2006; Martínez et al., 2007; Park et al., 2020).

1.2. Buses

Montevideo, la capital de Uruguay, es una ciudad dinámica con una población de 1.382.579³habitantes. Como una metrópolis moderna y en constante movimiento, el transporte público desempeña un papel crucial en la vida cotidiana de sus habitantes. El autobús, en particular, es el principal medio de transporte para la población de a pie. En la Tabla 1-1, se presentan algunas características de los diferentes tipos de buses que circulan por las calles de Montevideo, destacando aspectos como el peso bruto vehicular y el tipo de suspensión utilizado.

Tabla 1-1. Buses y sus características. Montevideo-Uruguay. Fuente (Elaboración propia)

Marca	Tipo	Peso bruto vehicular (kg)	Tipo de suspensión
BYD k9	Eléctrico	19700	Suspensión neumática
Mercedes-Benz Torino Urbano	Combustión interna	15000	Muelles ballesta, Suspensión neumática
Yutong ZK B125 CHEVEG	Híbrida	18000	Suspensión neumática.

2. LUGARES DE MEDICIÓN

Las mediciones se realizaron en diversas calles de Montevideo con pavimentos de asfalto y hormigón en condiciones aceptables. A continuación, se describen las ubicaciones y el estado del pavimento.

- No. 1 Avenida Uruguay entre Minas y Magallanes. Tipo de pavimento asfalto
- No. 2 Avenida Italia entre Santiago Nieves y Ignacio Núñez. Tipo de pavimento hormigón
- No. 3 Benito Nardone entre Patria e Ingeniero Carlos Ma. Maggiolo. Tipo de pavimento hormigón.
- No. 4 Bulevar Juan Benito Blanco entre Juan María Pérez y Francisco Solano Antuña. Tipo de pavimento asfalto.
- No. 5 José Ellauri entre Dr. José María Montero y Joaquín Núñez. Tipo de pavimento asfalto.
- No. 6 Avenida Italia entre Av. Colombes y C. Santana. Tipo pavimento Hormigón

3. METODOLOGÍA

Las mediciones de vibraciones se llevaron a cabo utilizando como instrumento de medida un sonómetro de clase 1 Brüel & Kjær tipo 2250, y un acelerómetro piezoeléctrico de baja frecuencia modelo 4534-B-002 fabricado también por Brüel & Kjær, de rango de medición 0,3 a 12800 Hz y sensibilidad de $50 \frac{mV}{ms^2}$. La adquisición de datos en cada una de las ubicaciones se realizó solo en la dirección vertical perpendicular a la superficie del pavimento (eje z) La ubicación del sensor se muestra en la Figura 3-1.

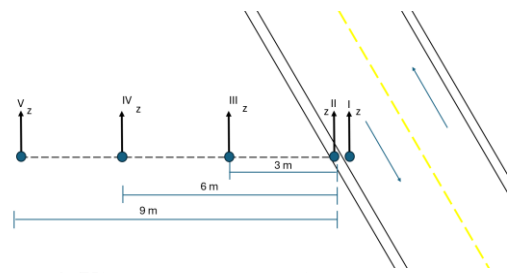


Figura 3-1. Ubicaciones generales de medición.

I	Sobre calzada
II	Sobre cordón
III	A 3 m del cordón
IV	A 6 m del cordón
V	A 9 m del cordón

La técnica de fijación se llevó a cabo utilizando una cinta de 160 micrones de espesor adhería al suelo con

³ Reportes departamentales (2019). Dirección nacional de evaluación y monitoreo

pegante epoxi, sobre esta se colocó el sensor y se dejó cerca de 10 minutos. Luego, se empezó la medición. A continuación, se muestra en la Tabla 3-1 las ubicaciones del sensor en cada una de las calles medidas.

Tabla 3-1. Ubicación de la sección

No.	I	II	III	IV	V
1	x		x		
2		x	x		
3	x				
4		x			
5	x				
6	x		x	x	x

4. RESULTADOS DE MEDICIÓN

Para el análisis, se consideraron las siguientes afirmaciones:

- a) Los niveles de decibels están referidos aceleración⁴ $10^{-6} \frac{m}{s^2}$. La fórmula para la conversión fue la siguiente.

$$N(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{a}{a_{ref}} \right)$$

- b) Densidad espectral de potencia fue utilizada como herramienta para analizar la distribución de energía, en el que se estima la distribución de la intensidad de la señal en un espectro de frecuencia. La PSD se representa normalmente en unidades de $\left(\frac{m}{s^2}\right)^2 / Hz$. (Irvine, 2007)

También fueron utilizados los siguientes lineamientos:

- a) El paso del vehículo no debía verse interferido por otro vehículo y en lo posible que entre paso y paso hubiera cerca de 10 segundos de lapso.
b) En los casos que no fue posible seguir el lineamiento anterior se tuvo en cuenta que, si al paso del bus iba otro vehículo, este debía ser de menor proporción.
c) Utilización de cámara en la mayoría de los casos, para tener en cuenta alguna situación anómala.
d) Se registro en una libreta tiempos de paso de buses.

Finalmente se realizó un análisis de gama frecuencias, buscando determinar las dominantes de acuerdo con las referencias, también se analizó la diferencia espectral entre un vehículo pesado como un bus y un vehículo pequeño, y la influencia de distancia a la fuente tomando como base la velocidad de vibración máxima generada en el instante y por último se realizó una comparación entre las vibraciones originadas por un bus eléctrico y un bus de combustión interna.

4.1 Gama de frecuencias

Uno de los objetivos de medir sobre la carretera era estar lo más cerca posible de la fuente para identificar un amplio rango de frecuencias producto de la interacción entre el vehículo y el pavimento.

Sin embargo, diversas situaciones pueden influir en las mediciones, como el paso de personas, la caída de objetos cerca del sensor o el movimiento del cable por el viento. Al revisar la bibliografía, se puede sugerir que dentro de los espectros analizados producto del paso de los buses se puede identificar unas frecuencias propias de esa interacción. A continuación, en la **Figura 4-1**, se observan los resultados obtenidos.

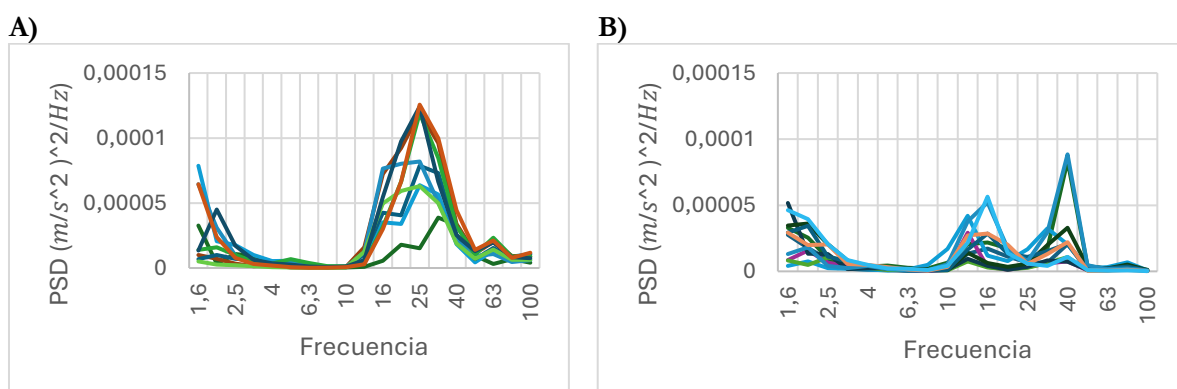


Figura 4-1. PSD (1,6-100 Hz) buses, A) Hormigón ubicación No 3 y ubicación del sensor I; B) Asfalto Ubicación No 5 y ubicación del sensor I

⁴ International Organization for Standardization. (2015) Acoustics — Preferred reference values for acoustical and vibratory levels (1683).

Las frecuencias hasta 2,5 Hz pueden atribuirse al sistema de suspensión neumática de los buses (Singh et al., 2006; Martínez et al., 2007; Park et al., 2020). Para el siguiente rango de frecuencias, hay una particularidad interesante: ambos tipos de calles muestran un inicio de amplificación de energía en 10 Hz. Sin embargo, el corte atenuación de energía para el caso de pavimento de hormigón se da en 40 Hz (ver **Figura 4-1A**), mientras que para el pavimento de asfalto se da en 25 Hz ver (ver **Figura 4-1B**), según las referencias (Cebon, 1986; Al-Hunaidi et al., 1996; Mhanna et al., 2011) las frecuencias en el rango de 10 a 15 Hz están dentro de la posibilidad que esa generación de energía una parte sea contribuida por el salto de eje del vehículo. La parte restante de rango de

frecuencias se puede atribuir según las referencias a la vibración del pavimento de la carretera producto de la interacción con el vehículo (Papan et al., 2019) y otras variables.

4.2. Influencia de la masa del vehículo

La masa es un factor relevante en la generación de vibraciones en las estructuras.

En la siguiente Figura 4-2 se observa de manera general la diferencia de espectros entre bus típicamente un bus Mercedes-Benz Torino Urbano de masa 15000 kg y vehículos pequeños que en promedio rondan 2000 kg.

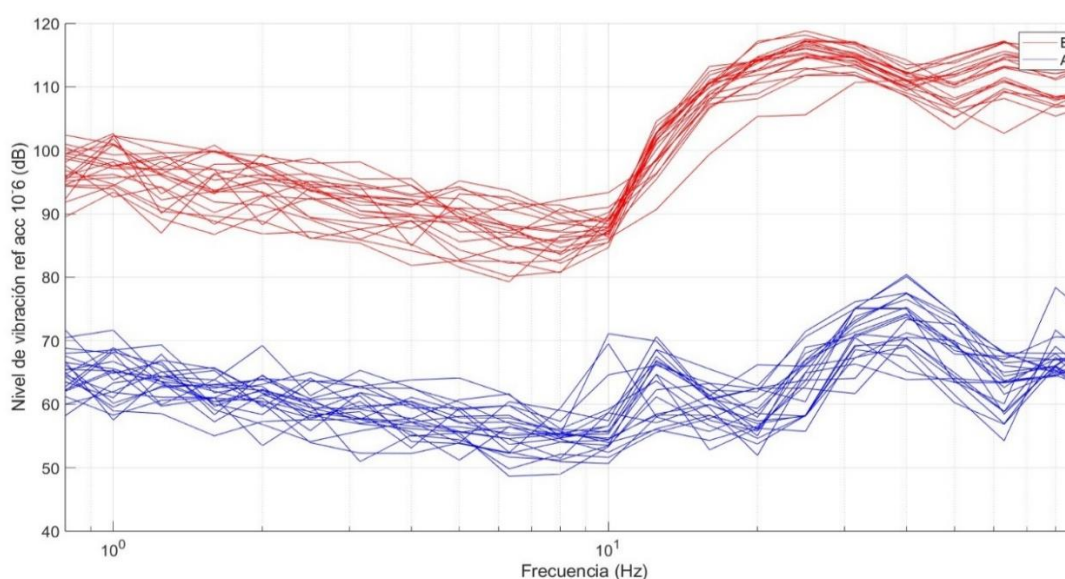


Figura 4-2. Comparación entre bus y vehículo pequeño. Tipo de pavimento hormigón

Las mediciones se realizaron en la ubicación No. 3, ubicación del sensor I. Se evidencia a lo largo de todo el espectro que la diferencia es bastante considerable cuando se habla de cantidad de energía, siendo para el bus 25 dB en promedio más grande para buses. En cuanto al comportamiento de los rangos de frecuencia que influyen en la generación de vibraciones, para frecuencias bajas hasta 10 Hz tienen un comportamiento similar entendiendo las diferencias de ganancias, por otro lado a partir de los 10 Hz se observa una diferencia en el comportamiento, siendo para los buses frecuencias entre 10 y 40 Hz teniendo su pico máximo en 25 Hz, por otro lado para vehículos livianos aunque en 10 Hz se observa también el corte de ganancia de energía esta tiene su pico máximo en 12,5 Hz con corte de atenuación en 20 Hz.

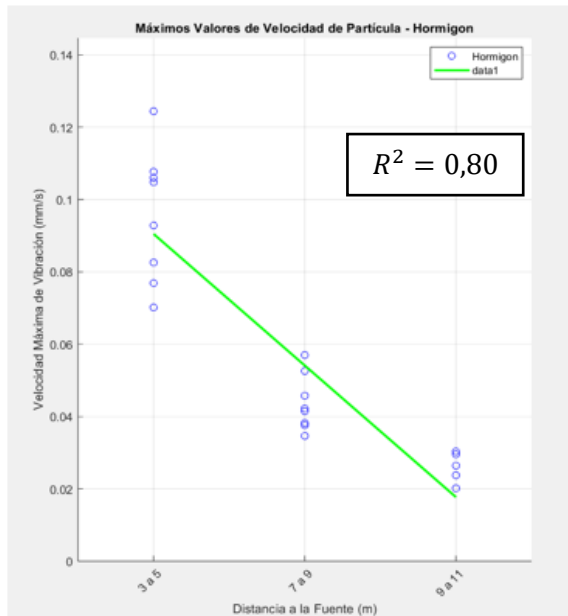
4.3. Distancia a la fuente

La distancia a la fuente es otro factor importante que influye en la percepción del ser humano o afectación de un edificio, para este caso se realizaron las mediciones a diferentes distancias y en dos lugares diferentes. Para facilitar el análisis se muestra en PPV (mm/s) y las muestras son el paso de los buses. Ver Figura 4-3

Se puede observar que para ambas medidas Figura 4-3A, realizada sobre pavimento en hormigón, y la Figura 4-3B, realizada sobre pavimento en asfalto, se obtiene una relación de atenuación negativa entre la distancia y velocidades máxima de vibración. Los resultados reflejan más lo relacionado con las referencias, donde la energía vibración generada por el paso de vehículos pesados tiende a dispersarse con la distancia, debido a la propagación en el medio y la interacción con el terreno y el tipo de pavimento.

Al visualizar las frecuencias dominantes se observa una relación con lo evidenciado en la Figura 4-1. Ver Figura 4-4.

A)



B)

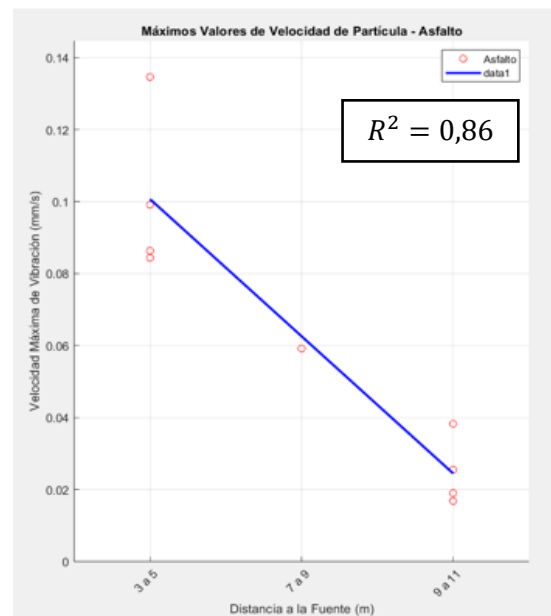
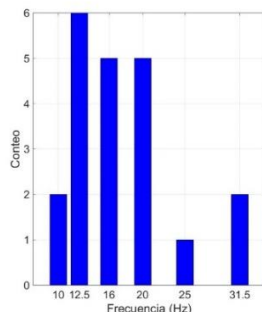


Figura 4-3. Paso de buses a diferentes distancias y en diferente pavimento. A) Pavimento de Hormigón, ubicación No 2; B) Pavimento de Asfalto, ubicación No 1.

A)



B)

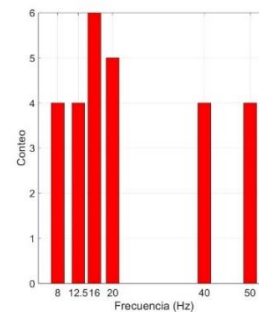


Figura 4-4. Frecuencias dominantes durante la medición. A) Hormigón; B) Asfalto.

Para este caso se tomaron las 3 frecuencias con mayor vibración máxima de velocidad de cada muestra, los valores máximos se distribuyeron en mayor medida en el rango de frecuencias de 8 a 31,5 Hz para el caso del hormigón (ver Figura 4-4A) mientras que para el asfalto (ver Figura 4-4B) las frecuencias dominantes están entre 10 a 25 Hz, con otro pico de 40 a 50 Hz.

4.4. Buses eléctricos

En relación con la contaminación sonora, los vehículos eléctricos han surgido como una alternativa para reducir la generación ruido. Sin embargo, dada la importancia que también recae sobre la contaminación generada por las vibraciones, es necesario realizar una comparación entre los

vehículos de combustión interna y los vehículos eléctricos.

Para este estudio se utilizaron, además del acelerómetro, un sonómetro Casella CEL620.clase 1, con el objetivo de registrar los niveles de presión sonora generados por el paso de los buses. La ubicación del punto de medición corresponde a la ubicación No. 4, la ubicación del sensor en el lugar se dio en el numeral II, tanto para el acelerómetro como para el sonómetro.

En la Figura 4-5 se registraron los niveles máximo-relativos al paso de vehículo, estando en el eje y la aceleración y en el eje x los niveles de presión sonora. Adicionalmente, se tomó en cuenta la velocidad de pasaje de cada bus.

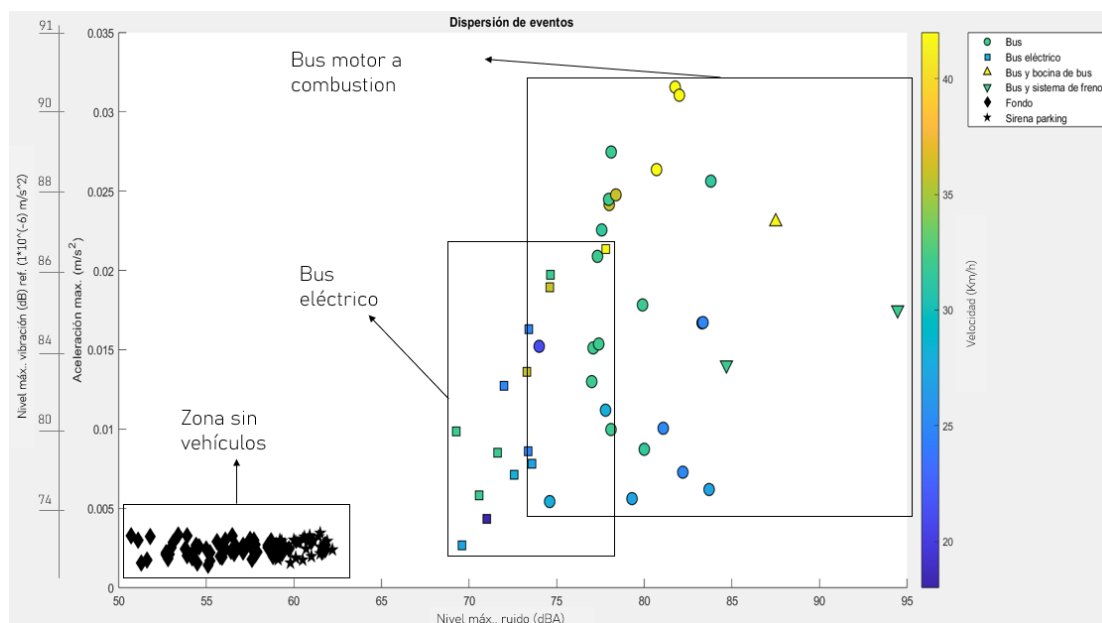


Figura 4-5. Gráfica de dispersión de eventos de paso de buses

La Figura 4-5 se presenta un conjunto de eventos correspondientes al paso de buses tomando los niveles máximos de cada paso tanto en niveles de presión sonora como en niveles de vibración. Cada punto representa el paso de bus en donde su color varía de acuerdo con la velocidad en la que iba pasando en ese momento, siendo el amarillo la mayor velocidad y el azul oscuro la de menor velocidad. En la gráfica se puede distinguir tres grandes zonas. La primera, marcada en color negro, corresponde a eventos sin tránsito de vehículos y representa el nivel de fondo. Esta región proporciona una referencia de las condiciones acústicas y vibratorias de base, con niveles considerablemente menores que los asociados al paso de buses.

La segunda zona agrupa a los buses eléctricos, cuyos niveles máximos se ubican entre 68 y 78 dB(A) en presión sonora, y entre 0,0025 y 0,0225 $\frac{m}{s^2}$ en aceleración vibratoria.

La tercera zona corresponde a los buses con motor a combustión interna, que se distribuyen en un rango de 74 a 94 dB(A) y 0,005 a 0,032 $\frac{m}{s^2}$. Este grupo presenta mayores niveles de ruido y vibración.

Respecto a la relación entre velocidad y vibración, se observó una correlación positiva moderada-alta. El coeficiente de correlación para los buses eléctricos fue de 0,65, mientras que para los buses a combustión fue de 0,68. Estos valores sugieren que, a mayor velocidad, tienden a generarse mayores niveles de vibración, en concordancia con lo reportado por Mhanna et al. (2011) y Zarei et al. (2022) en sus respectivas modelaciones, se identifica que el peso del vehículo constituye una variable determinante en la

generación de vibraciones durante el paso de estos. No obstante, en el presente análisis esta variable no fue incorporada de forma explícita, lo cual representa una limitación.

Se espera en los próximos estudios tener presente esta variable. Esto permitiría avanzar hacia una caracterización más precisa del impacto vibratorio según tipo de vehículo, condiciones de carga y velocidad de operación.

5. CONCLUSIONES

- Las frecuencias dominantes que correlacionan positivamente con el paso de un bus se encuentran en el rango de 8 a 50 Hz para pavimento de hormigón, con un pico máximo en 25 Hz, y de 8 a 20 Hz para pavimento de asfalto, con picos máximos en 12.5 Hz y 16 Hz, así como de 25 a 50 Hz con picos en 40 Hz. Para frecuencias entre 0.8 y 6 Hz no se encontró una correlación positiva.
- La distancia, ubicación y fijación del sensor son esenciales al realizar mediciones. Se observó una correlación negativa entre el alejamiento de la fuente y los valores de velocidad de vibración máxima.
- Los vehículos pesados generan la mayor cantidad de energía y vibraciones en las ciudades, especialmente si las calles están en malas condiciones.

- Al comparar buses eléctricos con buses de combustión interna, se encontró que estos últimos generan mayor vibración. Es necesario realizar más estudios y aumentar la muestra de buses eléctricos y agregar más variables como el peso del vehículo y la cantidad pasajeros para corroborar esta afirmación.
- Este es el primer estudio de su tipo en Montevideo y pretende servir como guía para los técnicos de la Intendencia de Montevideo en el análisis de vibraciones y en estudios relacionados con la molestia causada por las vibraciones del tráfico.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi tutora, Alice Elizabeth Gonzales, por su paciencia, consejos, apoyo y conocimiento. También agradezco a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación por la beca POS_NAC_2022_1_173756, que me ha permitido formarme y ampliar mis conocimientos.

REFERENCIAS

- Al-Hunaidi, M. O., Rainer, J. H., & Tremblay, M. (1996). Control of traffic-induced vibration in buildings. *oil Dynaraics and Earthquake Engineering*, 245-254.
- Astrauskas, t., & Grubliauskas, r. (2017). Modelling of ground borne vibration induced by road transport. *Environmental Protection Engineering*, 376-380.
- Athanasopoulos, G., Pelekis, P., & Anagnostopoulos, G. (2000). Effect of soil stiffness in the attenuation of Rayleigh-wave motions from field measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 277-288.
- Bernhard, R., & Wayson, R. (2005). *An Introduction to Tire-Pavement Noise*. West Lafayette: Final Research Report SQDH 2005-1.
- Bronkhorst, A. J., Moretti, D., & Geurts, C. P. (2021). Vibration Threshold Exceedances in the Groningen Building Vibration Monitoring Network. *Front. Built Environ.*
- Cebon, D. (1986). Road Damaging Effects of Dynamic Axle Loads. *Proceedings, International Symposium*. Kelowna, British Columbia.
- Cebon, D. (1989). Vehicle-Generated Road Damage: A Review. *Vehicle System Dynamics*, 107-150.
- Chilton, F., Friesz, T., & Chen, E. (1975). Traffic Induced Vibration.
- Czech, K. R. (2016). The Impact of the Type and Technical Condition of road surface on the level of traffic-generated vibration propagated to the enviroment. *Procedia Engineering*, 1358-1367.
- Dare, T., McDaniel, R., Shah, A., & Bernhard, R. (2014). *Hot Mix Asphalt Surface Characteristics Related to Ride, Texture, Friction, Noise and Durability*. Saint Paul: Report No. MN/RC 2014-07.
- Federal Transit Administration (FTA). (2018). *Transit Noise and Vibration impact Assessment Manual*.
- Irvine, T. (2007). *Power spectral density units : [G² / Hz]*.
- Li, T. (2018). Influencing Parameters on Tire–Pavement Interaction Noise: Review, Experiments, and Design Considerations. *Designs*.
- Martinez, M. A., Singh, S. P., & Cloquell-Ballester, V.-A. (2007). Measurement and Analysis of Vibration Levels for truck transport in Spain as a function of payload, suspension and speed. *Wiley InterScience*, 439-451.
- Mhanna, M., Sadek, M., & Shahrour, I. (2011). Study of traffic induced ground vibrations using a combined finite difference model. *20ème Congrès Français de Mécanique*. Besançon, France.
- Nilsson, N. A., Bennerhult, O., & Soderqvist, S. (1980). External tire/road noise: Its generation and reduction. *Inter-Noise*. Miami; Florida.
- Ohiduzzaman, M., Sirin, O., Kassem, E., & Rochat, J. L. (2016). State-of-the-Art Review on Sustainable Design and Construction of Quieter Pavements—Part 1: Traffic Noise Measurement and Abatement Techniques. *Sustainability*.
- Papan, D., Papanova, Z., & Krkoskova, K. (2019). Experimental dynamic analysis of traffic seismicity effect on historical building. *5th International Scientific Conference on Civil Engineering-Infrastructure-Mining*.
- Park, J., Choi, S., & Jung, H. M. (2020). Measurement and Analysis of Vibration Levels for truck transport enviroment in Korea. *Applied Sciences*.
- Rodríguez, M. F. (2023). Modelos numéricos de sistemas mecánicos para la mejora de la detectabilidad sonora de los vehículos silenciosos . *Doctoral dissertation, Universidad Miguel Hernández de Elche*.
- Singh, J., Singh, S. P., & Joneson, E. (2006). Measurement and Analysis of US Truck Vibration for Leaf Spring and Air Ride

-
- Suspensions, and Development of Tests to Simulate these Conditions. *Wiley InterScience*, 309-323.
- Watts, G. R. (1987). *Traffic induced ground-borne vibration in dwellings*. Crowthorne: Transport and Road Research.
- Watts, G. R. (1990). *Traffic induced vibration in buildings*. Transport and road research laboratory, Crowthorne, Berkshire.
- Zarei, Z., Sadeghi, J., & Sarkar, A. (2022). Evaluation of heavy-vehicle-induced vibrations running on asphalt pavements. *Construction and Building Materials*.