



V CAIM 2016

V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

5 al 7 de Octubre de 2016

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DETERMINACION DEL UMBRAL DE CONFORT DE VIAJE EN FUNCION DE LAS ACELERACIONES PERCIBIDAS EN EL TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS

Hurani, Raúl Andrés ¹, Imaz, Fernando Javier ² y Jaurena, Juan Francisco ³

^{1,2 y 3} Grupo Científico de Estudios de Transporte, Accidentología y Movilidad (CETRAM)
Facultad Regional Santa Fe – Universidad Tecnológica Nacional
Lavaisse 610, Santa Fe (3000), Argentina. cetram@frsf.utn.edu.ar

RESUMEN

La calidad del transporte público urbano se mide a partir de indicadores que se establecen para cada aspecto del servicio. Son instrumentos que ayudan enormemente a la planificación, control y permiten visualizar de forma sistémica los objetivos y su cumplimiento. A partir de esta premisa se persigue relacionar las aceleraciones sufridas por un usuario durante su viaje con el confort asociado a irregularidades en el pavimento, a los efectos dinámicos consecuencia de las vibraciones, aceleración, frenado y cambio de carril del vehículo, problemas mecánicos del coche y otras circunstancias que afectan a la comodidad del usuario.

El interés en mejorar el confort de los pasajeros lleva a plantearse cómo relacionar el valor de las aceleraciones identificadas anteriormente con el confort que perciben los ocupantes del vehículo.

Para ello, se diseñó un protocolo de medición, a partir del uso de acelerómetros y giróscopos fijados a diferentes puntos de la carrocería, y así se pudieron medir las aceleraciones en los tres ejes, lo que asociado a datos de GPS establecieron con gran exactitud los lugares, las condiciones de la vía o actitudes de conductores que provocan estas situaciones. Además, el ensayo incluía la provisión de pulsadores para los usuarios y así identificar momentos de incomodidad, para relacionarlo con los picos de las aceleraciones.

Verificado el protocolo a partir de una prueba piloto se realizó el ensayo definitivo con una muestra mayor, para garantizar la representatividad de la misma.

Una vez procesados los resultados se analizaron las relaciones entre las aceleraciones y la sensación de disconfort percibida por los usuarios, determinando que los mayores malestares se observaban cuando el vehículo transitaba por calles en mal estado, asociados a aceleraciones y frenadas bruscas de parte del conductor.

El análisis final permite determinar el umbral de disconfort relacionados con las aceleraciones

Palabras claves: indicadores de calidad, confort, transporte público, aceleraciones.

Área Temática: Mecatrónica y automatización - Instrumentación, actuadores, sensores y transductores.



V CAIM 2016

V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

5 al 7 de Octubre de 2016

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

1. Introducción

Este trabajo se realizó en el marco del proyecto de investigación y desarrollo denominado “Estudio del índice de confort del servicio del transporte público de pasajeros a través de la medición de aceleraciones” homologado por Evaluadores Externos de la Universidad Tecnológica Nacional dentro del Programa de Incentivos Docentes Investigadores de la Secretaría de Políticas Universitarias (código REI3451), que tiene por objetivo general “relacionar las aceleraciones (laterales y verticales) medidas en el sistema de transporte público de pasajeros con el confort percibido por los usuarios del sistema”. El mismo se encuentra en fase de desarrollo a la fecha de publicación de este trabajo, por lo que lo que aquí se presenta no es una valoración de los resultados finales del proyecto sino una validación de la metodología que se estableció para la determinación del umbral de confort, a partir de la realización de trabajos de campo.

Existen algunos antecedentes donde se desarrollan metodologías para ese fin, que hacen referencia al tratamiento de las aceleraciones medidas. En ellos se manifiesta que a igualdad de aceleraciones, la respuesta del cuerpo humano varía de acuerdo a las condiciones de operación, por ejemplo si una persona se encuentra sentada en un colectivo: al acelerar éste, el cuerpo de la persona se mantiene firme, sujetado por el respaldo del asiento; pero en el momento en el que el vehículo frena, la persona se abalanza involuntariamente hacia delante al carecer de un soporte en esta dirección.[1] Este ejemplo permite evidenciar que a igualdad de aceleraciones en distintos sentidos, el cuerpo humano presenta reacciones muy diferentes, por lo que se considera preciso incorporar estos aspectos al tratado de los datos.

El análisis se realiza teniendo en cuenta cuatro tipos de aceleraciones principales:

- Longitudinales
 - Arranques (positivas)
 - Frenadas (negativas)
- Transversales
 - Giros (positivas y negativas)
- Verticales
 - Saltos, pozos o desniveles (positivas y negativas)

Relacionando las aceleraciones percibidas con las valoraciones de confort de los usuarios se pueden determinar los umbrales de incomodidad, es decir las tolerancias de las personas frente a las distintas direcciones de las aceleraciones.

El objetivo fue estimar el umbral de confort, a partir de la medición de las aceleraciones en el servicio de transporte urbano de pasajeros, que luego pueda ser tomado como referencia para determinar si un servicio analizado excede, o no, estos valores, en vistas de elaborar un índice de calidad del transporte basado en sus aceleraciones promedio.

2. Metodología

Para el desarrollo de este estudio se utilizó un colectivo urbano de la ciudad de Santa Fe, de la línea 16 -en servicio- en su recorrido normal. La elección del mismo surgió de un análisis de criticidad de la totalidad de líneas urbanas y sus recorridos en la ciudad de Santa Fe, donde se consideraron la presencia de tramos céntricos, tramos rectos, sinuosos, frecuencia de circulación por avenidas. Además se consideró la cantidad de pasajeros transportados. En la **Figura 1** se resalta el recorrido estudiado sobre un mapa de la ciudad de Santa Fe. Los registros de posición se obtuvieron por medio de un GPS.



V CAIM 2016

V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

5 al 7 de Octubre de 2016

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina



Figura 1. Recorrido estudiado Línea 16

Una vez determinado el recorrido, se procedió a definir cómo se iban a realizar las mediciones del **vector de aceleraciones** por un lado y de qué forma se registrarían los momentos en los cuales los usuarios perciben incomodidades.

Para la medición de las aceleraciones se utilizó una aplicación de un teléfono celular [2](ver **Figura 2**), el cual fue instalado solidariamente en la estructura del colectivo de forma tal que pudiera medir las componentes de aceleración correspondientes a la dirección del movimiento, a la dirección normal al suelo y a la dirección perpendicular a las dos anteriores. Cabe aclarar que dicho equipamiento podía registrar además, los valores de velocidad instantánea del coche.



Figura 2. Registro de aceleraciones con el acelerómetro de un celular.

Para determinar la **percepción de discomfort**, se utilizaron aplicaciones de celulares capaces de almacenar marcas de tiempo cuando los usuarios del servicio presionaban un botón del celular, **“cada vez que se sintieran incómodas”**.

La cantidad de pulsadores distribuidos en el colectivo surgió de un análisis de la cantidad de pasajeros transportados, de forma tal que la muestra tomada analizada sea representativa.

Se seleccionó un tipo de muestreo probabilístico, y se utilizó la siguiente ecuación:

$$n = \frac{N\sigma^2.Z^2}{(N-1).e^2 + \sigma^2.Z^2} \quad (1)$$

Donde,

- **n**: tamaño de la muestra.



V CAIM 2016

V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

5 al 7 de Octubre de 2016

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

- **N**: tamaño de la población. En este caso se tomó la cantidad de pasajeros por día (promedio) en la línea seleccionada. De datos obtenidos por el Ente de Control del Transporte Público de Pasajeros de Santa Fe, la Línea 16 transporta 4.187.221 pax/año, por lo que se estima un promedio de 11.631 pax/día (distribución constante).
- **σ** : Desviación estándar de la población. Se adopta un valor de 0,5.
- **Z**: Valor obtenido mediante niveles de confianza. Se tomará en orden al 95% de confianza, equivale a 1,96.
- **e**: Límite aceptable de error muestral. Teniendo en cuenta que no se tiene su valor, se adopta un valor que varía entre el 1% (0,01) y 9% (0,09). Para este caso, se adopta: $e = 9\%$ (0,09).

Con estos datos se obtiene el siguiente valor de muestra:

$$n = \frac{11631 \times 0,5^2 \times 1,96^2}{(11631 - 1) \times 0,09^2 + 0,5^2 \times 1,96^2} = 117 \quad (2)$$

El valor obtenido se estratificó por horario, y por franja etaria.

Para la estratificación por horario, se realizó el siguiente análisis: de acuerdo al estudio realizado por la UTN en 2008 [3], se dividió el uso del vehículo en 6 franjas: pico mañana, valle mañana, pico mediodía, valle tarde, pico tarde-noche y valle noche. Dividiendo el total de pulsadores por 6 resultó que se colocarían 20 pulsadores en el coche.

En tanto, para el tipo de edad de los usuarios se tomó como referencia el estudio de 2008 y ajustando la representación de las edades a la distribución referida anteriormente, se adoptó la siguiente estrategia de estratificación:

- Niño / Adolescente (hasta 15 años): 20% (4 usuarios)
- Joven hasta 30 años: 20% (4 usuarios)
- Adulto hasta 55 años: 45% (9 usuarios)
- Mayor 55 años: 15% (3 usuarios)

En cuanto a la distribución de los pulsadores dentro del colectivo, se utilizó el siguiente criterio; debía haber pasajeros sentados y parados y ocupar las tres zonas definidas. La **Figura 3** muestra la distribución que se adoptó dentro del vehículo, donde “A” representa la ubicación del acelerómetro y “Z₁”, “Z₂” y “Z₃” indican las zonas donde se ubicaron los pulsadores.

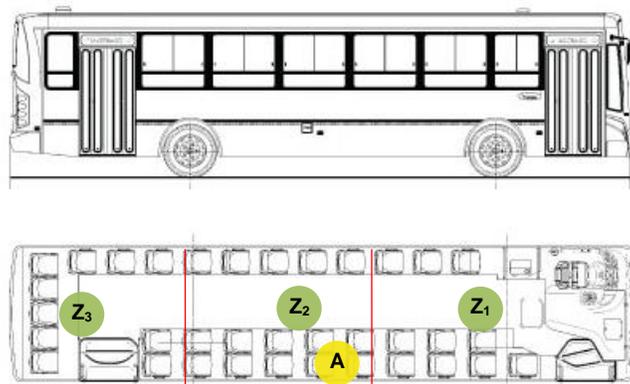


Figura 3. Zonas de ubicación de los pulsadores y el acelerómetro dentro del vehículo estudiado.

Los pulsadores y el acelerómetro estuvieron vinculados en el tiempo de forma que cada “sensación de incomodidad” se represente inequívocamente en un punto en el espacio e



V CAIM 2016

V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

5 al 7 de Octubre de 2016

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

identificada con un usuario. Durante los distintos recorridos se obtuvieron aproximadamente 420.000 registros de aceleraciones y más de 1200 pulsaciones de discomfort.

Dichos registros se vincularon con las marcas horarias, unificando registros de aceleraciones, pulsadores y GPS en una misma línea temporal y espacial.

Se obtuvieron dos líneas de valores:

- **Aceleraciones** en función del tiempo. Para el análisis se seleccionaron los 1000 valores mayores en valor absoluto (sobre más de 400.000) ya que si se analizaban en su totalidad el procesamiento resultaba muy lento y a los efectos del estudio no resultaba beneficioso.
- **Instancias de incomodidad** (una por pulsador) ubicadas temporal y espacialmente. Se establecieron franjas de 10 segundos de duración y se contabilizaron las cantidades de pulsaciones en cada período.

Posteriormente se procedió a analizar y relacionar dichos valores con situaciones de perturbación prefijados, tales como: arranques, frenadas, giros y saltos.

Se tomó como criterio, que cuando la percepción de incomodidad en un punto en el espacio superara al 66% de los usuarios, se realizaría un análisis particular de las aceleraciones que causarían el discomfort.

Tal como se comentó, se dividió el tiempo de recorrido en franjas de 10 segundos y se contabilizaron las cantidades de pulsaciones que había en cada período. Se adoptó este rango porque los usuarios tienen distintas velocidades de reacción. Se estima que una persona lúcida puede demorar entre 1,5 y 2 segundos en reaccionar ante una perturbación.

Una vez determinados los períodos de discomfort de los usuarios se analizaron las aceleraciones y velocidades registradas en dicho período para evaluar la relación entre las variables.

Luego de procesar los datos, analizar los valores y tipos de aceleraciones fue posible determinar algunos valores de aceleración que ponen de manifiesto la incomodidad de los usuarios que podrían definirse como "**umbrales de incomodidad**". Algunos autores, como Robert Norton, lo definen como "Tolerancia humana a la aceleración" [4].

3. Resultados

La forma de tomar y procesar los datos tiene las ventajas de brindar información sobre las pulsaciones desagregada en términos espaciales (por la vinculación temporal con los datos del GPS) y cualitativos (por la asignación a los distintos tipos de aceleración).

La **Tabla** muestra el volumen de datos obtenidos:

Tabla 1. Cantidad de registros obtenidos.

Datos	Cantidad de registros
Ubicación GPS	2322
Aceleración X	418195
Aceleración Y	418195
Aceleración Z	418195
Pulsaciones	1229

A continuación se muestran algunos resultados obtenidos. La figura 4 muestra el total de aceleraciones y la 5 el resumen de las 1000 aceleraciones más altas discriminadas por ejes. Como se puede ver sería muy difícil realizar el análisis sobre el total por la cantidad de datos observados.



V CAIM 2016

V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

5 al 7 de Octubre de 2016

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

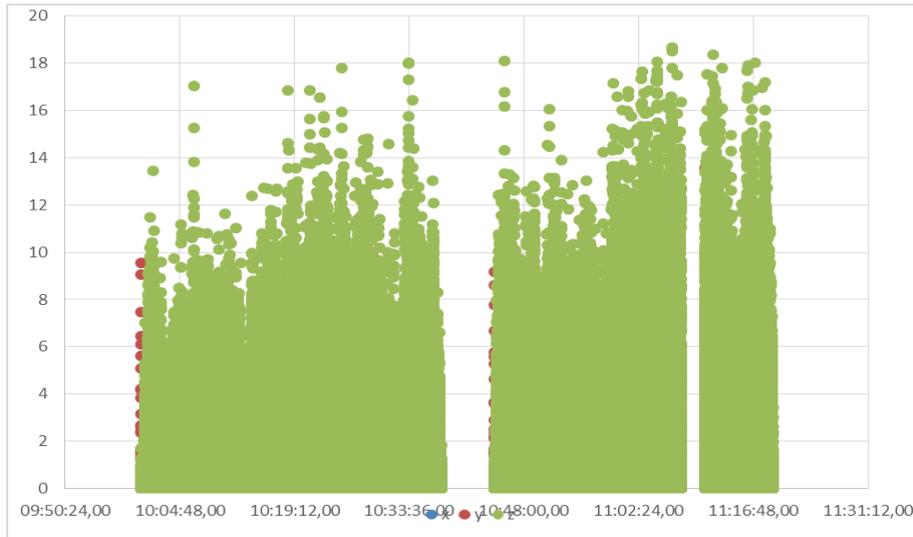


Figura 4. Total de aceleraciones medidas durante el ensayo

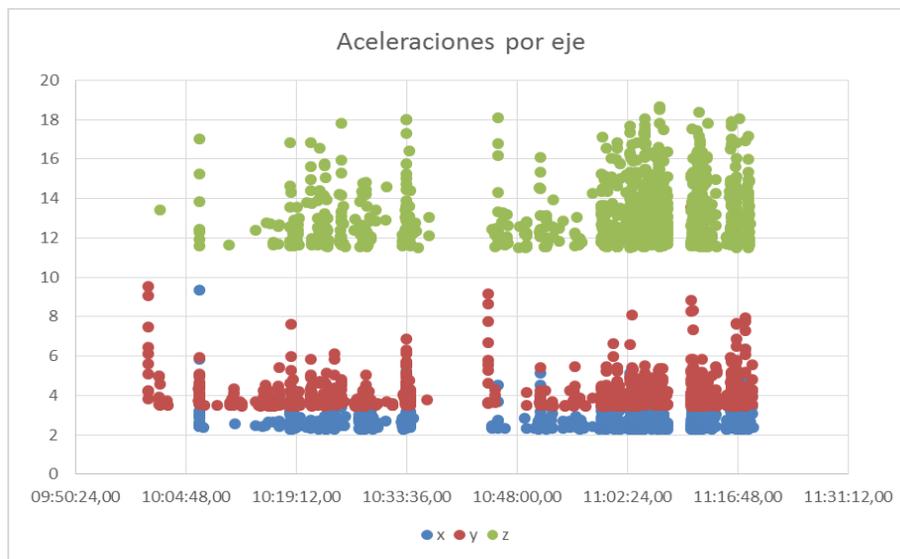


Figura 5. Resumen de las 1000 aceleraciones superiores en los tres ejes

El GPS permitió tener datos de las velocidades que tuvo el vehículo durante el ensayo, lo que se pone de manifiesto en la Figura 6, donde se observa que en algunos tramos del recorrido se superaron los 60 km/h.



V CAIM 2016

V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

5 al 7 de Octubre de 2016

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

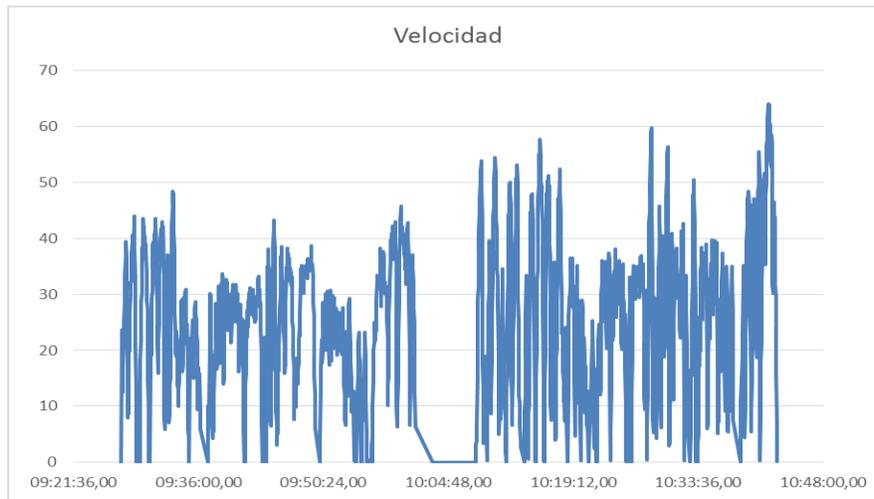


Figura 6. Valores de velocidad que adoptó el vehículo en el ensayo

Tal como se comentó en el apartado 3 se llevó a cabo el agrupamiento de las pulsaciones por rango de tiempo, las que posteriormente fueron ordenadas y analizadas en forma particular.

La Tabla 2 muestra el resumen de los valores de pulsaciones más elevados.

Tabla 2. Mayor cantidad de pulsaciones por rango horario

Hora Intervalo	Pulsadores accionados
11:16:10	94,44%
11:08:30	94,44%
10:51:10	94,44%
10:44:20	94,44%
11:13:20	88,89%
10:00:10	88,89%
11:12:50	83,33%
10:37:40	83,33%
11:19:20	77,78%
11:13:10	72,22%
11:12:30	72,22%
11:06:40	72,22%
11:05:20	72,22%
10:52:20	72,22%
10:30:40	72,22%
10:06:30	72,22%
11:18:50	66,67%

Posteriormente se filtraron los valores de aceleración para los períodos de tiempo citados en la Tabla 2 para ver si se podía obtener alguna relación.

La Figura 7 muestra el rango de tiempo entre las 11 horas 16 minutos y 00 segundos y las 11 horas 16 minutos y 10 segundos y se puede apreciar que a las 11:16:03 se midieron valores de



V CAIM 2016

V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

5 al 7 de Octubre de 2016

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

aceleración en el eje Z cercanos a los 18 m/s^2 , lo que indefectiblemente comprueba que es la causa de la disconformidad de los usuarios.

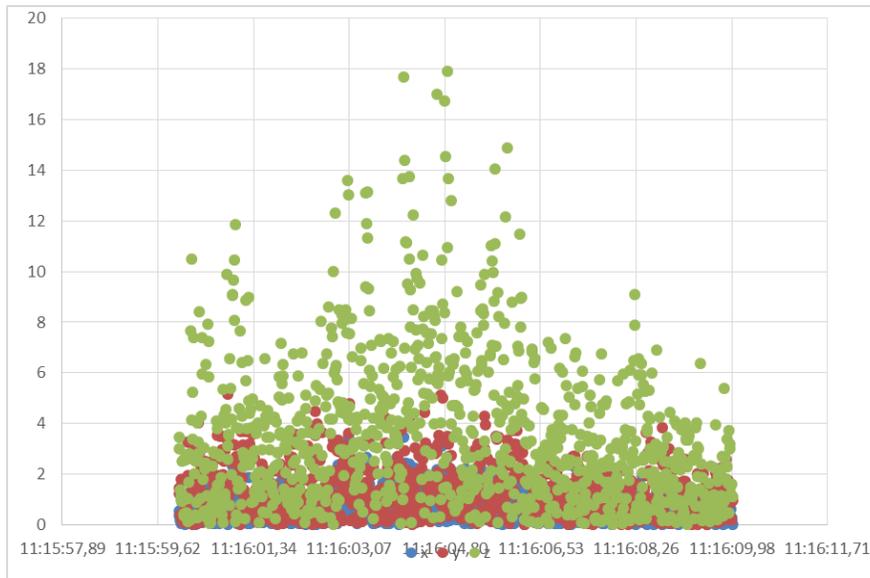


Figura 7. Análisis del período de tiempo 11:16:00 – 11:16:10

Otro punto singular lo representa el período 10:44:10 – 10:44:20 donde se puede observar (Figura 8) un componente de aceleración sobre el eje Y superior a los 9 m/s^2 , que llevó a que un gran porcentaje de usuarios (94%) pulsara el botón de incomodidad. Este análisis lleva a pensar que los usuarios son más proclives a tolerar aceleraciones verticales que laterales, ya que la perturbación mostrada en la Figura 7 es significativamente más baja, pero los porcentajes de usuarios molestos son similares. Las aceleraciones laterales pueden provenir de una maniobra brusca de parte del conductor.

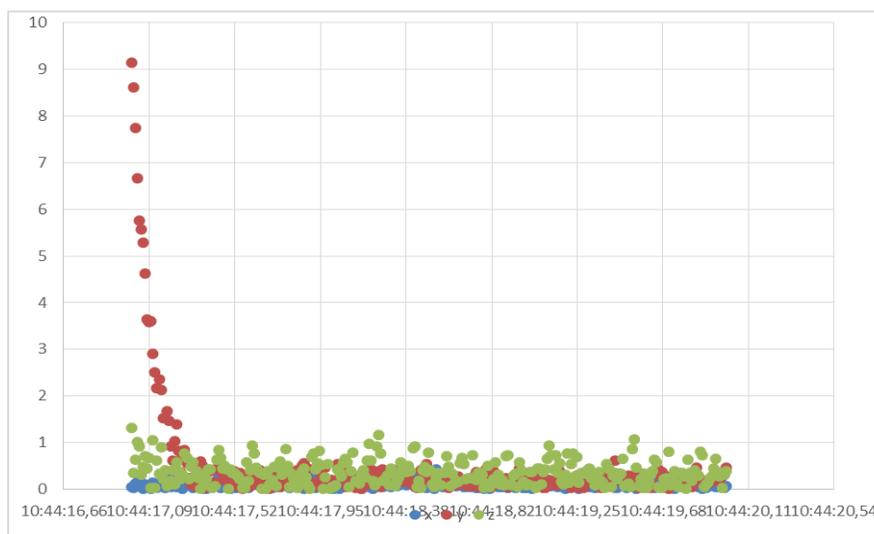


Figura 8. Análisis del período de tiempo 10:44:10 – 10:44:20



Otro estudio interesante corresponde al período 10:06:30 – 10:06:40 donde el 72% de los pasajeros se sintieron incómodos. En la Figura 9 se puede ver que hay componentes de aceleración elevados, tanto en el eje X como en el eje Z. Sin embargo, los valores absolutos de aceleración son mucho más altos en Z (verde) que en X (azules) (17 m/s^2 contra 9 m/s^2).

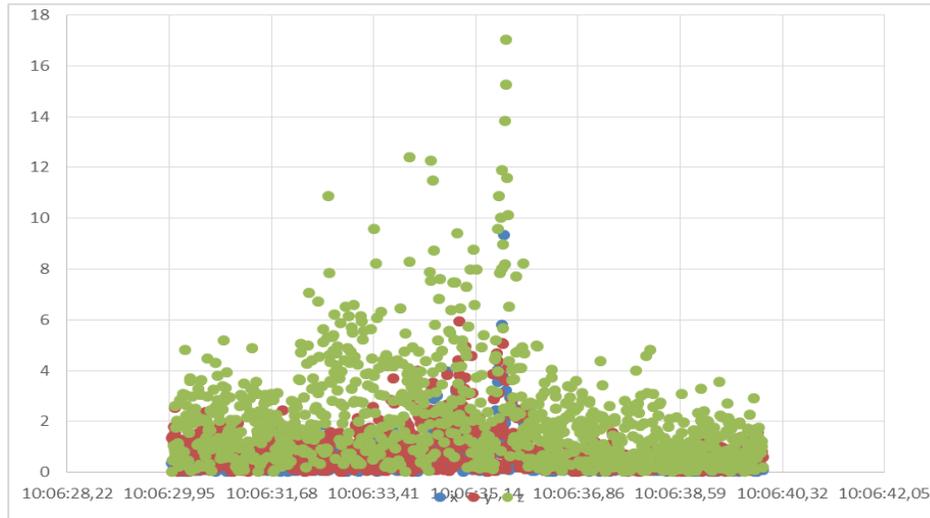


Figura 9. Análisis del período de tiempo 10:06:30 – 10:06:40

El último período seleccionado para el análisis es el correspondiente a: 11:18:40 – 11:18:50, donde solo el 66% de los pasajeros demostraron disconfort, es decir el valor a partir del cual se realizaba el estudio particular. La figura 10 muestra valores de aceleración en el eje Z cercanos a 10 m/s^2 y algunos valores en el eje Y apenas inferiores a los 6 m/s^2 .

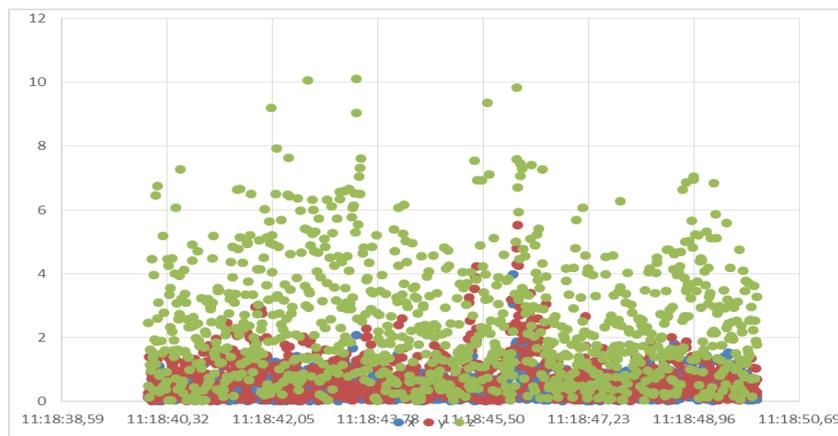


Figura 10. Análisis del período de tiempo 11:18:40 – 11:18:50

El análisis de cada uno de los períodos estudiados comprueba que existió, al menos un valor de aceleración que motivó el accionamiento del pulsador.



V CAIM 2016

V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

5 al 7 de Octubre de 2016

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI



Universidad Nacional de
Santiago del Estero
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

4. Conclusiones

Haciendo la salvedad que el ensayo realizado constituye una primera prueba, y que el mismo debe extenderse a todos los coches de la empresa, con mayor número de pulsadores, se pueden detectar las siguientes potenciales conclusiones:

- **Definición de umbrales de confort:** a partir de la comparación de las cantidades de “botones de incomodidad” pulsados se pueden definir valores límites de aceleración (en cada uno de los ejes), o zonas de mayor o menor comodidad. Para el estudio se pudo comprobar que para valores de aceleración superiores a 9 m/s^2 la percepción de incomodidad es muy alta por lo que puede considerarse que el umbral está por debajo de dicho punto.
- **Variación de la valoración de la incomodidad según la dirección de las aceleraciones:** del análisis de los distintos casos singulares se pudo comprobar que la aceleración lateral es menos tolerable para los usuarios que la vertical. La aceleración longitudinal se observó un valor de más de 11 m/s^2 , que sin embargo no tuvo su respuesta como percepción de incomodidad.
- **Causas de las aceleraciones:** un análisis posterior al presente escrito permitirá determinar el porqué de la generación de dichas aceleraciones. Como se nombró anteriormente, éstas se pueden generar debido a una forma agresiva de conducción, a problemas mecánicos de los vehículos relacionados a la suspensión o a imperfecciones en la calzada, baches, lomos de burro, calles no asfaltadas, etc.

5. Reflexión Final

El uso de instrumentos tales como acelerómetros y giróscopos permite colaborar con la planificación y el control de la prestación del servicio de transporte urbano de pasajeros, determinando en tiempo real las desviaciones al programa acordado entre las partes. Además, brinda información para interpretar las causas que producen dichas incomodidades, para luego poder adoptar medidas tendientes a mejorar la calidad del viaje de los usuarios.

La factibilidad de conocer los “**umbrales de incomodidad**”, asociados a aceleraciones permite determinar aspectos relacionados al perfil de los usuarios del sistema de transporte público de pasajeros, y en base a ello adoptar medidas para mejorar el servicio, de forma de captar mayor cantidad de pasajeros y por consiguiente fortalecer un sistema más sostenible para la movilidad de las personas.

6. Referencias

[1] Castellanos, J. C., Fruett, F. “Embedded system to evaluate the passenger comfort in public transportation based on dynamical vehicle behavior with user’s feedback”. Elsevier - Measurement, (págs. 47, 442-451). (2014)

[2] Thommen Karimpanal, G, Harit Maganlal, G. “Sensing discomfort of standing passengers in public rail transportation systems using a smart phone”. International conference on control and automation (ICCA) (págs. 1509-1513). (2013).

[3] Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Santa Fe - GETRANS, Estudio del transporte Público de Pasajeros de Santa Fe - UTN, Fac. Reg. Santa Fe – Argentina (págs. 69-72) (2005)

[4] Norton Robert, "Diseño de Maquinaria", editorial Mc Graw Hill 4° Edición, (págs 319 – 320), (2009)