

ESTUDIO DEL ÍNDICE DE CONFORT DEL SERVICIO DEL TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS A TRAVÉS DE LA MEDICIÓN DE ACELERACIONES

Área temática: Gestión de la Calidad

Hurani, Raúl Andrés, Imaz, Fernando Javier, Jaurena, Juan Francisco

*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.

En la gestión de la calidad del transporte público urbano tienen un papel primordial los indicadores de calidad, 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. Este estudio se basa en relacionar las aceleraciones sufridas por el usuario durante su viaje debido a brusquedades en el trayecto y la pérdida de comodidad o confort, mediante un indicador específico.

El conductor y los pasajeros de un vehículo de transporte de pasajeros se ven sometidos durante su marcha a aceleraciones debidas a las irregularidades de la calzada y a los efectos dinámicos consecuencia de las vibraciones, aceleración, frenado y cambio de carril del vehículo. El creciente interés en mejorar el confort de los pasajeros lleva a plantearse cómo relacionar el valor de estas aceleraciones con el confort que perciben los ocupantes del vehículo.

El uso de acelerómetros y giróscopos fijados a diferentes puntos de la carrocería permite medir aceleraciones en tres ejes, lo que asociado a datos de GPS se puede utilizar para establecer con gran exactitud los lugares, las condiciones de la vía o actitudes de conductores que provocan estas situaciones. Por otra parte, dotando a los usuarios de pulsadores para identificar momentos de incomodidad, se podrán relacionar los picos de las aceleraciones con el disconfort en el viaje.

A partir de estas relaciones e interpretando las causas que producen dichas perturbaciones, se podrán adoptar medidas tendientes a mejorar la calidad del viaje, modificando parámetros de conducción o gestionando reparaciones necesarias en la vía.

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

ABSTRACT

In quality management for public urban transport, the quality indicators that are established for every aspect of the service play a key role. They are tools that ease the planning and control and allow visualizing the goals and their achievement in a systemic way. This research is based on linking the accelerations suffered by the passenger during the journey -due to abruptness/potholes on the way- and the loss of comfort with a specific indicator.

During the trip, driver and passengers are put through accelerations consequence of uneven road surfaces and the dynamic effects of vibrations, acceleration, braking and lane changing. The increasing interest on improving the passengers comfort, leads to wonder how to link the acceleration values with the comfort perceived by the inhabitants of the vehicle. This research studies this accelerations measured on the public passenger transport system that will allow establishing the indicators for a dynamic management of this quality aspect.

The use of accelerometers and gyroscopes fixed in different places of the bodywork allows to measure accelerations in three axes; which associated to GPS data, can be used to establish with great accuracy the places, the road conditions or driver attitudes that gender this kind of situations. From the relation between passengers comfort and acceleration values measured in the vehicle, it will be possible to take actions tending to improve the quality of the journey, modifying driving parameter or managing road repairs.

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 Incentivo a 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”.

Si bien existen antecedentes en donde se desarrollan distintas metodologías para ese fin (Castellanos y Fruett) [1], las mismas no suelen hacer un tratamiento profundo de las distintas direcciones en las que las aceleraciones son medidas. Esta mención se debe a que a igualdad de aceleraciones, la tolerancia del cuerpo humano a las perturbaciones suele variar según las distintas causas que las generan, y esto se aprecia claramente cuando una persona se encuentra sentada en un colectivo: al acelerar éste, el cuerpo de la persona se mantiene firme, sujetado por el respaldar 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. 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.

En una primera instancia, se puede estudiar el confort de las personas [2] teniendo en cuenta cuatro tipos de aceleraciones principales:

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

Identificando correctamente las sensibilidades de las personas frente a cada tipo y determinando sus límites de confort, será posible construir un umbral general de confort realizando un promedio de los límites individuales ponderado por la sensibilidad, que luego podrá ser tomado como referencia para elaborar un índice de confort.

De esta forma, se desarrolló una metodología que permitirá estimar y comparar la calidad de los servicios de transporte urbano de pasajeros que no sólo tiene en cuenta las magnitudes de las aceleraciones, sino que también incorpora las tolerancias y sensibilidades para las distintas direcciones en su cálculo.

2. METODOLOGÍA DESARROLLADA.

El objetivo fue desarrollar un método general para estimar el límite de confort del usuario promedio al usar los servicios de transporte urbano de pasajeros. Dentro de este marco, se buscó que las prácticas a realizar fueran flexibles, con intenciones a futuro de utilizar los procedimientos aquí establecidos para diseñar un índice de calidad del transporte, que compare las aceleraciones promedio de un viaje con los umbrales de confort correspondientes.

Para el desarrollo de este estudio se trabajó con un colectivo urbano de la línea 5 de la ciudad de Santa Fe, -en servicio- en un tramo de su recorrido habitual. La elección del mismo surge de un análisis de criticidad previo 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 y cantidad de pasajeros transportados, entre otros. La sección del recorrido que fue estudiada se encuentra resaltada con celeste en la Figura 1, y va desde la intersección entre las calles 9 de Julio y Junín hasta la última parada de la línea sita en Av. 12 de Octubre y Teniente Loza; los puntos en color rojo muestran la posición del vehículo a intervalos iguales de tiempo durante el ensayo, y el texto a la derecha de cada uno de ellos indica la hora del día en esos momentos. Estas medidas de posición en el tiempo se registraron mediante un GPS.

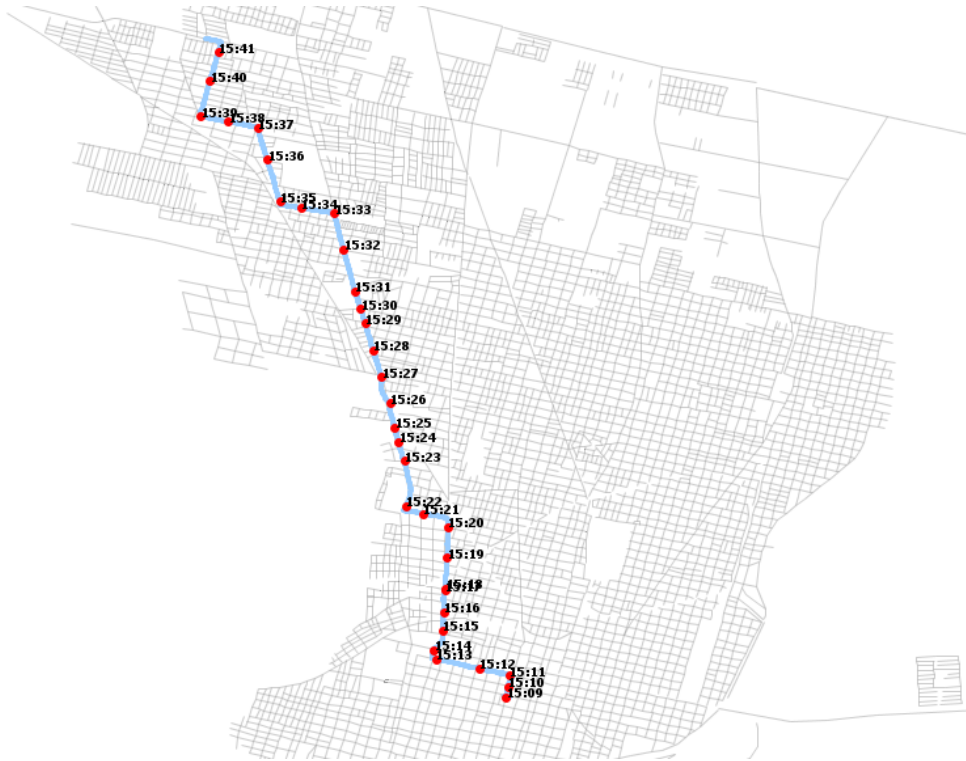


Figura 1 Recorrido estudiado. Tramo de la línea 5 de la ciudad de Santa Fe.

Definidos los parámetros principales del estudio, el primer paso fue efectuar las mediciones del **vector de aceleraciones** y registrar los momentos en los cuales los usuarios se sintieron incómodos.

Para la primera parte se utilizó el acelerómetro incorporado en un teléfono celular (ver Figura 2), el cual fue fijado solidariamente a la estructura del colectivo (respaldar del asiento) 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.



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

En cuanto al registro de las **instancias de incomodidad**, se entregaron cronómetros capaces de almacenar marcas de tiempo (pulsadores) a cuatro personas cercanas al proyecto y se les instruyó accionarlos “cada vez que se sintieran incómodas”. En la Figura 3 se muestra la distribución que se adoptó dentro del vehículo, donde “A” representa la ubicación del acelerómetro y P1, P2, P3 y P4 indican las posiciones de las personas con pulsadores. El pulsador P1 contaba con el GPS para georeferenciar las mediciones.

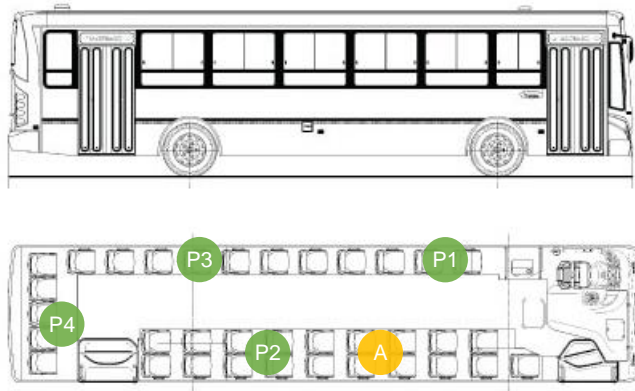


Figura 3 Distribución de los pulsadores y ubicación del acelerómetro dentro del vehículo estudiado.

Se intentó que la distribución elegida para los pulsadores fuera lo más uniforme posible con la intención de evitar posibles sesgos en la toma de datos, sujetos a la disponibilidad de recursos para el ensayo (recursos humanos en este caso).

A modo de referencia, en la Tabla 1 se resume el volumen de datos obtenidos:

Tabla 1 Conteo de registros obtenidos.

Dato	Cantidad de registros
Ubicación (GPS)	2.791
Aceleraciones longitudinales	343.281
Aceleraciones transversales	343.281
Aceleraciones verticales	343.281
Instancias de incomodidad	519

Realizadas las mediciones, el paso siguiente fue vincular todos los datos a través de las marcas horarias, con el objetivo de unificar los valores registrados de aceleraciones, pulsadores y GPS en una misma línea temporal y espacial, mejorando así el orden.

Luego, se pasó a disponer de dos conjuntos ordenados de datos para seguir trabajando:

- **Aceleraciones** en función del tiempo.
- 4 listas (una por pulsador) con valores de tiempo correspondientes a **instancias de incomodidad**.

Seguidamente se procedió a vincular cada instancia de incomodidad con uno de los cuatro tipos de perturbación en las aceleraciones previamente establecidos (arranques, frenadas, giros y saltos).

A pesar que en la realidad cada evento pudo haber sido ocasionado por más de una causa, y no necesariamente por una única pura, se optó por asignar cada instancia registrada a un único tipo de aceleración, ya que esto permitirá observar tendencias con mayor facilidad.

El procedimiento, que se repitió para cada uno de los valores de tiempo que se encontraban en las listas de cada pulsador, fue el siguiente:

1. Establecer un **rango de tiempo** que comprendiera los valores de aceleración tomados desde dos segundos antes de la pulsación analizada hasta el momento exacto de la pulsación (esto es debido a que la persona no tiene una **velocidad de reacción** instantánea, por lo que se acepta que puede tardar un máximo de dos segundos en apretar el botón después de haber sentido un momento de incomodidad).
2. Para cada tipo de aceleración, determinar las **máximas desviaciones** dentro del rango de tiempo establecido con respecto a las medias correspondientes (las medias son referidas al total de las mediciones, y no sólo al rango de tiempo del punto 1).

3. Dividir estos valores por la **desviación media** correspondiente (por ejemplo, la máxima desviación hallada para las aceleraciones del tipo “saltos” -vertical- se dividirá por la desviación media de la medición completa de aceleraciones del tipo “saltos” -vertical-).
4. Luego, el tipo de aceleración que presentara el valor más alto resultaba “beneficiado” con la asignación del evento analizado.
5. En el caso que el valor más alto fuera compartido por más de un tipo de aceleración, se adoptó el criterio de asignar el evento a ambos por igual.

Para automatizar el procesamiento de los datos, se volcó el procedimiento anterior en un algoritmo computacional y se lo implementó en el programa “GNU Octave 4.0.0”, de código libre.

Esta separación de los eventos entre las distintas “causas” se hace por el hecho de poder contar con la información de estos cuatro tipos de aceleración principales por separado, lo que permite un tratamiento mucho más rico de los datos, al tiempo que su distinción resulta casi directa -utilizando medios informáticos-, que no representan un incremento en la complejidad de procesamiento.

3. PROCESAMIENTO DE DATOS Y RESULTADOS OBTENIDOS.

El método de toma y procesamiento de datos desarrollado en el apartado “**METODOLOGIA DESARROLLADA**” presenta grandes ventajas al 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).

Como se explicó anteriormente, esto permite tratar los datos de manera muy profunda. A continuación se muestran algunas de las potencialidades del método del método.

Por ejemplo, es posible ubicar en un mapa los eventos registrados y localizar puntos críticos, en donde exista una mayor concentración de los mismos, con intenciones de determinar lugares con posibles deficiencias en la infraestructura (ver Figura 4).



Figura 4 *Distribución espacial de los eventos registrados.*

Si se concentra la atención en los tramos finales, llegando a la última parada, se observa una densidad de pulsaciones mucho mayor que en el resto del recorrido, esto da la pauta que pueden llegar a existir problemas en la infraestructura por esa zona, por lo que constituye un punto de inicio para un trabajo de mejora en la calidad del transporte.

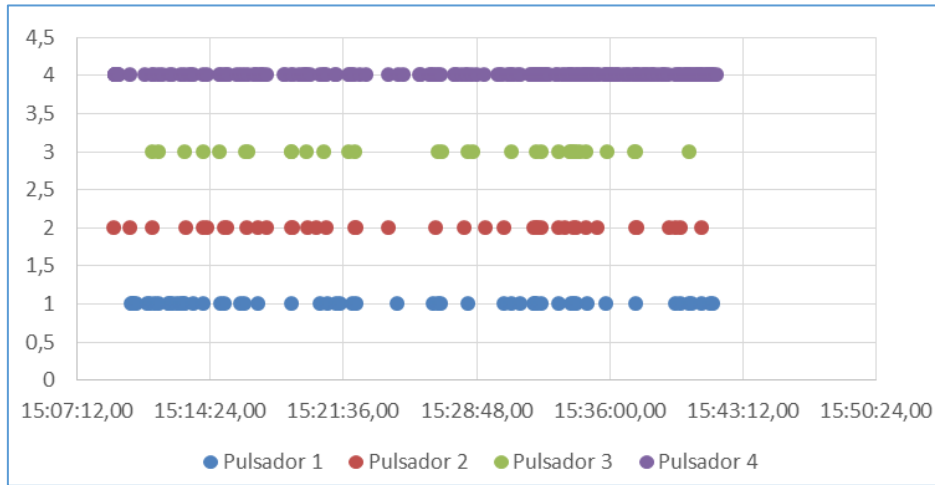


Figura 5 *Eventos registrados divididos por pulsador.*

Geográficamente, también se pueden localizar los puntos en los cuales se superan los límites de velocidad, en este caso 40 km/h (ver Figura). Estos eventos, de presentarse durante períodos de tiempo prolongados, pueden evidenciar perfiles de conducción inadecuados para la calidad del transporte. En la figura 6 se muestran todos los perfiles de velocidad desarrollados en el tramo de estudio.

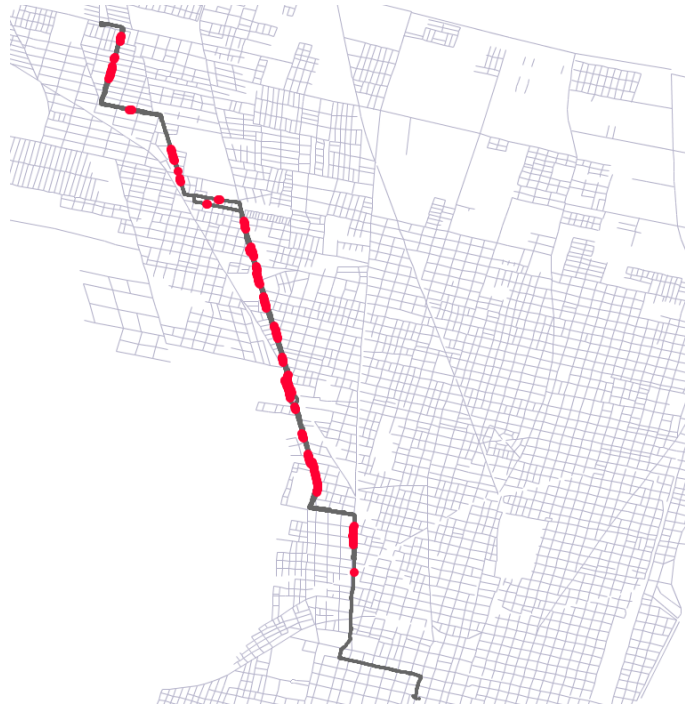


Figura 6 *Instancias de velocidades superiores a los 40km/h.*

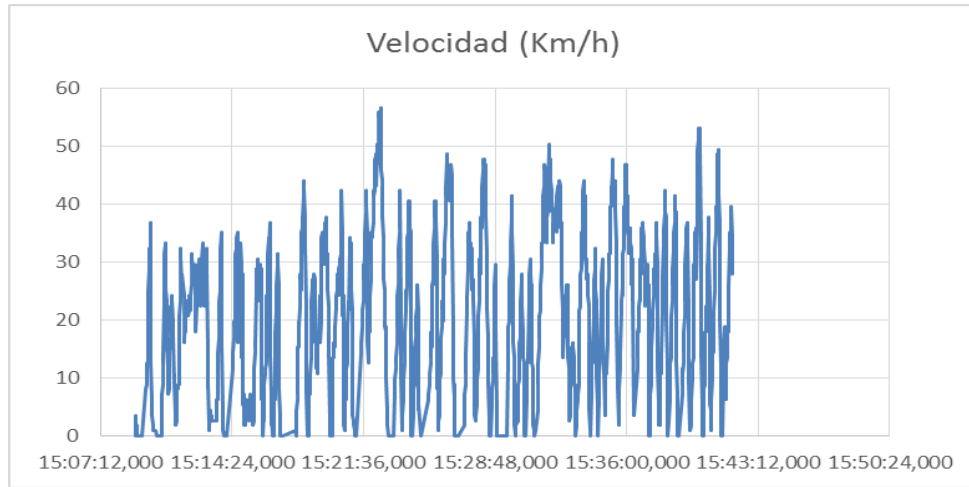


Figura 7 Perfil de velocidades desarrolladas en el tramo de estudio.

Por otro lado, utilizando los datos disponibles, para cada uno de los cuatro tipos planteados se pueden calcular la sensibilidad de la persona promedio frente a las variaciones de aceleración y los límites de comodidad en cada caso. Para esto, lo primero sería establecer rangos de aceleración (ya que las medidas de aceleración son variables continuas) y luego determinar qué pulsadores fueron accionados en cada uno de ellos para cada tipo de aceleración. Esto sirve para calcular el porcentaje de la muestra que se siente incómoda en cada rango de valores de aceleración.

El método permite también ver la distribución de aceleraciones, donde curvas con sus picos comprimidos lo más posible en los extremos se relacionan con aceleraciones más constantes y, por ende, una mejor calidad en el servicio.

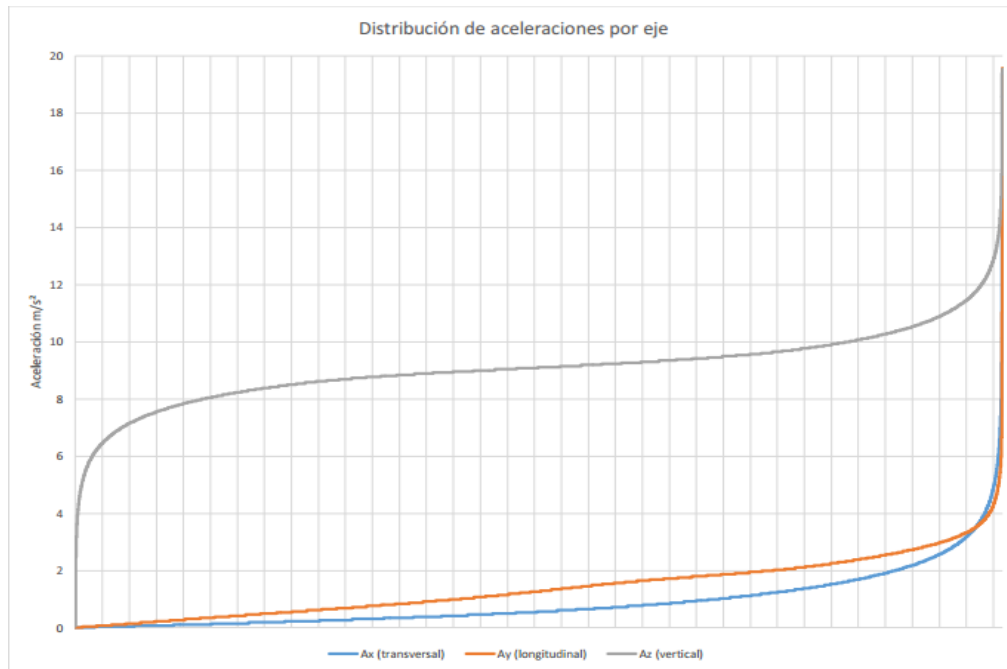


Figura 8 Distribución de aceleraciones

Esta forma de ordenar las mediciones permite, con herramientas informáticas, calcular percentiles que permitan decir, por ejemplo: “El 90% de las instancias de incomodidad en el eje vertical se registraron a un valor de aceleración igual o superior a los 11 m/s^2 ”, lo que da luego la posibilidad de comparar estos valores percentiles con las aceleraciones promedio registradas a lo largo de todo el recorrido, con el objetivo de ver qué tan cómodos o incómodos estuvieron los pasajeros al utilizar el transporte.

Finalmente, se pueden relacionar los valores de aceleración medidas, con las situaciones de incomodidad planteadas por los usuarios provistos de los pulsadores y los valores de velocidad, tal como se puede ver en la figura 9.

En ella en la parte superior se puede ver el perfil de velocidades (con los valores sobre la derecha), debajo las mediciones de aceleración (longitudinal en X, transversal en Y y vertical en Z) con sus correspondiente valor en el eje de la izquierda y en la parte inferior la distribución de utilización de los pulsadores.

Es importante notar que para la representación gráfica de las aceleraciones, solamente se muestran los 500 valores superiores en valor absoluto contra los más de 343000 valores tomados. De esta forma se pudo “limpiar” la gráfica y obtener resultados más claros. Por ejemplo, en la Figura 9 se puede observar que sobre el final del recorrido, el vehículo ingresa en calles que se encuentran en peor estado de conservación y por tal motivo se registran muchos valores por encima del “piso” elegido. Del mismo modo pueden verse tramos “blancos” donde las aceleraciones son menores a las del “piso” asignado. Sin embargo, en dichos tramos también se observan presiones de los pulsadores, que pueden surgir porque un posible error de correlación entre la acción del pulsador y la medición de las aceleraciones o bien porque los usuarios demoraron mayor tiempo en la decisión de presionar el botón.

El hecho que se trate de una prueba piloto, con solo 4 usuarios dotados de pulsadores, refleja que la ejecución del ensayo definitivo debe realizarse con un número superior de pulsadores para evitar las subjetividades de los usuarios.

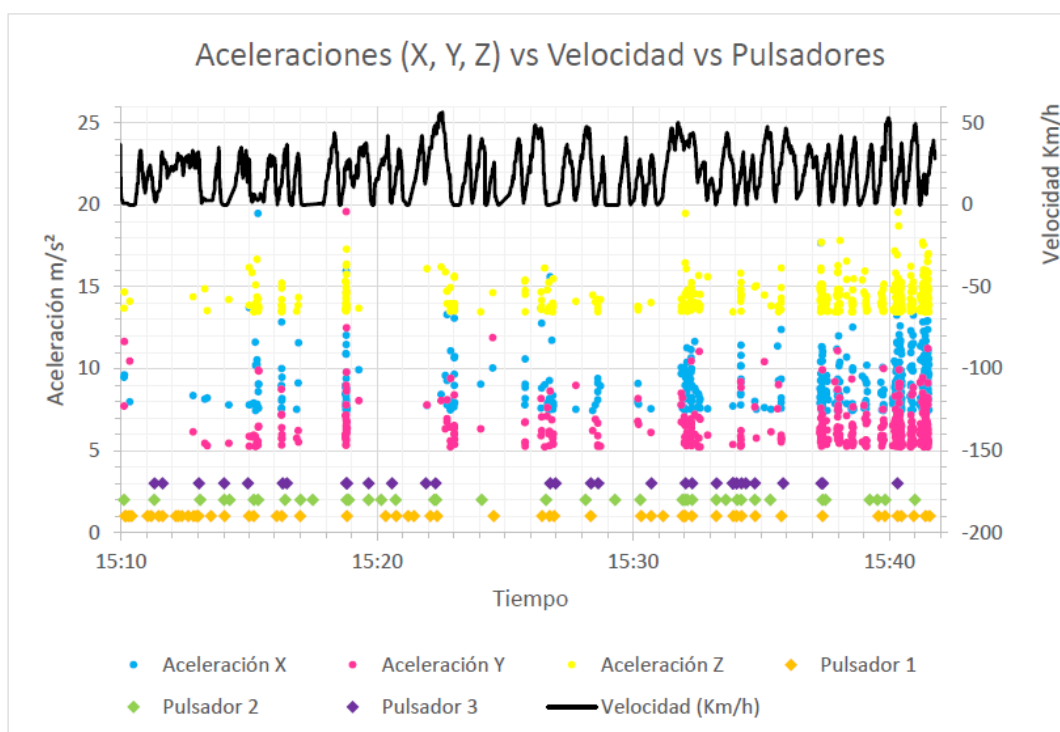


Figura 9 Relación de las aceleraciones con la velocidad del móvil y la acción de los pulsadores

4. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE ACCIONES FUTURAS.

El término calidad en el transporte público urbano ha ido evolucionando hasta llegar al grado de complejidad actual, donde ya no únicamente se habla de calidad en sentido genérico, sino que a su alrededor se han desarrollado numerosos conceptos, enfoques, modelos, procesos, métodos y herramientas.

En particular, este trabajo intentó identificar las relaciones que existen entre las aceleraciones sufridas por el usuario durante su viaje y la disminución de comodidad o confort.

El estudio relaciona los tres componentes de aceleraciones (longitudinal, transversal y vertical), las velocidades de circulación y la percepción de incomodidad de los usuarios (manifestada a partir de la presión de un pulsador), por medio de un sistema geo referenciado.

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

- **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, de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 2 Matriz de valoración de la incomodidad.

Porcentaje de pulsadores apretados	Percepción de la comodidad	Color
Más del 85%	Incomodidad alta	
Entre el 50 y 85%	Incomodidad media	
Menos del 50%	Incomodidad baja	

Relacionando los valores de aceleración realmente medidos en las denominadas “zonas rojas”, podrán determinarse los umbrales de confort de forma tal de obtener valores máximos de aceleraciones que no deberían superarse ya que generan situaciones de incomodidad alta.

Una vez definidos estos umbrales, y colocando un sensor de aceleraciones en el vehículo ligado a una señal lumínica o acústica, se podrán identificar conducciones con niveles de confort bajos.

Para la gestión de la calidad del servicio, y en función de la contabilización de las veces que se superó el umbral de comodidad, se podrán adoptar medidas tendientes a mejorar la prestación que van desde cuestiones punitivas, como generar la penalización de parte del Órgano de control del servicio, o bien administrativas de ejecución de programas de mejoramiento de la conducción.

- **Estudio de casos singulares:** la metodología desarrollada proporciona una gran cantidad de información para analizar, y a partir de ello tomar decisiones. En este sentido se pueden identificar los siguientes casos:
 - Repetición de valores de aceleración altos (particularmente en la componente vertical) en el mismo sector del recorrido, y en todos los coches de la empresa: representa que la incomodidad es independiente de la forma de manejo y que puede estar relacionada al estado de la infraestructura. Se debería evaluar la misma para poder identificar posibles problemas (baches, lomos de burro, imperfecciones en el pavimento, etc.).
 - Valores de aceleración elevados (componentes longitudinales y transversales) para un coche o para un solo conductor, lo que estaría caracterizando una “conducción agresiva” de parte del chofer, por lo que se podría plantear una capacitación en manejo defensivo o eventualmente una sanción al mismo.
 - Valores altos de aceleración (componentes variadas) para un vehículo en particular: podría identificar que el coche posee problemas en algún sistema mecánico que afectan la comodidad de los pasajeros, como por ejemplo los frenos, la suspensión, los neumáticos, etc.

En síntesis, 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.

Por último, la factibilidad de conocer los “umbrales” de comodidad, asociados a aceleraciones permitirá 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.

Referencias:

[1] Castellanos, J. C., Fruett, F. (2014). "Embedded system to evaluate the passenger comfort in public transportation based on dynamical vehicle behavior with user's feedback".

[2] Thommen Karimpanal George, Harit Maganlal Gadhia, Ruben S/O Sukumar (2013) "Sensing discomfort of standing passengers in public rail transportation systems using a smart phone"