

Estimación de la Velocidad de un Móvil Mediante el Procesamiento del Sonido Pasante

Gustavo Monte, Norberto Scarone, Damián Marasco, Ariel Agnello

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional del Neuquén
Plaza Huinca, Argentina
Email: gmonte@frn.utn.edu.ar

Resumen—Este trabajo presenta la aplicación de una técnica de muestreo inteligente de señales sensoriales a la estimación de la velocidad de un móvil procesando la señal de audio que se captura cuando pasa por el punto de adquisición. La razón de desarrollar este sistema es para obtener parámetros de flujo vehicular en proyectos de señalización vial inteligentes. El sonido en la banda audible es procesado teniendo en cuenta la implementación en microcontroladores embebidos en la aplicación real. Se basa en dos procesos fundamentales. El primero es la determinación del sonido característico de un móvil y el segundo, un detector de envolvente robusto. La rapidez de cambio de la envolvente de la señal es la portadora de la información de velocidad. Los desafíos que enfrenta la implementación de este sistema son señales interferentes de origen diverso y la gran variedad del tipo de señal que generan distintos tipos de vehículos. Se presentan los algoritmos diseñados y resultados experimentales en condiciones reales de operación.

Keywords—muestreo inteligente; procesamiento de audio; señalización inteligente; filtrado no lineal;

I. INTRODUCCION

La estimación de las velocidades de los vehículos y el flujo de tráfico por las calles y/o rutas de nuestras ciudades, hoy en día, es una necesidad. Se estima que para el 2030 dos terceras partes de la población vivirán en áreas urbanas [1]. La alta densidad de tránsito vehicular requiere de soluciones inteligentes para facilitar la movilidad y ahorrar energía. Existen diversos métodos utilizados para medir la velocidad de un móvil. Entre los más importantes se pueden mencionar los basados en el procesamiento de imágenes [2], [3], los que utilizan identificación de UHF [4] y aquellos basados en tecnologías de radar, láser y ultrasonidos. En el presente trabajo se analiza una solución alternativa a las ya existentes de muy bajo costo y de gran versatilidad. Se basa en el procesamiento digital del sonido de un móvil al pasar por el punto de adquisición. Se obtiene en tiempo real el flujo de vehículos por unidad de tiempo y sus velocidades. Algunas de las potenciales aplicaciones de este desarrollo pueden ser enmarcadas en soluciones viales como por ejemplo, dotar de inteligencia a un controlador de señalización vial. Al contar con esta información, el controlador podría regular los tiempos de las vías en función de la densidad de tránsito, que cambia notablemente durante el transcurso del día. También

podría utilizarse en señalización interactiva distribuida sobre rutas, advirtiendo a los conductores sobre zonas de velocidad de circulación reducida, o para estudios de perfiles de densidad de tránsito.

El trabajo está organizado de la siguiente forma. En la siguiente sección se presenta un resumen de una técnica de muestreo de señales sensoriales desarrollada por nuestro grupo de desarrollo que es base de una norma mundial para sensores inteligentes. Este muestreo proporciona una plataforma para la extracción de la información presente en una señal de una manera ágil y explícita. En las secciones siguientes, se analizan los dos algoritmos principales que confluyen a la detección de un móvil pasante y a la inferencia de su velocidad. El primero es una caracterización del sonido de un móvil acercándose al punto de medición y el segundo es la estimación de la velocidad basado en el análisis de la envolvente detectada. Por último se presentan resultados experimentales basados en capturas con micrófonos tipo Electret de sonidos reales a diferentes velocidades.

II. TÉCNICA DE MUESTREO

A. Introducción

El proceso de adquisición de la señal sensorial debería facilitar el procesamiento de ella para inferir rápidamente el conocimiento. El subsistema de muestreo es un componente híbrido en el sentido que su entrada es una señal analógica y su salida digital y es el único elemento de interfase con el mundo real. En 1949, Shannon publicó el documento “*Communication in the Presence of Noise*” que estableció las bases de la teoría de la información. Después de este hito, la teoría de muestreo había llegado a lo que parecía ser un estado muy maduro, con investigaciones de alto componente matemático pero con un bajo o nulo impacto en el procesamiento de señales y comunicaciones. Recientemente, se ha experimentado una fuerte recuperación de la temática, especialmente con el desarrollo del muestreo compresivo [5], lo que demuestra que el tema no está agotado.

Si bien existen diferentes técnicas para muestrear una señal, la forma más simple y mayormente empleada es el muestreo uniforme. La razón de este hecho es que la variable temporal, generalmente el tiempo, es obtenida directamente

desde el índice de la secuencia de las muestras digitales. Pero la información que proporciona necesita ser procesada para ser entendida. El valor de la muestra en un instante es solo una parte de la información presente en la señal y si no se comete *aliasing* es una representación fidedigna de la señal analógica original. Sin embargo, la información presente en una señal está embebida en cómo se relacionan muestras en diferentes instantes de tiempo. La Fig. 1 sugiere una representación más completa de la señal digital, en donde se conozca desde el proceso de muestreo la relación entre muestras.

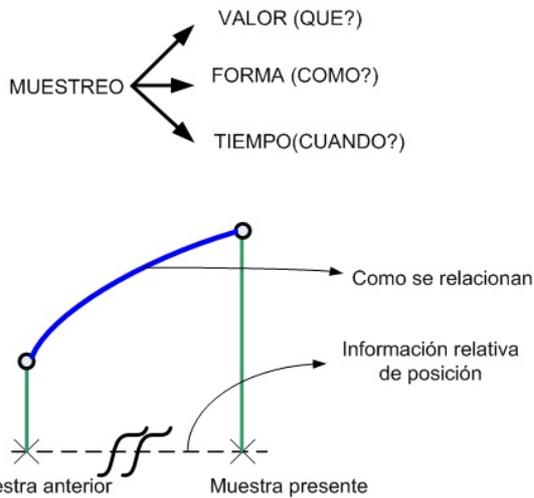


Fig. 1. El muestreo uniforme proporciona sólo el valor de la señal en un instante particular. Más información explícita es necesaria, especialmente como se relacionan las muestras entre sí para conformar una plataforma de inferencia de conocimiento.

La idea principal es representar la señal como una concatenación de funciones conocidas en lugar de secuencia de muestras. En una condición de sobremuestreo, el valor de la muestra pierde importancia relativa mientras que la comparación de su valor con muestras pasadas permite inferir comportamientos de trayectoria. Bajo esta condición, las trayectorias de la señal son suaves y se propone a la señal como originada por una función generatriz la cual se contrae, dilata y adapta para seguir la trayectoria de la señal.

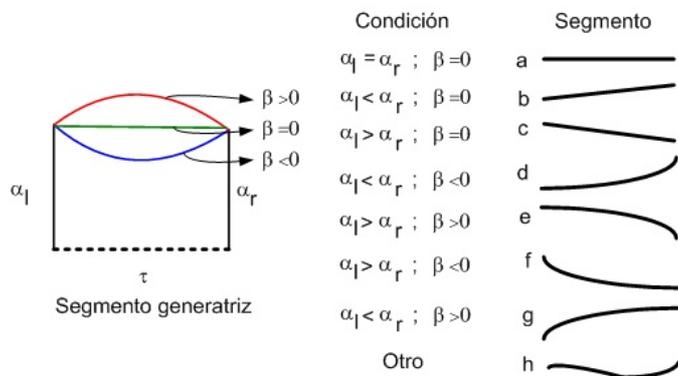


Fig. 2. Función generatriz de segmentos que mediante contracción, dilatación, escalamiento y traslación sigue la trayectoria de la señal.

En condiciones de sobremuestreo, las trayectorias se pueden simplificar a ocho clases de comportamiento que son representados por tres parámetros: α , β y τ , como se describe en la Fig. 2. Ahora la señal es una concatenación de segmentos elementales. Un algoritmo que compara la trayectoria real de la señal en tiempo real para determinar cuál es el segmento que mejor la describe fue propuesto en [6] y es empleado como la estructura básica para inferir conocimiento desde el muestreo de la señal. El algoritmo genera tres vectores *Marcas* (α), *Clases* (β) and *Tiempo* (τ), que llamamos en forma abreviada **MCT**. La señal real se compara contra una trayectoria lineal y en función del error generado por la trayectoria real, se termina un segmento cuando se supera una cota de error. En las clases **a, b** y **c** el segmento concluye debido a un límite práctico de tamaño máximo de segmento. La Fig. 3 muestra el resultado sobre una señal testigo, en donde la señal es reconstituida empleando segmentos lineales.

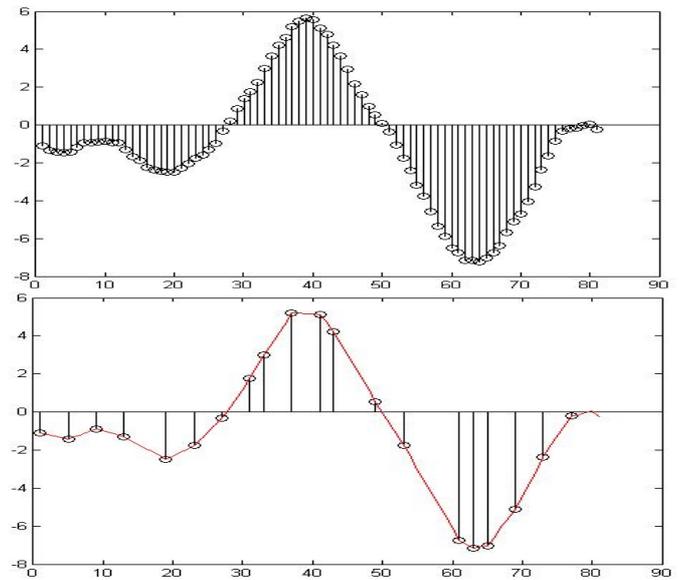


Fig. 3. Superior: Señal de prueba sobremuestreada. Inferior: Muestras que delimitan los segmentos luego de aplicar el algoritmo MCT con un error de interpolación del 0.5%. La envolvente es la reconstrucción empleando funciones lineales.

Como la señal fue sobremuestreada se genera redundancia entre muestras adyacentes. Las muestras esenciales o marcas son la que delimitan los segmentos.

La señal de la Fig. 3 se describe con la terna MCT como se muestra en la Tabla 1.

TABLE I. TERNA DE VECTORES MCT

M	C	T
-1.09	F	1
-1.44	G	5
-0.89	E	9
-1.3	F	13
...

La señal real vive en un subespacio que está representado por la trayectoria simplificada y acotada por un error, por lo tanto no se comete aliasing. La cantidad de muestras por segundo toma el rol de información en vez de parámetro de entrada y su valor es función del contenido espectral de la señal. Se infiere en forma inmediata, información fundamental para describir a una señal, como por ejemplo un máximo local, (la unión de un segmento ascendente y uno descendente), mínimos, puntos de inflexión y patrones específicos simplemente observando la secuencia de clases. Una descripción más completa se encuentra en [7].

En la siguiente sección se describen los algoritmos específicos basados en esta plataforma para estimar la velocidad de un móvil.

III. ANALISIS DE LOS ALGORITMOS

A. Características de las señales sonoras

La Fig.4 muestra una captura de un móvil a 60 kph. Se puede observar la forma de la envolvente que posee la información de la velocidad. Se desprende de la Fig. 4 que la estimación de la velocidad no es un proceso sencillo por dos motivos; el ruido propio del ambiente y la naturaleza ruidosa del crecimiento de la señal a medida que el móvil se aproxima al micrófono, como se aprecia en el zoom de la Fig. 4.

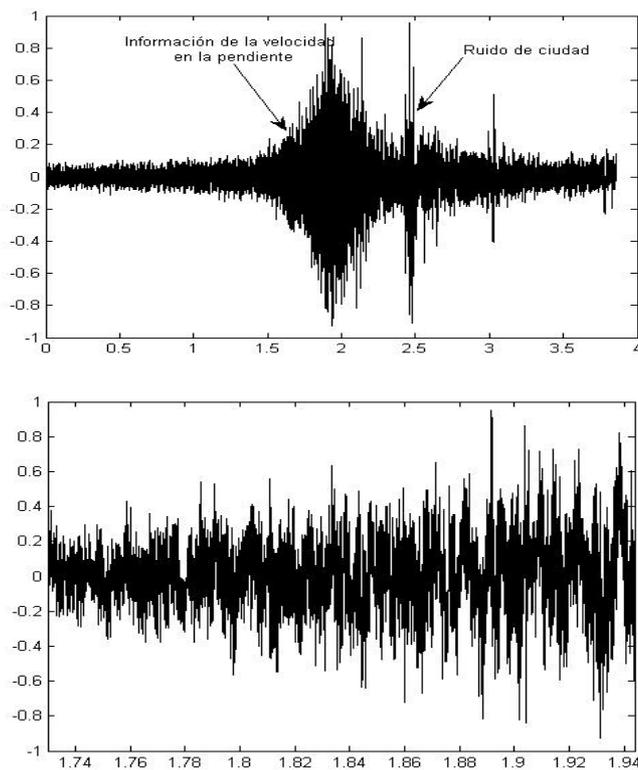


Fig. 4. Superior: Captura de un móvil a 60 KPH. Inferior: Zoom de la parte creciente de la información de velocidad. Frecuencia de muestreo: 44100 Hz.

El crecimiento de la intensidad sonora tiene una forma exponencial y el contenido espectral es amplio y uniforme.

B. Algoritmo detector de envolvente

El primer procesamiento es determinar la envolvente ya que en la forma de ella se encuentra la información de aproximación del vehículo.

Algoritmo envolvente:

- Sobremuestrear la señal.
- Cada T_i segundos:
- Aplicar muestreo MCT con error de interpolación bajo, del orden del 0.1%.
- Obtener los máximos locales.
- Calcular como salida, el valor promedio de los máximos.

En los resultados experimentales mostrados en este trabajo se emplearon los siguientes parámetros: $F_s=44100$ kHz, $T_i=20$ ms. En la Fig. 5 se muestra el resultado aplicado sobre una señal real.

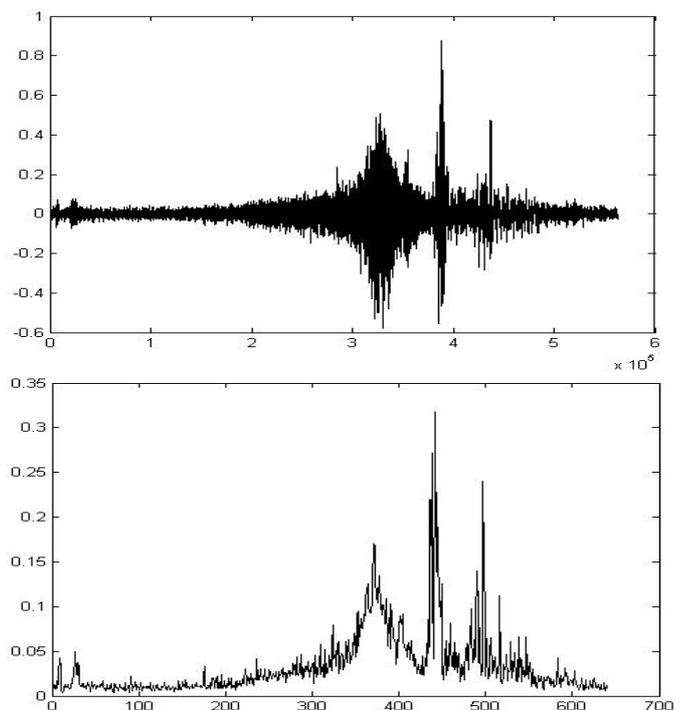


Fig. 5. Inferior: Resultado de algoritmo de envolvente aplicado a la captura superior. Velocidad del móvil 65KPH. Se captura la información de envolvente pero es muy sensible al ruido en amplitud.

Nótese que si bien la señal es sobremuestreada, no se almacenan las muestras sino que son procesadas y de cada 880 se obtiene un resultado. En la Fig. 5, 600 valores máximos promedio representan aproximadamente 5 segundos de señal. Dos observaciones importantes. La forma de la envolvente es capturada, pero el algoritmo es sensible al ruido en amplitud. Además la envolvente es todavía ruidosa como para calcular la pendiente.

C. Algoritmo discriminador de sonido

Se buscó un algoritmo basado en la estructura **MCT** que discrimine las características del sonido generado por un móvil. Se eligió como variable aleatoria a la cantidad de máximos locales por unidad de tiempo, un estimador del contenido espectral. Se ensayó el algoritmo MCT pero con un error grande de interpolación de manera tal que, alto contenido espectral pero con pequeña amplitud no genere una salida apreciable.

Algoritmo discriminador sonido móvil:

- Sobremuestrear la señal.
- Cada T_i segundos:
- Aplicar muestreo MCT con error de interpolación alto, del orden del 2%.
- Obtener los máximos locales.
- Calcular como salida, la cantidad de los máximos hallados.

En la Fig. 6 se muestra la respuesta del algoritmo a la señal de la Fig. 5.

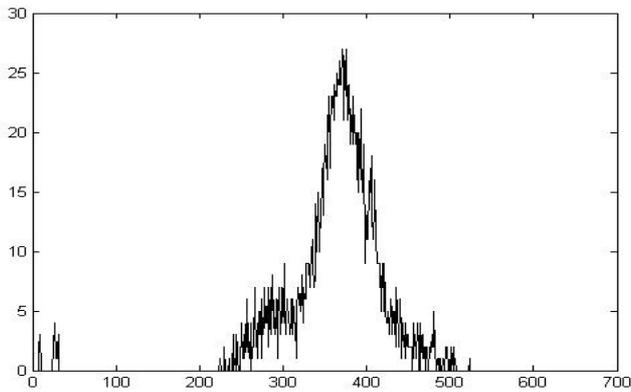


Fig. 6. Salida del algoritmo discriminador aplicado a la señal de la Fig. 5. Son minimizados segmentos de señal en donde la cantidad de máximos con alto valor de señal es baja y en donde la cantidad de máximos es alta pero con intensidad baja.

El algoritmo discriminador elimina señales no deseadas, entre las más importantes; ruido provocado por el viento y voces.

D. Combinación de los dos algoritmos y filtrado

Se ensayaron diferentes propuestas y las más simple y efectiva fue la de multiplicar los resultados de los dos algoritmos. De esta forma se enfatizan los segmentos en donde hay amplitud de envolvente con características de ruido tipo móvil. La Fig.7 muestra la señal resultante del producto correspondiente a la señal de la Fig. 5.

El proceso restante es filtrar la señal para eliminar ruido antes de calcular la pendiente. Todos los filtros lineales pasabajos corrompen la pendiente de la señal y por lo tanto destruyen la información útil.

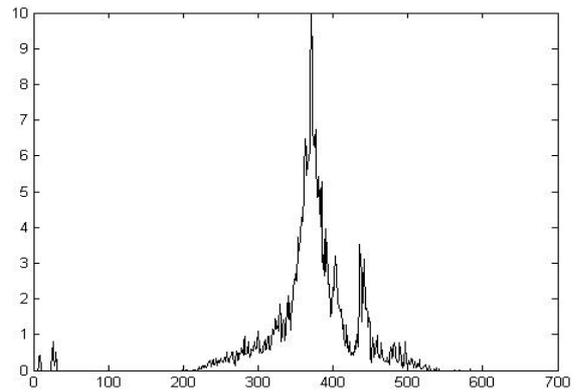


Fig. 7. Señal resultante del producto de las señales de los dos algoritmos. Resta filtrar la señal para estimar la velocidad del móvil.

En la Fig. 8 se observa la señal de entrada y salida de un filtro de promedio móvil de una ventana de 50 muestras en donde se observa el cambio de la pendiente de la señal de salida, lo cual resulta inaceptable.

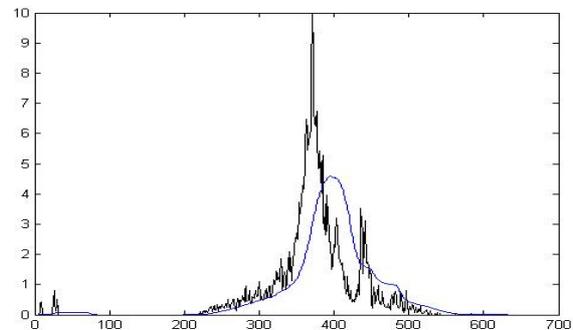


Fig. 8. Señal de entrada y salida de un filtro de promedio móvil de. Nótese la disminución de la pendiente de la señal de salida.

El filtro de mediana, que es simple de implementar, resulta ideal para esta aplicación. Su principal virtud es lograr un filtrado pasabajos sin afectar las pendientes de las transiciones.

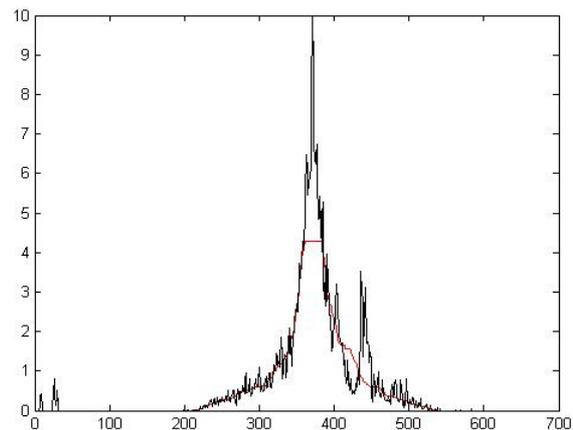


Fig. 9. Señal de entrada y salida de un filtro de mediana, ventana=50 muestras. Nótese la preservación de la pendiente.

La forma de la punta de la señal de entrada es destruida por los dos tipos de filtros, pero el filtro de mediana mantiene intacta la pendiente.

E. Filtrado MCT y análisis de la pendiente

El proceso de muestreo MCT permite reconstituir, empleando la información de los tres vectores, la señal entre las muestras esenciales. Dado que la señal es reconstituida empleando trayectorias simplificadas, se pierde información en alta frecuencia. La señal puede volver a muestrearse iterando el proceso un número arbitrario de veces. La señal de salida del filtrado mediano es iterada con el muestreo MCT un número N de veces hasta lograr una suavidad en la trayectoria que es inferida por la secuencia de clases. La Fig 10 muestra la respuesta del filtro mediana y la salida de filtro de iteración MCT para cinco iteraciones.

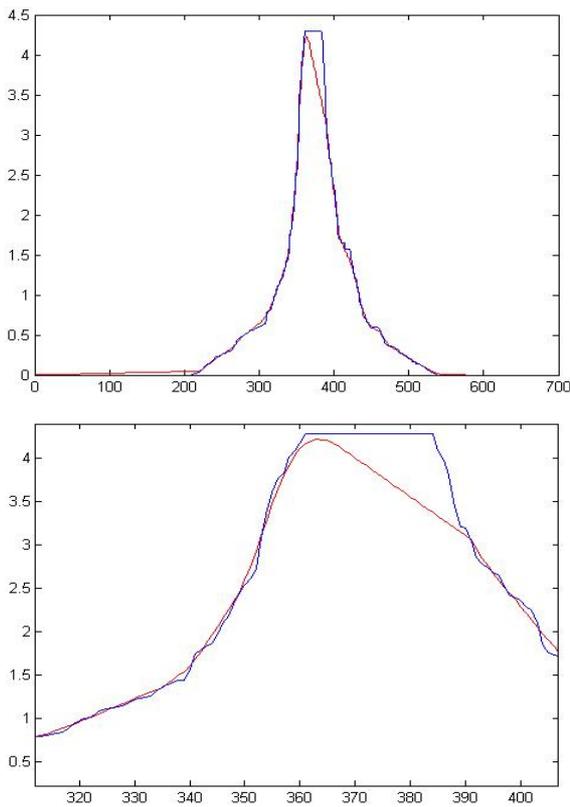


Fig. 10. Superior: Señal de salida del filtro mediana filtrada con el filtro MCT. Inferior: zoom de la pendiente de subida. Filtro MCT con reconstrucción por interpolación lineal, cantidad de iteraciones=5, error=0.1%.

Se comprueba empíricamente que el filtrado por iteración MCT no destruye la pendiente de la señal. La salida del filtro MCT es analizada para determinar la pendiente. La secuencia de clases de la señal de la Fig. 10 es:

Clase=[d,d,d,d,g,g,d,d,g,d,d,d,d,d,d,d,g,g,g,g,g,e,e,ef,f,e,f,f,e,f,f,f,f,f]

La unión de los segmentos “ge” determina la posición del máximo. La pendiente es calculada empleado los segmentos tipo “d” previos a los del tipo “g”.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se realizaron capturas de sonidos de vehículos a velocidades entre 40 y 70 KPH, empleando diferentes móviles. Los datos fueron capturados a una frecuencia de muestreo de 44100 KHz, empleando directamente la placa de audio estándar de computadoras portátiles. El micrófono empleado fue del tipo Electret de bajo costo.

Todos los algoritmos ensayados se basan en la estructura de muestreo MCT, salvo el filtro de mediana. La función del filtro de mediana es la eliminar ruido que tiene las características de un móvil pasante, pero que no se sostiene el tiempo suficiente para ser considerado un móvil. La combinación de los algoritmos propuestos proporciona una detección muy confiable. Resta profundizar los ensayos intensivamente sobre plataformas con microcontroladores.

En la Fig. 11 se observan valores de pendiente hallados en función de distintas velocidades en donde la pendiente fue calculada empleando el promedio de los segmentos tipo “d” previos al primer segmento tipo “g” que está involucrado en el máximo. Es importante remarcar que la unión de un segmento “d” con uno “g” es un punto de inflexión.

Los segmentos tipo “g” previos al máximo son consecuencia del filtrado MCT en la zona en donde el filtro de mediana ha producido un recorte abrupto. Todos los algoritmos son aptos para ser implementados en microcontroladores de uso general.

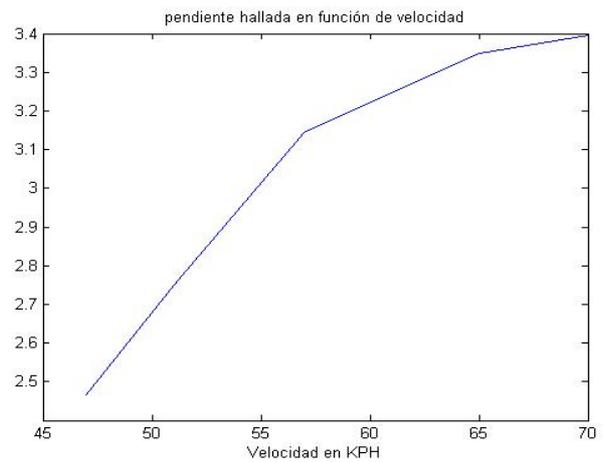


Fig. 11. Pendiente hallada del perfil sonoro en función de la velocidad. La pendiente es calculada como el promedio de los segmentos tipo “d” previos al máximo en el punto de inflexión “dg”.

En la Fig. 12 muestra la señal de salida del algoritmo completo para 40 segundos de captura en la cual pasan dos vehículos en la primera mitad, y el resto es ruido provocado por el viento y otros tipos de sonidos comunes en una ciudad. Se observa que el ruido es prácticamente eliminado. Los picos por encima de un umbral son considerados como vehículos pasantes.

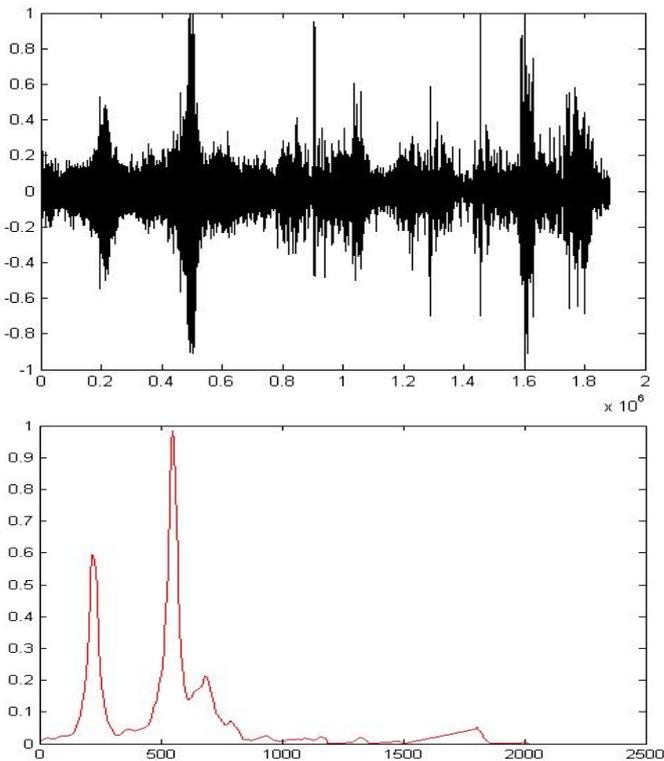


Fig. 12. Captura de 40 segundos. En los primeros 10 segundos pasan dos móviles distintos. El resto de la señal es ruido provocado por el viento e interferencias propias de una ciudad.

Los resultados presentados fueron procesados en computadoras personales empleando software de simulación y empleando capturas de señales reales.

El algoritmo de muestreo **MCT** se ha desarrollado en lenguaje C para microcontroladores ARM Cortex M3 y en lenguaje Processing para la plataforma ARDUINO. La estructura de software, apta para tiempo real, consiste en un doble buffer de vectores **MCT**, como se muestra en la Fig. 13. Los procesos de detección de máximos y secuencias específicas de clases se realizan en tiempo real y se habilitan cada vez que se genera una nueva terna **MCT** en el buffer activo. Otros algoritmos, como por ejemplo el filtrado pasabajos por iteración, requieren de un buffer completo estático para su procesamiento. Este algoritmo se ejecuta mientras se está llenando el buffer alternativo. Con esta estructura las tareas que desarrollan los algoritmos se ejecutan en forma concurrente.

V. CONCLUSIONES

La congestión en los centros urbanos será uno de los grandes desafíos que tendrá que enfrentar el hombre en los próximos años. Se requerirá de soluciones realmente inteligentes que exceden largamente a simples semáforos. La implementación de soluciones tecnológicas se ven afectadas por dos principales problemas, el costo y el consumo energético. El procesamiento por sonido tiene la fortaleza que es de muy bajo costo y que el sensado es totalmente pasivo, lo que permite implementaciones portátiles o de bajo consumo.

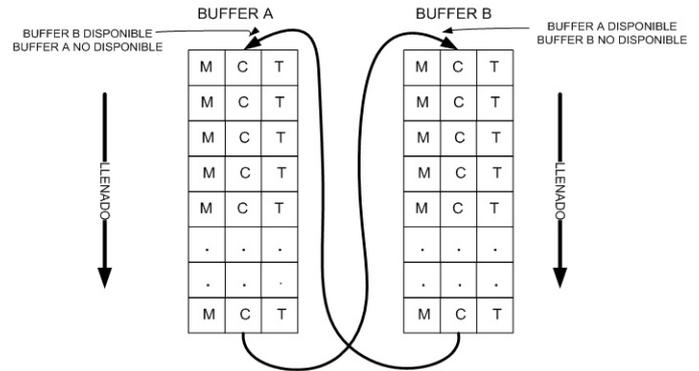


Fig. 13. Estructura de información propuesta para los vectores **MCT** apto para tiempo real y procesos iterativos como por ejemplo el filtrado **MCT**.

Los sensores inteligentes basados en procesamiento de video, las rutas y los móviles inteligentes son los paradigmas sobre los cuales se encontrarán soluciones a esta problemática. Mientras tanto, la solución propuesta en este trabajo sirve para dotar de algo de inteligencia a un semáforo que controla una intersección que tiene una densidad vehicular que varía en un mismo día desde 100 autos/hora a 1200 autos/hora y mantiene los mismos parámetros operativos para las dos condiciones extremas.

El muestreo inteligente **MCT** es la base del estándar propuesto para sensores inteligentes ISO/IEC/IEEE 21451-001 que está siendo desarrollada por un grupo mundial liderado por el grupo de investigación y desarrollo sobre sensores inteligentes de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional del Neuquén.

REFERENCIAS

- [1] Siemens. "Soluciones inteligentes para el tráfico de hoy y del mañana" <https://www.swe.siemens.com/spain/web/es/industry/mobility/Documents/traffic.pdf>.
- [2] Maduro, C. ; Batista, K. ; Peixoto, P. ; Batista, "Estimation of vehicle velocity and traffic intensity using rectified images" J. Image Processing, 2008. ICIP 2008. 15th IEEE International Conference on DOI: 10.1109/ICIP.2008.4711870, 2008 , pp. 777 – 780.
- [3] H. A. Rahim, U. U. Sheikh, R. B. Ahmad and A. S. M. Zain. "Vehicle Velocity Estimation for Traffic Surveillance System". World Academy of Science, Engineering and Technology Vol:4 2010-09-22.
- [4] Ling-fei Mo ; Chun-fang Qin ; Xiao-fen Tang "Velocity Analysis for UHF RFID Vehicle License Plate" Optoelectronics and Image Processing (ICOIP), 2010 International Conference on Volume: 2: 2010 pp. 722 – 725.
- [5] "An introduction to Compressive Sampling". Emmanuel J. Candès Michael B. Wakin. IEEE Signal Processing Magazine. pp 21-30.2008.
- [6] G. Monte, "Sensor Signal Preprocessing Techniques for Analysis and Prediction" Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE. pp 1788-1793. ISBN 978-114244-1766-7
- [7] Gustavo Monte, Juan Ignacio Pastore, Virginia Ballarin, Norberto Scarone. "Muestreo Integral de Señales Sensoriales". Congreso Bial IEEE Argentina ARGENCON 2014. Junio 2014.