

MEDICIÓN DEL EFECTO DOPPLER EN TRÁFICO RODADO

Méndez Sierra, J.A.*; Montero Moreno, I.M.; Vílchez Gómez, R.; Barrigón Morillas, J.M.;
Gómez Escobar, V.; Carmona del Río, F.J.; Rey Gozalo, G.; Prieto Gajardo, C.

Laboratorio de Acústica, Departamento de Física Aplicada, Escuela Politécnica,
Universidad de Extremadura.

Avda. de la Universidad s/n, 10003, Cáceres (Spain)

Telephone: +34 927 25 71 95; Fax: +34 927 25 72 03

E-mails: jmendez@unex.es*, ivmontero@alumnos.unex.es, vilchez@unex.es, barrigon@unex.es,
valentin@unex.es, jcarmona@unex.es, guille@unex.es, carlosprieto@unex.es

Resumen

Se han probado tres métodos diferentes para medir el Efecto Doppler al paso de vehículos. El primero, mediante sonómetros por bandas de 1/3 de octava, carece de resolución suficiente en frecuencias. El segundo, mediante Noise Book, mejora ampliamente la resolución frecuencial, aunque presenta deficiencias en el micrófono de grabación. El tercero mediante Symphonie soluciona ambos problemas.

Con los dos últimos métodos hemos podido determinar la velocidad de paso de un vehículo emitiendo tonos de frecuencia específica por los altavoces del coche. Sin la emisión de tonos puros es difícil determinar la velocidad a partir de los espectros grabados al paso del vehículo.

Palabras-clave: Efecto Doppler, resolución frecuencial, desplazamiento frecuencial, velocidad del emisor.

Abstract

We tested three different methods to measure the Doppler Effect to passing vehicles. The first through sonometers, with bands of 1/3 octave, lacks sufficient resolution in frequency. The second, by Noise Book, greatly improves the frequency resolution, but is weak in the recording microphone. The third through Symphonie solves both problems.

With the latter two methods we have determined the velocity of passage of a vehicle emitting specific frequency beep tones from the speakers of the car. Without the emission of pure tones is difficult to determine the velocity from the spectra recorded when the vehicle pass.

Keywords: Doppler Effect, frequency resolution, frequency shift, emitter speed.

PACS no. 43.28.Bj, 43.58.Fm

1 Introducción

¿Quién no ha escuchado alguna vez el sonido de un coche al pasar por delante suyo, la sirena de una ambulancia que nos adelanta o incluso los gritos de la gente subida en una montaña rusa?

Todos nos hemos fijado cómo en el momento en el que el vehículo fuente de sonido pasa por delante de nosotros hay un cambio en la frecuencia percibida. Sin embargo, tal vez estamos tan acostumbrados a ello que nunca nos hemos parado a pensar en cómo ocurre eso. ¿Acaso en ese momento la sirena emite en un tono distinto? ¿O los pasajeros del vagón cambian el tono de su grito, como un coro, en el instante exacto?

Obviamente no son ninguna de estas razones las que explican estos sucesos. Fuera cual fuera el ejemplo exacto que hizo recapacitar a Christian Doppler [1], su explicación, mucho más científica, es la base de éste estudio.

La explicación de este fenómeno, que se da para cualquier emisor de ondas (luz, sonido, etc.) y que es conocido como Efecto Doppler [2-3] debido a su formulador, ha ayudado a numerosos descubrimientos y conocimientos astronómicos, resulta de gran utilidad en aplicaciones médicas y sirve como medio de control de la velocidad de los vehículos en las carreteras de todo el mundo [4].

Este trabajo es un estudio experimental de cómo funciona el Efecto Doppler en los vehículos motorizados. Además puede servir de guía para otros estudios posteriores en la misma línea puesto que la problemática con la que nos hemos encontrado es grande, y la información y estudios de este campo dentro del Efecto Doppler pequeña.

La intención con la que comienza el estudio es demostrar experimental y rigurosamente el efecto Doppler. Secundariamente queríamos calcular con datos experimentales las velocidades de los vehículos registrados (proceso que ya efectúan los radares de los cuerpos de seguridad del estado pero con método diferente) aunque no ha sido posible si el vehículo móvil no emitía una señal de frecuencia controlada.

Sin embargo esto es también un aplauso al increíble sistema auditivo humano, cuya capacidad es en algunos términos superior a la de las máquinas más precisas que somos capaces de diseñar.

En la sección de Metodología describiremos las ecuaciones teóricas, el equipamiento empleado, y las técnicas y lugares de medición. En el apartado de Resultados y Discusión mostraremos los diferentes espectros obtenidos según el sistema de grabación empleado: Sonómetro 2250 Brüel & Kjær, Noise Book o Symphonie. Finalmente daremos unas conclusiones generales, reflejando lo que ha sido nuestra experiencia al intentar medir el Efecto Doppler, para tráfico rodado.

2 Metodología experimental

2.1 Cálculos de las frecuencias y velocidad del emisor

Asumiendo que el desplazamiento del emisor respecto del receptor es aproximadamente rectilíneo, y dado que el sistema de medida se encuentra estático, y por lo tanto la velocidad del receptor es nula, tendremos entonces las siguientes ecuaciones [2-3]:

$$\Delta f = f_{acercándose} - f_{alejándose} = \left(f \frac{c}{c - v_E} \right) - \left(f \frac{c}{c + v_E} \right) = f \frac{2 \cdot c \cdot v_E}{c^2 - v_E^2} \quad (1)$$

Donde $f_{acercándose}$ y $f_{alejándose}$ representan las frecuencias que medimos cuando el vehículo emisor se acerca o aleja respectivamente, respecto al receptor quieto, f es la frecuencia de emisión, c la velocidad del sonido en condiciones ambiente, y v_E la velocidad del emisor.

A partir de la ecuación (1) podemos calcular la velocidad del emisor despejando:

$$v_E = \frac{-2 \cdot f \cdot c + \sqrt{4 \cdot c^2 (f^2 + \Delta f^2)}}{2 \cdot \Delta f} \quad (2)$$

2.2 Equipamiento utilizado

✚ Medidas mediante sonómetro:

- Sonómetro 2250 Light de Brüel & Kjaer
- Calibrador Brüel & Kjaer Modelo 4231
- Software BZ-7132, registrador en bandas de octava y tercio de octava con periodos de integración de un segundo, y software BZ-5503 programa para cargar en el ordenador los datos del sonómetro, ambos de Brüel & Kjaer.

✚ Primer equipo de grabación de sonido compuesto por:

- Ordenador portátil Fujitsu Siemens, B series LIFEBOOK del equipo Noise Book
- Auriculares microfónicos binaurales
- Software de grabación "Noise Book"
- Software de análisis "Cool Edit Pro 2.0"

✚ Segundo equipo de grabación:

- Sistema de grabación Symphonie
- Software de análisis: software para Symphonie de 01 db (dbBati y dbFA)

2.3 Método de medición

Las mediciones con tonos controlados fueron realizadas en una carretera cerrada a tal efecto, en un lugar externo y apartado de la ciudad de Cáceres (Recinto Ferial). Empleando un vehículo modelo Seat Ibiza 1.9 TDI, se grabaron en el reproductor mp3 del equipo de sonido del coche los siguientes tonos puros: 90, 357, 1430, 2228 y 3567 Hz. También se empleó un tono compuesto (1, 3 y 5 kHz).



Figura 1 – Vista terrestre y aérea del primer lugar de mediciones (Recinto Ferial de Cáceres)

También se realizaron mediciones con el vehículo y los tonos, anteriormente mencionados, en el paseo central del campus universitario de Cáceres. En este caso también se midió el paso del vehículo experimental tocando la bocina, y el paso aleatorio de diferentes vehículos que circulaban por la zona.



Figura 2 – Vista terrestre y aérea del segundo lugar de mediciones (Campus Universitario de Cáceres)

Para la disposición del sonómetro y de los equipos de grabación se tuvieron en cuenta las directrices de la norma ISO 1996-2: 2007, [5].

3 Resultados y discusión

Presentaremos en primer lugar los resultados obtenidos con sonómetro, a continuación aquellos medidos con el Noise Book, y finalmente los correspondientes al equipo Symphonie.

3.1 Mediciones con sonómetro

Las mediciones de este apartado fueron todas realizadas en el primer lugar indicado de medición (Fig. 1). Mostramos en primer lugar los espectros, en tercios de octava y medidos cada 1 segundo, obtenidos al paso del vehículo emitiendo por altavoces un tono de 90 Hz (Fig. 3).

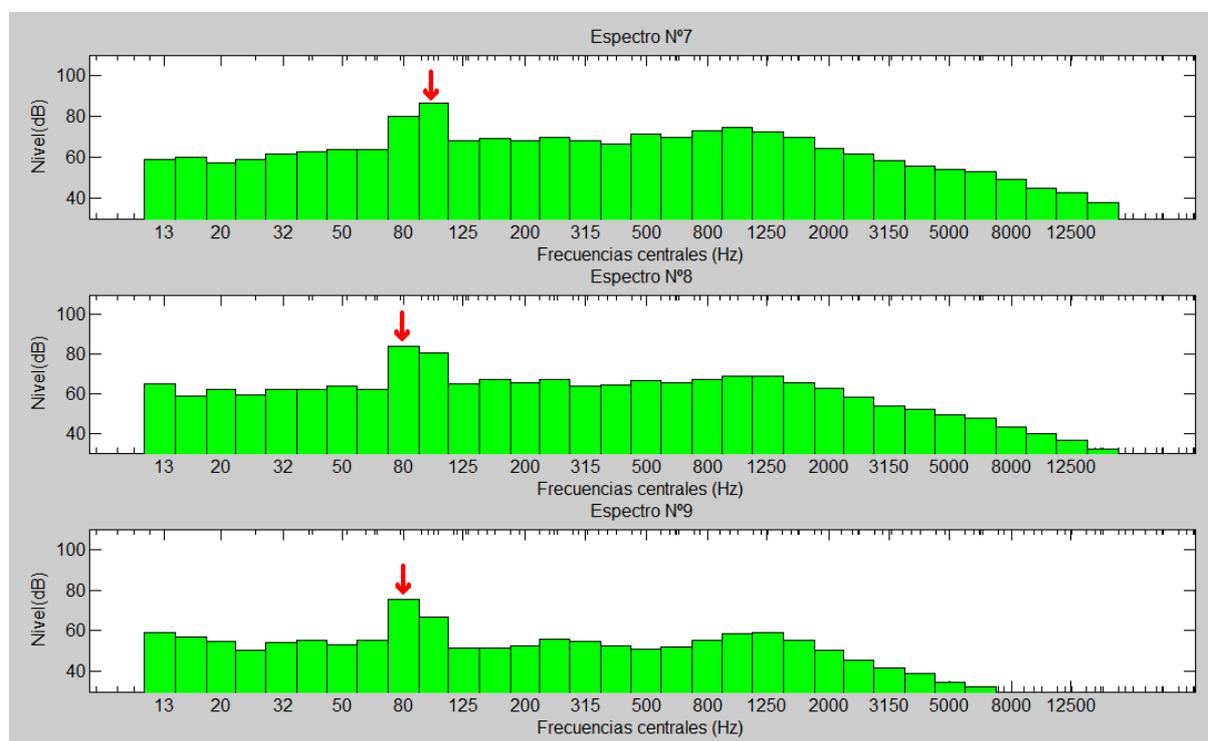


Figura 3 – Espectros medidos cada 1 segundo al paso del vehículo emitiendo por altavoces un tono de 90 Hz.

Dentro de la figura el espectro n° 7 corresponde al vehículo aproximándose al sonómetro, el espectro n°8 corresponde al vehículo recién pasada la posición de medida, y el n°9 al vehículo ya alejándose. Podemos observar el cambio que se produce de la banda de 100 a la de 80 Hz al paso del vehículo emisor (marcado con flechas en rojo).

Encontramos ya en esta técnica tres dificultades importantes: i) los espectros se graban con una periodicidad de 1 segundo, teniendo por lo tanto una secuencia de espectros que no es continua en el tiempo; ii) la resolución en tercios de octavas puede no ser suficiente para detectar el cambio en la frecuencia por efecto Doppler; iii) dentro de la banda de octava que cambia no podemos saber exactamente la variación numérica de frecuencia, lo más un rango de frecuencias.

A continuación mostramos los espectros, en tercios de octava y medidos cada 1 segundo, obtenidos al paso del vehículo emitiendo por altavoces un tono de 3547 Hz (Fig. 4).

Podemos observar una vez más el cambio de nivel entre las bandas de 3150 y 4000 Hz cuando el vehículo emisor se acerca (espectros n° 7 y 8) y cuando el vehículo se aleja (espectro n° 9), marcado con flechas rojas. Una vez más no podemos dar un valor numérico preciso del cambio de frecuencias, y menos cuando las bandas de octavas van siendo a frecuencias más elevadas, ya que, como se deduce de la definición de banda, su anchura va aumentando, aunque esto no se aprecie en el gráfico, en donde por utilidad las hemos representado todas con la misma anchura.

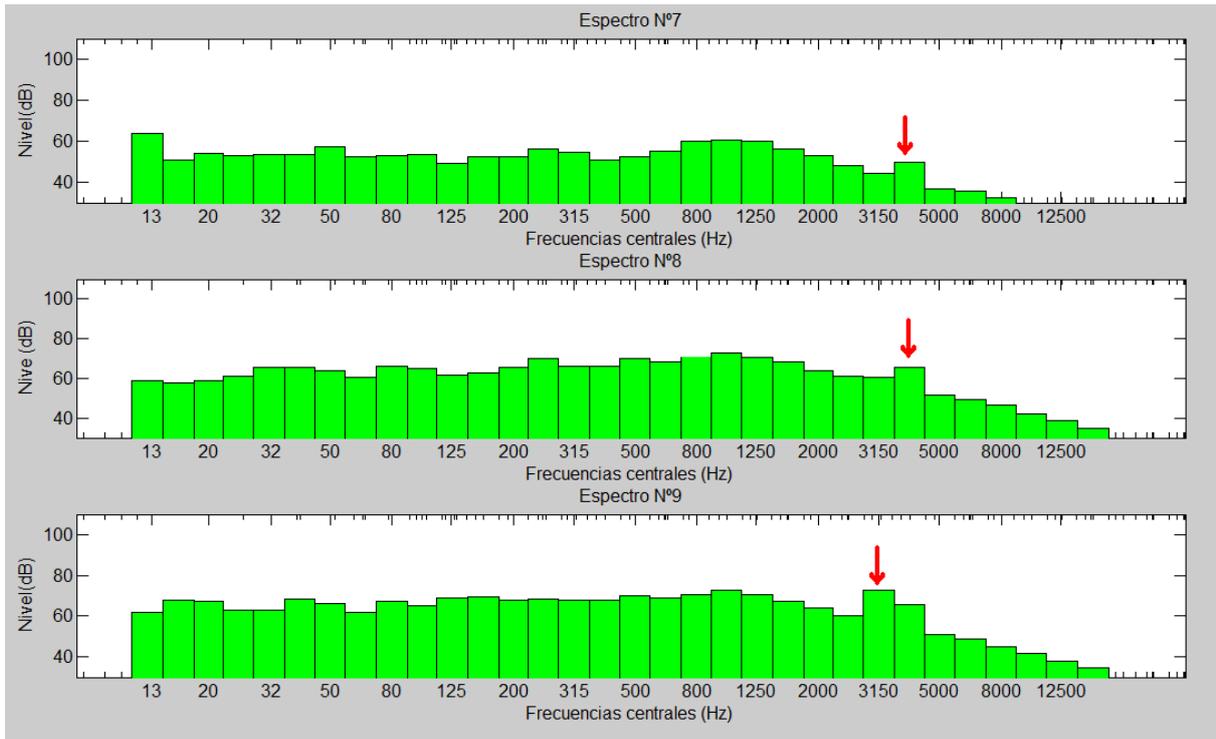


Figura 4 – Espectros medidos cada 1 segundo al paso del vehículo emitiendo por altavoces un tono de 3567 Hz

3.2 Mediciones con Noise Book

Todas las grabaciones de este aparatado fueron realizadas en el segundo lugar de medición (Fig. 2). Vemos primero lo registrado por el sistema al paso del vehículo emitiendo a 90 Hz.

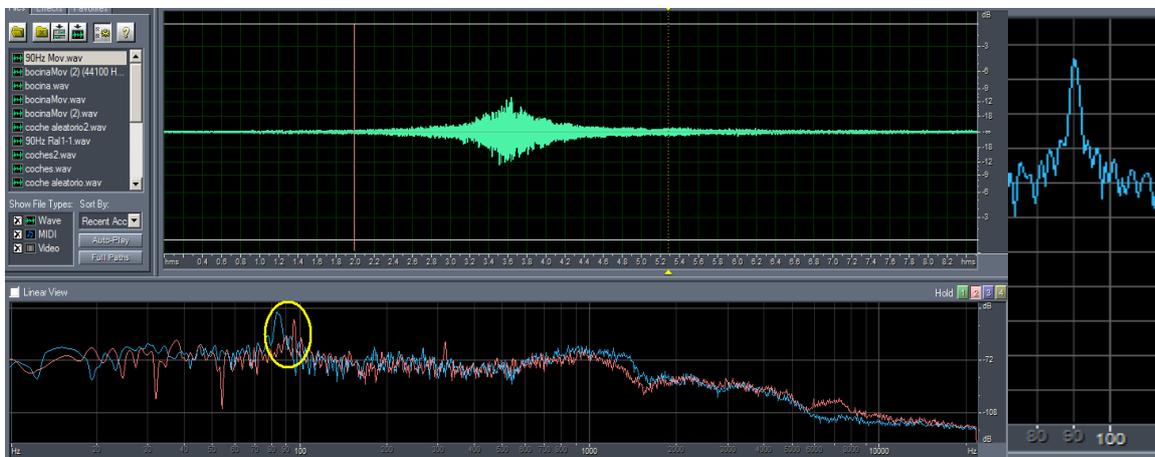


Figura 5 – Nivel de presión frente al tiempo (gráfico en verde) medido al paso del vehículo emisor. Pico a 90 Hz medido con el vehículo parado (gráfico derecha-azul). Espectros con el vehículo acercándose (rojo) y con el vehículo alejándose (azul)

El desplazamiento frecuencial encontrado debido al paso del vehículo es de $96.22 - 84.11 = 12.11\text{Hz}$ (véase círculo amarillo Fig. 5). Si sustituimos este valor en la Ecuación (2) obtendremos entonces la velocidad del vehículo emisor: $v_E = 83.75\text{ km/h}$. La velocidad marcada en el indicador del vehículo de prueba fue de $80 \pm 5\text{ km/h}$.

Veamos a continuación el mismo procedimiento para el paso del vehículo emitiendo un tono de 3547 Hz.

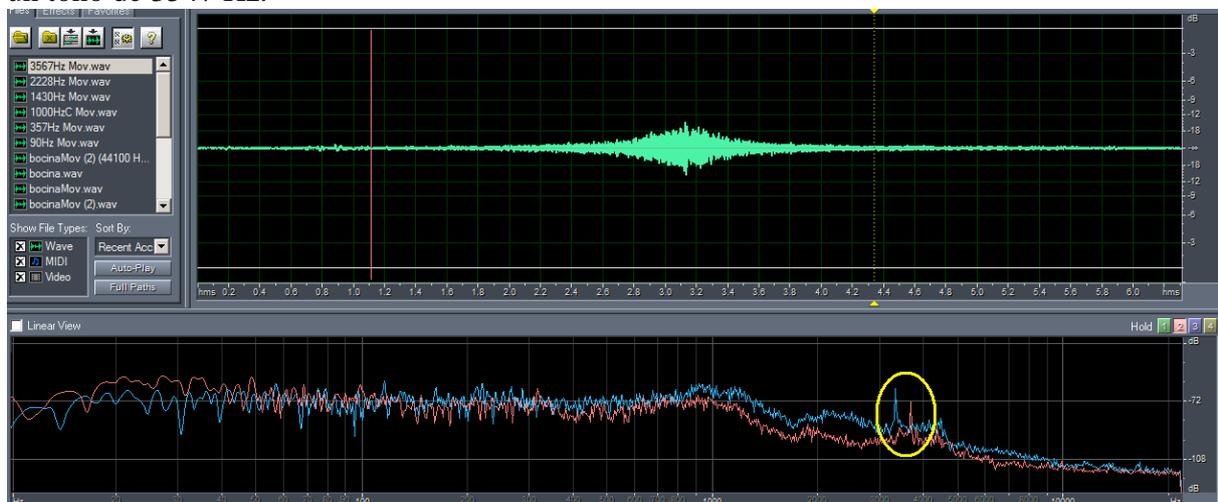


Figura 6 – Nivel de presión frente al tiempo (verde). Espectros del vehículo acercándose (rojo-naranja) y del vehículo alejándose (azul). Tono emitido a una frecuencia de 3547 Hz.

La variación frecuencial es $3733-3374= 359\text{ Hz}$ (véase círculo amarillo en Fig. 6), y la velocidad estimada para el vehículo emisor es de 62.89 km/h . La velocidad indicada en el velocímetro del vehículo era de $65 \pm 5\text{ km/h}$.

A continuación podemos ver los espectros grabados al paso del vehículo emisor tocando la bocina.

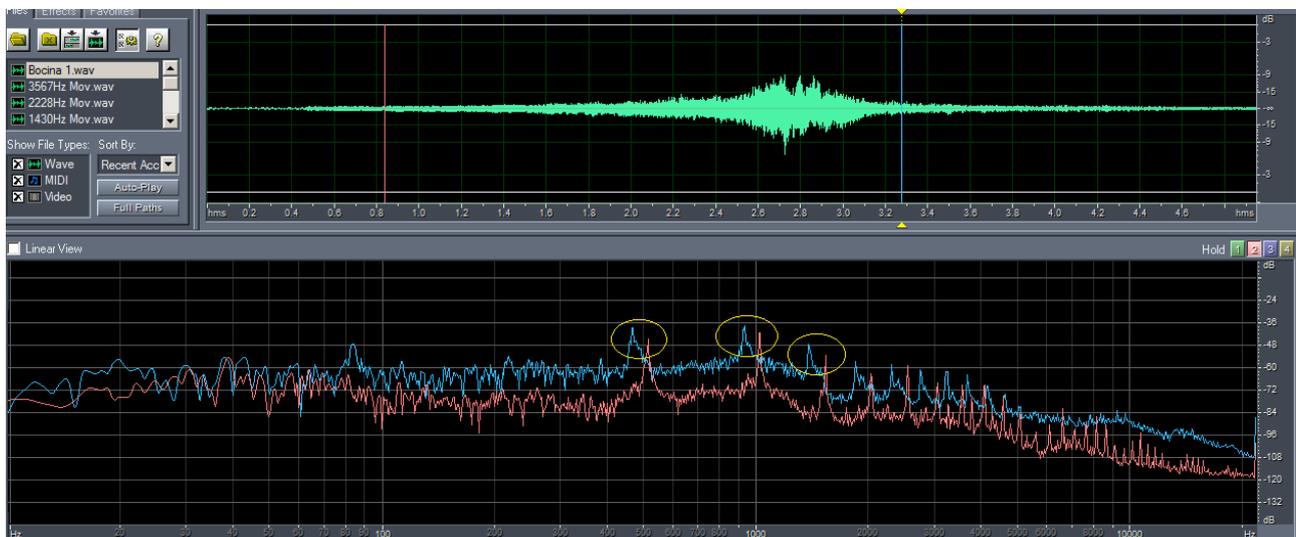


Figura 7 – Niveles de presión y espectros correspondientes al paso del vehículo emisor tocando la bocina.

Podemos observar las diferencias de frecuencias encontradas para los picos marcados con un círculo amarillo, y por lo tanto las velocidades calculadas en la siguiente tabla:

Tabla 1 – Frecuencias para el vehículo de prueba tocando la bocina, acercándose y alejándose del receptor estático. Velocidades calculadas para el emisor.

Nº de pico	$f_{acercándose} (Hz)$	$f_{alejándose} (Hz)$	$\Delta f (Hz)$	$v_E (km/h)$
1º	518.8	470.3	48.5	62.92
2º	1032.0	940.7	91.3	62.89
3º	1552.0	1399	153.0	62.89

La velocidad marcada en el indicador del vehículo de prueba fue de 65 ± 5 km/h.

Veremos a continuación en las siguientes cuatro figuras (Fig. 8 – 11) la evolución de la frecuencia (eje vertical en Hz) medida en función del tiempo (eje horizontal en segundos), y el valor del nivel de presión (código de colores: valores bajos color oscuro – valores altos colores brillantes). Estos gráficos se denominan espectrogramas [6].

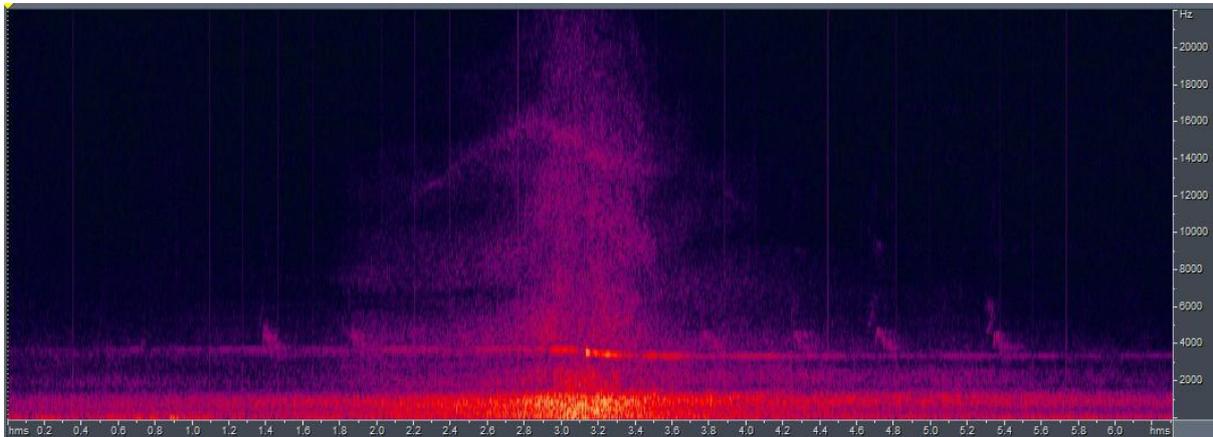


Figura 8 – Espectrograma para vehículo emitiendo un tono de 3567 Hz

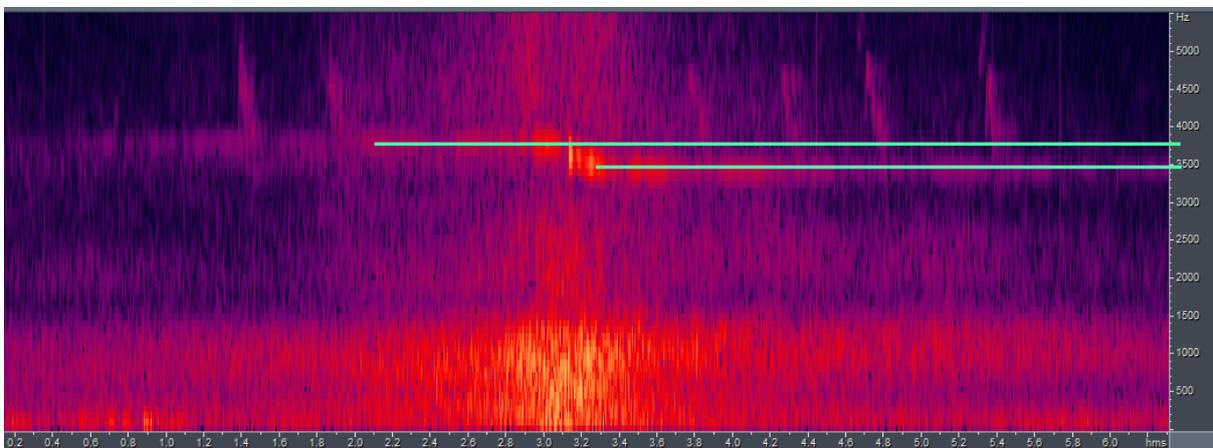


Figura 9 – Ampliación del espectrograma para vehículo emitiendo un tono a 3567 Hz

A parte de las frecuencias más bajas, podemos observar una línea de frecuencias en torno a la frecuencia del tono emitido (3567 Hz), ligeramente por encima de esta frecuencia mientras el vehículo

se acerca (desde 0 hasta los 2.8 segundos), luego se inclina en el momento de paso ante el receptor (desde los 3.0 hasta los 3.4 segundos aproximadamente), para luego continuar horizontal mientras el vehículo se aleja del receptor. Esto es similar a lo observado para mediciones al paso de aeronaves [6].

En la Figura 9 vemos una ampliación del momento de paso del vehículo emisor frente al receptor, en donde se observa el cambio de frecuencias producido (marcado con las líneas verdes).

Tanto en la Figura 8 como en la 9, pueden apreciarse unas marcas verticales periódicas, que corresponden al paso del vehículo de prueba por unas bandas de limitación de velocidad situadas en la calzada de pruebas.

En las siguientes figuras podemos observar la evolución de las frecuencias para el vehículo emisor tocando la bocina.

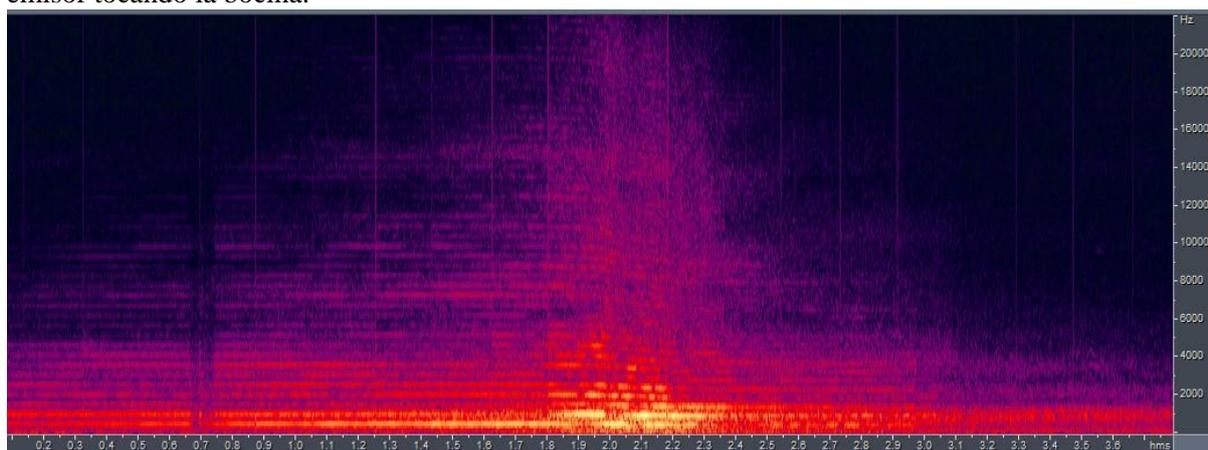


Figura 10 – Espectrograma para vehículo emisor tocando la bocina

Pueden observarse los múltiples armónicos que aparecen, así como la disminución en frecuencia en el momento de paso del vehículo frente al receptor, en torno al intervalo 2.0 – 2.2 segundos.

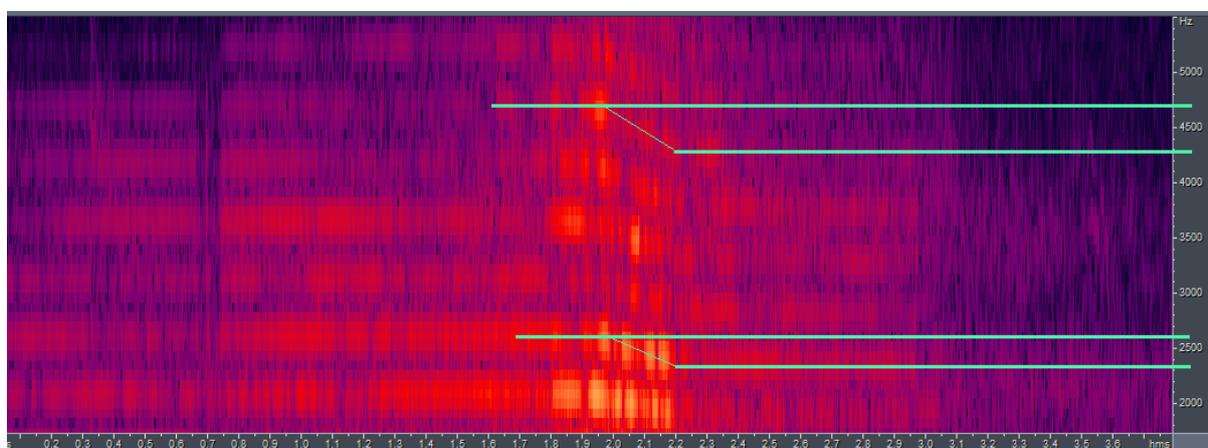


Figura 11 – Ampliación del espectrograma para el vehículo emisor tocando la bocina

Ampliación del espectrograma de la figura 10, en donde hemos marcado el cambio de frecuencias (líneas verdes) para dos armónicos en torno a los 2500 y 4500 Hz.

3.3 Mediciones con Symphonie

Con el objeto de mejorar, principalmente en el apartado de micrófono, respecto al sistema de medición anterior, hemos empleado Symphonie. Sin embargo, las medidas han sido de nuevo analizadas con el software Cool Edit Pro 2.0, ya que este ofrece mejor resolución en frecuencias, que el software de 01dB (dbBati y dbFA)[7-8]. Puede verse una comparación de estos y otros software de acústica en referencia [9]. Estas mediciones también fueron realizadas en el segundo lugar de pruebas (Fig. 2).

Veremos a continuación en las siguientes dos figuras los espectros grabados al paso de dos vehículos aleatorios (un vehículo ligero o turismo, y otro pesado o autobús). Es preferible observar los cambios en frecuencia en los espectros habituales que mostramos a continuación, en vez de los sonogramas correspondientes, ya que Cool Edit Pro 2.0 posee una herramienta de cursor que da los valores de frecuencia y nivel en el caso de espectros, cosa que no ocurre con el sonograma, pudiendo tener por lo tanto mayor imprecisión.

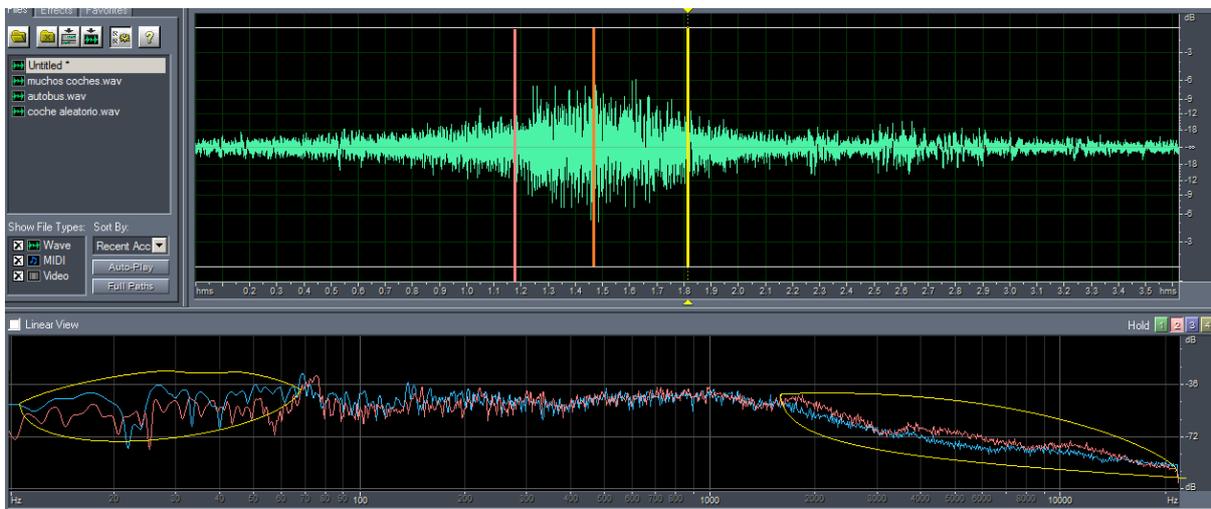


Figura 12 – Espectros detectados al paso de un vehículo ligero aleatorio (turismo)

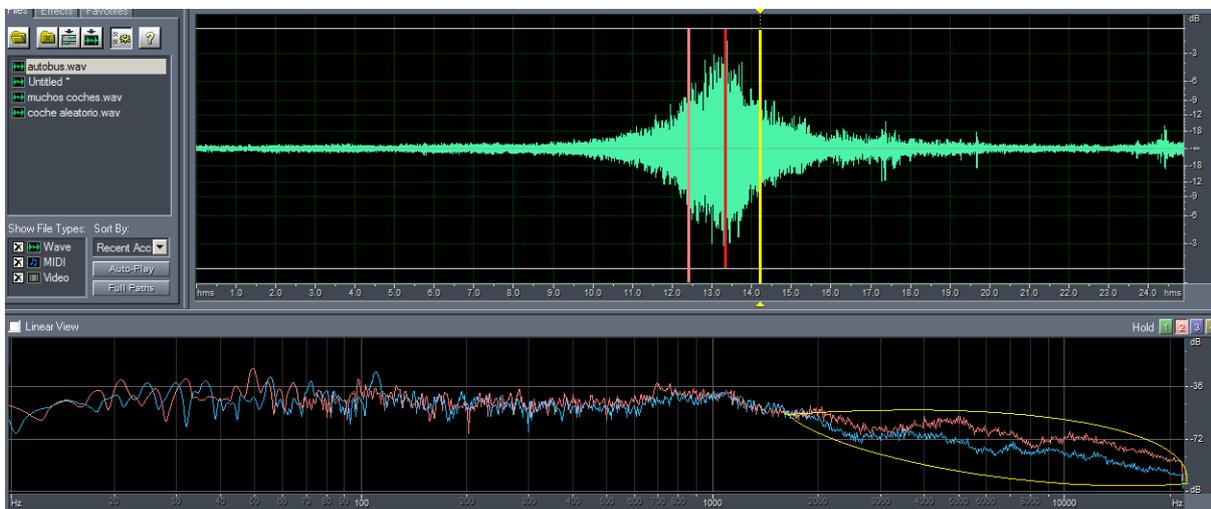


Figura 13 – Espectros detectados al paso de un vehículo pesado aleatorio (autobús)

Podemos observar en las zonas marcadas en amarillo, en alta frecuencia, cómo el espectro en rojo (vehículo alejándose) presenta mayores niveles que el espectro en azul (vehículo acercándose). Sin embargo, al no tener el vehículo emisor ningún tono especial o característico que podamos destacar, no podemos aventurar ningún cálculo sobre corrimiento frecuencial, y por lo tanto, velocidad del vehículo.

Los espectros obtenidos en este último apartado para un vehículo ligero (turismo) y un vehículo pesado (autobús), coinciden con los espectros generales para este tipo de vehículos. [10]

4 Conclusiones

De todo lo anterior podemos extraer las siguientes conclusiones:

- Para la observación, y cuantificación del Efecto Doppler, son preferibles sistemas de grabación y análisis de la señal sonora con amplia resolución espectral. Un sistema en bandas de tercios de octava puede resultar insuficiente.
- Puede obtenerse la velocidad de paso de un vehículo emitiendo algún tipo de señal de frecuencia conocida, con sistemas de grabación y análisis de la señal sonora con amplia resolución frecuencial.
- Para vehículos con espectros de emisión normales (debidos al ruido del motor, rodadura, aerodinámico y otros) precisamos todavía de más pruebas para verificar el Efecto Doppler y calcular la velocidad de paso.

Agradecimientos

Agradecer, como entidades financiadoras del proyecto, a la Junta de Extremadura, Consejería de Economía, Comercio e Innovación y al Fondo Social Europeo.



Referencias

- [1] http://es.wikipedia.org/wiki/Christian_Andreas_Doppler
- [2] http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Doppler
- [3] www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/doppler/doppler.html
- [4] <https://sites.google.com/site/lasondasyelsonido/efectos-sonoros/efectos-relacionados-con-el-movimiento-de-la-fuente/aplicaciones-efecto-doppler>
- [5] ISO 1996-2: 2007 (2007). Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 2: Basic quantities and assessment procedures. International Organization for Standardization, Switzerland.
- [6] Francés Monllor, J. et al., *Validación de un sistema de posicionamiento acústico de aeronaves*, Tecniacústica 2008, Coimbra (Portugal).
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Adobe_Audition
- [8] www.dbkes.com.tr/brosur/symphonie.pdf
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_multitrack_recording_software
- [10] Harris, Cyril M., *Manual de medidas acústicas y control del ruido*, Mc Graw Hill, 3rd Edition, Madrid, 1998.