



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008-A033

Tiempos de estabilización del espectro del ruido de tránsito

Federico Miyara ^(a), Pablo Miechi ^(b), Vivian Irene Pasch ^(c),
Susana Cabanellas ^(d), Marta Yanitelli ^(e), Ernesto Accolti ^(f)

Grupo Ruido, Facultad de Arquitectura, Planeamiento y Diseño, Universidad Nacional de Rosario. Riobamba 220 bis, 2000 Rosario, Argentina. Tel: +54 341 4808531

- (a) E-mail: fmiyara@fceia.unr.edu.ar
- (b) pmiechi@gmail.com
- (c) E-mail: pasch@fceia.unr.edu.ar
- (d) E-mail: scabanel@fceia.unr.edu.ar
- (e) E-mail: myanitel@fceia.unr.edu.ar
- (f) E-mail: ernestoaccolti@gmail.com

Abstract

In this paper a protocol is introduced to perform the batch processing of .WAV files containing calibrated digital recordings of traffic noise, in order to study the stabilisation time of the band spectrum. First, each file is manually marked with a digital audio editor to demarcate valid measurement periods, attaching traffic flow information that has been recorded during each period. Calibration signals and other interesting events are also demarcated. Then, using matrix-based mathematical software, the measurement periods are automatically detected, and the band spectrum at one-second intervals and the cumulative equivalent sound pressure levels are computed. Later, the stabilisation time for each band, defined as that instant at which the equivalent level enters and stays within a specified error margin from the final value, is computed. Finally, the stabilisation time is correlated with traffic flow.

Resumen

En el presente trabajo se ha desarrollado un protocolo para el procesamiento en masa de archivos de sonido en formato .WAV correspondientes a registros digitales calibrados de ruido del tránsito. En primer lugar se aplica un proceso manual de marcado del archivo mediante un editor de audio digital por el cual se delimitan los intervalos de medición adjuntando información en formato normalizado sobre el flujo vehicular registrado durante cada intervalo. También se delimitan los tonos de calibración y otras instancias de interés. Posteriormente, mediante software matemático matricial se detectan los intervalos de medición en forma automática y se determinan los espectros de bandas a intervalos de 1 s y los correspondientes niveles equivalentes acumulados. Luego se determina el tiempo de estabilización de cada banda, definido como el tiempo para el cual el nivel equivalente de la banda entra y permanece dentro de un margen de error especificado con respecto al valor final. Finalmente se correlaciona el tiempo de estabilización con el flujo vehicular.

1 Introducción

Existen varios estudios sobre el tiempo de estabilización de una medición de ruido de tránsito automotor (De Donato S. R., 2007; González A. et al, 2007), pero en general éstos se refieren al nivel equivalente ponderado A.

Por otra parte, existen varios programas computacionales que implementan modelos para predecir el comportamiento sonoro del ruido automotor (STAMINA, 1989; FHWA TNM, 2008). Estos modelos utilizan internamente niveles de presión sonora en bandas de octava, de tercio de octava o ambas. En particular el modelo que utiliza TNM se basa en modelos de regresión de datos empíricos registrados en la base de datos REMEL (Reference Energy Mean Emission Levels), la cual cuenta con datos de 6000 puntos de paso de vehículos en 40 sitios de 9 estados en Estados Unidos.

Otras investigaciones (Vos J., 1992) también tienen en cuenta el efecto la fluctuación sonora y de las bandas de frecuencia al momento de realizar experimentos que utilizan al ruido de tránsito automotor como factor.

Al realizar una inferencia empírica sobre niveles sonoros del ruido en general y, en particular, del ruido automotor, es importante fijar la duración de esta medición de forma tal que los datos relevados sean compatibles entre sí y además reflejen el fenómeno con la menor incertidumbre posible. También resulta de interés, en la mayoría de las aplicaciones, que la duración sea corta. Esa duración objetivo está dada por el tiempo de estabilización de la medición, es decir, el tiempo para el cual continuar el promedio energético de esa medición no introduzca variaciones de nivel sonoro mayores a una tolerancia prefijada.

Si bien es posible que exista una relación entre el tiempo de estabilización de una medición de nivel sonoro general con el tiempo de estabilización de las bandas de frecuencia de esa misma medición, no es evidente que ambos tiempos deban ser iguales e inclusive es de esperar que el tiempo de estabilización del nivel de al menos una de las bandas sea mayor que el de todo el rango espectral como valor global. Por esa razón se remarca la importancia de estudiar el tiempo de estabilización de una medición de nivel sonoro por bandas de frecuencia.

En el presente trabajo se desarrolló un algoritmo para determinar el tiempo de estabilización por bandas de frecuencia de octava, de tercio de octava y bandas críticas.

Además, dada la utilidad de estos datos en modelos de predicción, se calcula la correlación del tiempo de estabilización con el flujo vehicular (Vos J., 1992). Evidentemente el flujo vehicular está relacionado con la fluctuación sonora, la cual es un factor del tiempo de estabilización.

2 Escalas temporales de variabilidad del ruido

A diferencia de una magnitud estática como la longitud de una mesa (que, salvo a nivel microscópico, se mantiene esencialmente constante), la magnitud que describe el ruido varía permanentemente en el tiempo. Para el ruido ambiente esa variabilidad puede estudiarse en cuatro escalas temporales diferentes: valor instantáneo, envolvente, promedio a corto plazo y promedio a largo plazo.

En la escala instantánea se describe el sonido en términos de su presión sonora instantánea $p(t)$. Así, por ejemplo, para un tono puro se tiene $p(t) = P \sin \omega t$.

En la escala de la envolvente lo que se analiza es la variación de la amplitud. El proceso de extracción de la envolvente (que en general es energética) consiste en elevar la señal al cuadrado y hacer pasar la señal no negativa resultante por un filtro pasabajos con una constante de tiempo suficientemente pequeña como para registrar los eventos de interés (por

ejemplo un grito) pero a la vez suficientemente grande como para eliminar la rápida evolución instantánea. Típicamente se utilizan constantes de tiempo de 1 s, 125 ms ó 35 ms. En el caso de un tono puro la envolvente es constante. En el caso de un tono modulado en amplitud, la envolvente sigue la evolución de la moduladora.

Luego se tiene la escala correspondiente al promedio a corto plazo. En este caso, en lugar de un pasabajos se utiliza un integrador o promediador:

$$P_{ef}^2(T) = \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt. \quad (1)$$

El promedio obtenido depende del tiempo de integración. Si éste es extremadamente corto se obtiene un valor próximo al valor instantáneo inicial.

Dado que el ruido ambiente puede considerarse formado por multitud de eventos aislados de duración relativamente corta (por ejemplo un ladrido, el canto de un pájaro o el paso de un vehículo), suponiendo cierta distribución estadística de los eventos a lo largo del tiempo y que los eventos poseen parámetros (duración, amplitud) con una distribución estadística independiente del instante de tiempo que suceden (es decir, se trata de un ruido estacionario), al cabo de un tiempo es posible alcanzar una estabilización del promedio energético. En un caso típico esto sucederá luego de algunos minutos.

La suposición de estacionariedad no se cumple en general con el correr de las horas, ya que la actividad urbana presenta fluctuaciones asociadas con actividades variables según el horario. Así, por ejemplo, temprano en la mañana existe un periodo en el que el flujo vehicular aumenta desde un valor muy bajo hasta uno bastante mayor. Sin embargo, si el plazo se extiende considerablemente (meses o hasta años) se obtiene un promedio a largo plazo que, nuevamente, tiende a estabilizarse.

En este trabajo nos interesa el promedio a corto y a largo plazo, es decir, supondremos que el ruido es estacionario. El propósito es determinar el tiempo de estabilización del nivel equivalente para cada banda de frecuencia (de octava, de tercio de octava, y críticas), definido como el tiempo necesario para que el nivel equivalente acumulado $L_{eq}(t)$ ingrese definitivamente en un entorno $\pm\Delta L$ alrededor del nivel equivalente a largo plazo $L_{eq}(\infty)$. En la figura 1 se muestra un ejemplo.

3 Modelo teórico del tiempo de estabilización

Supondremos que frente a un punto de observación circular, durante un tiempo T , un tránsito integrado por vehículos individuales cuya inmisión en el receptor se caracteriza por la presión sonora $p_k(t)$. Esta presión será prácticamente despreciable salvo durante los pocos segundos que dura el paso efectivo frente al receptor. La correspondiente presión eficaz extendida a todo el intervalo será, entonces,

$$P_{ef,T,k}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T p_k^2(t) dt. \quad (2)$$

Aunque para T elevado (varios minutos) este valor no es demasiado representativo¹, resulta útil para calcular la presión eficaz sonora total apelando al principio de superposición

¹ En efecto, la energía sonora de un vehículo individual se concentra en un intervalo corto, mientras que este promedio se extiende a un periodo mucho más largo.

energética que rige para señales incoherentes (los ruidos de vehículos diferentes lo son). Resulta, entonces,

$$P_{ef,T,total}^2 = \sum_{k=0}^N P_{ef,T,k}^2, \quad (3)$$

donde N es la cantidad de vehículos que circulan durante el tiempo T .

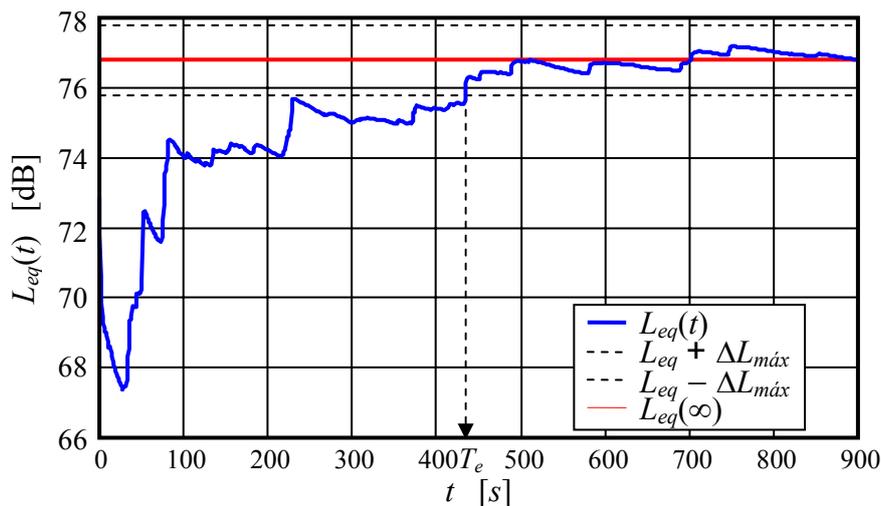


Figura 1. Concepto del tiempo de estabilización

$P_{ef,T,k}^2$ es una variable aleatoria con valor medio $\overline{P_{ef,T}^2}$ y desvío estándar $\sigma_{P_{ef,T}^2}$. $P_{ef,T,total}^2$ también es una variable aleatoria cuya distribución es aproximadamente normal para N grande. Su valor medio es $N \overline{P_{ef,T}^2}$ y su desvío estándar, $\sqrt{N} \sigma_{P_{ef,T}^2}$. Vemos que el valor medio crece más rápidamente que la dispersión.

Podemos interpretar el punto de estabilización de la presión eficaz total, $P_{ef,T,total}^2$, como el momento en el cual la cantidad de eventos es suficientemente elevada como para que la dispersión sea pequeña con respecto al valor medio. Para precisar este concepto tengamos en cuenta que el 99,7 % de los posibles resultados de promediar las presiones cuadráticas de N vehículos se encuentran comprendidos entre -3σ y $+3\sigma$, es decir,

$$N \overline{P_{ef,T}^2} - 3\sqrt{N} \sigma_{P_{ef,T}^2} < P_{ef,total}^2 < N \overline{P_{ef,T}^2} + 3\sqrt{N} \sigma_{P_{ef,T}^2}. \quad (4)$$

dado que estamos interesados en los niveles equivalentes más que en las presiones cuadráticas, conviene trabajar con la razón entre el valor extremo y el valor central. Hechos los cálculos resulta que con una probabilidad del 99,7 % el error con respecto al nivel equivalente a largo plazo (suponiendo que el tránsito es estacionario) está acotado por:

$$\Delta L < 10 \log \left(1 + \frac{3}{\sqrt{N}} \frac{\sigma_{P_{ef,T}^2}}{P_{ef,T}^2} \right). \quad (5)$$

Para N grande el logaritmo puede aproximarse linealmente, resultando

$$\Delta L < \Delta L_{m\acute{a}x} = \frac{30}{\ln 10} \frac{\sigma_{P_{ef,T}^2}}{\sqrt{N} P_{ef,T}^2}. \quad (6)$$

Vemos que el error depende fundamentalmente de la variabilidad de los parámetros del parque automotor y del número de eventos. Ahora bien, podemos expresar N como

$$N = Q T, \quad (7)$$

donde Q es el número de vehículos por unidad de tiempo. De aquí se concluye que el tiempo de estabilización para un determinado $\Delta L_{m\acute{a}x}$ es inversamente proporcional a Q .

$$T_{estab} \cong \frac{1}{Q} \left(\frac{30}{\ln 10} \frac{\sigma_{P_{ef,T}^2}}{P_{ef,T}^2} \frac{1}{\Delta L_{m\acute{a}x}} \right)^2. \quad (8)$$

Si bien el análisis anterior fue hecho en abstracto, es válido tanto para la presión sonora de banda ancha como para bandas de frecuencia.

La ecuación (8) es de utilidad teórica pero de escasa aplicabilidad práctica, dado que no se dispone del dato de la dispersión de las inmisiones provenientes de vehículos individuales. De hecho, podría constituir una manera indirecta de determinarla.

4 Protocolo para la determinación del tiempo de estabilización

Es posible determinar el tiempo de estabilización en forma directa a partir de registros sonoros digitales del ruido del tránsito. Para ello se determinan primero los niveles equivalentes $L_{eq,k}$ en sucesivos intervalos de 1 s de duración. Luego se calcula el nivel acumulado hasta el intervalo n -ésimo intervalo mediante la fórmula recursiva

$$L_{eq}(n) = 10 \log \left(10^{L_{eq}(n-1)/10} + 10^{L_{eq,n}/10} \right). \quad (9)$$

Finalmente se obtiene la diferencia $L_{eq}(n) - L_{eq}(M)$, donde M es la cantidad total de segundos en el intervalo considerado, y se determina el valor n_{estab} a partir del cual

$$|L_{eq}(n) - L_{eq}(M)| < \Delta L_{m\acute{a}x} \quad (10)$$

En este trabajo se adoptó un valor $\Delta L_{m\acute{a}x} = 1$ dB.

Debido a que se disponía de gran cantidad de grabaciones digitales calibradas de ruido de tránsito de 15 min de duración subdivididas en subintervalos de 5 min, se decidió implementar un protocolo que permitiera automatizar la extracción de los parámetros

deseados, vale decir los tiempos de estabilización de las diferentes bandas de frecuencia de tres juegos: bandas de octava, bandas de tercio de octava y bandas críticas.

El protocolo consta de una parte manual y otra automática. La parte manual consiste en el marcado en software de edición de audio digital mediante signos denominados “cues”. Hay dos tipos de cues: los que se vinculan a un instante de tiempo y los que se vinculan a un intervalo determinado por dos instantes. A cada cue se le puede asociar una etiqueta e información específica. Las etiquetas se usaron para establecer categorías de información:

Lugar / fecha
 Hora
 Calibración
 Medición

Así, la etiqueta de Calibración está asociada al tono de calibración grabado. Su información asociada es el nivel de presión sonora del tono. La etiqueta de Medición está asociada a un intervalo de medición. La información asociada incluye, típicamente, niveles leídos (por ejemplo nivel máximo, nivel equivalente), horario, y flujo vehicular por categoría, por ejemplo:

Lmáx = 87,6 dB - Leq = 72,3 dB - 10:13 a 10:18 - Au 30, Co 3, Ca 1, Mo 5

donde Au: autos
 Co: colectivos
 Ca: camiones
 Mo: motos

La información anterior se introduce en forma manual e interactiva a partir de las planillas de campo en las que se ha consignado oportunamente. La sintaxis de los datos es tolerante a variaciones ortográficas, tales como intercambiar mayúsculas y minúsculas, agregar exceso de espacios, etc. La información asociada a los cues se encuentra al final del archivo WAV que contiene el audio. El software editor de audio digital se encarga de darle el formato apropiado e insertarlas en el lugar apropiado del archivo.

Una vez procesados todos los archivos el resto del proceso es automático. Las rutinas desarrolladas extraen en forma autónoma la información y la interpretan. de particular interés resultan los datos de calibración y los de flujo vehicular. Entre ellas se encuentran:

Lectura de marcas
 Calibración
 Flujo horario
 Tiempo de estabilización

Las rutinas se integraron en una interfaz gráfica con menús y botones que facilita la interactividad.

Una vez extraída la información se aplican rutinas específicas. Así, para la obtención de las bandas se utilizó la transformada rápida de Fourier de 4096 puntos con dos tasas de muestreo: 44100 Hz y 1328,125 Hz (la tasa original con un submuestreo por 32). El primer caso se aplicó a las bandas de frecuencia mayores de 200 Hz, el segundo a las bandas

inferiores, con el fin de incrementar la resolución. En ambos casos se utilizó ventana de Blackmann.

Una vez obtenidos los espectros de bandas a intervalos de 1 s (a pesar de que los espectros submuestreados requieren alrededor 3 s para completarse) se les aplica el método descrito anteriormente para determinar el tiempo de estabilización correspondiente a cada banda.

Los resultados de cada nuevo análisis se guardan en el disco rígido de modo de disponer para uso futuro los espectros, flujos vehiculares y tiempos de estabilización.

5 Correlación entre tiempo de estabilización y flujo vehicular

Un segundo objetivo del análisis propuesto e implementado es intentar verificar empíricamente el resultado teórico establecido en la ecuación (8). Para ello se graficaron en la figura 2 los pares (flujo, tiempo de estabilización). Se observa una gran dispersión. No es posible ajustar una curva teórica

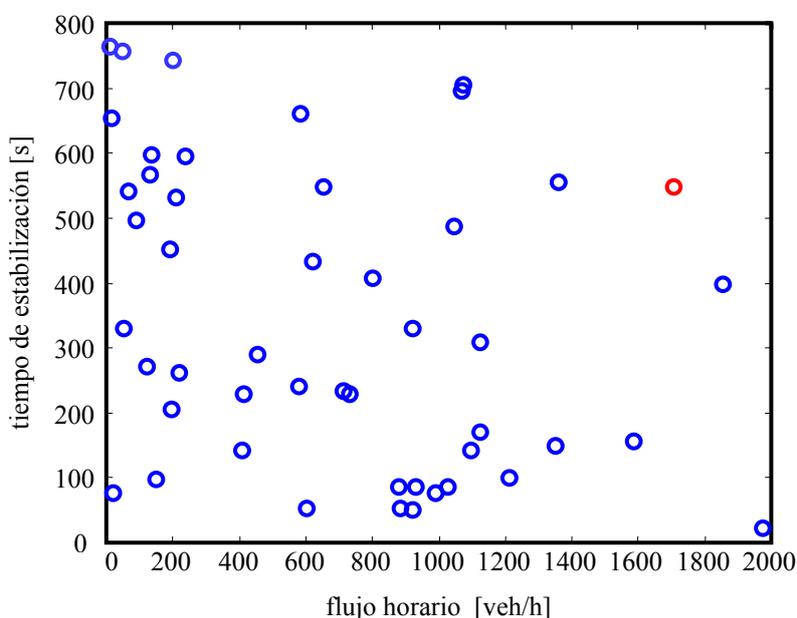


Figura 2. Tiempo de estabilización vs. flujo vehicular horario. El círculo rojo muestra un punto anómalo causado por una moto con escape libre

5.1 Posibles causas

Para bajos flujos vehiculares predomina el ruido de fondo, que, lejos de fuentes específicas, en muchos casos es bastante constante. Si las fuentes cercanas son importantes, unas pocas de ellas pueden desestabilizar el nivel equivalente. En los casos de grandes flujos vehiculares, la desestabilización procede de algunos eventos singulares, por ejemplo una moto con escape libre. La estructura de la información que se adoptó permite localizar fácilmente la grabación que da origen a cualquier punto. Se observan eventos escasos pero de gran energía, que desestabilizan la medición. Un ejemplo de ello es el punto indicado en rojo en la figura 2.

No se investigaron arterias con más de 2000 veh/h. En ellas probablemente la conclusión cambiaría.

6 Conclusiones

Si bien parece no ser posible, para flujos urbanos típicos, establecer una correlación entre flujo horario y tiempo de estabilización, sí se puede obtener una cota, que ronda los 15 minutos para todas las bandas. A pesar de ello, sería deseable realizar mediciones mucho más largas fuera de horarios pico para disponer de un valor estabilizado más confiable.

NOTA: El presente trabajo es parte de un proyecto de investigación financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT - PICT N° 38109)

Referencias

- De Donato S. R. (2007) "Estimation of the minimum integration time for determining the equivalent continuous sound level with a given level of uncertainty considering some statistical hypotheses for road traffic" Institute of Noise Control Engineering, Poughkeepsie, NY, ETATS-UNIS , vol. 55, no6, pp. 526-531
- FHWA TNM (2008) "Traffic Noise Model" - Federal Highway Administration, Department of transportation USA.
- Gonzalez A. E., Gabirondo M.; Pérez E.; Brancho A. A. (2007) "Urban noise : Measurement duration and modelling of noise levels in three different cities" Noise control engineering journal, vol. 55, no3, pp. 367-372
- Miyara, Federico; Pasch, Vivian; Cabanellas, Susana; Yanitelli, Marta; Miechi, Pablo."Tiempo de estabilización en las mediciones de Ruido de Tránsito". VI Jornadas de Acústica, Electroacústica y Áreas Vinculadas, Buenos Aires 25/10/07 al 26/10/07.
- Vos Joos. (1992) "Annoyance caused by simultaneous impulse, road traffic, and aircraft sounds: A quantitative model." Journal of the Acoustical Society of America 91, n° 6: 3330-3345.
- STAMINA (1989) "Predicting Stop-and-Go Traffic Noise Levels" National Academy of Sciences. Washington, D.C. USA