

UNA REVISIÓN DE MODELOS PREDICTIVOS DE RUIDO URBANO

REFERENCIA PACS: 43.50.Ba

A. Azzurro; L. Ercoli; F. Namuz

Grupo Análisis de Sistemas Mecánicos y Grupo Específico Auxiliar
Facultad Regional Bahía Blanca. Universidad Tecnológica Nacional

11 de Abril 461

Bahía Blanca. Argentina

Tel: 51 291 455 5220

Fax: 51 291 455 5311

E-Mail: azzurro@frbb.utn.edu.ar; lercoli@criba.edu.ar; fnamuz@frbb.utn.edu.ar

ABSTRACT

This paper presents the state of the art of the mathematical and numerical methods for the prediction of urban noise by means of a thorough bibliographic revision of the main scientific journals. The authors attempt to bring a systematic description of the evolution of a relevant subject not only from the acoustical point of view, but from the urban planning too.

RESUMEN

En este trabajo se presenta el estado del arte en modelos matemáticos y numéricos de predicción del ruido urbano a través de una pormenorizada revisión bibliográfica de las principales revistas científicas, comenzando desde los primeros modelos estadísticos, basados en el concepto de regresión, su perfeccionamiento e inclusión de variables, hasta modelos de trazado de rayos e incluso los basados en redes neuronales. Para trabajar con estos modelos, no solo se debe conocer su formulación matemática sino el comportamiento de las distintas variables que actúan en ellos: tipos de fuentes, estandarizaciones de los datos, etc. Los autores intentan aportar una visión sistemática de la evolución que ha tenido lugar en un tema relevante tanto desde el punto de vista de la acústica como del planeamiento urbano.

INTRODUCCIÓN

A través del tiempo ha crecido la preocupación respecto de la calidad de vida de la población, y se ha tomado conciencia del aporte que el ruido hace en la disminución de la misma; particularmente el ruido del tráfico urbano. Por ello, en los últimos años se vienen desarrollando distintos métodos de predicción de ruido para su utilización en la construcción de nuevas calles y edificaciones, tratando de evitar complicaciones futuras o solucionar problemas ya existentes. Estos modelos representan una poderosa herramienta cuyo campo de aplicación incluye la planificación de espacios, control de impacto acústico sobre el ambiente, desarrollo de nuevas legislaciones para regular la contaminación acústica, entre otros.

En general, permiten asociar parámetros geográficos con datos, ya sean medidos o calculados, de niveles sonoros con las fuentes que los producen, con las condiciones del campo acústico y con parámetros temporales o estacionales. El desarrollo de modelos cada

vez más complejos y abarcativos ha ido creciendo de la mano de la computación. Con el objeto de poner en relevancia algunas características de los principales modelos predictivos desarrollados por distintos autores de la literatura abierta internacional, a continuación se presenta una revisión actualizada de estos modelos en forma cronológica.

DESARROLLO

En 1977 Gilbert [1] elaboró una ecuación para predecir el nivel L_{10} en calles urbanas, la cual se derivó del análisis de las mediciones hechas en 190 lugares en Edimburgo y otros. La validez de la ecuación se confirmó por medio de un análisis de 134 mediciones hechas en Sheffield y Rotherham. Esta ecuación incluye variables de tráfico, las cuales son al presente difíciles de predecir, y una ecuación alternativa que usa variables fácilmente predecibles, que han sido derivadas de los datos de Sheffield y Rotherham. Los errores estándar de los dos métodos de predicción fueron de casi 3 dB(A). Se demostró que este error no es significativamente afectado por la instrumentación desplegada, siempre y cuando se alcancen los grados de estandarización industrial, o por el periodo de muestreo de los niveles medidos, con tal que estos no sean menores que 15 minutos. Sobre el rango de los datos estudiados el error estándar no fue afectado significativamente por no linealidades o discontinuidades en las 22 variables numéricas consideradas en el análisis de regresión, ni varió sistemáticamente con cualquiera de las 11 variables descriptivas que se examinaron. Hubo alguna indicación, sin embargo, de que la técnica de análisis de regresión no detectaba interacciones significativas entre variables. Cuando algunas de las variables descartadas como no significativas se agregaron y el análisis de la regresión se repitió, se logró una reducción importante en la predicción el error estándar.

En 1980 Lawrence y Burgess [2], presentaron una comparación entre algunos métodos de predicción de la atenuación por apantallamiento del ruido de tráfico causado por edificios, y las atenuaciones reales medidas en áreas residenciales típicas. Generalmente, se encontró que el método desarrollado por el Departamento de Ambiente en el Reino Unido da una predicción razonablemente precisa de la atenuación por apantallamiento en situaciones bastante simples. En situaciones más complejas, y particularmente donde una posición de recepción está cercana a una estructura significativamente apantallante, tal como un edificio, la atenuación obtenida no es predicha por el método DOE (Department of Environment), de este modo los niveles de diseño de fachada para el fondo de un edificio son predichos en exceso; como en otras situaciones. Las atenuaciones medidas para eventos individuales bajo condiciones nominales idénticas, mostraron tener grandes variaciones.

Se concluyó que los niveles predichos entre una fuente y un receptor tuvo dos componentes básicos, uno la distancia entre ellos, y otro la atenuación que produce el apantallamiento.

Bernard M. Favre [3], hace un análisis de los distintos métodos predictivos y los divide en tres métodos principales. Los métodos manuales (formulas o nomogramas), que llegan a predecir el nivel de ruido a través de una serie de ajustes respecto de un nivel de referencia. Entre los que se pueden mencionar: a) El Método del Reino Unido que desarrolló un procedimiento para predecir L_{10} , que se usó junto a las Regulaciones para Aislación de ruido (1975) y para propósitos de evaluación y planeamiento general. Éste procedimiento se revisó, y la revisión retiene la filosofía básica de aproximación pero extiende el rango de aplicación del método para tomar en cuenta una amplia variación de escenarios de predicción y resultados de estudios recientes. En particular se hicieron modificaciones significativas a las correcciones de flujo vehicular, tomando en cuenta el flujo reducido, las correcciones por superficie de rodadura y configuraciones de barreras. b) En Estados Unidos la FHWA (Federal Highway Administration – Administración Federal de Autopistas) desarrolló un método de fácil uso para predecir el L_{eq} .

El modelo se presentó en un formato lógico paso a paso con apéndices que cubren el respaldo teórico e identifican las suposiciones y limitaciones del método. Algunos de los pasos son el cálculo del nivel de referencia, y la clasificación de los vehículos. Ya que el análisis de los niveles de ruido vía por vía es muy tedioso especialmente en avenidas o autopistas multi-vía se elaboró un término para simplificar el cálculo, además el modelo toma en cuenta el

exceso de atenuación por bosques, el apantallamiento dado por edificios tomando en cuenta la discontinuidad, y también da un factores de conversión de fórmulas y monogramas que se pueden tener en una calculadora programable.

c) En Escandinavia también se desarrolló un método de predicción manual de predicción conjuntamente con Dinamarca, Finlandia, Noruega y Suiza. El método daba la posibilidad de calcular el L_{eq} .

Como un segundo método menciona los métodos computacionales que se desarrollaron desde los '60 comenzando de los primarios métodos de cálculo pero en la actualidad se llegó a modelos de mayor sofisticación. Algunos de ellos son programas de síntesis de flujo de tráfico, programas de síntesis de flujo de propagación, y métodos basados en fórmulas.

Por último se mencionan los modelos a escala, los cuales fueron útiles en el caso de que las formulaciones matemáticas no llegan a acordar con el esquema de las calles, son particularmente útiles en esquinas de calles complejas o distribuidores de tránsito en autopistas.

En 1987 Jraiw [4] presentó un modelo de computadora para predecir el ruido producido por el transporte en áreas urbanas y suburbanas bajo condiciones de flujo de tráfico libre. El modelo utiliza expresiones empíricas desarrolladas de estudios de campo hechos en 204 sitios en Bath (Gran Bretaña). Se tomaron en cuenta el flujo de tráfico, velocidad y composición, porcentaje de vehículos medianos y pesados, la distancia de los alrededores de las fachadas de los edificios, y la distancia de varias esquinas. Un buen nivel de concordancia se logró entre los valores medidos y los predichos. Se usaron L_{10} , L_{50} , L_{90} y L_{eq} en dB(A).

Radwan y Oldman [5] en el año 1987, desarrollaron un modelo de computadora para predecir niveles de ruido generados por tráfico urbano bajo condiciones de flujo interrumpido. El modelo esta compuesto de dos subsecciones. La primera predice las características de propagación del sonido en configuraciones típicas de calles y el segundo simula el flujo de tráfico callejero en áreas urbanas. Las dos subsecciones son luego combinadas para obtener un modelo capaz de predecir niveles de ruido de tráfico en condiciones urbanas. El modelo propiamente dicho utiliza el método de trazado de rayos. Las predicciones obtenidas de la aplicación de este modelo se comparan con aquellas aportadas por la aplicación de modelos predictivos basados en mediciones de campo. El acuerdo entre las predicciones es bueno. Se muestra que el modelo descrito en este documento puede predecir niveles de ruido por situaciones en las cuales los modelos basados en mediciones de campo no pueden manejar.

En 1989, Rao y Dev [6] desarrollaron ecuaciones semiempíricas para predecir niveles de ruido en diferentes zonas de la ciudad de Visakhapatnam mediante la medición extensiva de niveles de ruido y densidad de tráfico en distintas zonas de la ciudad (65 puntos cubriendo cuatro zonas). Para este trabajo, primero se eligieron los lugares de medición y se grabaron los L_{eq} por hora. Al mismo tiempo se obtuvo la densidad vehicular contando los vehículos que pasaban por el punto de medición. Se clasificaron las áreas de acuerdo al uso a que estaban dedicadas en, residenciales, residenciales - comerciales e industriales. De un estudio anterior, se obtuvo el número equivalente de vehículos que emitían el mismo nivel de ruido que un solo vehículo, para después tener una densidad de tráfico equivalente El acuerdo entre los valores predichos y experimentales estába dentro de los ± 5 dB(A).

Cammarata, Cavalieri y Fichera [7] presentaron en 1995 la aplicación de redes neuronales al problema de la predicción de ruido causado por tráfico urbano. La variable física más representativa para cuantificar emisiones de ruido es el nivel equivalente de presión sonora. Hasta ahora ha sido identificado basándose en modelos semiempíricos, típicamente análisis de regresión, los cuales generalmente no dan aproximaciones muy precisas de la tendencia seguida por el nivel de presión sonora. Los autores hicieron el intento de superar esta dificultad adoptando una aproximación neuronal basada en una red de retropropagación (Back Propagation Network - BPN). Los resultados obtenidos de la comparación de la aproximación BPN con aquellos aportados por las relaciones seleccionadas encontradas en la literatura, muestran cuán buena es la aproximación propuesta.

La solución neuronal al problema mostró la necesidad, en ciertas etapas, de un grupo de mediciones acústicas, las cuales debían ser tan libres de error como fuere posible. La complejidad de la identificación del error por medio de las aproximaciones clásicas ha llevado a los autores a explorar la posibilidad de una solución neuronal a este problema también. Los autores por consiguiente proponen el uso de una arquitectura neuronal hecha de dos niveles de cascada. En el primer nivel una red de clasificación supervisada, la red de vector de cuantificación y aprendizaje (LVQ: Learning Vector Quantization), filtra los datos descartando todas las mediciones erróneas, mientras que el segundo nivel la BPN predice el nivel de presión sonora.

Fossa y Schenone [8] en su trabajo presentado en 1995 hacen mención a que se habían dedicado grandes esfuerzos para desarrollar modelos de predicción para la estimación del L_{eq} y L_{10} como una función de un grupo de parámetros de tráfico restringidos. Es muy importante poder predecir el ruido de tráfico tan precisamente como sea posible, para usar los modelos predictivos como herramientas de planeamiento. Este objetivo puede ser alcanzado usando diferentes estrategias que incluyen restricciones de tráfico, planeamiento de uso de tierra, aislación de fuentes y/o moradas, barreras acústicas, etc. De este modo los modelos de predicción se deben aplicar a un gran número de casos prácticos tal como la evaluación del efecto del ruido cuando se planea una nueva calle, o cuando una calle existente es reubicada, ensanchada, o se introduce una intersección señalizada. De hecho, las correlaciones disponibles para el cálculo del L_{eq} es insuficiente para esta tarea, dando solo información parcial y siendo incapaz de considerar la influencia de algunos parámetros como ciclos de semáforos. En este trabajo se aplicó una aproximación evento por evento para evaluar la historia del ruido en el tiempo, en ubicaciones asignadas cerca de las calles como una función del flujo del tráfico, de la distribución de clases de los vehículos y de la configuración de la calle. Se han considerado condiciones de tráfico distintas, incluyendo la presencia de intersecciones señalizadas. La comparación con mediciones disponibles y datos teóricos confirmó la validez del modelo propuesto.

En 1995 Biasi y colaboradores [9] desarrollaron un programa de computadora basado en modelos de predicción, haciendo mención a que sólo recientemente la opinión pública ha tomado conciencia de que los niveles de ruido son componentes importantes de la calidad ambiental. Como una consecuencia de la disponibilidad de tecnología más y más sofisticada para el apropiado análisis de producción y propagación de ruido, el número de ingenieros y científicos que tratan de solucionar este problema esta aumentando continuamente. Este trabajo representa una contribución a la investigación involucrada en el desarrollo de código de computadora especialmente orientado al análisis del ruido producido por el tráfico urbano.

En 1997, Prascevic y otros [10] publicaron los resultados del modelado del nivel de ruido de tráfico a través de la tendencia de los datos recolectados en 11 sitios de medición en la ciudad de Nis (Yugoslavia). Se presentaron los modelos que describen el nivel de ruido con sólo una ecuación para todos los sitios, los que tienen dos ecuaciones para dos rangos de nivel y aquellos que tienen una ecuación para cada sitio.

Se demostró que es prácticamente imposible modelar tráfico con una única ecuación, que modelar ruido con ecuaciones separadas por dos rangos de nivel de ruido es bastante correcto y fácil de usar, y que los modelos con una ecuación por punto de medición tienen mayor precisión pero son relativamente complejos por la cantidad de ecuaciones, y muestran que el modelo de dos rangos/ecuaciones es mas preciso que el de una ecuación.

Chakrabarty y otros [11], midieron el ruido de tráfico en 24 cruces de calles de Calcuta (India) durante el verano de 1997, con la grabación simultánea del número de vehículos que pasaban. Se determinaron los valores ponderados A de $L_{eq(24)}$, L_{dn} , L_{10} , L_{90} , L_{99} , L_{np} y TNI. Se desarrollaron las ecuaciones de regresión $L_{eq(h)}$ como una función del logaritmo del número equivalente de vehículos livianos/pesados por hora para toda la ciudad y zonas dentro de la ciudad.

En este trabajo se cuenta con una complicación extra que es la falta de uniformidad de las calles de la ciudad. Se hicieron mediciones para establecer las condiciones del campo acústico. Se categorizaron los vehículos y se determinó la media del ruido ponderado A para

cada categoría de vehículos. Como las distancias del micrófono a la línea de circulación eran distintas se convirtió la distancia a una distancia, por fórmula, de acuerdo a la distancia mínima observada. Los autores destacan el éxito en la obtención de los objetivos propuestos.

Federico Miyara [12] en Argentina, brinda los fundamentos físicos, estadísticos y algorítmicos de la predicción del ruido del tránsito automotor. Desarrolla los conceptos de propagación del sonido en exteriores, incluyendo los efectos de la divergencia geométrica, atenuación en el aire, reflexión y absorción superficial, efectos del viento y los gradientes térmicos, potencia sonora emitida por un vehículo, efectos de la pendiente, aceleración y desaceleración, firma acústica, distribución espectral, intensidad y distribución estadística del tránsito, perfiles de velocidad, y las consecuencias sobre la magnitud, espectro y parámetros estadísticos del ruido total. Finalmente, dió pautas para protocolos de medición y ajuste de los parámetros en situaciones específicas.

En el presente año, González [13] aplicó un procedimiento de optimización del tiempo de muestreo y desarrolló un modelo predictivo que toma en cuenta un entorno atípico considerando eventos anómalos (bocinas, alarmas, escapes ruidosos de motos, vehículos en mal estado, propaganda callejera estática y móvil, etc) muy comunes en ciudades latinoamericanas, dado que las referencias bibliográficas no se adaptan en general a la realidad de este tipo de ciudades. Concluye proponiendo un modelo considerando los eventos mencionados, obteniendo muy buenos resultados.

CONCLUSIONES

Se ha presentado una revisión bibliográfica sucinta tendiente a poner en evidencia los avances registrados en la obtención de modelos precisos de predicción del ruido urbano en los últimos años. Los distintos modelos matemáticos desarrollados demuestran que hay gran variedad de casos de estudio, siendo posible obtener para ellos distintas soluciones y pudiéndose a su vez arribar a dichas soluciones por distintas vías. La investigación muestra también, que aún hay que seguir evaluando estos métodos para extraer de ellos la precisión deseada, y también algunas variables de las cuales no se tiene buena información. En conclusión, puede afirmarse que no todo está dicho en cuanto a la modelación de este fenómeno acústico, debiéndose tener en cuenta además, que cuanto mayor sea la precisión que se quisiera lograr, se deberá contar con mayores recursos técnicos y económicos.

REFERENCIAS

- (1) D. Gilbert (1977), *Journal of Sound and Vibration* 51(2). Noise from Road Traffic (Interrupted Flow). 171-181.
- (2) A. Lawrence y M. Burgess (1980), *Applied Acoustics* 13. Measurement of Traffic Noise Shielding Provided by Buildings. 211-225.
- (3) Favre, Bernad (1983). Noise emission of road vehicles:evaluation of some simple models. *Journal of Sound and Vibration* Cap (10).
- (4) K. S. Jraiw (1987), *Applied Acoustics* 21. A Computer Model to Assess and Predict Road Transport Noise in Built-up Areas. 147-162.
- (5) M. M. Radwan y D.J. Oldham (1987), *Applied Acoustics* 21. The Prediction of Noise from Urban Traffic Under Interrupted Flow Conditions. 163-185
- (6) M. G. Seshagiri Rao, P. Ramalingeswara Rao, K. Srinivas Dev & K. Venkateswara Rao (1989), *Applied Acoustics* 27. A Model for Computing Environmental Noise Levels due to Motor Vehicle Traffic in Visakhapatnam City. 129-136
- (7) G. Cammarata, S. Cavalieri, A. Fichera. (1995), *Neural Networks*, Vol. 8 N°6. A Neural Network Architecture for Noise Prediction. 963-973
- (8) M. Fossa, C. Schenone, M. Schenone (1995) *18th International Congress for Noise Abatement* (Italy). Discrete Modelling of Road Traffic Noise in Urban Areas.
- (9) L. Biasi, L. Castellano, A. Colombo, S. Lattanzi, M. Zambrini (1995) *18th International Congress for Noise Abatement* (Italy). ELITRA: a Code for the Prediction of Noise Pollution due to Urban Traffic.

- (10) M. R. Prascevic, D. S. Cvetkovic, A. S. Deljanin, V. O. Stojanovic (1997) *Fifth International Congress on Sound and Vibration*. December 15-18, Adelaide, South Australia. Modeling of Urban Traffic Noise.
- (11) D. Chakraborty, S. Chandra Santra, A. Mukherjee, B. Roy, P. Das (1997) *Journal Acoustical Society of America* 101(2). Status of Road Traffic Noise in Calcutta Metropolis, India. 943-949
- (12) Federico Miyara (1999). Modelización del ruido de tránsito automotor, modelos físicos determinísticos y estadísticos. *Curso Universidad Austral de Chile*. Valdivia
- (13) A. E. González, (2000), Contaminación Sonora en ambiente urbano: Optimización del tiempo de muestreo en Montevideo y desarrollo de un modelo predictivo en un entorno atípico. *Tesis Doctoral*. Universidad de la República Oriental del Uruguay. Montevideo, Uruguay