

MODELO PREDICTIVO MICROSCOPICO DE RUIDO Y DE TRÁFICO URBANO CMPTRU

Sergio González-Rojo¹, Oscar Ramsés Ruiz Varela², Carlos Eduardo Flores Peña²

División de Estudios de Posgrado e Investigación¹, Depto de Ing EL y ET²
Instituto Tecnológico de Chihuahua
Av. Tecnológico 2909
Tel. 2012000, Fax 4145187
grojo@itch.edu.mx
orruiz@itch.edu.mx

RESUMEN.

En general el modelado de la propagación de ruido en el medio urbano se puede visualizar a escala macroscópica y microscópica.

Los modelos microscópicos de propagación consideran a las fuentes generadoras de ruido como entidades separadas con sus modelos asociados de generación de ruido (que pueden a su vez estar compuestos de submodelos de partes individuales que generan ruido). Los modelos macroscópicos consideran por su parte todo en nivel de ruido en un determinado contexto, el nivel de ruido captado por un receptor ubicado en determinado lugar de interés, considerando variables como el flujo de tráfico.

La forma en que los modelos de propagación representan el ruido se denomina presión acústica. Así mismo un modelo de predicción de ruido de tráfico urbano considera las diversas fuentes de generación de ruido como potencia acústica, la forma como este ruido se propaga por medio de la atmósfera atenuándose y finalmente la percepción del ruido definida como presión acústica.

El problema general de los modelos de generación y propagación del ruido es el hecho de que la estimación en general de la presión acústica obtenida es inferior a lo percibido por los instrumentos de medición de ésta en los ambientes urbanos. Este problema, de la subestimación del ruido, es abordado y se propone la consideración de diversos fenómenos acústicos presentes en la propagación del ruido como el índice de dirección y de reverberación con el fin de mejorar la estimación de la presión acústica.

En este trabajo se considera la generación del ruido (potencia acústica) por los vehículos automotores ligeros y pesados para estimar el nivel de presión acústica en los ambientes urbanos que puede ser usado para definir los niveles de contaminación acústica y también para estimar las condiciones del tráfico urbano.

Palabras Clave: acústica, modelado matemático, potencia acústica, presión acústica, simulación de tráfico.

ABSTRACT.

General modeling of the noise propagation in the urban environment can be visualized in a macroscopic and microscopic scale. Microscopic propagation models consider noise generating sources as entities separated with their associated models (which can in turn be composed of sub-models of individual parts that generate noise). Macroscopic models consider all the noise level in a given context, e.g. the level of noise picked up by a receiver located in particular place of interest, a street. The form in which

propagation models represent the noise is called sound pressure. Likewise a model of prediction of urban traffic, consider the sources of noise like a sound power, how this noise is propagated through the atmosphere fading and finally defines the perception of this noise such as sound pressure. The general problem of generation and propagation of urban traffic noise is the fact that the estimation is lower than the measurement.

This work consider the noise generated by light and heavy motor vehicles to estimate the level of acoustic pressure in urban environments that can be used to define the levels of noise pollution and also to estimate the urban traffic conditions.

Key words: mathematical modeling, acoustics, sound pressure, sound power, traffic simulation.

1. INTRODUCCIÓN

El modelado de la propagación del sonido en el medio urbano puede ser visualizado a escala microscópica y macroscópica, en este trabajo nos interesamos en la escala microscópica. Los primeros trabajos han consistido en el modelado de las calles por dos fachadas paralelas parcialmente absorbentes con un suelo totalmente reflejante. Después han aplicado o adaptado la teoría de fuentes imágenes [1], [2], [9], [10], [11], [12].

Las diferencias observadas entre estos modelos y los datos experimentales han sido atribuidas a no haber tomado en cuenta reflexiones múltiples y difracciones dadas por las irregularidades de las fachadas. Dicho de otra forma, a más sonido directo (radiación fuente-receptor) y de primeras reflexiones (reflexiones del orden 1,2,...), existe un campo "difuso" alimentado por sus reflexiones múltiples y difracciones, que es función de las dimensiones de la avenida y de la difusividad de las fachadas. Más tarde modelos "clásicos" como: ASJ 1998 Model, Traffic Noise Prediction Model [15], VDI 2714 [14], NMPB [3], MAPB [4], ENM [5] consideran factores de corrección dados a la difracción, la absorción, las reflexiones, los efectos meteorológicos y la altura de la fuente, entre otros.

A diferencia de los modelos clásicos de la acústica ya comentados, hay enfoques diversos:

- que consideran que este campo que se difunde, no se propaga sino se reexpande en una calle (como la conducción del calor, de donde sale esta idea original de difusión de la energía sonora),
- modelos urbanos a escala (maqueta),

- modelos en espacios multidimensionales no cartesianos llamados mosaicos « tesseral »,
- enfoques basados en el marco de la acústica de salas para modelado de los campos sonoros difundidos [6].
- enfoque globales que provienen de la inteligencia artificial, específicamente las redes neuronales que tratan la generación y la propagación del ruido,
- hay también nanomodelos que representan la emisión del ruido a partir de diferentes componentes de los motores y/o los vehículos.

Para el conjunto de métodos de previsión de niveles sonoros, el vehículo en circulación es asimilado a una fuente puntual situada a 0.80 m del suelo [7]. Esta hipótesis simplificadora está justificada en la medida en que ella no introduce más que errores despreciables en la medida en que el receptor se aleja algunos metros del eje de la superficie de la calle. La distancia “ r ” del receptor a la fuente puntual debe en efecto ser grande comparada con las dimensiones del vehículo para que ella (la fuente) pueda ser verificada. La hipótesis de la fuente puntual puede admitirse sin inconveniente ni error significativo por el conjunto de previsiones del ruido debido a la circulación de los vehículos.

Otra hipótesis simplificadora relativa a la fuente sonora, utilizada en el método presente, se basa en el hecho de que la fuente es supuestamente “omnidireccional”. En las condiciones usuales de validez de la asimilación de las fuentes reales a las fuentes puntuales omnidireccionales, la presión acústica “ p^2 ” a la distancia “ r ” de la fuente es proporcional a la potencia acústica “ W ” del vehículo, en ausencia de la absorción por el aire, por una fuente que emite ruido en todo el espacio, según la formula siguiente (1):

$$p^2 = \frac{DW\rho_0 c}{4\pi r^2} \quad (1)$$

donde ρ_0 es la masa volumétrica del aire en reposo (1.1 Kg/m³ a 20oC), c es la velocidad del son en el aire (343 m/s a 20oC), para estimar la presión acústica eficaz, W es la potencia acústica de la fuente, r es la distancia entre el emisor y el receptor y D es el coeficiente de directividad.

El modelado del comportamiento de los vehículos está basado en la utilización de una ley de seguimiento a la cual son asociadas restricciones físicas ligadas a la aceleración y al frenado de los vehículos, a la distancia entre ellos y a los cambios de fase de las señales luminosas.

Cuando los vehículos se aproximan a una intersección los conductores deben tomar varias decisiones basados en las condiciones siguientes: el estado de la señalización, la distancia al semáforo, la posición del vehículo seguido si es el caso, la dimensión de la fila y la posición en la fila de vehículos.

La intensificación del tráfico vehicular en una red más y más densa utilizada por un parque vehicular ha suscitado la aparición de numerosos estudios sobre la importancia del ruido ligado a la circulación vehicular. La mayor parte de estos estudios se interesan en el ruido producido por los vehículos en las vías rápidas y en menor medida el problema del ruido en el medio urbano.

Podemos encontrar varias razones para explicar esa elección, una de ellas es que las condiciones de circulación sobre las vías rápidas son mucho más homogéneas que sobre las vías urbanas. La mayor independencia entre los vehículos, la ausencia de restricciones diversas como los semáforos en rojo, intersecciones, peatones, etc., hacen que las características del tráfico sean más fácilmente accesibles en el caso de las vías rápidas. La potencia acústica emitida por los vehículos está en este caso más estrechamente ligada a su velocidad.

Podemos clasificar los distintos modelos existentes en dos grupos, aquellos que involucran flujo, que suponen una circulación fluida y los establecidos en régimen urbano saturado o debido a su enfoque en modelos macroscópicos y microscópicos [8].

Esta parte es la descripción del modelo del comportamiento acústico de tráfico al aproximarse al semáforo. Las salidas de este modelo se componen de varias firmas acústicas del tráfico en diferentes puntos a lo largo de la calle. Estas firmas son una buena aproximación de las determinadas en localizaciones reales y bajo condiciones similares.

El uso del modelo conduce a una mejor comprensión del fenómeno y la derivación de las leyes que se basan en parámetros como el flujo de tráfico, los límites de velocidad, la proporción de vehículos pesados y los ciclos de las señales de tráfico y su sincronización [8].

Para determinar el nivel del ruido han sido utilizados diferentes modelos; por un lado aquellos que caracterizan las fuentes sonoras, es decir que modelan la generación del ruido y por el otro aquellos que se encargan de caracterizar la propagación del ruido en el medio urbano.

La caracterización y la clasificación de fuentes sonoras ha sido realizado por el CETUR [7], también la estimación de su altura en relación al suelo, El modelo microscópico utilizado para la generación del ruido [8] está descrito de forma detallada. El modelo desarrollado para caracterizar la propagación del sonido en el medio urbano considera los componentes atenuantes A_i del modelo Francés NMPB [3]. El índice de reflexión del modelo alemán VDI 2714/2770 [15] y el modelo del índice de reverberación de Guilhot y Flenner [2] han sido agregados al modelo de propagación CMPTRU propuesto.

El Modelo Analítico para la Previsión del Ruido MAPB y el modelo estándar alemán VDI 2714/2770 tienen importantes similitudes en relación con NMPB.

Se establece aquí, en este trabajo, la validación y la calibración del modelo de previsión de ruido generado por el tráfico urbano.

2 EL MODELADO DEL RUIDO EN EL MEDIO URBANO

La predicción del ruido ambiental toma la forma general siguiente:

- 1) Determinar los niveles de potencia acústica de las fuentes sonoras L_w .
- 2) Calcular la atenuación atmosférica total para un escenario dado, por medio del cálculo de los diferentes componentes de atenuación A_i :
 - Propagación geométrica.
 - Efectos del suelo.
 - Absorción del aire.
 - Efectos del viento.
 - Efectos de la temperatura.
 - Aislamiento por la vegetación y los inmuebles.
 - Cercas.
 - Barreras.
- 3) Calcular el nivel de la presión acústica L_p resultante en un punto del entorno por :

$$L_p = \sum_{todas las fuentes}^{\log_{10}} \left[L_w - \sum_{i=1}^n \text{aritmética} (A_i) \right] \quad (2)$$

La implementación de la ecuación (2) es realizada de maneras diferentes. Cada enfoque ha desarrollado su propia metodología basada por una parte sobre bases teóricas y por otra parte sobre la interpretación de los efectos medidos. Nuestro enfoque es el desarrollado en los subcapítulos siguientes.

2.1. EL MODELADO DE LA GENERACIÓN DEL RUIDO (L_w).

En el medio urbano el nivel de ruido generado por los vehículos es directamente proporcional a sus dimensiones. Para los vehículos ligeros el nivel de ruido depende de la carga del motor y de su velocidad fundamentalmente. La relación entre: velocidad y aceleración define el régimen de operación del motor. La aceleración máxima es proporcional a la velocidad deseada del vehículo. Una vez que el régimen del motor es determinado, el nivel de potencia acústica es calculado para el vehículo ligero de la forma siguiente:

$$L_{w_i} = A_i \log v + B_i a \log v + C_i a + D_i \quad (3)$$

donde L_{w_i} es el nivel de potencia acústica en dB(A) por el régimen i del motor, v es la velocidad instantánea (km/h), a es la aceleración instantánea (m/s^2), y A_i , B_i , C_i , D_i son parámetros constantes para el régimen i del motor (ver figura 1 y tabla 1) [8].

Régimen i	A	B	C	D
1	53	-2.5	6.5	25
2	53	-10	18	14
3	47	-7.0	14	19
4	40	-3.0	7.0	27

Tabla 1. Valor de los parámetros constantes que definen L_{w_i} de un vehículo ligero como función de los parámetros dinámicos v y a .

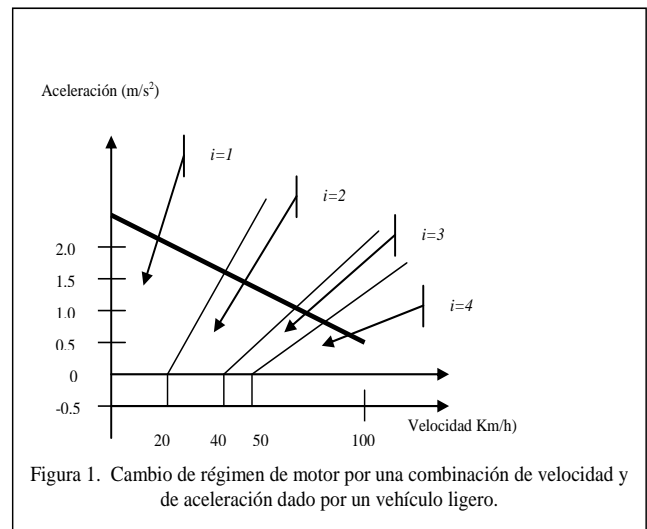


Figura 1. Cambio de régimen de motor por una combinación de velocidad y de aceleración dado por un vehículo ligero.

Dado al considerable número de tipos de vehículos pesados y de la forma en la cual son cargados, la potencia acústica de estos vehículos es difícil de modelar. El procedimiento para determinar el nivel de potencia acústica es el mismo que para los vehículos ligeros, para esto el modelo siguiente es utilizado:

$$L_{w_i} = A_i \log v + B_i \quad (4)$$

donde L_{w_i} es el nivel de potencia acústica en dB(A) para el régimen i del motor, v es la velocidad instantánea del vehículo en km/h, A_i y B_i son parámetros constantes para el régimen i

Régimen i	A	B
1	30	68
2	30	64
3	30	60
4	30	56

Tabla 2. Parámetros constantes que definen L_{w_i} de un autobús como función de los parámetros dinámicos v y a .

del motor (ver figura 2 y tabla 2). El valor asignado para la relación (3) no varía más que ± 3 dB(A) alrededor de la media observada en condiciones de tránsito urbano la cual es aproximadamente $15 \log v$ para velocidades superiores a 20 km/h (ibid.).

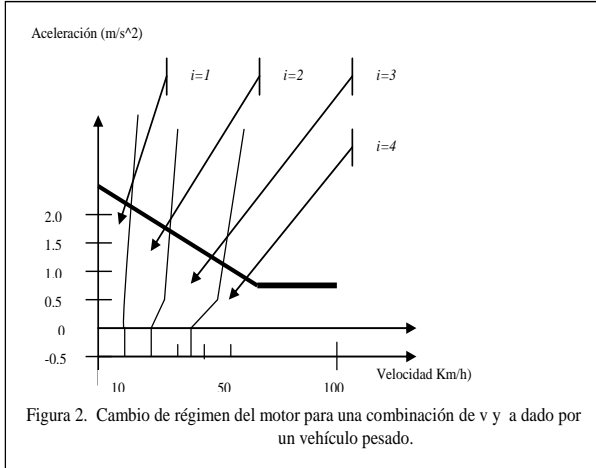


Figura 2. Cambio de régimen del motor para una combinación de v y a dado por un vehículo pesado.

2.2 EL MODELADO DE LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO

2.2.1 El nivel de presión acústica L_p

El nivel de la presión acústica L_p en un punto receptor localizado a una distancia r del punto central de una sola fuente, en nuestro caso, es calculado a partir de la expresión siguiente:

$$L_p = L_w + ID + IR + IRe v - \sum_{i=1}^n \text{arith} A_i \quad (5)$$

donde, L_p es el nivel de presión acústica, L_w es el nivel de potencia acústica, ID es el índice de directividad, IR es el índice de reflexión, $IRe v$ es el índice de reverberación y A_i son los componentes de atenuación. Este es el modelo propuesto de propagación del sonido en el medio urbano.

El nivel de presión acústica L_p ha sido el objeto de numerosas mediciones en el curso de los últimos años. Este nivel es el objeto particular de medidas de nivel sonoro máximo para la homologación de los vehículos por tipo y de motocicletas antes de su venta. Ha sido igualmente el objeto de numerosas medidas de campo por diversos organismos de investigación o de control de vehículos en circulación.

2.2.2 El índice de directividad ID

El índice de directividad de una fuente sonora ID , es la diferencia entre el nivel de presión acústica medido en una dirección específica de la irradiación de sonido (radiación directa) y el nivel que habría de ser producido en el mismo

punto por una fuente omnidireccional de la misma potencia acústica [5], entonces si una fuente tuviera un ID que remonta esta diferencia debe ser considerada. El coeficiente de directividad de la fuente es estimado igual a $D=2$ en el caso de una fuente omnidireccional que posee sobre un plano reflejante que emite ruido en un medio espacio (media esfera, es el caso de un vehículo sobre la calle) [13]. El índice de directividad es igual a:

$$ID = 10 \log_{10}(D) \text{ dB(A)} = 10 \log_{10}(2) = 3 \text{ dB(A)} \quad (6)$$

El índice de directividad ID , será considerado al momento de calcular el nivel global de presión acústica en un punto determinado.

2.2.3 El índice de reflexión IR [VDI 2714 / VDI 2720]

La corrección dada a la reflexión, el índice de reflexión ("Solid Angle Réflexion Index") toma valores en función de si la fuente está limitada por planos de reflexión ortogonales, IR toma los valores de 0, 3, 6, 9 dB si la fuente tiene 0, 1, 2 o 3 planos ortogonales respectivamente, esta corrección es considerada en el modelo VDI 2714 / VDI 2720 [14]. Se considera en groso modo que hay dos imágenes de la fuente en el receptor, estas imágenes varían en intensidad naturalmente en relación a la distancia fuente- receptor.

2.2.4 El índice de reverberación $IRe v$

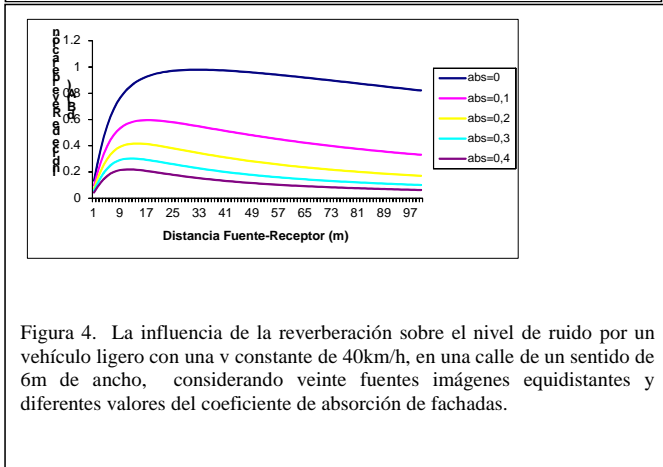
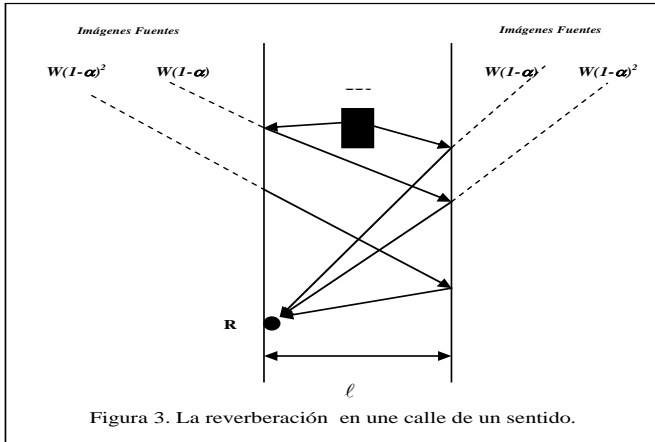
Como en los problemas clásicos de acústica de edificios, la influencia de la reverberación se va a traducir en un aumento del nivel sonoro y una disminución de las fluctuaciones de ese nivel. Existen dos métodos de aproximación posibles: estudio en régimen transitorio o un estudio en régimen establecido del nivel sonoro en función de la distancia a la fuente [2].

La posición del problema es la siguiente: Una fuente puntual de potencia acústica W produce, por reflexiones múltiples, un conjunto de imágenes fuentes equidistantes situadas a ambos lados de la calle (ver la figura 3 y 4).

La presión acústica al punto de medida en el borde de la calle viene a ser (ver (7)),

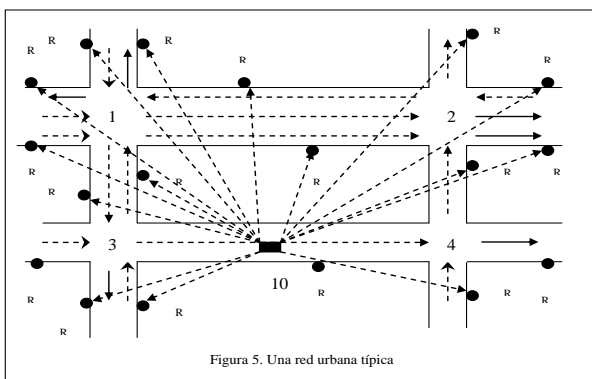
$$P_i^2 = \frac{DW_i \rho_0 c_0 (2 - \alpha)}{4\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(1 - \alpha)^n}{r_i^2 + \left(\frac{2n+1}{2}\right)^2 \ell^2} \quad (7)$$

donde ℓ es el estimado del ancho de la calle, α (0, 0.4) es el coeficiente de absorción de las fachadas y n es el número de imágenes fuentes equidistantes a considerar. Se constata que la velocidad del decrecimiento depende de la distancia r de la fuente. Diferentes valores del coeficiente de absorción α han sido utilizados, se pueden considerar valores típico de $\alpha=0.15$, $\alpha=0.2$ en calles típicas de un centro urbano.



2.3 ATENUACIONES DEBIDAS A LA ATMÓSFERA A,

El cálculo total de las atenuaciones debidas a la atmosfera para un escenario dado se da por el cálculo de diferentes componentes de atenuación A_i siguientes: Efectos del suelo, propagación geométrica, absorción del aire, efectos del viento, efectos de la temperatura, aislamiento por la vegetación y los edificios, cercas y barreras. En esta parte se asume íntegramente el enfoque desarrollado por el método NMPB [3].

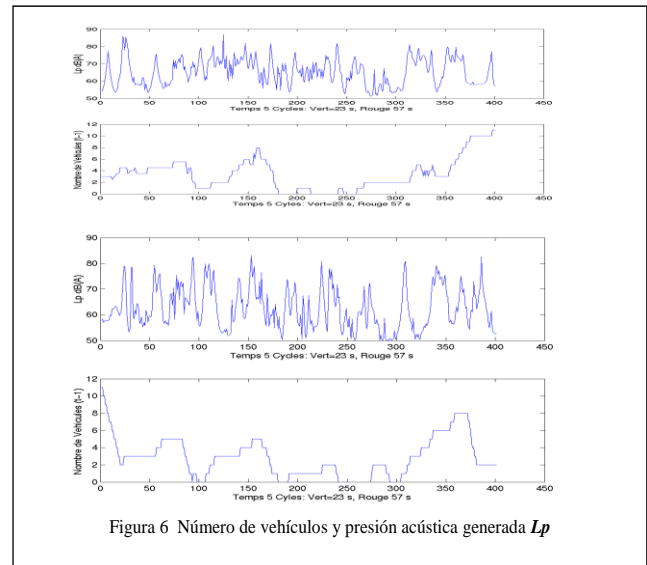


La figura 5 muestra el efecto sonoro de un automotor en todos los receptores ubicados en un ambiente urbano hipotético, de una red urbana típica utilizada como ejemplo.

3.RESULTADOS

La validación puede ser definida como la comparación de la salida de modelos con datos independientes del procedimiento de calibrado. Para calibrar o validar un modelo de microsimulación es necesario en general tener acceso a medidas reales del ruido del tráfico. En este apartado tenemos presentes algunos resultados de la validación.

Aquí presentamos los resultados concernientes a la validación del modelo de ruido de tráfico presente en el simulador de tránsito desarrollado para ilustrar la aplicación de la previsión del ruido y de un enfoque de control de tráfico urbano que deberá ser presentado en el contexto de otro trabajo.

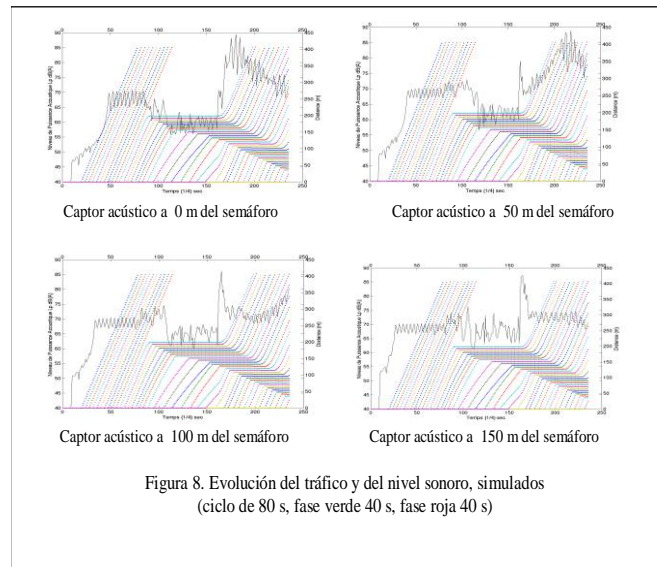


La figura 6 muestra la distribución de las presiones acústicas medidas y simuladas en una calle típica de un solo sentido de un centro urbano. Las medidas son relativas a presiones acústicas equivalentes (la media) durante un s ($L_{p_{eq}}(s)$) y en simulación calculamos la media de la L_p instantánea cada $\frac{1}{4}$ de s durante 1 s . Al momento de las mediciones había viento fuerte y condiciones de tráfico saturado en la calle perpendicular debido a trabajos de construcción.

La tabla 3 presenta las estadísticas descriptivas de los niveles de ruido medidos y simulados. La figura 7 muestra los niveles del ruido medido y simulados donde el receptor se encontraba a 70 m del semáforo.

Estadística Descriptiva	Medida	Simulación
Media	63,6938492	57,7501446
Error – tipo	0,24685938	0,21404575
Mediana	62,5	55,5893035
Moda	58,5	50,000042
Desviación	7,83754249	6,79574176
Varianza	61,4270724	46,182106
Kurtosis (Coeficiente de aplastamiento)	-0,76504726	1,23268198
Coeficiente de asimetría	0,34619811	1,2656524
Playa	36,8	38,1656
Mínimo	50,1	50,000042
Máximo	86,9	88,165642
Suma	64203,4	58212,1458
Número de muestras	1008	1008

Tabla 3 Estadísticas descriptivas de la medición y la simulación de ruido en medio urbano

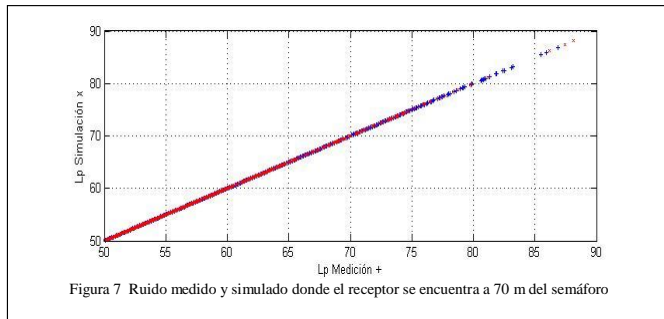


4. CONCLUSIONES

Hemos desarrollado el Modelo Predictivo de Tráfico y Ruido Urbano presentado (Chihuahua Modelo Predictivo de Tráfico y Ruido Urbano, CMPTRU).

El modelo microscópico utilizado para la generación de ruido fue descrito de forma detallada. El índice de reflexión del modelo alemán VDI 2714/2770 [14] y el modelo de reverberación Guilhot-Flenner [2] han sido considerados en el modelo asumido para la propagación del sonido en el medio urbano donde la parte de las atenuaciones atmosféricas fue tomado del modelo NMPB.

La integración de los modelos de generación y de propagación del ruido para estimar los niveles de ruido a nivel de las intersecciones ha estado hecha de tal forma que se obtienen resultados equivalentes en relación a las validaciones de los modelos de propagación utilizados. La baja estimación del ruido inherente a los modelos sigue siendo un problema difícil a resolver, el problema reside al nivel del modelado de generación, de la propagación y del modelado del flujo de tráfico como pudo constatar en las diferentes gráficas de resultados mostradas. Sin embargo estamos interesados sobre todo a representar la dinámica del ruido en relación a la dinámica del tráfico fundamentalmente y en segundo término a estimar el nivel de molestia de este tipo de polución. El objetivo final de este trabajo es el de invertir el modelo (problema) y determinar la dinámica del tráfico a partir de la dinámica del ruido, es decir el estado de las condiciones del tráfico y ciertos parámetros que definen las condiciones del tráfico como la concentración y la densidad del tráfico.



La figura 8 es el resultados de la superposición entre la presión acústica y el diagrama espacio tiempo. Podemos notar la correlación entre las evoluciones del nivel de ruido y el flujo de vehículos. Podemos también verificar la relación existente entre los niveles de ruido y las condiciones del tráfico tales como flujo fluido (libre), frenado, espera, saturación y el arranque. La presión acústica es estimada en diferentes puntos a lo largo de la calle y a 7.5 m del centro de la calle. El efecto de la posición del captor puede ser notado comparando las diferentes figuras.

Referencias

- [1] Wiener F.M., Malme C.I., Gogos C.M. (1965), Sound propagation in urban areas, *J. Acoust. Soc. Am*, 37(4), pp. 738-747.
- [2] Flenner J.P., Étude du Bruit de Trafic Automobile en Site Urbain : Élaboration d'un Modèle de Prévision en Temps Réel, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, 1978.
- [3] Certu, Cstb, Lcpc, Setra, Bruit des infrastructures routières: méthode de calcul incluant les effets météorologiques, Certu, 1997.
- [4] Defrance et al., A new analytical method for the calculation of outdoor noise propagation, *Applied Acoustics*, No. 57, , 1999, 109-127.
- [5] Tonin R. et al., Modelling and Predicting Enviromental Noise, www.rtagroup.com.
- [6] Picaut J., Modélisation de la propagation du son en milieu urbain par un processus de diffusion, Bulletin du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Centre de Nantes, Sept. 2001, pp. 127-140.
- [7] Guide Du Bruit Des Transports Terrestres. Previsions Des Niveaux Sonores. Direction Générale des Transports Intérieurs, Ministère des Transports, Paris.
- [8] Favre, B., Noise at the Approache to Traffic Lights : Result of a Simulation Programme, *Journal of Sound and Vibration* (1978) 58(4), 563-578.
- [9] Wiener F.M., Malme C.I., Gogos C.M. , Sound propagation in urban areas, *J. Acoust. Soc. Am*, 37(4), 1965, pp. 738-747.
- [10] Schlatter W.R. (1971), Sound power measu-rement in a semi-confined space, M. sc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1971, 63 pages.
- [11] Sergeev M.V. (1979), Scattered sound and reverberation on city and in tunnels, *Sov. Phys. Acoust.*, 25(3), 1979, pp. 248-252.
- [12] Vinokur R.Y. (1979), Propagation of sound generated by a point source in certain built-up urban environments, *Sov. Phys. Acoust.*, 25(5), 1979, pp. 377-379.
- [13] David T., Fundamentals of physical acoustics, A. Wiley-Interscience Publications, pp, 495-506, 2000.
- [14] Wetzel E. et al., Modelling the propagation pathway of street-traffic noise: practical comparison of German guidelienes and real-world measurements, *Applied Acoustics*, Vol. 57, pp. 97-107, 1999.
- [15] Yamamoto et al., Road Traffic, Noise Prediction Model « ASJ MODEL 1998 »Proposed by the Acoustical Society of Japan- Part3 : Calculation Model of Sound Propagation,