

# REVISTA DE ACUSTICA

PUBLICACION DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ACUSTICA

Vol. XIV	1 <sup>er</sup> y 2 <sup>o</sup> Trimestre 1.983	Núms. 1-2
<p><b>Director.</b> D. J. J. Martínez Requena.</p> <p><b>Redactor Jefe.</b> D. Antonio Calvo-Manzano</p> <p><b>Redacción, Administración y Publicidad.</b> Sociedad Española de Acústica. Serrano, 144. Teléfono 261 88 06 Madrid-6.</p> <hr/> <p><b>Precio del ejemplar.</b> España: 200 pesetas. Extranjero: \$ 3</p> <p><b>Suscripción anual.</b> España: 600 pesetas Extranjero: \$ 10</p> <hr/> <p><b>Tarifas de publicidad</b> En blanco y negro Una página 10.000 pesetas Media página 5.000 pesetas</p> <hr/> <p>Depósito Legal: M. 19.769-1970</p>	<h2>INDICE</h2>	<p><b>Páginas</b></p>
	<p><b>Actividades de la S.E.A.</b> Primer Encuentro de Trabajo Luso-Español de Acústica . . .</p>	<p>5</p>
	<p><b>Colaboraciones</b> <i>Modelo de Predicción del Nivel Sonoro Continuo Equivalente producido por el Ruido de Tráfico en Vías Urbanas e Interurbanas de Alta Velocidad en Espacio Abierto</i>, por Fernando Luis López Ranz . . . . .</p>	<p>9</p>
	<p><i>Método aproximado de Cálculo del Parámetro EPNL</i>, por José Luis Manglano de Mas, Francisco Belmar Ibáñez y Ángel Gimeno Hernández . . . . .</p>	<p>23</p>
	<p><i>Contaminación Acústica en términos de Nivel Ponderado de Ruido Percibido (WECPNL) en las zonas colindantes al Aeropuerto de Valencia</i>, por José Luis Manglano de Mas, Francisco Belmar Ibáñez y Angel Gimeno Hernández . . . . .</p>	<p>31</p>
	<p><i>Determinación de la forma de las curvas de Ruido de Aerona- ves, en términos de EPNL, en función de la distancia observador-avión</i>, por José Luis Manglano de Mas, Francisco Belmar Ibáñez y Angel Gimeno Hernández . . . . .</p>	<p>45</p>
	<p><i>Atenuación del Senel causada por los Edificios para el caso del ruido emitido por el ferrocarril</i>, por José Luis Manglano de Mas, Hermelando Estellés Belenguer y Francisco Belmar Ibáñez . . . . .</p>	<p>53</p>
	<p><i>Contaminación acústica originada por el ruido emitido por el ferrocarril dentro del Municipio de Valencia</i>, por José Luis Manglano de Mas, Hermelando Estellés Belenguer y Francisco Belmar Ibáñez . . . . .</p>	<p>59</p>
	<p><b>Novedades Técnicas</b> Micrófonos B &amp; K para Estudios . . . . .</p>	<p>69</p>
	<p><b>Publicaciones</b> Nato Asi Series. Serie F: Computer and System Sciences. . . . .</p>	<p>71</p>
	<p>The Noise-CON 83 proceedings are available . . . . .</p>	<p>72</p>
	<p><b>Noticias</b> Acontecimientos Acústicos 1984 . . . . .</p>	<p>73</p>

Los autores son los responsables del contenido de los artículos. Se autoriza la reproducción total o parcial de los artículos citando su procedencia.

# CONTAMINACION ACUSTICA ORIGINADA POR EL RUIDO EMITIDO POR EL FERROCARRIL DENTRO DEL MUNICIPIO DE VALENCIA

*JOSE LUIS MANGLANO DE MAS  
HERMELANDO ESTELLES BELENGUER  
FRANCISCO BELMAR IBAÑEZ*

## INTRODUCCION

El presente estudio se encuadra dentro del campo de la contaminación acústica generada por los medios de transporte en áreas urbanas, y concretamente está enfocado a la obtención de los niveles de molestia originados por el ruido emitido por el ferrocarril dentro del municipio de Valencia.

Dentro de la contaminación acústica originada por el ruido emitido por los medios de transporte podemos citar como más importantes:

- Ruido por tráfico aéreo
- Ruido por tráfico rodado
- Ruido por tráfico de trenes

El grado de molestia causado por el ferrocarril parece ser pequeño en comparación con el causado por el tráfico rodado y el tráfico aéreo. La razón del menor impacto sobre la comunidad del ruido producido por este medio de transporte puede ser debido a que la presencia del ferrocarril en la comunidad es mucho más antigua que la de los otros dos medios de transporte, habiéndose acoplado mucho mejor en la sociedad. Realmente, en

muchos países, el ferrocarril como medio de transporte decayó con el paso de los años. Sin embargo, en los últimos tiempos, parece ser que el ferrocarril vuelve a jugar un papel importante dentro de la estructura de los sistemas modernos de transporte, y es muy posible que con el paso del tiempo tenga que ser considerado como la fuente de ruido más importante dentro de la comunidad. Las razones para esto, es que un incremento en el tráfico y en las velocidades de los trenes, tiene como resultado un incremento de los niveles de ruido, y por tanto en la molestia causada al hombre.

Hay que hacer notar el hecho de que las estaciones de ferrocarril, con el crecimiento demográfico, han ido quedando en el interior de las ciudades, con lo que el número de residentes a lo largo de las líneas férreas ha aumentado considerablemente y por tanto el número de personas perjudicadas va creciendo con el paso del tiempo.

## INDICE DE MOLESTIA

De los efectos del ruido en el hombre, el más extendido es la molestia, entendida ésta como una sensación de desagrado o una

actitud adversa contra un determinado factor ambiental, del cual el ser humano sabe que puede afectar negativamente a su salud o bienestar.

En la evaluación de la reacción de la comunidad frente al ruido es obvio que se necesitará un parámetro que relacione la respuesta subjetiva del hombre con alguna propiedad del ruido que sea fácilmente medible. Siendo la molestia un efecto subjetivo, dependerá tanto de las características físicas del ruido como del estado de ánimo, edad, sensibilidad, nivel cultural del individuo, etc. Debido a esto, ha sido necesario definir una serie de parámetros que nos cuantifiquen la sensación de molestia causada al hombre por cada una de las diferentes fuentes de ruido. Los índices de molestia más utilizados son:

- Nivel sonoro ponderado A
- Nivel sonoro equivalente
- Nivel equivalente día-noche
- Nivel de exposición al ruido de un suceso aislado
- Nivel de ruido percibido
- Nivel de contaminación acústica
- Índice de ruido de tráfico

De entre los índices de molestia mencionados deberemos elegir el más apropiado para el ruido emitido por el ferrocarril. La elección de este parámetro presenta una gran dificultad, ya que para ello se deberían realizar una serie de encuestas o estudios sociales que afectasen a los residentes a lo largo de las líneas férreas. Con este fin se analizaron diversos estudios sociales sobre la molestia causada al hombre por el ruido emitido por el ferrocarril, y en todos ellos se llegó a la conclusión de que el nivel sonoro equivalente era el que mejor se ajustaba a la molestia.

El nivel sonoro equivalente se define como la media energética, ponderada en la escala A, del nivel de ruido promediado en el tiempo de medida. Su expresión es:

$$Leq = 10 \text{Log} \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P(t)^2}{P_0^2} dt$$

donde, T es el tiempo total de medida, en segundos,

P(t) es la presión acústica instantánea en la escala de ponderación A, y

P<sub>0</sub> es la presión acústica de referencia (2.10<sup>-5</sup> N/m<sup>2</sup>).

Una expresión más sencilla es:

$$Leq = 10 \text{Log} \frac{1}{T_0} \sum^n 10^{\text{SENEL}(i)/10} \quad (1)$$

donde, SENEL es el nivel de exposición al ruido de un suceso aislado, y se define como el nivel constante, que si se mantuviese por un periodo de referencia (normalmente de un segundo), transmitiría al receptor la misma cantidad de energía acústica, ponderada en la escala A, que el ruido medido. Su expresión es:

$$\text{SENEL} = 10 \text{Log} \int_0^T 10^{L(t)/10} dt$$

donde, L(t) es el nivel de presión acústica instantánea, en dB(A), y

T es el tiempo en el cual el nivel se mantiene dentro de los 10 dB de su máximo durante el suceso.

En la expresión del Leq, n es el número de sucesos que tienen lugar en el tiempo T<sub>0</sub>.

## NIVEL SONORO EQUIVALENTE

En el ruido emitido por el tren podemos distinguir dos sucesos claramente diferenciados, el ruido emitido por el paso del tren propiamente dicho y el ruido emitido por el silbato del tren. Calculemos el SENEL de estos dos focos sonoros.

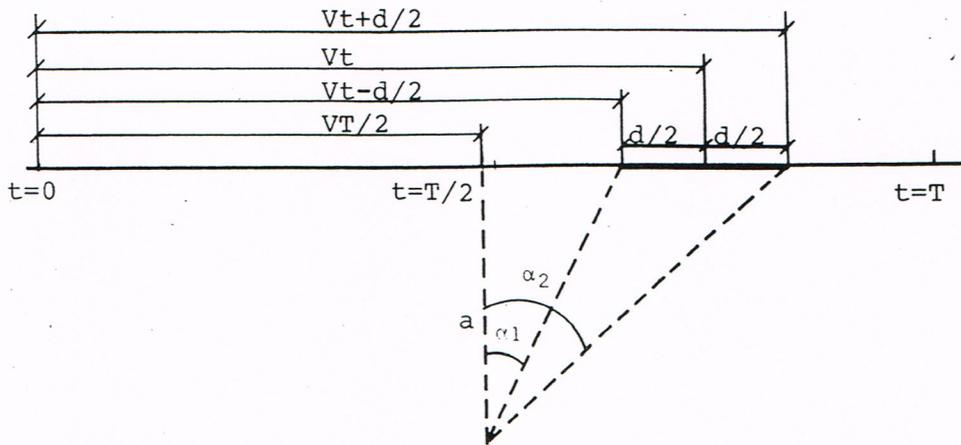


Figura 1

SENEL (k) para el paso del tren.— El paso de un tren se puede considerar como una fuente lineal de ruido, con carácter direccional. Si el tren tiene una longitud  $d$ , el nivel de presión acústica en un punto situado a una distancia  $a$  de la línea férrea, será:

$$L_p(t) = L_w - 10\text{Log}(4\pi a d) + 10\text{Log}\left(\text{arctag}\frac{2Vt - VT + d}{2a} - \text{arctag}\frac{2Vt - VT - d}{2a} + \frac{2a(2Vt - VT + d)}{4a^2 + (2Vt - VT + d)^2} - \frac{2a(2Vt - VT - d)}{4a^2 + (2Vt - VT - d)^2}\right)$$

donde,  $V$  es la velocidad del tren, en m/s, y  $T$  es el tiempo en que el nivel se mantiene dentro de los 10 dB de su máximo, en segundos.

El nivel de potencia acústica,  $L_w$ , se obtiene experimentalmente para cada tipo de tren, y viene dado en función de la velocidad por una ecuación del tipo:

$$L_w = A + B\text{Log}(V)$$

donde las constantes  $A$  y  $B$  dependen del tipo de tren y de la línea férrea.

El SENEL (k) para el paso de un tren vendrá dado por la expresión:

$$\begin{aligned} \text{SENEL}(k) &= 10\text{Log}\int_0^T 10^{L_p(t)/10} dt = \\ &= L_w - 10\text{Log}(4\pi a d) + \\ &+ 10\text{Log}\left[\left(T + \frac{d}{V}\right)\text{arctag}\frac{VT + d}{2a} + \left(T - \frac{d}{V}\right)\text{arctag}\frac{d - VT}{2a}\right] \end{aligned}$$

SENEL (s) para el silbato.— El silbato del tren se puede considerar como una fuente puntual, por tanto el nivel de presión acústica, en un punto situado a una distancia  $a$  de la vía, será:

$$L_p(t) = L_w - 10\text{Log}[(s - Vt)^2 + a^2] - 10\text{Log}(4\pi)$$

donde,  $s$  es la distancia entre el punto en que el tren comienza a silbar y la normal a la vía trazada por el punto de observación.

El nivel de potencia acústica del silbato,  $L_w$ , se puede obtener experimentalmente o bien se puede calcular a partir de la potencia acústica nominal del silbato del tren.

El SENEL (s) para el silbato será:

$$\text{SENEL (s)} = L_w - 10\text{Log}(4\pi aV) + 10\text{Log}(\text{arctag}(s/a) - \text{arctag}\frac{s - VP}{a})$$

donde, P es el periodo de tiempo en que tiene lugar la emisión de la señal acústica por el silbato del tren.

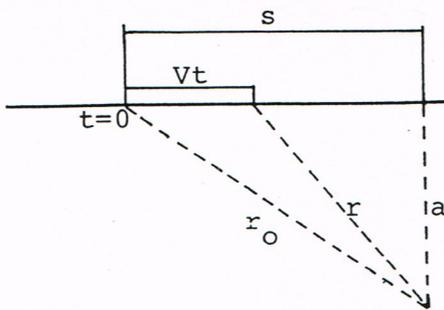


Figura 2

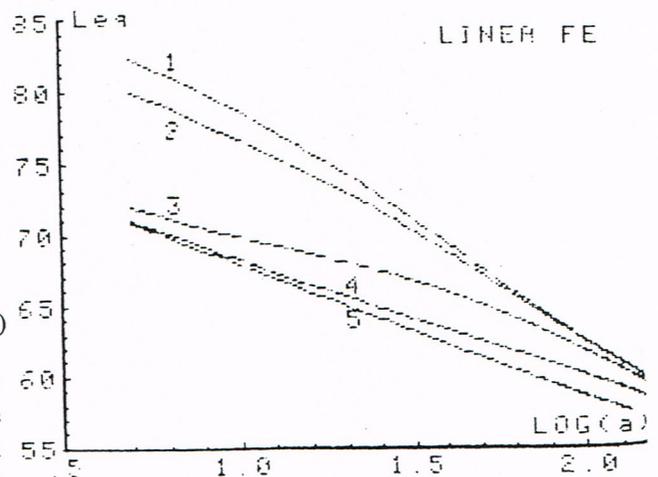
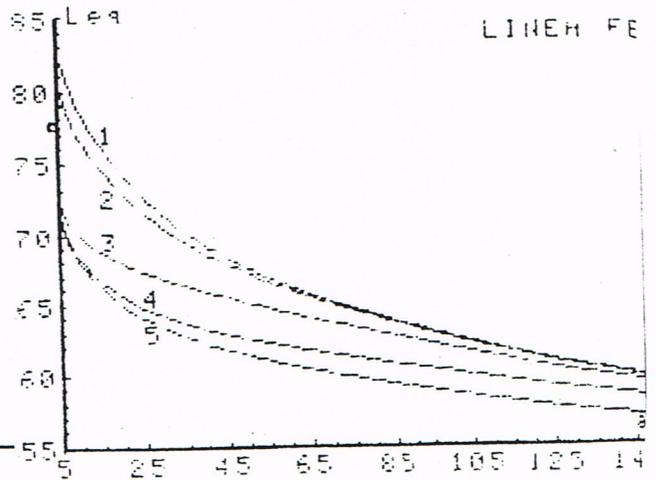
Como ambos sucesos, el paso del tren y la emisión de la señal acústica, son simultáneos, el SENELT para un tren dado será la suma de los SENEL (k) y SENEL (s), es decir:

$$\text{SENELT} = 10\text{Log}(10^{\text{SENEL(k)}/10} + 10^{\text{SENEL(s)}/10})$$

Conocidos los SENELT de cada tipo de tren y conocido el número de cada uno de estos que circulan diariamente por una línea férrea, el nivel sonoro equivalente se calculará mediante la expresión (1).

Al representar gráficamente la variación del nivel equivalente en función de la distancia a la vía, para distintos valores de  $s$  y para unas condiciones de funcionamiento (velocidad y emisión de señales acústicas), se observa que esta variación es prácticamente

logarítmica, por lo que también se representa la variación del nivel equivalente en función del  $\text{Log}(a)$ , mostrando las correspondientes rectas de regresión,  $L_{eq} = A + B\text{Log}(a)$ , y los coeficientes de correlación, que están muy próximos a la unidad.



$$L_{eq} = -16.298 * \text{LOG}(A) + 95.175$$

PARA  $s = 20 \text{ m}$   $r = .99832$

$$L_{eq} = -14.677 * \text{LOG}(A) + 91.826$$

PARA  $s = 40 \text{ m}$   $r = .99581$

$$L_{eq} = -9.116 * \text{LOG}(A) + 79.934$$

PARA  $s = 80 \text{ m}$   $r = .97057$

$$\text{Leq} = -8.3509 * \text{LOG}(A) + 76.636$$

PARA s = 160 m                      r = .99871

$$\text{Leq} = -9.3516 * \text{LOG}(A) + 77.228$$

PARA s = 320 m                      r = .9998

Figura 3

### FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO

1) Absorción atmosférica.— Esta depende de la frecuencia del sonido, de la temperatura ambiente, de la humedad relativa del aire y de la distancia fuente-receptor. Atendiendo a los análisis en frecuencia realizados (ver por ejemplo la figura 4) y a la recomendación de la Organización Internacional de Normalización (ISO TC 43), podemos considerar que este factor es despreciable, puesto que para frecuencias inferiores a 4000 Hz y temperaturas superiores a 10°C y humedades relativas superiores al 50%, la atenuación es inferior a 1 dB/100 m, según la norma señalada.

2) Atenuación por el terreno.— En este caso la atenuación depende de la frecuencia del sonido, de la naturaleza del terreno y de la distancia fuente-receptor, y puede calcularse por las expresiones:

$$\text{Atenuación} = 0 \text{ dB para } fr < 1,22 \cdot 10^5$$

$$\text{Atenuación} = 10 \text{Log}(fr) - 51 \text{ dB}$$

para  $fr > 1,22 \cdot 10^5$

donde la frecuencia, f, viene dada en Hz., y la distancia fuente-receptor en metros.

De estas ecuaciones se desprende que la atenuación es despreciable (inferior a 1 dB) para frecuencias inferiores a 1000-1250 Hz y distancias fuente-receptor inferiores a 150 m.

3) Atenuación por edificios.— La atenuación causada por los edificios en el nivel de presión acústica se puede condensar en la expresión:

$$\text{Atenuación} = (13 + 6 + 2) \text{ dB}(A)$$

donde, el primer término, 13, corresponde a un primer bloque de edificios, el segundo, 6, a un segundo bloque, y el tercero, 2, es la desviación típica. En este caso no importa la anchura del edificio ni la distancia fuente-receptor o línea férrea-edificio.

Sin embargo, la atenuación del SENEL causada por los edificios depende de la distancia fuente-edificio y edificio-receptor. Así, por ejemplo, en la figura 5 se muestra la atenuación del SENEL causada por un edificio situado a 10 metros de la línea férrea, en el caso de un tren de 75 metros de longitud.

4) Condiciones de funcionamiento.— Dentro de este grupo podemos citar como más importantes los factores siguientes:

- Tipo de tren
- Tráfico
- Velocidad y longitud del tren
- Número de emisiones acústicas (silbato) y duración de estas.

En el presente trabajo se agruparon todos los trenes que circulan por las líneas férreas que existen dentro del municipio de Valencia, en 9 tipos, asignando a cada uno de ellos una longitud y una velocidad, dependiendo esta última de la zona por la que circula el tren. También se fijaron los puntos donde el tren hace sonar el silbato y la duración de la emisión, dependiendo ésta de la zona donde se produzca la emisión, según sea la zona rural o urbana.

### TRAZADO DE LAS CURVAS DE IGUAL NIVEL EQUIVALENTE

La obtención de las curvas de igual nivel equivalente en áreas urbanas, es un proceso muy complejo que depende en gran manera de la configuración de la zona. Para el correcto trazado de las curvas sería necesario cono-

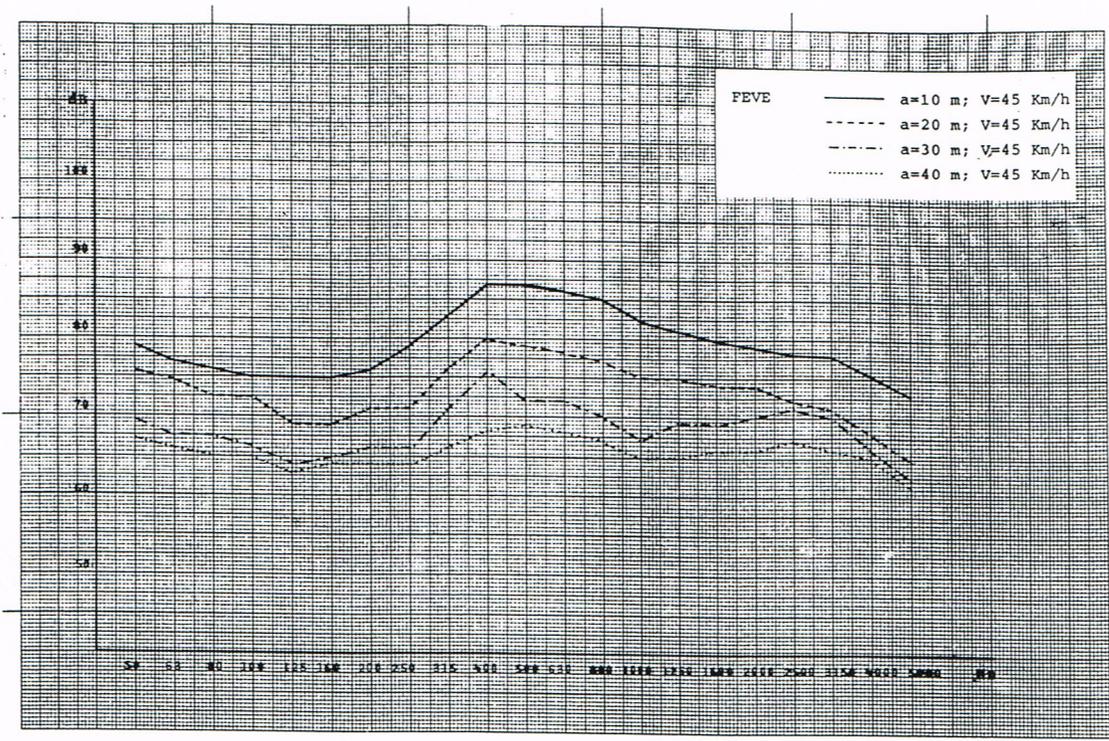


Figura 4

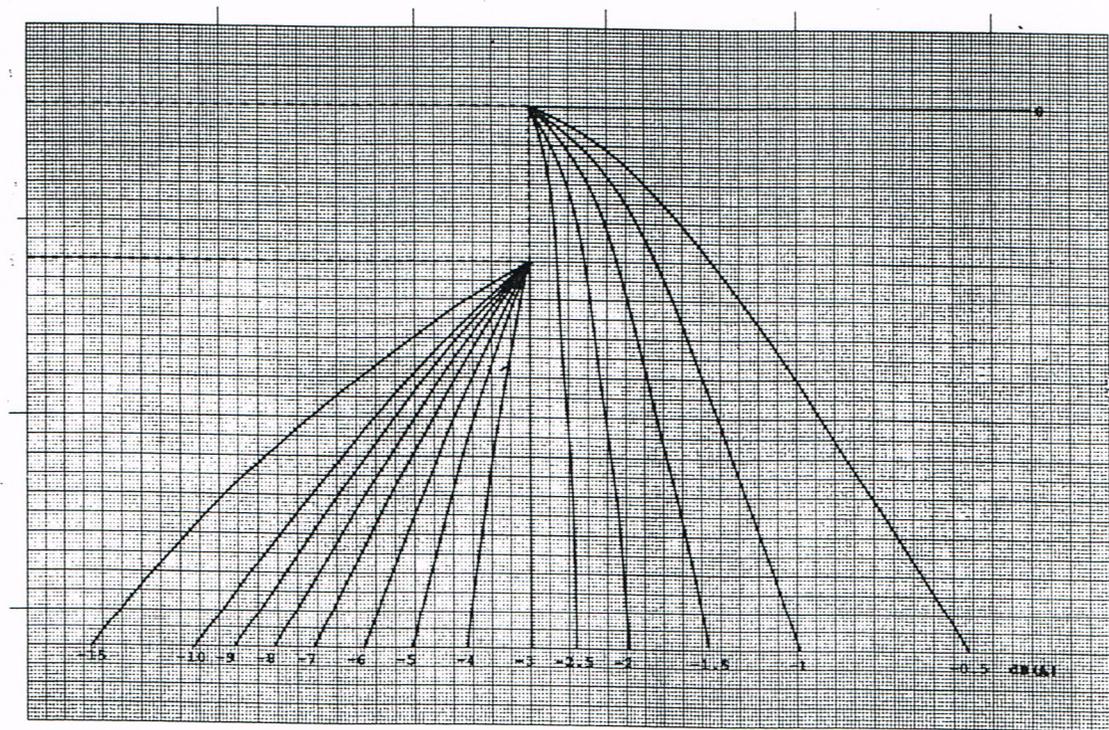


Figura 5

cer con exactitud las características urbanas de la zona en cuestión.

Como lo que nos proponemos es el trazado de las curvas en todo el municipio de Valencia, sería prácticamente imposible realizarlo considerando la configuración urbana de todo el municipio. Por tanto, trazaremos las curvas de igual nivel equivalente como si se tratara de campo libre (ausencia de edificios). Conocidas estas curvas y conocido el efecto de los edificios, será sumamente sencillo calcular el nivel equivalente en cualquier punto de una zona cuya configuración urbana sea conocida.

Para el trazado de las curvas, hemos dividido el término municipal de Valencia en 26 zonas, definiendo para cada una de ellas las variables que intervienen en el cálculo del nivel equivalente, como son la velocidad del tren, la emisión de señales acústicas, etc.

El trazado de las curvas de igual nivel equivalente se realizará para cada zona por separado, y el proceso a seguir en cada una de ellas será el siguiente:

— Primero se elegirán los puntos a lo largo de la línea férrea para los cuales se va a calcular el nivel equivalente en función de la distancia a la vía.

— A continuación se obtendrá para cada uno de los puntos elegidos, la ecuación que nos dará el nivel equivalente en función del logaritmo de la distancia a la vía.

— A partir de estas ecuaciones se calcularán los valores de  $a$  para los que el nivel equivalente es igual a 55, 60, 65, 70, 75 y 80 dB(A).

— Por último se procederá al trazado manual de las curvas.

En la figura 6 se muestra una de las zonas estudiadas en la que aparecen las curvas de 80, 75, 60 y 65 dB(A).

## COMPROBACION EXPERIMENTAL

La comprobación experimental la vamos a realizar en dos etapas. En la primera de ellas estudiaremos el ajuste entre los niveles teóricos y los niveles experimentales. En la segunda etapa, someteremos a las diferencias entre los niveles teóricos y experimentales a un test de normalidad, para estudiar las posibles desviaciones.

1ª Etapa.— Esta primera prueba la realizaremos individualmente para cada tipo de tren, y consiste en estudiar si los niveles equivalentes teóricos obtenidos en el presente trabajo se ajustan a los obtenidos experimentalmente. Para ello, calcularemos el coeficiente de correlación entre ambos valores, para cada tipo de tren.

En la tabla I se muestran los resultados obtenidos para uno de los tipos de tren, concretamente para un tren eléctrico de vía estrecha. Como se puede observar, las diferencias entre los valores teóricos y experimentales raramente superan los 2 dB, y el coeficiente de correlación está muy próximo a la unidad, lo que nos indica que el ajuste entre ambos valores es aceptable.

2ª Etapa.— La prueba anterior nos dice que el ajuste entre los valores teóricos y experimentales es bueno, pero no nos dice si los valores teóricos tienden a estar por encima o por debajo de los experimentales, es decir si la distribución de las diferencias entre ambos valores presenta algún tipo de sesgo.

Para estudiar este punto someteremos a las diferencias entre los valores teóricos y experimentales del nivel equivalente a un test de normalidad, el test de Kolmogorov-Smirnov. Este test consiste en calcular la diferencia máxima entre la función de distribución acumulativa muestral y la función de distribución acumulativa normal de media 0 y desviación típica la que presenten las muestras (1.29 en nuestro caso). Si esta diferencia es menor que un cierto valor tabulado, que en nuestro caso



<u>Leq TEORICO</u>	<u>Leq EXPERIMENTAL</u>
68.57	68.74
72.55	70.50
69.17	69.54
72.36	72.02
74.29	74.35
74.49	72.63
74.80	73.84
76.65	77.44
75.88	75.44
75.43	74.44
76.18	77.56
79.49	80.99
74.39	77.13
72.36	74.11
73.50	75.08
73.50	73.97
72.52	72.58
71.32	68.07
73.74	75.80
71.76	70.49
72.43	71.14
70.96	69.35
73.3	72.19
73.20	72.04
70.18	68.21
72.77	71.32
74.02	73.83
73.63	73.03
72.97	71.51
71.83	70.11
75.83	74.77
73.25	71.49
73.97	73.32
75.98	75.65
76.99	76.23
74.80	74.37
77.07	77.16
75.98	76.4
73.89	73.26
76.28	76.20
75.98	76.51
77.03	77.09
76.20	75.45
75.34	74.84
77.99	78.16
76.20	75.80
77.03	76.88

Coefficiente de Correlación:  $r = .92$

TABLA I

para un nivel de confianza del 95% es de 0.1062, diremos que la función de distribución muestral es normal de media 0.

En la figura 7, se han representado las funciones muestral,  $F_n(x)$  y normal,  $F_o(x)$ , de ésta se observa que la diferencia máxima entre ambas funciones se presenta para  $x = -0.17$ , como en este punto las funciones toman los valores:

$$F_n(-0.17) = 0.3354$$

$$F_o(-0.17) = 0.4404$$

resulta que la diferencia máxima es 0.1050, que es menor que el valor tabulado mencionado anteriormente.

Por tanto, podemos aceptar, con un nivel de confianza del 95% que la hipótesis de que los valores residuales siguen una distribución normal de media 0 y desviación típica 1.29, es válida. Así pues, los valores teóricos no tienden a ser ni superiores ni inferiores a los valores experimentales.

#### BIBLIOGRAFIA

- (1) Contribución al estudio de un modelo matemático sobre la propagación del ruido emitido por el ferrocarril y los niveles de molestia dentro del municipio de Valencia. 1982. E.T.S. de Ingenieros Industriales de Valencia. H. Estellés Belenguer.
- (2) The Propagation Of Railway Noise. 1974. University of Southampton, Institute of Sound and Vibration Research. J.A. Tubby.
- (3) Note on Two Common Problems of Sound Propagation. 1969. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich. E.J. Rathe.
- (4) Equivalente Mean Energy Level from Relatively Short Part of Railway Lines. 1979. Journal of Sound and Vibration. M. Louden.
- (5) Railway Noise Annoyance in Residential Areas: Current Findings and Suggestions for Future Research. 1976. University of Southampton, Department of Social Statistics. J.M. Fields.
- (6) Contribución al estudio de la contaminación acústica originada por la Aviación Comercial en las proximidades del Aeropuerto de Valencia. 1981. E.T.S. de Ingenieros Industriales de Valencia. F. Belmar Ibáñez.