

01121  
2



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

---

---

# RUIDO EN CARRETERAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

**AGUILAR MORALES CASIANO**

DIRECTOR DE TESIS: ING. MIGUEL ANGEL GONZALEZ LOPEZ

MEXICO, D. F.

NOVIEMBRE DEL 2003

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

A



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

Autorizo a la Dirección General de Secretarías de la UNAM a financiar en formato electrónico el contenido de mi trabajo profesional.

NOMBRE: Aguilar Morales Casiano

FECHA: 31 de Octubre de 2003

FIRMA: \_\_\_\_\_

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/016/03

Señor  
CASIANO AGUILAR MORALES  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. MIGUEL ANGEL GONZALEZ LOPEZ, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"RUIDO EN CARRETERAS"**

- INTRODUCCIÓN
- I. PARÁMETROS BÁSICOS DEL ESTUDIO
  - II. MODELACIÓN
  - III. VERIFICACIÓN DEL MODELO MEDIANTE UN CASO ESTUDIO
  - IV. PROGRAMA DE CÓMPUTO PARA EVALUAR EL RUIDO EN CARRETERAS EN LA ETAPA DE OPERACIÓN
  - V. DISEÑO DE BARRERAS DE CONTENCIÓN
  - VI. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cd. Universitaria a 7 Marzo 2003

EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO  
GFB/GMP/mstg.

**A DIOS**

*Por darme la vida y la tranquilidad para poderme desarrollar como persona,*

**A MIS PADRES**

*Tomás Aguilar Madrigal  
Victalina Morales Huerta*

*Por todo el cariño, comprensión, desvelos que han puesto en mí. Se como se esforzaron por darme una educación óptima y por darme todo lo necesario.*

*¡ Gracias por ser tan maravillosos!*

**A MIS HERMANOS**

*José Luis †  
Elodia  
María Eugenia*

*Por todos los concejos y apoyo que me han brindado en todo momento este trabajo también es de ustedes, gracias por impulsarme ser mejor día con día.*

**A LA FAMILIA MEDINA AGUILAR**

*JORGE  
CITLALI  
LUIS ANGEL*

*Por ser y estar, por compartir el espacio y los momentos significativos.*

**A ROSALBA RODRÍGUEZ CHAVEZ**

*Por ser como eres conmigo, todo lo que significas para mi ya lo sabes de sobra, y espero que siempre, siempre estés junto a mi y que nuestra relación cada día crezca más... muchas gracias por impulsarme a sacar adelante este proyecto.*

**AL ING. MIGUEL ANGEL GONZALEZ LOPEZ**

*Por su orientación y paciencia, sin la cual no se hubiera logrado el presente trabajo.*

*Finalmente a todas las personas que de alguna u otra forma antenido que ver para que fuese posible este proyecto.*

---

# **RUIDO EN CARRETERAS**

## **Introducción**

### **1. Parámetros Básicos**

- 1.1 Sonido y Ruido
- 1.1.1 Características Físicas del Sonido

### **1.2 El poder del sonido y su intensidad**

- 1.2.1 Sonidos periódicos y tonos puros
- 1.2.2 Longitud de onda
- 1.2.3 Sonidos no periódicos
- 1.2.4 Energía de una onda sonora
- 1.2.5 Intensidad sonora
- 1.2.6 Nivel de presión sonora

### **1.3 Características del ruido**

- 1.3.1 El ruido como contaminante.
- 1.3.2 Características del ruido

### **1.4 Niveles y Decibeles del Ruido**

- 1.4.1 Nivel Sonoro con Ponderación A
- 1.4.2 Ponderación A y Efectos del Ruido

### **1.5 Aparatos para medir el ruido**

### **1.6 Efectos en el ser humano**

- 1.6.1 Breve anatomía del oído
- 1.6.2 Oído externo
- 1.6.3 Oído medio
- 1.6.4 Oído interno
- 1.6.5 Protecciones del oído
- 1.6.6 Protecciones del oído externo
- 1.6.7 Protecciones del oído medio
- 1.6.8 Protecciones del oído interno

- 1.6.9 Efectos auditivos del ruido
  - 1.6.9.1 Presbiacusia y socioacusia
  - 1.6.9.2 Desplazamiento temporal del umbral
- 1.6.10 Determinación del riesgo auditivo
- 1.6.11 Interferencia a la palabra
- 1.6.12 Efectos no auditivos del ruido
  - 1.6.12.1 Efectos sobre la voz
  - 1.6.12.2 Efectos psicológicos
  - 1.6.12.3 Otros efectos clínicos
- 1.6.13 Algunos criterios psicoacústicos

## **2. Modelación del Ruido**

### **2.1 Sistemas $L_N$ y $L_{EQ}$**

- 2.1.1 Sistema  $L_N$
- 2.1.2 Sistema  $L_{EQ}$

### **2.2 Transmisión del ruido a exteriores**

- 2.2.1 Ley de inversos cuadrados
- 2.2.2 Campos de radiación de la fuente sonora
- 2.2.3 Directividad
- 2.3 Transmisión por aire
  - 2.3.1 Efectos de las condiciones atmosféricas
  - 2.3.2 Modelo básico de fuente puntual
- 2.4 Modelo para la predicción del ruido.
  - 2.4.1 Ruido de vehículos individuales
  - 2.4.2 Ruido debido a un vehículo en movimiento
  - 2.4.3. Efecto de las atenuaciones en la propagación
  - 2.4.4. Nivel equivalente del ruido de un vehículo en movimiento
  - 2.4.5. Niveles estadísticos  $L_n$  del ruido de un vehículo en movimiento
  - 2.4.6 Ruido como fenómeno colectivo
  - 2.4.7. Nivel equivalente del ruido del tránsito
  - 2.4.8. Niveles estadísticos del tránsito
  - 2.4.9. Descripción estadística del tránsito

### **3. Verificación del Modelo Mediante un Caso Estudio**

#### **Introducción**

##### **3.1 Aforo Vehicular**

##### **3.2 Conclusiones**

### **4. Programa de Cómputo para Evaluar el Ruido en Carreteras en la Etapa de Operación**

#### **Introducción**

##### **4.1 Pantalla inicial**

##### **4.2 Pantalla del modelo $N_{50}$**

##### **4.3 Pantalla del modelo $Leq$**

##### **4.4 Listado del programa**

###### **4.4.1 Desarrollo del programa en Visual Basic**

###### **4.4.2 Diagrama de flujo**

##### **4.5 Código fuente del programa.**

##### **4.6 Ejecución del programa mediante un caso**

### **Diseño de Barreras de Contención**

#### **Introducción**

##### **5.1 Influencia del trazado y diseño de la carretera**

###### **5.1.1 Trazado en planta**

###### **5.1.2 La sección transversal de la carretera.**

###### **5.1.3 Perfil longitudinal de la carretera**

###### **5.1.4 Anchura de la plataforma.**

###### **5.1.6 El tipo de pavimento**

##### **5.2 El entorno de la carretera.**

###### **5.2.1 Atenuación con la distancia**

###### **5.2.2 Atenuación por absorción del aire**

###### **5.2.3 Influencia de la temperatura y del viento en la propagación**

###### **5.2.4 Efecto de los obstáculos. Reflexión y efecto pantalla**

###### **5.2.5 Actuaciones Contra el ruido en Carreteras**

##### **5.3 Acciones sobre la propagación del sonido**

##### **5.4 Actuaciones en el entorno del receptor**

##### **5.5 Barreras acústicas o anti-ruido**

###### **5.5.1 Tipos de barreras acústicas**

###### **5.5.2 Diques de tierra**

###### **5.5.3 Pantallas acústicas convencionales**

###### **5.5.4 Construcciones mixtas**

###### **5.5.5 Cubiertas parciales o totales de la calzada o vía de circulación:**

## Ruido en Carreteras

---

5.5.6 Pantallas vegetales implantadas en una banda de anchura considerable.

### 5.6 Tratamientos absorbentes

5.6.1 Materiales Acústicos

### 5.7 Materiales Acústicos

### 5.8 Diseño de barreras acústicas

### 5.9 Pasos a seguir para el diseño de una barrera acústica

5.9.1 Ubicación de barreras acústicas

### Conclusiones

### Bibliografía

---

## CAPÍTULO I

---

### Parámetros Básicos

#### 1.1 Sonido y Ruido

El sonido que se percibe es el resultado de una fuente sonora que, al inducir vibraciones en el aire, produce bandas alternadas de partículas de aire relativamente más y menos densas, que se propagan desde la fuente de sonido, de la misma forma que las ondulaciones lo hacen sobre el agua luego de arrojar una piedra. El movimiento de las partículas produce una fluctuación de carácter oscilatorio en la presión atmosférica normal, u ondas de sonido, las cuales se propagan a través de un medio elástico (gas, líquido o sólido). En principio, podemos decir que el sonido se propaga en ondas esféricas concéntricas, y se irradian en línea recta en todas direcciones desde la fuente pudiendo ser reflejada y dispersadas, o bordear obstáculos.

Se puede definir una fuente sonora como un cuerpo que, a través de vibraciones mecánicas o la turbulencia de aire, genera energía acústica en los rangos audibles de amplitud y de frecuencia. Cuando la fuente deja de vibrar, las ondas sonoras desaparecen casi instantáneamente, y el sonido se detiene. El oído humano es extraordinariamente sensible a las fluctuaciones de la presión del aire, las cuales se convierten en sensaciones auditivas.

##### 1.1.1 Características Físicas del Sonido

Como se dijo anteriormente, el sonido puede ser descrito a partir de sus principales características físicas: amplitud, frecuencia y velocidad.

La amplitud de un sonido es lo que se percibe como su fuerza, potencia o sonoridad. En realidad, este termino corresponde a la amplitud de las variaciones de presión atmosférica que constituye el sonido. La presión sonora es la medida fundamental de la amplitud del sonido.

## Ruido en Carreteras

La velocidad a la que vibra la fuente sonora, y por lo tanto, la velocidad a la que vibra el aire, determina la frecuencia del sonido, al que se percibe como el tono del sonido. La mayoría de los sonidos están compuestos por una mezcla de tonos, de variada frecuencia y amplitud.

La velocidad del sonido  $c$  en un gas depende de su peso molecular y de su temperatura, según la ecuación

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (1.1)$$

Donde :  $\gamma$  =  $C_p/C_v = 1,4$  para gases *diatómicos* (como el aire),  
 $R$  =  $8,31 \text{ J/mol}\cdot^\circ\text{K}$ ,  
 $M$  = masa de 1 mol en  $\text{kg/mol} = 0,0288 \text{ kg/mol}$  para el aire,  
 $T$  = temperatura absoluta en K.

Para temperaturas cercanas a la temperatura ambiente, esta expresión puede aproximarse (para el aire) por

$$c \cong 332 + 0,608 \cdot t, \quad (1.2)$$

donde  $t$  es la temperatura en  $^\circ\text{C}$  y  $c$  está en  $\text{m/s}$ . En particular, para  $t = 20^\circ\text{C}$  resulta  $c = 344 \text{ m/seg}$ .

Las perturbaciones no sólo se propagan en los gases, sino también en cualquier medio elástico, como los líquidos y los sólidos. En la Tabla 1.1 se indica aproximadamente la velocidad del sonido en varios medios para ondas planas<sup>1</sup>.

Medio	Velocidad [m/s]
Aire a 0 °C	332
Aire a 20 °C	344
Anhidrido carbónico	260
Hidrógeno	1294
Agua a 20 °C	1482
Alcohol etílico a 20°	1170
Vapor a 100 °C	405
Acero	5200
Aluminio	5000
Bronce	3480
Corcho	500
Hormigón	3500
Granito	3950
Madera	4000
Mármol	3810
Plomo	1190
Vidrio	5000

TABLA 1.1. Velocidad del sonido para ondas planas en varios medios (Beranek, 1993)

<sup>1</sup> En una onda plana la presión en cada instante es constante sobre cada plano perpendicular a la dirección de propagación.

La propagación de una onda sonora no implica un desplazamiento neto de las partículas (moléculas) que forman el aire, *sino de la perturbación*. En otras palabras, no existe propagación de materia, como sucede en cambio en una ráfaga de viento o en el flujo de aire a través de una tubería de ventilación.

Sin embargo, cuando por un punto pasa una perturbación, las partículas correspondientes experimentan, realmente, un pequeño desplazamiento respecto a su posición de equilibrio. Al terminar la perturbación, cada partícula vuelve a su estado original.

El movimiento de una partícula alrededor de su posición de equilibrio podría describirse por medio de la distancia respecto a dicha posición en cada instante (elongación), pero resulta más conveniente hacerlo en términos de la velocidad  $u$ . Una de las razones es que para una onda plana la presión resulta ser proporcional a la velocidad:

$$\frac{p}{u} = \rho_0 c \quad (1.3)$$

Donde  $\rho_0$  = densidad del aire en  $\text{kg/m}^3 = 1,2 \text{ kg/m}^3$  (a  $20^\circ\text{C}$ )

$c$  = velocidad de propagación del sonido en  $\text{m/s} = 344 \text{ m/s}$

El cociente  $p/u$  se denomina impedancia acústica,  $Z_a$  :

$$Z_a = \frac{p}{u} \quad (1.4)$$

De la ecuación (1.3) puede deducirse que para una conversación normal, cuya presión sonora es de unos  $0,3\mu$  Bares, la velocidad de las partículas es del orden de  $0,00007 \text{ m/s}$ . Este pequeño valor contrasta con el mucho más elevado de  $344 \text{ m/s}$  correspondiente a la velocidad de propagación de la onda sonora.

## 1.2 El poder del sonido y su intensidad

### 1.2.1 Sonidos periódicos y tonos puros

Un caso muy importante se da cuando las perturbaciones se repiten cada tiempo  $T$ , es decir, con una frecuencia  $f = 1/T$ . En este caso, auditivamente se evoca la sensación de tono. La sensación de altura del tono aumenta con la frecuencia. Así, los sonidos de baja frecuencia son graves (bajos), mientras que los de alta frecuencia son agudos (altos). Como se muestra en la figura 1.1.

La perturbación periódica más simple es la senoidal (figura 1.2.), Es decir, aquélla en la que la presión varía *senoidalmente* con el tiempo:

$$p(t) = P_{\text{máx}} \sin 2\pi f t. \quad (1.5)$$

En este caso el sonido resultante se denomina *tono puro*. Los tonos puros se encuentran rara vez en la naturaleza, pero son de extraordinaria importancia como herramienta de análisis, ya que todo sonido puede considerarse como formado por la superposición de tonos puros de diversas frecuencias.

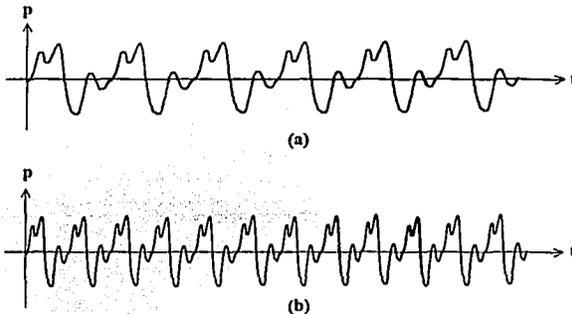


Figura 1.1. Dos sonidos periódicos: (a) De baja frecuencia (grave); (b) De alta frecuencia (agudo).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

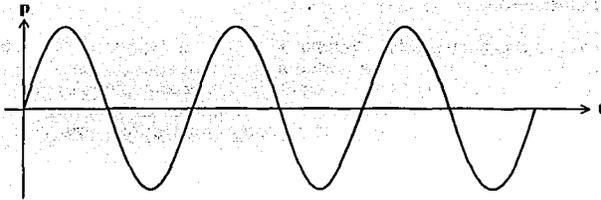


Figura 1.2. Un tono puro (onda senoidal). Se muestran tres ciclos.

Cuando el sonido es periódico de frecuencia  $f$ , las frecuencias de los tonos puros que lo constituyen son múltiplos de  $f$ , y se denominan sonidos armónicos o sobretonos armónicos, o simplemente, armónicos. Este importante resultado se conoce como Teorema de Fourier, y puede expresarse matemáticamente como

$$p(t) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \text{sen}(2\pi n f t + \varphi_n), \quad (1.6)$$

Donde  $P_n$  es la amplitud y  $\varphi_n$  es la fase de cada armónico. La frecuencia  $f$  se denomina frecuencia fundamental. En la figura 1.3 se muestran los primeros armónicos de una onda cuadrada, y la comparación entre su suma y la propia onda cuadrada.

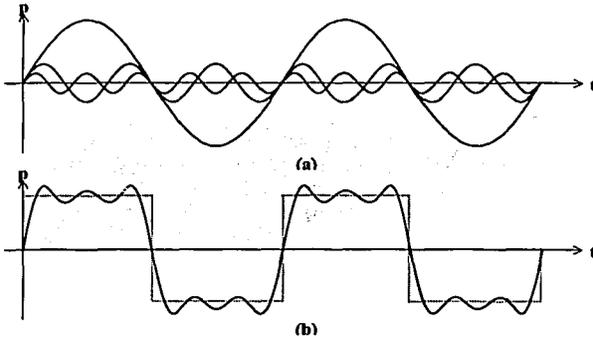


Figura 1.3. (a) Los tres primeros armónicos de una onda cuadrada, de frecuencias  $f_0$ ,  $3f_0$  y  $5f_0$ . (b) El resultado de superponer los tres armónicos, comparado con la onda cuadrada. Si bien tres armónicos son poca cantidad, vemos que comienza a esbozarse la forma de la onda cuadrada.

### 1.2.2 Longitud de onda

En los sonidos periódicos cada tiempo  $T = 1/f$  se repite la correspondiente perturbación. Durante ese tiempo, la perturbación se desplazó una distancia  $c \cdot T$ , lo cual significa que la distancia entre dos perturbaciones sucesivas es precisamente  $c \cdot T$ . Esta distancia se denomina longitud de onda,  $\lambda$ , y es un parámetro importante en acústica. Para estimar el efecto de un obstáculo sobre una onda sonora; Resulta:

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad (1.7)$$

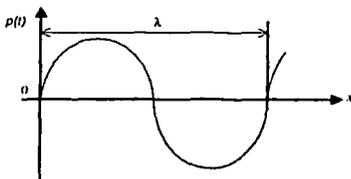


Figura 1.4 Longitud de onda

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 1.2.3 Sonidos no periódicos

Existen dos tipos de sonidos no periódicos: a) los que están formados por una serie no armónica de tonos puros denominados sonidos parciales o simplemente parciales, de frecuencias identificables ya sea auditivamente o por medio de instrumentos de medición, y b) los que contienen gran cantidad de tonos de frecuencias tan próximas entre sí que no es posible individualizarlas (figura 1.4).

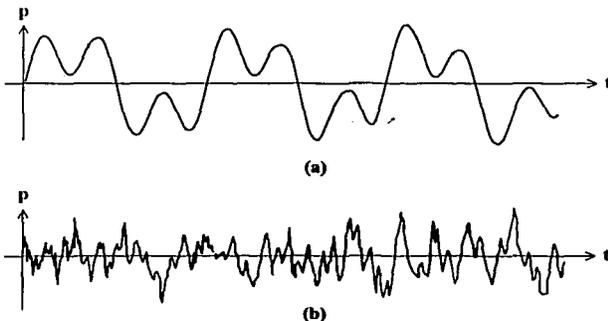


Figura 1.4 Sonidos no periódicos: (a) con tonos puros de frecuencias identificables. (b) sin tonos puros discernibles.

### 1.2.4 Energía de una onda sonora

La energía es uno de los conceptos centrales de la física, debido a que es una propiedad común a todos los sistemas físicos (mecánicos, electromagnéticos, termodinámicos, químicos, etc.) con la característica de que puede transferirse entre sistemas vinculados, obedeciendo a un *principio de conservación*.

Los sistemas acústicos son casos particulares de sistemas mecánicos, por lo cual la energía acústica puede descomponerse en energía potencial y energía cinética. Como el campo sonoro varía con la posición, su energía se describe mejor mediante la densidad de energía  $D$ , o energía por unidad de volumen, en cada punto; resulta (Beranek, 1961, 1986):

$$D = \frac{1}{2} (\rho_0 \cdot u^2 + \frac{p^2}{\rho_0 \cdot c^2}) \quad (1.8)$$

El primer término,  $\frac{1}{2}\rho_0 u^2$ , corresponde a la energía cinética, y el segundo,  $\frac{1}{2}p^2/\rho_0 c^2$ , a la energía potencial. Esta densidad de energía es función de la posición y del tiempo. En el caso de una onda plana (en la cual la presión es constante sobre los planos perpendiculares a la dirección de propagación), ambos términos se hacen iguales, y entonces

$$\text{Onda plana} = \frac{p^2}{\rho_0 \cdot c^2} \quad (1.9)$$

Se puede apreciar que la energía de una onda plana es proporcional a la presión elevada al cuadrado.

### 1.2.5 Intensidad sonora

Dado que en una onda sonora sólo hay energía en los puntos por los que está pasando la perturbación (pues únicamente allí  $p \neq 0$ ), resulta que la energía se va propagando junto con la perturbación.

Se define la intensidad sonora,  $i$ , como la potencia (energía por unidad de tiempo) transmitida por una onda por unidad de superficie normal a la dirección de propagación. Si la potencia es  $w$ , y la superficie atravesada por la onda sonora es  $S$ , resulta<sup>2</sup>

$$i = \frac{w}{S} \quad (1.10)$$

<sup>2</sup> La intensidad sonora es en realidad un vector cuya dirección es igual a la dirección de la velocidad de las partículas  $u$ , y puede calcularse como

$$i = p \cdot u$$

Para una onda plana resulta:

$$i = D \cdot c = \frac{p^2}{\rho_0 c} = \frac{p^2}{Z_a} \quad (1.11)$$

La intensidad sonora varía en el tiempo. Es interesante calcular su valor medio en un intervalo de tiempo T, denominado intensidad media, I, que está dado por

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{\rho_0 c} \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt \quad (1.12)$$

El valor

$$P_{ef}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt \quad (1.13)$$

se denomina valor cuadrático medio de la presión. Su raíz cuadrada,

$$P_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (1.14)$$

es el valor eficaz de la presión o presión eficaz sonora o, simplemente, presión eficaz. En términos de  $P_{ef}$ , la intensidad media vale

$$I = \frac{P_{ef}^2}{\rho_0 c} \quad (1.15)$$

La presión eficaz corresponde a un valor constante capaz de producir la misma intensidad media. Para el caso de un *tono puro*, en el que la presión *varía senoidalmente*, es decir

$$p(t) = P_{\max} \sin 2\pi f t, \quad (1.16)$$

la relación entre la presión eficaz y la presión máxima resulta ser

$$P_{ef} = \frac{P_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (1.17)$$

de modo que

$$p(t) = \sqrt{2} P_{ef} \sin 2\pi f t. \quad (1.18)$$

Para un sonido periódico cualquiera descompuesto en serie de Fourier, se cumple:

$$P_{ef}^2 = \sum_{i=1}^{\infty} P_{ef\ n}^2 \quad (1.19)$$

donde  $P_{ef\ n}$  es el valor eficaz del armónico de orden  $n$ . Esta importante fórmula, conocida como fórmula de Parseval, indica que *la energía de los armónicos puede superponerse para obtener la energía total*.

### 1.2.6 Nivel de presión sonora

Debido al rango extraordinariamente amplio de la presión sonora, resulta conveniente utilizar una escala logarítmica para expresar sus valores. Así, se define el nivel de presión sonora,  $L_p$ , como<sup>3</sup>

$$L_p = (10) \log \left( \frac{P_{ef}}{P_{ref}} \right)^2, \quad (1.20)$$

donde  $P_{ef}$  es el valor eficaz de la presión sonora y  $P_{ref}$  es la presión de referencia, que vale

$$P_{ref} = 20 \times 10^{-11} \text{ Bares.} \quad (1.21)$$

El nivel de presión sonora se expresa en decibeles (dB). Un incremento de 1 dB no representa un incremento fijo de la presión sino un *aumento relativo* de un 12,2%.

El valor de  $P_{ref}$  se ha elegido porque *coincide con el umbral de audición normal para 1 kHz*, lo cual implica que un sonido se puede percibir cuando  $L_p > 0$  dB. En la Tabla 1.2 se dan valores típicos de la presión eficaz sonora y del  $L_p$  para algunos sonidos habituales.

FUENTE	$P_{ef}$ [Pa]	$L_p$ [dB]
Umbral de dolor	20	120
Discoeca a todo volumen	6.3	110
Martillo neumático a 2 m	3.6	105
Ambiente industrial ruidoso	0.63	90
Piano a 1 m con fuerza media	0.20	80
Automóvil silencioso a 2 m	0.063	70
Conversación normal	0.020	60
Ruido urbano de noche	0.0063	50
Habitación interior (día)	0.0020	40
Habitación interior (noche)	0.00063	30
Estudio de grabación	0.00020	20
Cámara sismomortiguada	0.000063	10
Umbral de audición a 1 kHz	0.000020	0

Tabla 1.2. Presión eficaz sonora y nivel de presión sonora para algunas fuentes sonoras y ambientes acústicos típicos

<sup>3</sup> Si bien la abreviatura natural en castellano para nivel de presión sonora sería NPS, internacionalmente se utilizan abreviaturas en inglés.

### 1.3 Características del ruido

El ruido, se define como "sonido no deseado". En gran medida, está determinada por la percepción subjetiva de las personas lo cual a su vez, varía de un individuo a otro, e incluso, para un mismo individuo, dependiendo de la situación o circunstancia. Debido a su naturaleza subjetiva, no es posible medir el ruido con ninguna unidad objetiva. A los efectos de clasificar y comparar diferentes eventos de ruido, es necesario dar, al menos, una descripción aproximada mediante valores cuantitativos.

El ruido es un sonido o conjunto de sonidos mezclados y desordenados. Si vemos las ondas de un ruido observaremos que no poseen una longitud de onda, frecuencia, ni amplitud constantes y que se distribuyen aleatoriamente unas sobre otras.

#### 1.3.1 El ruido como contaminante.

La contaminación por ruido está dada por el conjunto de sonidos que circulan a nivel aéreo por las calles de una población. Como generalmente las ciudades poseen gran cantidad de elementos generadores de ruido, como ser el tránsito e industrias, se produce en conjunto un alto nivel sonoro que puede llegar a perjudicar la integridad física y psíquica del habitante urbano.

El oído humano sólo puede soportar ciertos niveles máximos de ruido; sin embargo, el nivel que se acumula en las regiones centrales de la ciudad en reiteradas ocasiones supera ese máximo. Algunos ruidos de la ciudad se encuentran por encima del "Umbral del dolor" (por encima de los 130 dB).

Ya que el ruido es una forma de contaminación debe ser restringidos y controlados por las autoridades para mantener la salud de los ciudadanos que circulan por las calles.

Tanto el ruido como el sonido se expresan en decibeles (dB) y se miden con unos instrumentos llamados sonómetros.

#### 1.3.2 Características del ruido

El ruido presenta grandes diferencias con respecto a otros contaminantes:

- Es el contaminante más barato de producir y necesita muy poca energía para ser emitido.
- Es complejo de medir y cuantificar.
- No deja residuos, no tiene un efecto acumulativo en el medio, pero sí puede tener un efecto acumulativo en sus efectos en el hombre.
- Tiene un radio de acción mucho menor que otros contaminantes.

## 1.4 Niveles y Decibeles del Ruido

La Organización Mundial de la Salud establece que, para evitar lesiones al oído interno por ruidos impulsivos, los niveles pico no deben superar los 140 dB para adultos, aunque no hay que descartar la posibilidad de daños al oído a partir de los 120 dB, dependiendo del tiempo de exposición. Para el caso de los niños, la OMS establece el límite para el nivel pico de ruido impulsivo en 120 dB.

Respecto a la frecuencia, se puede decir que el oído humano tiene la capacidad de identificar sonidos cuyas frecuencias estén comprendidas entre 20 Hz y 20 KHz, aunque se han encontrado personas capaces de detectar sonidos de frecuencia tan baja como 16 Hz. El límite superior en cambio, no es tan simple de determinar.

La respuesta en frecuencia del oído humano se encuentra en las frecuencias intermedias, aproximadamente entre 1 KHz y 5 KHz. Esto significa que los sonidos con igual nivel de presión sonora, pero de distinta frecuencia, son percibidos como si tuviera diferente sonoridad o intensidad.

### 1.4.1 Nivel Sonoro con Ponderación A

El nivel de presión sonora tiene la ventaja de ser una medida objetiva y bastante cómoda de la intensidad del sonido, pero tiene la desventaja de que está lejos de representar con precisión lo que realmente se percibe. Esto se debe a que la sensibilidad del oído depende fuertemente de la frecuencia. En efecto, mientras que un sonido de 1 kHz y 0 dB ya es audible, es necesario llegar a los 37 dB para poder escuchar un tono de 100 Hz, y lo mismo es válido para sonidos de más de 16 kHz.

Cuando esta dependencia de la frecuencia de la sensación de sonoridad fue descubierta y medida (por Fletcher y Munson, en 1933, ver gráfica), se pensaba que utilizando una red de filtrado (o ponderación de frecuencia) adecuada sería posible medir esa sensación en forma objetiva. Esta red de filtrado tendría que atenuar las bajas y las muy altas frecuencias, dejando las medias casi inalteradas.

En otras palabras, tendría que intercalar unos controles de graves y agudos al mínimo antes de realizar la medición.

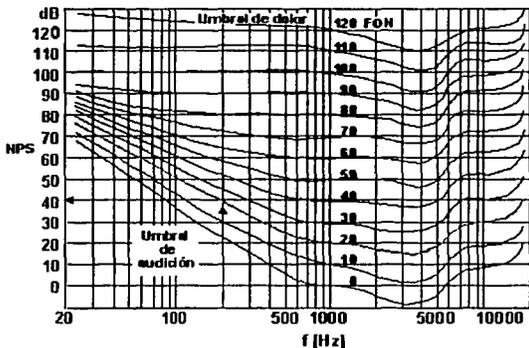


Figura 1.5 Curvas de Fletcher y Munson

Sin embargo; existían algunas dificultades para implantar tal instrumento o sistema de medición. El más obvio era que el oído se comporta de diferente manera con respecto a la dependencia de la frecuencia *para diferentes niveles físicos del sonido*. Por lo que se tienen que a muy bajos niveles, sólo los sonidos de frecuencias medias son audibles, mientras que a altos niveles, todas las frecuencias se escuchan más o menos con la misma sonoridad. Por lo tanto parecía razonable diseñar tres redes de ponderación de frecuencia correspondientes a niveles de alrededor de 40 dB, 70 dB y 100 dB, llamadas A, B y C respectivamente. La red de ponderación A (también denominada a veces red de compensación A) se aplicaría a los sonidos de bajo nivel, la red B a los de nivel medio y la C a los de nivel elevado (ver figura 1.6). El resultado de una medición efectuada con la red de ponderación A se expresa en decibeles A, abreviados dBA o algunas veces dB(A), y análogamente para las otras.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

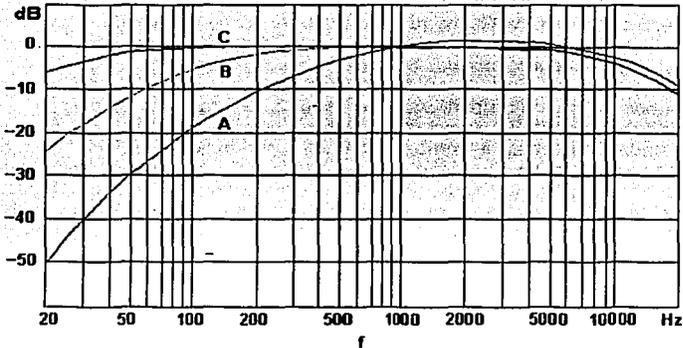


Figura 1.6 Curvas de ponderación A, B y C

Primero había que obtener un valor aproximado para decidir cuál de las tres redes había que utilizar, y luego realizar la medición con la ponderación adecuada.

La segunda dificultad importante proviene del hecho de que las curvas de Fletcher y Munson (al igual que las finalmente normalizadas por la ISO, Organización Internacional de Normalización) son sólo promedios estadísticos, con una desviación estándar (una medida de la dispersión estadística) bastante grande.

Esto significa que los valores obtenidos son aplicables a poblaciones no a individuos específicos. Más aún, son aplicables a poblaciones jóvenes y otológicamente normales, ya que las mediciones se realizaron con personas de dichas características.

La tercera dificultad tiene que ver con el hecho de que las curvas de Fletcher y Munson fueron obtenidas para tonos puros, es decir sonidos de una sola frecuencia, los cuales son muy raros en la Naturaleza. La mayoría de los sonidos de la vida diaria, tales como el ruido ambiente, contienen muchas frecuencias simultáneamente. Esta ha sido tal vez la razón principal por la cual la intención original detrás de las ponderaciones A, B y C fue un fracaso.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Estudios posteriores mostraron que el nivel de sonoridad, es decir la magnitud expresada en una unidad llamada fon que corresponde al nivel de presión sonora (en decibeles sin ponderación) de un tono de 1 kHz igualmente sonoro, no constituía una auténtica escala. Se tiene que para un sonido de 80 fon no es el doble de sonoro que uno de 40 fon. Se creó así una nueva unidad, el son, que podía medirse usando un analizador de espectro (instrumento de medición capaz de separar y medir las frecuencias que componen un sonido o ruido). Esta escala, denominada simplemente como sonoridad, está mejor correlacionada con la sensación subjetiva de sonoridad, y por ello la ISO normalizó el procedimiento (en realidad dos procedimientos diferentes según los datos disponibles) bajo la Norma Internacional ISO 532. En la actualidad existen inclusive instrumentos capaces de realizar automáticamente la medición y los cálculos requeridos para entregar en forma directa la medida de la sonoridad en son.

### 1.4.2 Ponderación A y Efectos del Ruido

Desde luego, lo anterior no responde la pregunta de cuán molesto o perturbador resultará un ruido dado. Es simplemente una escala para la sensación de sonoridad. Varios estudios han enfocado esta cuestión, y existen algunas escalas, como la escala *noy* que cuantifica la ruidosidad bajo ciertas suposiciones, y por supuesto, en función del contenido de frecuencias del ruido a evaluar.

Se aprecia, por lo tanto, que no hay disponible en la actualidad ninguna escala que sea capaz de dar cuenta exitosamente de la molestia que ocasionará un ruido a través de mediciones objetivas.

Diversos estudios han mostrado una buena correlación entre el nivel sonoro A y el daño auditivo, así como con la interferencia a la palabra. Sin otra información disponible, el nivel sonoro con ponderación A es la mejor medida única disponible para evaluar problemas de ruido y para tomar decisiones en consecuencia.

Es interesante observar que a pesar de que la escala de decibeles "A" fue originalmente concebida para medir sonidos de bajo nivel, ha demostrado ser más adecuada para medir daño auditivo, resultado de la exposición a ruidos de nivel elevado.

Con respecto a su utilización en cuestiones legales, en la mayoría de las ordenanzas y leyes sobre ruido, es porque proporciona una medida objetiva del sonido de alguna manera relacionada con efectos para la salud y la tranquilidad, así como la interferencia con diversas actividades.

Niveles Sonoros y Respuesta Humana		
Sonidos característicos	Nivel de presión sonora (dB)	Efecto
Zona de lanzamiento de cohetes (sin protección auditiva)	180	Pérdida auditiva irreversible
Operación en pista de jets	140	Dolorosamente fuerte
Sirena antiáerea		
Trueno	130	
Despegue de jets (60 m)	120	Máximo esfuerzo vocal
Bocina de auto (1 m)		
Martillo neumático	110	Extremadamente fuerte
Concierto de Rock		
Camión recolector	100	Muy fuerte
Petardos		
Camión pesado (15 m)	90	Muy molesto
Tránsito urbano		Daño auditivo (8 Hrs)
Reloj Despertador (0,5 m)	80	Molesto
Secador de cabello		
Restaurante ruidoso	70	Difícil uso del teléfono
Tránsito por autopista		
Oficina de negocios		
Aire acondicionado	60	Intrusivo
Conversación normal		
Tránsito de vehículos livianos (30 m)	50	Silencio
Líving	40	
Dormitorio		
Oficina tranquila		
Biblioteca	30	Muy silencioso
Susurro a 5 m		
Estudio de radiodifusión	20	
	10	Apenas audible
	0	Umbral auditivo

Tabla 1.3 pertenece a la Noise Pollution Clearinghouse, Dicha tabla compara algunos sonidos comunes y muestra cómo se clasifican desde el punto de vista del daño potencial para la audición. El ruido comienza a dañar la audición a niveles de alrededor de 70 dBA. Para el oído, un incremento de 10 dB implica duplicar la sonoridad.

### 1.5 Aparatos para medir el ruido

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Figura 1.7 Sonómetro Digital

El medidor de nivel sonoro, también denominado sonómetro o decibelímetro es el instrumento de medición acústica más simple, y por esa razón, el más difundido. Está orientado a determinar el nivel sonoro,  $L_{pA}$ , es decir el nivel de presión sonora con intercalación de una adecuada red de compensación (o ponderación) de frecuencias. En la figura 1.8 se muestra el diagrama de bloques de un medidor de nivel sonoro. El micrófono toma la presión sonora  $p(t)$  y la convierte en una tensión  $v_m(t)$ , que es amplificada por un amplificador. Luego sigue un atenuador, que permite la selección de escala. Esto es necesario dado que en general el rango dinámico<sup>4</sup> de algunos de los bloques que siguen no es tan alto como el que se pretende para el instrumento completo (por ejemplo, son comunes los medidores que permiten medir desde 30 dBA hasta 130 dBA, lo que corresponde a un rango dinámico de 100 dB). Seguidamente, se tiene un filtro cuya finalidad es realizar la ponderación seleccionada (A, B, C, etc.), cuya salida es tratada por el cuadrador. Luego aparece el filtro pasabajos cuya constante de tiempo, en general seleccionable, permite distintas respuestas temporales del instrumento. A la salida de este filtro se tiene el valor eficaz al cuadrado.<sup>5</sup>

<sup>4</sup> El rango dinámico es la diferencia en dB entre el máximo y el mínimo nivel de señal que es capaz de manejar un dispositivo en condiciones operativas adecuadas (por ejemplo, sin distorsionar o cambiar su forma de operación, o sin resultar demasiado ruidoso comparado con la señal a procesar).

<sup>5</sup> Para aumentar el rango dinámico del bloque cuadrador muchas veces se utiliza un esquema de cómputo implícito (Miyara, 1997). Esto es necesario cuando se pretende que cada rango del instrumento abarque 60 dB o más, ya que al elevar al cuadrado una señal con dicho rango dinámico el resultado es una señal cuyo rango dinámico es de 120 dB, lo cual supone dificultades debidas al ruido eléctrico de los componentes.

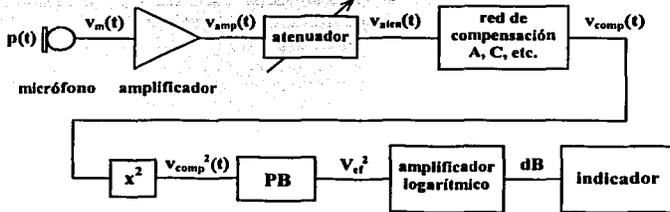


Figura 1.8 Diagrama de bloques de un medidor de nivel sonoro (también denominado sonómetro, o decibelímetro).

El amplificador logarítmico se encarga de transformar el valor eficaz en dBA, y el indicador presenta el valor medido. En general el indicador es digital, y tiene intercalado un conversor analógico digital.

Existen algunas variantes de este esquema. En los instrumentos más económicos no existe amplificador logarítmico. Utilizan un indicador analógico de aguja con una graduación no lineal que realiza simultáneamente la radicación y la logaritmicación en forma gráfica. En estos casos cada rango abarca no más (y en general menos) de 20 dB,<sup>6</sup> lo cual obliga a disponer de una gran cantidad de rangos, y además dificulta la medición de ruidos cuyo nivel varía rápidamente entre límites amplios. En el otro extremo de la escala de precios, tenemos instrumentos con funciones como el almacenamiento de datos digitales, en general con la posibilidad de volcado de datos a una computadora personal, o como el procesamiento estadístico de las mediciones. Entre las funciones especiales pueden hallarse la indicación de sobrecarga (overload), que advierte que el nivel máximo de un determinado rango (o del instrumento completo) ha sido superado, o la selección automática del rango (autorango). También puede proveerse la detección y retención de picos.

Los parámetros relativos a la respuesta frecuencial (redes de compensación) y temporal (velocidad de respuesta) de los medidores de nivel sonoro son los ya estudiados en forma general en las secciones anteriores. Así, tenemos que en general los instrumentos proveen las escalas A y C, a las que se agrega en algunos casos una escala impropriadamente llamada lineal (sería preferible denominarla plana), cuya respuesta en frecuencia es constante prácticamente en todo el rango audible, y por lo tanto permite determinar el nivel de presión sonora. Con respecto a la velocidad de respuesta, habitualmente se dispone de las respuestas rápida ( $\tau = 125$  ms) y lenta ( $\tau = 1$  s), y en casos especiales respuesta impulsiva ( $\tau = 35$  ms para la subida y 1,5 s para la bajada).

<sup>6</sup> Una variación de 20 dB corresponde a una variación de  $V_{\text{ef}}^2$  de 100 a 1, la máxima que puede representarse en un instrumento analógico de aguja con razonable precisión.

Entre las aplicaciones del medidor de nivel sonoro se encuentran las mediciones requeridas en la aplicación de diversos criterios, recomendaciones, normas, reglamentaciones, legislaciones, etc.

Los medidores de nivel sonoro más confiables responden a diversas normas nacionales e internacionales, como la normas IEC 651 (1979) de la International Electrotechnical Commission (Comisión Electrotécnica Internacional), la ANSI S 1.4-1983, del American National Standards Institute (Instituto Nacional Norteamericano de Normas). Los instrumentos se clasifican en tipos o clases según su precisión. Así, los de Tipo 0, o Clase 0, son los de mayor precisión, es decir los que satisfacen tolerancias más estrechas ( $\pm 0,7$  dB entre 100 Hz y 4 kHz). Su campo de aplicación son las mediciones acústicas de laboratorio. Los de Tipo 1, o Clase 1, son de precisión algo menor ( $\pm 1$  dB entre 100 Hz y 4 kHz), y son aptos para mediciones de certificación para la aplicación de legislaciones. Los de Tipo 2, o Clase 2, son de menor precisión ( $\pm 1,5$  dB entre 100 Hz y 1,25 kHz), y se utilizan en mediciones generales de comprobación, o cuando la fluctuación o falta de repetibilidad de un determinado ruido hace imposible una determinación precisa. Las normas prevén un Tipo 3, o Clase 3, cuya utilización para fines técnicos no se recomienda por ser su precisión bastante menor.

## 1.6 Efectos en el ser humano

### 1.6.1 Breve anatomía del oído

El oído humano está formado, al igual que el de todos los mamíferos, por tres partes bien diferenciadas, denominadas respectivamente oído externo, oído medio y oído interno. A estas tres partes, que realizan respectivamente un procesamiento acústico, mecánico y eléctrico de la señal sonora se agrega el posterior procesamiento neurológico con progresivos niveles de complejidad hasta llegar a la corteza cerebral, donde se llevan a cabo los procesos intelectuales superiores como la comprensión inteligente de la palabra y la música (Deutsch y Deutsch, 1993).

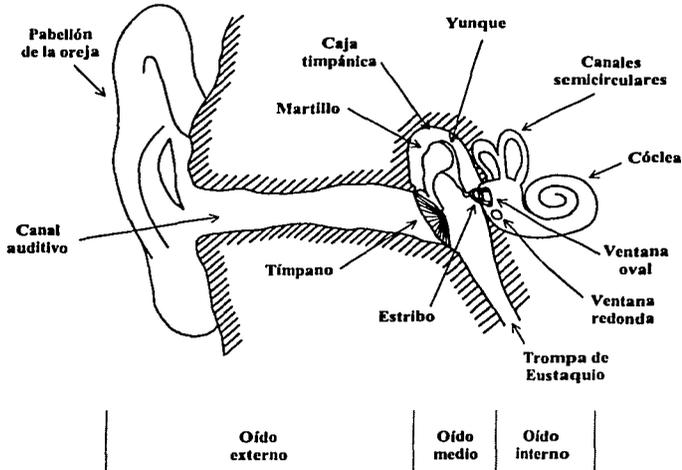


Figura 1.9 Corte transversal del oído derecho, en el cual se muestran las partes anatómicas más representativas del aparato auditivo.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### 1.6.2 Oído externo

El oído externo está formado por el pabellón u oreja y el canal auditivo (figura 1.9). La oreja cumple la función de focalizar el sonido hacia el canal auditivo, produciendo un acoplamiento más efectivo entre la baja impedancia acústica del aire y la más alta del tímpano. Este acoplamiento incrementa el campo sonoro en el canal auditivo unos 5 dB con respecto a si no existiera la oreja, especialmente alrededor de los 5,5 kHz, que corresponde a la resonancia del pabellón. Otra función importante es la de ayudar a la localización direccional del sonido. En otros animales, la oreja está bajo control muscular voluntario o reflejo, permitiendo orientarla hasta lograr la máxima sensibilidad. En el ser humano esta función está casi completamente atrofiada, y se la sustituye por movimientos de la propia cabeza.

El canal auditivo es un tubo algo curvado que comunica la oreja con el tímpano. En promedio mide unos 7 mm de diámetro y unos 25 mm de longitud, y desempeña dos funciones: la de proteger al tímpano, haciéndolo virtualmente inaccesible desde afuera, y la de enfatizar por resonancia la región del espectro más importante para la inteligibilidad de la palabra. En efecto, la primera frecuencia de resonancia de un tubo semiabierto está dada por donde  $c$  es la velocidad del sonido y  $L$  la longitud del tubo.

$$f = \frac{c}{4L}, \quad (1.22)$$

Esta frecuencia concuerda muy bien con la zona más sensible del oído, de acuerdo a lo que muestran las curvas obtenidas experimentalmente por Fletcher y Munson y luego otros investigadores. Cerca de la resonancia, el incremento del campo sonoro en el tímpano es de alrededor de 10 dB (Kinsler et al., 1995).

### 1.6.3 Oído medio

El oído medio (figura 1.9) está formado por el tímpano, la caja timpánica, la cadena oscilar (los huesecillos), una serie de músculos (como el tensor del tímpano y el estapedio) y la trompa de Eustaquio.

El tímpano es una membrana semitransparente en forma de cono achatado (con el vértice hacia adentro) que separa el canal auditivo de la caja timpánica. Su finalidad es captar las ondas sonoras que ingresan al canal auditivo y transformarlas en vibraciones mecánicas que luego serán comunicadas al oído interno. Esto sucede porque el interior de la caja timpánica, una cavidad de unos  $2 \text{ cm}^3$ , contiene aire estanco y, por lo tanto, a presión constante. En el canal auditivo, en cambio la presión varía en el tiempo a causa de la onda sonora, por lo cual habrá una diferencia neta de presión que hará vibrar al tímpano alrededor de su posición de reposo.

La cadena osicular es un conjunto de tres diminutos huesos: el martillo, el yunque, y el estribo,<sup>7</sup> también denominados huesecillos, cuya función es la de actuar como palanca entre el tímpano y el oído interno. Dicha palanca comienza con el primero de dichos huesecillos, el martillo, que es sometido a desplazamientos relativamente grandes<sup>8</sup> pero de pequeña fuerza por la vibración del tímpano. El martillo se articula con el segundo huesecillo, el yunque, y éste con el tercero de ellos, el estribo. A causa del efecto palanca (ver figura 1.10), las vibraciones del estribo son de menor amplitud pero mayor fuerza. La ganancia mecánica de esta palanca es de 1,3, lo que significa que la fuerza que el estribo ejerce sobre la ventana oval es 1,3 veces mayor que ejerce el tímpano sobre el martillo. A este efecto de palanca se agrega la gran diferencia de áreas entre el tímpano (0,6 cm<sup>2</sup>) y la ventana oval (0,04 cm<sup>2</sup>), lo cual implica que la relación entre las presiones en el tímpano y en la ventana oval es:

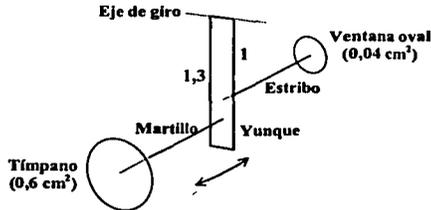


Figura 1.10 Diagrama esquemático del comportamiento de los huesecillos u oscículos como un sistema de palanca.

$$\frac{P_{\text{ventana oval}}}{P_{\text{tímpano}}} = \frac{1,3 \cdot 0,6}{0,04} \cong 20. \quad (1.23)$$

Esta diferencia de presiones es necesaria ya que en el tímpano existe una impedancia acústica mucho menor que en el oído interno, dado que éste último contiene agua (con iones de potasio). El conjunto actúa, por consiguiente, como un ingenioso adaptador de impedancias acústicas.

<sup>7</sup> El martillo mide 8 mm de largo, el yunque, 6 mm, y el estribo, 3 mm.

<sup>8</sup> En realidad, para los menores niveles de presión sonora audibles (-10 dB a 3 kHz), la vibración del tímpano es del orden de 10<sup>-11</sup> m, que es diez veces menor que un átomo de hidrógeno.

La trompa de Eustaquio es un conducto que comunica el oído medio con la garganta, y por consiguiente, a través de la boca, con el exterior. Normalmente está cerrada, asegurando así la estanqueidad del aire dentro del oído medio, pero al tragar o bostezar se abre, permitiendo la circulación de aire. Esto no sólo sirve como ventilación, sino que periódicamente garantiza el equilibrio entre las presiones estáticas dentro y fuera del oído medio, lo cual es necesario para evitar deformaciones del tímpano, que al operar alejado de su posición normal de reposo estaría o demasiado tenso o demasiado relajado, lo cual disminuiría su eficiencia, particularmente para los tonos agudos. De hecho, es lo que sucede al subir en un corto lapso de tiempo a un edificio muy alto o a una montaña. La presión atmosférica a gran altura es menor que a nivel del suelo, y como el proceso de ventilación del oído medio es relativamente lento, la presión dentro del oído medio sigue siendo, por un tiempo, cercana a la presión original, que es mayor que la nueva. Ello significa que el tímpano opera desplazado hacia afuera, produciendo una pérdida temporal de la respuesta a los agudos.

### 1.6.4 Oído interno

El oído interno (figura 1.9), también denominado laberinto, posee dos partes con funciones bien diferenciadas. La primera son los canales semicirculares, que son tres pequeños conductos con forma de anillo de unos 6 mm de diámetro, ubicados con sus ejes aproximadamente en cuadratura. Constituyen el órgano sensor del equilibrio ya que permiten detectar movimientos rotacionales. Al girar la cabeza (al inclinarse), dicha rotación contendrá componentes en uno o más de los ejes de los canales semicirculares. El líquido contenido en el interior de dichos canales (endolinfa) tiende, por inercia, a mantenerse inmóvil, y eso causa un movimiento relativo entre el canal y el líquido que es detectado por unos cilios (pelos) que tapizan las paredes interiores de los canales. Esto desencadena el envío de una señal nerviosa al cerebro, quien ordenará las acciones pertinentes para recuperar el equilibrio.

La segunda parte es la cóclea o caracol, que tiene forma precisamente de caracol, y es probablemente el sistema mecánico más complejo de todo el organismo. Está destinada a transformar las vibraciones provenientes del oído medio (a través del estribo) en señales neuroeléctricas dirigidas al cerebro. La característica más sobresaliente de esta admirable pieza de ingeniería biológica es su capacidad de realizar una descomposición frecuencial del sonido, codificándolo multiparamétricamente de acuerdo a su espectro.

La cóclea, que se encuentra embutida en una cavidad de igual forma en el hueso temporal, tiene dos vueltas y media, y si pudiera desenrollarse se obtendría un conducto con forma algo cónica (el conducto coclear) de unos 35 mm de longitud y un diámetro medio de unos 2 mm. El volumen total es de alrededor de  $0,05 \text{ cm}^3$  (una gota). En la figura 1.11 se muestra un corte transversal de dicho conducto (Deutsch, 1993), y en la figura 1.12 se observa esquemáticamente el conducto desenrollado. Según se puede apreciar en la figura 1.11, el conducto coclear está dividido en tres subconductos, denominados rampas (debido a que representan ascensos desde la base del caracol hacia su vértice): rampa vestibular, rampa coclear y rampa timpánica. La rampa vestibular y la rampa timpánica están llenas de perilinfa, un líquido acuoso rico en iones de sodio ( $\text{Na}^+$ ), y se comunican entre sí en el vértice o ápex del caracol a través de un pequeño orificio denominado helicotrema (extremo de la hélice o helicoides). La rampa coclear, en cambio, contiene endolinfa, líquido algo gelatinoso rico en iones de potasio ( $\text{K}^+$ ). En la base del caracol (espira más ancha), la rampa vestibular se comunica con el oído medio a través de la ventana oval, un orificio cubierto con una membrana sobre la cual se apoya el estribo, mientras que la rampa timpánica lo hace a través de la ventana redonda, otro orificio cubierto con otra membrana denominada tímpano secundario (de ahí el nombre de rampa *timpánica*).

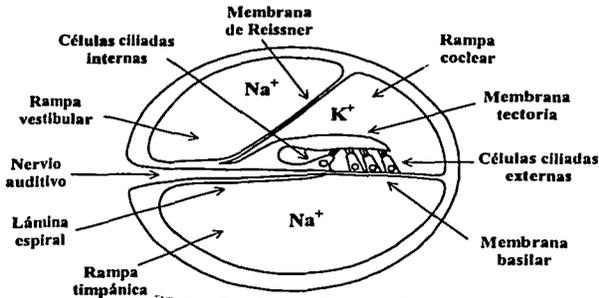


Figura 1.11 Corte transversal del conducto coclear.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La capacidad de la cóclea de llevar a cabo una descomposición espectral del sonido obedece a varias características de las diversas partes que la constituyen. En primer lugar tenemos la membrana basilar, que separa la rampa coclear de la rampa timpánica (figura 1.11).

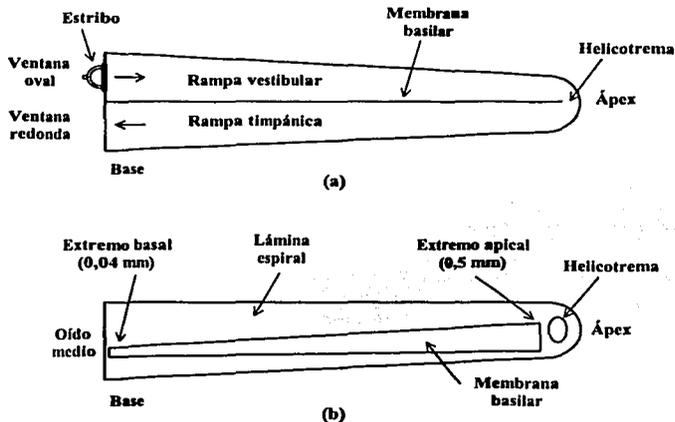


Figura 1.12. Esquema de la cóclea, hipotéticamente desenrollada. (a) Corte según un plano perpendicular a la membrana basilar. Por simplicidad sólo se muestran las rampas vestibular y timpánica, habiéndose omitido la rampa coclear. Las flechas indican la dirección de movimiento de la perilinfina cuando el estribo se mueve hacia adentro de la cóclea. (b) Corte según un plano paralelo a la membrana basilar.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Esta membrana tiene una longitud similar a la del conducto coclear, es decir unos 35 mm, y su ancho aumenta desde 0,04 mm en la zona próxima a la base del caracol hasta 0,5 mm en la zona del vértice o ápex, como se muestra en la figura 1.12b. Cerca de la base, donde es más angosta,<sup>9</sup> es relativamente rígida, haciéndose más flexible conforme se acerca al vértice. Esta peculiaridad determina un comportamiento mecánico que es la clave de la discriminación de frecuencias que se opera en la cóclea. Para verlo, tengamos en cuenta tres hechos:

- a) Todo cuerpo elástico tiene una frecuencia propia de resonancia (o más de una), es decir una frecuencia  $f$ , tal que si se lo excita con ella la amplitud de vibración es mayor que para otras frecuencias.
- b) A igual geometría un cuerpo más rígido tiene mayor frecuencia de resonancia.
- c) A igual rigidez un cuerpo más pequeño también tiene mayor frecuencia de resonancia.

En el caso de la membrana basilar, en la zona *basal* (cercana a la base) las dimensiones son pequeñas y la rigidez, alta, por lo tanto es de esperar que tenga una frecuencia de resonancia elevada. En la zona *apical* (cercana al ápex), en cambio, es mucho más ancha y menos rígida, por lo cual cabe esperar una frecuencia de resonancia mucho menor. Por consiguiente, la frecuencia de resonancia de la membrana basilar va disminuyendo a lo largo de ella desde valores bastante altos hasta valores pequeños.

Si ahora se excita el oído con un tono senoidal de cierta frecuencia  $f$ , el estribo ocasionará una serie de perturbaciones sucesivas sobre la ventana oval que se transferirán a la base de la membrana basilar. Como la membrana basilar es un medio elástico, estas perturbaciones, también de frecuencia  $f$ , darán origen a ondas sucesivas que se propagarán a lo largo de ésta, denominadas ondas viajeras.

---

<sup>9</sup> Podría parecer extraño que en la base, donde el diámetro de la cóclea es mayor, la membrana basilar sea más angosta. Esto es así porque como la membrana basilar es un medio disipativo, conviene que la región más cercana al estribo sea más sensible a las altas frecuencias.

En cada punto de la membrana basilar existirá, por lo tanto, una excitación senoidal<sup>10</sup> de frecuencia  $f$ , y eso producirá una respuesta cuya amplitud variará a lo largo de la membrana. En aquella posición en la cual la correspondiente frecuencia de resonancia  $f_r$  coincide con  $f$ , la amplitud será máxima. En la figura 1.13 se representa esta situación en un instante determinado, y en la figura 1.14 se muestra la forma de la onda viajera en tres instantes sucesivos.<sup>11</sup>

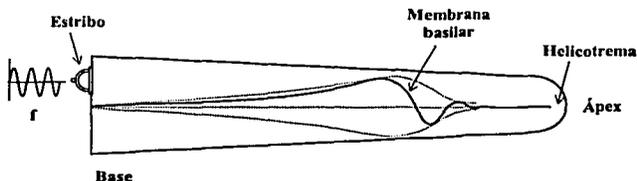


Figura 1.13. Onda viajera en la membrana basilar en un instante dado. Las líneas de trazos indican el lugar geométrico de los picos de la onda conforme ésta va avanzando a lo largo de la membrana.

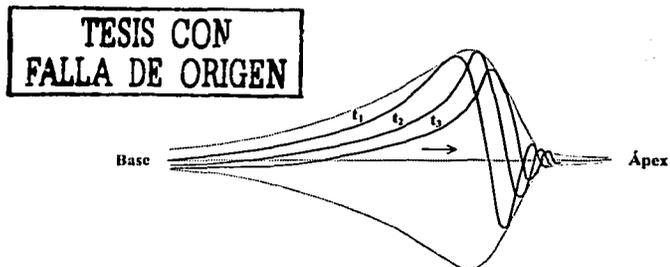


Figura 1.14 Forma de la onda viajera en la membrana basilar en tres instantes sucesivos. (Por claridad se han exagerado mucho las proporciones verticales; la amplitud real es extremadamente pequeña comparada con la longitud de la membrana.)

<sup>10</sup> En realidad será *aproximadamente* senoidal, debido a diversas no linealidades del tímpano, el oído medio, y la propia membrana basilar. Esta última es la base de un tipo de examen audiológico por *otoemisiones acústicas*, es decir sonidos generados por el propio oído.

<sup>11</sup> Es interesante observar que el primer semiciclo de la onda viajera mostrada en la figura es mucho más largo que los siguientes, que van reduciendo su longitud progresivamente. Ello se debe a que por ser la membrana basilar progresivamente menos rígida en puntos más alejados de la base, la velocidad de propagación de la onda se vuelve menor, disminuyendo consecuentemente la longitud de onda.

El razonamiento anterior, corroborado experimentalmente por los trabajos de von Békésy (von Békésy, 1961), muestra que la membrana basilar se comporta como un analizador espectral, ya que excitada con tonos puros de diversas frecuencias, se generan ondas viajeras cuyos máximos estarán localizados en diferentes posiciones. Más precisamente, para una frecuencia  $f$  mayor de 200 Hz la máxima amplitud de la onda viajera se verifica a una distancia de la ventana oval dada aproximadamente por:

$$x = 61 - 14 \log_{10} f, \quad (1.24)$$

Donde  $x$  está en mm y  $f$  en Hz (adaptado de Fletcher, 1995; véase también Kinsler et al., 1993). Así tenemos que para un tono de frecuencia 5 kHz las ondas viajeras alcanzan máxima amplitud a una distancia de 9,2 mm de la ventana oval, y por lo tanto del estribo (figura 1.15).

Esta localización espacial de las frecuencias se ha dado en llamar "teoría del lugar", y fue propuesta por primera vez por Helmholtz a mediados del siglo pasado, aunque su explicación reducía la membrana basilar a una serie de fibras bajo tensión que resonaban a diversas frecuencias, en lugar de un elemento de rigidez variable, como es en realidad.

Volviendo a la figura 1.11, vemos que sobre la membrana basilar existe una formación en la cual se distinguen las células ciliadas (o células pilosas)<sup>12</sup>, denominadas de esa forma porque poseen terminaciones en forma de cilios o pelos. Esta formación se denomina órgano de Corti, en honor a su descubridor. Existen dos tipos de células ciliadas: las externas y las internas. Hay alrededor de 20.000 células ciliadas externas y unas 3.500 células ciliadas internas. Los cilios de estas células están encastrados en otra membrana, la membrana tectoria, y al producirse un movimiento relativo entre ambas membranas, como se muestra esquemáticamente en la figura 1.16, los cilios experimentan un movimiento de *pandeo*, lo cual genera un potencial eléctrico<sup>13</sup> que excita las células nerviosas (neuronas) que parten hacia el cerebro (van Bergeijk, 1962).

<sup>12</sup> En la figura 1.11 sólo se muestran las células ciliadas. Además de ellas existen otras células que forman una estructura de sostén, que por simplicidad se han omitido.

<sup>13</sup> Este potencial se denomina *microfónico coclear*, y puede medirse por medio de electrodos externos con técnicas electroencefalográficas.

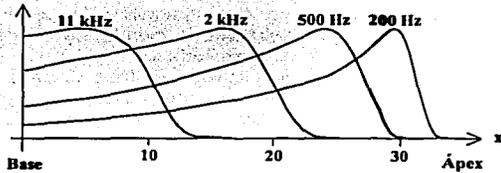


Figura 1.15 Envolvente espacial de las ondas viajeras sobre la membrana basilar para cuatro frecuencias diferentes.

Esto implica que estas células captan la vibración de la membrana basilar (selectiva en frecuencia, según vimos) y la transforman en una señal eléctrica que luego se transforma en señal nerviosa.<sup>14</sup> El cerebro recibe, así, señales nerviosas provenientes de cada posición de la membrana basilar, y por consiguiente recibe señales con *información frecuencial* o *espectral* acerca del sonido.

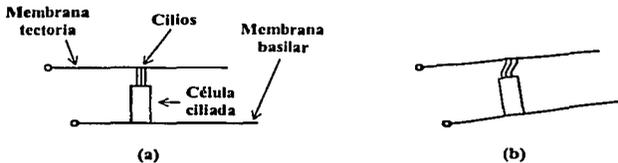


Figura 1.16 (a) Una célula ciliada entre las membranas basilar y tectoria en estado de reposo (b) Cuando se produce un movimiento de la membrana basilar a causa de una onda viajera, los cilios (pelos) de la célula ciliada experimentan un pandeo.

Las células ciliadas externas tienen aún otra función relacionada con el hecho de que poseen propiedades contráctiles, lo cual les permite actuar como pequeños "músculos", modificando en forma activa la vibración de la membrana basilar (Deutsch, 1993). Esta modificación consiste en acentuar o agudizar la amplitud de vibración de la zona de la membrana basilar donde la amplitud de la onda viajera es máxima y para ello las células ciliadas externas ejercen una fuerza adicional sobre la membrana que está en fase con la propia vibración de la membrana, y que es tanto mayor cuanto más alta sea la amplitud de la vibración. Se trata, por lo tanto, de una realimentación regenerativa que conduce a un sistema muy resonante, fenómeno análogo al que tiene lugar en los filtros electrónicos activos

<sup>14</sup> Las señales nerviosas son, de hecho, señales eléctricas también, pero organizadas en forma de descargas denominadas **potenciales de acción**. Para que se produzca un potencial de acción, debe existir un potencial generado por alguna otra célula (en este caso una célula ciliada) que alcance determinado umbral.

de alto Q (factor de mérito). Esta propiedad permite explicar la capacidad del oído humano de discriminar frecuencias muy próximas.

Los experimentos de von Békésy relativos a la mecánica coclear, realizados sobre cócleas cadavéricas, no permitían advertir este rasgo de la operación del oído. Por ese motivo este investigador no pudo explicar satisfactoriamente la alta discriminación tonal observada (von Békésy, 1960).

La resonancia causada por las células ciliadas externas es tan intensa que la vibración de la membrana basilar produce un tenue sonido, medible desde el exterior por medio de una sonda microfónica. Estos sonidos se denominan otoemisiones acústicas (o emisiones otoacústicas) y se utilizan para realizar una evaluación audiológica objetiva de la audición (Wainerman, 1996).

#### 1.6.5 Protecciones del oído

El resumen de la estructura anatómica del oído que se ha realizado pone en evidencia no sólo la gran complejidad sino lo delicado de las partes que lo componen. Las células ciliadas, son sensibles a movimientos más pequeños que las dimensiones atómicas, razón por la cual están fácilmente expuestas a la destrucción por sobrecarga (especialmente las externas). Por ese motivo no es sorprendente que la Naturaleza haya desarrollado en el oído algunos recursos de autoprotección que contribuyen a preservarlo. Dichos recursos están distribuidos en las distintas porciones del aparato auditivo que hemos estudiado, y protegen contra diversas agresiones, no sólo las acústicas. Se describirá brevemente las más importantes.

#### 1.6.6 Protecciones del oído externo

El conducto auditivo externo tiene dos partes diferenciadas. En su tercio exterior posee una cobertura formada por un tejido cutáneo grueso con pilosidades que bloquean el paso de objetos extraños al interior del conducto, que pudieran perjudicar al tímpano. Dicho tercio exterior tiene además unas glándulas que segregan cerumen, sustancia cerosa que fija las partículas de polvo y las arrastra hacia el exterior, realizando una labor higiénica. Además, en condiciones ambientales de gran nivel sonoro, la segregación de cerumen es más copiosa, tendiendo a obstruir el canal con el denominado tapón de cerumen o tapón de cera.

La porción restante, correspondiente a los dos tercios internos de la longitud del canal, no posee más que una piel delgada, pero se encuentra ligeramente curvado, dificultando la penetración de objetos grandes hacia el tímpano.

Es interesante destacar que el tímpano es un órgano que se reconstruye espontáneamente, en caso de que por alguna enfermedad o ruido violento sufriera lesiones, aunque en general ello puede dejar algún tipo de secuelas.

### **1.6.7 Protecciones del oído medio**

El oído medio posee dos tipos de protecciones. La primera, constituida por la trompa de Eustaquio, está destinada a proteger al oído contra variaciones de presión estática, o presión atmosférica. Normalmente está cerrada, y se abre al tragar y al bostezar, momento en que el aire puede entrar o salir de la cavidad del oído medio. A causa de determinadas enfermedades otorrinolaringológicas, la trompa de Eustaquio permite también el ingreso de gérmenes capaces de infectar la zona del oído medio, con la posible segregación de mucosidades que al rellenar la caja timpánica, reducen la eficiencia de la transmisión, en especial en alta frecuencia.

El segundo tipo de protección se refiere a la contracción de un músculo denominado estapedio, ubicado sobre el estribo, que entorpece sus movimientos.

Esto sucede cuando el nivel sonoro excede los 80 dB, lo cual representa una reducción de unos 10 dB en la efectividad de la transmisión.

### **1.6.8 Protecciones del oído interno**

No se puede hablar de una protección del oído interno propiamente dicha. Sin embargo, ante un sonido de gran nivel sonoro el oído interno genera señales nerviosas que el cerebro interpreta, reenviando señales inhibitorias hacia las células ciliadas externas, lo cual hace que éstas reaccionen con las llamadas contracciones lentas, que tienden a oponerse a la vibración de la membrana basilar. Pero debido a la demora considerable de la respuesta, ello no permite controlar los rápidos ruidos impulsivos.

Debido a ello el oído interno está, esencialmente, desprotegido, lo cual se agrava por lo delicado de las células ciliadas, es decir las células sensorias, que, por ser de un tamaño muy pequeño (2  $\mu\text{m}$ ), están fácilmente expuestas a sufrir daños.

### **1.6.9 Efectos auditivos del ruido**

#### **1.6.9.1 Presbiacusia y socioacusia**

Se observa en general que con el transcurso de los años las personas experimentan una disminución en su capacidad auditiva, denominada presbiacusia. Esto se debe a dos factores: el desgaste natural de los tejidos, y la exposición a ruidos considerados normales en la sociedad. Un estudio realizado en una población muy poco ruidosa del Sudán (Rosen, 1962) reveló que la presbiacusia era mucho menos marcada que la evidenciada en estudios realizados en EEUU (en el estado de Winsconsin, por ejemplo), en los cuales se observan niveles de ruido ambiente considerablemente mayores. Por esta razón se propuso el nombre de socioacusia para contemplar este efecto.

Uno de los parámetros más utilizados para medir la audición es el umbral auditivo, que se determina con diversos procedimientos. Se toma en cuenta el desplazamiento o aumento del umbral con relación al umbral considerado normal<sup>15</sup> para cada una de las frecuencias normalizadas. Cuando el aumento del umbral es permanente o irreversible, se denomina pérdida auditiva. En la figura 1.17 se ha representado la pérdida auditiva en función de la frecuencia para diversas edades.

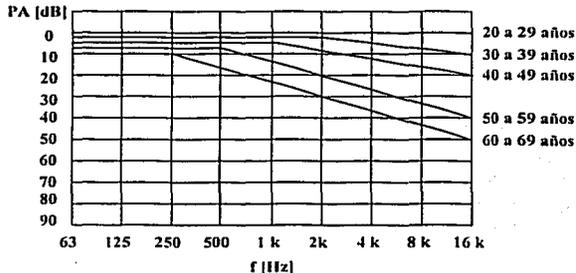


Figura 1.17 Evolución promedio de la presbiacusia, en función de la frecuencia y de la edad, según Scherzer (Moch, 1986).

### 1.6.9.2 Desplazamiento temporal del umbral

Cuando una persona está sometida a ruidos intensos durante un periodo relativamente corto de tiempo, experimenta un aumento temporario del umbral auditivo, que desaparece luego de algunas horas de descanso. Es éste el primer efecto de la exposición a ruidos de elevado nivel sonoro, y si bien suele ser reversible (salvo que el ruido sea repentino y de nivel demasiado alto, como en una explosión o un ruido impulsivo o de impacto de gran violencia), la reiteración continuada de tales exposiciones termina, a mediano plazo, ocasionando desplazamientos permanentes del umbral.

El desplazamiento temporario se produce siguiendo un crecimiento asintótico durante las primeras horas de exposición. Después de unas 8 a 16 hs se alcanza una meseta cuya magnitud depende del nivel sonoro en dBA. Interrumpida la exposición, después de una inestabilidad inicial del umbral (que dura alrededor de 2 minutos) el aumento del umbral comienza a retroceder, y lo hace en forma aproximadamente lineal con el logaritmo del tiempo hasta desaparecer. El proceso es tanto más rápido cuanto menor haya sido el nivel sonoro durante la exposición.

<sup>15</sup> El umbral corresponde conceptualmente a la línea de 0 fon de las curvas de Fletcher y Munson de la figura 1.23, pero en realidad se toma el valor que corresponde a un nivel de sonoridad de 4,2 fon. según las curvas de igual nivel de sonoridad normalizadas (por ejemplo, según la Norma IRAM 4066).

Aunque no se conoce aún en detalle el proceso del desplazamiento permanente del umbral inducido por ruido, se supone que podría seguir una evolución similar a la correspondiente al desplazamiento temporario.

### 1.6.10 Determinación del riesgo auditivo

El riesgo auditivo que conlleva la exposición a determinado nivel de ruido de origen laboral durante un tiempo dado se define como *el porcentaje de las personas expuestas que adquieren algún grado de incapacidad auditiva menos el porcentaje de las personas no expuestas que adquieren el mismo grado de incapacidad*. Se toma esta diferencia para eliminar los casos de presbiacusia y conservar sólo aquellos atribuibles exclusivamente a la exposición al ruido. El grado de incapacidad que se adopta habitualmente es el que corresponde a las primeras dificultades para la comprensión de la palabra, esto es, una pérdida auditiva promedio de 25 dB.

En la tabla 1.4 se indican los porcentajes de personas no expuestas a ruidos importantes que adquieren incapacidad de acuerdo al criterio anterior, en función de la edad, es decir, la distribución estadística de *presbiacúsicos*.

Edad	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
%	1	2	3	5	7	10	14	21	33	50

TABLA 1.4 Porcentaje de personas con presbiacusia en función de la edad.

La Organización Internacional de Normalización (ISO, International Organization for Standardization) ha emitido la norma ISO 1999, que da el riesgo auditivo en función del nivel sonoro continuo equivalente en dBA, y los años de exposición, como se indica en la tabla 1.5. El nivel sonoro continuo equivalente es el nivel sonoro de un ruido constante a lo largo de la jornada laboral de 8 horas que tiene la misma energía que el ruido fluctuante real. Para calcular el riesgo de acuerdo con la definición dada, se considera que la vida laboral comienza a los 20 años de edad.

Nivel Sonoro Continuo Equivalente [dBA]	Años de exposición								
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
80	0	0	0	0	0	0	0	0	0
85	1	3	5	6	7	8	9	10	7
90	4	10	14	16	16	18	20	21	15
95	7	17	24	28	29	31	32	29	33
100	12	29	37	42	43	44	44	41	35
105	18	42	53	58	60	62	61	54	41
110	26	55	71	78	78	77	72	62	45
115	36	71	83	87	84	81	75	64	47

TABLA 1.5 Riesgo porcentual en función del nivel sonoro y de los años de exposición.

La tabla muestra que cuando el nivel de ruido es inferior a los 80 dBA el porcentaje de personas afectadas más allá de lo atribuible a la presbiacusia no es significativo. Por otra parte, una extensa investigación de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, US Environmental Protection Agency) ha concluido que una exposición permanente (24 horas diarias) a un nivel equivalente (promedio) de ruido de 70 dBA o bien una exposición de carácter laboral (8 horas diarias) a 75 dBA aseguran que un 96 % de la población no sufrirá mayores daños auditivos que los correspondientes a la presbiacusia, correspondiendo el restante 4 % a los individuos cuya audición ya está dañada .

#### 1.6.11 Interferencia a la palabra

Uno de los efectos no clínicos más conspicuos del ruido es la interferencia a la palabra, es decir la dificultad para mantener una conversación en presencia de ruido.

Conviene recordar que la potencia acústica emitida en el habla normal es muy pequeña, siendo en promedio de unos  $25 \mu W$  con picos de  $3600 \mu W$  para algunas voces masculinas (Knudsen-Harris, 1978). Si bien el umbral normal de audición a 1 m de distancia es del orden de  $10 \mu W$ , no es lo mismo *percibir* un sonido *que recibir exitosamente* el mensaje que éste pretende transmitir. Particularmente, las porciones más débiles de la palabra (las consonantes) pueden quedar enmascaradas ante la presencia de ruido, reduciendo la inteligibilidad.

#### 1.6.12 Efectos no auditivos del ruido

##### 1.6.12.1 Efectos sobre la voz

El ruido intenso tiene un efecto indirecto sobre la voz, debido al reflejo cócleo-recurrencial, que consiste en que si una persona está hablando, ante un aumento del nivel sonoro ambiental tenderá a "subir" la voz. Subir la voz implica una doble acción: aumentar la potencia sonora emitida y aumentar la frecuencia. El aumento de la frecuencia se debe a que en la región central de la voz, a mayor frecuencia mayor es la potencia sonora que es posible emitir, y por consiguiente mayor el nivel de presión sonora (figura 1.18). Concordante con lo anterior, si se pide a un sujeto que pronuncie una frase sucesivamente con diversas intensidades, la frecuencia con que espontáneamente lo irá aumentando aproximadamente a razón de una octava cada 24 dB, tal como se muestra en la figura 1.19.

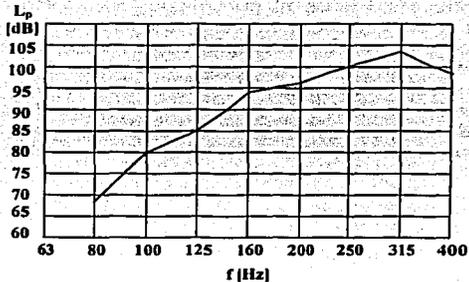


Figura 1.18 Máximo nivel de presión sonora a 40 cm de la boca en función de la frecuencia emitida por una voz masculina. En el caso ilustrado la mínima frecuencia que podía emitir el sujeto era de 80 Hz.

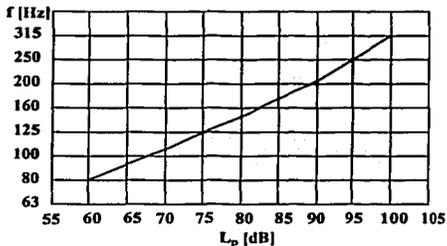


Figura 1.19. Frecuencia emitida espontáneamente por una voz masculina al hablar con diferentes niveles de presión sonora. La mínima frecuencia que podía emitir el sujeto era de 80 Hz.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 1.6.12.2 Otros efectos clínicos

Se han descrito numerosos efectos clínicos<sup>16</sup> no auditivos del ruido (Moch, 1986). Entre ellos pueden citarse la hipertensión arterial pasajera, las taquicardias, las cefaleas, el nerviosismo, el estrés, la reducción del rendimiento físico y la pérdida de la concentración y de la atención. También hay variaciones del ritmo respiratorio, disminución de la secreción salival y del tiempo de tránsito intestinal.

Con relación a la eficiencia en el trabajo, se observa que la misma se reduce ante un ruido repentino o inusual, pero al volverse éste repetitivo el individuo se acostumbra y recupera la eficiencia. Esto es especialmente cierto para el caso de los trabajos manuales o que no requieren una gran elaboración intelectual. Las tareas intelectuales se ven más afectadas por el ruido que las físicas.

A partir de estudios epidemiológicos se han comprobado incrementos significativos en la incidencia de accidentes cardiovasculares, neurológicos, digestivos y endócrinos, los cuales llegan a ser hasta 4 veces más frecuentes en la población expuesta a ruidos muy intensos, como sucede en los alrededores de los aeropuertos. Según los especialistas, esto podría deberse a que las vías nerviosas colaterales a la vía nerviosa auditiva podrían verse afectadas cuando la señal neurológica es muy intensa, influyendo presumiblemente en varios aspectos de diversas funciones fisiológicas no auditivas.

El ruido incide de dos formas sobre los canales semicirculares. Primero, porque en el vestíbulo, es decir la zona que comunica los canales semicirculares con la cóclea, existen vibraciones fluidas que afectan las células sensorias de dichos canales, y segundo porque las vías nerviosas de dichos canales y del órgano de Corti están muy próximas espacialmente.

Es bien sabido que el ruido muy intenso provoca insomnio, pero aún cuando el nivel sea suficientemente bajo como para no ocasionar la vigilia, se producen efectos perniciosos sobre las etapas del sueño profundo. Esto es especialmente perjudicial en los niños pequeños, ya que las hormonas del crecimiento se segregan especialmente durante el sueño profundo, por lo cual también se ve afectado el crecimiento y desarrollo. En el adulto, el sueño profundo es la etapa reparadora. De acuerdo con los criterios de la Organización Mundial de la Salud (Berglund-Lindvall, 1995) la calidad del sueño en presencia de ruido no sólo está vinculada con el nivel equivalente del ruido, sino con la cantidad de eventos que pueden superar un determinado nivel.

---

<sup>16</sup> Los efectos clínicos son aquellos que se manifiestan a través de alguna patología o sintomatología de la persona cuya determinación puede realizarse objetivamente a través de un examen médico. Por lo general no desaparecen inmediatamente, aún cuando hubiera desaparecido el agente causante de la afección.

### 1.6.12.3 Efectos psicológicos

Por último, el ruido produce también simplemente molestia, lo cual no está en relación directa con el nivel sonoro ni con su frecuencia ni con su contenido espectral. Los ruidos con contenido semántico, en muchos casos provocan mayor interferencia y molestia que otros ruidos de espectro y nivel similares, aunque en esto existe una gran variabilidad individual. No existen hasta el momento criterios ampliamente difundidos que puedan tener en cuenta estos efectos.

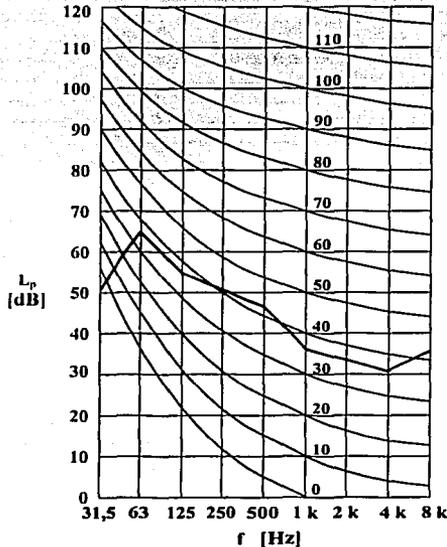
### 1.6.13 Algunos criterios psicoacústicos

Existen varios criterios destinados a evaluar el efecto del ruido sobre diversas actividades desde el punto de vista del bienestar. Son, desde luego, más exigentes que los criterios de riesgo. Comentaremos dos de estos criterios, pertinentes en particular a la inteligibilidad de la palabra hablada y al nivel de ruido admisible para diversos tipos de ambientes.

### 2.6.13 Criterios para el ruido en diversos ambientes

En un ambiente para una aplicación determinada, por ejemplo una oficina pública o un aula, existe cierto ruido de fondo máximo compatible con un buen desempeño de las actividades a realizar en dicho ambiente. Si bien el nivel sonoro permite hasta cierto punto darse una idea de si el ambiente será o no considerado "ruidoso" por los usuarios, hay criterios más específicos. Uno de ellos es el de las curvas NR (noise rating curves), el cual ha sido objeto de normas nacionales y extranjeras como la IRAM 4070 o la ya desaparecida ISO R 1996. En algunos países, como los Estados Unidos, se utilizan otros grupos de curvas similares, como las curvas NC (noise criterion), las curvas PNC (preferred noise criterion) o las curvas NCB (balanced noise criterion).

Las curvas NR (figura 1.21) han sido propuestas teniendo en cuenta principalmente el efecto del ruido sobre la comodidad de la comunicación oral y de la escucha de la música, a través de numerosas encuestas a personas expuestas a diversos ruidos en diversas actividades.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 1.21. Curvas de criterio NR para la evaluación del ruido de fondo de un ambiente.

La obtención del valor NR que corresponde a determinado ruido ambiente consiste en trazar directamente sobre la familia de curvas el espectro de bandas de octava del ruido, y luego encontrar el menor valor de NR cuya curva asociada no es superada a ninguna frecuencia por el ruido a evaluar.

Las curvas se complementan con listas de actividades y ambientes con indicación del rango de valores NR admisibles. En la tabla 1.6 se incluye un listado, en el cual se ha supuesto que el ruido es exclusivamente el de fondo, sin considerar el ruido adicional que podrían provocar la presencia de personas o las respectivas actividades normales. Es importante remarcar que no sólo es conveniente respetar los máximos, sino también los mínimos. Esto es porque un ambiente excesivamente silencioso puede provocar incomodidades, al percibirse algunos ruidos que de otra manera serían enmascarados por un moderado ruido de fondo.

NOTA: La recomendación ISO R 1996 fue posteriormente reemplazada por la norma ISO 1996, en la cual se retiró toda referencia a las curvas NR. En cualquier caso, siguen siendo un criterio razonable para especificar el máximo ruido admisible, en las diversas bandas.

Ambiente	NR recomendado
Clinicas y cabinas audiométricas	10 - 20
Estudios de Radio y Televisión	15 - 20
Salas de concierto	20 - 25
Teatros	20 - 25
Residencias rurales	20 - 30
Residencias suburbanas	25 - 35
Templos	25 - 35
Salas de conferencia	25 - 35
Cines	25 - 35
Aula de escuela	25 - 35
Salas de lectura de escuela	25 - 30
Habitaciones de hospital	25 - 35
Residencias urbanas	30 - 40
Habitaciones de hotel	30 - 40
Oficinas privadas	30 - 40
Bibliotecas	30 - 40
Quirófanos	30 - 40
Pasillos de hospital	35 - 45
Restaurantes, bares, comedores	35 - 45
Oficinas públicas	35 - 45
Gimnasios	35 - 50
Piscinas	40 - 55
Salones de venta comerciales	40 - 50
Grandes tiendas	50 - 55
Estacionamientos	50 - 55
Talleres	60 - 70

Tabla 1.6 Valores de NR recomendados para diversos ambientes según la aplicación. No se incluye el ruido causado por las personas o por la actividad normal (IRAM 4070 y otras fuentes).

## CAPÍTULO II

### Modelación del Ruido

Existen varias razones por las que resulta interesante la posibilidad de predecir el ruido. En primer lugar, permite la evaluación del impacto acústico de una nueva obra vial o de infraestructura a iniciar, así como de cualquier modificación que afecte la intensidad o composición del tránsito. Éste es, actualmente, un requisito para la aprobación de los respectivos proyectos o anteproyectos, y en los casos en que la legislación no contemple tales estudios de impacto acústico, de todas maneras permite anticipar los conflictos potenciales que podrían originarse y tomar decisiones que permitan evitarlos o atenuarlos.

En segundo lugar, permite llevar a cabo zonificaciones o catastros acústicos sin recurrir a la realización de extensas y costosas campañas de medición. Esto es útil con el fin de programar o planificar el crecimiento y desarrollo urbanos, establecer áreas protegidas o sensibles, o distribuir racionalmente los usos del suelo.

En tercer lugar, dichas predicciones pueden emplearse para simplificar y reducir costos del trazado y actualización de mapas acústicos. En efecto, a partir de una reducida cantidad de mediciones pueden ajustarse los parámetros de un modelo predictivo que permita la extrapolación a otros puntos y la actualización frecuente de los valores.

La predicción de diversos parámetros e indicadores relativos al ruido se realiza mediante modelos físicos que tienen en cuenta tanto las características de las fuentes (los vehículos y su distribución estadística en el espacio y el tiempo) como del medio en el que se propaga el sonido (el ambiente acústico, en el que se tienen en cuenta las particularidades de la edificación, las condiciones atmosféricas, la existencia de obstáculos, naturales o artificiales, etc.).

Con respecto a las fuentes, la caracterización acústica mínima corresponde al dato sobre la potencia acústica media emitida por cada vehículo bajo condiciones típicas de circulación. En el otro extremo, podría contarse, para cada tipo o modelo de vehículo, con información detallada de la potencia emitida bajo diversas condiciones de circulación (velocidades, aceleración y cargas).

En cuanto al medio de propagación, la información puede ser tan escueta como el tipo de perfil o tan completa como una descripción detallada de la volumetría circundante, la temperatura, humedad y presión ambientes, el gradiente vertical de temperatura, la velocidad y dirección del viento, las propiedades acústicas de la calzada y otras superficies como las fachadas, el tipo de vegetación, etc.

En la mayor parte de los casos la información disponible no será tan detallada ni en lo relativo a las fuentes ni a las condiciones de propagación. Es factible, en esos casos, obtener modelos de validez estadística cuyos parámetros puedan inferirse a partir de un número relativamente reducido de mediciones programadas para que su representatividad sea elevada.

Esta variedad de situaciones exige plantear modelos con diversos grados de detalle que permitan describir la situación acústica lo más precisamente posible para los datos que se puedan recolectar.

### 2.1 Sistemas $L_N$ y $L_{EQ}$

Un sistema ideal es aquel que permite mediciones a través de un medidor o analizador de nivel sonoro para representar la exposición al ruido de modo significativo. Como la respuesta al sonido es frecuentemente dependiente de la frecuencia del sonido, el tipo de ruido y la hora del día en que ocurren son factores significativos sobre la molestia.

Así el sistema ideal deberá tomar a la frecuencia dentro del cálculo, esto diferenciará entre el ruido del día y el de la noche, y, finalmente, debe ser capaz de describir la exposición al ruido acumulativo. Solo un sistema estadístico satisface estos requerimientos.

La dificultad en la práctica con un sistema clasificatorio estadístico es que producirá un gran número de parámetros por cada lugar de medición, por lo que se requeriría un gran arreglo de números para caracterizar un lugar. Esto literalmente es imposible, por lo que se definirá una medida de números sencillos de exposición al ruido. El sistema más usado en la actualidad es el  $L_N$  y  $L_{EQ}$ .

2.1.1 Sistema  $L_n$

Para poder analizar convenientemente un fenómeno complejo y variable como el ruido, se hace necesario el empleo de herramientas, más específicamente, de descriptores estadísticos de ruido. Los dos tipos de análisis más utilizados son el distributivo y el acumulativo.

El análisis distributivo indica por cuanto tiempo el nivel sonoro ha estado dentro de un dado intervalo. En la figura 2.1 podemos ver el gráfico correspondiente a este tipo de análisis.

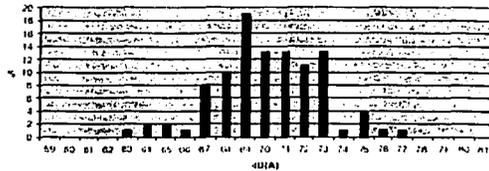


Figura 2.1 Gráfico de análisis distributivo

El análisis acumulativo, en cambio, brinda por cuanto tiempo un determinado nivel sonoro ha sido superado. En la figura 2.2 se observa el gráfico correspondiente a este tipo de análisis.

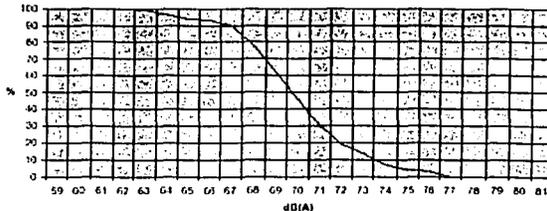


Figura 2.2 Gráfico de análisis acumulativo

El análisis acumulativo es el más utilizado, y con base en el mismo se definen los descriptores estadísticos de ruido comúnmente conocidos como "percentiles", los cuales sirven para dar información acerca de cómo varía o fluctúa el nivel sonoro durante el periodo de medición.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## Ruido en Carreteras

---

El nivel percentil  $L_x$  representa el valor de  $L_p$  (A) que fue superado durante el  $x$  porcentaje del tiempo de medición, los percentiles más utilizados son  $L_1$ ,  $L_5$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{90}$ ,  $L_{95}$  y  $L_{99}$ .

- $L_{90}$ ,  $L_{95}$  y  $L_{99}$  se suelen utilizar para indicar lo que se conoce como ruido de fondo, ya que es el nivel de presión sonora mínimo o de base, que está presente casi todo el tiempo.
- $L_1$ ,  $L_5$ ,  $L_{10}$  se suele utilizar para indicar lo que se conoce como "pico de ruido", esto quiere decir que si tenemos un  $L_{10} = 80\text{dB(A)}$  indica que solamente durante un 10% del tiempo que duró la medición, el nivel sonoro estuvo por encima de esa marca, sin hacer referencia al valor máximo obtenido durante ese período, por lo que posibles picos esporádicos de niveles de sonoridad excepcionalmente elevados quedan cubiertos. Por este motivo, los percentiles son considerados más representativos que los valores máximos y mínimos absolutos, y, particularmente,  $L_{10}$ ,  $L_{90}$  son dos de los más utilizados. En particular, a la diferencia entre estos dos últimos ( $L_{10} - L_{90}$ ) se suele denominar *clima de ruido*.
- $L_{50}$  indica el valor que fue superado durante el 50% del tiempo de medición. Dicho en otra manera, representa la medición de los valores medios. Recordando el concepto de mediana, si se ordenan de mayor a menor todas las muestras obtenidas, ésta equivale al valor central, o al promedio de los dos valores centrales.

### 2.1.2 Sistema $L_{EQ}$

Como se sabe, el nivel sonoro es variable en el tiempo. Debido a esto es muy común que se utilice el concepto de nivel equivalente para mediciones de ciertos periodos.

Durante el intervalo de tiempo que dura una medición, se tiene un nivel sonoro instantáneo que varía con el tiempo. Es posible calcular la energía total proporcionada por el mismo durante el tiempo mismo. Luego, para determinar el nivel equivalente, se calcula el nivel de sonido continuo que aporta la misma dosis de energía que el sonido variable, durante el intervalo de tiempo dado. El nivel equivalente viene entonces dado por la ecuación 2.1.

$$L_{eq} = (10) \log \frac{1}{T} \int_0^T 10^{L(t)/10} dt \quad (2.1)$$

Donde:

T= tiempo sobre el cual  $L_{EQ}$  se determina.

L(t)=nivel de ruido variable en dB(A) como función del tiempo.

Visto de otra forma, también se puede decir que el nivel equivalente es la energía media del nivel sonoro instantáneo a lo largo de un periodo de tiempo determinado.

Cuando se tiene una serie de valores discretos, producto de haber realizado  $n$  mediciones de nivel sonoro con un determinado período de muestreo fijo, y asumiendo que el nivel sonoro se mantiene constante dentro de cada período, la integral de la ecuación 2.1 se reduce a una sumatoria.

$$L_{eq} = (10) \log \left[ \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right] (2.2)$$

En la figura 2.3 se representa el nivel sonoro instantáneo y el nivel continuo equivalente para todo el periodo.

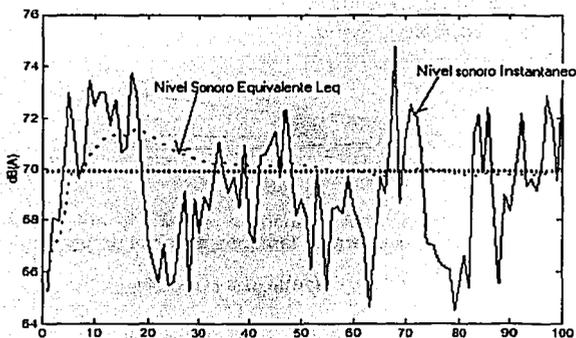


Figura 2.3 Curva de nivel sonoro y Leq

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## 2.2 Transmisión del ruido a exteriores

### 2.2.1 Ley de Inversos cuadrados

Si una esfera de radio  $\delta$ , vibra con expansión y contracción radial uniforme, y las ondas sonoras irradian uniformemente desde su superficie, si la esfera es puesta de tal forma que las ondas sonoras no se reflejen en la dirección de la fuente, y si el producto  $k\delta$ , donde  $k$  es el número de ondas, menor que 1, entonces la intensidad sonora a cualquier distancia radial  $r$  de la esfera es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, esto es:<sup>1</sup>

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (2.3)$$

Donde:

I= Intensidad sonora, watts/m<sup>2</sup>

W= Potencia Sonora de la fuente, watts.

La ecuación se conoce como la ley de inversos cuadrados; Es aquella porción de la reducción de la intensidad sonora con la distancia debido a la divergencia de onda figura 2.4.



Figura 2.4 ley de inversos cuadrados

Si se mide el nivel de potencia sonora ( $L_w$ , re:  $10^{-12}W$ ) antes que la potencia sonora ( $w$ ), la ecuación 2.3 quedara en términos del nivel de presión sonora.<sup>2</sup>

$$L_p = L_w - (20) \log(r - 1) \quad (2.4)$$

Donde:

$L_p$  = Nivel de presión sonora, dB re:  $0.0002\mu$  Bares

$L_w$  = Nivel de potencia sonora, dB re:  $10^{-12}W$

$r$  = distancia entre la fuente y el receptor, m

$20 \log r$  = transformación de decibeles =  $10 \log r^2$

$11$  = transformación de decibeles  $[10 \log (4\pi) = 10.99]$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

<sup>1</sup>  $k = 2\pi/\lambda$ , donde  $\lambda$  = longitud de onda,  $k$  tiene unidades recíprocas de longitud m<sup>-1</sup>

<sup>2</sup> Se hace la suposición de que  $\rho c = 400Kg/m^2 \cdot s$ .

### 2.2.2 Campos de radiación de la fuente sonora

El carácter de la radiación de onda de la fuente del ruido variara con la distancia a partir del origen figura 2.4, en lugares cerrados a la fuente, *el campo cercano*, la velocidad de la partícula no está en fase con la presión sonora. En esta área  $L_p$  fluctúa con la distancia y no se comporta con forme a la ley de inversos cuadrados. Cuando la velocidad de la partícula y la presión sonora están en fase, el lugar de la medida sonora se dice que está en *campo lejano*. Si la fuente sonora está en el espacio libre, es decir, no hay superficies reflejantes, entonces las medidas en el campo alejado son también medidas de campo libre. Si la fuente está en un espacio altamente reflejante, por ejemplo en un cuarto con paredes, techo y piso de acero, entonces las medidas en el campo lejano son también medidas en el campo reverberante. La zona sombreada en el campo lejano de la figura 2.5 muestra que  $L_p$  no sigue la ley de inversos cuadrados en el campo reverberante.

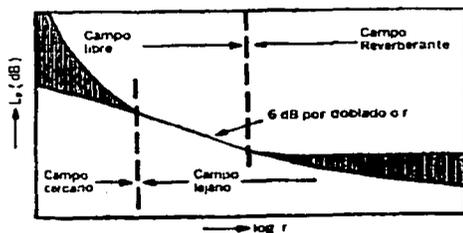


Figura 2.5 Variación del nivel de presión en lugares cerrados

### 2.2.3 Directividad

Realmente la fuente no irradia el sonido uniformemente en todas las direcciones, si se mide el nivel de presión sonora sobre una banda de frecuencia en una distancia fija desde una fuente real, se encontrarán diferentes niveles para direcciones diferentes. Si se traza en coordenadas polares, se obtendrá el factor de directividad de la fuente.

El factor de directividad es una medida numérica que en forma logarítmica éste factor es llamado: índice de directividad.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Ruido en Carreteras

---

Para una fuente esférica el índice se define como:

$$DI_{\theta} = L_{p\theta} - L_{ps} \quad (2.5)$$

Donde:

$L_{p\theta}$  = Nivel de presión sonora medida en una distancia "r" y un ángulo  $0^{\circ}$  desde una fuente directiva de potencia de radiación W dentro del espacio, dB.

$L_{ps}$  = Nivel de presión sonora medida en una distancia "r" y un ángulo  $0^{\circ}$  desde una fuente no directiva de potencia de radiación W dentro del espacio, dB.

Para una fuente localizada sobre o junto a una superficie plana o dura, el índice de directividad toma la siguiente forma:

$$DI_{\theta} = L_{p\theta} - L_{ps} + 3 \quad (2.6)$$

La adición de 3dB es por que la medida ésta hecha sobre una semiesfera en lugar de una esfera. Esto es, la intensidad en un radio "r", es dos veces tan grande si una fuente radia dentro de la semiesfera antes que la esfera, teniéndose que usar hasta éste punto. Cada índice es aplicable solamente para el ángulo en el cual  $L_{p\theta}$  fue medido y solamente para la frecuencia a la cual se midió.

Se asumirá que el patrón de directividad no cambia su forma sin hacer caso de la distancia de la fuente. Esto permite aplicar la ley de inversos cuadrados para fuentes directivas simplemente por adición del índice de directividad:

$$L_{p\theta} \cong L_w + DI_{\theta} - 20 \log r - 11 \quad (2.7)$$

Es importante notar que no es posible reducir la ecuación por el uso de la igualdad dada en la ecuación 2.5. Los valores de  $L_{p\theta}$  son en una distancia r, la cual es diferente a "r" de la ecuación 2.6.

## 2.3 Transmisión por aire

### 2.3.1 Efectos de las condiciones atmosféricas

La energía sonora es adsorbida en todas direcciones en el aire tranquilo por la excitación molecular y la relajación de las moléculas de oxígeno y en muy bajas temperatura, por conducción del calor y viscosidad en el aire. La excitación molecular es una función compleja de la frecuencia del ruido, humedad y temperatura. En general, se puede decir que conforme la humedad disminuye, la absorción sonora aumenta. Conforme la temperatura aumenta alrededor de 10 a 20°(dependiendo de la frecuencia sonora) la absorción aumenta. La absorción sonora es alta en frecuencias altas.

El perfil de temperatura vertical altera la trayectoria de propagación del sonido. Si existe una atmósfera con una estabilidad súper adiabática, la curva ascendente de los rayos sonoros y zonas sombreadas son formadas. Si existe una inversión, los rayos sonoros se inclinan hacia atrás del terreno. Esto da como resultado un incremento en el nivel sonoro. Estos efectos son insignificantes para distancias cortas pero pueden exceder 10dB en distancias sobre los 800 metros.

De manera similar, los gradientes de la velocidad del viento alteran el camino de propagación del ruido. El sonido que viaja con el viento tiende hacia abajo, mientras que el sonido que viaja en contra del viento tiende hacia arriba. Cuando las ondas sonoras tienden hacia abajo hay pequeños incrementos en los niveles sonoros o no los hay. Cuando las ondas sonoras tienden hacia arriba puede haber una reducción notable en los niveles sonoros.

### 2.3.2 Modelo básico de fuente puntual

Una fuente puntual es aquella para la cual  $k\delta \leq 1$  y la ecuación 2.3 lo cubre. De acuerdo a Magrab, " En la práctica la mayoría de las fuentes de ruido no están como una simple fuente puntual; sin embargo, el campo sonoro de una fuente por su complejidad se verá como si fuera un punto de origen si las siguientes condiciones se cumplen:<sup>3</sup>

1.-  $r/\delta \gg 1$ , es decir, la distancia desde el origen es grande comparada a sus características de dimensión , y

2.-  $\delta/\lambda \ll r/\delta$ , es decir, la relación del tamaño de la fuente a la longitud de la onda sonora en el medio, es pequeña comparada con la relación de la distancia desde la fuente a sus características de dimensión.

Recordar que  $r/\delta \gg 1$  desde la primera condición. Un valor de  $r/\delta > 3$  es una aproximación suficiente; por lo tanto  $\delta/\lambda \ll 3$ .

<sup>3</sup> Edward B. Magrab, Control de Ruido Ambiental, New York, pp.4y6,1952

## Ruido en Carreteras

---

Una fuente direccional que tenga un nivel de potencia sonora  $L_w$  producirá un nivel de presión sonora en un receptor, el cual puede estimarse por la siguiente ecuación:<sup>4</sup>

$$L_{p0} \cong L_w + DI_0 20 \log r - 11 - A_e \quad (2.8)$$

A excepción del ultimo termino ( $A_e$ ), esta es la ley del inverso cuadrado modificada. El termino  $A_e$  es el exceso de atenuación más allá de la onda divergente, en condiciones ambientales y tiene unidades de decibeles.

$A_e$  puede dividirse en seis términos:

$A_{01}$ = Efecto de la diferencia en valores de  $\rho c$  de 400 Kg/m<sup>2</sup>.s cuando la temperatura ambiente y presión barométrica difieren apreciablemente de valores haciendo que  $\rho c = 400$  Kg/m<sup>2</sup>.s.

$A_{03}$ = Atenuación por lluvia, hielo, nieve o neblina, dB.

$A_{04}$ = Atenuación por barreras, dB.

$A_{05}$ = Atenuación por hierba, árboles y arbustos, dB.

$A_{06}$ = Atenuación por absorción en el aire, dB.

$A_{02}$ = Atenuación y fluctuaciones debido al viento y gradientes de temperatura, turbulencias atmosféricas y características del terreno, dB.

El efecto de la diferencia en  $\rho c$  desde 400 Kg/m<sup>2</sup>.s puede calcularse primero haciendo un cambio de densidad ( $\rho$ ) debido al cambio de temperatura y presión. El efecto del cambio de temperatura sobre la velocidad del sonido se puede calcular con la raíz cuadrada de la temperatura multiplicada por el factor 20.05 en m/s, la atenuación total, se calcula entonces.

$$A_{r1} = 10 \log \left( \frac{\rho c}{400} \right) \quad (2.9)$$

---

<sup>4</sup> Aun cuando la fuente no es direccional,  $DI_0 = 3$  dB para la radiación de una semiesfera

El signo de  $A_{e1}$  es positivo, así valores del lado derecho de la expresión reduce  $L_{p\theta}$ , mientras que valores negativos lo incrementan.

De resultados de pruebas de laboratorio de los efectos de la temperatura y humedad sobre la atenuación del sonido,  $A_{e2}$ , en un rango de frecuencia de 125 a 12500 Hz, para temperaturas entre  $-10$  y  $30$  °C para humedad relativa entre 10 y 90 % se obtuvo que para  $20$  °C  $A_{e2}$  se calcula como sigue:

$$A_{e2} = 7.4 * 10^{-8} \left( \frac{f^2 r}{\theta} \right) \quad (2.10)$$

Donde:

F = frecuencia media geométrica, Hz  
 R = Distancia entre fuente y receptor, m  
 $\Theta$  = humedad relativa, %

Para otras temperaturas ( $20^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ), una aproximación:

$$A_{e2} = \frac{A_{e2}}{[1 + (\beta)(\Delta T)(f)]} \quad (2.11)$$

Donde:

$A_{e2}$  = atenuación a  $20^\circ\text{C}$  y  $\Phi=50\%$ , dB.  
 $B = 4 * 10^{-6}$  para T en °C  
 $\Delta T = T - 20^\circ\text{C}$   
 T = temperatura, °C

## 2.4 Modelo para la predicción del ruido.

### 2.4.1 Ruido de vehículos individuales.

El ruido de los vehículos automotores es en general una superposición de tres tipos de ruido de orígenes bien diferenciados: a) el ruido de propulsión (el motor, la transmisión y el sistema de escape asociado); b) el ruido de rodadura entre las cubiertas y la calzada; y c) el ruido aerodinámico. A velocidades por encima de 80 km/h el ruido aerodinámico se vuelve muy importante, ya que la intensidad del ruido aerodinámico crece entre 4 a 8 veces elevadamente. Por debajo de 50 km/h, en general predomina el ruido del motor.

Sin embargo, y especialmente en el caso de los automóviles más nuevos, el silenciador de escape es tan efectivo que aún a velocidades tan bajas como 40 km/h sigue predominando el ruido de rodadura.

La caracterización de los vehículos como fuentes sonoras puede efectuarse con diversos grados de detalle. Podría describirse simplemente el promedio de la potencia sonora emitida en diversas condiciones de circulación, o podría darse una descripción particularizada para diversos tipos de vehículos de la potencia sonora por bandas de tercio de octava en función de la velocidad y aceleración, junto con un diagrama polar en acimut y elevación. En la práctica, rara vez se dispondrá de tanta información, pero, al mismo tiempo, un detalle tan extremo requeriría un modelo muy refinado para su aprovechamiento completo. Una situación intermedia podría ser disponer de la potencia sonora emitida en bandas de octava en función de la velocidad.

En la tabla 2.1 se indica el espectro típico del ruido de automóviles y camiones pesados circulando a dos velocidades diferentes, graficado en la figura 2.6. Los valores han sido medidos a 15 m de distancia y a 1.2 m del suelo, y corresponden al instante en que el vehículo pasa frente al instrumento de medición. Si bien el ruido de propulsión depende más de la velocidad angular del motor que de la velocidad lineal del vehículo, las condiciones de conducción habituales llevan a que la alta velocidad lineal se asocie a una elevada velocidad de giro del motor. En la figura 2.6 se muestran los niveles sonoros con compensación A para tres categorías de vehículos, en función de la velocidad.

Tipo de vehículo	Velocidad [km/h]	Frecuencia [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
Automóviles	56	65	61	62	61	57	53
	88	71	68	66	68	66	60
Camiones	56	87	84.5	81.5	78	74.5	70.5
	88	87.5	85	87.5	82.5	77	73.5

Tabla 2.1. Espectro típico del ruido de automóviles y camiones pesados circulando a dos velocidades. Los valores se midieron a 15 m de distancia y a 1,2 m del suelo.

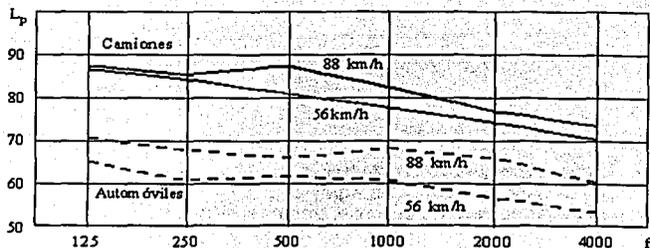


Figura 2.6. Espectros correspondientes a los datos de la tabla 1.

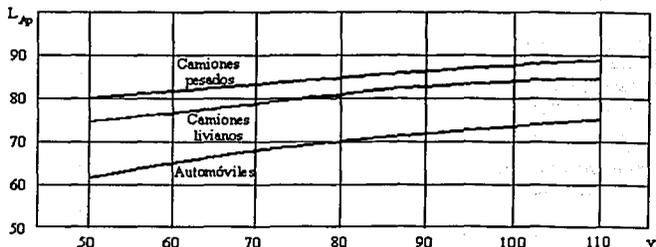


Figura 2.7 Nivel sonoro típico (dBA) en función de la velocidad  $v$  (km/h) para tres categorías de vehículos en EEUU, a 15 m de la trayectoria.[10]

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

A partir del nivel de presión sonora a 15 m de distancia, puede estimarse la potencia emitida, si se hacen ciertas suposiciones, por ejemplo que la emisión es aproximadamente omnidireccional, que la superficie de la calzada es muy reflectante. Bajo estas condiciones puede suponerse divergencia hemisférica, y entonces vale

$$W = \frac{2\pi r^2}{\rho_0 c} P_{ref}^2 10^{L_p/10} \quad (2.12)$$

Donde:

$P_{ref}$  = presión de referencia = 0.0002  $\mu$  bares

$\rho_0$  = densidad del aire en  $Kg/m^3 = 1.2 Kg/m^3$  ( $A20^\circ C$ )

$c$  = velocidad de propagación del sonido en  $m/s = 344 m/s$

En la práctica, para medir el nivel de presión sonora a una distancia dada, basta colocarse a esa distancia de la trayectoria del vehículo y medir el valor máximo de  $L_p$ .

#### 2.4.2. Ruido debido a un vehículo en movimiento

Hasta aquí sólo se había tenido en cuenta el instante en que el vehículo pasaba a una distancia dada (por ejemplo 15 m) del sonómetro. Por supuesto que habría sido más simple dejar el vehículo detenido a esa distancia y medir el nivel de presión sonora o el espectro a distintas velocidades angulares del motor, pero no se podría incluir en dicha medición los ruidos de rodadura y aerodinámico, que son tan importantes a altas velocidades.

A continuación se analiza ahora cómo varía el ruido conforme va variando la distancia entre el vehículo y el receptor debido al movimiento. Con referencia a la figura 2.8, llamando  $P_{max}$  a la presión registrada en el instante  $t = t_0$  en que el vehículo pasa justo frente al observador y despreciando la atenuación atmosférica así como los efectos del viento, se tendrá.

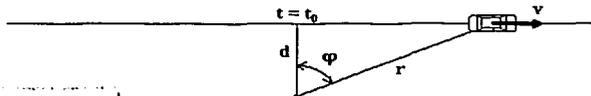


Figura 2.8. Disposición geométrica para determinar el efecto del movimiento sobre el nivel sonoro en un punto receptor.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$$P_{\text{máx}}^2 = \frac{W \rho_0 c}{2\pi d^2} \quad (2.13)$$

$$P^2 = \frac{P_{\text{máx}}^2}{d^2 + \frac{d^2}{v^2 (t-t_0)^2}} \quad (2.14)$$

Se ha calculado la presión cuadrática en lugar de la presión porque esto permitirá luego superponer en energía los efectos de varios automóviles circulando simultáneamente por la misma vía. La evolución de  $P^2$  se suele denominar *firma acústica* o *huella acústica* del vehículo en cuestión. Dicha firma acústica se ilustra en la figura 2.9 en su versión energética y logarítmica. En la práctica, debido a que el ruido del vehículo no es perfectamente estacionario, las firmas acústicas presentan irregularidades, como se muestra en la figura 2.10.

Si se tiene en cuenta el ruido de fondo, simbolizado por una presión sonora de fondo  $P_f$ , la ecuación 2.14 se transforma en

$$P^2 = \frac{P_{\text{máx}}^2}{d^2 + \frac{d^2}{v^2 (t-t_0)^2}} + P_f^2 \quad (2.15)$$

Como era previsible, para  $t - t_0$  muy grande, la presión sonora, perturbada por el paso del vehículo, retorna a su valor de fondo.

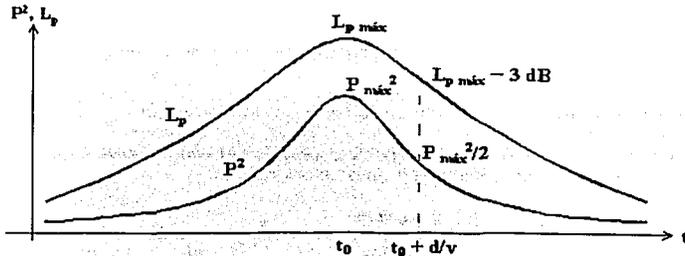


Figura 2.9. Firma o huella acústica idealizada de un vehículo pasando a una velocidad constante  $v$  frente a un punto de observación separado por una distancia  $d$  de la trayectoria. Se indican las versiones energética ( $P^2$ ) y logarítmica ( $L_p$ ).

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

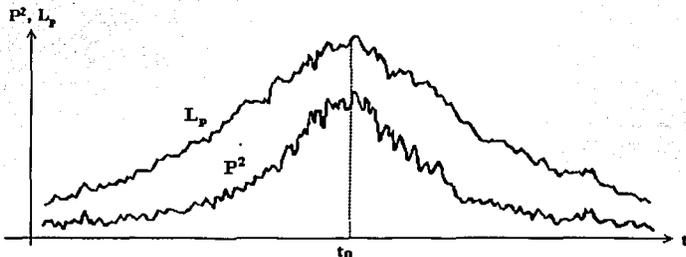


Figura 2.10. Firma o huella acústica real de un vehículo, en versión energética (P<sup>2</sup>) y logarítmica (L<sub>p</sub>).

#### 2.4.3. Efecto de las atenuaciones en la propagación

En las ecuaciones anteriores sólo se tuvo en cuenta la atenuación por divergencia geométrica, pero no por atenuación energética en el aire ni por fenómenos de reflexión o absorción. Se podría, en primer lugar, obtener una ecuación que incluya la atenuación en el aire multiplicando la ecuación 2.14 por el factor  $e^{-\gamma m x}$ , donde  $x$  es la distancia en cada instante entre el vehículo y el receptor. Sin embargo, dado que dicho factor se hace importante a distancias considerables, lo más probable es que el efecto de la divergencia geométrica reduzca el nivel de presión sonora por debajo del ruido de fondo antes de que dicha corrección sea realmente necesaria.

En cuanto al efecto de las reflexiones, las correcciones empíricas debidas al suelo dependen esencialmente de las características de éste, mientras que la reflexión en las fachadas será tomada en cuenta, más adelante, mediante el método de las imágenes, es decir, agregando varias fuentes virtuales que reemplacen a las fuentes virtuales.

#### 2.4.4. Nivel equivalente del ruido de un vehículo en movimiento

A partir de la ecuación 2.14 es posible obtener el nivel equivalente durante un tiempo  $T$ . Para ello se calcula el promedio energético:

$$P_{e,f}^2 = \frac{P_{\max}^2}{T} \int_{t_0-T/2}^{t_0+T/2} \frac{d^2}{d^2 + v^2(t-t_0)^2} dt \quad (2.16)$$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

El cálculo de esta integral sustituyendo  $u = v(t - t_0)/d$ , arroja

$$P_{ef}^2 = \frac{P_{máx}^2 d}{T v} 2 \arctg \frac{vT}{2d} \quad (2.17)$$

El caso más interesante es cuando  $vT \gg 2d$ , ya que abarca la parte significativa del pasaje del vehículo frente al observador. En ese caso el argumento del arco tangente es muy grande y ésta tiende a  $\pi/2$ , por lo cual puede aproximarse

$$P_{ef}^2 \cong P_{máx}^2 \frac{\pi d}{vT} = \frac{W \rho_0 c}{2 d vT} \quad (2.18)$$

de donde

$$L_{eqT} \cong 10 \log \frac{W \rho_0 c}{2 d vT P_{ref}^2} \quad (2.19)$$

Se observa que el nivel equivalente depende del tiempo considerado. Esto es así porque el paso de un vehículo aporta al receptor una energía sonora *finita*, que debe repartirse en un tiempo *arbitrario*. Si dicho tiempo es muy corto, de la ecuación 2.16 se deduce que la presión eficaz tiende al valor de la presión máxima. Si es muy largo, la energía se distribuye en un intervalo muy grande, resultando que el promedio tiende a cero.

#### 2.4.5. Niveles estadísticos $L_n$ del ruido de un vehículo en movimiento

Muchos criterios en acústica ambiental utilizan los niveles estadísticos  $L_n$ , definidos como los niveles que son superados un  $n\%$  del tiempo para diversos  $n$  entre 0 y 100. La razón para ello es que permiten dar una idea del grado de variabilidad del ruido, y que pueden obtenerse fácilmente con instrumentos apropiados, particularmente con varios modelos de sonómetros integradores digitales. Aún cuando los niveles estadísticos correspondientes a un evento aislado (como el paso de un vehículo individual frente al observador) no tienen mucha utilidad práctica, permitirá ubicar el problema.

Dado que el paso de un sólo vehículo no es un fenómeno estacionario, el valor estadístico necesariamente estará vinculado al periodo de tiempo específico T que abarque la medición. A partir de la ecuación 2.14 es fácil verificar que en condiciones ideales, es decir si el ruido de fondo es despreciable, se cumple

$$L_n = L_{p, \text{máx}} - 10 \log \left( 1 + \eta^2 \frac{v^2 T^2}{4 d^2} \right) \quad (2.20)$$

Donde  $\eta = n / 100$ . Como se puede apreciar, al aumentar el intervalo de tiempo T considerado,  $L_n$  disminuye hasta valores arbitrariamente bajos (inclusive negativos, correspondientes a presiones sonoras inaudibles) En el caso real en que hay un ruido de fondo  $L_f$ , la expresión anterior sólo vale mientras  $L_n$  sea sensiblemente mayor que  $L_f$ . Si no, debe utilizarse la ecuación 2.15 en lugar de la 2.14, obteniéndose

$$L_n = L_{p, \text{máx}} + 10 \log \left( \frac{1}{1 + \eta^2 \frac{v^2 T^2}{4 d^2}} + \frac{P_f^2}{P_{\text{máx}}^2} \right) \quad (2.21)$$

Para T grande, todos los valores, excepto  $L_0$  (que es igual a  $L_{p, \text{máx}}$ ), tienden a coincidir con el nivel de ruido de fondo.

#### 2.4.6 Ruido como fenómeno colectivo

Se pasará ahora a considerar el ruido como fenómeno colectivo. En este caso se tiene una serie de vehículos circulando sucesivamente frente al punto de observación. Así, cuando un vehículo determinado esté ya lo bastante lejos como para que su aporte de energía sonora sea despreciable, habrá otro u otros pasando cerca del observador.

Una primera aproximación al problema es suponer que todos los vehículos son iguales y marchan a la misma velocidad, pasando frente al punto de observación con una frecuencia constante Q (por ejemplo 0,3 vehículos/segundo (veh/s)). Entonces la presión cuadrática viene dada por

$$P^2(t) = P_{\text{máx}}^2 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{d^2}{d^2 + v^2 (t - k / Q)^2} \quad (2.22)$$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Cuando  $Q.d / v < 6$  lt; el régimen se asemeja al de un único vehículo que pasa esporádicamente. En la figura 2.11 se muestran las firmas acústicas de 5 vehículos sucesivos y el resultado de la circulación continua para el caso en que  $Q.d / v = 1$ . Como se observa, la presión cuadrática resultante es casi constante. A modo de comparación, la figura 2.12 muestra la presión cuadrática para varias relaciones  $Q.d / v$ , correspondientes a tránsito medianamente intenso a intenso. Vemos que cuanto más intenso es el tránsito ( $Q$  alto) o más lejos está el observador ( $d$  grande), más constante es la presión cuadrática y, por consiguiente, el nivel de presión sonora.

La serie de la ecuación 2.22 puede sumarse fácilmente para el caso en que  $t=0$ , obteniéndose así el valor de pico de la presión cuadrática:

$$P_{\text{pico}}^2 = P_{\text{máx}}^2 \frac{\pi Q d}{v} \coth \frac{\pi Q d}{v} \quad (2.23)$$

o bien

$$P_{\text{pico}}^2 = \frac{W \rho_0 c Q}{2 d v} \coth \frac{\pi Q d}{v} \quad (2.24)$$

Esta fórmula muestra que a una distancia considerable de una carretera ésta se comporta como una fuente lineal, ya que en ese caso la cotangente hiperbólica tiende a 1, y entonces la intensidad depende inversamente de la distancia:

$$P_{\text{pico}}^2 \approx \frac{Q W \rho_0 c}{2 d v} P_{\text{pico}}^2 \approx \frac{Q W \rho_0 c}{2 d v} \quad (2.25)$$

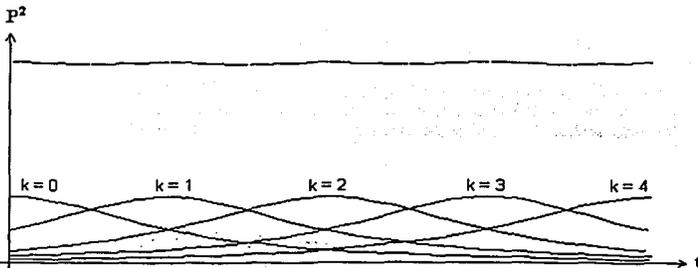


Figura 2.11. Presión cuadrática correspondiente a una sucesión de vehículos y las firmas acústicas de cinco de ellos. En este caso  $Q.d/v = 1$ .

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

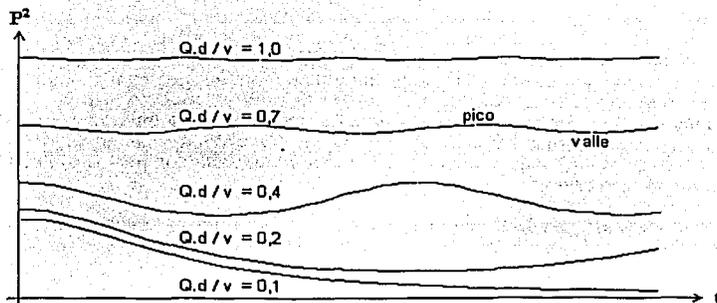


Figura 2.12. Presión cuadrática correspondiente a una sucesión de vehículos y las firmas acústicas de cinco de ellos.

Los valles también se pueden calcular con relativa facilidad, considerando  $t = 1/2Q$  (ya que se dan en el punto medio entre dos picos, cuyos valores están distanciados  $\Delta t = 1/Q$ ). EL resultado es

$$P_{\text{valle}}^2 = P_{\text{máx}}^2 \left( \frac{2\pi Qd}{v} \coth \frac{2\pi Qd}{v} - \frac{\pi Qd}{v} \coth \frac{\pi Qd}{v} \right) \quad (2.26)$$

o bien

$$P_{\text{valle}}^2 = \frac{W \rho_0 c Q}{2d} \left( 2 \coth \frac{2\pi Qd}{v} - \coth \frac{\pi Qd}{v} \right) \quad (2.27)$$

Este valor tiende asintóticamente al mismo valor correspondiente a los picos cuando  $Q.d/v$  se hace muy grande (tránsito intenso).

En la figura 2.13 se muestra cómo varían los picos y los valles en función de  $Q.d/v$ , así como el cociente entre ambos. (En los valles, para bajos valores de  $Q.d/v$  debería incluirse el ruido de fondo, que en este caso se ha despreciado por simplicidad.)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

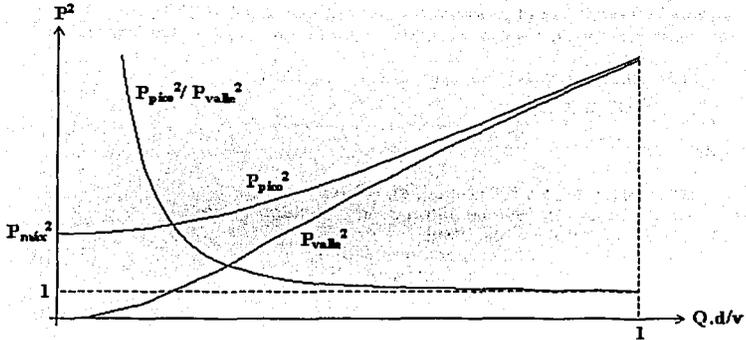


Figura 2.13. Variación de los picos y los valles de la presión resultante en función de  $Q.d/v$ . Se incluye, como referencia, el cociente (adimensional) entre ambos.

Cabe mencionar que existen otros modelos matemáticos que consideran al ruido provocado por el tránsito como fenómeno colectivo. En primer lugar el modelo propuesto por Johnson y Sonders<sup>5</sup> conocido como N50 y cuya ecuación es:

$$N_{50} = 51.5 + 10 \log \frac{Q}{(d * 3.28084)} + 30 \log \frac{(\bar{v} * 0.62150)}{40} \quad (2.28)$$

Donde:

$N_{50}$ : Nivel promedio de ruido en dB(A)

Q: Cantidad de vehículos por hora

d: Distancia del punto de observación a la fuente (m)

$\bar{v}$ : Velocidad media de los vehículos en (km/h)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

<sup>5</sup> Journal of Sound and Vibration (1968)

El segundo modelo es el propuesto en el reporte NCHRP 174 por el Ministerio de Comunicaciones y Transporte de Ontario. La ecuación es la siguiente:

$$L_{eq} = 42.3 + 10.2 \log(V_c + 6V_t) - 13.9 \log D + 0.13S \quad (2.29)$$

$$V_c = V_A + (10 * V_m) \quad (2.30)$$

Donde:

$L_{eq}$ : Energía equivalente del sonido, en dB(A)

Vc: Volumen de automóviles y automóviles medianos, veh/h

$V_A$ : Volumen de automóviles, veh/h

$V_m$ : Volumen de automóviles medianos, veh/h

Vt: Volumen de automóviles pesados, veh/h

D: Distancia del observador, m

S: Velocidad promedio del tráfico, km/h

#### 2.4.7. Nivel equivalente del ruido del tránsito

Suponiendo que se tiene un volumen de tránsito de Q vehículos por segundo, se puede calcular el nivel equivalente total a partir de la presión eficaz cuadrática que corresponde a un solo vehículo, obtenida en la ecuación 2.18. Para ello primero se multiplicará dicha presión cuadrática por la cantidad de vehículos que pasan durante el tiempo T considerado, es decir, por Q.T:

$$P_{eqT}^2 \cong Q T \frac{W \rho_0 c}{2 d v T} = \frac{Q W \rho_0 c}{2 d v} \quad (2.31)$$

No debe sorprendernos la identidad entre esta presión cuadrática media y la presión cuadrática de pico de la ecuación 2.25, ya que aquella había sido obtenida suponiendo que Q.d / v era grande, por lo cual las variaciones de la presión eficaz podían despreciarse.

Podemos ahora expresar esta presión en términos de nivel, y así se obtiene el nivel equivalente:

$$L_{eqT} \cong 10 \log \frac{Q W \rho_0 c}{2 d v P_{ref}^2} \quad (2.32)$$

Se observa que el nivel equivalente no depende del tiempo  $T$ , en tanto éste sea considerable ( $T \gg 2d/v$ ). Un problema experimental importante vinculado con esto es determinar, dadas ciertas condiciones, cuál debe ser el tiempo mínimo de medición para obtener una apropiada estabilización del nivel equivalente. Dicha estabilización viene planteada en términos de la tolerancia admisible en la medición. A pesar de que se ha considerado un flujo idealmente ordenado, dado que el aporte de energía sonora de cada vehículo en un tiempo considerable no depende del momento en que pase frente al observador, la fórmula 2.32 sigue siendo válida aún en presencia de un flujo aleatorio.

Se observa que la dependencia entre el nivel equivalente y el volumen o caudal de tránsito es logarítmica, siendo ésta la base de los modelos más simples que permiten estimar el ruido del tránsito.

#### 2.4.8. Niveles estadísticos del tránsito

En las condiciones ya mencionadas, se puede ver en la figura 2.12 que para  $Q.d / v$  moderadamente alto la alternancia entre picos y valles tiende a una función aproximadamente senoidal cuyos valores extremos son  $P_{\text{pico}}^2$  y  $P_{\text{valle}}^2$ . Esto permite obtener aproximaciones para los niveles estadísticos  $L_n$ , para lo cual basta analizar un semiperíodo decreciente de una función senoidal, comprendido entre su mínimo y su máximo (figura 2.14).

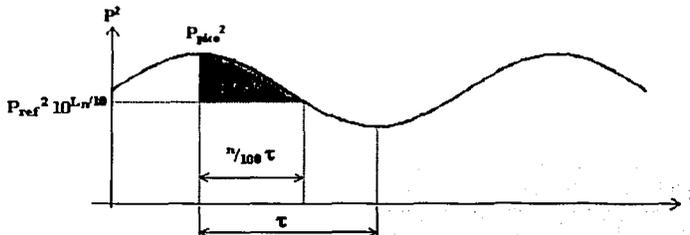


Figura 2.14. Análisis geométrico para obtener los niveles estadísticos  $L_n$  cuando la presión cuadrática fluctúa en forma aproximadamente senoidal.

El valor de presión cuadrática correspondiente a  $L_n$  es

$$P_n^2 = \frac{P_{pico}^2 - P_{valle}^2}{2} \cos \eta \pi + \frac{P_{pico}^2 + P_{valle}^2}{2} \quad (2.33)$$

donde  $\eta = n/100$ . El nivel estadístico resulta, entonces,

$$L_n = 10 \log \frac{P_n^2}{P_{ref}^2} \quad (2.34)$$

#### 2.4.9. Descripción estadística del tránsito

En las secciones previas se supuso, por simplicidad, que el flujo vehicular era perfectamente periódico. Si bien varias de las conclusiones obtenidas seguirán siendo cualitativa e inclusive cuantitativamente válidas, en realidad la circulación es aleatoria y debe ser descrita por medio de parámetros estadísticos.

Corresponde primeramente analizar qué sucede con los instantes de paso de los sucesivos vehículos frente al punto de observación. Si se supone que no hay interrupciones importantes del flujo se darán aproximadamente las condiciones requeridas para que la distribución sea de Poisson. Estas son:

- a) La cantidad de eventos (vehículos pasando frente al observador) en un intervalo  $[t_0, t_0 + t]$  es una variable aleatoria  $X$  dependiente sólo de  $t$ , y no del instante  $t_0$ .
- b) Las cantidades de eventos que ocurren en intervalos de tiempo disjuntos son variables aleatorias independientes.
- c) La probabilidad de que en un intervalo de tiempo pequeño  $[t_0, t_0 + t]$  ocurra un evento tiende a ser proporcional a  $t$ :  $P_1(t) = \lambda t + o(t)$ , donde  $o(t)$  es un infinitésimo de orden superior a  $t$ .
- d) La probabilidad de que en un intervalo pequeño de tiempo  $[t_0, t_0 + t]$  sucedan dos o más eventos es de orden superior, es decir  $o(t)$ .

La condición a) se satisface si se supone que el flujo es estacionario. Esto no sucede si se considera períodos largos de tiempo (un día completo), pero sí se restringe el análisis a lo que sucede en un horario específico. La condición b) se cumple porque en general no hay acuerdo entre los usuarios de los diversos vehículos que puedan hacer depender la circulación ulterior de lo que ya sucedió. Una situación en que esta hipótesis podría peligrar es el caso de la circulación en caravana. La condición c) se cumple si el caudal medio  $Q$  de vehículos se mantiene constante en un periodo dado, resultando  $\lambda = Q$ .

Por último, la condición d) queda garantizada por el hecho de que es muy improbable que pasen casi simultáneamente dos ó más vehículos.

Bajo los supuestos anteriores, se demuestra que la probabilidad de que se produzcan  $m$  eventos en un intervalo de amplitud  $t$  es

$$P_m(t) = P(X = m) = \frac{e^{-Qt}(Qt)^m}{m!} \quad (2.35)$$

En particular, si se llama a  $h$  al tiempo entre vehículos sucesivos, la probabilidad de que  $h > t$  coincide con la probabilidad de que en un intervalo de amplitud  $t$  haya 0 eventos, es decir, con  $p_0(t)$ :

$$P(h > t) = e^{-Qt} \quad (2.36)$$

entonces

$$P(h \leq t) = 1 - e^{-Qt} \quad (2.37)$$

siendo la densidad de probabilidades correspondiente

$$p(t) = \frac{dP(h \leq t)}{dt} = Qe^{-Qt} \quad (2.38)$$

Estas funciones, que corresponden a la distribución exponencial, se ilustran en la figura 2.15.

Se demuestra que para esta distribución el valor medio o esperanza matemática del número de eventos (es decir de vehículos que pasan frente al observador) en el intervalo  $t$  es, como era natural esperar,

$$\mu = Q t \quad (2.39)$$

mientras que el desvío estándar es

$$\sigma = \sqrt{Q t} \quad (2.40)$$

Esto significa que la dispersión no crece tan rápidamente como el intervalo de tiempo considerado y, por consiguiente, la dispersión relativa  $\sigma / \mu$  disminuye, y lo hace tanto más rápidamente cuanto más intenso sea el tránsito ( $Q$  grande).

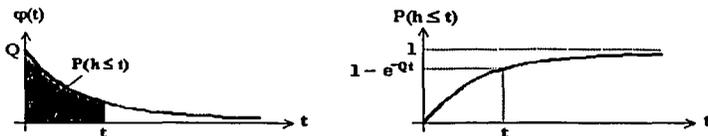


Figura 2.15. Distribución de probabilidades de Poisson y su correspondiente función de probabilidad acumulada para el caso en que se reduce a una exponencial (tiempo entre eventos sucesivos,  $m = 0$ ).

Además de los instantes de paso frente al observador, interesa la velocidad, ya que como se ha visto anteriormente, el ruido emitido por un vehículo depende de la velocidad. Estrictamente hablando, también depende de la aceleración, ya que en aceleración la relación de transmisión es más alta que la que corresponde a velocidad estacionaria, lo cual implica mayor cantidad de revoluciones por minuto y mayor ruido. Dicha consideración es importante cuando se analizan zonas de aceleración y desaceleración.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Se puede suponer que la velocidad es una variable aleatoria  $V$  que responde estadísticamente a una distribución gaussiana, lo cual implica que la probabilidad de que  $V < v$  es

$$P(V < v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^v e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{v-v_0}{\sigma}\right)^2} dv \quad (2.41)$$

donde  $v_0$  es la velocidad media y  $\sigma$  el desvío estándar, que determina la dispersión.

Si  $t_{0n}$  son los instantes en los que pasa algún vehículo por la posición  $x_0$  (los que, como se ha supuesto, estarán distribuidos según Poisson), entonces los instantes en los que dicho vehículo pasa por la posición  $x = x_0 + L$  serán

$$t_n = \frac{L}{v_n} + t_{0n} \quad (2.42)$$

(figura 2.16). Si se considera una cantidad suficientemente grande de eventos, los instantes  $t_n$  también se distribuyen según Poisson, dando así coherencia al modelo. Suponiendo que la mayoría de los vehículos tienen velocidades comprendidas entre  $v_0 - 3\sigma$  y  $v_0 + 3\sigma$ , en el peor caso el primer vehículo considerado llegará a la posición  $x_0 + L$  en un instante  $t_1$  acotado por:

$$t_1 = t_{0,1} + \frac{L}{v_0 - 3\sigma} \quad (2.43)$$

Durante ese tiempo habrán pasado por  $x_0$  una cantidad de vehículos estimada por

$$N_0 = Q \frac{L}{v_0 - 3\sigma} \quad (2.44)$$

por lo tanto la cantidad de vehículos a considerar para que se haya estabilizado la distribución de llegadas es

$$n > Q \frac{L}{v_0 - 3\sigma} \quad (2.44)$$

ya que a partir de allí el promedio de vehículos por unidad de tiempo en el punto de llegada se hace sensiblemente igual a  $Q$ . Este criterio fue corroborado por simulación.

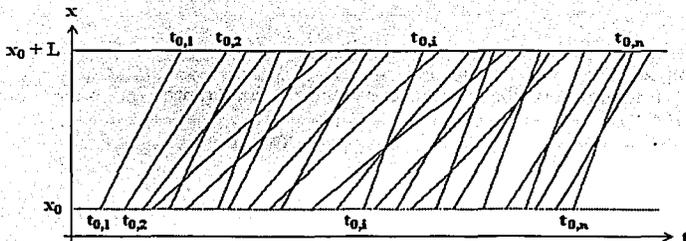


Figura 2.16. Instantos de partida y de llegada para una sucesión de vehículos y sus respectivas trayectorias.

Por último, se considerara que la presión cuadrática máxima (esto es, la que se registra cuando el vehículo pasa justo frente al observador), que venía dada por la ecuación 2.13, también es una variable aleatoria. En este caso cabe acotar que esta presión cuadrática máxima en la práctica puede tener una distribución bimodal o aún polimodal, debido a que en el tránsito hay varios tipos de vehículos bien diferenciados, como se muestra en las figuras 2.6 y 2.7 (las cuales consignan únicamente los valores promedio para cada tipo de vehículo y condición de marcha). Esto se puede resolver considerando por separado cada tipo de vehículo (por ejemplo automóviles, camiones ligeros y camiones pesados), y luego superponer las energías que aporta cada grupo.

Una complicación adicional es que esta variable es doblemente aleatoria, ya que para una velocidad determinada tiene una distribución, que podemos suponer gaussiana, pero además *depende de la velocidad*, que también está distribuida aleatoriamente. Mediante un ajuste logarítmico entre la velocidad y la presión máxima, es posible obtener, de la figura 2.7, las relaciones siguientes:

$$L_p \text{ máx} = \begin{cases} 39 \log \frac{v}{14} + 62 & \text{autos} \\ 29 \log \frac{v}{14} + 75 & \text{camiones livianos} \\ 26 \log \frac{v}{14} + 80 & \text{camiones pesados} \end{cases} \quad (2.45)$$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Esto implica unas relaciones del tipo

$$P_{m\acute{a}x}^2 = K_1 \left( \frac{v}{v_0} \right)^{K_2} \quad (2.46)$$

lo cual a su vez permite, aplicando la ecuación 2.18, concluir que

$$P_{of}^2 = K_1 \frac{\pi d}{v_0 T} \left( \frac{v}{v_0} \right)^{K_2 - 1} \quad (2.47)$$

Como  $K_2$  resulta siempre mayor que 1, resulta predominante el incremento del nivel máximo por velocidad sobre la reducción del tiempo de tránsito frente al observador.

Si pasáramos por alto esta correlación, asignando a  $P_{m\acute{a}x}^2$  una variable aleatoria independiente de la velocidad, no sólo se estaría permitiendo un aumento en la dispersión, sino que además provocaríamos un desplazamiento del valor esperado.

En la práctica se podría suponer que  $\log K_1$  es una variable gaussiana y que  $K_2$  es constante, por lo cual la dependencia de la velocidad será funcionalmente determinística. La razón por la cual se supone  $K_2$  constante es que al circunscribirse a un tipo de vehículos (por ejemplo automóviles), quedan fijadas aproximadamente las condiciones aerodinámicas y de rodadura, que son las que determinan la forma funcional en que el ruido depende de la velocidad.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## CAPÍTULO III

### Verificación del Modelo Mediante un Caso Estudio

#### INTRODUCCIÓN

##### Fuentes de ruido urbanas

Existen numerosos factores que contribuyen al ruido urbano. El primer lugar lo ocupa sin duda la circulación vehicular, particularmente los vehículos de transporte público, las motos, los camiones, y en menor medida los autos y obedecen en su incremento o decremento del flujo vehicular. Luego están las fábricas, en particular, embotelladoras, carpinterías, etc.

En este trabajo se realizó un aforo vehicular en una arteria típica y específica de la Ciudad de México.

##### La medición del ruido

La unidad de medición del sonido son los decibeles. Hay dos tipos de ponderaciones (escalas) comúnmente utilizadas: la ponderación A (dBA) y la ponderación C (dB). La ponderación C básicamente miden el sonido en cuanto a fenómeno físico. La ponderación A, en cambio, miden la forma en que se lo percibe, así como su peligrosidad potencial para el oído humano.

Los decibeles se miden con un medidor de nivel sonoro o sonómetro (también denominado decibelímetro). Cuando se desea medir otras características de un ruido se utilizan otros instrumentos más sofisticados como el analizador de espectro y los clasificadores estadísticos.

##### Normativa sobre ruido

En general puede afirmarse que los valores tolerados por la legislación tienden a proteger la tranquilidad y el bienestar de la población.

En México las normas que rigen los límites máximos permisibles son las siguientes:

Norma	Conceptos	INDICACIONES	
NOM-079-ECOL-1994	Que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de los vehículos automotores nuevos en planta y su método de medición.	Peso bruto vehicular Kg	Límites máximos permisibles en dB(A)
		Hasta 3000	79
		De 3000 y hasta 10000	81
		Mas de 10000	84
NOM-080-ECOL-1994	Que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido proveniente del escape de los vehículos automotores, motocicletas y triciclos motorizados en circulación y su método de medición.	Desplazamiento del motor en centímetros cúbicos	Límites máximos permisibles en dB(A)
		Hasta 499	96
		De 450 en adelante	99
NOM-081-ECOL/1994	Que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición.	Horario	Límites máximos permisibles en dB(A)
		De 6:00 a 22:00	68
		De 22:00 a 6:00	65
NOM-082-ECOL-1994	Que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las motocicletas y triciclos motorizados nuevos en planta y método de medición.	Desplazamiento del motor en centímetros cúbicos	Límites máximos permisibles en dB(A)
		Hasta 499	86
		De 450 en adelante	89

Tabla 3.1 Normas Oficiales Mexicanas 1

<sup>1</sup> [http://www.semarnat.gob.mx/marco\\_juridico/ruido.shtml](http://www.semarnat.gob.mx/marco_juridico/ruido.shtml)



## Ruido en Carreteras

---



Foto 3.1 Tipo de Vehiculos



Foto 3.2 Tipo de Vehiculos

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Foto 3.3 Tipo de Vehículos



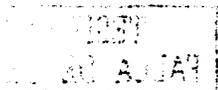
Foto 3.4 Tipo de Vehículos

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

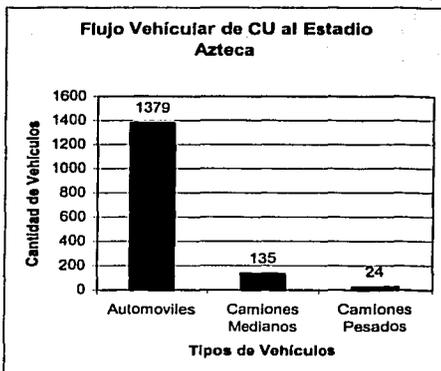
## Ruido en Carreteras

Datos Generales		
Ubicación de la zona en estudio :		
Hora de realización del aforo:		
Velocidad promedio:		
Automóviles	Camiones Medianos	Camiones Pesados

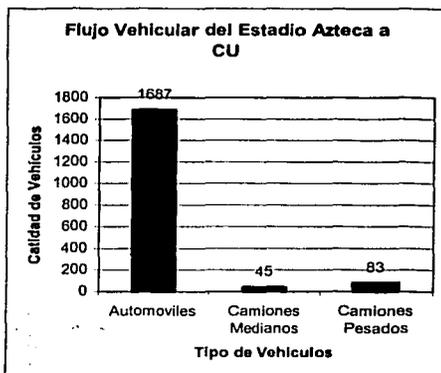
Figura 3.2 Formato para el aforo vehicular



El aforo vehicular se realizó el 18 de julio de 2003 encontrándose los siguientes resultados.



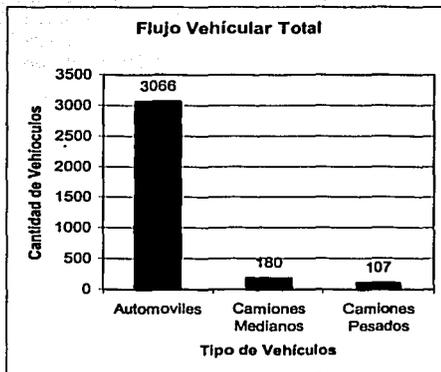
Grafica 3.1 flujo vehicular de Ciudad Universitaria (C.U) al Estadio Azteca



Grafica 3.2 flujo vehicular del Estadio Azteca a Ciudad Universitaria (C.U).

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA**



Grafica 3.3 flujo vehicular Total de la muestra

Una vez obtenido el aforo vehicular se procedió a determinar la velocidad media de los vehículos, para lo cual se realizó tomando la lectura del velocímetro de un vehículo, tomando como referencia dos puntos, para mayor veracidad, dicho método se realizo 5 veces de las cuales resultado que la velocidad media es de 55 km/h.

Ya conocidos estos datos y siendo suficientes para predecir el nivel de ruido, se procedió a introducirlos en el programa realizado como parte de este trabajo, obteniéndose la información presentada en las gráficas generadas por el mismo que se muestra en las figuras 3.3 y 3.4.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

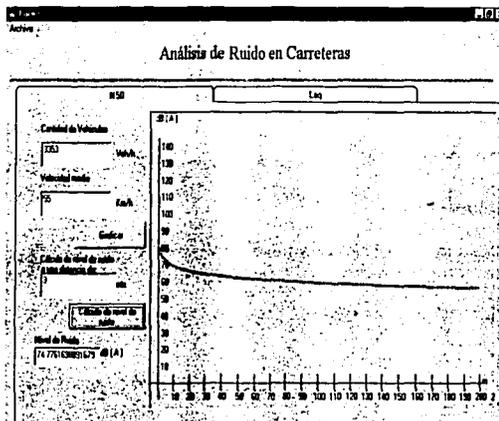


Figura 3.3 Análisis de Ruido con el modelo N50

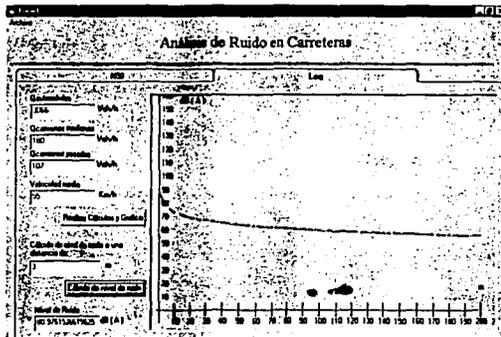


Figura 3.4 Análisis de Ruido con el modelo Lq

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El nivel de ruido obtenido mediante los modelos ya programados se presentan en la tabla 3.1

Modelo	Nivel de Ruido dB(A)
N <sub>50</sub>	74.77
Leq	80.97

Tabla 3.1 Nivel de ruido obtenido mediante los modelos programados.

### 3.2 Conclusiones

De los resultados obtenidos podemos tomar el más desfavorable, que para este caso sería el obtenido con el modelo Leq y que resulta el nivel de ruido de 80.97 dB(A). Si se compara este resultado con el nivel máximo permisible emitido por las Normas Oficiales Mexicanas (NOM-079-E OL-1994), Se puede percatar que se cumple por muy poco con esta norma .

## CAPÍTULO IV

### **Programa de Cómputo para Evaluar el Ruido en Carreteras en la Etapa de Operación**

#### **INTRODUCCIÓN**

La contaminación por ruido en carreras y en las zonas urbanas constituye un problema ambiental que suscita cada vez más interés entre los investigadores, los educadores, las fuerzas políticas, los medios de comunicación y los ciudadanos.

Ello se debe no sólo a que ha sido plenamente reconocida hace ya varias décadas como uno de los factores que más deterioran la calidad de vida, sino también a que por falta o insuficiencia de estrategias políticas para su control se ha venido acrecentando a la par de la diseminación masiva de múltiples productos de la tecnología.

Si bien en toda ciudad existen focos puntuales de contaminación acústica (en general derivados de actividades industriales, comerciales o recreativas específicas), el ruido del tránsito constituye sin duda su componente más significativo. En consecuencia, cualquier intento de reducir el ruido tanto en carreteras como urbano debería enfocar primordialmente el ruido del tránsito y el transporte a través de estrategias de planificación a corto, mediano y largo plazo.

En este contexto, resulta de suma utilidad el disponer de herramientas con las cuales se pueda evaluar la efectividad de una medida de control o planificación antes de llevarla a la práctica, permitiendo descartar aquellas propuestas cuyos resultados no sean significativos comparados con los costos sociales y económicos que implicarían, y, en cambio, adoptar las soluciones más efectivas. Esta evaluación previa se realiza mediante modelos matemáticos que permiten estimar el ruido a partir de algunos datos pertinentes, como la composición e intensidad del tránsito, las características de la edificación, etcétera.

## Ruido en Carreteras

---

La mayoría de los modelos utilizados para predecir el ruido debido al tránsito están orientados al cálculo manual (aún cuando finalmente se modela en programas de computadora), por lo cual son modelos empíricos sencillos con pocos datos, en su mayoría cualitativos, como el perfil de la vía, el tipo de pavimento, el tipo y composición del flujo vehicular, etcétera.

Los Modelos que se exponen aquí y que se programaron son; En primer lugar el modelo propuesto por Johnson y Sonders<sup>1</sup> conocido como N50 y cuya ecuación es:

$$N_{50} = 51.5 + 10 \log \frac{Q}{(d * 3.28084)} + 30 \log \frac{(\bar{v} * 0.62150)}{40} \quad (4.1)$$

Donde:

- N<sub>50</sub>: Nivel promedio de ruido en dB(A)
- Q: Cantidad de vehículos por hora
- d: Distancia del punto de observación a la fuente (m)
- v̄: Velocidad media de los vehículos en (km/h)

El segundo modelo es el propuesto en el reporte NCHRP 174 por el Ministerio de Comunicaciones y Transporte de Ontario. La ecuación es la siguiente:

$$L_{eq} = 42.3 + 10.2 \log(V_c + 6V_l) - 13.9 \log D + 0.13S \quad (4.2)$$
$$V_c = V_A + (10 * V_m) \quad (4.3)$$

Donde:

- L<sub>eq</sub>: Energía equivalente del sonido, en dB(A)
- V<sub>c</sub>: Volumen de automóviles y automóviles medianos, veh/h
- V<sub>A</sub>: Volumen de automóviles, veh/h
- V<sub>m</sub>: Volumen de automóviles medianos, veh/h
- V<sub>t</sub>: Volumen de automóviles pesados, veh/h
- D: Distancia del observador, m
- S: Velocidad promedio del tráfico, km/h

El programa está hecho en un lenguaje sencillo, se trata de Visual Basic versión 6.0. El programa se llama "Análisis de Ruido"

---

<sup>1</sup> Journal of Sound and Vibration (1968)

#### 4.1 Pantalla inicial

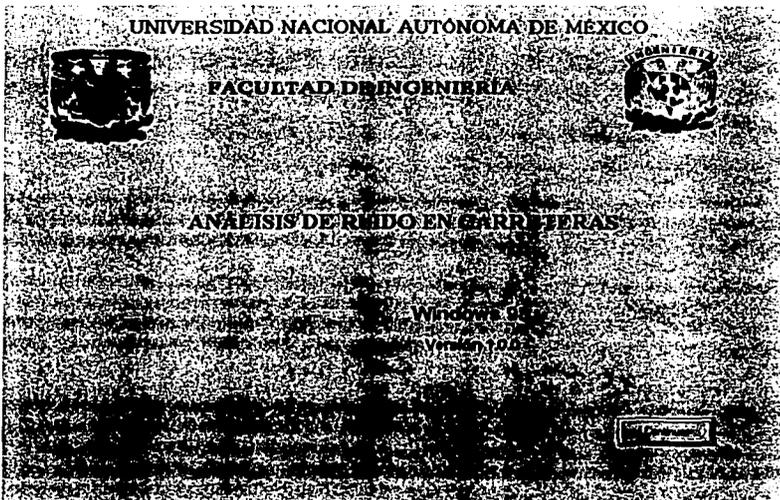


Figura 4.1 Pantalla de presentación

La primer pantalla (figura 4.1) muestra la presentación del programa en donde informa, para que es el programa, la plataforma en la que trabaja que en este caso es Windows 98 y la versión del programa que es 1.0, para continuar solo basta dar un ENTER o con el Mouse dar in clip en continuar.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 4.2 Pantalla del modelo N50

A continuación se describe brevemente cada uno de los elementos que componen la pantalla del programa N50.

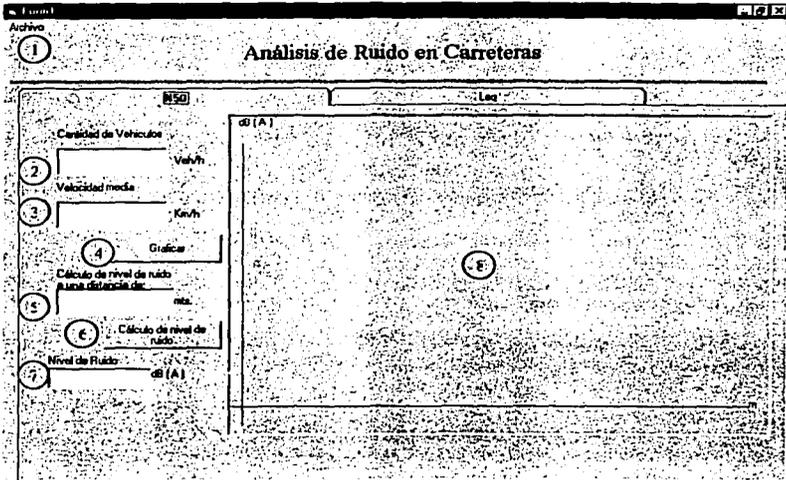


Figura 4.2 Pantalla del modelo N50

En general esta pantalla le permite al usuario

- Guardar datos, Guardar la grafica e imprimir .
- Capturar los datos obtenidos en el campo de trabajo.
- Calcular el nivel de ruido a cierta distancia con respecto al observador.
- Y los más importante visualizar (por medio de una gráfica) el comportamiento del nivel de ruido con respecto a la distancia del observador .

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La pantalla que se muestra en la figura 4.2 consta de los siguientes elementos:

1. La opción archivo proporciona las siguientes funciones:
  - Guardar datos, Guardar gráfica.
  - Imprimir el gráfico.
  - Salir
2. En este campo del programa se tendrá que introducir el numero de vehículos que pasaron durante el muestreo.
3. En este campo tendrá el usuario que introducir la velocidad media de los vehículos muestreados.
4. Este botón permite al usuario visualizar la gráfica, generada con los datos introducidos.
5. En este campo el usuario podrá proponer una distancia a la desea saber el nivel de ruido generado por la carga vehicular.
6. Este botón arrojará el resultado obtenido por el programa con la distancia propuesta por el usuario.
7. En este cuadro se visualizará el resultado generado por el programa con la distancia propuesta por el usuario.
8. En esta región del programa se visualizará la gráfica, obtenida a través de los datos dotados por el usuario.

### 4.3 Pantalla del modelo Leq

A continuación se describe brevemente cada uno de los elementos que componen la pantalla del programa Leq.

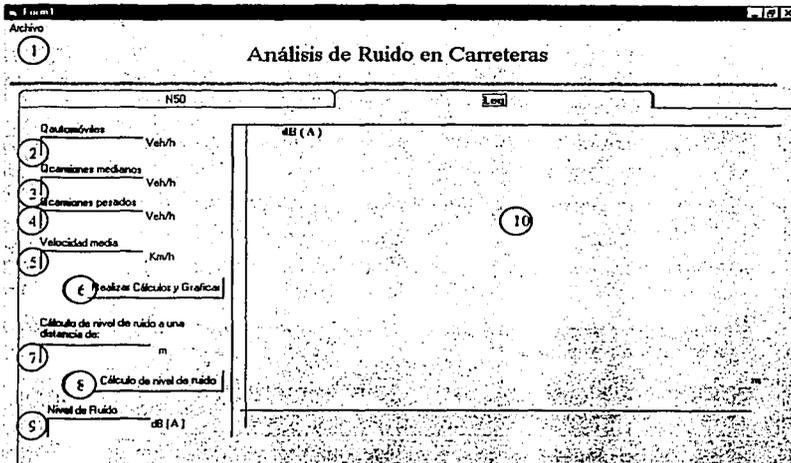


Figura 4.3 Pantalla del modelo Leq

Esta pantalla le permite al usuario

- Guardar datos, Guardar la grafica y imprimir .
- Capturar los datos obtenidos en el campo de trabajo.
- Calcular el nivel de ruido a cierta distancia con respecto al observador.
- Y los más importante visualizar (por medio de una gráfica) el comportamiento del nivel de ruido con respecto a la distancia del observador .

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

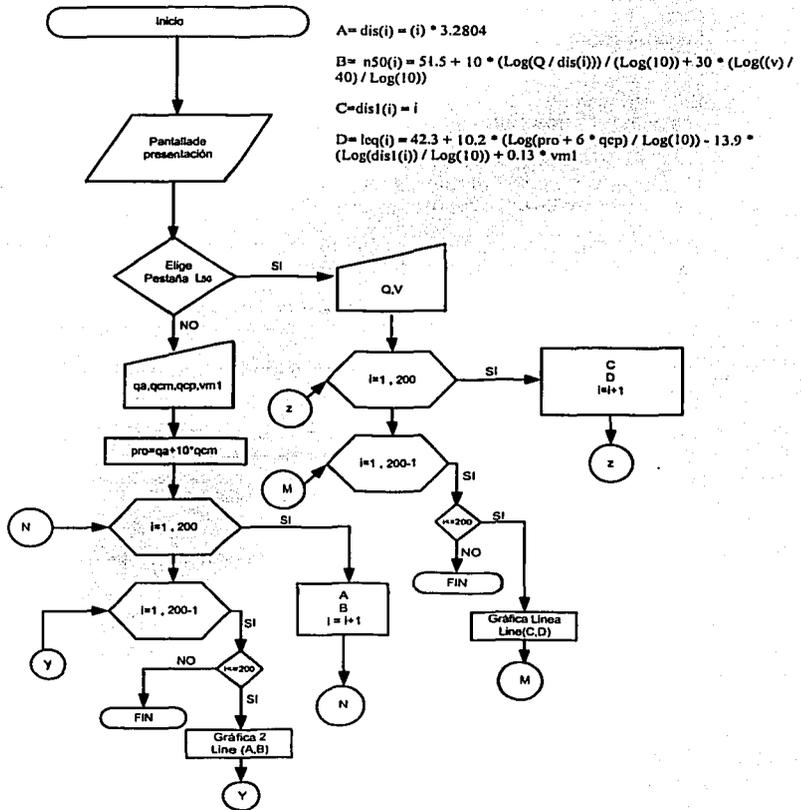
La pantalla de la figura 4.3 muestra los siguientes elementos:

1. En el archivo nos proporciona las siguientes opciones:
  - Guardar datos, Guardar gráfica.
  - Imprimir el gráfico.
  - Salir
2. En este campo del programa se tendrá que introducir el número de vehículos ligeros que pasaron en frente del observador durante el muestreo.
3. En este campo se introducirá el número de vehículos medianos que pasaron en frente del observador durante el muestreo.
4. En este campo se introducirá el número de vehículos pesados que pasaron en frente del observador durante el muestreo.
5. En este campo se tendrá el usuario que introducir la velocidad media de los vehículos muestreados.
6. Este botón permite al usuario visualizar la gráfica, generada con los datos introducidos.
7. En este campo el usuario podrá proponer una distancia a la que desea saber el nivel de ruido generado por la carga vehicular.
8. Este botón arrojará el resultado obtenido por el programa con la distancia propuesta por el usuario.
9. En este cuadro se visualizará el resultado generado por el programa con la distancia propuesta por el usuario.
10. En esta región del programa se visualizará la gráfica, obtenida a través de los datos dotados por el usuario.

#### 4.4 Listado del programa

##### 4.4.1 Desarrollo del programa en Visual Basic

##### 4.4.2 Diagrama de flujo



#### 4.5 Código fuente del programa.

```

Option Explicit
Dim Q, d, v As String
Dim i As Integer
Dim dis(1 To 500) As Variant
Dim valor As String
Dim n50(1 To 500) As Variant
Dim pro, qa, vm1, d1, qcm, qcq, s As String
Private Sub cmdcalcularN50_Click()
EjeHorizontal1
EjeVertical1
Q = Val(txtcarga.Text)
v = (Val(txtv.Text)) * 0.6215
For i = 1 To 200 Step 1

    dis(i) = (i) * 3.2804
    n50(i) = 51.5 + 10 * (Log(Q / dis(i))) / (Log(10)) + 30 * (Log((v) / 40) / Log(10))
    txtgdn50.Text = txtgdn50.Text & Chr$(10) & dis(i) & " " & n50(i) & vbCrLf
Next i

For i = 1 To 200 - 1
    If i <= 200 Then
        picgrafica1.DrawWidth = 2
        picgrafica1.PSet ((dis(i) / (3.2804)), n50(i)), vbRed
        picgrafica1.DrawWidth = 1
        picgrafica1.Line ((dis(i) / (3.2804)), n50(i))-((dis(i + 1) / 3.2804), n50(i + 1)),
        RGB(Int((255 * Rnd) + 1), Int((255 * Rnd) + 1), Int((255 * Rnd) + 1))
    End If
DoEvents
Next i
DoEvents
End Sub
Sub EjeHorizontal1()
Dim j As Integer, lbltiquetaswidth As Single
For j = 0 To 210 Step 10

    picgrafica1.Line (j, 5)-(j, -5)
    lbltiquetaswidth = picgrafica1.TextWidth(Str(j))
    picgrafica1.CurrentX = CSng(j) - lbltiquetaswidth / 2
    picgrafica1.CurrentY = -5
    If j < 0 Or j > 1 Then
        picgrafica1.Print j
    End If
Next j
End Sub

```

## Ruido en Carreteras

---

```
End If
Next
End Sub
```

```
Sub EjeHorizontal2()
Dim j As Integer, lbletiquetaswidth As Single
For j = 0 To 210 Step 10
    picgrafica2.Line (j, 5)-(j, -5)
    lbletiquetaswidth = picgrafica2.TextWidth(Str(j))
    picgrafica2.CurrentX = CSng(j) - lbletiquetaswidth / 2
    picgrafica2.CurrentY = -5
    If j < 0 Or j > 1 Then
        picgrafica2.Print j
    End If
Next
End Sub
```

```
Sub EjeHorizontal3()
Dim j As Integer, lbletiquetaswidth As Single
For j = 0 To 210 Step 10

    picgrafica3.Line (j, 5)-(j, -5)
    lbletiquetaswidth = picgrafica3.TextWidth(Str(j))
    picgrafica3.CurrentX = CSng(j) - lbletiquetaswidth / 2
    picgrafica3.CurrentY = -5
    If j < 0 Or j > 1 Then
        picgrafica3.Print j
    End If
Next
End Sub
```

```
Sub EjeVertical1()
Dim j As Integer, labelheight As Single
For j = 0 To 160 Step 10
    picgrafica1.Line (0.5, j)-(-0.5, j)
    labelheight = picgrafica1.TextHeight(Str(j))
    picgrafica1.CurrentY = j - labelheight / 2
    picgrafica1.CurrentX = 0.6

    If j > 0 Or j < -10 Then
        picgrafica1.Print j
    End If
Next
```

```
End Sub
Sub EjeVertical2()
Dim j As Integer, labelheight As Single
For j = 0 To 160 Step 10
    picgrafica2.Line (0.5, j)-(-0.5, j)
    labelheight = picgrafica2.TextHeight(Str(j))
    picgrafica2.CurrentY = j - labelheight / 2
    picgrafica2.CurrentX = 0.6

    If j > 0 Or j < -10 Then
        picgrafica2.Print j
    End If
Next
End Sub

Sub EjeVertical3()
Dim j As Integer, labelheight As Single
For j = 0 To 160 Step 10
    picgrafica3.Line (0.5, j)-(-0.5, j)
    labelheight = picgrafica3.TextHeight(Str(j))
    picgrafica3.CurrentY = j - labelheight / 2
    picgrafica3.CurrentX = 0.6

    If j > 0 Or j < -10 Then
        picgrafica3.Print j
    End If
Next
End Sub
Private Sub cmdcalculos2_Click()
Dim pro, qa, vm1, d1, qcm, qcp, s As String
Dim dist(1 To 1000)
Dim lq(1 To 1000)
Dim i As Integer
EjeVertical2
EjeHorizontal2
qa = Val(txtqa.Text)
qcm = Val(txtqcm.Text)
qcp = Val(txtqcp.Text)

vm1 = Val(txtvm1.Text)
pro = (qa + 10 * qcm) 'Camiones mas 10 por camiones medianos
For i = 1 To 200
    dist(i) = i
```

## Ruido en Carreteras

---

```
leq(i) = 42.3 + 10.2 * (Log(pro + 6 * qcp) / Log(10)) - 13.9 * (Log(dis1(i)) / Log(10)) +
0.13 * vml
txtgdlq.Text = txtgdlq.Text & Chr$(10) & dis1(i) & "      " & leq(i) & vbCrLf
Next i
For i = 1 To 200 - 1
  If i <= 200 Then
    picgrafica2.DrawWidth = 2
    picgrafica2.PSet (dis1(i), leq(i)), vbRed
    picgrafica1.DrawWidth = 1
    picgrafica2.Line (dis1(i), leq(i))-(dis1(i + 1), leq(i + 1)), RGB(Int((255 * Rnd) + 1),
Int((255 * Rnd) + 1), Int((255 * Rnd) + 1))
  End If
DoEvents
Next i
DoEvents
End Sub

Private Sub cmdggrafica3_Click()
picgrafica3.AutoRedraw = True
picgrafica3.Refresh
SavePicture picgrafica3.Image, "c:\ruido3.bmp"
End Sub

Private Sub cmdgraficar3_Click()
Dim Q, d, v As String
Dim i As Integer
Dim dis(1 To 500) As Variant
Dim valor As String
Dim n50(1 To 500) As Variant
Dim w(1 To 500) As Variant
Dim alfa(1 To 500) As Variant
Dim pmx(1 To 500) As Variant
Dim p2(1 To 500) As Variant
Dim r(1 To 500) As Variant
Dim lp As String

EjeHorizontal3
EjeVertical3
lp = Val(txtnr3.Text)
```

```

Q = Val(txtq3.Text) / 3600
v = (Val(txtvm3.Text))
For i = 1 To 200 Step 1
    dis(i) = (i)
    alfa(i) = (Atn(dis(i) / 500))
    r(i) = (dis(i) / Sin(alfa(i)))
    w(i) = ((2 * 3.1416 * r(i) * r(i)) / (1.2 * 344)) * (2 * 10 ^ -10) ^ 2 * 10 ^ (lp / 10)
    pmax(i) = (w(i) * 1.2 * 344) / (2 * 3.1416 * dis(i) ^ 2)
    p2(i) = (Log((pmax(i) * (dis(i) ^ 2 / (dis(i) ^ 2 + v ^ 2 * (96.875 - 3.09 / Q) ^ 2))) / (0.0002
    * 10 ^ -6) ^ 2) / Log(10)) * 10
Next i
For i = 1 To 200 - 1
    If i <= 200 Then
        picgrafica3.DrawWidth = 2
        picgrafica3.PSet (dis(i), p2(i)), vbRed
        picgrafica3.DrawWidth = 1
        picgrafica3.Line (dis(i), p2(i))-(dis(i + 1), p2(i + 1)), RGB(Int((255 * Rnd) + 1), Int((255
        * Rnd) + 1), Int((255 * Rnd) + 1))
    End If
DoEvents
Next i
DoEvents
End Sub

Private Sub cmdimprimir3_Click()
With Printer
    .Font = "couriel"
    .FontSize = 8
End With

    picgrafica1.AutoRedraw = True
    picgrafica1.Refresh
    Printer.Print picgrafica1.Picture
    Printer.EndDoc
End Sub

Private Sub cmdguardar1_Click()
picgrafica2.AutoRedraw = True
picgrafica2.Refresh
SavePicture picgrafica2.Image, "c:\ruido2.bmp"
End Sub

```

```
Private Sub cmdigrafica3_Click()
With Printer
    .Font = "couriel"
    .FontSize = 8
End With
    picgrafica3.AutoRedraw = True
    picgrafica3.Refresh
    Printer.Print picgrafica3.Picture
    Printer.EndDoc
End Sub
```

```
Private Sub cmdimprimir1_Click()
With Printer
    .Font = "couriel"
    .FontSize = 8
End With
    picgrafica2.AutoRedraw = True
    picgrafica2.Refresh
    Printer.Print picgrafica2.Picture
    Printer.EndDoc
End Sub
```

```
Private Sub Command1_Click()
Dim Q, d, v As String
Dim i As Integer
Dim dis As String
Dim valor As String
Dim n50 As String
d = Val(txtd.Text)
Q = Val(txtcarga.Text)
v = (Val(txtv.Text)) * 0.6215
dis = d * 3.2804
n50 = 51.5 + 10 * (Log(Q / dis)) / (Log(10)) + 30 * (Log((v) / 40) / Log(10))
txtnr1.Text = Val(n50)
End Sub
```

```
Private Sub Command2_Click()
Dim pro, qa, vm1, dl, qcm, qcp, s As String
Dim dis1 As String
Dim leq As String
Dim i As Integer
qa = Val(txtqa.Text)
```

```

qcm = Val(txtqcm.Text)
qcp = Val(txtqcp.Text)
vm1 = Val(txtvm1.Text)
pro = (qa + 10 * qcm) 'Camiones mas 10 por camiones medianos
dis1 = Val(txtdr.Text)
leq = 42.3 + 10.2 * (Log(pro + 6 * qcp) / Log(10)) - 13.9 * (Log(dis1) / Log(10)) + 0.13 *
vm1
txtd1.Text = Val(leq)
End Sub

```

```

Private Sub Command3_Click()
Dim Q, d, v As String
Dim i As Integer
Dim dis As Variant
Dim valor As String
Dim w As Variant
Dim alfa As Variant
Dim pmax As Variant
Dim p2 As Variant
Dim r As Variant
Dim lp As String

```

```

EjeHorizontal3
EjeVertical3
lp = Val(txtnr3.Text)

```

```

Q = Val(txtq3.Text) / 3600
v = (Val(txtvm3.Text))
dis = Val(txtdr3.Text)
alfa = (Atn(dis / 500))
r = (dis / Sin(alfa))
w = ((2 * 3.1416 * r * r) / (1.2 * 344)) * (2 * 10 ^ -10) ^ 2 * 10 ^ (lp / 10)
pmax = (w * 1.2 * 344) / (2 * 3.1416 * dis ^ 2)
p2 = (Log((pmax * (dis ^ 2 / (dis ^ 2 + v ^ 2 * (96.875 - 3.09 / Q) ^ 2))) / (0.0002 * 10 ^ -6)
^ 2) / Log(10)) * 10
txtnr4.Text = Val(p2)
End Sub
Private Sub Command4_Click()
With Printer
.Font = "couriel"
.FontSize = 8
End With

```

## Ruido en Carreteras

---

```
picgrafical.AutoRedraw = True
picgrafical.Refresh
Printer.Print picgrafical.Picture
Printer.EndDoc
End Sub
```

```
Private Sub Command5_Click()
picgrafical.AutoRedraw = True
picgrafical.Refresh
SavePicture picgrafical.Image, "c:\ruido1.bmp"
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
picgrafical.Scale (-5, 160)-(210, -15)
picgrafical.AutoRedraw = True
picgrafical.Line (-10, 0)-(210, 0)
picgrafical.Line (0, 160)-(0, -10)
picgrafica2.AutoRedraw = False
picgrafica2.Scale (-5, 160)-(210, -15)
picgrafica2.AutoRedraw = True
picgrafica2.Line (-2, 0)-(210, 0)
picgrafica2.Line (0, 160)-(0, -10)
picgrafica2.AutoRedraw = False
picgrafica3.AutoRedraw = False
picgrafica3.Scale (-5, 160)-(210, -15)
picgrafica3.AutoRedraw = True
picgrafica3.Line (-2, 0)-(210, 0)
picgrafica3.Line (0, 160)-(0, -10)
picgrafica3.AutoRedraw = False
SSTab1.TabVisible(2) = False
End Sub
```

```
Private Sub Label9_Click()
```

```
End Sub
```

```
Private Sub mnudatos150_Click()
Dim strfilename As String 'Cadena del archivo abrir
Dim strText As String 'Contenido del archivo
Dim strFilter As String 'Cadena de Filtro del common dialog
Dim strBuffer As String 'Variable de búfer de la cadena
Dim FileHandle% 'Variable que contiene el número de archivo
```

```

Dim strText1 As String
Dim strtext2 As String
Dim strtext3 As String
Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer
Dim strregistro As String
Dim strregistro1 As String
Dim l As Integer
Dim res As String
Dim Ruta As String
res = MsgBox("Tienes abierto tu proyecto.", vbYesNo)
If res = vbYes Then

    cdmain.InitDir = "c:\\"
    cdmain.Filter = "Archivos(*.txt)|*.txt"
    cdmain.DefaultExt = ".txt"
    cdmain.FileName = " "
    cdmain.ShowSave

If cdmain.FileName <> "" Then
    strfilename = cdmain.FileName
    Dim fso, MiArchivo
    Set fso = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
    Set MiArchivo = fso.CreateTextFile(cdmain.FileName, True)
    MiArchivo.writeline("Carga " & Q & " " & " Veh/h")
    MiArchivo.writeline("Velocidad en " & v & " " & " Km/h")
    MiArchivo.writeline("Distancia (m) " & " " & " Nivel de Ruido (dB(A)")
    MiArchivo.writeline(txtgdn50.Text)
    MiArchivo.Close

End If
    DoEvents
Elseif res = vbNo Then
    MsgBox "No tiene archivo abierto su proyecto."
    DoEvents

End If
End Sub

Private Sub mnugdIeq_Click()
Dim strfilename As String 'Cadena del archivo abrir
Dim strText As String 'Contenido del archivo
Dim strFilter As String 'Cadena de Filtro del common dialog
Dim strBuffer As String 'Variable de búfer de la cadena

```

## Ruido en Carreteras

---

```
Dim FileHandle% 'Variable que contiene el número de archivo
Dim strText1 As String
Dim strtext2 As String
Dim strtext3 As String
Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer
Dim stregistro As String
Dim stregistro1 As String
Dim l As Integer
Dim res As String
Dim Ruta As String
res = MsgBox("Tienes abierto tu proyecto.", vbYesNo)
If res = vbYes Then
    cdmain.InitDir = "c:\\"
    cdmain.Filter = "Archivos(*.txt)|*.txt"
    cdmain.DefaultExt = ".txt"
    cdmain.FileName = " "
    cdmain.ShowSave
If cdmain.FileName <> "" Then
    strfilename = cdmain.FileName
    Dim fso, MiArchivo
    Set fso = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
    Set MiArchivo = fso.CreateTextFile(cdmain.FileName, True)
    MiArchivo.writeline ("No. de Automóviles " & txtqa.Text & " " & " Veh/h")
    MiArchivo.writeline ("No. de Camiones medianos " & txtqcm.Text & " " & " Veh/h")
    MiArchivo.writeline ("No. de Camiones pesados " & txtqcp.Text & " " & " Veh/h")
    MiArchivo.writeline ("Velocidad en " & txtvm1.Text & " " & " Km/h")
    MiArchivo.writeline ("Distancia (m) " & " " & " Nivel de Ruido (dB(A)")

    MiArchivo.writeline (txtgdlqq.Text)
    MiArchivo.Close

End If
    DoEvents
Elseif res = vbNo Then
    MsgBox "No tiene archivo abierto su proyecto."

DoEvents

End If
End Sub
```

```
Private Sub mnugrafica2_Click()  
picgrafica2.AutoRedraw = True  
picgrafica2.Refresh  
SavePicture picgrafica2.Image, "c:\ruido2.bmp"  
End Sub
```

```
Private Sub mnugrafica150_Click()  
picgrafica1.AutoRedraw = True  
picgrafica1.Refresh  
SavePicture picgrafica1.Image, "c:\ruido1.bmp"  
End Sub
```

```
Private Sub mnugpa_Click()  
picgrafica3.AutoRedraw = True  
picgrafica3.Refresh  
SavePicture picgrafica3.Image, "c:\ruido3.bmp"  
End Sub
```

```
Private Sub mnugrafica1_Click()  
Dim PosicionXInicialEnHoja As Integer  
Dim PosicionYInicialEnHoja As Integer  
picgrafica1.Picture = picgrafica1.Image  
PosicionXInicialEnHoja = 100  
PosicionYInicialEnHoja = 100  
Printer.PaperSize = vbPRPSLetter 'Tamaño carta, 216X 279 mm+  
Printer.Orientation = vbPRORLandscape  
Printer.PrintQuality = vbPRPQHigh  
Printer.PaintPicture picgrafica1.Picture, PosicionXInicialEnHoja, PosicionYInicialEnHoja,  
Printer.ScaleWidth - 200, Printer.ScaleHeight - 200  
Printer.EndDoc  
'MsgBox " Ya se imprimio"
```

```
End Sub  
Private Sub mnugrafica2_Click()  
Dim PosicionXInicialEnHoja As Integer  
Dim PosicionYInicialEnHoja As Integer  
picgrafica2.Picture = picgrafica2.Image  
PosicionXInicialEnHoja = 100  
PosicionYInicialEnHoja = 100  
Printer.PaperSize = vbPRPSLetter 'Tamaño carta, 216X 279 mm+  
Printer.Orientation = vbPRORLandscape  
Printer.PrintQuality = vbPRPQHigh  
Printer.PaintPicture picgrafica2.Picture, PosicionXInicialEnHoja, PosicionYInicialEnHoja,
```

## Ruido en Carreteras

---

```
Printer.ScaleWidth - 200, Printer.ScaleHeight - 200
Printer.EndDoc
'MsgBox " Ya se imprimio"
End Sub
```

```
Private Sub mnugrafica3_Click()
With Printer
.Font = "couriel"
.FontSize = 8
End With
```

```
picgrafica3.AutoRedraw = True
picgrafica3.Refresh
Printer.Print picgrafica3.Picture
Printer.EndDoc
End Sub
```

```
Private Sub mnusalir_Click()
End
End Sub
```

```
Private Sub SSTab1_Db1Click()

End Sub
```

### 4.6 Ejecución del programa mediante un caso

Ejemplo:

Se desea saber el nivel de ruido que se genera cerca de una escuela, que se encuentra a 60 metros de la carretera. La cuadrilla mandada al punto en cuestión, obtuvo los siguientes datos:

Velocidad media de los vehículos =80,5 km/hr.  
Automóviles =2000/hr  
Vehículos medianos =100/hr  
Vehículos pesados =100/hr

Con el criterio de la NCHRP 174 el nivel de ruido que se genera es de 66 dBA.

Con el modelo de  $N_{50}$  resulta:

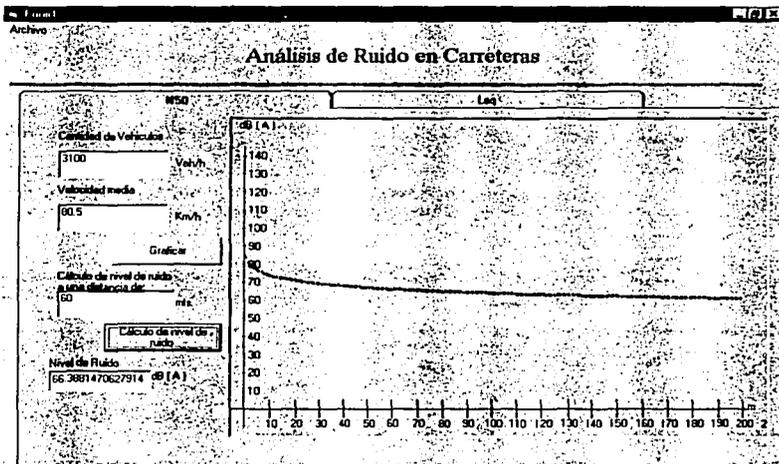


Figura 4.4 Ejecución del modelo N50 con los datos del caso

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

COPIA  
LIBRO DE ALTA

## Ruido en Carreteras

Mientras con el modelo Leq resulta

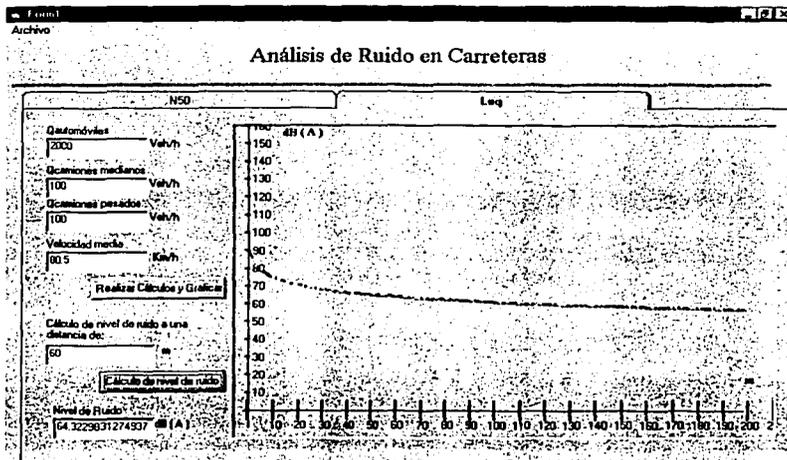


Figura 4.5 Ejecución del modelo Leq con datos del caso

Modelo	Nivel de ruido dB(A)
Criterio NCHRP 174	66
N <sub>50</sub>	66.38
L <sub>ge</sub>	64.32

Tabla 4.1 Comparación de resultados

Con respecto a los resultados expuestos en la tabla 4.1 se considera que los modelos se acercan mucho al resultado que proporciona el criterio de la NCHRP 174.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

---

## CAPÍTULO V

---

### Diseño de Barreras de Contención

#### Introducción

En una carretera el ruido se genera por el conjunto de todos los vehículos que circulan por ella. Un receptor situado en las proximidades de una carretera, al paso de un vehículo aislado tiene la sensación de que el nivel sonoro de fondo se incrementa hasta alcanzar un valor máximo y vuelve a disminuir a medida que se aleja. Cuando el tráfico tiene una cierta intensidad, el ruido percibido pasa a ser continuo, variando a lo largo del tiempo, pero desapareciendo prácticamente los intervalos de silencio. Entonces, la carretera puede considerarse como una fuente lineal de ruido.

El nivel sonoro resultante a una determinada distancia de la carretera depende de múltiples factores que pueden encuadrarse en tres grupos:

- El tráfico de la carretera
- El diseño de la carretera
- El entorno de la carretera

#### El tráfico

La potencia de emisión de una carretera viene determinada por el tráfico que circula por la misma. El conocimiento de las características y condiciones de este tráfico serán por lo tanto los parámetros necesarios para analizar la fuente de ruido.

#### Intensidad del tráfico

La intensidad del tráfico es el número de vehículos que circulan por una sección de la carretera en una unidad de tiempo (vehículos/hora, vehículos/día, etc.). Cuanto más vehículos circulen por un tramo de carretera durante un período determinado, mayor será el nivel sonoro equivalente en el entorno de la carretera para ese período.

## Ruido en Carreteras

---

Desde el punto de vista acústico, una duplicación del número de vehículos, con el resto de condiciones homogéneas, se traduce en un aumento de 3 dB(A) de los niveles sonoros. El tráfico no permanece constante a lo largo del tiempo. Se producen variaciones horarias, diarias, semanales, estacionales, etcétera.

Se suele conocer de las carreteras el valor de la IMD (Intensidad Media Diaria); es el número total de vehículos que ha pasado por una sección de una carretera durante un año dividido por 365. Este dato es en general insuficiente por sí solo en las evaluaciones del ruido ambiental.

### Composición del tráfico (tipo de vehículos)

Es necesario conocer el tipo de vehículos que circulan por la carretera. Al menos deben establecerse categorías separadas para vehículos ligeros y pesados, y si es posible para motocicletas. Lo habitual es tener datos del porcentaje de vehículos pesados con respecto al tráfico total.

### Velocidad media del tráfico

A mayor velocidad mayor potencia de emisión y mayor nivel de ruido en los receptores. Es preciso conocer al menos el dato de la velocidad media del tráfico que es la velocidad que es sobrepasada por el 50% de los vehículos que circulan por el tramo de carretera considerado, aunque es conveniente establecer distintas velocidades para las distintas categorías de vehículos.

### Espectro normalizado del ruido de tráfico

En el tráfico real, el espectro del ruido es una mezcla de todos los espectros característicos de los vehículos individuales. A pesar de que los objetivos se plantean siempre en términos de ruido global, el análisis en frecuencias permite identificar las contribuciones al ruido total de determinadas fuentes sonoras del tráfico o de un vehículo, y es fundamental para estudiar la propagación y las medidas correctoras. Es necesario conocer la distribución en frecuencias del ruido del tráfico para, calcular el aislamiento de una fachada o el diseño de una barrera acústica.

## 5.1 Influencia del trazado y diseño de la carretera

### 5.1.1 Trazado en planta

Para una potencia de emisión dada, el factor que más influye en la atenuación del ruido es la distancia. Cuanto más alejados de la carretera se sitúen los receptores, mayor probabilidad existe de que las molestias debidas al ruido sean mínimas.

Una adecuada planificación de corredores para albergar las carreteras y una adecuada y racional ordenación urbanística son sin duda la mejor actuación contra el ruido.

### 5.1.2 La sección transversal de la carretera.

El entorno inmediato de la carretera influye de manera notable en la posterior propagación del ruido a distancias mayores. La propagación del ruido es distinta en función de la sección transversal de la carretera y el entorno.

En principio una carretera en desmonte es menos favorable a la propagación del ruido que una carretera a nivel o en terraplén. Los desmontes actúan como obstáculos a la propagación del sonido, atenuando en cierta medida el ruido que se propaga más allá de la carretera.

INFLUENCIA DEL PERFIL TRANSVERSAL EN LA PERCEPCIÓN DEL RUIDO

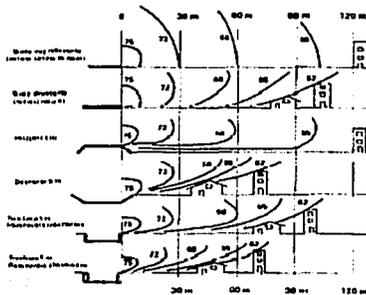


Figura 5.1 Influencia del perfil transversal en la percepción del ruido

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 5.1.3 Perfil longitudinal de la carretera

Si la carretera asciende (en rampa) los vehículos disminuyen la velocidad y fuerzan más el régimen del motor, sobre todo en el caso de los vehículos pesados. Este régimen de circulación es más ruidoso que el correspondiente a un perfil longitudinal horizontal de la carretera.

### 5.1.4 Anchura de la plataforma.

Un factor a tener en cuenta es la anchura de la plataforma, entendiendo por plataforma la zona de la carretera ocupada por la calzada, los arcenes (exteriores e interiores) y las bermas. El número de carriles, la mediana, la existencia y anchura de arcenes exteriores e interiores, delimitan la extensión de la fuente de ruido. Si bien es frecuente considerar una única fuente de ruido, situada en el eje de la carretera, los estudios más precisos deben tener en cuenta la distribución espacial de cada una de las líneas de tráfico presentes en la carretera, sobre todo para analizar los niveles de ruido en un entorno muy próximo de la carretera (menos de 30 m).

### 5.1.6 El tipo de pavimento

El tipo de superficie de rodadura, sobre todo a altas velocidades influye en la generación del ruido de la circulación. Por un lado, existen unos pavimentos con un comportamiento acústico mejor que otros. Por otro lado, cuanto más absorbente acústicamente sea el pavimento de la carretera, menor será la cantidad de energía acústica que se propaga más allá de la plataforma de la carretera.

Actualmente se efectúan numerosas investigaciones para caracterizar acústicamente los diferentes revestimientos de calzada. De un modo general se puede señalar que los revestimientos de alta adherencia provocan un crecimiento de ruido del orden de 3 dB(A) con relación a los revestimientos corrientes, y que la utilización de revestimientos drenantes (porosos) puede suponer la reducción del orden de 3 dB(A) con relación a los firmes más usuales.

## 5.2 El entorno de la carretera.

Conforme el receptor se aleja de la carretera, el nivel de ruido va disminuyendo, siguiendo las leyes de la propagación del sonido. Los factores que influyen en la propagación son:

### **5.2.1 Atenuación con la distancia**

Siendo los niveles sonoros en un punto determinado una función de la distancia del receptor a la carretera, existe una atenuación del ruido por divergencia geométrica, es decir, que conforme el receptor se aleja de la misma, los niveles sonoros disminuyen. En el caso que nos ocupa (la fuente emisora es una fuente lineal), esta atenuación sería de 3 dB(A) por cada duplicación de la distancia en condiciones ideales de propagación. En la realidad, las condiciones de propagación no son homogéneas, por lo que además de la atenuación por divergencia geométrica se consideran otros factores, que hacen que el ruido disminuya más rápidamente con la distancia.

### **5.2.2 Atenuación por absorción del aire**

Los valores de atenuación del ruido por absorción del aire se obtienen experimentalmente para unas ciertas condiciones de temperatura y humedad. En los casos habituales varían de 0,3 dB(A) a 1 dB(A) por cada 100 metros de recorrido en el aire según las diferentes frecuencias.

### **5.2.3 Influencia de la temperatura y del viento en la propagación**

Las variaciones de temperatura y la influencia del viento pueden motivar variaciones del orden de 5 dB(A) o más respecto a las condiciones estables de referencia.

### **5.2.4 Efecto de los obstáculos. Reflexión y efecto pantalla**

Un obstáculo crea tras de sí una zona protegida en la que los niveles sonoros son sensiblemente inferiores a los existentes ante él, debido al fenómeno de la difracción. La atenuación del sonido aportada por el obstáculo depende de las dimensiones del obstáculo, de la posición relativa de la fuente y receptor respecto de éste y del factor de absorción del obstáculo.

En el entorno de una carretera pueden existir numerosos obstáculos que van a influir en la propagación del sonido: desmontes, terraplenes, barreras de seguridad, muros, pantallas acústicas, diques de tierra, etc.

### **5.2.5 Actuaciones Contra el ruido en Carreteras**

Hoy en día, el ruido de tráfico es considerado como una de las causas de deterioro medioambiental asociado a cualquier infraestructura de transporte: autopistas, líneas de ferrocarril, aeropuertos, etc.

Resulta evidente que la primera forma de evitar los efectos nocivos de la contaminación acústica de los transportes es una buena planificación urbanística, de forma que los usos del suelo menos sensibles al ruido se localicen próximos a los corredores y zonas de afección de las infraestructuras.

En los desarrollos nuevos de las ciudades hay que contemplar el factor ruido, tanto para la ubicación de las actividades y las edificaciones como para el diseño de los sistemas generales de transporte.

Teniendo en cuenta que las infraestructuras de transporte constituyen la principal fuente generadora de ruido, se deben establecer reservas de corredores y emplazamientos para infraestructuras con limitaciones de uso en el entorno de las mismas y una distancia mínima de la línea de edificación más próxima.

Evitar graves problemas de ruido en la fase de planificación es posible y sin embargo corregir el ruido en situaciones consolidadas resulta muchas veces tarea prácticamente imposible.

Las acciones encaminadas a disminuir el ruido en origen pueden encuadrarse en tres grandes grupos:

**Modificar el diseño y estructura de la fuente:** vehículos silenciosos, pavimentos de carretera más silenciosos; **Modificar el funcionamiento de la fuente:** restricciones de tráfico, horarios de actividad; **Aislar la fuente:** túneles y subterráneos.

En el caso del transporte terrestre, las actuaciones se centran en primer lugar en un diseño de la infraestructura que no favorezca la propagación del ruido (desmontes y trincheras por ejemplo son en general elementos recomendables). Para reducir el ruido en la interfase neumático-calzada se suele incidir principalmente en la prescripción y empleo de firmes de tipo poroso-drenante.

Recordar aquí, que no se trata únicamente de conseguir equipos y actividades menos ruidosas, sino que también es necesario gestionar adecuadamente el factor tiempo, limitando ciertas actividades y comportamientos durante los periodos más sensibles, fundamentalmente durante el periodo nocturno.

### 5.3 Acciones sobre la propagación del sonido

Las acciones para intentar reducir el ruido en el camino de propagación entre la fuente y el receptor son fundamentalmente:

La instalación de barreras acústicas: pantallas delgadas, diques de tierra, cubiertas parciales y totales, creación de obstáculos.

La modificación de las características del terreno y los obstáculos: cambiar superficies reflectantes por absorbentes.

Las acciones sobre la propagación del sonido son las medidas correctoras más comunes en los proyectos de infraestructuras de transporte terrestre y otras instalaciones.

### CÓMO PROTEGE UNA BARRERA CONTRA EL RUIDO

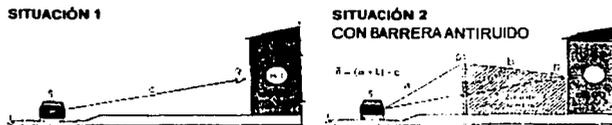


Figura 5.2 Protección de una barrera acústica

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 5.4 Actuaciones en el entorno del receptor

Desde un punto de vista teórico se podría actuar:

Aislando el entorno del receptor: cerramientos, fachadas y tejados, protección auditiva, cabinas insonorizadas, etc.

Modificando la actividad del receptor: en general es difícil obligar al receptor a modificar el tipo u horarios de actividad, para hacerlos compatibles con el ruido.

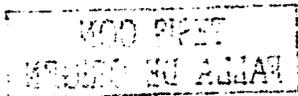
Las actuaciones de aislamiento representan la última medida correctora que se debe considerar, ya que no se aplican para reducir el ruido ambiental en el contexto en que se está aplicando en este tema (ruido en exteriores), sino que pretenden garantizar la calidad de los ambientes sonoros interiores.

Las técnicas de aislamiento permiten obtener con relativa facilidad aislamientos de más de 30 dBA, pero siempre a condición de que no existan zonas o elementos que permitan la entrada de ruido al recinto (obligación de permanecer con las puertas y ventanas cerradas para mantener su eficacia).

### 5.5 Barreras acústicas o anti-ruido

#### 5.5.1 Tipos de barreras acústicas

Entendemos por el término **barrera o pantalla acústica**, aquellos elementos u obstáculos que por su situación y características protegen del ruido proveniente de una determinada fuente sonora a un determinado receptor, dificultando la transmisión del sonido a su través. Por tanto en este término consideraremos incluidos:



### 5.5.2 Diques de tierra

Obstáculos formados por amontonamiento de tierra con grandes espesores en la base. Generalmente se suelen recubrir con tierra vegetal u otros elementos para facilitar la revegetación y crecimiento de plantas.

Presentan la ventaja de que el costo del material de construcción es relativamente bajo, pudiendo aprovecharse los excedentes del movimiento de tierras en infraestructuras de nueva construcción, no obstante, la ocupación de espacio que precisan y el costo de las expropiaciones que aumentarían el montante total de la obra, pueden llegar a desaconsejar su prescripción como medida correctora.

Adecuadamente ejecutados, su integración paisajística puede ser óptima, particularmente en zonas rurales.



Figura 5.3 Dique de Tierra

### 5.5.3 Pantallas acústicas convencionales

Muros o barreras constituidas por elementos de pared relativamente delgada, verticales o inclinados, que presentan distinto grado de absorción acústica y que ofrecen una gran resistencia a la transmisión del sonido a su través, es decir un índice de aislamiento a ruido aéreo suficiente. Las pantallas pueden adoptar numerosas formas y emplear diversos materiales: elementos metálicos, hormigón, madera, vidrio, materiales plásticos, materiales cerámicos, elementos prefabricados a base de los materiales anteriores y materiales absorbentes (lana mineral, fibra de vidrio, etc.) Son las más usualmente empleadas y más interesantes como equipamiento anti-ruido, propiamente dicho, de las infraestructuras viales.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

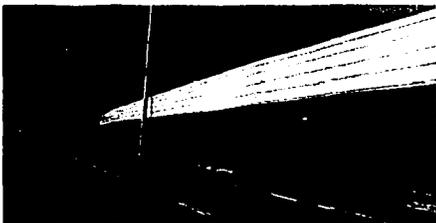


Figura 5.4 Pantalla acústica

### 5.5.4 Construcciones mixtas

Son soluciones que resultan de la combinación de algunos de los tipos anteriores (dique de tierra + pantalla acústica en su coronación, semidique con elementos de contención de tierra vegetalizables, etc.).



Figura 5.5 Barrera Mixta

### 5.5.5 Cubiertas parciales o totales de la calzada o vía de circulación:

Evidentemente, desde el punto de vista de la eficacia anti-ruido, son las más interesantes, pero su elevado presupuesto de ejecución las hace generalmente inabordables. Existen soluciones para cubrir total o parcial mediante elementos ligeros similares a los empleados en apantallamiento acústico (paneles modulares, enrejados de baffles, cubiertas translúcidas o transparentes, etc.), pero igualmente su empleo resulta muy limitado en razón de la elevada inversión que suponen.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

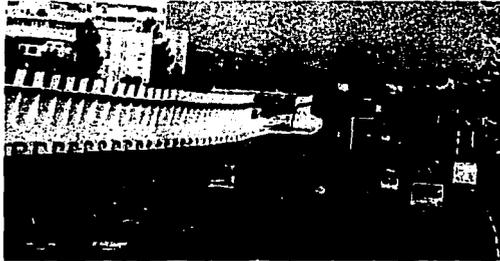


Figura 5.6 Barreras acústicas en vías urbanas

#### **5.5.6 Pantallas vegetales implantadas en una banda de anchura considerable.**

No son muy eficaces. Constituidas por masas de vegetación perennifolia, muy densas (se precisa una anchura del orden de 50 m de bosque de pino denso, para obtener una reducción de 2 a 3 dBA), no siendo eficaces las plantaciones de algunas pocas filas de árboles o arbustos junto a la carretera, ferrocarril, etc.

Así mismo, existen otro tipo de elementos que dificultan la propagación del sonido, desde la fuente al receptor, por absorción acústica de las ondas sonoras que inciden sobre ellos, son los:

#### **5.6 Tratamientos absorbentes**

Empleados para aumentar considerablemente el grado de absorción acústica de muros de contención, paredes de trincheras, accesos y bocas de túneles, etc. Suelen emplearse materiales análogos a los empleados para la realización de las pantallas acústicas absorbentes, sin que deban aportar un mínimo grado de aislamiento a ruido aéreo; con ellos se realiza un revestimiento de las superficies a tratar. Resultan igualmente muy interesantes como dotaciones antirruído de la infraestructura vial.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 5.6.1 Materiales Acústicos

En términos generales, la finalidad de los diversos materiales acústicos es reducir la energía acústica indeseable o perjudicial y optimizar la distribución de los sonidos útiles. Aunque un mismo material puede cumplir varias funciones a la vez, resulta interesante establecer las siguientes categorías:

**a) Materiales absorbentes:** absorben la energía acústica de las ondas que inciden en su superficie transformándola en calor, y reduciendo por consiguiente la energía acumulada en un recinto. Poseen un coeficiente de absorción sonora considerable.

**b) Materiales aislantes:** impiden la propagación del sonido de un recinto a otro. Su pérdida de transmisión es elevada.

**c) Materiales difusores:** contribuyen a lograr un campo sonoro más difuso en un recinto, y por consiguiente permiten controlar resonancias y otros defectos acústicos.

Antes de entrar en profundidad en cada categoría, hagamos una descripción somera de cada una de ellas.

#### a) Materiales absorbentes

Son en general materiales porosos con poros abiertos e interconectados. La absorción de energía acústica se realiza por dos mecanismos: 1) la transformación de la energía acústica en energía mecánica (a través de la elasticidad del material) y su posterior disipación por fricciones internas del propio material, y 2) la fricción viscosa entre el aire y el material en los intersticios comunicados de la estructura, con disipación de calor.

Los materiales absorbentes, por su propia estructura suelen ser livianos, y por consiguiente no son en general buenos aisladores del sonido. A esto se agrega el hecho de que son permeables (es decir, que el aire puede fluir a través de ellos), lo cual contribuye al pasaje de las ondas sonoras a través de los espacios interconectados. Estas características tienen otra importante consecuencia, y es que el desempeño de esos materiales, en particular su coeficiente de absorción, depende considerablemente del tipo de montaje de los mismos sobre las superficies a tratar acústicamente. La razón de ello es que al ser atravesados por una fracción importante de la energía, la misma puede reflejarse sobre la superficie tratada (en general muy reflectora) y retornar al recinto.



Figura 5.7 Estructura con poros abiertos interconectados típica de un material absorbente acústico.

### b) Materiales aislantes

En general son poco o nada porosos y muy masivos, ya que la pérdida de transmisión de un tabique aumenta con el logaritmo de su masa por unidad de superficie. Por tener gran densidad, la impedancia acústica es mucho mayor que la del aire, y por consiguiente la mayor parte de la energía incidente es reflejada. En otras palabras, el coeficiente de absorción sonora es pequeño, resultando entonces malos absorbentes.

De las expresiones de la pérdida de transmisión se concluye que si se duplica el espesor de una pared o tabique la pérdida de transmisión se incrementa en menos de 6 dB. Esa misma cantidad de material aislante puede utilizarse mucho más eficientemente si se subdivide en dos o más tabiques separados entre sí cierta distancia por aire u otra sustancia elástica. Esta mejora puede explicarse del siguiente modo. Con referencia a la figura 5.8, si en la superficie 1 incide una onda con presión  $p_1$ , la pared se mueve con una velocidad  $v_1$ , y por la relativa rigidez de los tabiques, la velocidad de la superficie 2 será  $v_2 = v_1$ . Si la capa de aire es suficientemente gruesa, la vibración de la superficie 2 producirá una presión. Esta presión se propaga hacia la superficie 3, provocando un movimiento del segundo tabique con velocidad  $v_3 \ll v_2$  debido a que la impedancia acústica de dicho tabique es mucho más alta que la del aire. Si la pared fuera maciza, es decir, si las superficies 2 y 3 estuvieran en contacto, sería  $v_3 = v_2$  (en este caso  $v_1$  y por lo tanto  $v_2$  sería la mitad de su valor para paredes divididas pues la masa de la pared maciza es el doble).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En conclusión, la pérdida de transmisión resulta más elevada. Este efecto es más notorio cuanto mayor sea la separación en relación a la longitud de onda que se quiere bloquear. Cuando, por el contrario, la separación es pequeña, la capa de aire se torna demasiado rígida y entonces  $v_3$  se aproxima a  $v_2$ .

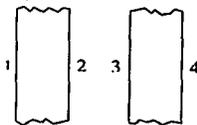


Figura 5.8. Tabique doble utilizado para mejorar la aislación acústica de una pared divisoria.

### c) Materiales difusores

Son materiales acústicos cuyo propósito es lograr una mayor difusión del campo sonoro, lo cual tiende a corregir la existencia de modos normales y resonancias, así como puntos focales (donde se concentran ondas sonoras) y de vacíos acústicos (donde se anula el campo sonoro). Su utilización no es muy frecuente en nuestro medio todavía, recurriéndose a la metodología clásica consistente en distribuir materiales absorbentes en forma algo irregular, o en diseñar geoméricamente los recintos evitando las simetrías, incluyendo cuñas, protuberancias, paredes inclinadas, etc.

Los materiales difusores, en cambio, poseen estructuras superficiales complejas, a menudo dictadas por consideraciones teóricas que llevan a utilizar canaletas de dimensiones y separación bien definidas según el rango de frecuencias para el cual se quiere mejorar la difusión, o bien cavidades de diversas profundidades, o protuberancias prismáticas de varias alturas. En todos los casos se busca lograr una interferencia entre ondas reflejadas a diferentes distancias. Esta interferencia genera ondas secundarias divergentes. En otras palabras, cuando una onda plana incide sobre este tipo de materiales, la misma se refleja en todas direcciones.



5.7 Materiales Acústicos

Material	Coeficiente de absorción $\alpha$ a la frecuencia					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Hormigón sin pintar	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.04
Hormigón pintado	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Ladrillo visto sin pintar	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
Ladrillo visto pintado	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Revoque de cal y arena	0.04	0.05	0.06	0.08	0.04	0.06
Placa de yeso (Durllock) 12 mm a 10 cm	0.29	0.10	0.05	0.04	0.07	0.09
Yeso sobre metal desplegado	0.04	0.04	0.04	0.06	0.06	0.03
Mármol o azulejo	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Madera en paneles (a 5 cm de la pared)	0.30	0.25	0.20	0.17	0.15	0.10
Madera aglomerada en panel	0.47	0.52	0.50	0.55	0.58	0.63
Parquet	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07
Parquet sobre asfalto	0.05	0.03	0.06	0.09	0.10	0.22
Parquet sobre listones	0.20	0.15	0.12	0.10	0.10	0.07
Alfombra de goma 0,5 cm	0.04	0.04	0.08	0.12	0.03	0.10
Alfombra de lana 1,2 kg/m <sup>2</sup>	0.10	0.16	0.11	0.30	0.50	0.47
Alfombra de lana 2,3 kg/m <sup>2</sup>	0.17	0.18	0.21	0.50	0.63	0.83
Cortina 338 g/m <sup>2</sup>	0.03	0.04	0.11	0.17	0.24	0.35
Cortina 475 g/m <sup>2</sup> fruncida al 50%	0.07	0.31	0.49	0.75	0.70	0.60
Espuma de poliuretano (Fonac) 35 mm	0.11	0.14	0.36	0.82	0.90	0.97
Espuma de poliuretano (Fonac) 50 mm	0.15	0.25	0.50	0.94	0.92	0.99
Espuma de poliuretano (Fonac) 75 mm	0.17	0.44	0.99	1.03	1.00	1.03
Espuma de poliuretano (Sonex) 35 mm	0.06	0.20	0.45	0.71	0.95	0.89
Espuma de poliuretano (Sonex) 50 mm	0.07	0.32	0.72	0.88	0.97	1.01
Espuma de poliuretano (Sonex) 75 mm	0.13	0.53	0.90	1.07	1.07	1.00
Lana de vidrio (fieltro 14 kg/m <sup>3</sup> ) 25 mm	0.15	0.25	0.40	0.50	0.65	0.70
Lana de vidrio (fieltro 14 kg/m <sup>3</sup> ) 50 mm	0.25	0.45	0.70	0.80	0.85	0.85
Lana de vidrio (panel 35 kg/m <sup>3</sup> ) 25 mm	0.20	0.40	0.80	0.90	1.00	1.00
Lana de vidrio (panel 35 kg/m <sup>3</sup> ) 50 mm	0.30	0.75	1.00	1.00	1.00	1.00
Ventana abierta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Vidrio	0.03	0.02	0.02	0.01	0.07	0.04
Panel cieborraso Spanacoustic (Manville) 19 mm	-	0.80	0.71	0.86	0.68	-
Panel cieborraso Acustidom (Manville) 4 mm	-	0.72	0.61	0.68	0.79	-
Panel cieborraso Prismatic (Manville) 4 mm	-	0.70	0.61	0.70	0.78	-
Panel cieborraso Profil (Manville) 4 mm	-	0.72	0.62	0.69	0.78	-
Panel cieborraso fisurado Auratone (USG) <sup>5/8"</sup>	0.34	0.36	0.71	0.85	0.68	0.64
Panel cieborraso fisurado Cortega (AWI) <sup>1/4"</sup>	0.31	0.32	0.51	0.72	0.74	0.77
Asiento de madera (0,8 m <sup>2</sup> /asiento)	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08
Asiento tapizado grueso (0,8 m <sup>2</sup> /asiento)	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44
	0.34	0.39	0.44	0.54	0.56	0.56
Personas en asiento de madera (0,8 m <sup>2</sup> /persona)						
	0.53	0.51	0.51	0.56	0.56	0.59
Personas en asiento tapizado (0,8 m <sup>2</sup> /persona)						
	0.25	0.44	0.59	0.56	0.62	0.50
Personas de pie (0,8 m <sup>2</sup> /persona)						

Tabla 5.1 Coeficientes de absorción de diversos materiales en función de la frecuencia (según varias referencias). Los valores no suministrados no estaban disponibles.

### 5.8 Diseño de barreras acústicas

Existen varias formas para atenuar el ruido una de ellas y la más usada es la pantalla o barrera acústica, existen también el encapsulamiento de la fuente y el encapsulamiento del receptor. La pantalla es bastante efectiva en el caso de ruido en exteriores. En locales, quieren un refuerzo con material absorbente así como el tratamiento de algunas superficies reflectoras, como el cielorraso en la zona inmediatamente encima de la barrera, como se aprecia en la figura 5.9.

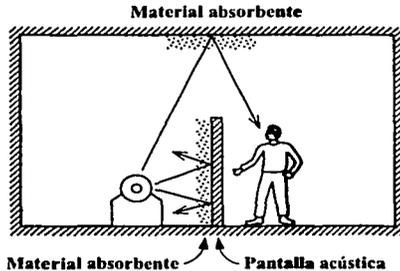


Figura 5.9. Uso de una pantalla acústica para reducir la propagación del ruido por campo directo entre la fuente y el receptor.

En exteriores la efectividad de una pantalla o barrera acústica (figura 5.10) puede predecirse mediante la siguiente ecuación, derivada de la teoría de difracción de ondas, que proporciona la atenuación debida a la barrera:

$$Aten = \begin{cases} 20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{Th \sqrt{2\pi N}} + 5 \text{ dB} & \text{si } N \geq -0,2 \\ 0 & \text{si } N < -0,2 \end{cases} \quad (5.1)$$

donde **N** es el número de Fresnel, <sup>1</sup> dado por

<sup>1</sup> Cuando  $N < 0$ , puede reemplazarse por  $|N|$  y la tangente hiperbólica por la tangente trigonométrica (considerando el argumento en radianes).

$$N = \begin{cases} \frac{2}{\lambda}(A + B - C) & \text{en la zona de sombra} \\ -\frac{2}{\lambda}(A + B - C) & \text{en la zona visible} \end{cases} \quad (5.2)$$

siendo **A**, **B** y **C** las distancias indicadas en la figura 5.10, y  $\lambda$  la longitud de onda del sonido. La atenuación anterior se agrega a la atenuación en el aire y a la atenuación por divergencia esférica o cilíndrica de la fuente.

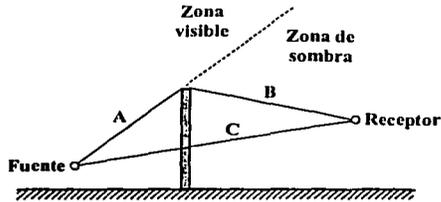


Figura 5.10. Distancias utilizadas en la ecuación 5.2 para obtener el número de Fresnel.

En el proyecto de una barrera acústica deben tenerse en cuenta algunos detalles sin los cuales la efectividad puede reducirse considerablemente. En primer lugar, la pérdida de transmisión del material o la estructura a utilizar debe ser mayor que la atenuación adicional que se pretende de la barrera. Una diferencia de 10 dB podría considerarse aceptable. En segundo lugar, debe tenerse en cuenta que si la barrera no es suficientemente ancha, los cantos verticales se comportarán a su vez según a las ecuaciones 5.1 y 5.2, por lo cual el campo sonoro resultante se incrementará por las contribuciones laterales. El peor caso se da cuando la barrera tiene forma cuadrada, ya que el sonido de ambos laterales y el que pasa por sobre la barrera llegan *en fase*, sumándose directamente sus amplitudes. El campo resultante es, entonces, casi 10 dB mayor que el que predice la ecuación 5.1. Por este motivo se recomienda que la barrera se extienda hacia cada lado de la fuente *al menos el doble de su altura*.

De la inspección de la figura 5.10 se concluye que cuanto más cerca se encuentre la barrera de la fuente de ruido, mayor será  $A + B - C$  y por consiguiente  $N$ . Sin embargo, no siempre es posible un acercamiento pronunciado.

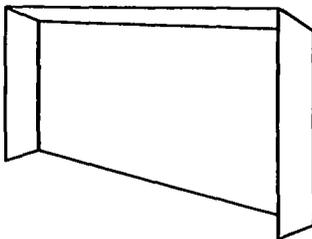


Figura 5.11. Ejemplo de pantalla acústica con alero y solapas laterales

### 5.9 Pasos a seguir para el diseño de una barrera acústica

- Lo primero que tenemos que calcular será el número de Fresnel, dado por

$$N = \begin{cases} \frac{2}{\lambda}(A + B - C) & \text{en la zona de sombra} \\ -\frac{2}{\lambda}(A + B - C) & \text{en la zona visible} \end{cases} \quad (5.2)$$

Donde

$$A = \sqrt{((h - h_f)^2 + d_p^2)} \dots (5.3)$$

$$B = \sqrt{((h - h_r)^2 + (d_p - d_r)^2)} \dots (5.4)$$

$$C = \sqrt{((h - h_f)^2 + d_r^2)} \dots (5.5)$$

$$\lambda = \frac{345}{f} \dots (5.6)$$

Donde:

h: Altura de la barrera

$h_f$ : Altura de la fuente

$h_r$ : Altura del receptor

$d_{fd}$ : Distancia fuente-barrera

$d_{fr}$ : Distancia fuente-receptor

f: Frecuencia

- Se prosigue a introducir el número de Fresnel a la siguiente formula

$$x = \sqrt{2\pi N} \dots (5.7)$$

$$I/Ix = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \dots (5.8)$$

- Finalmente se puede calcular la atenuación

$$At = \frac{20 \log\left(\frac{x}{I/Ix}\right)}{\log(10)+5} \dots (5.9)$$

**Nota:** Cabe mencionar que se tiene que interactuar proporcionando la alturas hasta que la At sea mayor o igual que la atenuación que se desea lograr.

Mediante las barreras acústicas, la máxima atenuación real que se consigue en la práctica es del orden de 24 dB. Hay que tener en cuenta que resultan mas atenuadas las frecuencias altas que las bajas.

La vegetación (árboles y arbustos) tiene poca incidencia como barrera acústica; su atenuación se puede considerar aproximadamente por la fórmula:

$$q = 2.34 * 10.3 * \frac{F}{2} * d \quad (5.10)$$

Siendo q la atenuación acústica en dB. F la frecuencia en Hz y d el espesor de la masa boscosa en m. Con todo ello y dependiendo naturalmente de las frecuencias, se obtienen valores de atenuación acustica entre 10 y 12 dB, para espesores boscosos de 100 m.

### 5.9.1 Ubicación de barreras acústicas

En la figura 5.12 se grafican diversas posiciones de las barreras acústicas. En la figura 5.13 se justifica la posición recomendada, por cuanto la atenuación acústica es mayor, cuanto mayor es el ángulo graficado ( $A > B$ ).

En la figura 5.13 se justifica la posición recomendada, por cuanto la atenuación acústica es mayor, cuanto mayor es el ángulo graficado ( $A > B$ ).

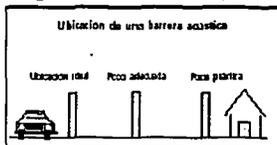


Figura 5.12 Ubicación de una barrera acústica

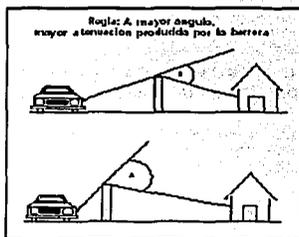


Figura 5.13 Recomendación de la inclinación de la barrera acústica

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Conclusiones

El ruido del tránsito constituye el componente más significativo de la contaminación acústica urbana, razón por la cual es necesario su control a través de la planeación. La posibilidad de simular este ruido constituye una ayuda invaluable para ello, al permitir examinar los efectos de diversas medidas de control antes de hacerlas efectivas.

Existen varios modelos de simulación actualmente en uso, pero dado que ponen énfasis en el cálculo manual a partir de escasos datos, sus resultados son, cuando menos, imprecisos. Por lo cual me propuse programar un software, el cual permitiera conocer el nivel de ruido provocado por un cierto número de vehículos que pasan frente al observador, las ventajas de este programa es que se puede conocer el nivel de ruido de manera precisa en poco tiempo, con sólo llevar a cabo un aforo vehicular.

Me encontré ante una legislación que además de permisiva es inaplicable sin ocasionar importantes perjuicios sociales. Según pude observar más de un 50% de los vehículos de transporte público de pasajeros se encuentran en infracción en lo que a ruido se refiere. Aplicar la legislación equivaldría a una virtual suspensión por tiempo indeterminado de más de la mitad del servicio de transporte público.

Esto implica que es necesario introducir mejoras en las actuales disposiciones tendientes a corregir el problema en el menor tiempo posible.

Finalmente me permito sugerir medidas para encarar la solución a este problema:

- Establecer planes progresivos o escalonados de reducción del ruido urbano a aplicarse a lo largo de varios años, que sean realistas y por lo tanto aplicables.
- Estudiar posibles reducciones de tasas para estimular inversiones tendientes a reducir la contaminación sonora.
- También deben exigirse planes de mantenimiento que incluyan las posibles emisiones de ruido. Por ejemplo, deberían corregirse periódicamente los frenos y silenciadores en mal estado, los desgastes en las transmisiones de los vehículos, etc.

## Ruido en Carreteras

---

- Planificar una campaña educativa en todos los niveles, incluyendo los medios de comunicación tales como la radio, la televisión, el periodismo, etc. acerca del problema del ruido, sus causas, sus efectos, y sus soluciones.
- Automatizar en lo posible los monitoreos de nivel sonoro en los locales en los que los ruidos sean excesivos, de manera de llevar un registro permanente sin intervención humana que permita establecer posibles violaciones a la normatividad.

## Bibliografía

Mackenzie L. Davis, Davis A. Cornwell, **Introduction to Environmental Engineering**. Editorial McGraw-Hill International, segunda edición 1999.

Jornal of sound and vibration (1968) vol 7.

Guizar Altamirano, Jose Luis, **Desarrollo de un Modelo Empírico para Predecir Niveles de Ruido Ambiental en Ejes Viales del Distrito Federal**. Tesis de Maestría, UNAM.

Federico Miyara, **Control de Ruido (1999)**, Universidad del Mar del Plata, Argentina.

Gervacci González, Héctor Manuel, **Ruido Producido por el Transito Urbano sus efectos en el ser humano y métodos de control**, Tesis de Licenciatura, UNAM.

Kurt Gieck, **Manual de Formulas Técnicas** , 18ª Edición

**Visual Basic,Manual del Programador**. Microsoft Corporation, Usa 1997.

<http://www.gemi.org.mx/informacion/regulaciones.htm>

[http://www.semarnat.gob.mx/marco\\_juridico/ruido.shtml](http://www.semarnat.gob.mx/marco_juridico/ruido.shtml)

<http://www.eie.fceia.unr/acustica/biblio.htm>