



**Medición y procesamiento avanzado  
de indicadores de ruido, en zonas críticas  
localizadas dentro del Distrito Federal**

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL GRADO  
MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERIA  
DE COMPUTO CON OPCION EN  
SISTEMAS DIGITALES  
P R E S E N T A  
ING. MARÍA GUADALUPE DOMÍNGUEZ URBÁN  
D I R E C T O R D E T E S I S :  
DR. LUIS PASTOR SÁNCHEZ FERNÁNDEZ



---

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....VIII

ÍNDICE DE TABLAS.....XI

GLOSARIO.....XII

**CAPITULO I. INTRODUCCIÓN ..... 1**

1.1 ANTECEDENTES ..... 1

1.2 FORMULACIÓN DE PROBLEMAS ..... 2

1.3 JUSTIFICACIÓN DE LOS PROBLEMAS PLANTEADOS ..... 2

1.4 HIPÓTESIS ..... 3

1.5 OBJETIVOS ..... 3

    1.5.1 *Objetivo general* ..... 3

    1.5.2 *Objetivos específicos* ..... 3

1.6 ALCANCE ..... 4

1.7 CONTRIBUCIONES ..... 4

1.8 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO UTILIZADO ..... 4

1.9 ESTRUCTURA DE LA TESIS ..... 5

**CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE ..... 7**

2.1 INTRODUCCIÓN ..... 7

2.2 RUIDO ..... 7

2.3 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN ..... 15

    2.3.1 *Sonómetro* ..... 15

    2.3.2 *Analizador de frecuencias* ..... 17

    2.3.3 *Dosímetro* ..... 17

    2.3.4 *Calibrador acústico* ..... 18

    2.3.5 *Micrófono* ..... 18




---

2.3.6 Preamplificador.....	19
2.3.7 Tarjeta de adquisición de datos .....	20
2.4 FILTROS DE PONDERACIÓN.....	21
2.5 MAPAS DE RUIDO .....	23
2.5.1 Cartografía.....	24
2.5.2 Edificios.....	25
2.5.3 Fuentes de ruido.....	27
2.6 AFECTACIONES AL SER HUMANO .....	28
2.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO .....	29

<b>CAPÍTULO III. PROCESAMIENTO DE INDICADORES ESTADÍSTICOS Y ESPECTRALES DE RUIDOS URBANOS EN ZONAS CRÍTICAS UBICADAS EN EL DISTRITO FEDERAL .....</b>	<b>31</b>
3.1 INTRODUCCIÓN .....	31
3.2 ESPECTRO AUDITIVO.....	32
3.3 PÉRDIDA AUDITIVA .....	33
3.4 DOLORES Y MOLESTIAS EN EL OÍDO .....	34
3.5 BANDAS DE ENMASCARAMIENTO.....	34
3.6 DIAGRAMA DEL MODELO COMPUTACIONAL PROPUESTO .....	35
3.7 ADQUISICIÓN Y PREPROCESAMIENTO DE LA SEÑAL.....	47
3.7.1 Adquisición y conversión a pascales.....	47
3.7.2 Filtros de ponderación .....	48
3.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	49
3.8.1 Percentiles (110, 150, 190).....	49
3.8.2 $Leq$ .....	50
3.8.3 $Sel$ .....	50
3.9 ANÁLISIS ESPECTRAL.....	51
3.9.1 FFT.....	51
3.9.2 Análisis de 1/n octavas .....	52
3.10 POSIBLES EFECTOS EN LA SALUD .....	53



---

3.11 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO .....	55
<b>CAPÍTULO 4. PROCESAMIENTO NEURONAL DE RUIDOS URBANOS PARA ZONAS CRÍTICAS UBICADAS EN EL DISTRITO FEDERAL .....</b>	<b>56</b>
4.1 INTRODUCCIÓN .....	56
4.2 UBICACIÓN DE NODOS .....	57
4.3 PATRONES NORMALES E IRREGULARES .....	58
4.4 ANÁLISIS POR DÍA .....	61
4.5 PATRONES GENERADOS.....	62
4.6 MODELO NEURONAL.....	64
4.7 ENTRENAMIENTO DE LA RED NEURONAL .....	65
4.8 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO .....	68
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>69</b>
<b>TRABAJO FUTURO .....</b>	<b>71</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXO A. DIAGRAMAS DE BLOQUES DE TAREAS DEL PROGRAMA .....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXO B. PANEL FRONTAL DEL INSTRUMENTO VIRTUAL PARA LA CALIBRACIÓN Y RESULTADOS DE UNA CALIBRACIÓN .....</b>	<b>79</b>
<b>ANEXO C. PANEL FRONTAL DEL INSTRUMENTO VIRTUAL PARA ANÁLISIS AVANZADO DE LA INFORMACIÓN .....</b>	<b>81</b>



---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 Presiones sonoras y niveles de presión sonora generados por distintas fuentes acústicas (Recuero 2002).	9
Fig. 2.2 Efecto Doppler. Izquierda: Fuente estática, la longitud de onda medida por el emisor y por el observador es la misma. Derecha: Fuente en movimiento.	14
Fig. 2.3 Sonómetro (Cortesía de Brüel&Kjær).	17
Fig. 2.4 Calibrador Acústico (Cortesía de Brüel&Kjær).	18
Fig. 2.5 Micrófono (Cortesía de Scantek Inc).	19
Fig. 2.6 Preamplificador MA201 (Cortesía de Scantek).	20
Fig. 2.7 Tarjeta de Adquisición de Datos NI-USB9233 (Cortesía de National Instruments).	21
Fig. 2.8 Curvas de ponderación espectral.	22
Fig. 2.9 Tránsito rodado por carretera.	27
Fig. 3.1 Umbrales auditivos inferiores: MAF, MAP y biaural en campo libre para alta frecuencia (derecha). Umbrales superiores de molestia y sensación de punción y cosquilleo (Gelfand, 1998).	32
Fig. 3.2 Desplazamiento de umbrales auditivos 16 horas de exposición a banda de octava centrada en 425 Hz (izquierda), derecha: 24 horas de exposición a ruido centrado en 4000 Hz.	33
Fig. 3.3 Distribución espectral de bandas de octavas que produce el máximo desplazamiento temporal de los umbrales auditivos.	35
Fig. 3.4 Arquitectura de los nodos.	36
Fig. 3.5 a) Carta de calibración del micrófono MP231, b) carta de calibración del	38



---

micrófono y preamplificador MPA231, c) Curvas de respuesta en frecuencia del conjunto OM231.

Fig. 3.6. Diagrama de flujo del sistema computacional propuesto para un nodo (igual para todos los nodos). 39

Fig. 3.7 Modelo computacional. 39

Fig. 3.8 Diagrama a bloques del modelo computacional propuesto. 41

Fig. 3.9 Módulo para procesamiento estadístico y espectral. 41

Fig. 3.10 Nivel sonoro continuo equivalente cada hora. 43

Fig. 3.11 Nivel sonoro continuo equivalente cada hora nodo 9. 44

Fig. 3.12 Gráfica 3D nodo 2. 45

Fig. 3.13 Conexión de nodos. 46

Fig. 3.14 Módulo para procesamiento avanzado de indicadores de ruido. 46

Fig. 3.15 Señal original. 47

Fig. 3.16 Señal en micropascales. Izquierda: señal con ponderación A, derecha: señal con ponderación C. 48

Fig. 3.17 Comparativo de señales ponderadas; izquierda: señal original; centro: señal con ponderación A; derecha: señal con ponderación C. 48

Fig. 3.18 Señal y FFT. 51

Fig. 4.1 Patrones regulares de ruido. 59

Fig. 4.2 Patrones regulares cada hora nodo 0. 60

Fig. 4.3 Grupos de patrones nodo 2. 60

Fig. 4.4 Grupos de patrones nodo 6. 61

Fig. 4.5 Análisis del lunes nodo 0. 61



---

Fig. 4.6 Análisis del martes nodo 0.	62
Fig. 4.7 Patrones de ruido generados.	63
Fig. 4.8 Modelo de red neuronal.	64
Fig. 4.9 Desempeño de red neuronal nodo 0.	65
Fig. 4.10 Entrenamiento de neuronal nodo 0.	66
Fig. 4.11 Gráfica de porcentajes de reconocimiento.	67
Fig. 4.12 Clasificación de patrones para entrenamiento.	68
Fig. A.1 Conversión de una señal de presión acústica en Volts a micropascales.	77
Fig. A.2 Resumen del cálculo de nivel sonoro continuo equivalente ( $L_{eq}$ ).	77
Fig. A.3 Diagrama de bloques donde se incluye la función para el cálculo del nivel sonoro continuo equivalente.	78
Fig. B.1 Panel frontal del instrumento virtual para la calibración del canal de medición.	79



---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Características del conjunto OM231.	36
Tabla 3.2 Características de tarjeta de adquisición de datos NI 9233.	37
Tabla 3.3 Características de la computadora industrial ARK 3384.	37
Tabla 3.4 Equivalencia de colores a nivel sonoro.	43
Tabla 3.5 Afecciones ocasionadas por el ruido.	53
Tabla 4.1 Ubicación de nodos DF.	57
Tabla 4.2 Porcentaje de reconocimiento de la red neuronal.	66
Tabla B.1 Calibración del canal de medición para cada nodo.	79



---

## RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se presenta un modelo computacional desarrollado en ambiente de programación gráfico LabView versión 8.2 y MatLab 2008, consta de dos módulos el primero de los cuales realiza el procesamiento estadístico y espectral de los datos adquiridos, y el segundo un procesamiento neuronal. Tiene por objeto de estudio el ruido ambiental producido por diversas fuentes y puede ser destinado a la adquisición, almacenamiento, procesamiento y análisis avanzado de señales de ruido ambiental.

Se realiza la adquisición de señales de un sistema de monitoreo permanente que muestrea la señal de ruido a 25 KHz proporcionando la información requerida para el análisis espectral de los patrones de ruido ambiental originada a partir de uso de filtros de ponderación A o C. Para hacer más accesible la tarea de medición, comparación y análisis de datos se hace uso de una división del espectro audible en bandas de octava.

Los niveles sonoros continuos equivalentes registrados cada hora en los nodos permiten la identificación de los efectos nocivos a la salud que el ruido urbano puede ocasionar. Los niveles de ruido, dependiendo del nodo analizado, son caracterizados como patrones regulares o irregulares mediante el módulo de procesamiento neuronal, teniendo un nivel de identificación de alrededor del 75%.

Dadas las normas actuales de medición de ruido urbano, una problemática ambiental mundial de gran importancia, del Distrito Federal de la ciudad de México los dispositivos de medición utilizados en los nodos (micrófono, preamplificador, tarjeta de adquisición de datos y computadora industrial) se han calibrado a clase 1 para los diez puntos de medición seleccionados con base en las actividades sociales que acontecen en las distintas zonas de la delegación Cuauhtémoc.



---

Se realizó una recopilación bibliográfica de los posibles efectos del ruido en el ser humano y sus espectros causantes, ésta recopilación condujo a la identificación de patrones de ruido nocivos a la salud y al confort que permiten a las autoridades actuar en mejoras a las normas oficiales y estatales vigentes así como colaborar a la ecología urbana.



---

## ABSTRACT

This thesis presents a computational model developed in a graphical programming environment LabView version 8.2 along with MatLab 2008, it has two modules, the first of which performs the statistical processing and spectral data acquired, and the second a neural processing. It aims to study the environmental noise from different sources which can be used for acquisition, storage, processing and advanced signal analysis of noise pollution.

It performs the signal acquisition of a permanent monitoring system that samples the noise signal to 25 KHz providing the information required for spectral analysis of patterns of environmental noise as a result of the use of weighting filters A or C. To make the task more accessible for measurement, comparison and analysis makes use of a division of the audible spectrum into octave bands.

The equivalent continuous sound levels recorded every hour on the nodes allows the identification of adverse health effects that urban noise can cause. The noise levels, depending on the node analyzed, are characterized as regular or irregular patterns by neural processing module, taking identifying a level of about 75%.

Given the current standards of urban noise measurement, a global environmental problem of great importance, the Federal District of Mexico City the measuring devices used in the nodes (microphone, preamplifier, data acquisition card and industrial computer) have calibrated to Class 1 for the ten measurement points selected based on social activities that occur in different parts of Cuauhtémoc delegation.



---

There has been a bibliographic compilation of the possible effects of noise on humans and the spectra that cause the deterioration of his physical, psychological or physiological condition, this led to the identification of patterns of noise harmful to health and comfort allowing the authorities to act in better official rules and for the state as well as urban ecology.



---

# CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes

El ruido es un contaminante del medio ambiente al que recientemente se le ha prestado mayor atención debido a las diversas afecciones que éste causa a la salud. El ruido ambiental es un problema mundial al que varios países ya han destinado recursos para regular y evaluar el ruido.

Los efectos adversos que ocasiona el ruido a la salud pueden ser auditivos y extra-auditivos; fisiológicos o psicosociales; conscientes e inconscientes, cuyo daño depende de algunos factores como el tiempo de exposición, distancia de la fuente de ruido, periodicidad e intensidad del ruido.

Se han realizado aportaciones importantes en países como Europa donde se dedicó parte del capítulo 16 del Informe Dobrás sobre el medio ambiente (Agencia Europea del medio ambiente, 1998) además del Libro Verde de la Comisión Europea sobre «Política Futura de Lucha Contra el Ruido», publicado en 1996, en España se ha creado la Unidad de Niveles Sonoros del Ayuntamiento de Madrid. Además existe en México, desde 1982, el Reglamento para la Protección del Ambiente Originado por la Contaminación por Ruido; en 1994 se actualizaron y generaron nuevas normas con referencia al control del ruido ambiental las cuales son susceptibles de ampliar y actualizar.



---

## 1.2 Formulación de problemas

Decenas de miles de personas se ven afectadas por la exposición a ruidos de largo plazo, causados por tránsito terrestre y aéreo, cuyos patrones no están totalmente establecidos y que deben ser reconocidos, los daños auditivos comienzan a aparecer cuando el nivel de presión sonora es de 85 decibeles, causando dolor cuando llega a los 120 o 130 decibeles. Un nivel continuo de ruido alto produce daños auditivos permanentes, como sordera y tinnitus, así como otros efectos dañinos para la salud además de la disminución del confort.

Se plantean los siguientes problemas a resolver:

1. Ausencia de un monitoreo permanente de los niveles de ruidos en zonas críticas del Distrito Federal, es especial en el Centro Histórico, donde se registran índices de ruidos elevados y superiores a las normas oficiales.
2. La ausencia en México, de modelos computacionales para el procesamiento avanzado de ruidos ambientales que puedan ser originales tanto nacional como internacionalmente.

## 1.3 Justificación de los problemas planteados

La investigación encaminada a la atenuación de ruido ambiental trae consigo un relevante beneficio social. La deficiente calidad de vida provocada por elevados índices de ruido ambiental se verá subsanada de alguna manera mediante el mejor entendimiento de los factores causantes de estas afecciones.



---

## **1.4 Hipótesis**

La medición permanente de ruidos ambientales, el cálculo de indicadores acústicos y el reconocimiento de patrones de ruidos nocivos a la salud y al confort, aportarán la información necesaria para que las autoridades puedan actuar en mejoras sobre la calidad de la ecología urbana así como aplicar y mejorar las normas oficiales y estatales vigentes sobre ruidos ambientales en las ciudades.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo general**

Desarrollar un modelo computacional para procesar y analizar señales de ruidos urbanos, con aplicación en zonas críticas ubicadas en el Distrito Federal.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

1. Realizar y utilizar mediciones de ruidos urbanos, con aplicación en zonas críticas del Distrito Federal.
2. Diseñar el modelo computacional para el procesamiento de indicadores de ruidos urbanos en zonas críticas.
3. Desarrollar el módulo para el procesamiento de indicadores estadísticos y espectrales de ruidos urbanos en zonas críticas ubicadas en el Distrito Federal.



- 
4. Desarrollar el módulo para el procesamiento neuronal de ruidos urbanos en zonas críticas ubicadas en el Distrito Federal.

### **1.6 Alcance**

Se desarrollará un modelo computacional que realice procesamiento avanzado de señales de ruido provocado por flujo vehicular en vialidades del Centro Histórico de la Ciudad de México (zonas críticas).

### **1.7 Contribuciones**

Al finalizar el presente trabajo se pretende contar con un modelo computacional para medición y procesamiento avanzado de ruidos en puntos críticos.

### **1.8 Método de investigación y desarrollo utilizado**

1. Recopilar información sobre sistemas de ruido ambiental y de afecciones a la salud provocados por exposición a ruido urbano.
2. Elección de la zona de estudio donde se ubicaran los puntos de muestreo de los que se obtendrán o utilizarán muestras de ruido urbano.
3. Designación del método de adquisición de datos de señales de ruido ambiental.



4. Establecer indicadores que coadyuven a caracterizar señales de ruido urbano.
5. Determinar herramientas a utilizar en la elaboración del modelo computacional.
6. Diseñar el modelo computacional para el procesamiento de indicadores de ruidos urbanos en zonas críticas.
7. Implementar los módulos para el procesamiento de indicadores estadísticos y espectrales y procesamiento neuro-difuso de ruidos urbanos en zonas críticas ubicadas en el Distrito Federal.
8. Utilizar la información resultante del procesamiento de las señales de ruido urbano para determinar posibles daños a salud.
9. Realizar pruebas analizando señales de ruido ambiental y evaluar su el desempeño del modelo computacional.

## **1.9 Estructura de la tesis**

**Capítulo 1. Introducción**, se abordan los fundamentos, alcances y metodología de realización del presente trabajo de tesis.

**Capítulo 2. Estado del Arte**, se expone el estado actual del conocimiento, técnica y herramientas para evaluación, procesamiento y clasificación de efectos del ruido.

**Capítulo 3. Procesamiento de indicadores estadísticos y espectrales de ruidos urbanos para zonas críticas ubicadas en el Distrito Federal**, presentación de las aportaciones,



---

desempeño y características del módulo, se describe el funcionamiento y la estructura general del modelo.

**Capítulo 4. Procesamiento neuronal de ruidos urbanos para zonas críticas ubicadas en el Distrito Federal**, aborda la descripción del modelo neuronal utilizado, estudio de características esenciales que permitan reconocer patrones regulares e irregulares diarios de distintas fuentes de ruido ambiental.



---

## **CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE**

### **2.1 Introducción**

Cuando se requiere conocer la respuesta o alteraciones que el ruido provoca en el ser humano es necesario considerar la manera en que el oído percibe las frecuencias y niveles sonoros por ser el órgano receptor principal del sonido, debido a que presenta mayor sensibilidad en ciertas zonas receptoras es necesario considerar la respuesta en frecuencia del oído, para tal fin se utilizan las curvas de ponderación “A”, “B” y “C” [KOGAN, 2004]

El efecto dañino del ruido a la salud que ha sido en su mayoría objeto de estudio y considerado en la formulación de normas y leyes ha sido el de la pérdida de audición, sin embargo existen otros padecimientos que atañen al ser humano como consecuencia de la exposición al ruido como la pérdida de la calidad del sueño, estrés, interferencia en la comunicación, alteraciones cardiovasculares y gastrointestinales, modificación del ritmo respiratorio, entre otros.

### **2.2 Ruido**

El sonido es cualquier variación de la presión en el aire que puede ser detectada por el oído humano. Por definición, el ruido es un sonido no deseado y molesto. Técnicamente, el ruido es el resultado de la combinación de sonidos de una sola frecuencia o tonos puros, y tiene un espectro de frecuencia continuo, de amplitud y longitud de onda irregulares. [Bruel & Kjaer, 2007; William W. Seto, 1973].



El movimiento ondulatorio se inicia, cuando un elemento pone en movimiento a la partícula de aire más cercana, alejándose gradualmente de la fuente. Dependiendo del medio, el sonido se propaga a diferentes velocidades. En el aire, el sonido se propaga a una velocidad de 340 m/s, aproximadamente.

Comparado con la presión estática del aire  $10^5$  Pa (Pascuales), las variaciones de presión sonora audible son muy pequeñas, en un margen que puede ir desde los 20  $\mu$ Pa hasta 100 Pa. El umbral auditivo medio de una persona corresponde a 20  $\mu$ Pa. Una presión sonora de aproximadamente 100 Pa es tan alta que causa dolor y por lo tanto es llamado umbral del dolor.

El oído humano responde a los estímulos de forma logarítmica, por lo que es más práctico expresar los parámetros acústicos como una relación logarítmica entre el valor medido respecto a un valor de referencia [Cortés, 2001].

$$NPS = 20 \log_{10} \left( \frac{P_e}{P_{ref}} \right) \quad (1.1)$$

Donde NPS está expresado en dB;  $P_e$  es la presión efectiva medida de la onda sonora y  $P_{ref}$  es la presión efectiva de referencia.

Esta relación logarítmica es llamada decibelio o dB. El uso de escalas logarítmicas comprime el intervalo requerido para describir este gran intervalo de intensidades a una escala sencilla que va desde 0 dB en el umbral auditivo (20  $\mu$ Pa), hasta 130 dB, en el umbral del dolor ( $\sim$  100 Pa).



Al número de variaciones de presión por segundo se le llama frecuencia. La frecuencia se mide en Hertz (Hz). La percepción auditiva normal de una persona se encuentra en el rango de 20 Hz hasta 20 KHz, aproximadamente.

En la Fig. 2.1 se pueden apreciar algunos ejemplos típicos de fuentes de sonido, con sus respectivos niveles de presión sonora, medidos tanto en la escala lineal Pa, como en la escala logarítmica dB.

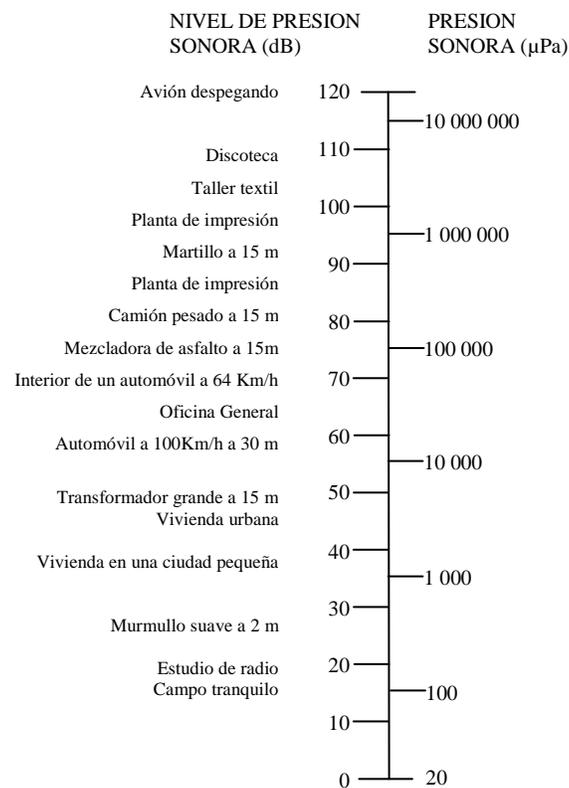


Fig. 2.1 Presiones sonoras y niveles de presión sonora generados por distintas fuentes acústicas (Recuero 2002).

Al ruido lo podemos clasificar de la siguiente manera con base en su carácter temporal [Bruel & Kjaer, 2007; Cortés, 2001]:



- **Ruido Continuo.** El ruido continuo se produce por maquinaria que opera del mismo modo sin interrupción, por ejemplo, ventiladores, bombas, y equipos de proceso. Para determinar el nivel de ruido es suficiente medir durante unos pocos minutos, pudiendo ser uniforme (con rango de variación menor a 3 dB A), variable (entre 3 y 6 dB A) y fluctuante (más de 6 dB A)
  
- **Ruido Intermitente.** Es producido cuando hay maquinaria que opera en ciclos, o cuando pasan vehículos aislados o aviones, el nivel de ruido aumenta y disminuye rápidamente. Para medir este tipo de eventos se hace de manera continua durante la duración del mismo, además se debe tener en cuenta la duración.
  
- **Ruido Impulsivo.** Proveniente de impactos o explosiones, es breve y abrupto.
  - **Impulsivo Repetitivo.** Es producido por impactos repetidos, por ejemplo los de una prensa.
  
  - **Impulsivo Simple.** Es producido por un impacto aislado, por ejemplo un disparo.

Con base en sus características espectrales se puede clasificar en: ruido de tono puro, presenta una componente en frecuencia, ruido armónico, presenta componentes sinusoidales múltiples, ruido de banda estrecha, éste se presenta en una región limitada del espectro, ruido en banda ancha, presenta un espectro continuo, ruido rosa, presentado en banda ancha tal que su densidad espectral de potencia es proporcional al recíproco de su frecuencia. Su contenido de energía disminuye en 3 dB por octava, haciendo que cada banda de frecuencias de igual anchura (en octavas) contenga la misma energía total y ruido blanco, ruido en banda ancha con igual amplitud en cada frecuencia discreta.



La propagación del ruido puede ser afectada por varias razones, por ejemplo [Bruel & Kjaer, 2007a]:

- Tipo de fuente.
  - **Fuente Puntual.** Si las dimensiones de una fuente de ruido son pequeñas comparadas con la distancia al oyente, entonces se le llama fuente puntual, por ejemplo, ventiladores y chimeneas. La energía sonora se propaga de forma esférica, por lo que el nivel de presión del sonido es el mismo en todos los puntos que se encuentran a la misma distancia de la fuente.
  - **Fuente Lineal.** Si una fuente es estrecha en una dirección y larga en otra comparada con la distancia al oyente, ésta es llamada fuente lineal. Por ejemplo una carretera llena de vehículos. El nivel de sonido se propaga de manera cilíndrica, por lo que el nivel de presión sonora es el mismo en todos los puntos a la misma distancia de la línea.
  - **Fuente Estática.** La fuente se mantiene estática a lo largo del tiempo. Por ejemplo una fábrica.
  - **Fuente Móvil.** La fuente cambia de posición a lo largo del tiempo, por ejemplo, aviones, automóviles, etc.
- Distancia desde la fuente:
  - En el caso de una fuente puntual, se presenta una disminución de la intensidad sonora con el cuadrado de la distancia  $r$  (divergencia esférica o hemisférica).



$$I(r) = I(r_0) \frac{r_0^2}{r^2} \quad (1.2)$$

- En el caso de una fuente lineal(Divergencia cilíndrica)

$$I(r) = I(r_0) \frac{r_0}{r} \quad (1.3)$$

- Atenuación en el aire: atenuación de energía sonora en el aire, debido a la fricción y al intercambio de energía vibratoria y rotacional en las moléculas, que implica una atenuación adicional dada por:

$$I' = e^{\gamma_m x} I \quad (1.4)$$

donde  $\gamma_m$  es el coeficiente de atenuación de energía, que depende de la temperatura, la humedad relativa ambiente y la frecuencia, y  $x$  la distancia que debe recorrer la onda sonora.

- Temperatura: produce una curvatura por refracción de la dirección de propagación de la onda sonora. Cuando una onda sonora pasa de una zona a otra en la cual la velocidad de propagación es diferente, tiende a inclinarse hacia la dirección en que disminuye la velocidad de acuerdo con la expresión siguiente:

$$\text{sen}\rho_2 = \frac{c_2}{c_1} \text{sen}\rho_1 \quad (1.5)$$

- Viento: la presencia de viento ocasiona un gradiente de velocidad más complejo, ya que difiere según la dirección de aquél. En efecto, suponiendo que la velocidad  $\mathbf{v}$  del viento fuera independiente de la altura, la velocidad efectiva del sonido es  $\mathbf{c} + \mathbf{v}$  a favor del viento y  $\mathbf{c} - \mathbf{v}$  contra él. Si ahora tenemos en cuenta que además la velocidad del viento en general aumenta con la altura (ya que la



fricción contra el suelo se reduce), vemos que la velocidad efectiva del sonido a favor del viento aumenta con la altura, y en cambio contra el viento disminuye con la altura. Este efecto es más notorio que el debido al gradiente térmico debido a que el viento varía su velocidad más rápidamente con la altura. Como puede apreciarse, en dirección opuesta al viento se puede generar fácilmente una sombra acústica. Por esta razón el sonido parece propagarse mejor en la dirección favorable al viento.

- Reflexiones: en algunos casos producen un incremento de la intensidad, y en otros casos, una disminución. Esto último se debe a que a ciertas frecuencias y distancias la llegada al punto receptor de las ondas directa y reflejada están en fase o contrafase. Por ejemplo, si la tanto la fuente como el receptor están a una altura  $h$  y la distancia entre ellos es  $d$ , entonces las frecuencias

$$f_n = n \frac{c}{2} \frac{1}{\sqrt{4h^2 + d^2} - d} \quad (1.6)$$

- Humedad: la atenuación del sonido es menor, cuanto mayor sea la humedad relativa en el aire, es por ello que en los días de niebla son más ruidosos que los días despejados.
- Lluvia: la velocidad de propagación del sonido es mayor en los sólidos que en los líquidos y en líquido mayor que en los gases.
- Efecto Doppler: este efecto se produce cuando la fuente de ondas y el observador están en movimiento relativo con respecto al medio en el que se propaga la onda, la frecuencia de las ondas observadas es diferente de la frecuencia de las ondas emitidas por la fuente [Alt, 2004]. Como se puede apreciar en la Fig. 2.2.

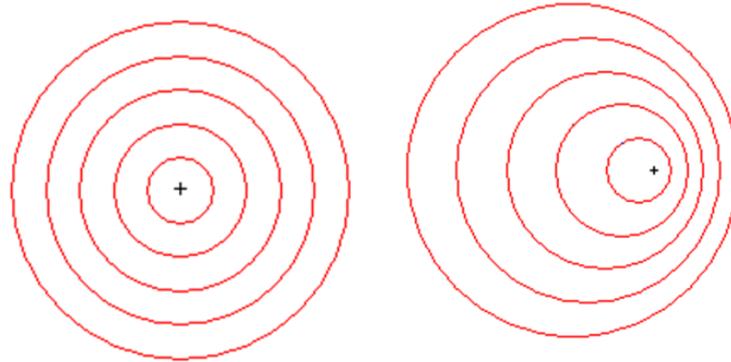


Fig. 2.2 Efecto Doppler. Izquierda: Fuente estática, la longitud de onda medida por el emisor y por el observador es la misma. Derecha: Fuente en movimiento

Existen diversas fórmulas empíricas que permiten calcular el nivel de presión sonora resultante considerando los diversos factores analizados anteriormente. La forma general es

$$L_p = L_W + D - A \quad (1.7)$$

donde  $L_p$  es el nivel de presión sonora,  $L_W$  el nivel de potencia sonora de la fuente (referido a 1 pW),  $D$  el índice de directividad de la fuente (definido como la diferencia en dB entre la intensidad en una dirección dada y la que tendría, a igual distancia, una fuente omnidireccional de igual potencia sonora) y  $A$  la atenuación total en dB, dada por:

$$A = A_{div} + A_\gamma + A_{refl} \quad (1.8)$$

siendo los términos del segundo miembro las atenuaciones debidas a la divergencia geométrica, la atenuación en el aire, y al efecto combinado de reflexión y absorción superficial. En caso de haber obstáculos, tales como barreras o pantallas acústicas, vegetación, terraplenes o desniveles en el terreno, etc., podrían agregarse otros términos. Los dos primeros términos pueden calcularse en forma precisa:

$$A_{div} = 10 \log \frac{4\pi r^2 P_{ref}^2}{\rho_0^c W_{ref}} \quad (1.9)$$



---

$$A_{\gamma} = 10r\gamma_m \log e \quad (1.10)$$

Para  $r$  expresado en  $m$ , puede reescribirse como:

$$A_{div} \cong 20 \log r + 11 \quad (1.11)$$

$$A_{\gamma} \cong 4.34\gamma_m r \quad (1.12)$$

El tercer término,  $A_{refl}$ , en general se determina empíricamente, ya que hay una gran cantidad de variables involucradas que no pueden determinarse en forma sencilla. Entre otras cosas,  $A_{refl}$  depende de la frecuencia, de la absorción superficial de las superficies reflectantes, del ángulo de incidencia, de las posiciones de la fuente y el receptor con respecto a cada superficie, de la dirección de emisión de la fuente, por mencionar algunos.

## 2.3 Instrumentos de medición

El sonómetro es el dispositivo que sirve para medir los niveles de sonido. Es un equipo que permite cuantificar el nivel de presión sonora.

Existe una gran variedad de dispositivos ya que dependiendo de las características del sonido que se desee medir es el dispositivo que se utilizará. Dentro de las características a considerar tenemos el tipo de ruido a medir: impulsivo, continuo, intermitente; el tipo de medición que se quiera realizar, etc.

### 2.3.1 Sonómetro

Instrumento de medición destinado para obtener medidas objetivas y repetitivas de la



---

presión sonora, que se valora de forma logarítmica, por lo cual se puede decir que es un medidor de nivel de presión sonora.

Los sonómetros se clasifican en:

- Clase 0 (patrones). Se utiliza en laboratorios y como referencia. (error +/- 0.4 dB)
- Clase 1 (precisión). Se emplea para mediciones de precisión en campo (error de +/- 0.7 dB).
- Clase 2 (uso general). Se utiliza en mediciones generales de campo (error +/- 1.0 dB).
- Clase 3 (inspección). Se emplea para realizar reconocimientos y mediciones aproximadas (error +/- 1.5 dB).

Los valores de los errores mostrados en la parte superior son aproximados ya que éstos pueden variar dependiendo de la frecuencia del sonido que se esté midiendo.

Esta clasificación está basada en la norma de la Internacional Electrotechnical Commission IEC 651[1979]. Además de esta norma, los sonómetros se rigen por: IEC 804[1985] y en el caso de América la norma American National Standard Specification for Sound Level Meters ANSI S1.4 [1983]. En la actualidad hay una nueva norma que vino a sustituir las normas IEC 651 y IEC 804, es la IEC 61672. Esta nueva norma sólo contempla las clases 0, 1 y 2.

Un sistema de medición de sonido se compone de un sensor de presión acústica (micrófono), unidad de acondicionamiento, unidad de procesamiento y unidad de presentación.

El micrófono o sensor de presión acústica se encarga de transformar las ondas sonoras en impulsos eléctricos que son ingresados al sistema.



Fig. 2.3 Sonómetro (Cortesía de Brüel&Kjær)

### **2.3.2 Analizador de frecuencias**

Instrumento de medición que determina el contenido energético de un sonido en función de la frecuencia. La señal que aporta el micrófono se procesa mediante filtros que actúan a frecuencias predeterminadas, valorando el contenido energético del sonido en ese intervalo.

### **2.3.3 Dosímetro**

Sonómetro integrador que permite calcular la dosis de ruido a la que está sometida una persona. Lleva incorporado un sistema lector en el que se expresa la dosis acumulada en el



tiempo que ha estado funcionando. Los más modernos dan directamente el nivel de presión sonora equivalente de cualquier ruido y el nivel sonoro continuo equivalente diario. Por su tamaño son portátiles, lo cual permite medir todo tipo de ruidos tanto en puestos de trabajo fijos como móviles.

### 2.3.4 Calibrador acústico

Instrumento que sirve para asegurar la fiabilidad de los sonómetros. Su misión es generar un tono estable de nivel a una frecuencia determinada, al cual se ajusta la lectura del sonómetro haciéndola coincidir con el nivel patrón generado por el calibrador. En general, disponen de un selector que permite generar uno o más tonos a una frecuencia de 1 KHz.



Fig. 2.4 Calibrador Acústico (Cortesía de Brüel&Kjær)

### 2.3.5 Micrófono

El primer elemento para la adquisición del sonido, el micrófono, transforma las variaciones de presión en el aire (ondas sonoras), en impulsos eléctricos de corriente eléctrica alterna, de manera que puedan ser manipulados y almacenados sobre algún soporte bien sea en formato analógico o digital. Posteriormente, se volverán a transformar esos impulsos eléctricos en ondas de presión mediante los altavoces o bocinas; por ello se dice que el micrófono es un transductor mecánico eléctrico.

La cantidad de energía captada por un transductor es pequeña, debido a que se podría

perturbar el funcionamiento del proceso si la cantidad de energía extraída y convertida contuviera componentes de frecuencia indeseables.

Seleccionar un micrófono implica tomar en cuenta la relación que existe entre la magnitud de salida y la de entrada, en ausencia de errores. Si la sensibilidad del dispositivo es constante en todo el margen de medición, se dice que el sensor es lineal. Además es necesario tomar en cuenta el menor cambio en la magnitud de entrada que producirá una alteración de los niveles sonoros a la salida y la coincidencia entre el valor de entrada y la magnitud deducida a partir de la salida y la sensibilidad.



Fig. 2.5 Micrófono (Cortesía de Scantek Inc)

### 2.3.6 Preamplificador

Debido a que las señales eléctricas generadas por el micrófono son débiles, éste debe estar acoplado a un preamplificador de propósito general, que para efectos de realización del sistema, será uno de la marca Scantek, modelo MA201. Este preamplificador está optimizado para el uso con micrófonos prepolarizados, proporciona una excelente respuesta en frecuencia y buen rendimiento al ser acoplado al micrófono MPA201; además de contar con una salida BNC que puede ser directamente acoplada a una tarjeta de adquisición de datos.



Fig. 2.6 Preamplificador MA201 (Cortesía de Scantek)

### 2.3.7 Tarjeta de adquisición de datos

En adición a los componentes anteriormente descritos se empleará una tarjeta de adquisición de datos tipo USB de la empresa National Instruments, cuyo modelo es 9233, ésta posee cuatro canales para adquisición dinámica de grandes cantidades de datos, cada canal brinda acondicionamiento de señal para acelerómetros y micrófonos, tiene una resolución de 24 bits, un rango de entrada de  $-5$  a  $+5$  V y posee una conexión para transmisión de datos tipo USB 2.0 de alta velocidad.

Esta tarjeta permite la conexión de sensores con salida digital o analógica para otros propósitos, lo cual permite ampliar el alcance de estudio del ruido si así se desea, por ejemplo agregando un sensor de temperatura a uno de sus canales.

Una de las características que hacen de esta tarjeta la indicada para ser integrada en el sistema aquí implementado, lo es el mínimo consumo de energía eléctrica que ésta presenta, puesto que únicamente se alimenta del puerto USB de la computadora que la gobierne, además de que su tamaño la hace discreta y portátil al momento de hacer mediciones.



Fig. 2.7 Tarjeta de Adquisición de Datos NI-USB9233 (Cortesía de National Instruments)

## 2.4 Filtros de ponderación

En la unidad de acondicionamiento se realiza la conversión analógico-digital, se hace la conversión a unidades de presión sonora (Pascuales) y se realiza un filtrado de los datos con los llamados filtros de ponderación [Sexto, 2007], los cuales son descritos a continuación:

- **Filtro de ponderación A.** Fue creado para modelar la respuesta del oído humano para niveles bajos (del orden de los 40 fonos). Actualmente casi todas las leyes y reglamentos lo utilizan para delimitar los niveles aceptables de ruido. Los niveles de sonido ponderados con el filtro A se denominan decibelio A dB(A).
- **Filtro de ponderación B.** Fue creado para modelar la respuesta del oído humano a intensidades medias. Prácticamente no se usa.
- **Filtro de ponderación C.** Fue creado para modelar la respuesta del oído humano ante sonidos de gran intensidad (aproximadamente 100 fonos). Se utiliza para evaluar sonidos ambientales, así como, sonidos de baja frecuencia en la banda de frecuencias audibles.



- **Filtro de ponderación D.** Surgió a partir de las curvas de ruido percibido y fue concebida para evaluar un evento único de ruido aeronáutico.
- **Filtro de ponderación U.** Se utiliza para medir sonidos audibles en presencia de ultrasonidos.

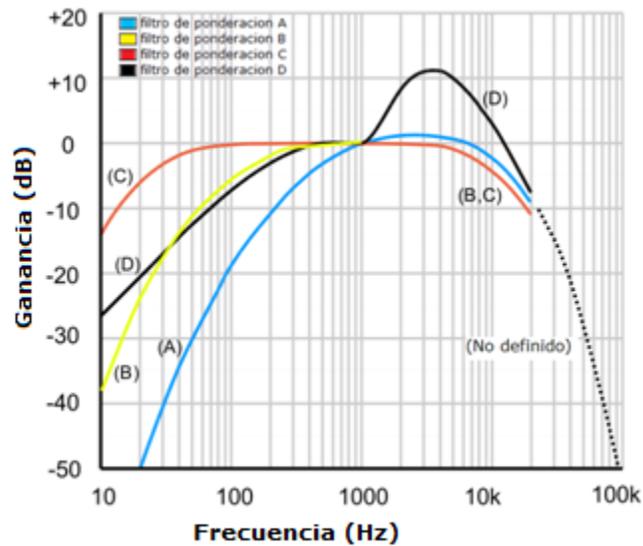


Fig. 2.8 Curvas de ponderación espectral

En la unidad de procesamiento se calculan los indicadores de sonido. Algunos de los más utilizados son [Crocker, 1998; Kinsler; 1999, Berglund, 1999]:

- **Nivel instantáneo ( $L_p$ ).** Nivel de presión sonora que se registra en un instante de medición. También se denomina SPL (Sound Pressure Level).
- **Nivel Sonoro Continuo Equivalente ( $L_{eq}$ ).** Índice acústico, medido en un intervalo de tiempo, de un sonido estacionario que contiene la misma energía que un sonido fluctuante.



- 
- **Nivel máximo (L<sub>max</sub>).** Es el nivel sonoro más alto que se registra durante un período de tiempo.
  - **Nivel mínimo (L<sub>min</sub>).** Es el menor nivel sonoro que se registra durante un intervalo de tiempo.
  - **Percentiles (L<sub>10</sub>, L<sub>50</sub>, L<sub>90</sub>, etc.).** Es el nivel sonoro que es superado determinado porcentaje de tiempo. Por ejemplo, el L<sub>90</sub> es el nivel sonoro que fue superado el 90% del tiempo de la medición.
  - **SEL (Sound Exposure Level).** Es el nivel sonoro que, si se mantiene constante durante 1 seg., tendría la misma energía que el evento sonoro medido. Se usa para medir eventos aislados, como el paso de aviones, etc. También es conocido como (Single Event Level).

Existen otros indicadores importantes como son: PNL (Perceived Noise Level), EPNL (Effective Perceived Noise Level), DNL (Day/Night Level), CNEL (Community Noise Equivalent Level).

## 2.5 Mapas de ruido

Un mapa estratégico de ruido es una herramienta diseñada para poder evaluar globalmente la exposición al ruido en una zona determinada debido a la existencia de distintas fuentes sonoras, al objeto de realizar un diagnóstico de la situación acústica global además de la recopilación de datos de entrada que sean adecuados para el procesamiento.



---

Cuando se elabora un mapa de ruido es necesario un elevado número de datos de entrada. La calidad de estos datos es esencial y de ello depende la obtención de un nivel de ruido en el modelo numérico simulado que se ajuste a los niveles de ruido existentes en la zona donde estamos realizando el mapa de ruido.

El mapa está constituido por un determinado número de capas y cada una de ellas contiene gran cantidad de información. Las principales capas que existen en un modelo geométrico son las que contienen: curvas de nivel, obstáculos (como pueden ser diques de tierra, montones, pantallas, etc.), taludes, plataformas, fuentes de ruido, viaductos, edificios, etc. es decir, cualquier elemento que tenga efectos en la propagación y recepción del ruido. Cada una de estas capas contiene una tabla de atributos que almacena toda la información asociada a cada registro de esa capa.

### **2.5.1 Cartografía**

El grado de detalle necesario en el estudio indicará la escala de trabajo. Dos escalas habituales de trabajo son 1:25000 y 1:5000.

El problema detectado en estos casos es la fecha de actualización de los archivos aportados. También dependerá de la zona concreta, si bien hay zonas de más reciente actualización que otras. Para el caso de ser necesario conocer la huella de ruido existente en una zona con fecha actual donde no se dispone de esta cartografía es necesario recurrir a otras herramientas como puede ser visitas de campo, cartografiar la zona, por mencionar algunos.

De tal manera, que como en muchos casos no es posible disponer de cartografía actualizada a fecha de realización del trabajo, será necesario realizar visitas de campo que permitan



---

detectar cambios posteriores a la elaboración de la cartografía e incluirlos en el modelo geométrico.

Una vez esté construida la base del modelo mediante las curvas de nivel, hay que incluir todos los obstáculos geométricos que puedan afectar a la propagación del ruido. Como pueden ser diques que han de estar en una posición concreta y con una altura determinada. Pantallas acústicas, en su posición y dimensiones reales, etc. En definitiva, cualquier obstáculo que en algunos casos no están contemplados en la cartografía básica y son detectados en visitas de campo.

Cuando se incluyen en el modelo las fuentes de ruido, como puede ser una carretera, pueden modificar cartografía. Al definir la posición del eje de la carretera y las especificaciones de la plataforma, pueden generarse taludes, viaductos, desmontes, etc. que modifican la propagación del ruido. Por ello, hay que incluirlos en los modelos y tenerlos muy en cuenta.

### **2.5.2 Edificios**

La diversidad de edificios puede ser alta cuando se realiza un mapa de ruido de una determinada zona:

- Origen de los datos: Hay diversas fuentes como puede ser CNIG, Catastro, Ayuntamientos, etc. Sin embargo, puede haber zonas donde los edificios no se ajusten perfectamente a la realidad.



- La base del edificio, no se corresponda exactamente con el edificio actualizado existente o existen edificios que no están contemplados en la capa de cartografía de los edificios.
- La altura de los edificios no es conocida generalmente y si lo es puede no ser correcta. Hay determinados edificios que presentan tejados no uniformes, lo cual provoca errores en la determinación de la altura a la hora de realizar un vuelo raster para construir la capa de cartografía de los edificios.
- Dentro de un bloque de edificios pueden existir diferentes alturas. Para la construcción del modelo, a efectos de propagación del ruido, puede no afectar sustancialmente. Por ello, en algunos casos se pueden hacer simplificaciones para que el modelo no tenga tanto peso y disminuir los tiempos de cálculo.
- Hay que conocer e incluir al modelo el uso de cada edificio. Se pueden clasificar principalmente en: Residenciales, Docentes, Sanitarios e industriales.

Si se analiza la capa de edificios en una zona urbana concreta, para un bloque de edificios, hay que valorar si es necesario introducir todos los detalles de cada uno de los edificios en el modelo geométrico.

Para ello, el criterio más adecuado es tener en cuenta la escala a la que se está realizando el mapa de ruido. De tal manera, que habrá casos en los que se puedan realizar simplificaciones en el modelo.

Por ejemplo, un cuarto de ascensores no va a producir modificaciones sustanciales en la propagación del ruido. Otros elementos constructivos a tener en cuenta son, por ejemplo,



patios, pequeños salientes/entrantes de los edificios, equipos de climatización que existen en las azoteas, etc.

En definitiva, incluir excesivos detalles en la capa de edificios hace que en el modelo se incrementen sustancialmente los tiempos de cálculo sin obtener mejores resultados. Otro problema que se puede encontrar a la hora de realizar el modelo geométrico son los edificios que se encuentran en ladera, dando lugar a diferentes alturas dependiendo del punto de análisis dentro de la planta del propio edificio.

### 2.5.3 Fuentes de ruido

En cuanto a fuentes de ruido, hay gran diversidad de tipos. En este trabajo, se tratan únicamente dos tipos de fuentes; tráfico rodado y de actividades en vía pública. En la Fig. 2.9 se muestra el trazo de vialidades que impulsan el crecimiento urbano incrementando son ello la emisión de ruido.



Fig. 2.9 Tránsito rodado por carretera

Teniendo en cuenta el tráfico rodado por carretera hay que destacar los siguientes puntos:

- El primer problema que nos encontramos es la gran diversidad de vehículos que circulan por una vía. Podemos encontrarnos motos, coches, camiones,



---

autobuses, vehículos especiales (como pueden ser ambulancias, bomberos). Incluso, dentro del mismo tipo de vehículos hay situaciones en las que el nivel de ruido generado varía, por ejemplo, dos motos de igual cilindrada: Una Harley Davidson o una Honda. Esto da lugar a diferentes niveles de emisión.

- Hay que estimar el número y tipo de vehículos que pasa por una sección determinada en un intervalo de tiempo, en definitiva la densidad de tráfico.
- Estimar la velocidad media del tráfico. Cuando el tráfico es fluido es relativamente sencillo, pero cuando el flujo es intermitente se complica considerablemente.
- Estimar el período temporal de circulación de cada tipo de vehículos.
- Estimar el tipo de flujo de tráfico puede ser complicado. Las situaciones más comunes suelen ser:
  - Flujo continuo fluido y estable. Es la situación que se da frecuentemente en autopistas, autovías, vías interurbanas.
  - Flujo continuo en pulsos. Es la situación que se da frecuentemente en calles urbanas, aparcamientos, zonas residenciales.

## **2.6 Afectaciones al ser humano**

Algunas de las afectaciones ocasionadas por el ruido son:



- 
- Molestias en el oído [Berglund, et al, 1995; Kryter, 1985]
  - Pérdida Auditiva [Berglund, et al, 1995]
  - Interferencias en la comunicación [Berglund, et al, 1999; Kryter, 1985]
  - Vibraciones localizadas en el cuerpo [Recuero, 1994]
  - Alteraciones del sueño [Michaud, 2007; Knipschild, 1977]
  - Hipertensión [Knipschild, 1977; Ostrosky, 2001]
  - Estrés [Berglund, et al, 1995]

El estrés puede tener diversas manifestaciones tanto físicas como psicológicas. Algunos ejemplos pueden ser: alergias, urticaria, dolor de espalda, calambres musculares, asma, bronquitis, presión elevada, migraña, ulcera duodenal, colitis, obesidad, ansiedad, angustia, fatiga, etc. [Ostrosky, 2001].

## **2.7 Conclusiones del capítulo**

El ruido es provocado por una variación de nivel de presión sonora molesta o indeseada que se mide en dB y puede ser captado mediante un sonómetro los cuales utilizan filtros de ponderación para interpretar y evaluar la sonoridad con que son percibidos por el oído humano. Algunos de los indicadores de sonido más utilizados son: Leq, Lp, Lmax, SEL, percentiles, PNL, EPNL, DNL y CNEL. Para analizar las señales algunas de las técnicas más usadas son: FFT, espectrogramas y análisis de octavas.



---

El ruido provoca diversas afecciones al ser humano, como pueden ser estrés, alteraciones en los sistemas cardiovascular, digestivo o endócrino, disminución del confort entre otras.

La percepción y propagación del sonido depende del medio de propagación, la distancia y tipo de la fuente que produce el sonido.



---

# **CAPÍTULO III. PROCESAMIENTO DE INDICADORES ESTADÍSTICOS Y ESPECTRALES DE RUIDOS URBANOS EN ZONAS CRÍTICAS UBICADAS EN EL DISTRITO FEDERAL**

## **3.1 Introducción**

Debido a la subjetividad con la que el ruido es percibido entre distintas personas y siendo estas las mayormente afectadas, el ruido no puede medirse en unidades objetivas en su totalidad. Sin embargo puede ser evaluado objetivamente mediante sus características objetivas como la presión del sonido cuya unidad de medida es el Pascal (Pa).

El sonido perceptible cubre un rango amplio de intensidades desde 20  $\mu\text{Pa}$  en el umbral auditivo hasta 200 Pa en el umbral del dolor, resulta compleja la utilización de unidades que permiten un amplio margen de unidades de medición, por lo que se realiza una transformación de estas en decibeles, una escala logarítmica equivalente.

En gran parte los efectos del ruido en función de la frecuencia no han sido demostrados con rigurosidad. En este capítulo se presentan los efectos que el ruido puede causar, las frecuencias que lo causan en un tiempo de exposición determinado.

La evaluación de las características contaminantes del ruido para un observador proporciona información aproximada acerca del daño que puede causar a la salud el comportamiento espectral en ciertas señales de ruido. Contar con un sistema para evaluar



las condiciones en las cuales se pueden presentar efectos adversos brinda información más acertada con base en información cuantitativa de los datos adquiridos.

### 3.2 Espectro auditivo

Una persona auditivamente sana puede escuchar sonidos comprendidos desde una frecuencia de 40 Hz hasta 18 KHz, un individuo con audición normal podría escuchar sonidos de 20 Hz a 16 KHz, en la mayoría de los adultos el límite superior se encuentra aproximadamente en 15 KHz, sin embargo es usual que los niños escuchen hasta frecuencias cercanas a 20 KHz. Es por ello que se suele decir que el rango del espectro auditivo humano es de 20 Hz a 20 KHz [Moore, 2003].

La sensibilidad auditiva varía con la frecuencia, pero también con los distintos niveles sonoros que fueron representados en las curvas de igual sonoridad por Robinson y Dadson en 1956 [Gelfand, 1998] posteriores a las curvas descritas por Fletcher y Munson. En la Fig. 3.1 se muestran los mínimos niveles audibles y los umbrales máximos correspondientes a las sensaciones de molestia, cosquilleo o punción del oído.

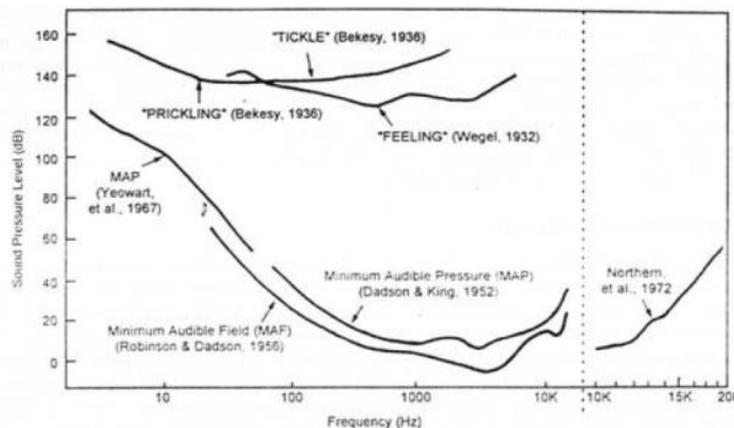


Fig. 3.1 Umbrales auditivos inferiores: MAF, MAP y binaural en campo libre para alta frecuencia (derecha). Umbrales superiores de molestia y sensación de punción y cosquilleo (Gelfand, 1998)



### 3.3 Pérdida auditiva

El desplazamiento permanente de umbral auditivo comienza en la banda más susceptible, la octava centrada en 4000 Hz. Posteriormente desplazándose a las frecuencias cercanas a 2000 Hz. Las frecuencias situadas entre media octava y una octava por debajo de la banda auditiva afectada causan constantemente desplazamientos de los umbrales temporales (TTS) y permanentes (PTS) [Kryter, 1985].

En el caso de exposición a ruidos de banda ancha y relativamente plana se producen pérdidas en el rango de 3000 a 6000 Hz [Harris 1995]. Las diferencias en el contenido espectral del ruido de banda ancha influyen en la extensión de la pérdida auditiva.

La Fig. 3.2 muestra el desplazamiento de los umbrales como consecuencia de exposición a ruidos de 80 y 85 dB centrados en 425 Hz y 4000 Hz.

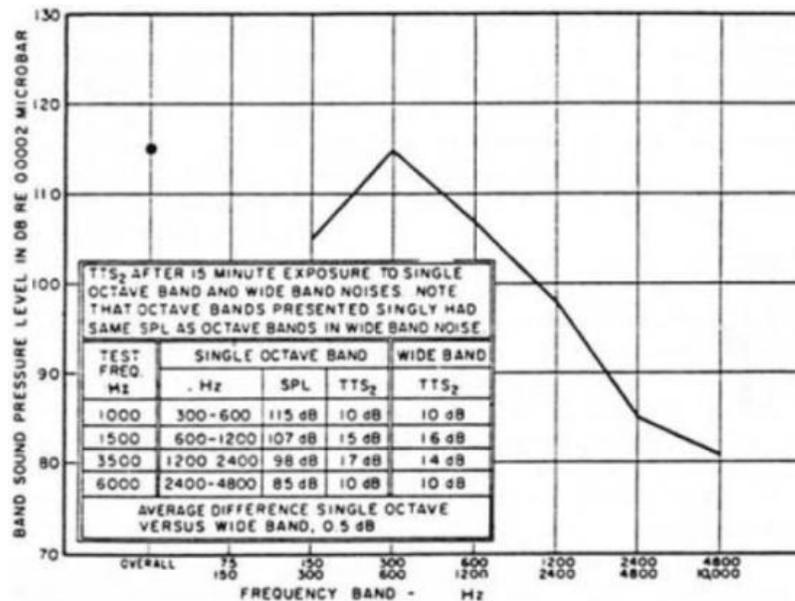


Fig. 3.2 Distribución espectral de bandas de octavas que produce el máximo desplazamiento temporal de los umbrales auditivos.



---

### **3.4 Dolores y molestias en el oído**

Una persona percibe una sensación de molestia al superarse los 110 dB, cosquilleo sobre los 132 dB y dolor al sobrepasar los 140 decibeles [Beranek, 1996], así como también el sonido intenso de baja frecuencia [Berglund – Lindvall, 1995]. Los sonidos de nivel elevado pueden causar molestias y dolor en el oído en un rango de 50 a 8000 Hz.

La exposición a bandas de ruidos estrechas centradas en 2 y 10 Hz de niveles sonoros comprendidos entre 142 y 153 dB han registrado molestias en el oído medio a causa de la acumulación de presión. El infrasonido de 7Hz a 142 decibeles causa sensación de alta presión en el oído [Jhonson, 1982].

### **3.5 Bandas de enmascaramiento**

Si se tienen estímulos de frecuencia baja y alto nivel sonoro se producirá un enmascaramiento considerable en frecuencias bajas y medias. En la Fig. 3.3 se compara el enmascaramiento de un tono de 400 Hz con otro de 2000 Hz, se muestra claramente que el tono puro más grave produce enmascaramiento de una zona más grande del espectro que el más agudo.

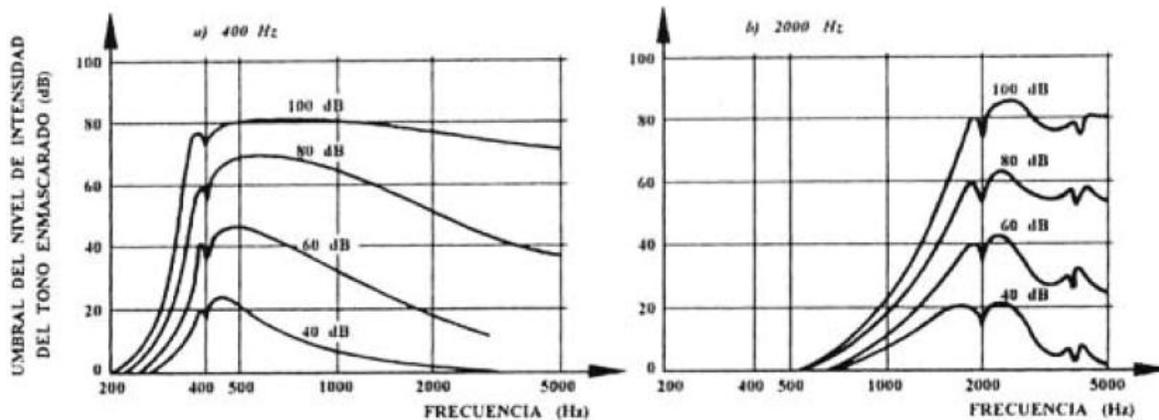


Fig. 3.3 comparación de enmascaramiento producido a un tono de 400 Hz y uno de 2000 Hz para distintos niveles (Recuero 2002)

### 3.6 Diagrama del modelo computacional propuesto

Cada canal de medición acústica está formado por el micrófono, la tarjeta de adquisición de datos y la computadora de uso industrial calibrados a clase 1, los resultados de calibración se muestran en el anexo B, como se muestra en la Fig. 3.4. El conjunto OM231 se encarga de la adquisición y adecuación de las señales de ruido ambiental. Posteriormente son enviadas mediante un conector tipo BNC al módulo NI 9233, el cual utiliza un método de conversión análogo-digital conocido como modulación delta-sigma. Si por ejemplo la frecuencia de muestreo es 25 kS/s entonces cada convertidor analógico-digital (ADC, *Analog-to-digital converter*) muestrea actualmente a 3.2 MS/s (128 veces la tasa de muestreo) y produce muestras a las que se les aplica un filtro antialiasing con frecuencia de corte igual a la mitad de la frecuencia de muestreo elegida por el usuario, en este caso sería igual a una frecuencia de corte de 12.5 KHz (la frecuencia de Nyquist) y digitalmente reacomoda los datos a la frecuencia de muestreo elegida de 25 kS/s.

Finalmente la señal muestreada se envía al dispositivo ARK 3384 para su almacenamiento y/o transmisión vía internet 3G al Centro de Control a través del cual se obtienen los datos para el procesamiento avanzado de indicadores de ruido urbano.



Fig. 3.4 Arquitectura de los nodos.

Cada nodo se constituye de un sensor de presión acústica MP231 junto con su preamplificador MA211 especialmente diseñado para micrófonos prepolarizados BSWA de  $\frac{1}{2}$  ", un conjunto denominado MPA231. El conjunto para mediciones permanentes en el exterior se le conoce como OM231 cuyas especificaciones más relevantes se describen en la tabla siguiente.

Tabla 3.1 Características del conjunto OM231.

Sensibilidad	40mV/Pa
Diámetro del micrófono	$\frac{1}{2}$ "
Respuesta en frecuencia	20 Hz- 20 KHz
Rango dinámico(3% límite de distorsión)	18-130 dB
Fuente de voltaje	4 mV
Conector de salida	BNC

La tarjeta de adquisición de datos NI 9233 realiza un ajuste automático a la frecuencia de muestreo requerida mediante un filtro antialias. Cada señal simultánea es almacenada en un buffer, prefiltrada analógicamente y muestreada por un convertidor analógico digital de 24 bits que realiza un filtrado digital con una frecuencia de corte que automáticamente se



ajusta a la frecuencia de muestreo establecida. Algunas de las características importantes de la tarjeta se encuentran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Características de tarjeta de adquisición de datos NI 9233.

Resolución	24 bits
Rango dinámico	120 dB
Entradas analógicas simultáneas	4
Rango de voltaje de entrada	$\pm 5V$

La computadora industrial utilizada ARK 3384 se encarga del almacenamiento y envío de las mediciones registradas, algunas de las características relevantes se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Características de la computadora industrial ARK 3384.

Procesador	Intel ULV Celeron M a 1.4 GHz (1MB cache L2)
Wireless	802.11b/g LAN inalámbrica, opera en banda de frecuencia de 2.4 GHz, Velocidad de hasta 54 Mbps
Interfaz USB	Controlador USB 2.0 integrado en un chip ICH4, soporta 3 x USB 2.0
Interfaz COM	Soporta PS/2, puerto 1xRS232
Consumo de potencia	Típica: 24W, Máxima: 36W
Entrada de voltaje	12Vdc ~ 24Vdc
Opciones de software	Windows XP embedded, Windows 2000/XP VISTA

En la Fig. 3.5 se muestran las hojas de calibración del micrófono y preamplificador OM231 adecuado para mediciones a campo abierto cumpliendo además con la norma IEC 61672 clase 1 que es la indicada para mediciones precisas. Como se puede apreciar en la Fig. 3.11



la respuesta en frecuencia es bastante estable aproximadamente hasta los 10 KHz, dicha estabilidad lo hace adecuado puesto que las componentes principales del ruido ambiental se encuentran por debajo de los 8 KHz.

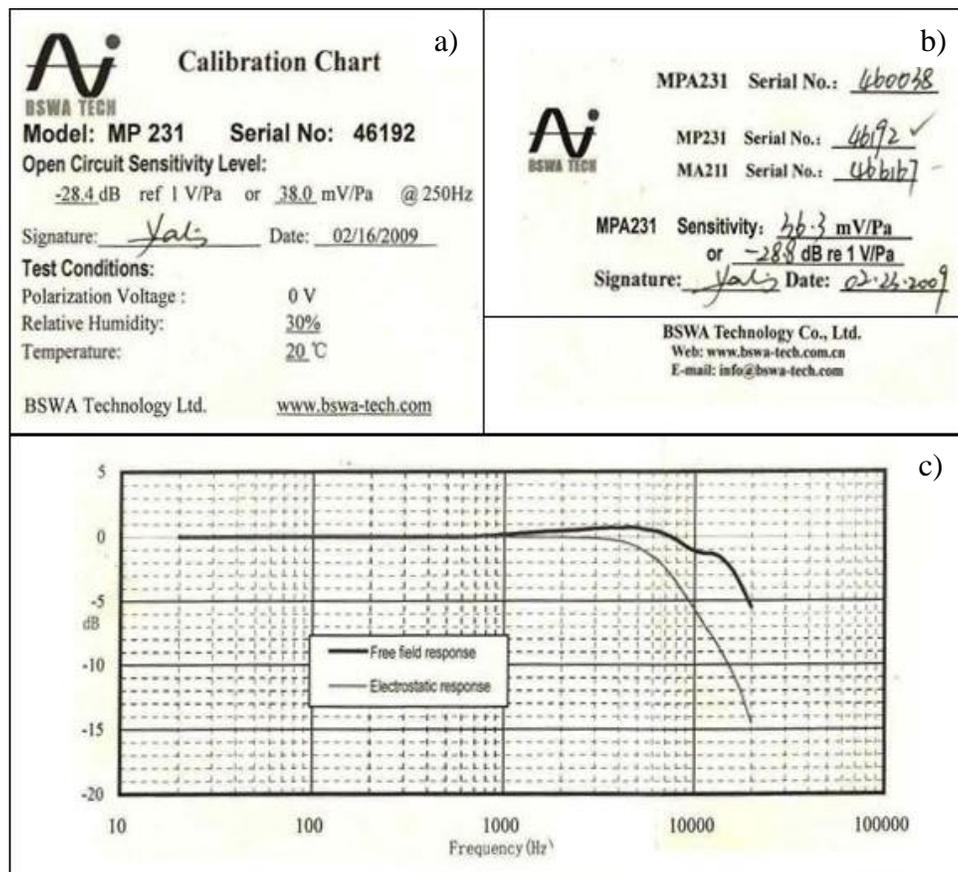


Fig. 3.5 a) Carta de calibración del micrófono MP231, b) carta de calibración del micrófono y preamplificador MPA231, c) Curvas de respuesta en frecuencia del conjunto OM231.

En la Fig. 3.6 se muestra el diagrama de flujo del programa para cada nodo. En el mismo se observan tres secciones o procedimientos paralelos (pseudoparalelos), cada uno de los cuales se ejecuta, al menos, en un hilo independiente (programación multihilo para procesadores de varios núcleos o de un núcleo). Una tarea atiende la comunicación con el Centro de Control y una segunda tarea realiza la lectura de datos mediante la tarjeta NI-9233. Esta tarea de adquisición de datos cuando termina de adquirir un bloque de datos de 29 segundos, lo envía mediante una función de sincronización denominada



NOTIFICACIÓN, a una tercera tarea denominada “almacenamiento en medio magnético”, la cual se ejecuta también de forma paralela pero entra en estado de interrupción o espera, hasta que recibe la notificación de que el bloque de datos de 29 segundos ha sido leído y puede continuar. El programa se mantiene ejecutándose cíclicamente hasta el “fin”.

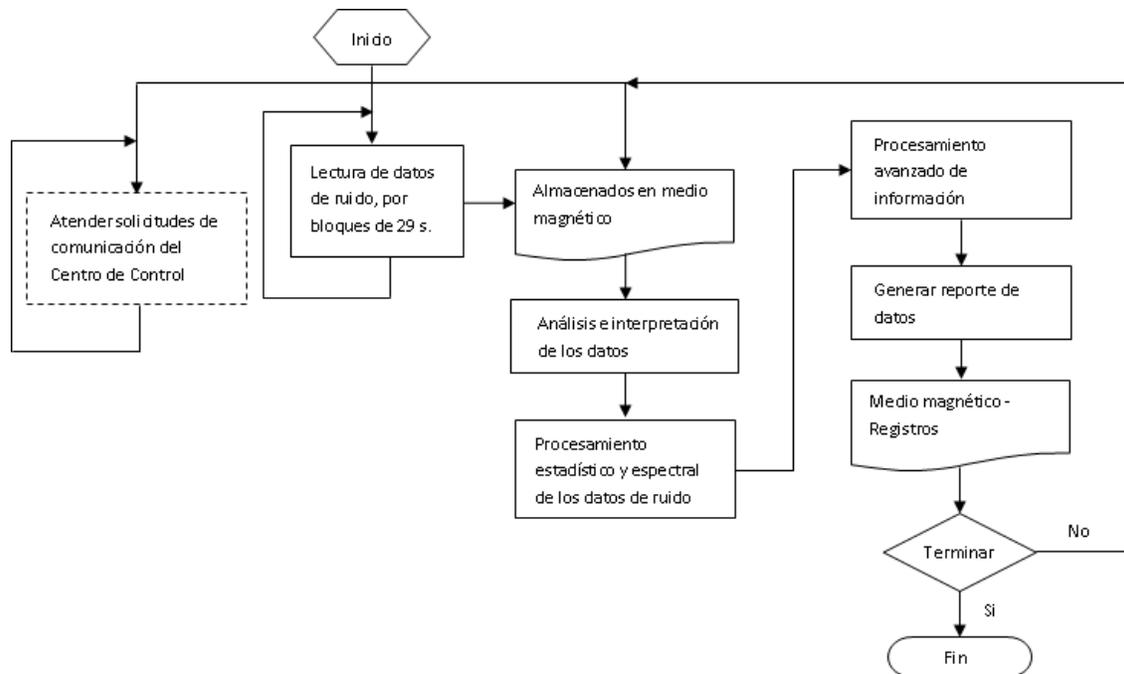


Fig. 3.6. Diagrama de flujo del sistema computacional propuesto para un nodo (igual para todos los nodos).

El modelo computacional (resuelve un modelo abstracto o conceptual) recibe como parámetros de entrada la presión acústica de una fuente de ruido medida en decibeles, y los patrones de ruido ambiental tomados de los puntos críticos de medición. La salida del modelo computacional proporciona los indicadores estadísticos y espectrales se muestra en la Fig. 3.7.

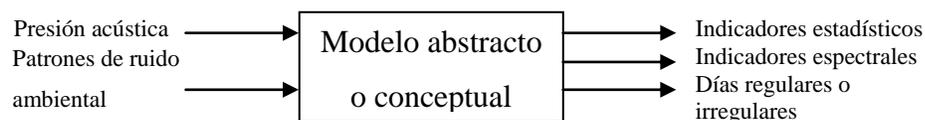


Fig. 3.7 Modelo computacional



En la Fig. 3.8 se muestra el diagrama a bloques del modelo computacional propuesto, en la parte superior de la figura se encuentran las secciones que componen al modelo computacional, donde cada cuadro representa un módulo funcional que se encuentra conectado mediante flechas que indican la dirección del flujo de datos. La primera fase comprende al transductor utilizado para la adquisición de las señales de ruido ambiental. Antes de que las señales puedan ser utilizadas en la etapa de procesamiento, un módulo acondicionador amplifica las señales obtenidas en volts que posteriormente se convierten a pascales y se aplica un filtro de ponderación A o C de manera que puedan ser utilizadas en etapas posteriores del modelo computacional.

La etapa de procesamiento consta de cuatro módulos funcionales en los que se calcula inicialmente el percentil L10, L50 y L90 que indica que niveles de ruido ambiental se encuentran presentes un 10, 50 y 90 por ciento del tiempo de medición, la transformada de Fourier permite la observación de las componentes de frecuencia de los señales de ruido ambiental. Para mejor observación de la percepción de altura del oído se realiza un análisis de octavas debido a que ésta proporcional al logaritmo de la frecuencia.

Los niveles sonoros continuos equivalentes registrados en la etapa de procesamiento son los mismos utilizados en la etapa de procesamiento avanzado de indicadores de ruido ambiental como entrada a la red neuronal, para la obtención de una clasificación en patrones regulares e irregulares.

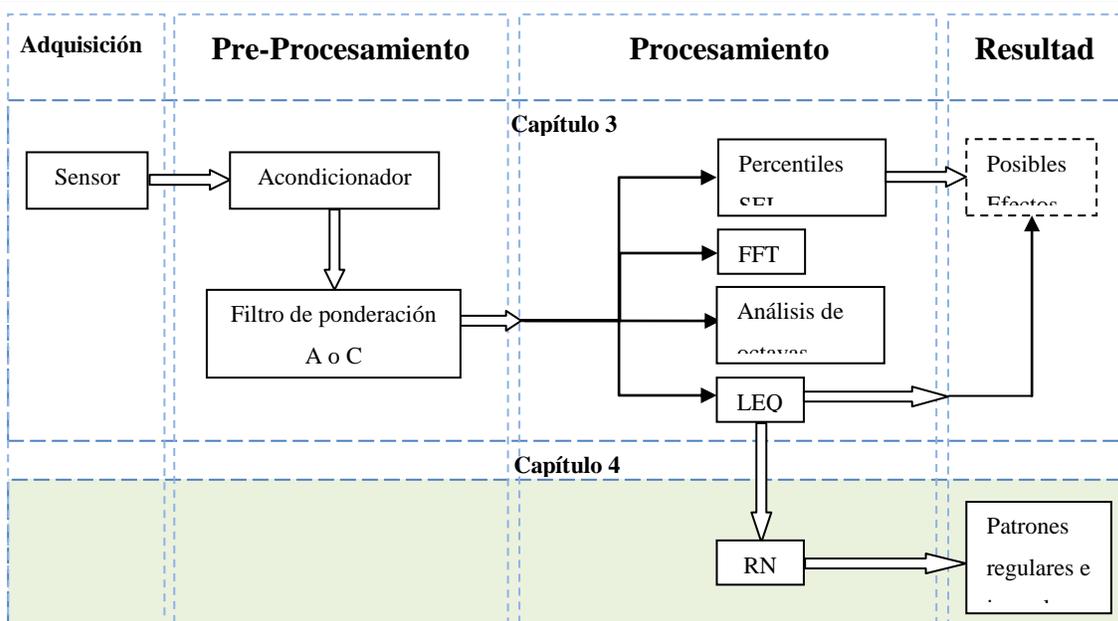
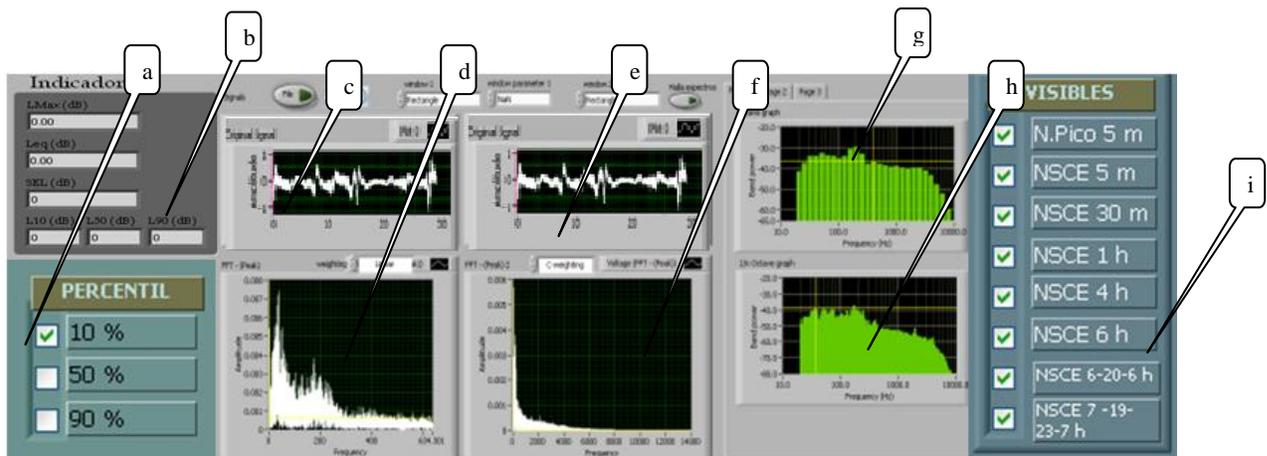


Fig. 3.8 Diagrama a bloques del modelo computacional propuesto.

El modelo computacional propuesto se conforma de dos módulos, el primero para procesamiento de indicadores estadísticos y espectrales de la información obtenida de los nodos ubicados en vialidades de la ciudad de México mostrado en la Fig. 3.9 donde se obtienen indicadores como nivel máximo nivel sonoro continuo equivalente, percentiles, análisis de octava y correcciones por componentes tonales emergentes impulsivas y de baja frecuencia.



En la Fig. 3.9 (a) : Fig. 3.9 Módulo para procesamiento estadístico y espectral. 90 de la señal, (b) se muestra el nivel máximo de la señal en decibeles, el nivel equivalente y el nivel de



exposición al sonido, (c) la señal original a partir de la cual se extraen datos posteriores de procesamiento, (d) muestra la señal después de aplicársele un filtro de ponderación A, (e) muestra la señal original en decibeles, (f) permite observar el cambio de la señal después de aplicado un filtro de ponderación C, (g) análisis de la señal original mediante bandas de octava, (h) análisis de la señal en frecuencias de un tercio de octava, (i) se muestra la capacidad de hacer visible la medición del nivel sonoro continuo equivalente cada 5 minutos, media hora, una hora, 4 horas o cada 6 horas, además del nivel pico cada 5 minutos del nivel sonoro continuo equivalente.

En la Fig. 3.10, se muestran los niveles sonoros continuos equivalentes, en la parte superior izquierda puede observarse el número de nodo del cual se han tomado las mediciones, cada columna está etiquetada en la parte superior con numeración para intervalos de cada hora y cada fila representa un patrón diario cuya fecha de adquisición de las señales de ruido ambiental se observa en la primer columna. Los distintos niveles se clasifican en tonos de colores conforme el nivel de sonoridad registrado.

El nodo dos ubicado en calle Moneda esquina Seminario muestra un comportamiento regular para varios días en patrones de 25 horas por día, donde la última columna corresponde a la medición efectuada para el día siguiente, lo que permite la observación simultánea de la norma del Distrito Federal y la norma ISO puesto que la primera establece intervalos de medición para los que se divide el día en dos periodos de las 06:00 a las 20:00 y 20:00 a las 06:00 h y la segunda divide tres franjas horarias: diurna (de 7:00 a 19:00), período de la tarde (19:00 a 23:00) y nocturna (23:00 a las 7:00).



Fig. 3.10 Nivel sonoro continuo equivalente cada hora.

Los niveles sonoros continuos equivalentes de las mediciones obtenidas de los puntos de medición se identifican en colores como se especifica en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Equivalencia de colores a nivel sonoro

Color	Nivel sonoro
	>85 dB
	75 a 80 dB
	70 a 75 dB
	65 a 70 dB
	60 a 65 dB
	55 a 60 dB
	50 a 55 dB
	0 a 50 dB



En la Fig. 3.11 se muestran las mediciones del nivel sonoro continuo equivalente para el nodo ubicado frente a Bellas Artes, registrado en dos semanas del 5 al 18 de Agosto de 2009.



Fig. 3.11 Nivel sonoro continuo equivalente cada hora nodo 9.

Los niveles sonoros pueden visualizarse en un gráfico tridimensional como se muestra en la Fig. 3.12 donde los datos son interpolados mediante una degradación de colores para una mejor apreciación del comportamiento de las mediciones del nivel sonoro continuo equivalente.

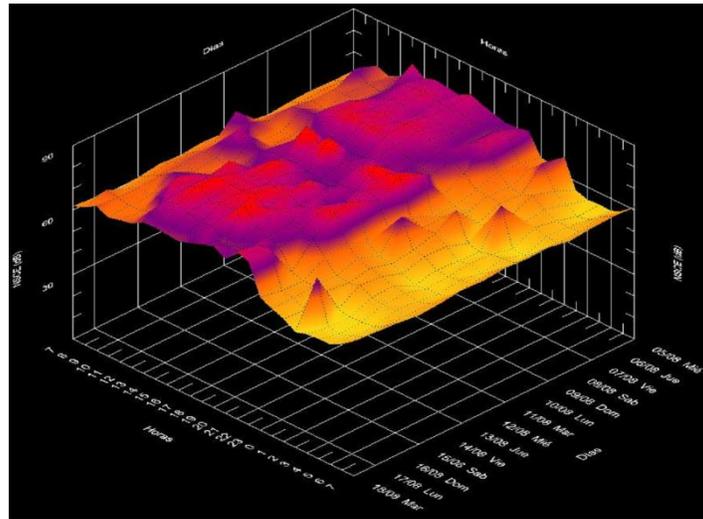


Fig. 3.12 Gráfica 3D nodo 2.

Todos los puntos de monitoreo deberán almacenar datos representativos de los niveles diarios del punto de medición por lo que se han colocado estratégicamente para objetivo de la investigación, como se muestra en la Fig. 3.13. El esquema presenta el diagrama de la comunicación de los nodos. Se encuentran conectados vía internet 3G al Centro de Control de donde son adquiridos los datos para procesamiento avanzado de la información.



Fig. 3.13 Conexión de nodos.

El módulo para análisis avanzado descrito en la Fig. 3.14 tiene como entrada la información en decibeles del comportamiento histórico del ruido a partir del cual se obtendrán patrones representativos que serán clasificados mediante el uso de una red neuronal en patrones regulares o irregulares.

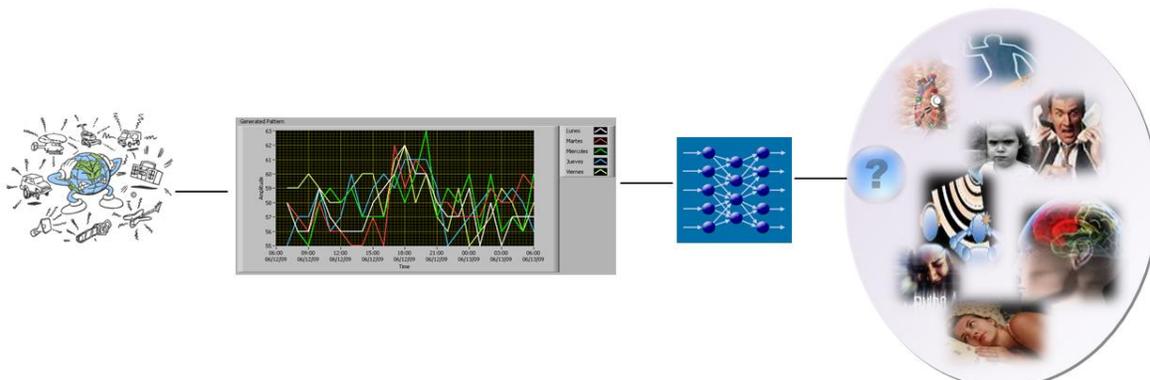


Fig. 3.14 Módulo para procesamiento avanzado de indicadores de ruido.

### 3.7 Adquisición y preprocesamiento de la señal

#### 3.7.1 Adquisición y conversión a pascales

El sistema de adquisición de señales permite la obtención y visualización de la señal original de un archivo o directamente desde la tarjeta de adquisición de datos como se muestra en la Fig. 3.15 de una señal de ruido producido por circulación vial.

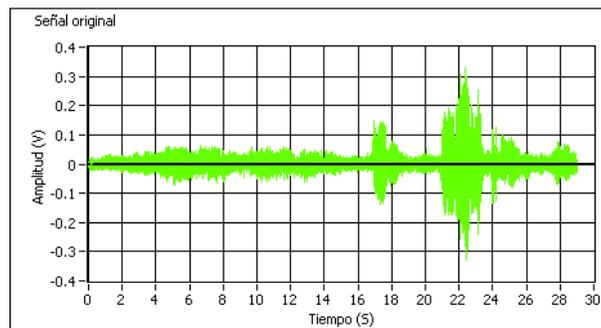


Fig. 3.15 Señal original

La Fig. 3.16 presenta la señal de la Fig. 3.15 convertida a micropascales y con filtros de ponderación A y C respectivamente. La conversión a pascales (micropascales) se realiza usando las expresiones siguientes.

$$y = \frac{x \cdot 1000}{c} \cdot 1000000 \quad (3.1)$$

Donde:  $x$  es la señal en volts entregada por el conjunto micrófono- preamplificador,  $c$  representa el valor de calibración del canal de entrada continuo formado por el conjunto micrófono, preamplificador y tarjeta de adquisición de datos en mV/Pa y por último la señal en micropascales se representa por  $y$ .

Para el cálculo de los índices acústicos en decibeles la expresión 3.1 se divide entre  $20\mu\text{Pa}$  que es la presión acústica de referencia o umbral auditivo, de forma tal de que cero decibeles corresponda al umbral auditivo.

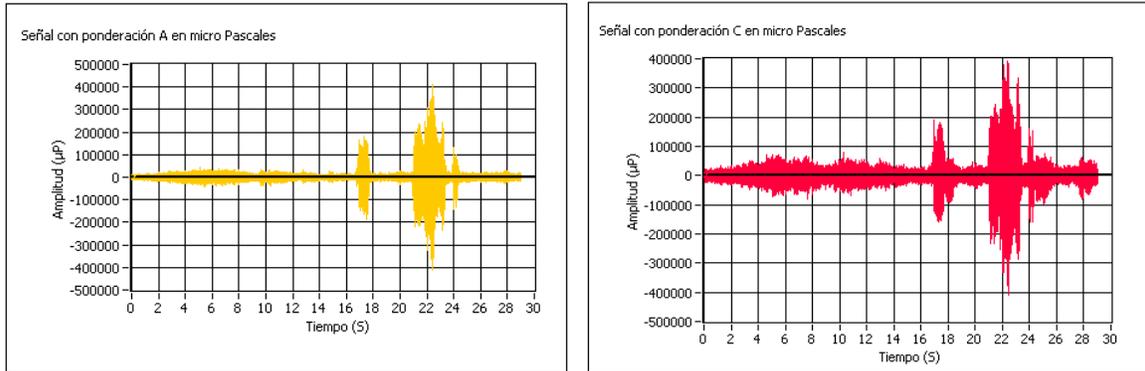


Fig. 3.16 Señal en micropascales. Izquierda: señal con ponderación A, derecha: señal con ponderación C.

### 3.7.2 Filtros de ponderación

El filtro de ponderación A fue creado para modelar la respuesta del oído humano a intensidades bajas. Actualmente casi todas las leyes y reglamentos lo utilizan para delimitar los niveles aceptables de ruido en México la NOM-036-SCT3-2000. Los niveles de sonido ponderados con el filtro A se denominan decibelio A dB(A).

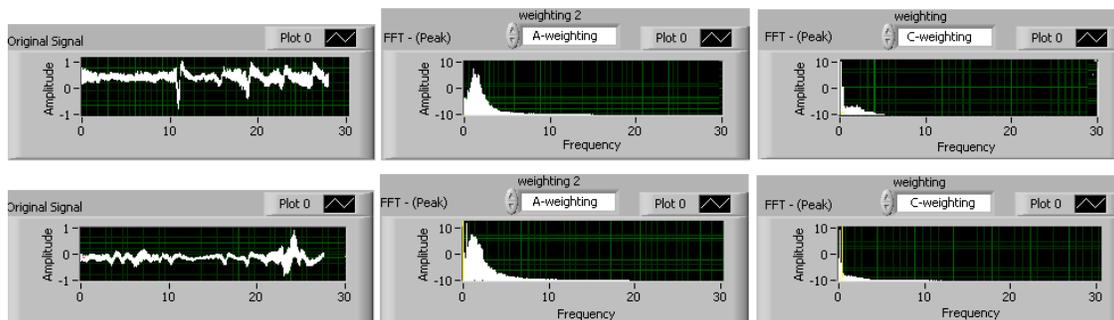


Fig. 3.17 Comparativo de señales ponderadas. Izquierda: señal original; centro: señal con ponderación A; derecha: señal con ponderación C.



### 3.8 Análisis estadístico

#### 3.8.1 Percentiles (110, 150, 190)

Es el nivel sonoro que es superado determinado porcentaje de tiempo [Crocker, 1998]. Por ejemplo, el  $L_{90}$  es el nivel sonoro que fue superado el 90% del tiempo de la medición.

Para calcularlo, se tiene que obtener el  $L_p$  de cada punto y ordenar esos valores de mayor a menor.

$$L_p = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0} (dB) \quad (3.2)$$

Donde  $p$  es la presión acústica instantánea dada en  $\mu\text{Pa}$  y  $p_0$  es la presión acústica de referencia =  $20 \mu\text{Pa}$ .

Después se aplica la siguiente fórmula.

$$L_{px} = n \cdot \left( \frac{\text{percentil}}{100} \right) \quad (3.3)$$

Donde  $n$  es la cantidad de muestras del arreglo que se toma, es decir, en caso de necesitar el percentil 90, éste será el  $L_p$  que se encuentra en la posición  $L_{px}$  del arreglo ordenado de mayor a menor.



### 3.8.2 Leq

Es el nivel de energía sonora que tendría un ruido constante en el mismo período de tiempo que el ruido medido. El  $L_{eq}$  representa la energía sonora que contiene el ruido en un determinado tiempo.

$$L_{eq} = 10 \log \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right] (dB) \quad (3.4)$$

Donde  $p(t)$  es la presión sonora en función del tiempo y  $T$  es el período de la medición.

Se presenta una sección del diagrama de bloques de su programación en LabView en el anexo A.

### 3.8.3 Sel

Es el nivel sonoro que, si se mantiene constante durante un segundo, tendría la misma energía que el evento sonoro medido.

$$SEL = 10 \log \left[ \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{T_{ref}} 10^{\frac{L_p(t)}{10}} dt \right] (dB) \quad (3.5)$$

Donde  $T_{ref}$  es el tiempo de referencia de 1 segundo,  $t_1$  es el tiempo de inicio de la medición del evento y  $t_2$  es el tiempo de finalización de la medición del evento de ruido.

### 3.9 Análisis espectral

#### 3.9.1 FFT

El análisis en el dominio de la frecuencia es una de las técnicas más usadas en el análisis de señales, obtenido de la DFT (Discrete Fourier Transform). Esta técnica permite obtener las componentes espectrales del ruido y de esta manera, poder analizar a la señal en el dominio de la frecuencia como se muestra en la Fig. 3.18.

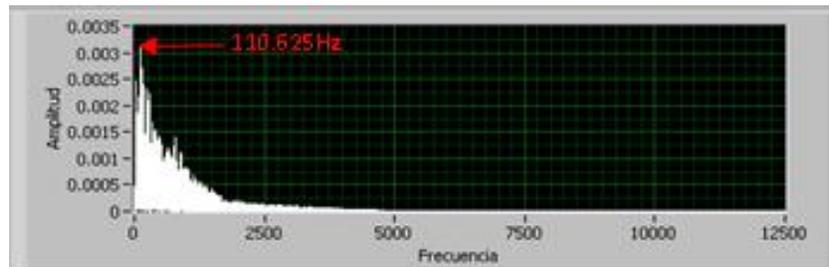


Fig. 3.18 Señal y FFT

La DFT se puede obtener mediante la fórmula siguiente:

$$f_j = \sum_{k=0}^{n-1} x_k e^{-\frac{2\pi i}{n}jk} \quad j = 0 \dots n - 1 \quad (3.6)$$

La secuencia de  $n$  números complejos  $x_0, \dots, x_{n-1}$  se transforma en la secuencia de  $n$  números complejos  $f_0, \dots, f_{n-1}$  según la fórmula (3.6), siendo  $e$  la base de los logaritmos naturales,  $i$  la unidad imaginaria ( $i^2 = -1$ ) y  $\pi$  el número pi.



Una FFT (Fast Fourier Transform) calcula la DFT (de orden  $N^2$ ) y produce exactamente el mismo resultado que si se evalúa la DFT directamente, la única diferencia es que la FFT es mucho más rápida, este algoritmo requiere  $N \log_2(N)$  operaciones.

### 3.9.2 Análisis de 1/n octavas

El mecanismo de audición humano es sensible a proporciones de frecuencias más que a frecuencias. La frecuencia de un sonido determinará su altura como percibido por un auditor y una proporción de dos veces una frecuencia se escucha como un cambio de altura de una octava, sin que importe cuales fueran las frecuencias. Si por ejemplo se sube un sonido de 100 Hz a 200 Hz, su altura se subirá una octava. El hecho es válido con tanta precisión en un rango importante de frecuencias, que es conveniente definir una octava como una proporción de frecuencias de dos, aunque la octava misma es una medida subjetiva de cambio en la altura de un sonido.

El análisis de octavas se realiza por medio de filtros pasa banda, los cuales tienen las frecuencias centrales  $f_c$  en 31.5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz. Para cada uno de ellos al ser filtros pasa banda requieren dos frecuencias que se obtienen a partir de la fórmula siguiente:

$$f_{c1} = \frac{f_c}{\sqrt{2}} \quad (3.7)$$

$$f_{c2} = f_c \sqrt{2} \quad (3.8)$$

Siendo  $f_{c1}$  la frecuencia de corte inferior y  $f_{c2}$  la frecuencia de corte superior para cada una de las bandas.



Cuando el análisis que se realiza es de 1/n octava, entonces para calcular las frecuencias centrales de las bandas intermedias se aplica lo siguiente:

- Si N es par

$$f_i = 1000 \times 2^{ib} \quad (3.9)$$

- Si N es impar.

$$f_i = 1000 \times 2^{\frac{(i+1)b}{2}} \quad (3.10)$$

Donde  $f_i$  es la frecuencia central del filtro i-esimo expresado en Hz,  $i$  indica el número de la banda, cuando  $f_0 = 1$  KHz, que es la frecuencia de referencia, y  $b$  es el tipo de análisis de banda 1 para el análisis de octava, 1/3 para el análisis de 1/3 de octava, 1/6 para 1/6 de octava, 1/12 para 1/12 de octava y 1/24 para 1/24 de octava.

### 3.10 Posibles efectos en la salud

Tabla 3.5 Afecciones ocasionadas por el ruido.

Efecto	Frecuencias causantes	Nivel de presión sonora	Tiempo de Exposición
Desplazamiento de Umbrales Auditivos y Pérdida Auditiva [Kryter, 1985; Berglund et al, 1999; Harris, 1995]	3000 - 6000 Hz	80 dB	Meses
Dolores en el Oído [Berglund et al, 1995; Kryter, 1985]	2 - 8000 Hz	140 dB	Segundos
Molestias en el Oído [Berglund et al, 1995; Kryter, 1985]	50 - 8000 Hz	110 dB	Segundos



Interferencia en la Comunicación [Berglund et al, 1999; Kryter, 1985]	100 - 4000 Hz	50 dB	Minutos
Interferencia en la Comunicación [Berglund et al, 1999; Kryter, 1985]	30 - 100 Hz	90 dB	Minutos
Reducción del Rendimiento [Recuero, 1994]	2 - 2000 Hz	140 dB	Minutos
Enfermedad Vibroacústica [Alves et al, 2000]	< 500 Hz	90 dB	Años
Incremento del Pulso [Kryter, 1985]	50 Hz	128 dB	Segundos
Efectos Cardiovasculares [Berglund et al, 1999]	< 500 Hz	90 dB	Años
Variación de Frecuencia Respiratoria [Berglund et al, 1995; Kryter, 1985]	0.5 - 100 Hz	70 dB	Segundos
Molestias Estomacales [Harris, 1995]	800 Hz	80 dB	Segundos
Cambios Endocrinos [Berglund et al, 1995; Kryter, 1985]	3000 - 4000 Hz	80 dB	Días
Tos y Ahogamiento [Kryter, 1985]	60 a 73 Hz	80 dB	Segundos
Efectos en la Vista (Vibración del campo visual) [Recuero, 1994, Kryter, 1985]	4 a 800 Hz	110 dB	Segundos
Vibraciones en el Cuerpo [Recuero, 1994]	4 a 100 Hz	105 dB	Segundos
Estrés [Ostrosky, 2001]	Todo el espectro	105 dB	Minutos
Alteración del Sueño [Michaud, 2007; Knipschild, 1977]	Desconocida (se relaciona con el ruido de aviones)	45 dB	10 - 15 eventos por noche
Hipertensión [Knipschild, 1977; Ostrosky, 2001]	Desconocida (se relaciona con el ruido de aviones)	50 dB	Años



---

### 3.11 Conclusiones del capítulo

Las señales de ruido ambiental muestreadas a 50 KHz Proporcionan información de frecuencias de 0 a 12.5 KHz con las ponderaciones A y C por lo que es suficiente muestrear a 25 KHz donde encontraremos la información requerida para procesamiento.

Los sonidos que el ser humano pueda percibir son mascarables mediante otros sonidos en determinada frecuencia lo que permite que los sonidos sean percibidos con menor daño aparente para el oído humano.

Los daños que el ruido puede causar al ser humano varían de acuerdo a la frecuencia a la que se esté expuesto, nivel sonoro, duración de los eventos y la percepción del individuo, siendo esta última una característica no medible pues corresponde al agrado de la persona, causando desde pequeñas molestias hasta daños permanentes en el oído.

La obtención del nivel sonoro continuo equivalente presente en una señal de ruido ambiental permite la identificación del daño que puede causar al ser humano, los sonidos encontrados.

El procesamiento de la señal original mediante filtro de ponderación A, adquiridas de los puntos de medición, proporcionan información sobre los niveles de ruido percibidos por el oído y que pueden ser evaluados mediante los indicadores acústicos programados.



---

## **CAPÍTULO 4. PROCESAMIENTO NEURONAL DE RUIDOS URBANOS PARA ZONAS CRÍTICAS UBICADAS EN EL DISTRITO FEDERAL**

### **4.1 Introducción**

Una problemática ambiental mundial de gran importancia dentro de los últimos tiempos, es el ruido ambiental debido a planificaciones urbanas. A partir de esta problemática se detecta la necesidad de optimizar el tiempo de muestreo para la determinación de tramos y puntos de medición. El escenario experimental correspondió a la zona centro de la Ciudad de México. En la que se analizó el comportamiento del transporte, reuniones sociales, eventos y actividades de los habitantes. De estos análisis se definieron los tramos de medición, los horarios y el tiempo de muestreo.

La generación de patrones pseudoaleatorios partiendo de la observación de patrones reales adquiridos de los nodos de medición ubicados en la zona centro de la Ciudad de México proporciona información sobre los niveles de contaminación por ruido mostrando un comportamiento repetitivo de acuerdo a la hora del día en que se observa la medición.

El análisis de señales de ruido ambiental mediante una red neuronal permite la clasificación en patrones normales e irregulares en dependencia del nodo analizado. Los puntos de medición presentan variaciones coincidentes con el día de la semana lo que permite la identificación del nodo que se analice.



## 4.2 Ubicación de nodos

Las mediciones adquiridas de los nodos proporcionan información similar en periodos de siete días a consecuencia de las actividades cotidianas que desempeñan las personas, sin embargo, los niveles registrados varían dependiendo de la ubicación de los nodos, los niveles más altos se registran en lugares donde el comercio y la concurrencia es mayor.

Los puntos de medición se han ubicado en la delegación Cuauhtémoc de la ciudad de México (ver tabla 4.1), a una altura de 2 m, se han seleccionado de acuerdo a características como son: avenidas con tránsito vehicular constante, avenidas principales, frente a lugares concurridos o comercios informales. Lo que permite una descripción y comparación de los niveles sonoros producidos en diversos puntos de la Ciudad de México además de la identificación de las fuentes contaminantes principales.

Tabla 4.1 Ubicación de nodos DF.

Nodo	Ubicación	Tipo de zona
0	Isabel la Católica Esq. Tacuba	Residencial de tráfico vehicular elevado
1	Palma Esq. 16 de Septiembre	Comercio formal y tráfico vehicular elevado
2	Moneda Esq. Seminario	Actividades sociales y culturales
3	Corregidora Esq. Pino Suárez	Actividades sociales, culturales y tráfico elevado
4	República del Salvador Esq. Pino Suarez	Actividades comerciales formales y tráfico vehicular elevado
5	Pino Suarez Esq. José María Izazaga	Actividades comerciales informales y tráfico vehicular intenso
6	República del Salvador	Actividades comerciales formales y tráfico vehicular elevado



	Esq. 5 de Febrero	
7	República de Uruguay Esq. Isabel la Católica	Actividades comerciales formales y tráfico vehicular elevado
8	Meave Esq. Eje Central	Actividades comerciales semi-formales numerosas e intenso tráfico vehicular
9	5 de Mayo Esq. Eje Central	Intenso tráfico vehicular por varias vías, control de tráfico vehicular intenso mediante agentes oficiales, y espacio cultural de gran importancia

Se utilizará el comportamiento del ruido ambiental durante 25 horas contadas desde las 6:00 am hasta las 7:00 am del próximo día, de manera que tanto la norma del Distrito Federal como la norma ISO puedan ser evaluadas, así como semanalmente pues en general el comportamiento es similar para todas las semanas.

La selección de los puntos de medición se lleva a cabo con la determinación de tramos acústicamente homogéneos, es decir, donde los niveles de ruido no varíen en más de 5 dBA, para cumplir con dichos requerimientos técnicos se debe estudiar las características urbanas y de flujo presentes en la vía. Analizando de esta forma el comportamiento temporal del ciclo diario característico de la vía y estabilización del nivel continuo equivalente, obteniéndose, el tiempo mínimo de muestreo para los periodos de mayor representatividad temporal.

#### **4.3 Patrones normales e irregulares**

Los patrones de ruido por días considerados como normales o regulares, son aquellos que muestran un comportamiento similar todos los días, es decir, si los niveles de ruido



ambiental aumentan o disminuyen ligeramente y permiten la agrupación por días de acuerdo a los nodos.

Para mejor entrenamiento de la red neuronal se han clasificado los nodos en grupos, lo que permite que más de un nodo pueda utilizar los pesos y vías del entrenamiento de la red neuronal para clasificación de patrones en regulares e irregulares.

En la Fig. 4.1 se observa un comportamiento de días regulares del nodo 0, las mediciones del nivel sonoro continuo equivalente de ruido ambiental en el período de lunes a jueves son muy cercanas en los intervalos horarios de acuerdo a la norma ISO.

	6-20 h	20-6 h	7-19 h	19-23 h	23-7 h
21/09/2009 (Lunes)	73	68	73	73	66
22/09/2009 (Martes)	73	66	73	71	63
23/09/2009 (Miérc.)	74	67	74	73	64
24/09/2009 (Jueves)	73	69	73	74	67
25/09/2009 (Viernes)	74	70	74	72	69
26/09/2009 (Sab.)	74	69	75	73	68
27/09/2009 (Dom.)	70	66	70	70	62

Fig. 4.1 Patrones regulares de ruido.

Los cambios que se observan al realizar una clasificación de acuerdo a las normas ISO no proporcionan información detallada sobre el proceso de cambio en los niveles sonoros como se observa en la Fig. 4.2 donde se aprecia el intervalo cada hora del nodo 0, lo que permite una clasificación de grupos diferente y más adecuada para propósitos del análisis de los efectos nocivos a la salud, en primera instancia de lunes a viernes en diversa forma que para el domingo ya que en este día los niveles sonoros no exceden los 74 decibeles



	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-0	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
21/09/2009 (Lunes)	.	69	71	72	74	75	71	72	72	71	72	73	74	75	75	74	69	68	65	67	68	66	66	65	67
22/09/2009 (Martes)	.	70	71	73	73	72	72	72	76	75	74	75	74	72	71	72	69	66	66	62	64	62	60	62	63
23/09/2009 (Miérc.)	.	70	71	72	72	72	72	73	74	75	75	76	74	75	75	72	69	67	67	64	62	64	60	61	65
24/09/2009 (Jueves)	.	69	72	73	73	73	74	75	74	72	74	71	73	71	77	71	72	71	73	68	62	59	65	59	62
25/09/2009 (Viernes)	.	69	72	72	72	72	73	72	76	74	74	75	77	73	72	71	71	72	68	70	71	70	66	63	68
26/09/2009 (Sab.)	.	69	73	73	73	74	74	74	75	76	76	76	75	74	75	73	70	69	68	70	69	68	67	63	64
27/09/2009 (Dom.)	.	64	64	74	66	67	69	67	73	70	71	70	71	72	70	70	68	69	65	63	63	60	59	58	64

Fig. 4.2 Patrones regulares cada hora nodo 0.

La diferencia de mediciones en los nodos permite la creación de grupos de patrones diferidos de acuerdo al día de la semana, en la Fig. 4.3 se observa un comportamiento similar para el intervalo lunes a miércoles que podría ser clasificado como grupo 1, el jueves y el viernes presentan un niveles más elevados de ruido en comparación con los encontrados de en el grupo 1 y se consideraría como un grupo independiente, el grupo 2. El sábado muestra niveles sonoros distintos a viernes y domingo formando así un tercer grupo, domingo presenta niveles sonoros menos ruidosos asignándose al grupo 4 para el nodo 2.

	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-0	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
27/07/2009 (Lunes)	.	63	64	70	65	75	69	70	73	72	70	71	75	72	71	69	73	63	60	57	69	66	52	57	57
28/07/2009 (Martes)	.	60	67	69	70	71	72	73	69	70	74	72	73	72	68	69	78	73	60	60	55	56	55	55	57
29/07/2009 (Miérc.)	.	62	64	68	65	67	72	74	75	72	73	75	73	73	72	77	77	70	70	66	56	54	57	54	57
30/07/2009 (Jueves)	.	62	66	67	66	66	74	78	77	76	75	74	77	76	73	78	81	70	64	60	57	55	57	56	57
31/07/2009 (Viernes)	.	61	64	68	65	69	71	74	77	78	80	76	78	75	71	77	79	73	70	62	59	59	56	57	57
01/08/2009 (Sab.)	.	60	63	69	66	68	75	77	78	77	76	76	76	77	75	77	80	69	61	69	59	57	56	57	57
02/08/2009 (Dom.)	.	59	62	66	64	71	75	77	76	77	75	75	76	77	73	67	64	64	62	59	57	71	55	54	60

Fig. 4.3 Grupos de patrones nodo 2.

En el nodo 6 los grupos se pueden agrupar de lunes a jueves para el primer grupo, pues los niveles de ruido se encuentran entre los 60 a 75 decibeles con un nivel de exposición sobre los 74 decibeles de una a tres horas, el grupo 2 se asigna a los patrones de ruido del viernes puesto que se sobrepasan los 75 decibeles en la mayor parte de las horas de la tarde, se asigna un grupo adicional para sábado puesto que los niveles en este nodo llegan a tomar



valores alrededor de los 80 decibeles y finalmente el grupo 4 conformado únicamente por domingo con mediciones de ruido que permanecen bajo 71 decibeles y llegan a los 70 decibeles después que el resto de los días .

	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-0	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
03/08/2009 (Lunes)	.	66	71	71	72	71	73	72	72	72	72	75	73	74	73	70	69	67	65	65	64	59	58	59	63
04/08/2009 (Martes)	.	67	71	71	72	72	71	72	72	72	75	74	73	75	74	74	69	67	64	62	60	61	57	60	64
05/08/2009 (Miér.)	.	68	70	72	71	73	73	73	72	73	73	72	73	75	71	72	69	67	64	62	67	62	60	60	66
06/08/2009 (Jueves)	.	67	70	71	78	72	72	72	72	74	74	75	74	74	76	74	69	71	66	63	62	76	62	63	64
07/08/2009 (Viernes)	.	67	77	71	71	73	76	78	77	75	75	77	75	73	73	72	71	68	68	66	65	73	65	63	61
08/08/2009 (Sab.)	.	65	68	69	71	73	75	77	80	81	80	80	79	81	75	74	71	67	66	65	64	63	61	61	61
09/08/2009 (Dom.)	.	63	67	68	70	69	70	71	73	71	71	70	70	69	68	70	66	65	64	62	58	59	57	58	62

Fig. 4.4 Grupos de patrones nodo 6.

#### 4.4 Análisis por día

En la Fig. 4.5 se muestra el comportamiento de los lunes para el nodo 0, se observa que la variación de decibeles es similar en cada uno de ellos.

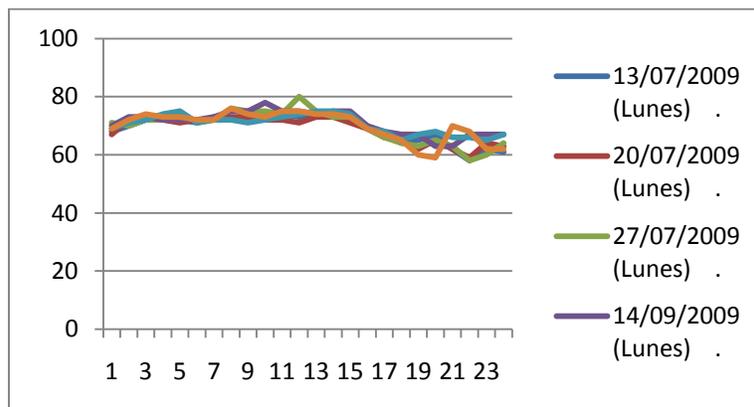


Fig. 4.5 Análisis del lunes nodo 0.



Algunos patrones presentan comportamientos irregulares, como se muestra en la Fig. 4.6 donde se observan valores únicamente de fechas que coinciden con martes para el nodo 0 que son clasificados por la red neuronal para su análisis detallado posterior.

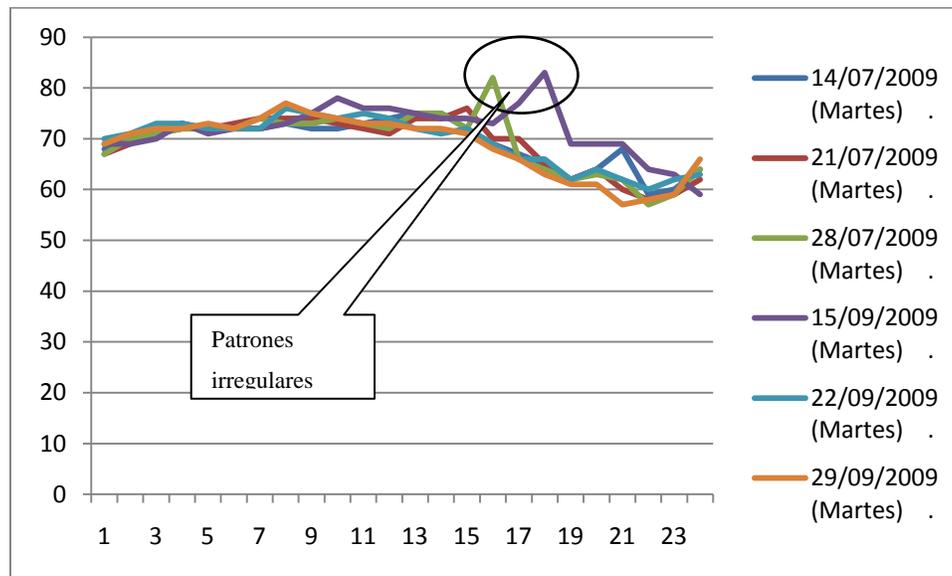


Fig. 4.6 Análisis del martes nodo 0.

#### 4.5 Patrones generados

Los patrones generados de manera pseudoaleatoria tomando como referencia los patrones en un nodo por día y divididos en patrones normales e irregulares se realiza mediante un programa en LabView considerando que Los patrones son distintos para cada nodo, día de la semana y grupo de acuerdo al comportamiento de cada punto de medición.

El ciclo diario de niveles de ruido corresponde a cada nodo observándose que lunes presenta un remanente del fin de semana, comenzando la actividad semanal con una mayor



lentitud. Por otra parte viernes tiene una mayor duración en cuanto al flujo de vehículos, esto por el comienzo de las actividades nocturnas de fin de semana.

La actividad laboral comienza alrededor de las 07:00 hrs., alcanzando un máximo de ruido a las 08:00 hrs. Posteriormente, los niveles de ruido comienzan a decaer paulatinamente hasta las 10:00 hrs. manteniéndose constantes hasta las 18:00 hrs., cuando comienzan nuevamente a aumentar presentando un descenso en la actividad alrededor de la 21:00 hrs.

La herramienta de generación de patrones permite seleccionar los días de la semana que se deseen observar mediante los botones de activación mostrados en la Fig. 4.7 para una mejor percepción del comportamiento de los patrones por día. Se generan 25 patrones, uno por cada hora, en niveles de decibeles que pueden ser almacenados en un archivo para su posterior utilización como entrenamiento de una red neuronal para su clasificación como patrones regulares o irregulares de los diferentes nodos seleccionables también en el programa.

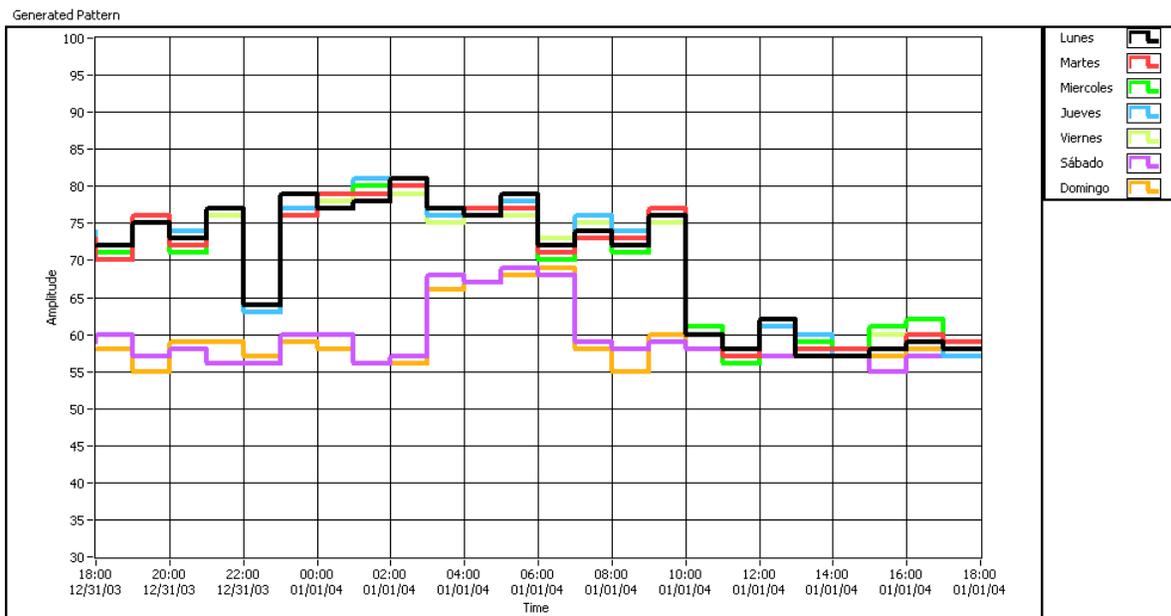


Fig. 4.7 Patrones de ruido generados



Los patrones generados varían de acuerdo al nodo que se seleccione, los niveles de ruido para el nodo cinco y ocho son más elevados que para el resto de los nodos.

#### 4.6 Modelo neuronal

El reconocimiento de patrones de ruido nocivos a la salud y al confort mediante una red neuronal permitirá que un observador tenga información más simplificada de los niveles de ruido ambiental y sus posibles afecciones a la salud y al confort.

El modelo neuronal propuesto consta de 25 neuronas de entrada, una para cada medición horaria, una capa de salida con dos neuronas para clasificación de patrones regulares o irregulares y una capa oculta con 20 neuronas como se muestra en la Fig. 4.8.

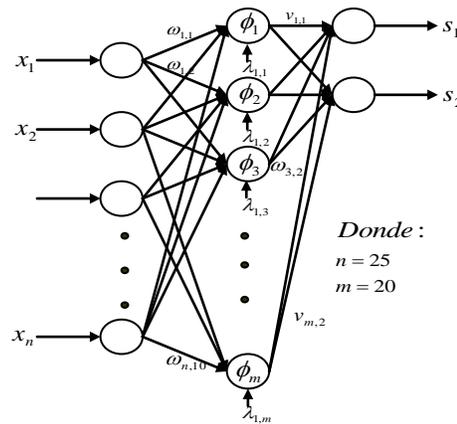


Fig. 4.8 Modelo de red neuronal



## 4.7 Entrenamiento de la red neuronal

El algoritmo de entrenamiento de la red neuronal con 25 neuronas de entrada se llevo a cabo para 4 nodos con los patrones reales y la validación con patrones generados por el programa de generación de patrones pseudoaleatorios para 4 de los nodos con mayor cantidad de información recabada. En la Fig. 4.9 se muestra el desempeño del entrenamiento de la red neuronal para el nodo 0 obtenido de Matlab 2008.

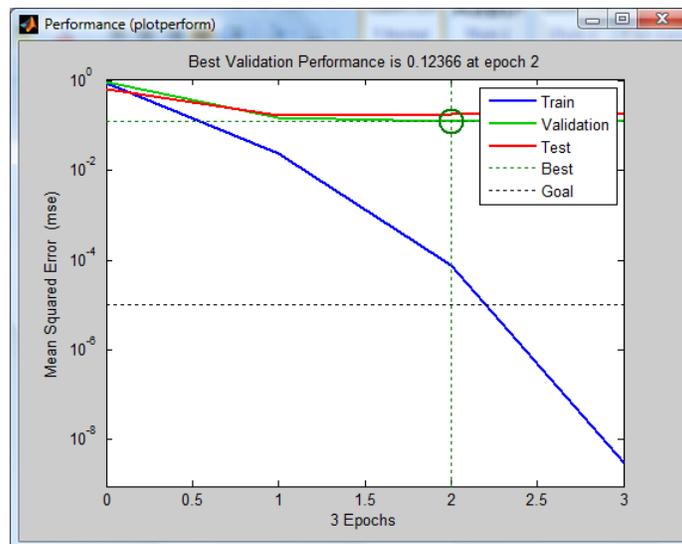


Fig. 4.9 Desempeño de red neuronal Nodo 0

El entrenamiento de la red neuronal se lleva a cabo para un máximo de 250 épocas como se muestra en la Fig. 4.10.

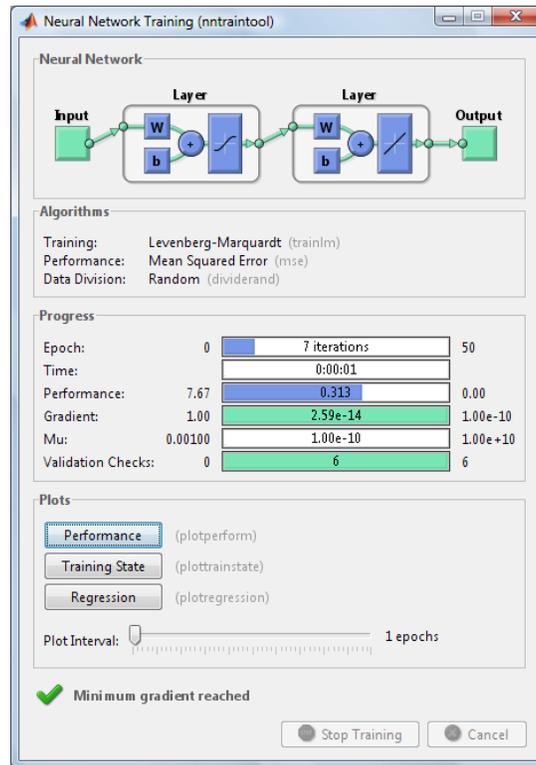


Fig. 4.10 Entrenamiento de neuronal Nodo 0

El porcentaje de reconocimiento de la red para patrones generados de manera pseudoaleatoria a partir del entrenamiento de la red neuronal con patrones reales de medición es del 75% para el nodo 0, variando para cada grupo de patrones considerado.

Tabla 4.2 Porcentaje de reconocimiento de la red neuronal.

Nodo	Reconocimiento de red neuronal (%)
0	74
1	76
2	75
3	90
4	68

5	70
6	73
7	76
8	78
9	70

En la gráfica 4.11 pueden observarse los porcentajes de reconocimiento para los nodos, los cuales fueron obtenidos de los patrones de ruido obtenidos a la fecha, los cuales varían conforme la información de los nodos sobre los niveles de ruido ambiental se incrementan ya que los patrones generados de manera pseudoaleatoria utilizados para el entrenamiento de la red neuronal parten de ellos.

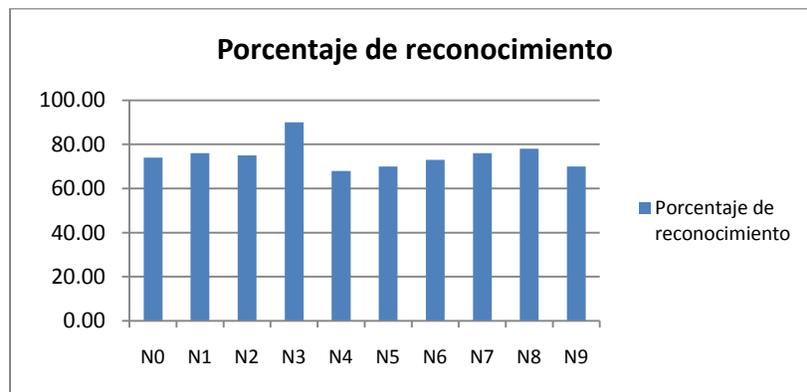


Fig. 4.11 Gráfica de porcentajes de reconocimiento

La clasificación de patrones en grupos ayuda a un mejor reconocimiento de la red neuronal, los patrones de ruido se clasifican mediante un programa en Matlab estableciendo límites máximos y mínimos de los patrones de ruido. En la Fig. 4.12 se muestra en verde los patrones de ruido originales generados y en rojo las líneas límite entre las que se considera un patrón regular.

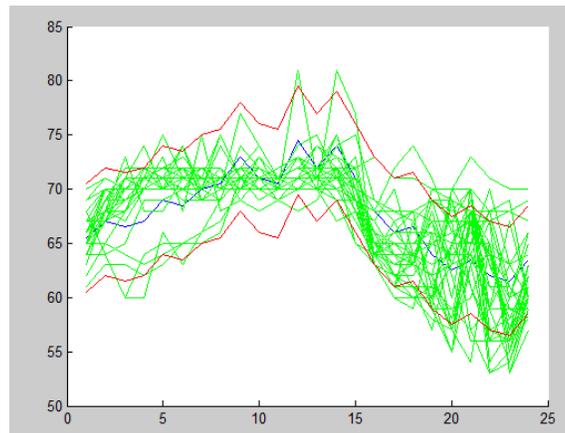


Fig. 4.12 Clasificación de patrones para entrenamiento.

#### 4.8 Conclusiones del capítulo

En dependencia de la ubicación de los nodos y de la actividad rutinaria y laboral pueden observarse niveles sonoros similares en los diferentes puntos de medición. Se observa que el comportamiento de los niveles de ruido en cada nodo depende tanto de la hora del día como de las actividades cotidianas que se realicen en dichos puntos.

El comportamiento por día de los patrones permite la clasificación en grupos de patrones y estos a su vez la identificación de patrones irregulares o regulares, tomando en consideración los niveles sonoros usualmente registrados por cada nodo.

La red neuronal permite identificar si un patrón es regular o irregular en un nodo específico mediante un patrón de 25 lecturas correspondientes a cada hora del día. La topología de red es igual para todos los nodos variando de 75 a 78% el porcentaje de reconocimiento para los 4 grupos creados de los nodos.



## CONCLUSIONES

La realización de mediciones de ruidos urbanos en zonas críticas del Distrito Federal proporcionó la información necesaria para identificar grupos de patrones de comportamiento de los niveles sonoros continuos equivalentes presentes en cada punto de medición.

La información recibida de los nodos de medición es procesada mediante modelo computacional para el procesamiento de indicadores de ruido que consiste de un software de análisis clásico para obtener los niveles sonoros continuos equivalentes cada hora de los puntos de medición lo que proporciona información de los decibeles presentes cada 6 horas, cada 4 horas, una hora, 30 minutos o cada 5 minutos para un análisis detallado del comportamiento en decibeles.

El cálculo de niveles sonoros continuos equivalentes de acuerdo a las normas del Distrito Federal así como los percentiles  $L_{10}$ ,  $L_{50}$  y  $L_{90}$  se procesan mediante el software de adquisición de señales. Además de contar con el análisis mediante filtros de ponderación A o C de las señales adquiridas, nos brinda información detallada de los niveles sonoros presentes.

La identificación de patrones normales e irregulares mediante el módulo para el procesamiento avanzado de indicadores de ruido, permite la caracterización del comportamiento de nodos de tal manera que se pueda saber el momento en que ocurra un comportamiento distinto al usual en los puntos de medición con el objeto de identificar el día e incluso la hora del día en el que ocurrió dicho suceso.

El análisis de los niveles sonoros presentes permite la suposición de las enfermedades causadas por exposición a ruido dependiendo de la duración del suceso, la red neuronal



---

permitirá identificar el comportamiento irregular de los patrones de ruido para detectar de forma autónoma eventos sonoros que se encuentren en un rango diferente de intensidad sonora. Es por ello que se considera que la hipótesis fue demostrada siendo cumplidos satisfactoriamente los objetivos planteados para el trabajo

Con los distintos puntos de medición fijos se contará paulatinamente con una extensa base de datos de los niveles de ruido presentes en cada nodo, lo que permitirá un análisis posterior bastante completo que definirá las afecciones causadas a la salud por intensidades de ruido ambiental recientes así como de tiempo atrás.



---

## TRABAJO FUTURO

Desarrollar un módulo que permita determinar, de forma automatizada, las causas de la ocurrencia de patrones irregulares, por ejemplo informar que horas del día tuvieron comportamientos irregulares con niveles sonoros continuos equivalentes superiores o inferiores a los valores regulares, así como determinar la mayor cantidad de posibles causas que dieron como resultado tal clasificación. Estas causas pueden ser porque se produjo una mejoría en el comportamiento del ruido ambiental (disminuyen los valores de los indicadores acústicos), las emisiones sonoras son mayores o se han producido eventos no rutinarios (regulares) de diferente naturaleza en la vía pública.

Trabajar en un modelo computacional que permita reconocer patrones del ruido ambiental nocivos a la salud con las afectaciones potenciales que se producirían de continuar los niveles sonoros actuales.

Determinar las componentes independientes (fuentes sonoras) del ruido ambiental en las zonas críticas que actualmente son monitoreadas y realizar su análisis de manera individual.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Allan D. Pierce: The wave theory of sound. Acoustical society of America, NY (1995).
2. Alt, R., Wiley, S.: A generalized wave diagram for moving sources. The Physics Teacher Volumen 42. Páginas 526-527, Diciembre (2004)
3. Alves, M., Castello, N.: Vibroacoustic Disease: Need for a New Attitude Towards Noise. CITIDEP & DCEA\_FCT-UNL (2000).
4. Banks, S.: Signal Processing: image processing and pattern recognition. Prentice-Hall (1991).
5. Berglund B., Lindvall T.: Community Noise, document prepared for the World Health Organization (WHO). Center for Sensory Research, Stockholm (1995).
6. Berglund B., Lindvall T., Schwela, D.: Guidelines for Community Noise. World Health Organization (WHO). Geneva (1999).
7. Birgitta B.: Community Noise, Institute of Environmental Medicine, Stockholm. Suecia. (1995) Citado el 27 Junio (2008). [Online] Disponible de:  
<http://www.books.google.com.mx>
8. Briel & Kjaer: Measuring Sound. (2007) [citado junio 11, 2008]. Disponible de:  
<http://www.bksv.com/doc/br0047.pdf>
9. Briel & Kjaer: Ruido Ambiental. (2007) [citado junio 11, 2008]. Disponible de:  
[http://www.bksv.com/doc/environmentalnoisebooklet\\_spanish.pdf](http://www.bksv.com/doc/environmentalnoisebooklet_spanish.pdf)
10. Cortés, A.: Criterios Acústicos en el Diseño de Centros Docentes (2001). [citado junio 11, 2008]. Parte 1a, Fundamentos del ruido y su caracterización. Disponible de:  
[http://www.stee-eilas.org/dok/arloak/lan\\_osasuna/udakoikas/acust/acus2.pdf](http://www.stee-eilas.org/dok/arloak/lan_osasuna/udakoikas/acust/acus2.pdf)
11. Crocker, M.: Handbook of Acoustics. New York. Wiley (1998).



12. EEA European Environment Agency: Europe's environment: the fourth assessment. State of the environment report No.1. Copenhagen, Denmark: European Environment Agency (2007).  
Disponible de:  
[http://www.eea.europa.eu/publications/state\\_of\\_environment\\_report\\_2007\\_1/Belgrade\\_EN\\_all\\_chapters\\_incl\\_cover.pdf](http://www.eea.europa.eu/publications/state_of_environment_report_2007_1/Belgrade_EN_all_chapters_incl_cover.pdf)
13. FHWA Federal Highway Administration: Highway Traffic Noise. E.E.U.U (2003). Citado el 21 Agosto 2008. Disponible de:  
<http://www.fhwa.dot.gov/environment/htnoise.htm>
14. FTA Federal Transit Administration: Transit Noise and Vibration "Impact Assessment". Washington, DC. EE.UU (1995). [citado el 21 Agosto 2008]. Disponible de:  
[http://www.hmmh.com/rail\\_manuals01fta.html](http://www.hmmh.com/rail_manuals01fta.html)
15. García, J. L.: Procesamiento digital de señales. (2000). [citado febrero 12, 2008]. Disponible de: World Wide Web: <http://www.tijbc.com/pds/libros/libro-pds.htm>
16. Gannoruwa A., Y. Ruwanpura J.: Construction noise prediction and barrier optimization using especial purpose simulation. Department of Civil Engineering, University Drive NW, University of Calgary. Canadá (2007)
17. Gil, P., Maldonado S., Gómez H., Lafuente S., López F.: Traffic sign shape classification and localization based on the normalized FFT of the signature of blobs and 2D homographies. Dpto. de Teoría de la señal y Comunicaciones. Universidad de Alcalá, Madrid. España (2008)
18. Harris, C.: Manual de Medidas Acústicas y Control de Ruido. Mc. Graw Hill (1995)
19. Hidalgo, A., Hernández, A., Morcillo, M. A., Hernández, M. J.: Metodología para la realización de mapas de ruido. Universidad de Coimbra, Portugal (2008)
20. Hílera, J. R., Martínez, V. J.: Redes Neuronales Artificiales. Fundamentos, modelos y aplicaciones. Alfaomega Ra-Ma (1995)



21. ICBEN 2008. The 9<sup>th</sup> Congress of the international commission on the biological effects of noise: noise as a public health problem. USA (2008)
22. Jakovljevic B., Paunovic K., Belojevic G.: Road-traffic noise and factors influencing noise annoyance in an urban population. Institute for Hygiene and Medical Ecology. School of Medicine, University of Belgrade. Belgrade, Serbia (2008)
23. Johnson, D.: Infrasound, It's Sources and Effects. Seminario Latinoamericano de Acústica, Volumen I. Córdoba (1982)
24. Johnson, D.: Quantifiable Effects of Noise on Humans. Seminario Latinoamericano de Acústica, Volumen I. Córdoba (1982)
25. Kinsler, L.; et al: Fundamentos de Acústica. Limusa (1999)
26. Kogan, P.: Análisis de la ponderación "A" para evaluar efectos del ruido en el ser humano. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Ingeniería Acústica (2004)
27. Kryter, K.: The Effects of Noise on Man. Segunda Edición. Londres (1985)
28. Matlab: Neural Network Toolbox (2008). Disponible de:  
[www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf\\_doc/nnet/nnet.pdf](http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/nnet/nnet.pdf).
29. Miyara, F.: Paradigmas para la investigación de las molestias por ruido. Laboratorio de Acústica y Electroacústica. Universidad Nacional de Rosario. Buenos Aires (2001)
30. Nociones de Acústica: (2007) [citado junio 11, 2008]. Disponible de World Wide Web:  
<http://www.sinfomed.org.ar/Mains/publicaciones/acustic1.htm>
31. Pavón, I. Ambientes laborales de ruido en el sector minero de la comunidad de Madrid: clasificación, predicción y soluciones. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid (2007)



32. Pallás, R.: Adquisición y distribución de señales. Marcombo. Boixareu Editores. Barcelona (1993)
33. Pérez, H. [editor]: Advances in Audio and Speech Signal Processing: Technologies and Applications. Idea Group Pub. (2007)
34. Prasher, Deepark: Biological Effects of Noise. Whurr Publishers. London (1998)
35. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA): NOM-081-ECOL-1994: Que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las Fuentes fijas y su método de medición. México (1994)
36. Recuero, M.: Contaminación acústica. Licenciatura en ciencias ambientales. Universidad politécnica de Madrid. Madrid (2002)
37. Recuero, M.: Ingeniería Acústica. Paraninfo. Madrid (1994).
38. Recuero, M: Mapas de ruido. Determinación del error cometido en medidas de campo, para diferentes duraciones de las muestras. Universidad Politécnica de Madrid. España. (1997) Citado el 11 Noviembre 2003. Disponible de:  
<http://www.ia.csic.es/sea/index.html>
39. R. Hilera J., Martínez V. J.: Redes Neuronales Artificiales, Fundamentos, Modelos y Aplicaciones. Alfaomega (2000)
40. Royal National Institute for Deaf People (RNID): “MUZAK - Music to whose ears? - A brief overview of research commissioned by The Royal National Institute for Deaf People, December 1998”. RNID, Gran Bretania (1998). Disponible de:  
<http://www.rnid.org.uk>
41. Rylander, R.: Efectos del Ruido Ambiental en los Seres Humanos. Universidad de Gotemburgo, Suecia
42. Mauricio F. Desarrollo de una Metodología de Medición de Niveles de Ruido Generados por Vías Urbanas Destinadas al Transporte Público de Pasajeros, Universidad Austral de Chile (2002)



- 
43. National Instruments: LabVIEW, A Graphical Programming Language to Create Applications. National Instruments. USA (2002)
  44. Seto, W.: Teoría y problemas de acústica. Mc Graw Hill (1973)
  45. Sexto, L. F.: ¿Cómo elegir un sonómetro? (2007) [citado junio 11, 2008]. Disponible de:  
[dhttp://www.eie.fceia.unr.edu.ar/~acustica/biblio/sonometr.htm](http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/~acustica/biblio/sonometr.htm)
  46. WHO World Health Organization. Prevention of Noise-Induced Hearing Loss. Geneva (1997) Citada el 02 junio 2009. Disponible de:  
[http://www.who.int/pbd/pdh/Docs/NOISEREP\\_V08.pdf](http://www.who.int/pbd/pdh/Docs/NOISEREP_V08.pdf)

#### NORMAS

47. IEC International Electrotechnical Commission : IEC 1260 Standard Octave Filters. Genova, Suiza (1995)
48. IEC International Electrotechnical Commission. IEC 651 Standard Sound Level Meters. Genova, Suiza (1979)
49. IEC International Electrotechnical Commission. IEC 804 Standard Integrating-Averaging Level Meters. Génova, Suiza (1985)
50. ISO International Standard Organization: ISO 2204 Acoustic – Guide to international on the measurement of airborne acoustic noise and evaluation of its effects on human beings. Suiza (1979)
51. ISO International Standard Organization: ISO 1996/1 Acoustic – Description and measurement of environmental noise – Part 1: Basic quantities and procedures. Suiza (1982)
52. ISO International Standard Organization: ISO 1996/2 Acoustic – Description and measurement of environmental noise – Part 2: Acquisition of data pertinent to land use. Suiza (1987)
53. ISO International Standard Organization: ISO 1996/3 Acoustic – Description and measurement of environmental noise – Part 3: Application to noise limits. Suiza (1987)

## ANEXO A. Diagramas de bloques de tareas del programa

### A1. Conversión volts a pascales

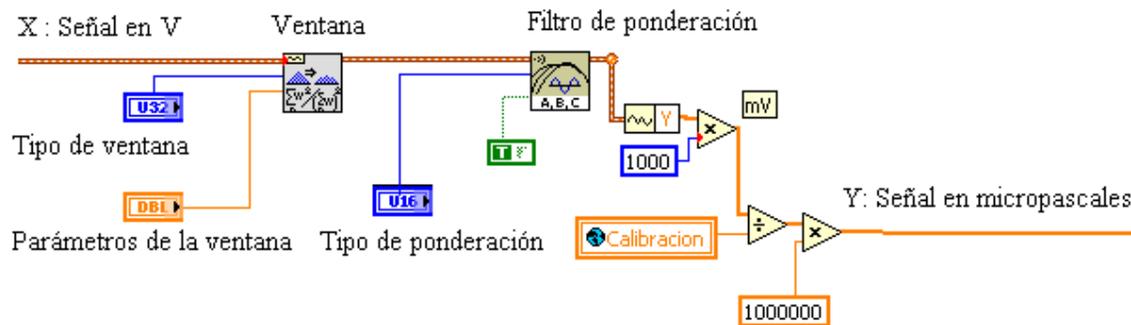


Fig. A.1 Conversión de una señal de presión acústica, de Volts a micropascales.

### A2. Calculo de nivel sonoro continuo equivalente

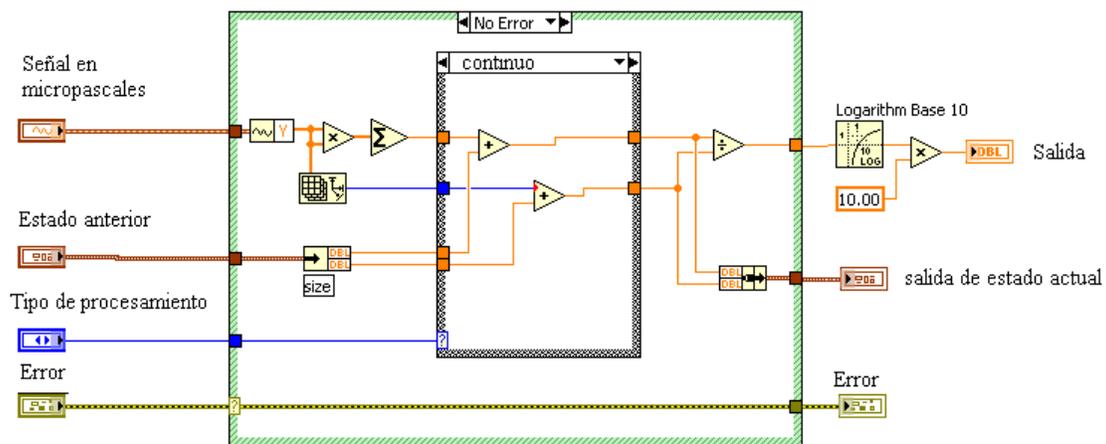


Fig. A.2 Resumen del cálculo de nivel sonoro continuo equivalente ( $L_{eq}$ )



### A3. Cálculo de nivel sonoro continuo equivalente

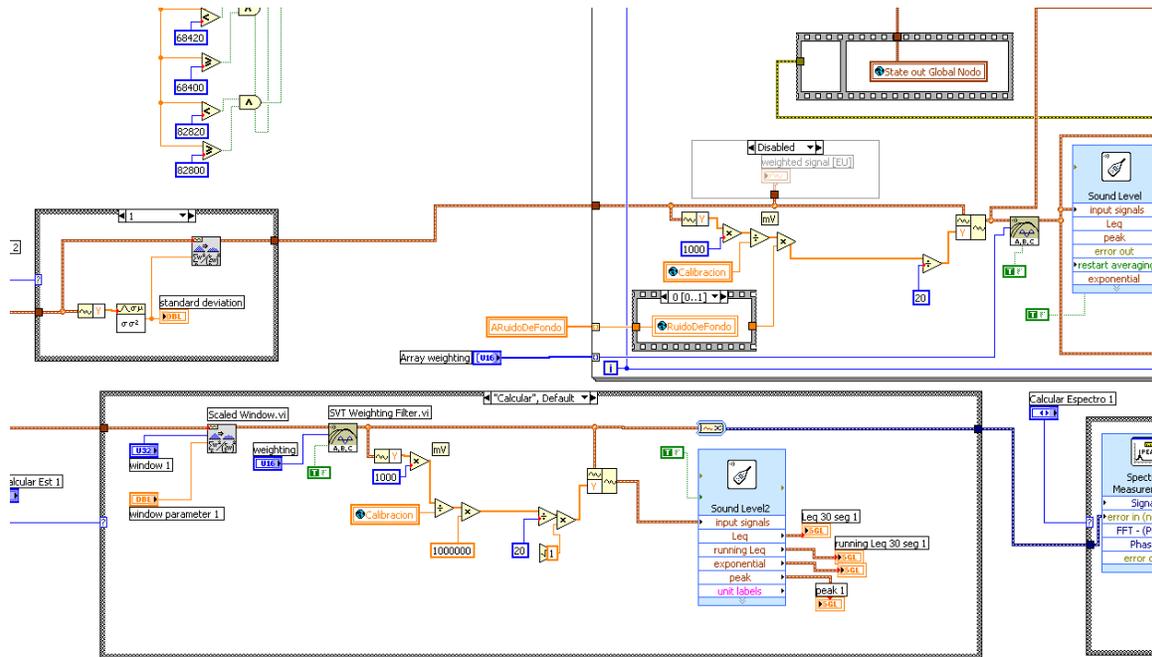


Fig. A.3 Diagrama de bloques donde se incluye la función para el cálculo del nivel sonoro continuo equivalente



## ANEXO B. Panel frontal del instrumento virtual para la calibración y resultados de una calibración

### B1. Panel frontal del instrumento virtual utilizado para la calibración del canal de medición acústica de cada nodo

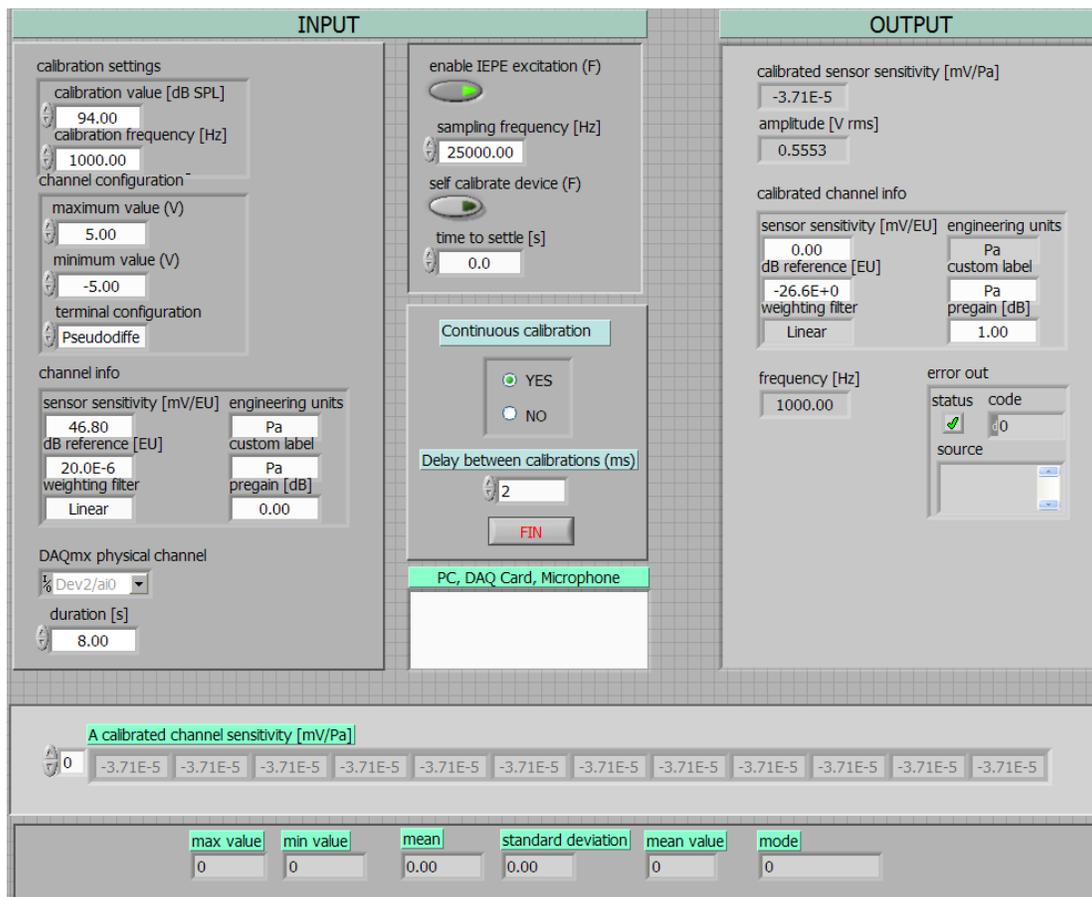


Fig. B.1 Panel frontal del instrumento virtual para la calibración del canal de medición



## B.2 Resultados de la calibración del canal de medición para cada nodo

Tabla B.1 Calibración del canal de medición para cada nodo.

Nodo	Calibración (mV/Pa)
0	39.76
1	36.6
2	47.61
3	40.54
4	41.93
5	43.98
6	43.32
7	48.54
8	40.62
9	45.9



---

## **ANEXO C. Panel frontal del instrumento virtual para análisis avanzado de la información**

Es una opción para especialistas en procesamiento digital de señales y conocimientos básicos de acústica. Es una herramienta adicional, no prevista en el diseño inicial, la cual se incluyó en el software del Centro de Control, de forma tal que pueda servir para trabajos de investigación y desarrollo de estudiantes de licenciatura e ingeniería, maestrías y doctorados. Adicionalmente, sirve para solicitar el audio más significativo grabado en los nodos, reproducirlo y ser evaluado por un operador.

Se está trabajando para que próximamente se incorporen herramientas de inteligencia artificial y de procesamiento digital de señales avanzado, para que la evaluación del audio se haga de forma automatizada sin que sea necesaria la intervención de un operador. Serían herramientas muy potentes y entre las cuales habrá métodos y algoritmos totalmente novedosos a nivel internacional.

Se puede utilizar de forma básica para borrar el audio grabado en un nodo, solicitar audio y reproducirlo.

Si se adiciona el hardware apropiado puede medir presión acústica y realizar todos los cálculos similares a los que realiza un nodo (conveniente para investigaciones y pruebas) en la próxima página se explican los controles principales.

**ANÁLISIS DE SEÑALES PA**  
Wavelet Ayuda

Indica si ocurrió un error

Leer una archivo de audio

Reproducir la señal de audio

Señal original

Amplitud (V)

0 0.1 0.2 0.3 0.4

0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

Tiempo (S)

Señal de audio. Puede ser reproducida

File TReal NI 9233 MC 3022 Audio PC

Selección de algún tipo de ventana para el PDS de audio

Rectangle 0.0282637

Filtro supresor de banda

Baja (Hz) 35 Alta (Hz) 45

Parámetro para la ventana Gaussiana

1/3 octava 1/n octava Ondelea (Wavelet) Escala X > Logaritm

1/3 octava sin ponderación

Espectros de amplitud de valores pico en DB

Espectros de amplitud de valores pico en DB

Espectro de amplitud pico

Amplitud (V)

0.0018 0.0016 0.0014 0.0012 0.001 0.0008 0.0006 0.0004 0.0002

0 2500 5000 7500 10000 12500

Frecuencia (Hz)

Amplitud (dB)

80 60 40 20 0 -20 -40 -60 -80

0 2500 5000 7500 10000 12500 15000

Frecuencia (Hz)

Amplitud (dB)

80 60 40 20 0 -20 -40 -60 -80 -100

0 2500 5000 7500 10000 12500 15000

Frecuencia (Hz)

Espectros de amplitud de valores pico en DB

Espectros de amplitud de valores pico en DB

Amplitud (dB)

86.0 84.0 82.0 80.0 78.0 76.0 74.0 72.0 70.0 68.0 66.0 64.0 62.0 60.0 58.0 56.0 54.0 52.0

10.0 100.0 1000.0 10000.0 100000.0

Frecuencia (Hz)

Escala logarítmica o lineal para el eje X

Análisis de octava

NSCE dBA 89.26 NSCE dBC 90.46 Pico dBA 112.27 Pico dBC 112.26

Total (dB) Parcial (dB)

B.F 0 C.I 0 C.T.E 3

0 20 40 60 80 100

Volumen

STOP

Borrar audio en un nodo

Solicitar audio a un nodo

No está en uso

Filtro supresor de banda

Parámetro para la ventana Gaussiana

Selección de algún tipo de ventana para el PDS de audio

Válido al adicionar un hardware

Indica si ocurrió un error

Leer una archivo de audio

Señal de audio. Puede ser reproducida

Espectros de amplitud de valores pico en DB

Espectros de amplitud de valores pico en DB

Espectro de amplitud pico

Escala logarítmica o lineal para el eje X

Análisis de octava

Amplificación de la reproducción del audio

Permite borrar el audio almacenado en un nodo

Permite solicitar el audio almacenado en un nodo

Valores en dB que se deben añadir por corrección por CTI (componentes tonales emergentes), CI (componentes impulsivas), BF (componentes de baja frecuencia)

Niveles Sonoros Continuos Equivalentes y valores pico para la señal de audio leída, con ponderación A y C

**ANÁLISIS DE SEÑALES PARA INVESTIGACION**  
Wavelet Ayuda

Leer  TReal  File  NI 9233  MC 3022  Audio PC

0.0282637 Rectangle

Filtro supresor de  Baja (Hz) 35 Alta (Hz) 45

1/3 octava 1/n octava Ondeleita (Wavelet) Escala X > Logarítmic

Fecha en que fue realizada la grabación de la señal  
18:57:30.126  
23/07/2009

Calibración del nodo  
39.76

NSCE calculado en el nodo  
89.259

Fecha y hora en que fue grabada la señal de audio en el nodo

Sensibilidad del canal de medición que está utilizando el nodo

Nivel Sonoro Continuo Equivalente en dBA calculado en el nodo. Puede servir de comparación con el que se calcula en el centro de control a partir de la misma señal de audio

NSCE dBA 89.26 NSCE dBC 90.46 Pico dBA 112.27 Pico dBC 112.26

Total (dB) Parcial (dB)  
B.F 0 C.I 0 C.T.E. 3

Señal original Amplitud (V) Tiempo (S)

FFT - (Peak) Amplitud (V) Frecuencia (Hz)

Bradas de potencia (dB) Frecuencia (Hz)

Volumen 0 20 40 60 80 100 20

SALVAR INDICADORES SI NO

Solicitar audio a un nodo

Audio en un nodo

STOP

Salvar o no los indicadores acústicos calculados para múltiples archivos leídos simultáneamente



---

## GLOSARIO

**Acústica.** Energía mecánica traducida como ruido, vibración, trepidación, sonido, infrasonido y ultrasonido.

**Adaptación auditiva.** Disminución en el volumen percibido de un tono después de que se haya presentado continuamente.

**Altura tonal.** Aumento hacia lo agudo de un tono que se acompaña de un incremento en la frecuencia.

**Amplitud.** El cambio en la presión creada por las ondas sonoras, la amplitud se relaciona con el volumen sonoro de un estímulo auditivo.

**Análisis de Fourier.** Proceso mediante el cual un estímulo es analizado en las ondas seno que lo componen.

**Armónicos.** Múltiplos de la frecuencia fundamental presentes en un sonido complejo.

**Audición.** Percepción subjetiva del sonido.

**Audiograma.** Es una gráfica que muestra la pérdida de audición o el nivel de pérdida de audición.

**Cambio permanente de umbral (PTS, Permanent Threshold Shift).** Incremento irreversible en el umbral de nivel de audición.

**Cambio temporal de umbral (TTS, Temporary Threshold Shift).** Incremento temporal en el umbral de nivel de audición.

**Contaminación acústica.** Presencia en el ambiente de ruidos o vibraciones que impliquen molestia, riesgo o daño para las personas, para el desarrollo de sus actividades o para los bienes de cualquier naturaleza, o que causen efectos significativos sobre el medio ambiente.

**Datos de ruido.** Adquisición de datos desde las unidades de monitoreo ambiental en tiempo real de la información mediante la conexión con el servidor del sistema.



---

**Decibel (dB).** Unidad adimensional que es igual a 10 veces el logaritmo base 10 de la relación de dos valores.

$$dB = 10 \cdot \log \left( \frac{v_1}{v_2} \right)$$

**Decibel A o decibel ponderado A (dBA).** Unidad adimensional representativa del nivel de sonido medido con filtro de ponderación A, que permite registrar dicho nivel, de acuerdo a la audición humana.

**Decibel C o decibel ponderado C (dBC).** Unidad representativa del nivel de sonido medido con filtro de ponderación C.

**Efectos nocivos.** Los efectos negativos sobre la salud humana o sobre el medio ambiente.

**Emisor acústico.** Cualquier actividad, infraestructura, equipo, maquinaria o comportamiento que genere contaminación acústica.

**Emisión de ruido.** Es la presión sonora que generada en cualesquiera condiciones, trasciende al medio ambiente o al espacio público.

**Espectro.** Representación de una onda sonora en función de sus componentes de frecuencia y amplitud.

**Frecuencia.** Número de veces que ocurre una función por unidad de tiempo.

**Frecuencia audible.** Cualquier frecuencia entre 20 Hz y 20 KHz.

**Frecuencia fundamental.** Componente de una onda sonora compleja que tiene la frecuencia más baja.

**Fuente.** Elemento que origina la energía mecánica vibratoria, definida como ruido o sonido.

**Hertz (Hz).** Frecuencia representada en ciclos por segundo.

**Intensidad del sonido.** Nivel promedio al que se transmite la energía del sonido por unidad de área normal a la dirección de propagación del sonido.



---

**Índice acústico.** Magnitud física para describir la contaminación acústica, que tiene relación con los efectos nocivos producidos por ésta.

**Longitud de onda.** Distancia entre los puntos de una onda sonora con el mismo valor de amplitud. Esta magnitud es inversamente proporcional a la frecuencia del sonido.

**Mapas de ruido:** Representación gráfica de los datos sobre una situación acústica existente o pronosticada en función de un indicador de ruido, en la que se muestra un la superación de un valor límite, el número de personas afectadas en una zona dada y el número de viviendas u otro tipo de estructuras habitacionales expuestos a determinados valores de ese indicador.

**Medio.** Entorno elástico en el que se propaga el sonido.

**Monitoreo.** Acción de medir y obtener datos en forma programada, de los parámetros que inicien o modifiquen la calidad del entorno.

**Nivel de inmisión.** Descriptor para exposición a ruido, en decibeles, que representa la energía total de incidencia en el oído por un período específico de tiempo (ej. meses, años).

**Nivel de intensidad del sonido.** En decibeles, es 10 veces el logaritmo base 10 de la división de la intensidad del sonido entre el nivel de referencia del sonido.

$$NIS = 10 \cdot \log \left( \frac{I}{I_0} \right)$$

**Nivel de presión del sonido.** En decibeles, es 10 veces el logaritmo base 10 de la división de la presión del sonido al cuadrado entre el cuadrado de la presión de referencia.

$$NPS = 10 \cdot \log \left( \frac{P^2}{P_0^2} \right)$$

**Nivel sonoro continuo equivalente (Leq).** Índice acústico, medido en un intervalo de tiempo, de un sonido estacionario que contiene la misma energía que un sonido fluctuante.



---

**Nivel sonoro día-noche (LDN).** Nivel en correspondiente a un tiempo de medición de 24 horas, con un castigo o sumatoria de 10 dB a los resultados obtenidos durante el período nocturno (22:00 horas a 7:00 horas).

**Período.** Duración de un ciclo completo de una forma de onda periódica.

**Ruido.** Cualquier sonido molesto o indeseado, usualmente de alta intensidad que molesta, altera o perturba cualquier actividad humana.

**Ruido nocivo.** Ruido por encima de los niveles máximos permisibles que causan daño en la salud de las personas expuestas, sea temporal o en forma permanente.

**Ruido continuo.** Aquel que se mantiene ininterrumpidamente por más de 5 minutos.

**Señal de tiempo o forma de onda.** Descripción de un sonido en el dominio del tiempo como fluctuación de una propiedad física como presión en el tiempo.

**Sonido.** Una sensación auditiva evocada por las oscilaciones de la presión en medio elástico y viscoso (ej. aire).

**Presión del sonido.** Presión instantánea total en un punto en presencia de una onda de sonido menos la presión estática en ese punto.

**Propagación de onda acústica.** Consiste en movimientos regulares y sistemáticos de las moléculas del medio transmisor que se superponen a los movimientos propios de las moléculas del medio.

**Sonómetro.** Instrumento que se utiliza para medir el nivel de presión acústica de un sonido o un ruido.

**Unidades de monitoreo ambiental.** Equipos de medición de ruido utilizados para la captura de los registros de los niveles de emisión sonora generada por las actividades sociales, culturales o rutinarias.

**Umbral de audición.** Mínimo nivel de presión acústica que podemos percibir.

**Umbral de dolor.** Mínimo nivel de presión acústica que produce la transición de una sensación de molestia a una sensación de dolor. Su valor está en torno a 120 dB.



---

**Velocidad del sonido.** Velocidad de propagación de la onda sonora obedece a las características del medio en que se transmite dicha propagación.

**Zona comercial.** Área autorizada por el gobierno local correspondiente para la realización de actividades comerciales y de servicios.

**Zona mixta.** Áreas donde colindan o se combinan en una misma manzana dos o más zonificaciones.

**Zona de protección especial.** Es aquel sector territorial de alta sensibilidad acústica, que requiere de protección especial contra el ruido y donde se ubican hospitales, centros educativos, orfanatos y asilos para ancianos.

**Zona residencial.** Área correspondiente para el uso de viviendas o residencias, con presencia de altas, medias y bajas concentraciones poblacionales.