

# Modelo computacional para generar un mapa de ruido ambiental utilizando mediciones en tiempo real.

# TESIS

Para obtener el grado de:

# MAESTRO EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

Presenta

# LUIS ALEJANDRO SÁNCHEZ PÉREZ

Director de Tesis: Dr. Marco Moreno Ibarra

México, D.F. Junio del 2011

### AGRADECIMIENTOS.

#### A mi padre

Por su esfuerzo y dedicación a nuestra familia y todo lo que gire alrededor de ella. Por ser mi ejemplo y guía. Gracias.

#### A mi madre

Por estar siempre pendiente y apoyándome incondicionalmente en todo. Gracias.

#### A mi hermano

Por creer en mí y exhortarme a seguir adelante.

#### A mis profesores

Por brindarme las bases y conocimientos para fortalecer mi formación profesional, en especial a Marco Moreno.

Al Centro de Investigación en Computación

Por darme la oportunidad de formar parte de su colectivo y brindarme todo el apoyo con el material requerido para el desarrollo de este trabajo.

# ÍNDICE.

NDICE	
NDICE DE FIGURAS	7
NDICE DE TABLAS	
GLOSARIO	
1. INTRODUCCIÓN	¡Error! Marcador no definido.
1.1. Motivación y Antecedentes	¡Error! Marcador no definido.
1.1.1. Efectos del ruido sobre la salud	¡Error! Marcador no definido.
1.2. Problemas a resolver	¡Error! Marcador no definido.
1.3. Alcance	¡Error! Marcador no definido.
1.4. Hipótesis	¡Error! Marcador no definido.
1.5. Objetivos	¡Error! Marcador no definido.
1.5.1. Objetivo general	¡Error! Marcador no definido.
1.5.2. Objetivo específicos	¡Error! Marcador no definido.
1.6. Contribuciones del trabajo	¡Error! Marcador no definido.
1.7. Valor práctico	¡Error! Marcador no definido.
1.8. Metodología y desarrollo de la investigación	¡Error! Marcador no definido.
1.9. Estructura de la tesis	¡Error! Marcador no definido.
2. ESTADO DEL ARTE	¡Error! Marcador no definido.
2.1. Medición y análisis del ruido ambiental	¡Error! Marcador no definido.
2.1.1. Mediciones no permanentes y permanentes	¡Error! Marcador no definido.
2.1.1.1. Sistemas de monitoreo permanente de ruido	¡Error! Marcador no definido.
2.1.2. Principales indicadores del ruido.	¡Error! Marcador no definido.
2.1.2.1. El decibel (dB)	¡Error! Marcador no definido.
2.1.2.2. Índices acústicos	¡Error! Marcador no definido.
2.1.2.3. Ponderaciones.	¡Error! Marcador no definido.
2.1.3. Análisis en el dominio de la frecuencia	¡Error! Marcador no definido.
2.1.3.1. División del espectro en bandas	¡Error! Marcador no definido.
2.1.3.2. Curvas de ponderación.	¡Error! Marcador no definido.
2.1.3.3. Decibel "A"	¡Error! Marcador no definido.
2.2. Propagación del ruido	¡Error! Marcador no definido.

2.2.1. Can	npo cercano y campo lejano	. ¡Error! Marcador no definido.
2.2.1.1.	Campo cercano	. ¡Error! Marcador no definido.
2.2.1.2.	Campo lejano	. ¡Error! Marcador no definido.
2.2.2. Tipo	os de fuentes de ruido	. ¡Error! Marcador no definido.
2.2.2.1.	Fuentes puntuales.	. ¡Error! Marcador no definido.
2.2.2.2.	Fuentes lineales	. ¡Error! Marcador no definido.
2.2.2.3.	Fuentes comunes	. ¡Error! Marcador no definido.
2.2.3. Algo	oritmos para modelar la propagación del ruido	. ¡Error! Marcador no definido.
2.2.3.1.	ISO 9613	. ¡Error! Marcador no definido.
2.2.3.2.	Atenuación por absorción atmosférica	. ¡Error! Marcador no definido.
2.2.3.3.	Efecto del viento y la temperatura	. ¡Error! Marcador no definido.
2.2.3.4.	Atenuación por barreras u obstáculos	. ¡Error! Marcador no definido.
2.2.3.5.	Atenuación por los efectos del terreno	. ¡Error! Marcador no definido.
2.2.3.6.	Otros tipos de atenuación	. ¡Error! Marcador no definido.
2.3. Mapas d	e ruido	. ¡Error! Marcador no definido.
2.3.1. Tipo	os de mapas de ruido	. ¡Error! Marcador no definido.
2.3.2. Téc	nicas de construcción de mapas de ruido	. ¡Error! Marcador no definido.
2.3.3. Sist	emas de información geográfica (GIS)	. ¡Error! Marcador no definido.
2.4. Sistemas	s de tiempo real	. ¡Error! Marcador no definido.
2.5. Localizad	ción automatizada de fuentes de ruido	. ¡Error! Marcador no definido.
2.5.1. Arre	eglos de micrófonos	. ¡Error! Marcador no definido.
2.5.1.1.	Diseño del arreglo	. ¡Error! Marcador no definido.
2.5.1.2.	Estimación de la dirección de arribo	. ¡Error! Marcador no definido.
2.6. Conclusi	ones	. ¡Error! Marcador no definido.
3. MARCO TEÓF	RICO	. ¡Error! Marcador no definido.
3.1. Algoritm Marcador no	o propuesto para modelar la propagación del ruido <b>definido.</b>	en la ISO 9613 <b>¡Error!</b>
3.1.1. Des	cripción de las fuentes de ruido	. ¡Error! Marcador no definido.
3.1.2. Cálo	culo por banda de octava	. ¡Error! Marcador no definido.
3.1.3. Cálo	culo de la atenuación por divergencia geométrica	. ¡Error! Marcador no definido.
3.1.4. Cálo	culo de la atenuación por absorción atmosférica	. ¡Error! Marcador no definido.
3.2. Estimaci	ón de la dirección de arribo (DOA)	. ¡Error! Marcador no definido.

3.3. Esti	mación del retraso en tiempo (TDE)	iError!	Marcado	or no defi	nido.
3.4. Cor	relación cruzada para la estimación del TDOA	iError!	Marcado	or no defi	nido.
3.5. Mé	todos de correlación cruzada generalizada	iError!	Marcado	or no defi	nido.
3.5.1.	Correlación cruzada clásica	iError!	Marcado	or no defi	nido.
3.5.2.	Transformación coherente suavizada.	iError!	Marcado	or no defi	nido.
3.5.3.	Transformación a fase	iError!	Marcado	or no defi	nido.
3.6. Geo	ometría del arreglo	iError!	Marcado	or no defi	nido.
3.6.1.	"Aliasing" espacial	iError!	Marcado	or no defi	nido.
3.6.2.	Problema de la discriminación adelante-atrás	iError!	Marcado	or no defi	nido.
3.7. Cor	clusiones	iError!	Marcado	or no defi	nido.
4. DISEÑO, <b>definido.</b>	IMPLEMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL SISTEMA DE ME	dición. <b>i</b>	Error!	Marcado	r no
4.1. Dise	eño del sistema de medición	iError!	Marcado	or no defi	nido.
4.1.1.	Tipo de micrófono	iError!	Marcado	or no defi	nido.
4.1.2.	Tarjeta de adquisición de datos	iError!	Marcado	or no defi	nido.
4.1.3.	Requerimientos sobre la frecuencia de muestreo	iError!	Marcado	or no defi	nido.
4.1.4.	Restricciones de tiempo	iError!	Marcado	or no defi	nido.
4.2. Imp	lementación y calibración del sistema de medición	iError!	Marcado	or no defi	nido.
4.2.1.	Calibrador acústico	iError!	Marcado	or no defi	nido.
4.3. Cor	clusiones	iError!	Marcado	or no defi	nido.
5. EVALUA GEOMETRÍA	ción de la direccionalidad de los micrófoi A triangular	NOS EN . <b>jError!</b>	UN A Marcado	RREGLO <b>or no defi</b>	CON <b>nido.</b>
5.1. Des <b>definido</b> .	cripción del arreglo de micrófono con geometría triangu	lar. <b>jErro</b>	r! M	arcador	no
5.2. Dise	eño y resultados de las mediciones	iError!	Marcado	or no defi	nido.
5.2.1. <b>defini</b> o	Una fuente con ruido urbano, con diferentes ubicacion <b>lo.</b>	es. <b>jError</b>	! Ma	rcador	no
5.2.2.	Tres fuentes con tonos puros	iError!	Marcado	or no defi	nido.
5.3. Cor	clusiones	iError!	Marcado	or no defi	nido.
6. EVALUA	CIÓN DE UNA GEOMETRÍA TRIANGULAR Y UNA LINEAL,	PARA LC	CALIZA	R UNA FU	ENTE
DE RUIDO (	ON BASE EN LAS DIFERENCIAS DE LOS TIEMPOS DE ARRI	BO. <b>jErro</b>	r! M	arcador	no
uenniao.				_	

6.1. Evaluación de una geometría triangular...... jError! Marcador no definido.

6.1.1. Una fuente a igual distancia y diferentes ángulos con respecto al punto de medici <b>¡Error! Marcador no defi</b>	ón <b>1ido.</b>
6.1.1.1. Análisis de correlación de las señales obtenidas ¡Error! Marcador no defin	nido.
6.1.1.2. Análisis para ubicar la fuente de ruido jError! Marcador no defin	nido.
6.1.2. Una fuente a diferentes distancias y diferentes ángulos con respecto al punt medición <b>¡Error! Marcador no defi</b>	o de nido.
6.1.2.1. Análisis de correlación de las señales obtenidas ¡Error! Marcador no defi	nido.
6.1.2.2. Análisis para ubicar la fuente de ruido jError! Marcador no defi	nido.
6.2. Evaluación de una geometría lineal jError! Marcador no defin	nido.
6.2.1. Una fuente a igual distancia y diferentes ángulos con respecto al punto de medici <b>¡Error! Marcador no defi</b>	ón <b>1ido.</b>
6.2.1.1. Análisis de correlación de las señales obtenidas jError! Marcador no defin	nido.
6.2.1.2. Análisis para la ubicación de la fuente de ruido ¡Error! Marcador no defination de fination de fina	nido.
6.3. Conclusiones jError! Marcador no defin	nido.
7. CASO DE ESTUDIO. DESPEGUES EN EL AEROPUERTO AICM jError! Marcador no defi	nido.
7.1. Definición del caso de estudio jError! Marcador no definición del caso de estudio.	nido.
7.2. Propuesta de la geometría para el arreglo de micrófonos ¡Error! Marcador no defin	nido.
7.3. Cálculo de la dirección y la distancia jError! Marcador no definitaria de la dirección y la distancia.	nido.
7.3.1. Estimación de la dirección de la fuente de ruido con respecto al punto de medi jError! Marcador no definido.	ción.
7.3.2. Estimación de la intersección de la dirección estimada con la pista de aterri jError! Marcador no definido.	zaje.
7.4. Conclusiones jError! Marcador no defi	nido.
8. GENERACIÓN DE LOS MAPAS DE RUIDO PARA EL CASO DE ESTUDIO. <b>¡Error! Marcador</b> definido.	no
8.1. Caracterización acústica de la fuente de ruido localizada ¡Error! Marcador no defination de fination d	nido.
8.1.1. Calculo del nivel de potencia sonora por banda de octava. <b>¡Error! Marcador</b> definido.	no
8.2. Generación de los mapas acústicos jError! Marcador no defi	nido.
8.3. Implementación del sistema jError! Marcador no defi	nido.
8.4. Pruebas de evaluación de final de fina	nido.
8.5. Conclusiones jError! Marcador no defin	nido.
9. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO jError! Marcador no defi	nido.

9.1. Conclusiones. ..... jError! Marcador no definido.

9.2. Trabajo futuro. ..... jError! Marcador no definido.

9.3. Trabajos enviados a congresos..... jError! Marcador no definido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS...... jError! Marcador no definido.

ANEXO A - CARACTERÍSTICAS DE LOS DISPOSITIVOS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.**¡Error! Marcador no definido.** 

ANEXO B - RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA DIRECCIONALIDAD DE LOS MICRÓFONOS. jError! Marcador no definido.

ANEXO C - RESULTADOS DE LA LOCALIZACIÓN DE LA FUENTE SONORA PUNTUAL EQUIVALENTE PARA LOS DESPEGUES DE LAS MEDICIONES 1, 5 Y 8. ..... **jError! Marcador no definido.** ANEXO D - FUNCIONES DE CORRELACIÓN CRUZADA, OBTENIDAS EN LA MEDICIÓN 2. ...... **jError! Marcador no definido.** 

ANEXO E - OTROS MAPAS GENERADOS PARA DESPEGUES DE AVIONES.**jError! Marcador no** definido.

ANEXO F - PANTALLAS DEL SISTEMA Y CÓDIGO FUENTE. ..... jError! Marcador no definido.

## **INDICE DE FIGURAS.**

Fig. 1.1 Metodología de la investigación <b>jError! Marcador no definido.</b>
Fig. 2.1 Curvas de ponderación espectral A y C jError! Marcador no definido.
Fig. 2.2 Esquema de propagación del ruido jError! Marcador no definido.
Fig. 2.3 Direccionalidad de la voz humana usada como fuente sonora jError! Marcador no
definido.
Fig. 2.4 Fuente sonora omni-direccional completa con su soporte para tripié ¡Error! Marcador no
definido.
Fig. 2.5 Esquema fundamental de los algoritmos para modelar la propagación del ruido jError!
Marcador no definido.
Fig. 2.6 Influencia del viento en la propagación del ruido jError! Marcador no definido.
Fig. 2.7 Dimensiones de un objeto para ser considerado una barrera u obstáculo. jError! Marcador
no definido.
Fig. 2.8 Influencia de la frecuencia y la trayectoria del ruido en la atenuación de las barreras. ¡Error!
Marcador no definido.
Fig. 2.9 Influencia de la altura de la barrera en la atenuación del ruido ¡Error! Marcador no
definido.
Fig. 2.10 Regiones para el cálculo de la atenuación del terreno jError! Marcador no definido.
Fig. 2.11 Atenuación del terreno con respecto al tipo de suelo y la frecuencia del sonido iError!
Marcador no definido.
Fig. 2.12 Atenuación debido al follaje jError! Marcador no definido.
Fig. 2.13 Atenuación debido a instalaciones o sitios industriales jError! Marcador no definido.
Fig. 2.14 Resultado de cada uno de los modelos utilizando el indicador Lday jError! Marcador no
definido.
Fig. 2.15 Comparación entre los modelos. 1) A y B 2) A y C 3) B y C jError! Marcador no definido.
Fig. 3.1 Ilustración de la estimación de la dirección de arribo en el espacio de dos dimensiones.
jError! Marcador no definido.
Fig. 3.2 Ilustración de la localización de una fuente sonora con arreglo de micrófonos equidistante.
jError! Marcador no definido.
Fig. 3.3 Ilustración del modelo ideal del campo libre con una fuente sonora <b>¡Error! Marcador no</b> definido.
Fig. 3.4 Fuentes ubicadas simétricamente con respecto al arreglo lineal de micrófonos iError!
Marcador no definido.
Fig. 4.1 Arquitectura del sistema de medición utilizado jError! Marcador no definido.
Fig. 4.2 Hoja de calibración del dispositivo MPA231 jError! Marcador no definido.

Fig. 4.3 Hoja de calibración del micrófono MP231. ..... **jError! Marcador no definido.** Fig. 4.4 Respuesta en frecuencia del micrófono MP231...... **jError! Marcador no definido.** 

Fig. 4.5 Tarjeta de Adquisición de Datos NI-USB9233	. ¡Error! Marcador no definido.
Fig. 4.6 Señal de ruido ambiental	. ¡Error! Marcador no definido.
Fig. 4.7 Diagrama de tiempo del sistema de monitoreo permanente	de ruido instalado en al Centro
Histórico de la Ciudad de México.	. ¡Error! Marcador no definido.
Fig. 4.8 Diagrama de tiempo de la etapa de experimentación	. ¡Error! Marcador no definido.
Fig. 4.9 Diagrama de tiempo del caso de estudio	. ¡Error! Marcador no definido.
Fig. 4.10 Panel frontal del programa de calibración	. ¡Error! Marcador no definido.
Fig. 4.11 Calibrador acústico CB-5	. ¡Error! Marcador no definido.

Fig. 5.1 Distribución de los micrófonos en el arreglo..... **¡Error! Marcador no definido.** Fig. 5.2 Malla de puntos en los cuales se estima el nivel sonoro continuo equivalente. ........ **¡Error! Marcador no definido.** 

Fig. 5.3 Resultado de la interpolación IDW 5 con la fuente a 0 grados. ..... **jError! Marcador no definido.** 

Fig. 5.4 Resultado de la interpolación IDW 15 con la fuente a 0 grados. ..... **¡Error! Marcador no definido.** 

Fig. 5.5 Resultado de la interpolación LP 10 con la fuente a 0 grados. **¡Error! Marcador no definido.** Fig. 5.6 Resultado de la interpolación LP 25 con la fuente a 0 grados. **¡Error! Marcador no definido.** Fig. 5.7 Resultado de la interpolación con splines cúbicos con la fuente a 0 grados. ......**¡Error! Marcador no definido.** 

Fig. 5.8 Espectro generado por la fuente fm<sub>1</sub>..... **jError! Marcador no definido.** 

Fig. 6.1 Procedimiento general aplicado en los experimentos...... **¡Error! Marcador no definido.** Fig. 6.2 Prototipo triangular utilizado durante el experimento. ...... **¡Error! Marcador no definido.** Fig. 6.3 Determinación de la resolución angular al hallar la posición de la fuente de ruido .....**¡Error! Marcador no definido.** 

Fig. 6.4 Distribución real del arreglo triangular de micrófonos durante el experimento. ...... **¡Error!** Marcador no definido.

Fig. 6.5 Señal utilizada en el experimento...... **jError! Marcador no definido.** Fig. 6.6 Pre-procesamiento aplicado a las señales obtenidas en las mediciones.**jError! Marcador no definido.** 

Fig. 6.7 Señal obtenida por uno de los micrófonos después del aplicarle el pre-procesamiento.

iError! Marcador no definido. Fig. 6.8 Implementación de la correlación cruzada en LabVIEW 8.5 ... iError! Marcador no definido. Fig. 6.9 Función de correlación entre el sensor m<sub>2</sub> y m<sub>1</sub>...... iError! Marcador no definido. Fig. 6.10 Esquema para determinar la ubicación de la fuente. ...... iError! Marcador no definido. Fig. 6.11 Distribución real del arreglo triangular de micrófonos durante el experimento. ...... iError! Marcador no definido.

Fig. 6.12 Diferencia en el tiempo de arribo entre dos frentes de onda **¡Error! Marcador no definido.** Fig. 6.13 Distribución real del arreglo lineal de micrófonos durante el experimento. ...... **¡Error! Marcador no definido.** 

Fig. 6.14 Orientación de los ángulos estimados. ..... jError! Marcador no definido.

Fig. 7.1 Procedimiento general aplicado en el caso de estudio. ...... jError! Marcador no definido. Fig. 7.2 Zona del caso de estudio. Ubicación del punto de medición. ¡Error! Marcador no definido. Fig. 7.3 Espectro de la señal medida durante el despegue de un avión tipo ATR-42. .....iError! Marcador no definido. Fig. 7.4 Espectro de la señal medida durante el despegue de un avión tipo Boeing 737...... jError! Marcador no definido. Fig. 7.5 Espectro de la señal medida durante el despegue de un avión tipo Airbus A320. ...... iError! Marcador no definido. Fig. 7.6 Distribución final de los micrófonos en el arreglo utilizado en el caso de estudio. ..... jError! Marcador no definido. Fig. 7.7 Arreglo de micrófonos instalado para el caso de estudio...... jError! Marcador no definido. Fig. 7.8 Esquema de ubicación relativa de la pista y el arreglo de micrófonos... jError! Marcador no definido. Fig. 7.9 Algoritmo de localización para un fragmento de señal aplicado en el caso de estudio. jError! Marcador no definido. Fig. 7.10 Señal en tiempo y espectro en frecuencia obtenidos de la medición 2. ... jError! Marcador no definido. Fig. 7.11 Fragmento uno de la medición 2. ..... jError! Marcador no definido. Fig. 7.12 Fragmento dos de la medición 2..... jError! Marcador no definido. Fig. 7.13 Fragmento tres de la medición 2..... jError! Marcador no definido. Fig. 7.14 Señal en tiempo y espectro en frecuencia obtenidos de la medición 4. ... jError! Marcador no definido. Fig. 7.15 Fragmento uno de la medición 4. ..... jError! Marcador no definido. Fig. 7.16 Fragmento dos de la medición 4..... jError! Marcador no definido. Fig. 7.17 Fragmento tres de la medición 4. ..... jError! Marcador no definido. Fig. 7.18 Fragmento cuatro de la medición 4..... jError! Marcador no definido. Fig. 7.19 Ubicación de los puntos C1 y C2..... jError! Marcador no definido. Fig. 8.1 Algoritmo para la obtención del mapa acústico para un fragmento de señal. .....iError!

#### Marcador no definido.

ig. 8.2 Espectro en bandas de octava del fragmento uno de la medición 2 correspondiente al
nicrófono 0 <b>¡Error! Marcador no definido.</b>
ig. 8.3 Espectro en bandas de octava del fragmento uno de la medición 2 correspondiente al
nicrófono 1 <b>¡Error! Marcador no definido.</b>
ig. 8.4 Espectro en bandas de octava del fragmento uno de la medición 2 correspondiente al
nicrófono 2 iError! Marcador no definido.
ig. 8.5 Espectro en bandas de octava del fragmento uno de la medición 2 correspondiente al
nicrófono 3 <b>¡Error! Marcador no definido.</b>
ig. 8.6 Mapa de ruido generado para el fragmento de señal uno de la medición 2iError!
Marcador no definido.

Fig. 8.7 Mapa de ruido generado para el fragmento de señal dos de la medición 2iError!
Marcador no definido.
Fig. 8.8 Mapa de ruido generado para el fragmento de señal tres de la medición 2iError!
Marcador no definido.
Fig. 8.9 Mapa de ruido generado para el fragmento de señal uno de la medición 4iError!
Marcador no definido.
Fig. 8.10 Mapa de ruido generado para el fragmento de señal dos de la medición 4iError!
Marcador no definido.
Fig. 8.11 Mapa de ruido generado para el fragmento de señal tres de la medición 4iError!
Marcador no definido.
Fig. 8.12 Mapa de ruido generado para el fragmento de señal cuatro de la medición 4 jError!
Marcador no definido.

Fig. A.1 Hoja de calibración del dispositivo MPA231 para el sensor 1. **¡Error! Marcador no definido.** Fig. A.2 Hoja de calibración del dispositivo MP231 para el sensor 1... **¡Error! Marcador no definido.** Fig. A.3 Respuesta en frecuencia del micrófono MP231 para el sensor 1...... **¡Error! Marcador no definido.** 

Fig. A.4 Hoja de calibración del dispositivo MPA231 para el sensor 2. **¡Error! Marcador no definido.** Fig. A.5 Hoja de calibración del dispositivo MP231 para el sensor 2... **¡Error! Marcador no definido.** Fig. A.6 Respuesta en frecuencia del micrófono MP231 para el sensor 2...... **¡Error! Marcador no definido.** 

Fig. A.7 Hoja de calibración del dispositivo MPA231 para el sensor 3. **¡Error! Marcador no definido.** Fig. A.8 Hoja de calibración del dispositivo MP231 para el sensor 3... **¡Error! Marcador no definido.** Fig. A.9 Respuesta en frecuencia del micrófono MP231 para el sensor 3...... **¡Error! Marcador no definido.** 

Fig. A.10 Especificaciones de la tarjeta NI USB-9233..... **jError! Marcador no definido.** Fig. A.11 Panel frontal del programa para la adquisición de las señales...... **jError! Marcador no definido.** 

Fig. B.1 Resultado de la interpolación IDW 15 con la fuente a 30 grados. ...... **jError! Marcador no definido.** 

Fig. B.2 Resultado de la interpolación LP 25 con la fuente a 30 grados..... **jError! Marcador no definido.** 

Fig. B.3 Resultado de la interpolación con splines cúbicos con la fuente a 30 grados. .....iError! Marcador no definido.

Fig. B.4 Resultado de la interpolación IDW 15 con la fuente a 60 grados. ...... **jError! Marcador no definido.** 

Fig. B.5 Resultado de la interpolación LP 25 con la fuente a 60 grados..... **jError! Marcador no definido.** 

Fig. B.6 Resultado de la interpolación con splines cúbicos con la fuente a 60 grados. .....iError! Marcador no definido.

Fig. B.7 Fuentes utilizadas en los experimentos...... jError! Marcador no definido.

Fig. C.1 Señal en tiempo y espectro en frecuencia obtenidos de la medición 1 de la Tabla 7.2.
iError! Marcador no definido.
Fig. C.2 Señal en tiempo y espectro en frecuencia obtenidos de la medición 5 de la Tabla 7.2.
iError! Marcador no definido.
Fig. C.3 Señal en tiempo y espectro en frecuencia obtenidos de la medición 8 de la Tabla 7.2.
iError! Marcador no definido.

Fig. D.1 Función de correlación cruzada entre los micrófonos 0 y 1 para el fragmento uno.....**jError!** Marcador no definido.

Fig. D.2 Función de correlación cruzada entre los micrófonos 0 y 1 para el fragmento dos. .... **¡Error!** Marcador no definido.

Fig. D.3 Función de correlación cruzada entre los micrófonos 0 y 1 para el fragmento tres.....**¡Error!** Marcador no definido.

Fig. D.4 Función de correlación cruzada entre los micrófonos 1 y 2 para el fragmento uno.....**jError!** Marcador no definido.

Fig. D.5 Función de correlación cruzada entre los micrófonos 1 y 2 para el fragmento dos. .... **¡Error!** Marcador no definido.

Fig. D.6 Función de correlación cruzada entre los micrófonos 1 y 2 para el fragmento tres.....**jError!** Marcador no definido.

Fig. D.7 Función de correlación cruzada entre los micrófonos 2 y 3 para el fragmento uno..... **¡Error!** Marcador no definido.

Fig. D.8 Función de correlación cruzada entre los micrófonos 2 y 3 para el fragmento dos. .... **¡Error!** Marcador no definido.

Fig. D.9 Función de correlación cruzada entre los micrófonos 2 y 3 para el fragmento tres.....**jError!** Marcador no definido.

Fig. E.7 Mapas de ruido generados para los fragmentos tomados a p	oartir del segundo 6 de la
medición 8 de la Tabla 7.2	¡Error! Marcador no definido.
Fig. E.8 Mapas de ruido generados para los fragmentos tomados a p	oartir del segundo 0 de la
medición 7 de la Tabla 8.11	¡Error! Marcador no definido.
Fig. E.9 Mapas de ruido generados para los fragmentos tomados a p	oartir del segundo 0 de la
medición 10 de la Tabla 8.11	¡Error! Marcador no definido.
Fig. E.10 Mapas de ruido generados para los fragmentos tomados a	partir del segundo 0 de la
medición 11 de la Tabla 8.11	¡Error! Marcador no definido.

Fig. F.1 Pantalla del programa para el análisis digital de señales. ...... **¡Error! Marcador no definido.** Fig. F.2 Pantalla del programa para generar los mapas de ruido. ...... **¡Error! Marcador no definido.** 

# ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 2.1: Comparación de los métodos de propagación de ruido ambiental.... **¡Error! Marcador no** definido.

 Tabla 2.2: Coeficientes de absorción atmosférica calculados por Sutherland and Bass en 1979.

 **jError! Marcador no definido.** 

 Tabla 2.3: Coeficiente de atenuación atmosférica α, por banda de octava, calculados en la ISO

 9613.
 **jError! Marcador no definido.**

Tabla 4.1 Características generales del sensor de presión acústica OM231...... **¡Error! Marcador no definido.** 

Tabla 5.1: Nivel de presión sonora por banda de octava y <i>Leq</i> obtenido para cada micrófono, con la
fuente ubicada a 0 grados definido.
Tabla 5.2: Nivel de presión sonora por banda de octava y Leq obtenido para cada micrófono, con la
fuente ubicada a 30 grados <b>jError! Marcador no definido.</b>
Tabla 5.3: Nivel de presión sonora por banda de octava y Leq obtenido para cada micrófono, con la
fuente ubicada a 60 grados definido.
Tabla 5.4: Tonos generados por cada una de las fuentes en las pruebas realizadasiError!
Marcador no definido.
Tabla 5.5: Resultados de la Prueba 1 de la Tabla 5.4 <b>jError! Marcador no definido.</b>
Tabla 5.6: Resultados de la Prueba 2 de la Tabla 5.4 jError! Marcador no definido.

Tabla 5.7: Resultados de la Prueba 5 de la Tabla 5.4..... jError! Marcador no definido.

Tabla 6.1: Índice en el eje x del valor máximo de la correlación entre las señales obtenidas...**jError!** Marcador no definido.

Tabla 6.2: Resultados obtenidos al evaluar la implementación del algoritmo de ubicación. .... **¡Error!** Marcador no definido.

Tabla 6.8: Resultados del algoritmo con la fuente a 5 metros del punto de medición. .....iError! Marcador no definido. Tabla 6.9: Resultados del algoritmo con la fuente a 10 metros del punto de medición. ...... **¡Error!** Marcador no definido.

Tabla 6.10: Resultados del algoritmo con la fuente a 15 metros del punto de medición ....... **¡Error!** Marcador no definido.

Tabla 6.11: Índice en el eje x del valor máximo de la correlación entre las señales obtenidas. Fuente a 0 grados con respecto al punto de medición...... jError! Marcador no definido. Tabla 6.12: Índice en el eje x del valor máximo de la correlación entre las señales obtenidas. Fuente a 30 grados con respecto al punto de medición...... jError! Marcador no definido. Tabla 6.13: Índice en el eje x del valor máximo de la correlación entre las señales obtenidas. Fuente a 60 grados con respecto al punto de medición...... jError! Marcador no definido. Tabla 6.14: Estimación de la dirección a partir de los datos de la Tabla 6.11. Fuente a 0 grados con respecto al punto de medición...... jError! Marcador no definido. Tabla 6.15: Estimación de la dirección a partir de los datos de la Tabla 6.12. Fuente a 30 grados con respecto al punto de medición...... jError! Marcador no definido. Tabla 6.16: Estimación de la dirección a partir de los datos de la Tabla 6.13. Fuente a 60 grados con respecto al punto de medición...... jError! Marcador no definido. Tabla 6.17: Resultados del algoritmo utilizando t<sub>12</sub> y t<sub>23</sub>..... **jError! Marcador no definido.** Tabla 6.18: Resultados del algoritmo utilizando t<sub>01</sub> y t<sub>13</sub>..... **jError! Marcador no definido.** Tabla 6.19: Resultados del algoritmo utilizando t<sub>02</sub> y t<sub>23</sub>..... **jError! Marcador no definido.** Tabla 7.1: Ubicación geográfica de los puntos ma, rw<sub>1</sub>, rw<sub>2</sub>..... **jError! Marcador no definido.** Tabla 7.2: Relación de aeronaves que despegaron durante el experimento del caso de estudio. jError! Marcador no definido. Tabla 7.3: Resultados de la correlación cruzada aplicada a los fragmentos de la medición 2... jError! Marcador no definido. Tabla 7.4: Resultados de las estimaciones del ángulo  $\theta$  para los fragmentos de la medición 2. jError! Marcador no definido. Tabla 7.5: Resultados de la correlación cruzada aplicada a los fragmentos de la medición 4... jError! Marcador no definido. Tabla 7.6: Resultados de las estimaciones del ángulo  $\theta$  para los fragmentos de la medición 4. jError! Marcador no definido. Tabla 7.7 Coordenadas geográficas de los puntos C1 y C2 ..... jError! Marcador no definido. Tabla 7.8: Estimaciones de la ubicación del avión para cada fragmento de la medición 2. ..... iError!

#### Marcador no definido.

Tabla 7.9: Estimaciones de la ubicación del avión para cada fragmento de la medición 4. ..... **¡Error!** Marcador no definido.

Tabla 8.3: Nivel de presión sonora por banda de octava para el fragmento tres de la medición 2. ...... jError! Marcador no definido. Tabla 8.4: Nivel de potencia sonora por banda de octava de la fuente puntual equivalente estimada en cada uno de los fragmentos de la medición 2..... jError! Marcador no definido. Tabla 8.5: Nivel de presión sonora por banda de octava para el fragmento uno de la medición 4. jError! Marcador no definido. Tabla 8.6: Nivel de presión sonora por banda de octava para el fragmento dos de la medición 4. jError! Marcador no definido. Tabla 8.7: Nivel de potencia sonora por banda de octava para el fragmento tres de la medición 4. jError! Marcador no definido. Tabla 8.8: Nivel de potencia sonora por banda de octava para el fragmento cuatro de la medición 4.....jError! Marcador no definido. Tabla 8.9: Nivel de potencia sonora por banda de octava de la fuente puntual equivalente estimada en cada uno de los fragmentos de la medición 4. ..... jError! Marcador no definido. Tabla 8.10: Coordenadas geográficas de los puntos de comprobación. ..... jError! Marcador no definido.

# Tabla 8.11: Relación de aeronaves que despegaron durante las pruebas de evaluación. ...... **¡Error!** Marcador no definido.

Tabla 8.12: Comparación del *Leq* obtenido en cada punto de comprobación contra el obtenido en el mapa generado, para cada fragmento de la medición 7 de la Tabla 8.11. ..... **¡Error! Marcador no definido.** 

Tabla 8.13: Comparación del *Leq* obtenido en cada punto de comprobación contra el obtenido en el mapa generado, para cada fragmento de la medición 10 de la Tabla 8.11. ... **¡Error! Marcador no definido.** 

Tabla 8.14: Comparación del *Leq* obtenido en cada punto de comprobación contra el obtenido en el mapa generado, para cada fragmento de la medición 11 de la Tabla 8.11. ... **¡Error! Marcador no definido.** 

Tabla B.1: Resultados de la Prueba 3 de la Tabla 5.4	¡Error! Marcador no definido.
Tabla B.2: Resultados de la Prueba 4 de la Tabla 5.4	¡Error! Marcador no definido.

Tabla C.1: Estimaciones de la ubicación del avión para cada fragmento de la medición 1 de la Tabla7.2. Los fragmentos se eligen a partir del segundo 4.Tabla C.2: Estimaciones de la ubicación del avión para cada fragmento de la medición 5 de la Tabla7.2. Los fragmentos se eligen a partir del segundo 6.Tabla C.3: Estimaciones de la ubicación del avión para cada fragmento de la medición 8 de la Tabla7.2. Los fragmentos se eligen a partir del segundo 6.Tabla C.3: Estimaciones de la ubicación del avión para cada fragmento de la medición 8 de la Tabla7.2. Los fragmentos se eligen a partir del segundo 6.Fror! Marcador no definido.7.2. Los fragmentos se eligen a partir del segundo 6.JError! Marcador no definido.

# GLOSARIO.

ISO	Organización Internacional para la Estandarización.
sonómetro	Es un dispositivo que sirve para medir los niveles de presión sonora y calcular algunos índices acústicos.
GIS	Sistema de información geográfica.
decibel (dB)	Es una unidad logarítmica utilizada en acústica para representar los niveles de presión sonora y otros indicadores.
Pascal (Pa)	Es la unidad de presión del Sistema Internacional de Unidades.
NPS	Nivel de presión sonora.
Leq	Nivel sonoro continuo equivalente.
Banda	Un intervalo de frecuencias.
banda de octava	Es un intervalo de frecuencias, cuya frecuencia final es el doble de la frecuencia final.
dB(A)	Decibel ponderado A.
campo libre	Medio homogéneo libre de obstáculos y superficies reflectantes.
campo cercano	Clasificación que se da a la ubicación de la fuente, cuando el frente de onda que llega al arreglo de micrófonos se considera esférico.
campo lejano	Clasificación que se da a la ubicación de la fuente, cuando el frente de onda que llega al arreglo de micrófonos se considera plano.
fuente puntual	La energía sonora que irradia se propaga de forma esférica.
JAVA	Es un lenguaje de programación orientado a objetos, desarrollado por Sun Microsystems a principios de los años 90.
Geotools	Conjunto de bibliotecas para la manipulación en JAVA de datos geográficos.
DOA	Dirección de arribo de la señal.
TDE	Estimación del retraso en tiempo de la señal.
TDOA	Diferencia en el tiempo de arribo de la señal.
espacio anecoico	Espacio donde no existe reflexión.
CCF	Función de correlación cruzada.
GCC	Correlación cruzada generalizada.
GCCF	Función de correlación cruzada generalizada
"aliasing" espacial	Situación que ocurre al sub-muestrear espacialmente la señal.
rango dinámico	Es el término usado para describir la relación entre el valor más pequeño y el valor más grande posible de una cantidad variable. El oído humano tiene un rango dinámico para los niveles de sonido de aproximadamente 100 dB.

ADC	Conversor análogo digital.
LabVIEW	Entorno de programación gráfica. Muy útil en la integración del hardware y software para instrumentación virtual.
Tono puro	Sonido sinusoidal simple.
resolución angular	Ángulo más pequeño detectado. Mínima variación entre un ángulo y otro.
proceso de despegue	Período de medición de 24 segundos de un despegue.
SMP	Sistema de medición portátil.
METAR	Reporte meteorológico de un aeródromo.

### **RESUMEN.**

En este trabajo se presenta un modelo computacional para generar mapas de ruido ambiental con base en mediciones en tiempo real. El modelo permite la estimación de la distribución del ruido existente alrededor de un punto de medición, con un arreglo de cuatro micrófonos. Todas las estimaciones se realizan basándose únicamente en las mediciones obtenidas, aplicando:

- Métodos para la localización automatizada de fuentes de ruidos con base en las diferencias en los tiempos de arribo (TDOA).
- Análisis de octavas de las mediciones obtenidas para la caracterización acústica de la fuente sonora predominante.
- Métodos para la elaboración de mapas de ruido, basados en modelos de simulación de la propagación del ruido, específicamente la norma ISO 9613.

Para las mediciones se desarrolla un sistema de medición con cuatro sensores de presión acústica, una tarjeta de adquisición de datos y una computadora portátil.

El modelo es implementado en un sistema de información geográfica y evaluado en un caso de estudio para los despegues de aviones en el aeropuerto AICM. Se generan mapas de ruidos temporales para diferentes intervalos de tiempo, durante el despegue de un avión. Las pruebas de evaluación muestran errores menores a 6 *dB*.

A diferencia de los mapas de ruido estáticos basados en mediciones puntuales históricas, cuya validez depende de que se mantengan las condiciones en las cuales se hicieron las medidas, el modelo que se presenta, permite la actualización periódica de la estimación del ruido en la zona de estudio.

Este sistema está vinculado a los siguientes proyectos:

- Proyecto CONACyT (02/2007 06/2011). "Sistema Avanzado de Monitoreo Ambiental de Sonidos y Vibraciones". Clave: 51283-Y.
- Proyecto de desarrollo y transferencia de tecnología: "Sistema distribuido de monitoreo permanente para el Centro Histórico de la Ciudad de México"; CIC-IPN e ICyTDF.

## ABSTRACT.

This work presents a computational model to generate environmental noise maps based on real time measurements. The model allows the estimation of the existing noise distribution around a measurement point, with an array of four microphones. All estimations are based on measurements only, obtained by applying:

- Methods for automatic localization of noise sources based on the timedifference-of-arrival (TDOA).
- Octave analysis of the measurements obtained for the acoustic characterization of the prevailing sound source.
- Methods for noise mapping based on simulation models of noise propagation, specifically ISO 9613.

For measurements is developed a measurement system with four acoustic pressure sensors, a data acquisition card and a laptop.

The model is implemented in a geographic information system and evaluated on a case of study for aircraft take-offs at the airport AICM. Noise maps are generated for different time intervals during the take-off of a plane. The evaluation tests show errors below 6 dB.

Unlike the static noise maps based on historical measurement spots, whose validity depends on maintaining the conditions under which measurements were made, the model presented allows regular updating of noise estimation in the study area.

This system is linked to the following projects:

- CONACyT project (02/2007 06/2011). "Sistema Avanzado de Monitoreo Ambiental de Sonidos y Vibraciones". Key: 51283-Y.
- Project of development and transfer of technologies: "Sistema distribuido de monitoreo permanente para el Centro Histórico de la Ciudad de México"; CIC-IPN and ICyTDF.

## 1. INTRODUCCIÓN.

## 1.1. Motivación y Antecedentes.

El ruido ambiental está constituido por el conjunto de sonidos no deseados, de niveles sonoros elevados, desagradables o inesperados. Entre los contaminantes ambientales el ruido tiene características que lo hacen particular:

- 1. Es ubicuo. Se genera muy fácilmente en cualquier lugar donde el hombre tenga participación.
- 2. Es fácilmente percibido.
- 3. Reduce la calidad de vida de forma significativa, justamente por la sensibilidad humana al sonido.
- 4. Está formado por ondas mecánicas.

La reducción de la contaminación acústica no se consideraba una prioridad en materia ambiental, a diferencia de la reducción de la contaminación atmosférica. Las consecuencias sobre la población eran menos espectaculares y la degradación de la calidad de vida era aceptada como una consecuencia directa del progreso tecnológico y la urbanización. Sin embargo, en las últimas décadas, para un sector cada vez más importante y creciente de la población, el ruido es percibido como uno de los factores más negativos que afectan la calidad de vida, especialmente en las ciudades. El ruido ambiental, que se aceptaba como un fenómeno natural, ha dejado de serlo para convertirse en algo indeseado, pero consustancial a las sociedades modernas [1].

Esta forma de contaminación generalizada y principalmente urbana, que afecta a la salud como a la calidad de vida de los ciudadanos, provoca una preocupación creciente en la sociedad por las molestias y efectos que origina sobre la salud, el comportamiento y las actividades de los individuos, así como por las consecuencias psicológicas y sociales que conlleva. Por ello, a pesar de su aparente simplicidad, el problema del ruido incluye diferentes aspectos que afectan a campos muy diversos, como la física, la medicina, la psicología, la sociología y el urbanismo [1].

#### 1.1.1. Efectos del ruido sobre la salud.

Alrededor del 20% de los habitantes de Europa occidental están expuestos a niveles de ruido que los científicos y los profesionales de la salud consideran inaceptables, lo cual para la Organización Mundial de la Salud es una cifra alarmante [2][3].

Hoy en día, el ruido ambiental es considerado como un peligro para la salud. Sus efectos negativos van desde la pérdida progresiva de la audición hasta alteraciones de la presión arterial y del ritmo cardíaco. Se estima que 10 millones de personas están expuestas a niveles sonoros capaces, no solo de causar pérdida auditiva, sino también de inducir acúfenos, estrés, hipertensión, agresión y otros tipos de comportamientos antisociales [2][4][5].

#### **Efectos auditivos** [4][5][6]

Existen numerosos efectos nocivos sobre el mecanismo de audición del ser humano. Algunos de ellos se describen brevemente a continuación:

*Efecto máscara*: se produce cuando un sonido impide la percepción total o parcial de otros sonidos.

*Acúfenos:* Ruidos que aparecen en el interior del oído humano por la alteración del nervio auditivo y hacen que quien los padece escuche un pitido interno constante.

*Desviación Permanente del Umbral Auditivo (DPU) o Trauma Acústico:* Aumento irreversible del umbral de audibilidad a ciertas frecuencias, después de la exposición a altos niveles de presión sonora.

*Elevación temporal del umbral auditivo:* se produce con exposición a ruidos de intensidad moderada o alta y durante tiempos más o menos largos, recuperándose cuando desaparece la exposición a los niveles mencionados.

#### **Efectos extrauditivos** [6][7]

*Alteraciones del sistema cardiovascular:* Los investigadores y los estudios realizados demuestran que los efectos principales son: elevación de la presión arterial, vasoconstricción periférica y aceleración del ritmo cardíaco.

Perturbación del órgano de equilibrio: Vértigo, nauseas, vómitos.

*Perturbaciones del sueño y del descanso:* Retraso en el inicio del sueño, despertar frecuente en mitad de la noche, precoz y temprano por la mañana.

*Perturbación de la concentración y del rendimiento del trabajo:* Disminución de la concentración, de las facultades de atención, lentitud en los actos y tareas, en los reflejos y en la reacción ante señales de alerta y peligro, error en los cálculos y evaluación de las distancia, en la apreciación de los contornos, relieves y colores.

Los efectos antes mencionados son los más estudiados por los investigadores y los más abordados por la literatura. Sin embargo, existen otros de igual o mayor trascendencia, que aún siguen sin un estudio profundo de las alteraciones que producen en el ser humano. Entre estos, se encuentran el *efecto en los fetos de mujeres embarazadas, alteraciones en el aparato digestivo y en el sistema endocrino, modificaciones del metabolismo*, entre otros.

#### 1.2. Problemas a resolver.

Los problemas que se establecen en este trabajo son:

- 1. Los indicadores acústicos calculados a partir de mediciones en un punto, solo representan con certeza, el comportamiento sonoro en el mismo.
- 2. Sin modelos computacionales, cualquier estimación alrededor del punto se haría de forma intuitiva.
- 3. La carencia de un modelo computacional que estime periódicamente, los niveles de ruido ambiental alrededor de un punto de medición, con base en sus mediciones.

### 1.3. Alcance.

- 1. Dada la complejidad de los escenarios en los cuales se produce la contaminación acústica, este trabajo se limita a considerar solamente una fuente de ruido.
- 2. Las condiciones de temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad de viento que se utilizaron, son las existentes en las áreas cercanas a los puntos de medición, en las fechas en que se realizaron los experimentos.
- 3. Se consideran que las reflexiones de las ondas sonoras son mínimas y no afectan el resultado de los experimentos.

## 1.4. Hipótesis.

A partir de mediciones simultáneas en tiempo real, del ruido generado por una fuente sonora puntual desconocida, mediante:

- a) Un arreglo de cuatro micrófonos.
- b) Frecuencia de muestreo de 50,000 *Hz* (muestras por segundo).

Se puede caracterizar acústicamente la fuente sonora y trazar un mapa de ruido estimado, alrededor del punto de medición, conociendo la ubicación de la misma y utilizando las ecuaciones de propagación definidas en la ISO 9613.

## 1.5. Objetivos.

#### 1.5.1. Objetivo general.

Desarrollar un modelo computacional para generar mapas de ruido temporales alrededor de un punto de medición, con base en sus mediciones en tiempo real.

### 1.5.2. Objetivo específicos.

- 1. Implementar un sistema de medición de ruido con un arreglo de cuatro micrófonos que permita frecuencias de muestreo hasta 50 *kHz*.
- 2. Evaluación teórica y en campo, de las geometrías lineal y triangular para el arreglo cuatro de micrófonos.
- 3. Evaluar la factibilidad de estimar la ubicación de una fuente puntual a partir de las mediciones obtenidas con el arreglo de cuatro micrófonos.
- 4. Caracterizar acústicamente la fuente de ruido.
- 5. Generar mapas de ruido temporales.
- 6. Realizar pruebas de comprobación del modelo.

## 1.6. Contribuciones del trabajo.

- 1. Se establece un modelo computacional para generar mapas de ruido temporales alrededor de un punto de medición, con base en sus mediciones en tiempo real.
- 2. Se desarrolló un caso de estudio en un escenario real, generando mapas de ruido temporales alrededor del punto de medición.

## 1.7. Valor práctico.

Aunque el trabajo realizado se considera parte de un área de investigación científico tecnológica, aún en desarrollo a nivel mundial, los resultados obtenidos pueden ser aplicados en casos reales específicos.



1.8. Metodología y desarrollo de la investigación.

#### 1.9. Estructura de la tesis.

En el capítulo 2 se presenta el estado del arte.

En el capítulo 3 se describe el método de cálculo propuesto en la norma ISO 9613 para modelar la propagación y atenuación del ruido. Asimismo, se presentan los fundamentos teóricos, para la localización de fuentes de ruido a partir de arreglos de micrófonos y con base en las diferencias en los tiempos de arribo.

En el capítulo 4 se describe la arquitectura del sistema de medición utilizado en los experimentos, así como los dispositivos que lo conforman.

En el capítulo 5 se presentan los experimentos y resultados obtenidos en la evaluación de la direccionalidad de los micrófonos de un arreglo con geometría triangular.

En el capítulo 6 se presenta la evaluación de una geometría triangular y una lineal, a partir de prototipos construidos para cada una de estas. Se describen los experimentos realizados para ello y los resultados obtenidos. Se evalúan los métodos de localización de fuentes de ruido, basados en las diferencias en el tiempo de arribo.

En el capítulo 7 se presenta el caso de estudio desarrollado y el procesamiento digital aplicado a las señales obtenidas en los experimentos. Se describe el algoritmo para la localización de la fuente sonora puntual predominante.

En el capítulo 8 se describe el procedimiento de generación de los mapas de ruido para el caso de estudio. Se presenta el algoritmo para caracterizar acústicamente la fuente sonora puntual predominante. Asimismo, se describe la implementación del modelo y las pruebas de comprobación del mismo.

### 2. ESTADO DEL ARTE.

En este capítulo se realiza un estudio de las principales fuentes bibliográficas que abordan las temáticas relacionadas con la medición y análisis del ruido ambiental. Asimismo, se da un panorama general de algunos aspectos relacionados con la propagación, estimación y visualización del ruido, así como, de la localización automática de fuentes de ruido.

## 2.1. Medición y análisis del ruido ambiental.

Las repercusiones negativas del ruido sobre la salud y la calidad de vida del ser humano, han traído como resultado que organizaciones nacionales e internacionales se interesen en realizar acciones de prevención, regulación y mitigación de emisiones sonora. Ejemplo de esto es la norma ambiental para el Distrito Federal NADF-005-AMBT-2006 [8], en la cual se establecen límites, condiciones y procedimientos de medición, por ejemplo, calibrar el instrumento de medición al inicio y al final del proceso, así como evitar realizar mediciones bajo condiciones meteorológicas desfavorables como lluvia, tormenta eléctrica, ráfagas de viento y otros. Una norma similar a la establecida para el Distrito Federal es la norma ISO 1996-1:2003 [9], la cual, además de describir cómo medir y evaluar el ruido ambiental, establece ciertos métodos para predecir el nivel de afectación que puede sufrir una comunidad, expuesta a cierta contaminación acústica durante un período prolongado de tiempo.

En la ISO 1996-1:2003 [9], se establece que debe registrarse al menos la información siguiente cuando se lleva a cabo una medición:

- Resultados numéricos
- Técnica de medición
- Tipo de instrumentación utilizada
- Procedimiento de medición utilizado
- Cálculos utilizados
- Condiciones predominantes
- Condiciones atmosféricas (dirección y velocidad del viento, lluvia, temperatura, presión atmosférica, humedad)
- Naturaleza/estado del terreno entre la fuente y el receptor
- Variabilidad de la fuente
- Datos de calibración
- Fecha de la medición, hora de inicio y de parada
- Número de mediciones hechas
- Descripción de las fuentes de sonido investigadas

Las medidas objetivas de los niveles de ruido son una parte indispensable de cualquier sistema o programa de evaluación del ruido ambiental. Los normas y legislaciones especifican qué parámetros deben ser medidos y en la mayoría de los casos, también indican cómo configurar los equipos de medida y como tratar los diversos factores tales como las condiciones meteorológicas.

### 2.2. Mediciones no permanentes y permanentes.

Existen dos formas principales para monitorear el ruido ambiental, las cuales son, *no permanentes* y *permanentes*.

En el monitoreo *no permanente*, las mediciones no son realizadas continuamente durante todo un día. Comúnmente son mediciones aisladas que se realizan mediante un sonómetro o algún sistema que contenga un sensor de presión acústica. Estas mediciones son usadas frecuentemente para el control con base en las normas establecidas; con estas, se ubican los puntos de mayor emisión sonora alrededor de cierta fuente sonora. Usualmente este control es producto de alguna denuncia ciudadana. Como se menciona en [10][11][12], para la confección de mapas estáticos de ruido ambiental se crean mallas de puntos de medición, los cuales son tomados utilizando mediciones como las antes citadas.

El monitoreo de ruido *permanente* se realiza las 24 horas del día, los 365 días del año. Ayuda al control del cumplimiento de los límites de ruido y añade otras ventajas adicionales como mostrar las tendencias del ruido y apoyar a la elaboración de mapas de ruido. Una creciente variedad de organizaciones usan ya el monitoreo permanente de ruido. Un ejemplo de esto es el Sistema Distribuido de Monitoreo Permanente de Ruidos Ambientales instalado en el Centro Histórico [13], iniciativa del gobierno del Distrito Federal y desarrollado en el Centro Investigación en Computación.

#### 2.2.1. Sistemas de monitoreo permanente de ruido.

Los sistemas de monitoreo permanente consisten en un conjunto de puntos distribuidos en una zona de interés que realizan mediciones periódicas durante todo el día, recogiendo información de ruido y otros parámetros ambientales relevantes. Todos los resultados de las mediciones se recogen, almacenan y transfieren periódicamente a un servidor central. El número de terminales (puntos de medición) del sistema de monitoreo, dependerá del área cubierta, así como, de las necesidades específicas de monitoreo. Muchos sistemas, entre los que se encuentran [13][14][15], tienen entre 1 y 30 terminales, incluso existen sistemas con 100 terminales.

Un punto de medición consiste básicamente de un micrófono resistente a la intemperie, un dispositivo de almacenamiento y análisis de datos y un sistema de transmisión de información, tal como una línea telefónica. Los sistemas de monitoreo permanente normalmente tienen bases de datos amplias para el análisis, investigación de impacto y evaluación de estado, incluyendo resultados periódicos. Los sucesos de ruido y las quejas, se pueden correlacionar y combinar con la cartografía digital GIS (Sistema de Información Geográfica), para facilitar la presentación de la exposición de la población al ruido ambiental [16].

#### 2.2.2. Principales indicadores del ruido.

Cuando se evalúa el ruido, es útil analizar las distribuciones estadísticas de los niveles sonoros. El análisis no sólo proporciona información útil sobre la variabilidad de los niveles de ruido, sino que además, es importante en muchas normativas como base para evaluar el ruido de fondo.

#### 2.2.2.1. El decibel (dB).

Comparado con la presión estática del aire  $(10^5 Pa)$ , las variaciones de presión sonora audible son muy pequeñas, en un margen que puede ir desde los 20  $\mu Pa$  ( $20 \times 10^{-6} Pa$ ) hasta 100 *Pa*. Aplicar de forma directa las escalas lineales (en *Pa*) a la medida de la presión sonora lleva a cifras enormes e inmanejables. Ya que el oído responde a los estímulos de forma logarítmica, más que lineal, los parámetros acústicos se expresan usualmente como una relación logarítmica entre el valor medido respecto a un valor de referencia. Esta relación logarítmica es llamada decibel o dB. En términos de niveles de presión sonora, el sonido audible varía desde el umbral auditivo de 0 *dB* hasta el umbral del dolor de 130 *dB* o más [16][17].

El número de variaciones de presión por segundo se llama frecuencia del sonido y se mide en Hertz (Hz). La percepción auditiva normal de una persona joven saludable varía aproximadamente desde 20 Hz hasta 20000 Hz [1].

#### 2.2.2.2. Índices acústicos.

Un índice acústico, también llamado indicador o descriptor, es una magnitud física para describir la contaminación acústica, que tiene relación con los efectos nocivos producidos por ésta. Estos indicadores procesan los niveles sonoros recibidos en el tiempo, algunos dan cuenta de la energía sonora en un período de tiempo, otros indican niveles máximos o mínimos que se alcanzan en un determinado lapso y otros son simplemente valores en un instante. Además del análisis en tiempo que se realiza con estos indicadores, comúnmente se aplican filtros espectrales para algún propósito dado, como por ejemplo, simular la respuesta del oído humano [16][18]

El *nivel de presión sonora (NPS)*, nivel sonoro o simplemente nivel de un sonido, se define como:

$$NPS = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2} \ (dB) \tag{2.1}$$

Donde:

• p representa la presión sonora y  $p_0$  la presión de referencia. En el aire  $p_0 = 20 \mu P a$ .

Por otro parte, como comentan en [16], el índice acústico más comúnmente usado es el nivel *sonoro continuo equivalente* ( $L_{eq}$ ). Este indicador representa el nivel sonoro, de un ruido constante, que tuviera la misma energía sonora de aquel a medir durante el mismo período de tiempo [18][19]. El  $L_{eq}$  se calcula de la manera siguiente:

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right] (dB)$$
(2.2)

Donde:

- p(t): presión sonora en un instante.
- *T*: período de medición.

Una demostración de la gran utilidad que tiene este último indicador se da en [20], donde concluyen que, el índice acústico adecuado para separar la contribución de dos fuentes, es el  $L_{eq}$  con un tiempo de integración no inferior a 30 segundos.

Por otra parte, algunos indicadores representativos de un instante son: el *nivel*  $m\acute{a}ximo$  ( $L_{max}$ ), que no es más que el nivel sonoro más alto que se registra durante un período de medición (dB), y el *nivel mínimo* ( $L_{min}$ ), el cual indica el menor nivel que se registra durante un intervalo de medición (dB) [21].

Asimismo, existen algunos indicadores conocidos como *percentiles* ( $L_{10}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{90}$ , *etc*). Un percentil representa el nivel sonoro que es superado determinado porcentaje del tiempo de medición. Cuánto más chico es el porcentaje de tiempo, más alto será el nivel a superar. Por ejemplo, el  $L_{90}$  es el nivel sonoro que fue superado el 90% del tiempo de medición, por lo cual se suele emplear para registrar el ruido de fondo existente. Por el contrario el  $L_{10}$  registrará un nivel que incluirá solo los eventos más sonoros, los cuales en total estuvieron presentes tan solo el 10% del tiempo de medición (*dB*) [21][22].

Otro indicador importante es el *nivel equivalente día-tarde-noche*  $(L_{den})$ , que integra los niveles sonoros medidos durante 24 horas considerando 12 horas de día  $(L_{day})$ , 4 horas de tarde  $(L_{evening})$  (donde se exigen 5 *dB* menos que en el día) y 8 horas de noche  $(L_{evening})$  (donde se exigen 10 *dB* menos que en el día) [18][21]. Este indicador es empleado en la Comunidad Europea y recientemente en nuestro país, mediante el Sistema Distribuido de Monitoreo Permanente de Ruidos Ambientales en el Centro Histórico del Distrito Federal. Se calcula de la manera siguiente:

$$L_{den} = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{24} \left( 12 \cdot 10^{\frac{L_{day}}{10}} + 4 \cdot 10^{\frac{L_{evening}+5}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{L_{night}+10}{10}} \right) \right] (dB)$$
 (2.3)

#### 2.2.2.3. Ponderaciones.

La molestia debida a una fuente de ruido determinada se percibe de forma diferente según la persona y también depende de otros factores no acústicos tales como, la prominencia de la fuente, la opinión personal del oyente sobre la fuente, entre otros. Durante muchos años, los investigadores han intentado cuantificar esto para que resulte posible una evaluación objetiva de las molestias del ruido y aplicarle límites aceptables.

Los límites están regulados individualmente por el país o la autoridad local. Las diferencias en el estilo de vida, el clima (actividades al aire libre, ventanas abiertas o cerradas) y el diseño de edificios hacen que la armonización internacional de los límites de ruido sea difícil [16].

Las ponderaciones, correcciones o penalizaciones no son más que una medida de ciertos factores conocidos que incrementan la molestia del ruido que está siendo medido. Existen varios tipos de penalizaciones, a continuación mencionamos algunas de ellas y las cuales se utilizan en algunas normativas como [8][23]:

- Penalización por componentes impulsivas.
- Penalización por componentes tonales emergentes.
- Penalización por la hora del día.
- Penalización (positiva o negativa) para ciertas fuentes y situaciones.

La penalización por componentes tonales emergentes varía entre 0 *dB* (sin penalización) y 6 *dB*. Algunos países usan una única penalización de 5 *dB* mientras que otros países utilizan dos o más valores. La penalización máxima por componentes impulsivas puede variar hasta los 7 *dB* entre países. Los períodos temporales de referencia para aplicar penalizaciones por la hora del día varían según el país. Algunos usan sólo el día y la noche, mientras que otros combinan los dos anteriores con períodos de la tarde. Para cada período temporal de referencia se utilizan diferentes procedimientos de evaluación [8][16][23].

#### 2.2.3. Análisis en el dominio de la frecuencia.

El ruido con tonos destacados, como el ruido de ventiladores, compresores o sierras, es, con mucho, más molesto que otros tipos de ruido. Este factor de molestia no se tiene en cuenta en las mediciones de banda ancha. Para evaluar la molestia se podría necesitar un análisis espectral.

#### 2.2.3.1. División del espectro en bandas.

El mecanismo de audición humano es sensible a proporciones de frecuencias más que a una simple frecuencia. La altura es la percepción de "cuan agudo" o "cuan grave" es un sonido y está determinada por la frecuencia de dicho sonido. Una proporción de dos veces una frecuencia se escucha como un cambio de altura de una octava. Este fenómeno se puede resumir diciendo que la percepción de altura del oído, es proporcional al logaritmo de la frecuencia, en lugar de a la frecuencia misma [24].

Para facilitar la medición, comparación y análisis de datos se suele dividir el espectro audible en bandas de octava. Una banda de octava es una banda de frecuencia que está entre dos frecuencias con una relación de dos. Por ejemplo, la banda de octava de 1000 *Hz* comprende las frecuencias entre 707 y 1414 *Hz*. Las octavas adyacentes también están espaciadas en una relación de dos, como las octavas de 500 y 1000 *Hz*. Los centros de las bandas de octava están normalizados por la ISO a números redondeados como sigue: 63, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k, 16k *Hz*. Dado una frecuencia central *Fc*, de una banda de octava, se puede calcular los extremos de la banda ( $F_1 y F_2$ ) de la manera siguiente:

$$F_1 = 10^{\left(\log(Fc) - \frac{\log(2)}{2}\right)}$$
(2.4)

$$F_2 = 10^{\left(\log(F_c) + \frac{\log(2)}{2}\right)}$$
(2.5)

Asimismo, cuando se requiere un análisis más preciso se puede dividir el espectro en bandas de tercio de octava. Las frecuencias centrales de las bandas de tercio de octava para audio están normalizadas por la ISO a números redondeados como sigue: 20, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1k, 1.25k, 1.6k, 2k, 2.5k, 3.15k, 4k, 5k, 6k, 8k, 10k, 12.5k, 16k, 20k *Hz*.

#### 2.2.3.2. Curvas de ponderación.

Cuando se realizan mediciones de nivel de presión sonora, usualmente se quieren considerar con qué sonoridad los niveles medidos, serán percibidos por el oído humano. Para ello, la medición realizada se debe ponderar de acuerdo con la respuesta que tiene el oído humano, el cual es menos sensible a frecuencias muy bajas y muy altas. A causa de este requerimiento se definieron curvas de ponderación espectral. La ponderación de frecuencias más común en la actualidad es la "ponderación A", que se ajusta aproximadamente a la respuesta del oído humano y que proporciona unos resultados expresados como dB(A). La "ponderación C" también se utiliza, particularmente cuando se evalúan sonidos muy intensos o de frecuencia muy baja [16][21]. En la Fig. 2.1 se muestran las curvas de ponderación A y C.



Fig. 2.1 Curvas de ponderación espectral A y C.

Estas ponderaciones, además de adecuar cada banda de frecuencia a la respuesta del oído, cumplen la función de entregar un número único correspondiente a la suma energética de todas las bandas del sonido medido (cada una de ellas con su respectiva corrección de acuerdo con la ponderación empleada) [25].

#### 2.2.3.3. Decibel "A".

El dB(A) (también llamado dBA, decibel "A", o decibel ponderado A), constituye la forma de expresar el nivel de presión sonora, en decibeles, de un sonido cuyo espectro ha sido ponderado con la curva de ponderación A. Una vez que el nivel de presión sonora de un ruido es medido como una magnitud física, el filtro "A" otorga mayor importancia a las bandas de frecuencia para las que el oído humano tiene mayor sensibilidad y resta relevancia a las bandas del espectro audible que requieren de mayores valores energéticos para ser oídas [25].

La medición del nivel de presión sonora "A" es utilizada en un gran número de aplicaciones. Comenzando por los instrumentos acústicos como sonómetros y analizadores de espectro que todos ellos incluyen la ponderación "A" como modo de medición. La presencia de la curva "A" en los instrumentos responde a las exigencias normativas y legales sobre los procedimientos de medición del ruido. La gran mayoría de las legislaciones que protegen a las personas de la exposición al ruido en todo el mundo, ya sea en el ámbito laboral o comunitario, exige medir el ruido utilizando el filtro "A" [22][25].

## 2.3. Propagación del ruido.

La intensidad del sonido decrece a medida que la distancia desde la fuente aumenta. En un espacio libre, lejos de la influencia de objetos cercanos, el sonido de una fuente puntual se propaga uniformemente en todas direcciones. La intensidad del sonido decrece como se muestra en la Fig. 2.2. La misma potencia sonora fluye por A1, A2, A3 y A4, pero el tamaño de estas áreas aumenta conforme a la raíz cuadrada del radio *r*. Esto significa que la potencia sonora por unidad de área (intensidad) decrece conforme a la raíz cuadrada del radio. Si la distancia aumenta el doble, la intensidad se reduce 1/4 de su valor inicial, si se triplica la distancia la intensidad decrece 1/9. En un *campo libre* la intensidad del sonido es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la distancia a la fuente [26][27].



Fig. 2.2 Esquema de propagación del ruido.

Un *campo libre* es un medio homogéneo libre de obstáculos y superficies reflectantes. El sonido en un campo libre viaja en línea recta, libre y sin ser desviado. El término libre hace referencia a un sonido que no es reflejado, absorbido, difractado, refractado, difundido y que no está sujeto a los efectos de la resonancia [26][27].
# 2.3.1. Campo cercano y campo lejano.

### 2.3.1.1. Campo cercano.

En la región muy cercana a la fuente de ruido, el campo sonoro es considerablemente desordenado. En esta región la presión sonora y la velocidad de las partículas no están en fase, por lo que existe una densidad de energía reactiva que no se radia. El campo cercano está limitado a una distancia de la fuente aproximadamente igual a una longitud de onda del sonido o igual a tres veces la dimensión más grande de la fuente, cualquiera que sea mayor [26][28][29].

### 2.3.1.2. Campo lejano.

El campo lejano de una fuente comienza donde termina el campo cercano y se extiende hasta el infinito. La transición del campo cercano al campo lejano es gradual en la región de transición. En esta región la velocidad de las partículas está en fase con la presión, así que toda la densidad de energía es radiante. En la mayor parte de las fuentes, el campo radiado por estas disminuye a una frecuencia de 6 *dB* cada vez que la distancia desde la fuente se dobla [26][28][29].

# 2.3.2. Tipos de fuentes de ruido.

Debido a la diferencia en la complejidad mecánica con la que generan el ruido cada una de las fuentes existentes, es difícil establecer una clasificación para agrupar a cada una de ellas. Sin embargo existen algunas clasificaciones basadas por ejemplo, en el tipo de ruido que estas producen: *ruido continuo constante, ruido continuo intermitente, ruido fluctuante periódico, ruido fluctuante aperiódico, ruido con impulsos repetidos, ruido con un solo impulso*, etc. Asimismo para el análisis de la propagación del ruido se tiende a clasificar a las fuentes en dos grupos: *fuentes puntuales* y *fuentes lineales* [16][30][31].

### 2.3.2.1. Fuentes puntuales.

Si las dimensiones de una fuente de ruido son pequeñas comparadas con la distancia al oyente, entonces se 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 y disminuye en 6 *dB* al doblar la distancia. Esto se mantiene así hasta que el efecto del suelo y la atenuación del aire influyen de forma notoria en el nivel [16][30][31].

Para una fuente puntual con nivel de potencia sonora, Lw, localizada cerca del suelo, el nivel de presión sonora (Lp) a cualquier distancia (r, en m) desde la fuente, puede ser calculado a partir de la ecuación:

$$Lp = Lw - 20 \log 10(r) - 8dB$$
(2.6)

#### 2.3.2.2. Fuentes lineales.

Si una fuente de ruido es estrecha en una dirección y larga en la otra comparada con la distancia al oyente, ésta es llamada *fuente lineal*. Puede ser una fuente individual tal como una cañería llevando un fluido turbulento o puede estar compuesta de muchas fuentes puntuales operando simultáneamente, tal como una sucesión de vehículos en una carretera concurrida [16][30][31].

El nivel de sonido se propaga cilíndricamente, por lo que el nivel de presión sonora es el mismo en todos los puntos a la misma distancia de la línea y disminuye en 3 dB al doblar la distancia. Esto se mantiene así hasta que el efecto del terreno y la atenuación del aire influyen de forma notoria al nivel. Para una fuente lineal con nivel de potencia sonora por metro (Lw/m) localizada cerca del suelo, el nivel de presión sonora (Lp) a cualquier distancia (r, en m) desde la fuente puede ser calculado a partir de la ecuación:

$$Lp = Lw - 10\log 10(r) - 5dB$$
(2.7)

#### 2.3.2.3. Fuentes comunes.

La mayoría de las fuentes de ruido encontradas en los alrededores no son fuentes puntuales simples. En lugar de eso, ellas están hechas de varias fuentes, las cuales emiten más energía sonora en una dirección que en otra. Un ejemplo de este fenómeno son las emitidas por una persona al hablar [16][32].

La conversación de una persona no tiene la misma potencia en todas direcciones. Esto es debido, principalmente, a la *sombra sonora* que genera la cabeza humana. Esto es demostrado por Kuttruff y citado en [32], mediante los resultados que ilustra la Fig. 2.3.



Fig. 2.3 Direccionalidad de la voz humana usada como fuente sonora.

En el plano horizontal los efectos de direccionalidad son alrededor de 5 dB en la banda de 125-250 Hz. Esto se debe a que la cabeza es pequeña comparada con la longitud de onda de 4.5 – 9 ft asociada con esta banda de frecuencia. Sin embargo, hay efectos significativos en la banda de 1400-2000 Hz, en donde existen variaciones alrededor de los 12 dB. En el plano vertical pasa algo similar al plano horizontal excepto por los efectos del torso.

Existen varios esfuerzos por construir fuentes puntuales. Unos de ellos es la fuente comercial omnidireccional OS002 [33]. Esta fuente cuenta con 12 altavoces colocados en cada una de las caras de un dodecaedro, produciendo un patrón de distribución esférico que satisface los requerimientos de las normas ISO 140-3 e ISO 3382. Esta fuente puede generar una potencia de salida máxima de 115 *dB*. Otro ejemplo, es la fuente que se muestra en la Fig. 2.4 y construida en [29], en el Laboratorio de Acústica y Vibraciones de la Universidad Nacional Autónoma de México y que es un modelo similar al anterior, con la única diferencia que entrega una potencia de salida máxima de 94 *dB*.



Fig. 2.4 Fuente sonora omni-direccional completa con su soporte para tripié.

## 2.3.3. Algoritmos para modelar la propagación del ruido.

La pregunta clave que se realiza para caracterizar una fuente de ruido es ¿cuánto ruido genera dicha fuente? Sin embargo, muchos factores afectan al nivel de ruido y los resultados de las medidas pueden variar en decenas de decibeles para la misma fuente de sonido. Para explicar cómo se produce esta variación, se necesita considerar cómo se emite el ruido desde la fuente, cómo viaja a través del aire y cómo llega al receptor. Los factores más importantes que afectan a la propagación del ruido son [16][34]:

- Tipo de fuente
- Distancia desde la fuente
- Absorción atmosférica
- Viento
- Temperatura y gradiente de temperatura
- Obstáculos, tales como barreras y edificios
- Absorción del terreno
- Reflexiones
- Humedad
- Precipitación

De acuerdo con [12][16][34][35] la mayoría de los modelos de propagación de ruido ambiental siguen un esquema metodológico resumido como se muestra en la Fig. 2.5. Estos se basan en el modelado de las fuentes de ruido, modelado de la propagación del ruido y la obtención de los niveles de inmisión (resultados del cálculo).



Fig. 2.5 Esquema fundamental de los algoritmos para modelar la propagación del ruido.

La mayor parte de los estándares internacionales que siguen el esquema metodológico antes mencionado, están relacionados con la fuente de ruido, limitando su uso a ese tipo de fuente en particular. Como por ejemplo, XPS 31-133: método francés para carreteras basado en NMPB-Routes-96, RMR/SRM2: método holandés para ferrocarriles y ECAC-CEAC: método europeo para aeropuertos. Una excepción a esta regla es la norma ISO 9613 [36].

Los algoritmos normalmente se verifican mediante numerosas mediciones y sobre una gran variedad de escenarios tipo de prueba llegando a obtenerse precisiones (incertidumbre) de 3 dB, similar a lo que puede lograrse con las mediciones. Aunque se dispone de métodos más avanzados, la mayoría de los algoritmos estandarizados de uso corriente son empíricos y están basados en simples leyes de la física [16].

Los métodos usados en los estándares internacionales para modelar la propagación del ruido ambiental se agrupan en: métodos prácticos de ingeniería, métodos de aproximado semi-analítico y métodos numéricos [35]. En la Tabla 2.1 se muestra algunos de estos algoritmos.

*Métodos Empíricos o de ingeniería*: La técnica adoptada en estos métodos involucra el cálculo de los niveles de ruido restando por separado, la contribución que tiene cada factor de atenuación en la propagación del ruido. Se basan en resultados empíricos y son muy fáciles de aplicar.

*Métodos de aproximado semi-analítico*: mantienen la misma estructura que los métodos prácticos de ingeniería, pero se basan en simplificaciones analíticas de la ecuación de onda acústica, más que en resultados empíricos. Estos métodos permiten un mejor seguimiento de las condiciones meteorológicas a través del camino de propagación del ruido.

*Métodos numéricos*: Se basan en soluciones numéricas de la ecuación de onda acústica. Los métodos numéricos son bastante precisos y útiles para analizar la propagación del ruido bajo determinadas condiciones meteorológicas, pero están limitados en cuanto a la aplicación práctica, dado que ninguno de estos métodos son capaces, por sí solos, de manejar todas las condiciones ambientales, frecuencias y rangos de transmisión posibles.

Características	Empíricos o de	Métodos de modelado híbrido				
	ingeniería	Aproximado semi-analítico		Numéricos		
	ISO 9613	Ray Tracing	Fast Field Program (FFP)	Crank-Nicholson Parabolic Equation (CNPE)	Generalised Fokker-Planck Equation (GFPE)	
Tiempo de cómputo	Rápido	Rápido	Lento	Lento	Medio	
Precisión	Pobre	Media	Exacta	Muy buena	Buena	
Rango de frecuencia óptimo	Todas	Altas	Bajas	Bajas	Bajas y medias	
¿Condiciones meteorológicas?	No	No	No	Sí	Sí	
;Sombras y cáustica?	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	
¿Fuentes con altura?	No	Sí	Sí	No	Sí	

Tabla 2.1: Comparación de los métodos de propagación de ruido ambiental.

### 2.3.3.1. ISO 9613.

El objetivo de la norma ISO 9613 es especificar métodos de cálculo de la atenuación del sonido que se propaga al aire libre, para poder predecir los niveles de ruido ambiental en ubicaciones distantes, provenientes de varias fuentes de ruido. Por otra parte, otros estándares establecen algunos métodos para determinar los niveles de potencia sonora emitidos por varios tipos de fuentes como, una maquinaria y equipamiento específico (ISO 3740), o plantas industriales (ISO 8297). El método que se describe en la ISO 9613 es general debido a que puede ser aplicado a una amplia variedad de fuentes de ruido y cubre la mayor parte de los mecanismos de atenuación [36].

El método consiste específicamente en un algoritmo de bandas de octava, con frecuencias centrales desde 63 Hz hasta 8kHz, para calcular la atenuación del sonido que se origina a partir de una o varias fuentes puntuales. Estas fuentes pueden estar en movimiento o estacionarias. El algoritmo predice el nivel de presión sonora

ponderado A. Asimismo, se establecen términos para tener en cuenta los efectos físicos siguientes:

- Divergencia geométrica
- Absorción atmosférica
- Efectos del suelo
- Reflexión de las superficies
- Barreras

El nivel sonoro continuo equivalente ponderado A  $(L_{AT}(DW))$  debe ser calculado sumando la contribución que tiene cada fuente por cada una de las bandas de octava. La ecuación general para este cálculo en la ISO 9613 es la siguiente:

$$L_{AT}(DW) = 10 \log \left\{ \sum_{i=1}^{n} \left[ \sum_{j=1}^{8} 10^{0.1 \left[ L_{fT}(ij) + A_f(j) \right]} \right] \right\} dB$$
(2.7)

Donde:

- *n*: es el número de contribuciones i (fuentes).
- *j*: es un índice indicando las 8 bandas de octava con frecuencias centrales desde 63Hz hasta 8kHz.
- $L_{fT}(ij)$ : es el nivel de presión sonora de la fuente i en la banda j
- $A_f(j)$ : es la ponderación en la banda de octava j que se obtiene al aplicar el filtro A

### 2.3.3.2. Atenuación por absorción atmosférica.

La reducción de ruido al pasar a través del aire depende de muchos factores incluyendo:

- Distancia desde la fuente
- Contenido en frecuencia del ruido
- Temperatura ambiental
- Humedad relativa
- Presión ambiental

La Tabla 2.2 muestra los coeficientes de absorción atmosférica, expresados en *dB/Km*, calculados por Sutherland and Bass en 1979. Estos coeficientes corresponden al promediado para la banda de octava correspondiente.

Temperatura	Humedad	dB/Km						
(°C)	relativa (%)	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
	15	0.2	0.6	1.3	2.4	5.9	19.3	66.9
25	20	0.2	0.6	1.5	2.6	5.4	15.5	53.7
25	25	0.2	0.6	1.6	3.1	5.6	13.5	43.6
	30	0.1	0.5	1.7	3.7	6.5	13.0	37.0
50	15	0.1	0.4	1.2	2.4	4.3	10.3	33.2
	20	0.1	0.4	1.2	2.8	5.0	10.0	28.1
	25	0.1	0.3	1.2	3.2	6.2	10.8	25.6
	30	0.1	0.3	1.1	3.4	7.4	12.8	25.4
75	15	0.1	0.3	1.0	2.4	4.5	8.7	23.7
	20	0.1	0.3	0.9	2.7	5.5	9.6	22.0
	25	0.1	0.2	0.9	2.8	6.5	11.5	22.4
	30	0.1	0.2	0.8	2.7	7.4	14.2	24.0

Tabla 2.2: Coeficientes de absorción atmosférica calculados por Sutherland and Bass en 1979.

En la ISO 9613 se calculan coeficientes de absorción atmosférica para una frecuencia simple y bandas de octava, los cuales quedan expresados en *dB/km*. Este coeficiente está relacionado estrechamente con parámetros como, la temperatura del aire, la humedad relativa y, por supuesto, la frecuencia del sonido. A partir de estos cálculos se puede determinar que las frecuencias altas se atenúan más que las frecuencias bajas producto de la absorción atmosférica. En la Tabla 2.3 se muestra el efecto de este fenómeno físico con los distintos coeficientes que se aplican por banda de octava, en el método de la ISO 9613.

		Coeficiente de atenuación atmosférica $lpha$ , dB/Km							
Temperatura (°C)	Humedad relativa	Frecuencia del centro de la banda de octava, Hz							
	(%)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
10	70	0.1	0.4	1.0	1.9	3.7	9.7	32.8	117
20	70	0.1	0.3	1.1	2.8	5.0	9.0	22.9	76.6
30	70	0.1	0.3	1.0	3.1	7.4	12.7	23.1	59.3
15	20	0.3	0.6	1.2	2.7	8.2	28.2	88.8	202
15	50	0.1	0.5	1.2	2.2	4.2	10.8	36.2	129
15	80	0.1	0.3	1.1	2.4	4.1	8.3	23.7	82.8

Tabla 2.3: Coeficiente de atenuación atmosférica α, por banda de octava, calculados en la ISO 9613.

### 2.3.3.3.

## 2.3.3.4. Efecto del viento y la temperatura.

El viento es otro factor que influye en la propagación del ruido, ya sea para atenuarlo o para incrementarlo. En distancias cortas, hasta 50 m, el viento tiene una influencia pequeña en el nivel de sonido medido. Para mayores distancias, el efecto del viento se hace apreciablemente mayor. La velocidad del viento aumenta con la altitud, la cual desviará la trayectoria del sonido para "hacerla converger" en el lado situado a favor del viento y crear una "sombra" en el lado de la fuente que se encuentra en contra del viento [16][34][37].

El nivel puede aumentar unos pocos decibeles a favor del viento, dependiendo de su velocidad. Pero midiendo en contra del viento o lateralmente, el nivel puede caer en más de 20 dB, dependiendo de la velocidad del viento y de la distancia de la fuente al receptor. Ésta es la razón por la que se prefiere medir a favor del viento, debido a que la desviación es más pequeña y también el resultado es prudente o conservador. En la Fig. 2.6 se ilustra este efecto [16][34][37].



Fig. 2.6 Influencia del viento en la propagación del ruido.

Los gradientes de temperatura crean efectos similares a los de los gradientes de viento, excepto en que los primeros son uniformes en todas direcciones a partir de la fuente [38].

Debido a estos dos fenómenos físicos las ecuaciones para el cálculo del nivel sonoro continuo equivalente, utilizadas en la ISO 9613, fueron determinadas bajo el promedio de las condiciones siguientes:

- Dirección del viento dentro del rango de  $\pm 45^{\circ}$  con respecto a la línea que conecta el centro de la fuente dominante y el centro de la región donde se encuentre el receptor, con el viento fluyendo de la fuente al receptor.
- Velocidad del viento aproximadamente entre 1 m/s y 5 m/s medida a una altura entre 3 m y 11 m sobre el suelo.

Asimismo, en estas ecuaciones se utiliza una corrección meteorológica (*Cmet*), la cual está determinada principalmente por un coeficiente basado en la velocidad y dirección del viento y los gradientes de temperatura [37].

### 2.3.3.5. Atenuación por barreras u obstáculos.

En la ISO 9613 se establecen algunos parámetros que debe cumplir un objeto para ser considerado una barrera:

- La densidad de la superficie del objeto es al menos de 10 Kg/m<sup>2</sup>
- El objeto tiene una superficie cerrada sin grandes grietas o huecos.
- La dimensión horizontal del objeto, normal a la línea fuente-receptor, es mayor que la longitud de onda  $\lambda$  para la frecuencia central de la banda de octava de interés. En la Fig. 2.7 queda ilustrado.





La reducción de ruido causado por una barrera depende de dos factores:

- 1. La diferencia de la trayectoria de la onda sonora al viajar por encima de la barrera comparada con la transmisión directa al receptor.
- 2. El contenido en frecuencia del ruido.

El efecto combinado de estos dos factores se muestra en la Fig. 2.8, en la que se observa que las bajas frecuencias son difíciles de reducir usando barreras. Por otra parte, en la Fig. 2.9 se muestra la atenuación por el efecto de barrera para una pantalla típica en función de la altura de la misma. Una barrera es mucho más efectiva si se coloca cerca de la fuente de ruido o del receptor [16][37].



Fig. 2.8 Influencia de la frecuencia y la trayectoria del ruido en la atenuación de las barreras.



Fig. 2.9 Influencia de la altura de la barrera en la atenuación del ruido.

### 2.3.3.6. Atenuación por los efectos del terreno.

La atenuación del terreno se debe principalmente al sonido reflejado por la superficie que interfiere con el sonido que se propaga directamente de la fuente al receptor [39]. En la ISO 9613 se establece que la atenuación debido al terreno está determinada principalmente por las superficies cercanas a la fuente y al receptor. Es por ello que dividen la trayectoria del sonido de la fuente al receptor en tres regiones, como se muestra en la Fig. 2.10.



Fig. 2.10 Regiones para el cálculo de la atenuación del terreno.

Para calcular la atenuación clasifican cada una de las regiones anteriores asignándole un factor de terreno G, según sea el caso. Los tipos de terreno que se manejan son:

- Superficies duras, en las cuales se incluyen pavimento, agua, hielo, concreto y todas las demás superficies que tienen baja porosidad.
- Superficies blandas o porosas, en las cuales se incluyen todas aquellas que contengan hierba, árboles u otra vegetación, así como superficies que sean conveniente para el crecimiento de la misma, como la tierra de una granja.
- Superficies mixtas, las cuales consisten en regiones que contienen tramos de superficie dura y blanda. Para estas superficies el factor *G* es determinado considerando la fracción de la superficie que corresponda a cada una de las anteriores.

La atenuación del suelo se calcula en bandas de frecuencia, para tener en cuenta el contenido en frecuencia de la fuente de ruido y el tipo de terreno entre la fuente y el receptor. La Fig. 2.11 ilustra una generalización de la atenuación del terreno con respecto a las características del suelo [16].



Fig. 2.11 Atenuación del terreno con respecto al tipo de suelo y la frecuencia del sonido.

### 2.3.3.7. Otros tipos de atenuación.

Existen otros tipos de atenuación que se pueden tener en cuenta o que son aplicables según sea el caso de estudio. En esta categoría se pueden mencionar los tipos siguientes [34][37]:

Atenuación por follaje: El follaje de los árboles y arbustos proporciona una pequeña cantidad de atenuación, pero sólo si es suficientemente densa como para bloquear por completo la vista a lo largo del camino de propagación, por ejemplo cuando es imposible ver a una distancia corta a través del follaje. La atenuación puede ser por la vegetación cerca de la fuente, del receptor o por ambas situaciones, como se ilustra en la Fig. 2.12.

Atenuación por instalaciones o sitios industriales: En sitios industriales, la atenuación se puede producir debido a la dispersión de las instalaciones y otros objetos. El término instalaciones, incluye elementos como tubos, válvulas, cajas, elementos estructurales, etc. Este tipo de atenuación se recomienda que se determine con base en mediciones, dado que depende fuertemente de la clase de sitio que se analice. Sin embargo, en general la atenuación aumenta a medida que aumenta la distancia recorrida a través de la zona industrial como se muestra en la Fig. 2.13.

Atenuación aglomeración de casas: Ya sea que la fuente, el receptor o ambos estén situados en una zona de aglomeración de casas ocurrirá una atenuación debido a las proyecciones que se originan de las mismas. Sin embargo, este efecto puede ser compensado en gran medida por la propagación entre casas y por la reflexión de otras cercanas.



Fig. 2.12 Atenuación debido al follaje.



Fig. 2.13 Atenuación debido a instalaciones o sitios industriales.

# 2.4. Mapas de ruido.

Los mapas de ruido son una herramienta fundamental para conocer la situación acústica de grandes áreas, aunque también son utilizados habitualmente para analizar zonas de menor extensión con precisión. Por tanto, pueden abarcar cualquier rango: desde salas pequeñas, grandes núcleos de población y vías de comunicaciones. El término general de mapas de ruido se suele utilizar para referirse a mapas horizontales de líneas isofónicas a cierta altura del suelo. El nivel al que se refieren las líneas isofónicas suele ser un nivel sonoro continuo equivalente [40].

# 2.4.1. Tipos de mapas de ruido.

Los mapas de ruido pueden ser además, generales o específicos sobre una o varias fuentes determinadas. Los mapas urbanos serían del primer tipo, mientras que es frecuente realizar mapas específicos del entorno de las carreteras, de los ferrocarriles, de los aeropuertos, de canteras, zonas de ocio, zonas de obra y de determinadas industrias.

Al elaborar un mapa de ruido es necesario determinar en primer lugar las características del mapa que se desea obtener, entre las que se pueden mencionar:

- Mapa general o específico para cierta fuente.
- Ámbito del mapa y altura sobre el suelo.
- Escala de trabajo y precisión de los datos.
- Índices acústicos é información reflejados en el mapa.

## 2.4.2. Técnicas de construcción de mapas de ruido.

Existen tres técnicas fundamentales para la construcción de mapas de ruido [40][41][42]:

- Basada en mediciones.
- Basada en modelos de simulación.
- Mixta.

Los mapas de ruido basados en mediciones se generan mediante interpolación de mediciones puntuales, con lo que se estima el nivel de ruido en áreas que no fueron medidas. Ejemplo de ello es la metodología descrita en [43]. La selección de los puntos de medida se realiza mediante una malla o retícula que se superpone a la zona de estudio. El paso de malla o tamaño de la retícula varía según la escala de trabajo y la precisión exigida al mapa. Los recursos disponibles limitan frecuentemente este valor. De acuerdo a [16], el principal inconveniente de estos mapas es el costo en tiempo y dinero para realizar las mediciones. Sin embargo, para optimizar los recursos puede cambiarse el tamaño de la retícula, reduciéndolo en zonas complejas urbanizadas y aumentándolo en zonas poco pobladas.

Los mapas de ruido basados en modelos de simulación emplean cálculos matemáticos establecidos en estándares internacionales para simular la situación acústica en la zona. En estos modelos se recrea la topografía del área, se definen las condiciones ambientales habituales, la absorción acústica de los terrenos, y se caracterizan los edificios, vías de comunicaciones y fuentes de ruido del entorno. Posteriormente, se calculan las atenuaciones que sufren las emisiones de los distintos focos de ruido.

Los mapas de ruido basados en la técnica mixta utilizan principalmente modelos de simulación e incorporan algunas mediciones puntuales para la estimación, pero mayormente para la validación de los resultados estimados. Algunos desarrollos donde se utiliza este tipo de técnica son [44][45][46].

En la Fig. 2.14 se muestran los resultados obtenidos en [41] al evaluar tres modelos para la construcción de mapas de ruido. Los modelos A, B y C están basados en técnicas de simulación, mediciones y mixtas, respectivamente.



Fig. 2.14 Resultado de cada uno de los modelos utilizando el indicador Lday.

A partir de los resultados de [41] llegan a la conclusión que los modelos A y C presentan gran cantidad de datos similares, como se muestra en la Fig. 2.15, y que dichos modelos (A y C) representan correctamente la zona de estudio. En cambio, el

modelo B no simula fielmente la zona estudiada, esto se debe principalmente, a que no tienen en cuenta parámetros como la absorción y solo realiza una interpolación entre los puntos insertados, sin identificar ni tener en cuenta la presencia de edificios, o cualquier otro parámetro.



Fig. 2.15 Comparación entre los modelos. 1) A y B 2) A y C 3) B y C.

# 2.4.3. Sistemas de información geográfica (GIS).

Un Sistema de Información geográfica es una integración organizada de herramientas y datos geográficos. Puede ser concebido como una especialización de un sistema de bases de datos, caracterizado por su capacidad de manejar datos geográficos, que están geo-referenciados y los cuales pueden ser visualizados como mapas. Es un conjunto de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados para resolver problemas complejos de planificación y gestión [47][48].

Existen diversas herramientas para construir GIS, como por ejemplo Geotools. Geotools es una biblioteca o conjuntos de bibliotecas, para JAVA, que proveen un conjunto estándar de métodos poderosos y sugerentes para la manipulación de datos geoespaciales. Una de las características fundamentales es que Geotools implementa algunos de los estándares de la OGC (Open Geospatial Consortium) como son el estándar <u>OGC Grid Coverage</u> [49], para el trabajo con rasters, el <u>OGC Styled Layer Descriptor (SLD)</u> [50], para el manejo de la simbología, el <u>OGC Filter Encoding</u> [51], para el manejo de atributos y filtros espaciales, entre otros. La ventaja que tiene Geotools con respecto a otros GIS comerciales, como por ejemplo ArcGIS, es que son bibliotecas abiertas las cuales dan libertad al desarrollador, para implementarlas en la forma que desee, mezclando las fortalezas del lenguaje JAVA con el manejo de información geospacial.

Existen otras herramientas de código abierto como por ejemplo [52]:

*JTS Topology Suite*: es por mucho la biblioteca central para trabajo con geometría en el desarrollo de GIS en JAVA. Provee implementación en JAVA para el estándar <u>OGS</u> <u>Simple Feature Access</u> [53]. Esta biblioteca es utilizada por Geotools.

*PostGIS*: añade la capacidad de manejar información espacial a las base de datos objeto - relacional PostgreSQL.

*GRASS*: es fácilmente el más antiguo de los productos de código abierto de software GIS. Originalmente fue un proyecto exclusivo para el Ejército de los Estados Unidos, se inició en 1982 para proporcionar capacidades que no existían en el sector comercial de los GIS.

*QGIS* (Quantum GIS): es un entorno de visualización GIS construido principalmente para Linux. QGIS depende del mismo conjunto de aplicaciones utilizado por el popular entorno de escritorio KDE.

*gvSIG*: es un proyecto de la provincia española de Valencia. El objetivo del proyecto es proporcionar una herramienta de código abierto que utiliza estándares abiertos y es independiente de la plataforma. gvSIG un número de bibliotecas en JAVA, incluyendo GeoTools y JTS.

Como se plantea en [54], el uso apropiado de los sistemas de información geográfica en el mapeo de los efectos del ruido, hace posible la optimización de la calidad y la eficiencia en los estudios de dichos efectos, automatizando el proceso de modelado a partir de la estimación y visualización de los datos, así como del desarrollo y aplicación de métodos estandarizados para el estudio. Un ejemplo importante de ello, es el rol que juegan los GIS en la metodología usada en [12].

# 2.5. Sistemas de tiempo real.

Un sistema de tiempo real [55], se caracteriza porque sus especificaciones básicas y sus fundamentos de diseño deben incluir la capacidad para satisfacer las restricciones de tiempo. Esto implica que su perfección depende no solamente de los procedimientos lógicos, sino también de lo oportuno de sus acciones. Para funcionar adecuadamente, debe producir un resultado correcto dentro de un tiempo establecido, llamado *línea vedada*. En estos sistemas, una acción realizada demasiado tarde (o demasiado temprano) puede resultar inútil o incluso nociva, aún cuando funcionalmente sea correcta. Si los requerimientos de tiempo vienen de aplicaciones de seguridad esencialmente críticas, al infringirse la *línea vedada*, los resultados podrían ser catastróficos. Ello puede ocasionar problemas serios en el sistema o en el ambiente, incluyendo daño o muerte de personas. Estos se denominan *Sistemas Rígidos de Tiempo Real*. Por el contrario, hay aplicaciones que también tienen *líneas vedadas*, pero no son críticas. Por ejemplo, se puede definir un sistema de transmisión que tendrá fallas si los paquetes de voz no son enviados dentro de *una línea vedada*, durante una teleconferencia. Sin embargo, tales fracasos no serán catastróficos, ellos

son denominados *Sistemas Flexibles de Tiempo Real*. En determinadas aplicaciones pueden considerarse tareas de tiempo real flexibles la visualización gráfica y estadística de datos, supervisión de procesos, análisis de señales, optimización dinámica y estática para lazos de control, etc. Sin embargo, sólo puede ser considerado un sistema operativo como de tiempo real cuando es capaz de asegurar las restricciones de tiempo y ser predecible.

Aunque usualmente se cree, que satisfacer los requerimientos de tiempo, es una cuestión de incrementar el rendimiento de los sistemas, investigaciones en sistemas de tiempo real han desacreditado esta noción. De hecho, la estructura computacional apropiada para que la respuesta temporal del sistema sea adecuada, es fundamentalmente diferente, del requerimiento de alto rendimiento [55].

# 2.6. Localización automatizada de fuentes de ruido.

Parte importante de los algoritmos que modelan la propagación del ruido, como se mencionó anteriormente, es el modelado de la fuente de ruido. Esto incluye no solo las características acústicas de la fuente sino también su ubicación. La localización es la determinación de la posición de cierto objeto, ya sea una o varias fuentes emitiendo cierta energía de interés, como por ejemplo, energía acústica, ultrasónica, óptica, sísmica y térmica [56].

En ambientes acústicos, la ubicación de la fuente juega un papel importante en aplicaciones tales como el seguimiento automático de cámaras de videoconferencia, realce de cierto discurso, reconocimiento verbal, entre otras. La estimación de la ubicación de la fuente, nombrado frecuentemente como el problema de ubicación, ha sido de interés por décadas. La estimación del ángulo de arribo o la posición en coordenadas cartesianas de la fuente, necesitan de un arreglo con dos o tres micrófonos [57].

Existen numerosos e interesantes algoritmos para señales de banda corta cuando se intenta resolver dos problemas que están estrechamente relacionados: la estimación del número de fuentes y la localización de múltiples fuentes [58][59][60][61][62][63]. Asimismo, las investigaciones para estimar la ubicación de las fuentes, que generan señales de banda ancha, tienen un creciente interés hoy en día. Ejemplo de estos trabajos son [64][65][66]

## 2.6.1. Arreglos de micrófonos.

Un arreglo de micrófono consiste en un conjunto de micrófonos posicionados de tal manera que la información espacial es capturada correctamente. El principal objetivo del procesamiento de señales de arreglo de micrófonos es la estimación de ciertos parámetros o la extracción de algunas señales de interés, dependiendo de la aplicación, usando la información espacio-temporal (y posiblemente la frecuencia), disponible a partir de las señales captadas por el arreglo de micrófono. Los problemas principales que puede ser resuelto potencialmente con arreglos de micrófonos son [57]:

- Reducción de ruido
- Reducción de eco
- Eliminación de los efectos de la reverberación
- Localización de una fuente
- Estimación del número de fuentes
- Localización de múltiples fuentes
- Separación de fuentes

### 2.6.1.1. Diseño del arreglo.

La geometría del arreglo de micrófono, dependiendo de la naturaleza de la aplicación, juega un importante rol en la formulación de los algoritmos de procesamiento. Por ejemplo, en la localización de fuentes, la geometría del arreglo de micrófonos debe ser conocida para que sea posible la ubicación correcta de la fuente. En algunos casos una geometría regular simplifica el problema de la estimación, es por ello que arreglos uniformes lineales y circulares son utilizados frecuentemente [57]. Otro tipo de geometría que ha sido ampliamente investigada es la geometría triangular [67][68].

### 2.6.1.2. Estimación de la dirección de arribo.

La estimación de la dirección de arribo (DOA) de una fuente sonora durante mucho tiempo ha sido de gran interés para la comunidad de investigadores. La necesidad de estimar la dirección de arribo (DOA) se presenta en muchas aplicaciones de ingeniería incluyendo las comunicaciones inalámbricas, el radar, radioastronomía, sonar, la navegación, el seguimiento de varios objetos, rescate y en dispositivos para la asistencia en emergencias. Existen numerosos algoritmos para la obtención de la dirección de arribo, los cuales son discutidos a detalle en [69][70] y entre los que podemos destacar aquellos basados en la estimación de la diferencia en los tiempos de arribo (TDOA). Estos algoritmos, basados en TDOA, se utilizan para encontrar la posición a partir de la información obtenida con determinado arreglo de micrófonos. Debido a la simplicidad y el bajo costo computacional, los algoritmos de estimación TDOA son ampliamente utilizados en sistemas de tiempo real [68].

## 2.7. Conclusiones.

El ruido es un sonido indeseable y molesto. Existen numerosos indicadores para la evaluación de la contaminación acústica, entre los que destaca el nivel sonoro continuo equivalente. Estos indicadores son calculados a partir de mediciones permanentes o no permanentes en un punto, que solo representan con exactitud, el comportamiento sonoro en el mismo. Cualquier estimación alrededor de estos puntos, debe realizarse mediante modelos computacionales.

Los mapas de ruidos con base en mediciones en tiempo real, son una solución para conocer la situación acústica en áreas alrededor de un punto de medición. Existen tres

técnicas fundamentales para la construcción de mapas de ruido: basadas en mediciones, en modelos de simulación o mixtas. Los modelos de simulación emplean cálculos matemáticos establecidos en estándares internacionales para modelar la propagación y atenuación del ruido. Estos algoritmos parten del conocimiento del tipo de fuente y la ubicación de las mismas. En la norma ISO 9613, se establece un método de cálculo basado en resultados empíricos y con un bajo costo computacional para su aplicación.

# 3. MARCO TEÓRICO.

Los algoritmos que modelan la propagación del ruido se basan en el conocimiento a priori de las fuentes de ruido. En la norma ISO 9613 se define un algoritmo basado en resultados experimentales cuyo costo computacional es bajo, lo cual lo hace adecuado para sistemas en tiempo real. Asimismo, para generar un mapa de ruido utilizando dichos algoritmos, se debe lidiar con el desconocimiento de la ubicación y las características acústicas de las fuentes sonoras alrededor del punto de medición.

En este capítulo se describe el algoritmo de modelación definido en la ISO 9613. Asimismo, se dan algunos fundamentos teóricos relacionados con la estimación de la dirección de arribo, las diferencias en los tiempos de arribo de las señales obtenidas en un arreglo de micrófono, así como algunas consideraciones a tener en cuenta al trabajar con arreglos de micrófonos.

# 3.1. Algoritmo propuesto para modelar la propagación del ruido en la ISO 9613.

El algoritmo definido en la norma ISO 9613 se basa en el cálculo por banda de octava de la contribución que tiene cada fuente involucrada en el campo sonoro. Para ello se calcula la atenuación, por banda de octava, que se origina a partir de cada fuente de ruido. La ecuación general para el cálculo del nivel sonoro continuo equivalente ponderado A ( $L_{AT}(DW)$ ) se describe en la sección 2.2.3.1 mediante la ecuación (2.7).

# 3.1.1. Descripción de las fuentes de ruido.

Las ecuaciones que se utilizan son para la atenuación del sonido de fuentes puntuales. Por lo tanto, para fuentes de ruidos extendidas, como el tráfico rodado, tráfico ferroviario o una planta industrial (la que puede incluir varias instalaciones o plantas, junto con el movimiento del tráfico en el sitio), se debe representar con un conjunto de secciones, cada una con cierta potencia sonora y directividad. La atenuación del sonido calculada para un punto representativo dentro de una sección, se utiliza para representar la atenuación de toda la sección. Una fuente lineal debe ser dividida en secciones lineales mientras que una fuente de área debe ser dividida en secciones de área, cada una representada por una fuente puntual en su centro [37].

Sin embargo, un grupo de fuentes puntuales puede ser descrito por una fuente puntual equivalente situado en el centro del grupo, en particular si [37]:

- Las fuentes tienen aproximadamente la misma potencia sonora y altura sobre el suelo.
- Existen las mismas condiciones de propagación desde todas las fuentes hasta el punto receptor.

• La distancia d de una fuente puntual equivalente dentro del grupo siempre es mayor a dos veces la dimensión más grande ( $H_{max}$ ) de todas las fuentes ( $d > 2H_{max}$ ).

### 3.1.2. Cálculo por banda de octava.

El nivel de presión sonora continuo equivalente en un punto receptor  $(L_{fT}(DW))$ , debe ser calculado para cada fuente puntual, y sus imágenes, y por cada banda de octava con frecuencias centrales de 63 *Hz* a 8 *kHz*, a partir de la ecuación siguiente [37]:

$$L_{fT}(DW) = L_w + D_c - A$$
 (3.1)

Donde:

- $L_{fT}(DW)$  es el nivel de presión sonora continuo equivalente en la ubicación del receptor para la banda de octava analizada.
- $L_w$  es el nivel de potencia sonora de la banda de octava en decibeles.
- $D_c$  es la corrección por directividad en decibeles. Para una fuente puntual omnidireccional emitiendo en campo libre,  $D_c = 0 \ dB$ .
- *A* es la atenuación en la banda de octava, en decibeles, que ocurre durante la propagación de la fuente al receptor.

Los niveles de potencia sonora de la ecuación (3.1) deben ser determinados a partir de mediciones, por ejemplo, como se describe en la ISO 3780 para maquinarias o en la ISO 8297 para plantas industriales [37].

El término de atenuación A, utilizado en la ecuación (3.1), se calcula a partir de la ecuación siguiente [37]:

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc}$$
(3.2)

Donde:

- $A_{div}$  es la atenuación por divergencia geométrica (ver sección 3.1.3).
- *A<sub>atm</sub>* es la atenuación por absorción atmosférica (ver sección 3.1.4).
- $A_{gr}$  es la atenuación por los efectos del suelo (ver sección 2.2.3.5).
- $A_{bar}$  es la atenuación por barreras u obstáculos (ver sección 2.2.3.4).
- $A_{misc}$  es la atenuación por otros efectos (ver sección 2.2.3.6).

### 3.1.3. Cálculo de la atenuación por divergencia geométrica.

La divergencia geométrica representa la propagación esférica en campo libre de una fuente puntual, por lo que la atenuación en decibeles se calcula de la manera siguiente [34][37]:

$$A_{div} = 20 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + 10 \log_{10} 4\pi$$
(3.3)

Donde:

- *d* es la distancia de la fuente al receptor en metros.
- $d_0$  es la distancia de referencia de 1 m.

### 3.1.4. Cálculo de la atenuación por absorción atmosférica.

La atenuación debido a la absorción atmosférica en decibeles  $(A_{atm})$  durante la propagación a través de una distancia d, en metros, se calcula a partir de la ecuación siguiente [37]:

$$A_{atm} = \alpha d / 1000 \tag{3.4}$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de atenuación atmosférica, en decibeles por kilómetros, para cada banda de octava. Estos coeficientes vienen definido en la Tabla 2.3.

El coeficiente de atenuación atmosférica depende en gran medida de la frecuencia del sonido, la temperatura ambiente y humedad relativa del aire, pero sólo débilmente de la presión ambiental. Para el cálculo de los niveles de ruido ambiental, el coeficiente de atenuación atmosférica debe basarse en valores medios determinados a partir del intervalo de tiempo donde las condiciones meteorológicas sean relevantes para la localidad [37].

## 3.2. Estimación de la dirección de arribo (DOA).

La estimación de la dirección de arribo trata con el caso donde la fuente sonora esta en el campo lejano con respecto al arreglo de micrófonos, como se ilustra en la Fig. 3.1. En esta situación, la fuente irradia una onda s(k), cuyo frente de onda es plano y que se propaga a través del aire. La normal al frente de onda forma un ángulo  $\theta$  con la línea que une a los dos micrófonos y la señal recibida por cada micrófono es una versión atrasada o adelantada de la señal recibida en el sensor de referencia. Si se toma el primer sensor ( $y_1(k)$ ), en la Fig. 3.1, como el punto de referencia y se denota la distancia entre ellos como d, la señal en el segundo sensor está atrasada, el tiempo requerido por la onda para propagarse en una distancia igual a  $d \cos \theta$ . Por lo tanto, la diferencia en tiempo, al recibir la señal acústica entre los dos sensores, está dada por

 $\tau_{12} = d \cos \theta / c$ , donde *c* es la velocidad del sonido en el aire. Si el ángulo se encuentra entre 0° y 180° y el tiempo  $\tau_{12}$  es conocido, entonces el ángulo  $\theta$  puede ser determinado y viceversa. Por lo tanto, estimar el ángulo  $\theta$  es esencialmente lo mismo a estimar la diferencia en tiempo  $\tau_{12}$ . En otras palabras, el problema de la estimación de la dirección de arribo (DOA) es el mismo que para la estimación de la diferencia en el tiempo de arribo (TDOA), para el caso del *campo lejano* [71].



Fig. 3.1 Ilustración de la estimación de la dirección de arribo en el espacio de dos dimensiones.

Asimismo, el ángulo de incidencia puede ser estimado con el uso de dos o más sensores, pero la distancia entre la fuente y el arreglo de micrófonos es imposible de determinar si la fuente se encuentra en el *campo lejano*. Sin embargo, si la fuente se encuentra en el campo cercano, como se ilustra en la Fig. 3.2, es posible estimar no solo el ángulo con el que la onda alcanza a cada micrófono, sino también la distancia entre la fuente y cada micrófono. Si se toma el primer micrófono  $(y_1(k))$  como el sensor de referencia y se considera  $\theta_n$  y  $r_n$  como el ángulo incidente y la distancia entre el la fuente sonora y el micrófono, respectivamente, para n = 1,2,3, el TDOA entre  $y_2(k)$  y  $y_1(k)$  está dado por [71]:

$$\tau_{12} = (r_2 - r_1)/c \tag{3.5}$$

El TDOA entre  $y_3(k)$  y  $y_1(k)$  es:

$$\tau_{13} = (r_3 - r_1)/c \tag{3.6}$$

Aplicando la regla de los cosenos, se obtiene:

$$r_2^2 = r_1^2 + d^2 + 2r_1 d\cos(\theta_1) \tag{3.7}$$

$$r_3^2 = r_1^2 + 4d^2 + 4r_1d\cos(\theta_1) \tag{3.8}$$

Para aplicaciones prácticas con arreglos de micrófonos, la distancia d debe ser siempre medida una vez que el arreglo esté fijado. Si  $\tau_{12}$  y  $\tau_{13}$  son conocidos entonces se puede calcular todos los parámetros restantes  $\theta_1$ ,  $r_1$ ,  $r_2$  y  $r_3$  solucionando las ecuaciones desde (3.5) hasta (3.8). Más aun, aplicando la regla del seno, se puede obtener un estimado de  $\theta_2$  y  $\theta_3$ . Por lo tanto, toda la información con respecto a la posición de la fuente relativa al arreglo de micrófono, puede ser determinada usando la regla de triangulación una vez que la información del TDOA está disponible. Este principio básico de triangulación es el fundamento de la mayoría de las técnicas de localización de fuentes sonoras [71].

Por lo tanto, ya sea que la fuente se encuentre en el *campo lejano* o cercano, el paso fundamental para obtener la información del origen de la fuente es el de estimar el TDOA entre diferentes micrófonos. Este problema de estimación sería una tarea fácil, si las señales recibidas fueran solamente versiones desplazadas y escaladas una de otra. Sin embargo, en la realidad, la fuente sonora está inmersa en un ambiente ruidoso donde la existencia del ruido es inevitable. Más aún, cada señal observada puede contener múltiples replicas atenuadas y desplazadas de la señal original, debido a las reflexiones de los objetos. Este efecto, conocido como reverberación, deteriora seriamente la señal original. En adición a esto, la fuente puede también moverse, resultando un cambio en los tiempos calculados. Todos estos factores hacen el cálculo del TDOA un problema desafiante y complejo [70][71].



Fig. 3.2 Ilustración de la localización de una fuente sonora con arreglo de micrófonos equidistante.

Suponiendo que solamente hay una fuente en el campo sonoro y que se tiene un arreglo de *N* micrófonos. En un espacio abierto anecoico, como se muestra en la Fig. 3.3, la señal sonora s(k) se propaga radialmente y el nivel sonoro disminuye como función de la distancia con respecto a la fuente. Si se elige el primer micrófono  $(y_1(k))$ 

como punto de referencia, la señal captada por el micrófono n en el tiempo k puede ser expresada como se muestra a continuación:

$$y_n(k) = \alpha_n s(k - t - \tau_{n1}) + v_n(k)$$
(3.9)  
=  $\alpha_n s(k - t - F_n(\tau)) + v_n(k)$   
=  $x_n(k) + v_n(k), n = 1, 2, ..., N$ 

Donde:

- $\alpha_n(n = 1, 2, ..., N)$  es el factor de atenuación debido a los efectos de propagación que está en el rango [0,1].
- *s*(*k*) es la señal desconocida.
- *t* es el tiempo que se demora en propagarse el sonido de la fuente desconocida al sensor 1.
- $v_n(k)$  es una señal de ruido aditivo captada por el sensor n, la cual se asume que no está correlacionada ni con la señal de la fuente, ni con el ruido observado en otros sensores.
- $\tau$  es el TDOA entre el sensor 1 y 2.
- $\tau_{n1} = F_n(\tau)$  es el TDOA entre el sensor 1 y  $n \operatorname{con} F_1(\tau) = 0$  y  $F_2(\tau) = \tau$ .

Para n = 3, ..., N, la función  $F_n$  depende no solamente de  $\tau$ , sino también de la geometría del arreglo de micrófono. Por ejemplo, en el caso del *campo lejano*, para el arreglo lineal equidistante, se tiene que:

$$F_n(\tau) = (n-1)\tau, \quad n = 2, ..., N$$
 (3.10)

Para un arreglo lineal no equidistante, se tiene:

$$F_{n}(\tau) = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n-1} d_{i}}{d_{1}}\right)\tau, \quad n = 2, ..., N$$
(3.11)

Donde  $d_i$  es la distancia entre los micrófonos i y i + 1 (i = 1, ..., N - 1). En el caso del *campo cercano*,  $F_n$  depende también de la posición de la fuente sonora.  $F_n(\tau)$  puede ser una función no lineal de  $\tau$  para un arreglo con geometría no lineal, aún en el caso del *campo lejano*, por ejemplo, tres sensores equiláteros [71].



Fig. 3.3 Ilustración del modelo ideal del campo libre con una fuente sonora.

## 3.3. Estimación del retraso en tiempo (TDE).

La estimación del retraso en tiempo, la cual tiene como objetivo medir la diferencia relativa en el tiempo de llegada de una señal a los sensores de un arreglo, es un enfoque fundamental para la identificación, localización y seguimiento de fuentes radiantes. La correlación cruzada generalizada es la técnica más popular para la estimación del TDOA. Esta técnica es muy exitosa en la localización y seguimiento de una fuente en campo abierto donde no existen efectos de múltiples rutas [72][73][74][75].

## 3.4. Correlación cruzada para la estimación del TDOA.

La correlación cruzada, en el análisis de señales, es una medida de la similitud de dos formas de ondas como función del lapso de tiempo aplicada a ambas. Para funciones continuas la correlación cruzada está definida como:

$$(f \star g)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(t)g(t+\tau)\,d\tau \tag{3.12}$$

Donde  $f^*$  es el complejo conjugado de f. Similarmente, para funciones discretas, la correlación cruzada está definida como:

$$(f \star g)[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f^*[m] g[n+m]$$
(3.13)

La correlación cruzada es similar a la convolución de dos funciones. La correlación cruzada solamente involucra el desplazamiento de una señal y la multiplicación por otra señal, mientras que la convolución invierte la señal, la desplaza y la multiplica por otra señal [76][77].

Suponiendo que se tiene dos funciones reales  $f \neq g$ , que difieren solamente en un intervalo desconocido en el eje x, entonces se puede usar la correlación cruzada para hallar cuanto debe ser desplazada la función g a través del eje x, para que sea idéntica a la función f. La fórmula esencialmente lo que hace es desplazar la función g a lo largo del eje x, calculando la integral del producto de ambas funciones en cada posición. Cuando las funciones concuerdan, el valor de  $(f \star g)$  está maximizado. Esto sucede porque al estar alineados los picos de las funciones hacen una gran contribución a la integral. Lo mismo sucede con las depresiones de las funciones [76].

Considerando el modelo del campo libre con una fuente sonora y solo dos sensores, N = 2, la función de correlación cruzada (CCF) entre los dos señales observadas  $y_1(k)$ y  $y_2(k)$  queda definida como [71]:

$$r_{y_1y_2}^{CC}(p) = E[y_1(k)y_2(k+p)]$$
(3.14)

Sustituyendo (6.5) en (6.10), se puede deducir que:

$$r_{y_1y_2}^{CC}(p) = \alpha_1 \alpha_2 r_{ss}^{CC}(p-\tau) + \alpha_1 r_{sv_2}^{CC}(p+t) + \alpha_2 r_{sv_1}(p-t-\tau) + r_{v_1v_2}(p)$$
(3.15)

Asumiendo que  $v_n(k)$  no está correlacionado con ninguna de las señales, ni con el ruido observado en el otro sensor, se puede verificar que  $r_{y_1y_2}^{CC}(p)$  alcanza su máximo en  $p = \tau$ .

$$\hat{\tau}^{CC} = \arg\max_{p} r_{y_1 y_2}^{CC}(p)$$
 (3.16)

Donde  $p \in [-\tau_{max}, \tau_{max}]$ , y  $\tau_{max}$  es el máximo retraso posible.

Para implementaciones digitales de la ecuación (3.16) se necesita realizar algunas aproximaciones, debido a que la CCF no es conocida y debe ser estimada. Una forma de hacer esto es remplazar la CCF definida en (3.14) con su promedio estimado en tiempo. Suponiendo que en un instante de tiempo k tenemos un conjunto de muestras,  $x_n(k), x_n(k+1), ..., x_n(k+K-1), n = 1,2$ , la CCF correspondiente puede ser estimada como sigue [71]:

$$\hat{r}_{y_1y_2}^{CC}(p) = \begin{cases} \frac{1}{\kappa} \sum_{i=0}^{K-p-1} y_1(k+i) y_2(k+i+p) & , p \ge 0\\ & \hat{r}_{y_1y_2}^{CC}(-p), \ p < 0 \end{cases}$$
(3.17)

### 3.5. Métodos de correlación cruzada generalizada.

El algoritmo de correlación cruzada generalizada (GCC) propuesto por Knapp y Carter en 1976 [76] es usado ampliamente para la estimación del TDOA. Considerando el modelo del campo libre de la ecuación (3.9) y solo dos micrófonos, N = 2, la estimación del TDOA entre los dos micrófonos es obtenida como el instante de tiempo que maximiza la CCF entre las señales filtradas de las salidas de los micrófonos, esta es comúnmente llamada la CCF generalizada (GCCF) [71]:

$$\hat{\tau}^{GCC} = \arg \max_{\tau} r_{y_1 y_2}^{GCC}(p)$$
 (3.18)

Donde  $r_{y_1y_2}^{GCC}(p)$  es la función GCC y está definida de la forma siguiente:

$$r_{y_{1}y_{2}}^{GCC}(p) = F^{-1} \left[ \Psi_{y_{1}y_{2}}(f) \right]$$
  
=  $\int_{-\infty}^{\infty} \Psi_{y_{1}y_{2}}(f) e^{j2\pi f p} df$   
=  $\int_{-\infty}^{\infty} v(f) \phi_{y_{1}y_{2}}(f) e^{j2\pi f p} df$  (3.19)

Donde  $F^{-1}$  significa el inverso de la transformada discreta de Fourier (IDTFT) y  $\phi_{\gamma_1\gamma_2}(f)$  es el espectro cruzado definido de la manera siguiente:

$$\phi_{y_1y_2}(f) = E[Y_1(f)Y_2^*(f)]$$
(3.20)

Donde:

$$Y_n(f) = \sum_k y_n(k) e^{-j2\pi fk}, n = 1, 2,$$
(3.21)

Asimismo,  $\Psi_{y_1y_2}(f)$  es el espectro cruzado generalizado y está definido como se muestra a continuación:

$$\Psi_{y_1y_2}(f) = v(f)\phi_{y_1y_2}(f) \tag{3.22}$$

Donde v(f) es la función de ponderación en el dominio de la frecuencia.

Hay muchas opciones diferentes para la función de ponderación en el dominio de la frecuencia v(f), las cuales derivan en una variedad de métodos GCC. A continuación se presentan algunos de estos métodos GCC [71].

### 3.5.1. Correlación cruzada clásica.

Si se establece v(f) = 1, se puede verificar que la GCC se convierte en el método de correlación cruzada discutido en la sección anterior. La única diferencia es que ahora para calcular la CCF se usa la transformada directa de Fourier (DFT) y la DFT inversa (IDFT), la cual puede ser implementada eficientemente gracias a la transformada rápida de Fourier FFT. Se conoce a partir del modelo del campo libre definido en la ecuación (3.9) que:

$$Y_n(f) = \alpha_n S(f) \ e^{-j2\pi f \left[t - F_n(\tau)\right]} + V_n(f), \ n = 1,2$$
(3.23)

Sustituyendo (3.23) en (3.22) y considerando por definición que el ruido de la señal en el micrófono uno no está correlacionado con la señal de la fuente sonora, ni con el ruido de la señal en el micrófono dos, se tiene que:

$$\Psi_{y_1y_2}^{CC}(f) = \alpha_1 \alpha_2 e^{-j2\pi f\tau} E[|S(f)|^2]$$
(3.24)

El hecho que  $\Psi_{y_1y_2}^{CC}(f)$  dependa de la señal de la fuente sonora, puede ir en detrimento de la estimación del TDOA, dado que la conversación humana es inherentemente no-estacionaria [71].

### 3.5.2. Transformación coherente suavizada.

Una manera efectiva para contrarrestar el impacto en la estimación del TDOA de los niveles fluctuantes de la señal producida por la conversación humana, es preblanquear las salidas de los micrófonos antes que sea calculado el espectro cruzado. Esto es equivalente a escoger [71]:

$$v(f) = \frac{1}{\sqrt{E[|Y_1(f)|^2]E[|Y_2(f)|^2]}}$$
(3.25)

Lo cual lleva al método de transformación coherente suavizada (SCOT). Sustituyendo (3.23) y (3.25) en (3.22) se genera el espectro cruzado siguiente:

$$\Psi_{y_{1}y_{2}}^{SCOT}(f) = \frac{\alpha_{1}\alpha_{2}e^{-j2\pi f\tau}E[|S(f)|^{2}]}{\sqrt{E[|Y_{1}(f)|^{2}]E[|Y_{2}(f)|^{2}]}}$$

$$\Psi_{y_{1}y_{2}}^{SCOT}(f) = \frac{\alpha_{1}\alpha_{2}e^{-j2\pi f\tau}E[|S(f)|^{2}]}{\sqrt{\alpha_{1}^{2}E[|S(f)|^{2}] + \sigma_{v_{1}}^{2}(f)} \cdot \sqrt{\alpha_{2}^{2}E[|S(f)|^{2}] + \sigma_{v_{2}}^{2}(f)}}$$

$$\Psi_{y_{1}y_{2}}^{SCOT}(f) = \frac{e^{-j2\pi f\tau}}{\sqrt{1 + \frac{1}{SNR_{1}(f)}} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{SNR_{2}(f)}}}$$
(3.26)

Donde:

$$\sigma_{\nu_n}^2 = E[|V_n(f)|^2], \qquad (3.27)$$

$$SNR_n(f) = \frac{\sigma_n^2 E[|S(f)|^2]}{E[|V_n(f)|^2]}, n = 1,2$$
(3.28)

Si el valor de  $SNR_n(f)$  es el mismo para ambos micrófonos, entonces se obtiene:

$$\Psi_{\mathcal{Y}_1\mathcal{Y}_2}^{SCOT}(f) = \left[\frac{SNR(f)}{1+SNR(f)}\right] \cdot e^{-j2\pi f\tau}$$
(3.29)

Por lo tanto, el desempeño del algoritmo SCOT para la estimación del TDOA variará con respecto a SNR(f). Pero cuando el SNR(f) es suficientemente grande, se obtiene lo siguiente:

$$\Psi_{y_1 y_2}^{SCOT}(f) \approx e^{-j2\pi f\tau} \tag{3.30}$$

Lo que implica que el desempeño de la estimación es independiente de la potencia de la señal original. Por lo tanto, el método SCOT es teóricamente superior al método de correlación cruzada clásica. Pero esta superioridad solamente se mantiene cuando el nivel de ruido es bajo [71].

### 3.5.3. Transformación a fase.

Al examinar la ecuación (3.19) es claro que la estimación del TDOA está más relacionada con la fase que con la amplitud del espectro cruzado. Por lo tanto, se puede descartar la amplitud y solamente trabajar con la fase, estableciendo [71]:

$$v(f) = \frac{1}{|\phi_{y_1 y_2}(f)|} \tag{3.31}$$

De esta forma se obtiene el método de transformación a fase (PHAT). El espectro cruzado generalizado para este caso queda definido de la manera siguiente:

$$\Psi_{y_1 y_2}^{PHAT}(f) = e^{-j2\pi f\tau}$$
(3.32)

El cual depende solamente de  $\tau$ . Sustituyendo (3.32) en (3.19), se obtiene la función GCC siguiente:

$$r_{y_1y_2}^{PHAT}(p) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j2\pi f(p-\tau)} df = \begin{cases} \infty, p = \tau \\ 0, \text{ en otro caso} \end{cases}$$
(3.33)

Como resultado, el método PHAT se desempeña, en general, mejor que los métodos de correlación cruzada clásica y SCOT, para la estimación del TDOA cuando se tratan de fuentes sonoras de conversación humana [71].

### 3.6. Geometría del arreglo.

Para mejorar las estimaciones antes mencionadas y lograr la localización de fuentes sonoras, se necesita determinar una buena geometría para el arreglo de micrófonos. Los factores más relevantes a tener en cuenta para determinar la geometría son [78]:

- Separación posible entre cada par de micrófonos.
- Número de elementos del arreglo.
- Ubicación geométrica de dichos elementos.

Una mayor separación permite detectar variaciones más pequeñas en el ángulo de llegada de la señal al arreglo de micrófonos, mejorando así la exactitud de la

estimación final. Sin embargo, existe un límite máximo para la separación entre micrófonos que debe ser considerada para evitar el problema del "aliasing" espacial, sobre el que se profundizará más adelante [78][79].

Por otra parte, un aumento en el número de elementos del arreglo de micrófonos también puede mejorar la exactitud de las estimaciones. No obstante, el número de elementos de un arreglo está limitado por un aspecto inherente de estos sistemas: el costo de los sensores. Asimismo, un mayor número de elementos implica un mayor número de trayectorias de medición. Si esto no se tiene en cuenta correctamente puede ser un elemento degradante para sistemas de medición en tiempo real, dado que aumenta el tiempo total de medición [78].

Una de las geometrías más usadas es la geometría lineal [57][80]. Esto es debido a su facilidad de construcción y procesamiento. Sin embargo, en los arreglos de micrófonos con geometría lineal la discriminación adelante-atrás es un problema que debe tenerse en cuenta [68]. Otro tipo de geometrías que suelen utilizarse son la triangular y la circular [81][82].

# 3.6.1. "Aliasing" espacial.

Como se mencionó anteriormente, si se desea una mayor exactitud simplemente se incrementa la distancia entre cada par de micrófonos, lo cual llevará a un arreglo de mayor apertura. Esto en general conduce a una mayor reducción del ruido (señal que no es de interés). Por lo tanto, en el diseño de los arreglos, se esperaría establecer un distancia entre micrófonos tan grande como sea posible. Sin embargo, cuando la distancia d entre micrófonos es mayor a  $\lambda/2 = c/(2f)$ , donde  $\lambda$ , es la longitud de onda de la señal, puede ocurrir el "aliasing" espacial. Este problema trae consigo ambigüedad al momento de determinar la localización de la fuente, producto de submuestrear espacialmente la señal. De acuerdo con el teorema muestreo de Nyquist, es necesario tomar al menos dos muestras por cada período de la componente de frecuencia de Fourier más alta de la señal. En este caso, al menos dos muestras espaciales son necesarias por cada longitud de onda, haciendo que el espaciado entre los micrófonos sea  $d \leq \left(\frac{\lambda}{2} = \frac{c}{(2f)}\right)$ . Por analogía con el teorema de muestreo de Nyquist, este resultado puede interpretarse como el teorema de muestreo espacial [79][83].

### 3.6.2. Problema de la discriminación adelante-atrás.

En la Fig. 3.4 se muestran dos fuentes que generan la misma señal pero que están ubicadas simétricamente con respecto a un arreglo lineal de micrófonos. Asimismo, las condiciones de propagación entre ambas fuentes y el arreglo de micrófonos son las mismas. Como los frentes de onda de las señales emitidas por la *Fuente 1* y la *Fuente 2*, llegan al micrófono  $m_1$  con el mismo ángulo con respecto al arreglo, el tiempo que necesitan ambas señales para llegar a  $m_2$  una vez que han llegado a  $m_1$ , es el mismo. Esto significa que con las diferencias en los tiempos de arribo que se obtienen

mediante un arreglo lineal de micrófonos, no se puede determinar si la fuente a localizar está al frente o detrás del arreglo.



Fig. 3.4 Fuentes ubicadas simétricamente con respecto al arreglo lineal de micrófonos.

## 3.7. Conclusiones.

El método de cálculo descrito en la ISO 9613, se basa en la contribución individual por banda de octava de cada fuente y en la atenuación que sucede desde la ubicación de la misma hasta el punto de interés. En esta norma se clasifican las fuentes como puntuales o como conjuntos de fuentes puntuales.

Los métodos para determinar la dirección de arribo (DOA) de una señal recibida en un arreglo de micrófonos, basados en la estimación del TDOA, son los más utilizados en sistemas en tiempo real, por su bajo costo computacional. Una de las técnicas principales para la determinación de la diferencia en el tiempo de arribo, es la correlación cruzada. Por otra parte, para determinar la distancia de la fuente de ruido, es necesario considerar que la misma se encuentra en el campo cercano, y por tanto, el frente de onda que llega al arreglo de micrófonos es esférico.

# 4. DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.

En este capítulo se describe el sistema de medición implementado para utilizar en los experimentos, para lo cual se presentan algunas características del hardware y del software utilizado.

# 4.1. Diseño del sistema de medición.

En la Fig. 4.1 se muestra la arquitectura del sistema de medición el cual consta de:

- Cuatro sensores de presión acústica para mediciones permanentes en el exterior.
- Tarjeta de adquisición de datos de amplio rango dinámico.
- Computadora portátil para procesar los datos.



Fig. 4.1 Arquitectura del sistema de medición utilizado.

## 4.1.1. Tipo de micrófono.

Se utiliza el dispositivo denominado MPA231 de BSWA-Tech, el cual consta de un micrófono MP231 junto con su preamplificador MA211. Por sus características para mediciones permanentes en el exterior se le conoce como OM231, cuyas especificaciones generales resumidas se muestran en la Tabla. 4.1.

Modelo	OM231
Sensibilidad	40 mV/Pa
Diámetro del micrófono	1/2″
Respuesta en frecuencia	20 Hz ~ 20 kHz
Rango dinámico (3% límite de distorsión)	18 ~ 130 dB
Voltaje de polarización	0 V
Fuente de alimentación	4 mA
Dirección de referencia	0 o
Conector de salida	BNC

Tabla 4 1	Características	generales del	sensor de	presión	acústica	OM231
1 a01a 7.1	Caracteristicas	generates del	sensor de	presion	acustica	011251.

El micrófono MP231 integrado en sensor de presión acústica OM231 es *Clase 1* de acuerdo a la norma IEC 61672, el cual es excelente por su estabilidad. Este sensor de presión acústica es adecuado para los experimentos que se pretenden realizar pues es recomendado para el uso en el exterior incluyendo el monitoreo de ruido en aeropuertos.

A continuación se muestra para uno de los sensores de presión acústica OM231 utilizados en los experimentos, la hoja de calibración del dispositivo MPA231, del micrófono MP231 y la respuesta en frecuencia del mismo. Esta información es provista por BSWA-Tech. En el anexo A se muestran las especificaciones para los otros sensores utilizados.

MPA231 Serial No.: 460047 MP231 Serial No.: 46176 MA211 Serial No .: 4 50 ts RSWE Sensitivity: 39.4 mV/Pa **MPA231** dB re 1 V/Pa or -28.1 Signature: ons Date: BSWA Technology Co., Ltd. Web: www.bswa-tech.com.cn E-mail: info@bswa-tech.com

Fig. 4.2 Hoja de calibración del dispositivo MPA231.

Cali	bration Chart				
Model: MP 231	Serial No: 46176				
Open Circuit Sensitivity I	Level:				
<u>-27.5</u> dB ref 1 V/Pa	or <u>42.2</u> mV/Pa @ 250Hz				
Signature: Jaks	Date: <u>02/16/2009</u>				
Test Conditions:					
Polarization Voltage :	0 V				
Relative Humidity:	30%				
Temperature:	<u>20</u> ℃				
BSWA Technology Ltd.	www.bswa-tech.com				

Fig. 4.3 Hoja de calibración del micrófono MP231.



Fig. 4.4 Respuesta en frecuencia del micrófono MP231.

## 4.1.2. Tarjeta de adquisición de datos.

En el sistema de medición se utiliza una tarjeta de adquisición de datos NI USB-9233. Es una tarjeta con un microprocesador y cuatro canales para hacer mediciones de alta precisión, mediante sensores IEPE. Tiene un rango dinámico de 102 *dB* e incorpora acondicionamiento de la señal para acelerómetros y micrófonos. Permite la adquisición simultánea de los cuatro canales a tasas de 2 a 50 *kHz*, además incluye filtros digitales anti-aliasing que se ajustan automáticamente a la frecuencia de muestreo. Tiene una resolución de 24 bits, el ADC es del tipo delta-sigma y el rango de entrada es de  $\pm$  5V. En la Fig. A.10 del anexo A, se muestran las especificaciones detalladas (en inglés) de la tarjeta de adquisición de datos. En la Fig. 4.5, provista por National Instruments, se muestra la tarjeta de adquisición de datos NI USB-9233.



Fig. 4.5 Tarjeta de Adquisición de Datos NI-USB9233.

Una de las características que hacen conveniente esta tarjeta para ser integrada en el sistema de medición, es el bajo consumo de energía eléctrica que requiere, puesto que se alimenta del puerto USB de la computadora a la cual sea conectada. Además, por su tamaño es discreta y portátil para realizar experimentos en diferentes escenarios.

### 4.1.3. Requerimientos sobre la frecuencia de muestreo.

El teorema de muestreo de Nyquist establece que, para reconstruir una señal a partir de sus muestras la frecuencia de muestreo debe ser al menos, el doble de la frecuencia del mayor armónico de la señal. En la Fig. 4.6 se muestra el espectro en frecuencia de una señal de ruido urbano. En este tipo de señales el armónico de mayor frecuencia se encuentra alrededor de los 8 *kHz*. Sin embargo los armónicos con mayor energía se encuentran por debajo de los 3 *kHz*. Por lo tanto, una frecuencia de muestreo de 25 *kHz* es adecuada para señales de ruido ambiental, pues equivale a muestrear la señal a una frecuencia aproximadamente igual a 3 veces la frecuencia del mayor armónico. Asimismo, las frecuencias de mayor interés, que corresponden a aquellas por debajo de 3 *kHz*, se muestrean al menos a 8 veces dicha frecuencia. Por otra parte, el uso de frecuencias mayores a 25 *kHz* para la estimación de las diferencias en los tiempos de arribo entre micrófonos de un arreglo, aplicando la técnica de correlación cruzada, mejora la exactitud de los resultados. Con la tarjeta de adquisición de datos que se maneja se puede lograr una frecuencia de muestreo de 50 *kHz*.



Fig. 4.6 Señal de ruido ambiental.

### 4.1.4. Restricciones de tiempo.

La Fig. 4.7 muestra el diagrama de tiempo correspondiente al sistema de monitoreo permanente de ruido instalado en el Centro Histórico de la Ciudad de México. En este se puede observar que la cota o período de tiempo en el cual se realizan las tareas, es de 30 segundos, las cuales se inician de manera automática y periódica un número infinito de ciclos. Una de las tareas es la adquisición de datos en tiempo real rígido durante 29 segundos con el período de muestreo seleccionado. Posteriormente, se espera un segundo para permitir la comunicación entre los instrumentos virtuales y asegurar que todas las mediciones comiencen en un tiempo múltiplo de 30 segundos. La segunda tarea consiste en el pos-procesamiento y almacenamiento de los resultados, que se realiza bajo el esquema de multitareas de tiempo compartido y se
utilizan los datos obtenidos en la adquisición del ciclo anterior. Por lo tanto, el posprocesamiento y almacenamiento de los resultados, tienen una línea vedada no crítica, y con la potencia de cómputo utilizada en los puntos de medición, se realizan en un tiempo menor a 15 segundos.



Fig. 4.7 Diagrama de tiempo del sistema de monitoreo permanente de ruido instalado en al Centro Histórico de la Ciudad de México.

Tanto en la etapa experimental, como en el desarrollo del caso de estudio del capítulo 7, se establecieron determinadas restricciones de tiempo con base en el diagrama descrito en la Fig. 4.7.

En la Fig. 4.8 se muestra el diagrama de tiempo correspondiente a la etapa experimental. Todas las tareas inician su ejecución a demanda. La cota de tiempo que se maneja para un experimento es de 49 segundos. En los primeros 29 segundos se realiza la adquisición de datos en tiempo real rígido. Posteriormente, se realiza el almacenamiento de la serie de tiempo obtenida y el pos-procesamiento bajo el esquema de multitareas de tiempo compartido. Esta última etapa se realiza en un tiempo *t* menor a 20 segundos, utilizando la potencia de cómputo siguiente:

- Procesador Intel® Core<sup>™</sup> 2 Duo T7700 (2.40GHz).
- 2.0GB DDR2-667MHZ.
- Windows® XP Professional Original SP3.

En la Fig. 4.9 se muestra el diagrama de tiempo correspondiente al caso de estudio. Al igual que en la etapa experimental todas las tareas inician su ejecución a demanda. La cota de tiempo que se maneja para un experimento es de 44 segundos. Sin embargo la tarea de adquisición de datos en tiempo real rígido, tiene una duración de 24 segundos, pues en trabajos anteriores [84][85] se determinó que durante un despegue, la parte relevante de la señal se puede enmarcar en este intervalo de tiempo. La tarea de almacenamiento y pos-procesamiento se lleva a cabo de manera similar a la etapa experimental.



Fig. 4.8 Diagrama de tiempo de la etapa de experimentación.





# 4.2. Implementación y calibración del sistema de medición.

Para la implementación del sistema de medición se utilizó LabVIEW, el cual es un entorno de programación gráfica para desarrollar sistemas sofisticados de medida, pruebas y control con un estilo de programación similar a un diagrama de flujo. Ofrece integración con una gran variedad de dispositivos de hardware y brinda cientos de bibliotecas integradas para análisis avanzado y visualización de datos, con el fin de crear instrumentación virtual. La plataforma LabVIEW es escalable a través de múltiples objetivos y sistemas operativos, desde su introducción en 1986 se ha vuelto un líder en la industria.

Para realizar las mediciones se desarrolla un programa el cual permite leer los cuatro canales a la vez. La obtención de las señales se realiza a demanda. Una vez transcurrido el tiempo de medición, en el cual se obtuvo una señal por cada canal de medición, se guardan las muestras de dichas señales en un archivo binario para su análisis posterior. En la Fig. A.11 el anexo A, se muestra el panel frontal de dicho programa.

Cada canal de medición acústica está formado por el micrófono, el preamplificador, la tarjeta de adquisición de datos y la computadora portátil. Son calibrados como un conjunto utilizando un calibrador acústico *Clase 1*, así como un programa de cómputo especializado, desarrollado en el CIC-IPN. Adicionalmente, se comprueban los resultados de la calibración usando otros dos calibradores y por comparación con un sonómetro *Clase 1*. En la Fig. 4.10 se muestra el panel frontal del programa de calibración desarrollado.



Fig. 4.10 Panel frontal del programa de calibración.

### 4.2.1. Calibrador acústico.

El calibrador acústico que se utiliza es un CB-5 de CESVA Instruments S.L. Es un instrumento portátil, fácil de manejar y de buena precisión para la verificación de de instrumentos de de medición *Clase 1* y *Clase 2*. Este calibrador acústico es *Clase 1* según las normas IEC 60942-2003 y UNE-EN 60942:2005. La frecuencia que utiliza para la verificación es de 1 *kHz* y maneja dos niveles de presión sonora, 94 y 104 *dB*. En la Fig. 4.11 se muestra el calibrador acústico CB-5.



Fig. 4.11 Calibrador acústico CB-5.

## 4.3. Conclusiones.

El diseño e implementación del sistema de medición que se utilizó durante los experimentos, se realizaron con base en los siguientes elementos:

- Tipo de señales a analizar.
- Costo de los dispositivos a integrar.
- Exactitud de los dispositivos.
- Restricciones de tiempo.

A partir de estos elementos se crea un sistema de medición portátil *Clase 1*, lo cual asegura la exactitud recomendada para pruebas de laboratorios o estudios detallados en campo y brinda la flexibilidad de realizar experimentos en diversos escenarios. Además, los requerimientos que se describen en la literatura para el análisis del tipo de señal involucrada, se logran al obtener las mismas de cuatro sensores de manera simultánea, a una frecuencia de muestreo de 25 *kHz* escalable hasta 50 *kHz*. Asimismo, el costo de los dispositivos es relativamente bajo con respecto a otros existentes en el mercado.

# 5. EVALUACIÓN DE LA DIRECCIONALIDAD DE LOS MICRÓFONOS EN UN ARREGLO CON GEOMETRÍA TRIANGULAR.

En este capítulo se realiza un análisis para determinar si la orientación de un micrófono determina qué información acústica recibirá de las fuentes existentes a su alrededor. Para ello se construye un prototipo de un arreglo de micrófonos con geometría triangular en la cual cada micrófono direccional queda orientado hacia una ubicación diferente. Asimismo, en el centro del triángulo definido por la ubicación de los micrófonos, se coloca otro omnidireccional. Con esta distribución se pretende determinar si existen cambios en la información captada por cada uno de los micrófonos direccionales, en dependencia de la ubicación de las fuentes en los escenarios evaluados. Por otra parte se busca identificar qué parámetros en dichos escenarios, pueden ser seleccionados como entrada del modelo para estimar el ruido alrededor del punto de medición. Se realizan dos experimentos en los cuales se evalúan escenarios con una y varias fuentes de ruido.

# 5.1. Descripción del arreglo de micrófono con geometría triangular.

En la Fig. 5.1 se muestra la distribución de los micrófonos en el arreglo. El arreglo de micrófonos tiene las siguientes características.

- Los micrófonos  $m_1,\ m_2\ y\ m_3$  son direccionales, mientras que  $m_0$  es omnidireccional
- La orientación del micrófono  $m_1$  es aquella definida por la dirección del vector que une los micrófonos  $m_0$  y  $m_1$ .
- La orientación del micrófono  $m_2$  es aquella definida por la dirección del vector que une los micrófonos  $m_0$  y  $m_2$ .
- La orientación del micrófono  $m_3$  es aquella definida por la dirección del vector que une los micrófonos  $m_0$  y  $m_3$ .
- La distancia establecida entre micrófonos es de 40 cm.
- Las direcciones de los micrófonos difieren entre sí en 120°.



Fig. 5.1 Distribución de los micrófonos en el arreglo.

## 5.2. Diseño y resultados de las mediciones.

Para las mediciones que se realizaron en los experimentos se estableció medir el nivel sonoro continuo equivalente durante 29 segundos (*Leq*). Este indicador es el más usado para evaluar el ruido que existe en determinada ubicación. Además, las señales obtenidas son almacenadas sin ningún procesamiento para el análisis posterior.

# 5.2.1. Una fuente con ruido urbano, con diferentes ubicaciones.

El procedimiento seguido en el experimento fue el siguiente:

- 1. Colocar una fuente sonora a 10 metros del punto de medición alineada con la orientación del micrófono  $m_2$ .
- Realizar dos mediciones del *Leq* por cada punto de la malla ilustrada en la Fig.
   5.2, con la fuente emitiendo la señal de ruido urbano. Para dichas mediciones se utilizan dos sonómetros *Clase 1* calibrados previamente.
- 3. Rotar 30 grados la posición de la fuente con respecto al punto de medición y hacia el micrófono  $m_3$ . Posteriormente realizar las mismas mediciones que en los puntos 2.
- 4. Realizar el mismo procedimiento que en el punto 3, de tal forma que la posición de la fuente estuviera rotada 60 grados con respecto a su posición original.



Fig. 5.2 Malla de puntos en los cuales se estima el nivel sonoro continuo equivalente.

En cada una de las pruebas se determinó el espectro en bandas de octava de la señal obtenida por cada micrófono. También se calculó el nivel sonoro continuo equivalente durante los 29 segundos de medición. En las Tablas 5.1 – 5.3 se muestran los resultados.

	Frecuencia central de la banda de octava en Hz										
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Leq		
Micrófono 0	49.972	59.362	52.809	50.529	57.271	58.264	54.149	28.105	64.643		
Micrófono 1	50.020	60.016	51.847	49.275	58.671	62.571	54.898	33.155	66.479		
Micrófono 2	49.143	58.184	52.219	48.404	58.714	64.583	60.219	34.568	68.331		
Micrófono 3	51.839	61.437	52.727	49.809	58.717	60.763	54.805	31.018	65.934		

Tabla 5.1: Nivel de presión sonora por banda de octava y *Leq* obtenido para cada micrófono, con la fuente ubicada a 0 grados.

Tabla 5.2: Nivel de presión sonora por banda de octava y Leq obtenido para cada micrófono, con lafuente ubicada a 30 grados.

	Frecuencia central de la banda de octava en Hz										
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Leq		
Micrófono 0	43.578	57.145	52.799	50.752	54.146	58.358	54.110	28.551	63.149		
Micrófono 1	43.482	57.834	51.982	49.997	54.854	60.263	61.557	35.957	64.551		
Micrófono 2	42.894	55.961	53.300	49.430	56.380	62.458	65.805	38.655	66.159		
Micrófono 3	46.270	59.211	53.889	50.974	55.589	61.486	59.646	34.388	65.074		

Tabla 5.3: Nivel de presión sonora por banda de octava y Leq obtenido para cada micrófono, con lafuente ubicada a 60 grados.

	Frecuencia central de la banda de octava en Hz										
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Leq		
Micrófono 0	43.765	58.466	51.474	50.178	56.000	59.318	55.901	29.324	64.828		
Micrófono 1	44.668	59.579	50.696	51.411	58.338	62.428	55.687	33.511	66.366		
Micrófono 2	42.860	58.183	51.392	49.132	57.240	63.379	58.282	33.712	66.664		
Micrófono 3	45.685	60.700	52.869	50.643	56.679	61.329	57.284	33.085	66.456		

En las tablas anteriores se puede observar que el *Leq* del micrófono 2, el cual está más cercano a la fuente, siempre es el mayor. Esto se cumple estando la fuente a 0, 30 o 60 grados. Esta misma tendencia existe con las bandas de octava en espectro calculado para la señal del micrófono 2. Sin embargo, la diferencia es más notoria en las bandas de 1000, 2000, 4000 y 8000 *Hz*. Esto se debe fundamentalmente a que las altas frecuencias se atenúan más con respecto a la distancia.

Por otra parte, a partir de los valores del *Leq* en *dBA*, obtenidos en cada punto, se aplicaron técnicas de interpolación para generar un mapa que represente la distribución del ruido, para la zona evaluada. En las Fig. 5.3 – 5.7 se muestran los mapas generados. Los cinco métodos de interpolación utilizados son:

- Inverso de la distancia ponderado con 5 vecinos (IDW 5).
- Inverso de la distancia ponderado con 15 vecinos (IDW 15).
- Interpolación polinómica local con 10 vecinos (LP 10).
- Interpolación polinómica local con 25 vecinos (LP 25).
- Splines cúbicos.



Fig. 5.3 Resultado de la interpolación IDW 5 con la fuente a 0 grados.



Fig. 5.4 Resultado de la interpolación IDW 15 con la fuente a 0 grados.



Fig. 5.5 Resultado de la interpolación LP 10 con la fuente a 0 grados.



Fig. 5.6 Resultado de la interpolación LP 25 con la fuente a 0 grados.



Fig. 5.7 Resultado de la interpolación con splines cúbicos con la fuente a 0 grados.

De acuerdo a las características de la propagación del ruido y los escenarios evaluados en las mediciones, los resultados obtenidos con las interpolaciones LP 25 y splines cúbicos son los más cercanos a la realidad. En el anexo B se muestran los resultados obtenidos para la fuente ubicada a 30 y 60 grados.

### 5.2.2. Tres fuentes con tonos puros.

El procedimiento seguido en el experimento fue el siguiente:

- 1. Colocar tres fuentes sonoras a 15 metros del punto de medición. Para facilitar el análisis se etiquetaron las fuentes sonoras como fm<sub>1</sub>, fm<sub>2</sub> y fm<sub>3</sub>, las cuales estaban alineadas con los micrófonos m<sub>1</sub>, m<sub>2</sub> y m<sub>3</sub>, respectivamente.
- 2. Realizar dos mediciones por cada combinación de tonos puros elegida para las fuentes de ruido. En la Tabla 5.4 se muestran las pruebas realizadas y la frecuencia principal generada por cada una de las fuentes.

Prueba	Fuente fm <sub>1</sub>	Fuente fm <sub>2</sub>	Fuente fm <sub>3</sub>
1	4 kHz	125 Hz	1 kHz
2	2 kHz	500 Hz	1 kHz
3	1 kHz	1 kHz	1 kHz
4	2 kHz	2 kHz	2 kHz
5	63 Hz	8 kHz	1 kHz

Tabla 5.4: Tonos generados por cada una de las fuentes en las pruebas realizadas.

En el anexo B se muestran algunas fotografías tomadas durante los experimentos, donde se pueden apreciar las fuentes utilizadas. El ruido generado por estas no se produce únicamente en las frecuencias mostradas en la Tabla 5.4, pero si los mayores armónicos. La Fig. 5.8 muestra el espectro generado a un metro de la fuente fm<sub>1</sub>, cuando esta genera el tono de 1 *kHz*.



Fig. 5.8 Espectro generado por la fuente fm<sub>1</sub>.

En las Tablas 5.5 – 5.7 se muestran las bandas de octava de interés, obtenidas a partir de las señales recibidas en los micrófonos del arreglo, para las pruebas 1, 2 y 5 de la Tabla 5.4. Asimismo, se muestra el nivel sonoro continuo equivalente, calculado a partir de la señal recibida en cada uno de los micrófonos. En el anexo B se muestran los resultados para las pruebas 3 y 4.

	Fuente fm <sub>2</sub>	Fuente fm <sub>3</sub>	Fuente fm <sub>1</sub>	Lea	
	125 Hz	1 kHz	4 kHz		
Micrófono 0	56.43	67.62	66.11	69.75	
Micrófono 1	58.80	65.96	73.00	73.20	
Micrófono 2	60.50	66.60	71.94	73.02	
Micrófono 3	58.56	67.79	77.89	78.40	

Tabla 5.5: Resultados de la Prueba 1 de la Tabla 5.4.

Tabla 5.6: Resultados de la Prueba 2 de la Tabla 5.4.

	Fuente fm <sub>2</sub>	Fuente fm₃	Fuente fm <sub>1</sub>	Lea	
	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4	
Micrófono 0	62.83	66.41	73.94	75.09	
Micrófono 1	62.83	64.65	72.06	73.33	
Micrófono 2	64.27	65.02	69.96	71.35	
Micrófono 3	63.23	66.44	63.42	69.78	

#### Tabla 5.7: Resultados de la Prueba 5 de la Tabla 5.4.

	Fuente fm <sub>1</sub>	Fuente fm <sub>3</sub>	Fuente fm <sub>2</sub>	Lea
	63 Hz	1 kHz	8 kHz	4
Micrófono 0	50.66	67.88	57.74	69.31
Micrófono 1	51.93	66.37	59.40	68.39
Micrófono 2	55.39	66.56	59.85	69.55
Micrófono 3	51.99	67.56	53.32	68.11

En las tablas anteriores se puede observar que en la mayoría de los casos, el micrófono direccional alineado con la fuente que emite en determinada banda de frecuencia, detecta el mayor nivel de presión sonora para dicha banda, con diferencias por encima de 0.3 dB, valor que representa el error máximo de estos micrófonos.

### 5.3. Conclusiones.

Los micrófonos utilizados en los experimentos presentan un comportamiento direccional, si se les orienta hacia direcciones diferentes. Este comportamiento está determinado principalmente, por la ubicación, la potencia sonora y el contenido en frecuencia de la señal emitida por las fuentes de ruido generadoras. Sin embargo, este comportamiento puede desaparecer si las contribuciones de todas las fuentes, ubicadas alrededor del punto de medición, son similares para cada dirección analizada.

La direccionalidad de los micrófonos puede ser de utilidad como parámetro para un modelo computacional que genere mapas de ruido para cierta zona en específico. La estimación del ruido alrededor del punto de medición, se puede realizar teniendo en cuenta las diferencias en frecuencia de las señales captadas por cada micrófono. El comportamiento de estas diferencias puede ser identificado, estableciendo una correspondencia entra las mismas y los valores de ruido obtenidos de un conjunto de puntos distribuidos en la zona de estudio.

Sin embargo, estos modelos están limitados a la zona de aplicación y son propensos a errores si cambia el número de fuentes generadoras o la ubicación de las mismas. A pesar de ello, la direccionalidad de los micrófonos, así como la identificación previa del ruido en cierta zona, a través de los valores medidos en una malla de puntos, pueden utilizarse para corregir y validar los resultados en otro modelo.

# 6. EVALUACIÓN DE UNA GEOMETRÍA TRIANGULAR Y UNA LINEAL, PARA LOCALIZAR UNA FUENTE DE RUIDO CON BASE EN LAS DIFERENCIAS DE LOS TIEMPOS DE ARRIBO.

La geometría del arreglo de micrófonos juega un papel importante en los algoritmos de localización. Un tipo de geometría puede ser adecuada para determinado problema, pero puede ser difícil de construir o ser más complejo el análisis de los resultados obtenidos mediante esta.

En este capítulo se realiza un análisis de la localización de fuentes sonoras basada en las diferencias en los tiempos de arribo (TDOA) de un arreglo de micrófono. Para ello se realizan varios experimentos de campo, con diferentes diseños geométricos del arreglo de micrófono (triangular y lineal). Como técnica fundamental para la estimación de las diferencias en los tiempos de arribo se utiliza la correlación cruzada. Los objetivos que se pretenden alcanzar con la realización de los experimentos son los siguientes:

- Analizar el comportamiento de la técnica de correlación cruzada, aplicada a señales de amplio rango en frecuencia y obtenidas a partir de los arreglos de micrófonos con las geometrías evaluadas.
- Analizar los resultados de los algoritmos de localización aplicados a los arreglos de micrófonos con las geometrías evaluadas.
- Evaluar la factibilidad de aplicación, de las geometrías seleccionadas para el arreglo de micrófono, en casos de estudios.



Fig. 6.1 Procedimiento general aplicado en los experimentos.

La Fig. 6.1 muestra el procedimiento general aplicado en todos los experimentos. Los pasos a seguir se inician eligiendo la geometría a utilizar, ya sea triangular o lineal, posteriormente se elige la ubicación para el prototipo del punto de medición y se calibra el sistema de medición. A partir de la ubicación del punto de medición se determina la dirección y distancia a la cual colocar la fuente de ruido. Una vez establecido el escenario, se realizan las mediciones para dos señales diferentes. El siguiente paso es el análisis de las mediciones, el cual incluye:

- Pre-procesamiento de las señales para evitar el "aliasing" espacial y acotar las mismas de acuerdo a la respuesta en frecuencia de los micrófonos.
- Obtención de las diferencias en los tiempos de arribo (TDOA) entre pares de micrófonos.
- Estimación de la ubicación de la fuente de ruido.

Durante los experimentos se reubica la fuente de ruido en más de una ocasión. La dirección y distancia en cada reubicación se establece en la definición de cada experimento.

### 6.1. Evaluación de una geometría triangular.

Para los experimentos y resultados que se describen a continuación se construyó un prototipo de arreglo triangular de micrófonos, el cual se observa en la Fig. 6.2. La distancia propuesta entre cada par de micrófonos fue de 40 *cm*. Sin embargo, las distancias reales entre los micrófonos fueron medidas en cada experimento. Esta distancia entre micrófonos fue establecida como punto de partida para lograr el mejor ajuste, entre la exactitud y las restricciones impuestas por el teorema de muestreo espacial.

Con la distancia de 40 *cm* establecida entre un par de micrófonos y la velocidad del sonido igual a 343 *m/s*, el teorema de muestreo espacial restringe el análisis espacial a frecuencias menores a 420 *Hz*. Asimismo, se logra una resolución angular aproximada de dos grados al momento de determinar la posición de la fuente de ruido, con respecto al punto de medición. La Fig. 6.3 muestra como se calcula dicha resolución. Considerando que el frente de onda de la señal es plano, la distancia que le falta por recorrer para llegar a  $m_2$ , una vez que llegó a  $m_1$ , es d. Como la frecuencia de muestreo es igual a 25000 *Hz*, la distancia que logra recorrer la onda sonora, en el lapso de tiempo en el que se toma una muestra de la señal, es igual a 0.01372 *m*. Haciendo d = 0.01372 m, se puede determinar el ángulo  $\theta$ , el cual representa el ángulo mínimo detectable por el sistema de medición implementado.



Fig. 6.2 Prototipo triangular utilizado durante el experimento.



Fig. 6.3 Determinación de la resolución angular al hallar la posición de la fuente de ruido

# 6.1.1. Una fuente a igual distancia y diferentes ángulos con respecto al punto de medición.

Los objetivos que se persiguen con este experimento son:

- Determinar si existen cambios en las diferencias en los tiempos de arribo (TDOA) al rotar la posición de la fuente con respecto al punto de medición.
- Analizar los resultados del algoritmo de localización considerando que la fuente se encuentra en el *campo cercano*.

La Fig. 6.4 muestra la configuración final en campo del arreglo triangular para este experimento. Para facilitar el análisis se etiquetaron los micrófonos del arreglo como  $m_1$ ,  $m_2$  y  $m_3$ . El procedimiento seguido en el experimento fue el siguiente:

- Colocar una fuente sonora a 10 metros del punto de medición alineada con la orientación del micrófono m<sub>2</sub>. Realizar tres mediciones con la fuente emitiendo determinada señal. Posteriormente realizar tres mediciones más con la fuente emitiendo otra señal de similar contenido espectral que la inicial.
- Rotar 30 grados la posición de la fuente con respecto al punto de medición y hacia el micrófono  $m_3$ . Posteriormente realizar las mismas mediciones que en el punto 1.
- Realizar el mismo procedimiento que en el punto 2, de tal forma que la posición de la fuente estuviera rotada 60 grados con respecto a su posición original.



Fig. 6.4 Distribución real del arreglo triangular de micrófonos durante el experimento.

Las señales emitidas por la fuente sonora consistieron en fragmentos de 29 segundos de determinadas canciones, en las cuales se mezclaban la voz del cantante principal, las voces en los coros y los instrumentos musicales. Este tipo de señal fue elegida para determinar el comportamiento de la técnica de correlación cruzada, con señales de amplio rango en frecuencia. En la Fig. 6.5 se muestra una de las señales utilizadas, en tiempo y frecuencia.



Fig. 6.5 Señal utilizada en el experimento.

La Fig. 6.6 ilustra el pre-procesamiento que se aplica a las señales antes de ser utilizadas para determinar las diferencias en los tiempos de arribo.



Fig. 6.6 Pre-procesamiento aplicado a las señales obtenidas en las mediciones.

A las señales obtenidas por los micrófonos del arreglo se les aplica un filtro pasa banda. El filtro es del tipo IIR (Respuesta infinita al impulso), cuyas frecuencias de corte inferior y superior son 20 *Hz* y 8 *kHz* respectivamente. La topología del filtro es del tipo Chebyshev, con la cual se puede obtener una transición más aguda con un menor orden en las frecuencias de corte. La aplicación de este filtro se debe a la respuesta en frecuencia que tienen los micrófonos utilizados, la cual es similar entre ellos para la banda de 20 *Hz* a 8 *kHz*. Para cumplir con el teorema de muestreo espacial, con la distancia de 40 *cm* entre los micrófonos, solo se pueden considerar las frecuencias por debajo de 420 *Hz*. Por lo tanto, antes de hallar la correlación entre las señales, se aplica un filtro pasa banda, del mismo tipo y topología que el aplicado anteriormente y cuyas frecuencias de corte son 20 *Hz* y 420 *Hz*. En la Fig. 6.7 se muestra la señal muestreada por uno de los micrófonos del arreglo después de haberle aplicado el pre-procesamiento anterior.



Fig. 6.7 Señal obtenida por uno de los micrófonos después del aplicarle el pre-procesamiento.

#### 6.1.1.1. Análisis de correlación de las señales obtenidas.

Para el cálculo de las correlaciones se utilizó la implementación discreta de LabVIEW 8.5 (ver Fig. 6.8), que queda como se muestra a continuación.



Fig. 6.8 Implementación de la correlación cruzada en LabVIEW 8.5

Considerando que h representa una secuencia que puede tener índices negativos, N el número de elementos en la secuencia X, M el número de elementos en la secuencia Y, y asumiendo que los elementos en X y Y que estén fuera de su rango son igual a cero, como se muestra en las ecuaciones siguientes:

$$x_j = 0, \ j < 0 \ or \ j \ge N$$
 (6.1)

$$y_j = 0, \ j < 0 \ or \ j \ge M$$
 (6.2)

Entonces los elementos de h son calculados mediante la siguiente ecuación:

$$h_j = \sum_{k=0}^{N-1} x_k^* \cdot y_{j+k}$$
(6.3)  
for  $j = -(N-1), -(N-2), \dots, -1, 0, 1, \dots, (M-2), (M-1)$ 

donde el operador  $x^*$  significa el complejo conjugado de x.

Los elementos de la salida Rxy están relacionados con los elementos de h de la forma siguiente:

$$R_{xy_i} = h_{i-(N-1)}$$
(6.4)  
for  $i = 0, 1, 2, ..., N + M - 2$ 

Dado que LabVIEW no puede indexar los arreglos con números negativos, el valor de la correlación en t = 0 es el elemento *N*-ésimo de la secuencia de salida *Rxy*.

La Fig. 6.9a muestra la gráfica de la función de correlación entre el sensor  $m_2$  y  $m_1$  para el caso donde la fuente se encuentra alineada con el micrófono  $m_2$  a 10 metros de distancia. En la Fig. 6.9b se muestra la misma función acotada entre [-2500, 2500] y en la Fig. 6.9c acotada entre [-30, 30]. El máximo de la función de correlación, punto donde son más semejantes las señales de ambos micrófonos, se encuentra en la muestra 13 sobre el eje x. Como la frecuencia de muestreo es de 25000 *Hz*, el período de muestreo es de 0.00004 segundos. Por lo tanto, la señal medida tardó 0.00052 segundos en llegar a  $m_1$  una vez que había llegado a  $m_2$ .



Fig. 6.9 Función de correlación entre el sensor m<sub>2</sub> y m<sub>1</sub>.

La Tabla 6.1 muestra el índice en el eje x, donde se obtuvo el valor máximo en la correlación cruzada para todas las pruebas realizadas durante el experimento. Cada uno de estos valores, multiplicado por el período de muestreo, es igual al tiempo que tardó la señal en llegar de un micrófono a otro. En la primera fila se indica el ángulo de rotación con respecto al micrófono m<sub>2</sub>. La segunda fila muestra los subíndices de los micrófonos con los cuales se trabaja para hallar la correlación cruzada.

	00				<b>30</b> °		<b>60</b> °			
	2-1	2-3	1-3	2-1	2-3	1-3	2-1	2-3	1-3	
Prueba 1 Señal 1	16	-19565	84115	41131	23906	- 12611	- 22617	173187	- 66713	
Prueba 2 Señal 1	18	20	2	21	13	-7	15	1	-16	
Prueba 3 Señal 1	25382	20	3	16	13	-4	-6142	3	-15	
Prueba 1 Señal 2	13	19	5	3060	2622	-3272	14	3	-12	
Prueba 2 Señal 2	3	11	9	19513	10	-4	12	1	-13	
Prueba 3 Señal 2	9	-425	8	16	13	-4	10	0	-11	

Tabla 6.1: Índice en el eje x del valor máximo de la correlación entre las señales obtenidas.

Teniendo en cuenta la frecuencia de muestreo utilizada y suponiendo que la fuente de ruido está alineada con respecto a uno de los pares de micrófonos, la cantidad de muestras que se podría tomar, en el tiempo que tarda el frente de onda en llegar de un micrófono a otro, sería de 30 muestras. Este es el caso donde el frente de onda tardaría más en llegar de un micrófono a otro.

Algunos de los resultados obtenidos en la Tabla 6.1 se encuentran fuera del rango esperado. El motivo de esto es que, durante el experimento, realizado en campo abierto, existieron condiciones de viento desfavorables. Algunos de estos valores inesperados son -425, 19513, 84115 y todos aquellos fuera del rango [-30,30]. Examinando el audio obtenido por los micrófonos, en las mediciones donde se hallaron valores inesperados, se corroboró la existencia de ráfagas de viento. Esto sugiere que las ráfagas de viento pueden afectar los valores obtenidos al aplicar la técnica de correlación cruzada.

#### 6.1.1.2. Análisis para ubicar la fuente de ruido.

Para estimar la ubicación de la fuente de ruido, se considera que la misma se encuentra en el *campo cercano*. Por lo tanto, el frente de onda que llega al arreglo de micrófonos es esférico. La Fig. 6.10 ilustra el esquema definido para estimar la ubicación de la fuente de ruido.



Fig. 6.10 Esquema para determinar la ubicación de la fuente.

Dada las características del frente de onda, las diferencias en los tiempos de arribo entre los micrófonos 2-3 y 1-3 cumplen las relaciones siguientes:

$$t_{23} = (r_3 - r_2)/c \tag{6.5}$$

$$t_{13} = (r_3 - r_1)/c \tag{6.6}$$

Aplicando ley de los cosenos se tiene:

$$r_2^2 = r_3^2 + d_{23}^2 - 2d_{23}r_3\cos\theta$$
(6.7)

$$r_1^2 = r_3^2 + d_{13}^2 - 2d_{13}r_3\cos(\theta + \beta)$$
(6.8)

Desarrollando  $\cos(\theta + \beta)$  tenemos:

$$\cos(\theta + \beta) = \cos\theta\cos\beta - \sin\theta\sin\beta$$
(6.9)

Además:

$$d_{12}^{2} = d_{23}^{2} + d_{13}^{2} - 2d_{13}d_{23}\cos\beta$$
(6.10)

Las distancias entre los micrófonos  $d_{12}$ ,  $d_{23}$  y  $d_{13}$  son conocidas dado que forman parte de la definición del experimento. Las diferencias en los tiempos de arribo  $t_{23}$  y  $t_{13}$  se calculan usando la correlación cruzada. Por lo tanto, a partir de las ecuaciones de la (6.5) a (6.10), se pueden obtener todos los parámetros desconocidos del esquema de la Fig. 6.10, incluyendo las distancias de la fuente a cada micrófono, denotadas como  $r_1$ ,  $r_2$  y  $r_3$ .

El algoritmo anterior se implementó utilizando en el lenguaje de programación JAVA. Los datos de entrada comprendían las distancias entre micrófonos y las diferencias en los tiempos de arribo, calculadas mediante la correlación cruzada. La Tabla 6.2 muestra los resultados obtenidos al evaluar el algoritmo de ubicación implementado.

Tabla 6.2: Resultados obtenidos al evaluar la implementación del algoritmo de ubicación.

t <sub>13</sub>	t <sub>23</sub>	Ángulo fuente	$r_1$	$r_2$	$r_3$	Angulo θ
2 * 0.00004 s	20 * 0.00004 s	00	0.319 m	0.072 m	0.347 m	7.330
3 * 0.00004 s	20 * 0.00004 s	00	0.311 m	0.078 m	0.352 m	9.18°
5 * 0.00004 s	19 * 0.00004 s	00	0.290 m	0.097 m	0.358 m	13.270
-7 * 0.00004 s	13 * 0.00004 s	30º	0.397 m	0.122 m	0.301 m	11.50°
-4 * 0.00004 s	13 * 0.00004 s	30°	0.345 m	0.111 m	0.290 m	1.41º
-4 * 0.00004 s	10 * 0.00004 s	30°	0.324 m	0.132 m	0.269 m	1.750
-16 * 0.00004 s	1 * 0.00004 s	60°	0.485 m	0.251 m	0.265 m	37.850
-15 * 0.00004 s	3 * 0.00004 s	60°	0.484 m	0.237 m	0.278 m	35.310
-12 * 0.00004 s	3 * 0.00004 s	60°	0.400 m	0.194 m	0.236 m	19.10º

Al analizar dichos resultados se observa que todas las distancias estimadas  $r_1$ ,  $r_2$  y  $r_3$  se encuentran muy lejos del valor esperado de 10 metros. Esto se debe a que el frente de onda de la señal se comportó de manera plana, dado que la fuente se encontraba en el *campo lejano* con respecto al arreglo de micrófonos. Por lo tanto, no se cumplen las ecuaciones (6.5) y (6.6).

# 6.1.2. Una fuente a diferentes distancias y diferentes ángulos con respecto al punto de medición.

Los objetivos que se persiguen con este experimento son:

- Realizar un experimento con el arreglo de micrófonos con geometría triangular pero bajo condiciones meteorológicas diferentes.
- Determinar si existen cambios en las diferencias en los tiempos de arribo (TDOA) al variar la distancia de la fuente al punto de medición.
- Analizar los resultados del algoritmo de localización considerando que la fuente se encuentra en el *campo cercano*.

En la Fig. 6.11 se observa la configuración final en campo del arreglo triangular utilizado para este experimento. Las señales emitidas por la fuente de ruido fueron las mismas utilizadas en el experimento de la sección 6.1.1. El procedimiento seguido fue el siguiente:

- 1. Colocar una fuente sonora a 2 metros del punto de medición alineada con la orientación del micrófono m<sub>2</sub>. Realizar dos mediciones con la fuente emitiendo determinada señal. Posteriormente realizar dos mediciones más con la fuente emitiendo otra señal de similar contenido espectral que la inicial.
- Realizar las mismas mediciones que en el punto 1, pero con la fuente a 5, 10 y 15 metros.
- 3. Rotar 30 grados la posición de la fuente con respecto al punto de medición y hacia el micrófono  $m_3$ . Posteriormente realizar las mismas mediciones que en los puntos 1 y 2.
- 4. Realizar el mismo procedimiento que en el punto 3, de tal forma que la posición de la fuente estuviera rotada 60 grados con respecto a su posición original.



Fig. 6.11 Distribución real del arreglo triangular de micrófonos durante el experimento.

#### 6.1.2.1. Análisis de correlación de las señales obtenidas.

A las señales obtenidas se les aplicó el mismo pre-procesamiento descrito en la Fig. 6.6, antes de calcular la correlación cruzada. Esto incluye la aplicación de los filtros pasa banda para tener en cuenta, la respuesta en frecuencia de los micrófonos y el teorema de muestreo espacial.

En las Tablas 6.3 - 6.6, se muestran los resultados obtenidos al aplicar la correlación cruzada para cada uno de los escenarios recreados. Se puede observar que para cada uno de estos escenarios, los valores obtenidos con la correlación cruzada son muy similares en cada una de las pruebas realizadas. Por ejemplo, en la Tabla 6.3 se puede ver que, el máximo de la función correlación entre los micrófonos 2 y 1, siempre se mantuvo en 28, a pesar de variar la distancia con respecto al punto de medición.

Por otra parte, en algunas pruebas existen valores fuera del rango esperado, como por ejemplo 19593, -14663, 16682 y otros; esto se debe a que en dichas pruebas también se registraron ráfagas de viento en el audio de la señal muestreada. A pesar de ello, las condiciones del viento fueron más estables que en el experimento de la sección 6.1.1.

	00				<b>30</b> °			60°		
	2-1	2-3	1-3	2-1	2-3	1-3	2-1	2-3	1-3	
Prueba 1 Señal 1	28	24	-3	30	13	-16	24	0	-25	
Prueba 2 Señal 1	28	24	-3	30	13	-16	24	-1	-25	
Prueba 1 Señal 2	28	25	-3	30	14	-16	24	0	-25	
Prueba 2 Señal 2	28	25	-3	30	14	-16	24	-1	-25	

Tabla 6.3: Índice en el eje x del valor máximo de la correlación entre las señales obtenidas con la fuente a2 metros del punto de medición.

Tabla 6.4: Índice en el eje x del valor máximo de la correlación entre las señales obtenidas con la fuente a5 metros del punto de medición.

	00				<b>30</b> °		<b>60</b> °			
	2-1	2-3	1-3	2-1	2-3	1-3	2-1	2-3	1-3	
Prueba 1 Señal 1	28	24	-4	32	14	-18	26	0	-25	
Prueba 2 Señal 1	28	25	-4	32	14	-18	25	0	-26	
Prueba 1 Señal 2	29	24	-5	31	13	-17	26	0	-25	
Prueba 2 Señal 2	29	24	-4	32	14	-18	25	0	-25	

	<b>0</b> 0				<b>30</b> °			60°		
	2-1	2-3	1-3	2-1	2-3	1-3	2-1	2-3	1-3	
Prueba 1 Señal 1	28	24	-4	- 14663	15	19593	25	-1	-25	
Prueba 2 Señal 1	28	24	-4	30	14	-17	25	0	-24	
Prueba 1 Señal 2	27	16682	-7	31	14	-17	24	0	-25	
Prueba 2 Señal 2	28	24	-4	30	14	-17	25	0	-25	

Tabla 6.5: Índice en el eje x del valor máximo de la correlación entre las señales obtenidas con la fuente a10 metros del punto de medición.

Tabla 6.6: Índice en el eje x del valor máximo de la correlación entre las señales obtenidas con la fuente a15 metros del punto de medición.

	00				<b>30</b> °			60°		
	2-1	2-3	1-3	2-1	2-3	1-3	2-1	2-3	1-3	
Prueba 1 Señal 1	27	24	-4	30	13	-17	24	0	-24	
Prueba 2 Señal 1	27	23	-4	31	13	4420	24	0	-23	
Prueba 1 Señal 2	27	23	-4	- 13193	3421	-12	23	0	-23	
Prueba 2 Señal 2	27	23	-5	30	13	-17	23	0	-22	

### 6.1.2.2. Análisis para ubicar la fuente de ruido.

Para la estimación de la ubicación de la fuente de ruido se utilizó el mismo algoritmo descrito en el punto 6.1.1.2. Al analizar detenidamente los resultados de las Tablas 6.3 – 6.6 se observa que a pesar de variar la distancia de la fuente, los valores de correlación cruzada se mantienen muy similares para todos los escenarios, ya sea que la fuente esté a 2, 5, 10 o 15 metros. Esto sugiere que para todas estas distancias el frente de onda emitido por la fuente de ruido se comportó de manera plana.

En la Fig. 6.12 se muestran dos frentes de onda emitidos por dos fuentes a diferentes distancias, alineadas con respecto al punto de medición. Al estar las fuentes a diferentes distancias, el arco que describe el frente de onda varía. Esto se debe al aumento de la circunferencia que describe la propagación del ruido. Es por ello que existe una diferencia en el tiempo de arribo entre los frentes de onda al llegar al micrófono  $m_2$ . Esta diferencia es necesaria para lograr distinguir entre dos fuentes que emiten ruido a diferentes distancias.



Fig. 6.12 Diferencia en el tiempo de arribo entre dos frentes de onda

Las Tablas 6.7 - 6.10 muestran los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo con los datos de correlación cruzada calculados en las Tablas 6.3 – 6.6. Los valores de  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  y  $\theta$  marcados con '-' significan que para los valores de  $t_{13}$  y  $t_{23}$  no se encontró solución mediante el algoritmo.

t <sub>13</sub>	<i>t</i> <sub>23</sub>	Ángulo fuente	$r_1$	$r_2$	$r_3$	Angulo θ
-3 * 0.00004 s	24 * 0.00004 s	00	2.327 m	1.957 m	2.286 m	31.980
-3 * 0.00004 s	25 * 0.00004 s	00	0.816 m	0.432 m	0.775 m	20.840
-16 * 0.00004 s	13 * 0.00004 s	30º	-	-	-	-
-16 * 0.00004 s	14 * 0.00004 s	30º	-	-	-	-
-25 * 0.00004 s	0 * 0.00004 s	60°	-1.494 m	-1.837 m	-1.837 m	96.05°
-25 * 0.00004 s	-1 * 0.00004 s	60°	-4.016 m	-4.346 m	-4.359 m	94.58°

Tabla 6.7: Resultados del algoritmo con la fuente a 2 metros del punto de medición.

Tabla 6.8: Resultados del algoritmo con la fuente a 5 metros del punto de medición.

-	-	Ángulo				Angulo
<i>t</i> <sub>13</sub>	$t_{23}$	fuente	$r_1$	$r_2$	$r_3$	θ
-4 * 0.00004 s	24 * 0.00004 s	00	1.056 m	0.671 m	1.000 m	136.80
-4 * 0.00004 s	25 * 0.00004 s	00	-	-	-	-
-5 * 0.00004 s	24 * 0.00004 s	00	-	-	-	-
-18 * 0.00004 s	14 * 0.00004 s	300	-	-	-	-
-17 * 0.00004 s	13 * 0.00004 s	30°	-	-	-	-
-25 * 0.00004 s	0 * 0.00004 s	60°	-1.494 m	-1.837 m	-1.837 m	96.05°
-26 * 0.00004 s	0 * 0.00004 s	60°	-0.426 m	-0.782 m	-0.782 m	104.32º

t <sub>13</sub>	<i>t</i> <sub>23</sub>	Ángulo fuente	$r_1$	$r_2$	<i>r</i> <sub>3</sub>	Angulo θ
-4 * 0.00004 s	24 * 0.00004 s	00	1.056 m	0.671 m	1.000 m	136.8º
-17 * 0.00004 s	14 * 0.00004 s	30º	-	-	-	-
-25 * 0.00004 s	-1 * 0.00004 s	60°	-4.016 m	-4.346 m	-4.359 m	94.58°
-24 * 0.00004 s	0 * 0.00004 s	60°	5.408 m	5.078 m	5.078 m	87.82º
-25 * 0.00004 s	0 * 0.00004 s	60°	-1.494 m	-1.837 m	-1.837 m	96.050

Tabla 6.9: Resultados del algoritmo con la fuente a 10 metros del punto de medición.

Tabla 6.10: Resultados del algoritmo con la fuente a 15 metros del punto de medición

t <sub>13</sub>	t <sub>23</sub>	Ángulo fuente	$r_1$	$r_2$	$r_3$	Angulo θ
-4 * 0.00004 s	24 * 0.00004 s	00	1.056 m	0.671 m	1.000 m	136.80
-4 * 0.00004 s	23 * 0.00004 s	00	9.390 m	9.020 m	9.335 m	34.68°
-5 * 0.00004 s	23 * 0.00004 s	00	1.483 m	1.099 m	1.415 m	30.540
-17 * 0.00004 s	13 * 0.00004 s	30º	-	-	-	-
-24 * 0.00004 s	0 * 0.00004 s	60°	5.408 m	5.078 m	5.078 m	87.82°
-23 * 0.00004 s	0 * 0.00004 s	60°	1.392 m	1.077 m	1.077 m	79.65º
-22 * 0.00004 s	0 * 0.00004 s	60°	0.915 m	0.613 m	0.613 m	71.60°

De forma similar al experimento anterior, estos resultados indican que el frente de onda se comportó de manera plana, pero en esta ocasión para distancias mayores a 2 metros. Sin embargo, cuando la fuente de ruido se encontraba a 2 metros de distancia y alineada con el micrófono m<sub>2</sub>, la distancia estimada con el algoritmo coincidió con la distancia real de la fuente. Esto sugiere que para distancias menores a 2 metros, el frente de onda generado por la fuente de ruido utilizada en el experimento, se puede comportar de manera esférica. No obstante, esta distancia resultaría muy pequeña para lograr una caracterización acústica de una zona.

Por otra parte, observando detalladamente los valores de los tiempos  $t_{13}$  y  $t_{23}$ , una variación muy pequeña en la cantidad de muestras obtenidas a partir de la correlación cruzada puede llevar a grandes cambios en los valores estimados de  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  y  $\theta$ . Por ejemplo, en la Tabla 6.10, cuando  $t_{13} = -4 * 0.00004 s$  y  $t_{23} = 24 * 0.00004 s$ , los valores de distancia estimados están alrededor de 1 *m*, sin embargo, cuando  $t_{13} = -4 * 0.00004 s$  y  $t_{23} = 23 * 0.00004 s$ , los valores de distancia estimados están alrededor de 1 *m*, sin embargo, cuando  $t_{13} = -4 * 0.00004 s$  y  $t_{23} = 23 * 0.00004 s$ , los valores de distancia estimados están alrededor de 9 *m*. Este fenómeno es provocado por aplicar el algoritmo de localización considerando que la fuente se encuentra en el *campo cercano*. No obstante, un aumento en la frecuencia de muestreo puede ser útil para caracterizar con mayor exactitud las variaciones detectadas en este experimento.

## 6.2. Evaluación de una geometría lineal.

Una de las ventajas de la geometría lineal es la facilidad en el análisis de los resultados. Asimismo, al estar alineados todos los sensores entre sí, se obtiene una mayor pluralidad en distancias entre los pares de micrófonos, así como una mayor apertura del arreglo con menos sensores.

Para el experimento que se describe a continuación se construyó un prototipo de arreglo lineal con cuatro micrófonos. La distancia propuesta entre cada par de micrófonos es de 20 *cm*. A partir de esta configuración para el arreglo se pueden analizar pares de micrófonos cuyas distancias son 20, 40 y 60 *cm*.

# 6.2.1. Una fuente a igual distancia y diferentes ángulos con respecto al punto de medición.

Los objetivos que se persiguen con este experimento son:

- Analizar las diferencias en los tiempos de arribo (TDOA) para distancias entre micrófonos de 20, 40 y 60 *cm*.
- Determinar la dirección de la fuente considerando que se encuentra en el *campo lejano*.
- Analizar los resultados del algoritmo de localización considerando que la fuente se encuentra en el *campo cercano*.

A las señales obtenidas se les aplicó el mismo pre-procesamiento descrito en la Fig. 6.6, antes de calcular la correlación cruzada. Sin embargo, dadas las múltiples distancias entre micrófonos que se utilizan, se modifican las frecuencias de corte del filtro aplicado en el paso 3. Esto significa que, para aperturas de 20 cm se utiliza un filtro pasa banda con frecuencias de corte de 20Hz y 850Hz, para 40 cm, frecuencias de corte de 20 Hz y 420Hz, y para 60 cm frecuencias de corte de 20Hz y 280Hz. Cabe resaltar que al aumentar la apertura entre un par de micrófonos, disminuye la frecuencia de corte superior del filtro pasa banda. Esto puede degradar el resultado de la correlación cruzada, dado que se desecha gran parte de la señal original. En la Fig. 6.13 se muestra el diseño del prototipo del punto de medición que se utilizó en campo.



Fig. 6.13 Distribución real del arreglo lineal de micrófonos durante el experimento.

El procedimiento seguido para realizar el experimento fue el siguiente:

- Colocar una fuente sonora a 10 metros del punto de medición alineada con la línea perpendicular al arreglo de micrófonos. Realizar tres mediciones con la fuente emitiendo determinada señal. Posteriormente realizar tres mediciones más con la fuente emitiendo otra señal de similar contenido espectral que la inicial.
- 2. Rotar 30 grados la posición de la fuente con respecto al punto de medición y a favor de las manecillas de reloj. Posteriormente realizar las mismas mediciones que en el punto 1.
- 3. Realizar el mismo procedimiento que en el punto 2, de tal forma que la posición de la fuente estuviera rotada 60 grados con respecto a su posición original.

### 6.2.1.1. Análisis de correlación de las señales obtenidas.

El cálculo de las correlaciones se realizó entre todas las combinaciones posibles de micrófonos del arreglo. Las tablas 6.11 - 6.13 muestran el índice en el eje x donde se obtuvo el máximo valor de la función de correlación cruzada.

Tabla 6.11: Índice en el eje x del valor máximo de la correlación entre las señales obtenidas. Fuente a 0grados con respecto al punto de medición.

	20 cm			40 (	40 cm		
	20Hz - 850Hz			20Hz –	20Hz – 280Hz		
	0-1	1-2	2-3	0-2	1-3	0-3	
Prueba 1 Señal 1	1	0	-1	1	0	16606	
Prueba 2 Señal 1	1	0	-1	2	-1	-1	
Prueba 3 Señal 1	1	0	0	3	0	0	
Prueba 1 Señal 2	-33177	-5254	0	-11260	-12935	-27439	
Prueba 2 Señal 2	16048	-12719	-280390	14058	-21620	1640	
Prueba 3 Señal 2	-111399	-690	0	7	-101169	132097	

Tabla 6.12: Índice en el eje x del valor máximo de la correlación entre las señales obtenidas. Fuente a 30grados con respecto al punto de medición.

	20 cm			40 d	40 cm		
	2	0Hz - 850H	z	20Hz –	20Hz – 280Hz		
	0-1	1-2	2-3	0-2	1-3	0-3	
Prueba 1 Señal 1	-5	-6	-7	-7	-13	-15	
Prueba 2 Señal 1	-5	-5	-7	-4	-12	-9	
Prueba 3 Señal 1	-6	-6	-7	-7	-9	-8127	
Prueba 1 Señal 2	-6	-6	-7	-2021	12114	-20552	
Prueba 2 Señal 2	7484	4565	12623	25215	12932	7016	
Prueba 3 Señal 2	-5	-6	-7	1	-9	-8	

	20 cm			40 d	m	60 cm
	20Hz - 850Hz			20Hz –	20Hz – 280Hz	
	0-1	1-2	2-3	0-2	1-3	0-3
Prueba 1 Señal 1	-9	-11	-12	-12	-21	-26
Prueba 2 Señal 1	-1472	69304	-1044	-6975	-34478	-49562
Prueba 3 Señal 1	-11	-11	-13	-18	-24	-34
Prueba 1 Señal 2	-10	-11	-12	-12	-19	-27
Prueba 2 Señal 2	-6956	4560	-12	-13	-10993	49957
Prueba 3 Señal 2	22324	11632	-13	44888	31427	-4416

Tabla 6.13: Índice en el eje x del valor máximo de la correlación entre las señales obtenidas. Fuente a 60grados con respecto al punto de medición.

Al igual que en experimentos realizados con la geometría triangular, la aparición de ráfagas de viento afectó los resultados obtenidos en algunas pruebas. Sin embargo este no es el único factor que afecta los resultados de la correlación cruzada. En el caso donde los micrófonos están espaciados 60 *cm*, la eliminación de las frecuencias mayores a 280 *Hz* producto del filtro pasa banda, provoca que se deseche parte importante de la señal original y por ende, que los resultados obtenidos sean inesperados. Tal es el caso de la prueba 1 con la señal 1 de la Tabla 6.11, en la cual todos los valores son correctos excepto el obtenido en la columna de 60 *cm*.

Por otra parte, se reprodujo el audio de las señales filtradas y se determinó que el viento generaba ruido de baja frecuencia, detectable aun por debajo de 280 *Hz*. Asimismo, a partir de dicho análisis se concluye para los experimentos realizados que, a medida que se disminuye la frecuencia de corte superior ocurren los siguientes fenómenos:

- 1. La señal original pierde relevancia al momento de realizar la correlación cruzada. Parte de la señal se desecha antes de aplicar dicha técnica.
- 2. El ruido de baja frecuencia generado por el viento se convierte en la fuente predominante. De ahí que la correlación arroje resultados inesperados.
- 3. Los valores obtenidos mediante la correlación cruzada son correctos cuando el viento es ligero o moderado y no existen ráfagas. Tal es el caso de la prueba 1 con la señal 1 de la Tabla 6.12, donde a pesar del viento se obtiene resultados correctos.

### 6.2.1.2. Análisis para la ubicación de la fuente de ruido.

El primer análisis que se realizó para la ubicación de la fuente de ruido fue estimar la dirección de la misma. Para ello se considera que el frente de onda que llega al arreglo de micrófonos es plano. El algoritmo utilizado es el descrito a partir de la Fig. 3.1. Las Tablas 6.14 – 6.16 muestran los ángulos estimados, los cuales representan el ángulo formado por la recta perpendicular a la línea que une los micrófonos del arreglo. La Fig. 6.14 muestra cómo interpretar dichos ángulos. Los datos de entrada del algoritmo son los valores estimados en las Tablas 6.11 – 6.13.



Fig. 6.14 Orientación de los ángulos estimados.

Tabla 6.14: Estimación de la dirección a partir de los datos de la Tabla 6.11. Fuente a 0 grado	s con
respecto al punto de medición.	

	20 cm			40 (	40 cm		
	2	20Hz - 850Hz			20Hz – 420Hz		
	0-1	1-2	2-3	0-2	1-3	0-3	
Prueba 1 Señal 1	-3.930	00	3.88º	-1.98º	00	-	
Prueba 2 Señal 1	-3.930	00	3.88 <sup>0</sup>	-3.96°	1.97º	1.310	
Prueba 3 Señal 1	-3.930	00	00	-5.95°	0o	00	
Prueba 1 Señal 2	-	-	00	-	-	-	
Prueba 2 Señal 2	-	-	-	-	-	-	
Prueba 3 Señal 2	-	-	00	-14.00°	-	-	

Tabla 6.15: Estimación de la dirección a partir de los datos de la Tabla 6.12. Fuente a 30 grados con respecto al punto de medición.

	20 cm			40 (	40 cm		
	2	0Hz - 850H	z	20Hz –	20Hz – 280Hz		
	0-1	1-2	2-3	0-2	1-3	0-3	
Prueba 1 Señal 1	20.06°	24.70°	28.24º	14.00°	26.48º	20.06°	
Prueba 2 Señal 1	20.06º	20.38º	28.24º	7.95°	24.31º	11.88°	
Prueba 3 Señal 1	24.31º	24.70°	28.24º	14.00°	17.98º	-	
Prueba 1 Señal 2	24.31º	24.70°	28.24º	-	-	-	
Prueba 2 Señal 2	-	-	-	-	-	-	
Prueba 3 Señal 2	20.06º	24.70°	28.24º	-1.98º	17.98°	10.54°	

Tabla 6.16: Estimación de la dirección a partir de los datos de la Tabla 6.13. Fuente a 60 grados con respecto al punto de medición.

	20 cm			40 (	40 cm		
	2	20Hz - 850Hz			20Hz – 420Hz		
	0-1	1-2	2-3	0-2	1-3	0-3	
Prueba 1 Señal 1	38.13º	50.00°	54.20°	24.50°	46.08º	36.48°	
Prueba 2 Señal 1	-	-	-	-	-	-	
Prueba 3 Señal 1	48.99º	50.00°	61.48º	38.470	55.40°	51.02°	
Prueba 1 Señal 2	43.31º	50.00°	54.20°	24.50°	40.670	38.13°	
Prueba 2 Señal 2	-	-	54.20°	26.70°	-	-	
Prueba 3 Señal 2	-	-	61.48º	-	-	-	

El análisis de los resultados de las Tablas 6.14 – 6.16 muestra que al aumentar la distancia entre micrófonos se puede detectar cambios más pequeños con respecto a la dirección de la fuente de ruido. Tal es el caso de la prueba 1 con la señal 1 de la Tabla 6.14, donde 1 muestra entre los micrófonos 0 y 1 (distancia de 20 *cm*) representa un ángulo de 3.93°, mientras que 1 muestra entre los micrófonos 0 y 2 (distancia de 40 *cm*) representa un ángulo de 1.98°. Sin embargo, se obtuvo una mejor exactitud con distancias menores entre los micrófonos. Esto se debe a la aplicación del filtro pasa banda que elimina parte importante de la señal a medida que aumenta la distancia entre micrófonos.

Por otra parte, se aplicó el algoritmo de localización descrito a partir de la Fig. 3.2 y para el cual se considera el frente de onda esférico. Se calculó el ángulo  $\theta$ , definido como:  $\theta = 180 - \theta_1$ . Las Tablas 6.17-6.19 muestran los resultados de la evaluación del algoritmo.

<i>t</i> <sub>12</sub>	<i>t</i> <sub>23</sub>	Ángulo fuente	$r_1$	<i>r</i> <sub>2</sub>	$r_3$	Angulo θ
0 * 0.00004 s	-1 * 0.00004 s	00	-2.952 m	-2.952 m	-2.966 m	95.83°
0 * 0.00004 s	0 * 0.00004 s	00	Ø	œ	œ	900
-6 * 0.00004 s	-7 <b>*</b> 0.00004 s	30°	-2.816 m	-2.898 m	-2.994 m	119.96°
-5 * 0.00004 s	-7 <b>*</b> 0.00004 s	30º	-1.255 m	-1.324 m	-1.420 m	121.91º
-11 * 0.00004 s	-12 * 0.00004 s	60°	-1.527 m	-1.678 m	-1.843 m	146.09º
-11 * 0.00004 s	-13 * 0.00004 s	60º	-0.416 m	-0.567 m	-0.746 m	155.46º

Tabla 6.17: Resultados del algoritmo utilizando  $t_{12}$  y  $t_{23}$ 

Tabla 6.18: Resultados del algoritmo utilizando t<sub>01</sub> y t<sub>13</sub>

<i>t</i> <sub>01</sub>	t <sub>13</sub>	Ángulo fuente	$r_1$	$r_2$	$r_3$	Angulo θ
1 * 0.00004 s	0 * 0.00004 s	00	-4.380 m	4.366 m	-4.366 m	92.63°
1 * 0.00004 s	-1 * 0.00004 s	00	-2.922 m	-2.909 m	-2.922 m	95.89°
-5 * 0.00004 s	-13 * 0.00004 s	30º	-2.346 m	-2.415 m	-2.593 m	120.51°
-5 * 0.00004 s	-12 * 0.00004 s	30º	-3.639 m	-3.708 m	-3.872 m	117.03º
-6 * 0.00004 s	-9 <b>*</b> 0.00004 s	30º	2.648 m	2.566 m	2.442 m	103.570
-5 * 0.00004 s	-9 * 0.00004 s	30º	7.916 m	7.848 m	7.724 m	106.58º
-9 * 0.00004 s	-21* 0.00004 s	60°	-1.413 m	-1.537 m	-1.825 m	140.63°
-11 * 0.00004 s	-24 * 0.00004 s	60°	-1.417 m	-1.567 m	-1.897 m	149.00°
-10 * 0.00004 s	-19 * 0.00004 s	60°	5.035 m	4.898 m	4.637 m	128.82º

<i>t</i> <sub>02</sub>	t <sub>23</sub>	Ángulo fuente	$r_1$	$r_2$	$r_3$	Angulo θ
1 * 0.00004 s	-1 * 0.00004 s	00	-2.944 m	-2.930 m	-2.944 m	95.85°
2 * 0.00004 s	-1 * 0.00004 s	00	-2.211 m	-2.184 m	-2.198 m	96.52°
3 * 0.00004 s	0 * 0.00004 s	00	-2.914 m	-2.873 m	-2.873 m	92.02°
-7 * 0.00004 s	-7 * 0.00004 s	30°	-1.053 m	-1.149 m	-1.245 m	122.44º
-4 * 0.00004 s	-7 <b>*</b> 0.00004 s	30°	-0.762 m	-0.817 m	-0.913 m	124.02º
1 * 0.00004 s	-7 * 0.00004 s	30º	-0.559 m	-0.546 m	-0.642 m	126.570
-12 * 0.00004 s	-12 * 0.00004 s	60°	-0.338 m	-0.502 m	-0.667 m	149.670
-13 * 0.00004 s	-12 * 0.00004 s	60°	-0.356 m	-0.534 m	-0.699 m	149.40º
-18 * 0.00004 s	-13 * 0.00004 s	60°	-0.318 m	-0.565 m	-0.743 m	155.470

Tabla 6.19: Resultados del algoritmo utilizando t<sub>02</sub> y t<sub>23</sub>

Como en casos anteriores, las distancias estimadas son incorrectas y el motivo es considerar el frente de onda esférico. Sin embargo, se puede comprobar fácilmente que los ángulos estimados indican direcciones bastante cercanas a la de la fuente de ruido con respecto al punto de medición.

### 6.3. Conclusiones.

A partir del sistema de medición implementado, el cual incluye los prototipos de arreglos de micrófonos, se realizan mediciones del ruido generado por fuentes sonoras de amplio rango en frecuencia y se obtienen diferencias en los tiempos de arribo entre las señales recibidas en cada micrófono.

En ambas geometrías de los arreglos de micrófonos, lineal y triangular, a partir de la técnica de correlación cruzada, se detectaron cambios en las diferencias en los tiempos de arribo (TDOA) al rotar la fuente alrededor del punto de medición; hasta 360° y 180° para la geometría triangular y lineal, respectivamente.

Al considerar que la fuente se encuentra en el *campo cercano*, se establece que el frente de onda que llega a los micrófonos del arreglo es esférico. Los algoritmos de localización utilizados para ambas geometrías se basan en esta consideración y producen resultados erróneos si la fuente no se encuentra en el *campo cercano*.

En el algoritmo de localización aplicado a la geometría triangular, descrito en la Fig. 6.10, se utiliza el ángulo  $\beta$ , el cual está definido a partir de las distancias entre cada par de micrófonos. La adición de este elemento puede ser un factor de incremento en el error obtenido. Por lo tanto, se sugiere realizar más experimentos con dicha geometría, con estructuras construidas industrialmente para arreglos de micrófonos.

En los experimentos realizados con la geometría lineal, considerando que el frente de onda que llega al arreglo de micrófonos es plano, fue posible determinar la dirección de arribo de la señal emitida por la fuente sonora. Al aplicar el algoritmo de localización, considerando que el frente de onda que llega al arreglo de micrófonos es esférico, los ángulos estimados (ángulo  $\theta$  de la Fig. 3.2 y 6.10) también representan, de manera aproximada, la dirección a la cual fue ubicada la fuente de ruido durante el experimento. Sin embargo, no se logra determinar la distancia de la misma. Se establece que la causa de tal comportamiento es que el frente de onda de la señal sonora, no se comportó de manera esférica para las distancias evaluadas.

La separación entre micrófonos de 60 cm no es práctica, ya que para la misma, el teorema de muestreo espacial establece descartar las frecuencias mayores a 280 Hz, lo cual no es conveniente pues las señales originales tienen su mayor contenido en armónicos, entre 20 Hz y 1 kHz y se eliminaría parte importante de la señal.

Con las separaciones entre micrófonos de 20 y 40 *cm*, se logran mejores resultados en las estimaciones de la dirección de arribo que con 60 *cm*. Asimismo, con 20 *cm* los resultados se aproximan más a la dirección de la fuente de ruido, lo cual se produce porque se puede analizar mayor parte de la señal original. Sin embargo, con distancias superiores a 20 cm, se obtiene una mejor resolución angular a costa de eliminar mayor contenido de la señal. Por lo tanto, la selección de la distancia entre micrófonos queda sujeta al contenido en frecuencia de la señal y al intervalo de distancias en el cuál puede estar ubicada la fuente.
### 7. CASO DE ESTUDIO. DESPEGUES EN EL AEROPUERTO AICM.

La ubicación de las fuentes de ruido, así como las características acústicas de las mismas, son elementos necesarios para poder aplicar los algoritmos que modelan la propagación del ruido como el descrito en la norma ISO 9613. En este capítulo se describe el algoritmo diseñado para la estimación de la ubicación de la fuente de ruido, en el plano, para el caso de estudio seleccionado. El algoritmo se basa en las diferencias en los tiempos de arribo, calculadas mediante la correlación cruzada de señales, que se obtienen a partir de un arreglo de micrófonos. Los puntos principales que se abordan son:

- Definición del caso de estudio.
- Descripción de la geometría del arreglo de micrófonos.
- Descripción del algoritmo para la estimación de la ubicación de la fuente de ruido.

#### 7.1. Definición del caso de estudio.

El caso de estudio se centra en el despegue de los aviones. Los objetivos que se pretenden son:

- 1. Estimar la ubicación de un avión proyectada en la superficie terrestre, en determinados lapsos de tiempo, durante su despegue.
- 2. Caracterizar acústicamente una fuente de ruido puntual equivalente para cada lapso de tiempo, que represente al avión.
- 3. Generar un mapa de ruido correspondiente a cada lapso de tiempo.

En este capítulo se aborda solamente el objetivo definido en el punto 1, el 2 y 3 en el capítulo 8.

En la Fig. 7.1 se define el procedimiento general aplicado en el caso de estudio. La distancia máxima al punto de medición, a la cual será estimada la posición del avión y será generado el mapa de ruido, es de 1000 m. Esta distancia es establecida puesto que en la norma ISO 9613, manejan distancias hasta 1000 m entre la fuente y el receptor.



Fig. 7.1 Procedimiento general aplicado en el caso de estudio.

Los despegues analizados se realizaron en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, Lic. Benito Juárez (AICM). En la Fig. 7.2 se muestra la zona de estudio y la ubicación del punto de medición.



Fig. 7.2 Zona del caso de estudio. Ubicación del punto de medición.

El caso de estudio fue seleccionado por las razones siguientes:

- 1. Durante un despegue el avión se convierte en la fuente de ruido predominante debido a los altos niveles sonoros emitidos, que enmascaran los demás sonidos.
- 2. Aplicando la definición de la norma ISO 9613, un avión durante el despegue es una fuente de ruido extendida (lineal). Por lo tanto, para su análisis y de acuerdo a esta misma norma, debe ser dividida en secciones lineales, cada una representada por una fuente puntual en su centro. Es por ello que la señal se divide en fragmentos antes del análisis.
- El contenido en frecuencia de las señales de los aviones durante el despegue es mayor en las bajas frecuencia, por debajo de 1000 Hz. Por lo tanto, las distancias entre micrófonos del arreglo de 20 y 40 m que se analizaron en el capítulo 6, son aplicables al caso de estudio.
- 4. Las señales emitidas por los aviones durante el despegue se han estudiado en trabajos anteriores, incluido el reconocimiento del tipo de aeronave [84][85].

En las Figs. 7.3 – 7.5 se muestran varios espectros de señales medidas durante los despegues de distintos tipos de aeronaves. El ruido generado por estos aviones proviene principalmente de los motores, los cuales son diferentes en cada tipo de aeronave. Sin embargo, se puede observar que todas las señales tienen una distribución importante en el espectro de frecuencia por debajo de 1000 *Hz*. Esto permite aplicar el mismo análisis para todo tipo de aeronave.



Fig. 7.3 Espectro de la señal medida durante el despegue de un avión tipo ATR-42.



Fig. 7.4 Espectro de la señal medida durante el despegue de un avión tipo Boeing 737.



Fig. 7.5 Espectro de la señal medida durante el despegue de un avión tipo Airbus A320.

## 7.2. Propuesta de la geometría para el arreglo de micrófonos.

A partir de los resultados obtenidos en el capítulo 6 y teniendo en cuenta la ubicación del punto de medición, la orientación de la pista de despegue y el tipo de espectro de las señales que serán muestreadas, se determina utilizar un arreglo de micrófono con geometría lineal. La Fig. 7.6 muestra la distribución de los micrófonos en el arreglo.



Fig. 7.6 Distribución final de los micrófonos en el arreglo utilizado en el caso de estudio.

Dada la ubicación del punto de medición y la orientación de los despegues, existe un lapso de tiempo de la señal en la cual el avión se encuentra al frente del arreglo de micrófonos y otro en el cual se encuentra detrás. Para evitar el problema de la discriminación adelante-atrás de los arreglos lineales, se establece que solo se analizará la porción de la señal que se encuentra antes del valor máximo de la misma.

Por otra parte, con el arreglo lineal se puede lograr un mayor número de combinaciones de pares de micrófonos. Esto da la posibilidad de realizar un análisis más detallado con respecto a las frecuencias en la señal y corroborar los resultados obtenidos, entre pares de micrófonos. La Fig. 7.7 muestra el arreglo instalado durante los experimentos realizados en el caso de estudio.



Fig. 7.7 Arreglo de micrófonos instalado para el caso de estudio.

La distancia de 40 cm entre los micrófonos fue elegida por las siguientes razones:

1. El avión durante el despegue se encuentra a distancias que pueden llegar a los 1000 *m* del punto de medición. Esto obliga a tener una mayor exactitud en las estimaciones de las direcciones puesto que, al aumentar la distancia, aumenta el error en la estimación de la posición. Con 40 *cm* entre micrófonos se tiene una resolución angular de aproximadamente un grado, el doble de la resolución que se puede lograr con 20 *cm*.

- 2. El filtro pasa banda que debe ser aplicado para cumplir con el teorema de muestreo espacial, permite analizar frecuencias de 20 *Hz* a 420 *Hz*. Parte importante de las señales analizadas se encuentran en estas frecuencias.
- 3. Al colocar cuatro sensores espaciados entre ellos 40 *cm* se logra una apertura en el arreglo de 120 *cm*. Esto permite tener mayor precisión en la estimación de la dirección, si las frecuencias condicionadas por el teorema de muestreo espacial fueran representativas del resto de la señal.

Es importante notar que esto es un primer acercamiento a la geometría ideal para el caso de estudio. Dicha geometría fue seleccionada a partir de los resultados obtenidos en experimentos anteriores y con base en las reglas y sugerencias encontradas en la literatura.

Por otra parte, las señales obtenidas durante los experimentos realizados fueron muestreadas a 50000 *Hz*. Esta frecuencia es el doble de la utilizada en los experimentos del capítulo 6 y tiene como objetivo lograr una mayor exactitud en las estimaciones de las diferencias en los tiempos de arribo.

#### 7.3. Cálculo de la dirección y la distancia.

La disyuntiva de cuando considerar que la fuente de ruido se encuentra en el *campo cercano* o en el *campo lejano*, queda sujeta a factores muy variables o inestables como son la distancia al punto de medición y las condiciones meteorológicas. Considerar que la fuente sonora emite la señal desde el *campo cercano*, permite utilizar la técnica de triangulación para conocer no solo la dirección, sino también la distancia de la fuente al punto de medición. Sin embargo, los resultados de dicha técnica están condicionados a la circularidad del frente de onda de la señal. Un mínimo cambio en la forma del frente de onda puede provocar resultados en las estimaciones, como se pudo comprobar en los experimentos reportados en el capítulo 6.

Otra opción es considerar que la fuente se encuentra en el *campo lejano* y que, por lo tanto, el frente de onda que llega al punto de medición se comporta de manera plana. Haciendo dicha consideración, la técnica de triangulación ya no es aplicable para determinar la ubicación de la fuente de ruido. Sin embargo, utilizando la correlación cruzada se puede determinar la dirección de la fuente, pero es imposible determinar la distancia de la misma. Esto se debe a que el frente de onda que llega al arreglo de micrófonos no se modifica, a pesar de variar la distancia de la fuente de ruido. Para obtener la distancia se debe aplicar algún algoritmo que tenga en cuenta otros elementos, además de la dirección estimada mediante la correlación cruzada. A continuación se presenta el algoritmo de ubicación implementado para el caso de estudio.

La Fig. 7.8 muestra el esquema de ubicación relativa de la pista y el arreglo de micrófonos, donde:

- rw<sub>1</sub>: primer punto localizado al inicio de la pista 5L.
- rw<sub>2</sub>: segundo punto localizado al final de la pista 5L.
- ma: arreglo de micrófonos.
- N: norte geográfico.
- $\alpha$ : ángulo entre N y la línea que une los micrófonos del arreglo.
- θ: ángulo que representa la dirección de la fuente con respecto a la línea que une los micrófonos del arreglo.





La Tabla 7.1 muestra las coordenadas geográficas de los puntos, ma, rw<sub>1</sub>, rw<sub>2</sub>.

Tabla 7.1: Ubicación	geográfica de	los puntos m	a, rw <sub>1</sub> , rw <sub>2</sub> .
----------------------	---------------	--------------	--

Punto	Latitud	Longitud
ma	19º 26' 42.288" N	99º 3' 45.669" O
rw <sub>1</sub>	19º 25' 40.5732" N	99º 5' 22.6176" O
rw <sub>2</sub>	19º 26' 45.0528" N	99º 3' 27.8136" O

En la Fig. 7.9 se muestra el algoritmo para la localización de la fuente puntual equivalente para un fragmento de señal.



Fig. 7.9 Algoritmo de localización para un fragmento de señal aplicado en el caso de estudio.

El objetivo principal del algoritmo es determinar la ubicación de la fuente puntual equivalente que representa al avión para el fragmento de señal analizado. Para ello se aplica el procedimiento siguiente:

- 1. Estimar el ángulo representativo de la dirección de la aeronave para un fragmento de señal (ángulo  $\theta$  en la Fig. 7.8), con base en la diferencia en los tiempos de arribo. Para ello se aplica la técnica de correlación cruzada entre los pares de micrófonos a partir de las señales obtenidas por estos.
- 2. Estimar el punto de intersección entre la pista y la dirección de arribo, estimada en el punto 1. Para ello, se determina la orientación geográfica del arreglo de micrófonos y la pista de aterrizaje.

### 7.3.1. Estimación de la dirección de la fuente de ruido con respecto al punto de medición.

Se realizaron mediciones para diecinueve despegues, que fueron efectuados por varios tipos de aeronaves en las pistas 5L (cinco izquierda) y 5R (cinco derecha) del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Todos los despegues tuvieron lugar el mismo día. La Tabla 7.2 muestra una relación de dichos despegues.

Medición	Tipo de aeronave	Pista de despegue
1	Embraer ERJ-145LU	
2	Airbus A320	5L
3	Boeing 737	5R
4	Airbus A320	5L
5	Boeing 737	5R
6	Boeing 737	5R
7	Boeing 737	5R
8	Airbus A320	5R
9	Boeing 737	5R
10	Embraer ERJ-145LU	5R
11	Airbus A320	5R
12	Boeing 737	5R
13	Airbus A320	5L
14	Boeing 737	5R
15	Boeing 737	5R
16	Boeing 737	5R
17	Embraer EMB-145LR	5L
18	Embraer ERJ-145LU	5R
19	Airbus A340	5R

Tabla 7.2: Relación de aeronaves que despegaron durante el experimento del caso de estudio.

El análisis que se reporta en este capítulo es el realizado con las mediciones 2 y 4 de la Tabla 7.2. Los despegues efectuados durante estas mediciones fueron grabados en video para obtener mayor información de los mismos. En cada caso, el ángulo de ascenso de la aeronave es diferente, por lo tanto las aeronaves no describen la misma trayectoria durante su despegue. Con el resto de las mediciones se realizó un análisis similar y resultados obtenidos respaldan las conclusiones obtenidas en el trabajo.

El primer paso para la estimación de la dirección de la fuente de ruido, es dividir la señal obtenida por los micrófonos en fragmentos. Para el caso de estudio se seleccionaron fragmentos de 2 segundos por las razones siguientes:

- Se estableció analizar como mínimo tres o cuatro fragmentos de la señal, los cuales al ser de dos segundos, aseguran no analizar parte de la señal que se encuentre después del instante de tiempo, donde se encuentra el valor máximo de la misma.
- Considerando una velocidad promedio de despegue igual a 260 km/h, para la aeronave analizada en la medición 2 y 4, la distancia recorrida en 2 segundos es de 150 m aproximadamente. Esta medida equivale al 15% de la distancia máxima al punto de medición, a la cual sería estimada la ubicación del avión. Este porcentaje es suficiente como punto de partida en la definición del tamaño de los fragmentos.

La Fig. 7.10 muestra la señal en tiempo y el espectro en frecuencia obtenidos de la medición 2. En las Fig. C.1 – C.3 del anexo C se muestran las gráficas para las

mediciones 1,5 y 8, respectivamente. Las señales del resto de las mediciones tienen distribuciones similares a las anteriores.

Por otra parte, los fragmentos utilizados para el análisis de la medición 2 quedan definidos como sigue:

- 1. Fragmento uno. Inicia en el segundo 5 de la medición 2. Ver Fig. 7.11.
- 2. Fragmento dos. Inicia en el segundo 7 de la medición 2. Ver Fig. 7.12.
- 3. Fragmento tres. Inicia en el segundo 9 de la medición 2. Ver Fig. 7.13.

El siguiente paso es aplicar a los fragmentos correspondientes a un par de micrófonos la técnica de correlación cruzada. Esto permite calcular la diferencia en tiempo a la que fue muestreado el mismo fragmento, por los micrófonos del par analizado. En la Tabla 7.3 se muestran los resultados de la correlación cruzada por cada par de micrófonos para todos los fragmentos de la medición 2, así como, la media de los valores obtenidos por cada fragmento. En el anexo D se muestran las funciones de correlación obtenidas entre los pares de micrófonos 0-1, 1-2 y 2-3, para todos los fragmentos de la medición 2.



Fig. 7.10 Señal en tiempo y espectro en frecuencia obtenidos de la medición 2.



Fig. 7.11 Fragmento uno de la medición 2.



Fig. 7.12 Fragmento dos de la medición 2.



Fig. 7.13 Fragmento tres de la medición 2.

Tabla 7.3: Resultados de la correlación cruzada aplicada a los fragmentos de la medición 2.

	Pareja de micrófonos para el cálculo de la correlación cruzada							
	0-1 1-2 2-3 Media							
Fragmento uno	20 * 0.00002 s	32 * 0.00002 s	14 * 0.00002 s	23 * 0.00002 s				
Fragmento dos	16 * 0.00002 s	27 * 0.00002 s	11 * 0.00002 s	18 * 0.00002 s				
Fragmento tres	-9 * 0.00002 s	3 * 0.00002 s	-10 * 0.00002 s	-5 * 0.00002 s				

A partir de las diferencias en los tiempos de arribo y considerando que el frente de onda que llega al arreglo de micrófonos es plano, se obtiene el valor de  $\theta$ , definido en la Fig. 7.8, de la ecuación siguiente:

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{c \cdot t_{ab}}{d_{ab}}\right) \tag{7.1}$$

Donde:

- c = 343 m/s
- θ: ángulo con respecto a la línea que une los micrófonos del arreglo, que representa la estimación de la dirección relativa del avión, para el fragmento de señal analizado.

- $t_{ab}$ : diferencia en los tiempos de arribo estimada a partir de la correlación cruzada entre el micrófono *a* y *b*. Para el caso específico de la mediciones 2 y 4 se utilizó la media calculada en la Tabla 7.2.
- $d_{ab}$ : distancia entre los micrófonos *a* y *b*. Para el caso de las mediciones 2 y 4 se utilizó la media de las distancias de los pares 0-1, 1-2, 2-3, la cual tiene un valor de 40.03 cm.

La Tabla 7.4 muestra los ángulos resultantes para cada uno de los fragmentos de la medición 2.

	t <sub>ab</sub>	$d_{ab}$	θ
Fragmento uno	23 * 0.00002 s	40.03 cm	66.79º
Fragmento dos	18 * 0.00002 s	40.03 cm	72.03º
Fragmento tres	-5 * 0.00002 s	40.03 cm	94.92°

Tabla 7.4: Resultados de las estimaciones del ángulo  $\theta$  para los fragmentos de la medición 2.

De la misma forma, el análisis aplicado a la medición 2 fue aplicado a la medición 4. La Fig. 7.14 muestra la señal en tiempo y el espectro en frecuencia obtenidos de la medición 4. Los fragmentos utilizados para el análisis de dicha medición quedan definidos como sigue:

- 1. Fragmento uno. Inicia en el segundo 2 de la medición 4. Ver Fig. 7.15.
- 2. Fragmento dos. Inicia en el segundo 4 de la medición 4. Ver Fig. 7.16.
- 3. Fragmento tres. Inicia en el segundo 6 de la medición 4. Ver Fig. 7.17.
- 4. Fragmento cuatro. Inicia en el segundo 8 de la medición 4. Ver Fig. 7.18.



Fig. 7.14 Señal en tiempo y espectro en frecuencia obtenidos de la medición 4.



Fig. 7.15 Fragmento uno de la medición 4.



Fig. 7.16 Fragmento dos de la medición 4.



Fig. 7.17 Fragmento tres de la medición 4.



Fig. 7.18 Fragmento cuatro de la medición 4.

En la Tabla 7.5 se muestra los resultados de la correlación cruzada para los fragmentos de la medición 4.

	Pareja de micrófonos para el cálculo de la correlación cruzada					
	0-1 1-2 2-3 Media					
Fragmento uno	29 * 0.00002 s	35 * 0.00002 s	22 * 0.00002 s	29 * 0.00002 s		
Fragmento dos	22 * 0.00002 s	30 * 0.00002 s	18 * 0.00002 s	23 * 0.00002 s		
Fragmento tres	7 * 0.00002 s	17 * 0.00002 s	4 * 0.00002 s	9 * 0.00002 s		
Fragmento cuatro	-18 * 0.00002 s	-7 * 0.00002 s	-22 * 0.00002 s	-16 * 0.00002 s		

Tabla 7.5: Resultados de la correlación cruzada aplicada a los fragmentos de la medición 4.

La Tabla 7.6 muestra los ángulos resultantes para cada uno de los fragmentos de la medición 4.

Tabla 7.6: Resultados de las estimaciones del ángulo  $\theta$  para los fragmentos de la medición 4.

	t <sub>ab</sub>	$d_{ab}$	θ
Fragmento uno	29 * 0.00002 s	40.03 cm	60.20°
Fragmento dos	23 * 0.00002 s	40.03 cm	66.79º
Fragmento tres	9 * 0.00002 s	40.03 cm	81.13°
Fragmento cuatro	-16 * 0.00002 s	40.03 cm	105.91°

### 7.3.2. Estimación de la intersección de la dirección estimada con la pista de aterrizaje.

Para estimar la ubicación de la fuente de ruido puntual equivalente, que representa al avión para determinado fragmento de señal, se calcula la intersección geográfica entre la orientación de la pista y la dirección obtenida anteriormente. A partir de los puntos geo-referenciados ubicados sobre la pista,  $rw_1$  y  $rw_2$ , se determina la ecuación de la recta que describe la inclinación de la misma y cuya pendiente se calcula de la forma siguiente:

$$m_{rw} = \frac{y_{rw_2} - y_{rw_1}}{x_{rw_2} - x_{rw_1}}$$
(7.2)

Como el ángulo  $\theta$  está definido con respecto al arreglo de micrófonos, se necesita conocer la orientación del arreglo para lograr determinar la orientación geográfica que representa dicho ángulo. Para ello, se definieron dos puntos geográficos (*C1* y *C2*), ubicados de tal manera que representen la orientación geográfica del arreglo. La ubicación de los puntos *C1* y *C2* se muestra en la Fig. 7.19 y las coordenadas geográficas de los mismos en la Tabla 7.7.

Punto	Latitud	Longitud
C1	19° 26' 41.91" N	99° 3' 45.03" O
C2	19° 26' 41.99" N	99° 3' 45.26" O

El cálculo de la orientación geográfica a partir de los puntos *C1* y *C2* es realizado con el conjunto de herramientas que provee GeoTools para el análisis de información geoespacial. Con ello se determina que el ángulo  $\alpha$ , definido en la Fig. 7.8, tiene un valor de 68.70°.



Fig. 7.19 Ubicación de los puntos C1 y C2.

A partir de los ángulos  $\theta$  y  $\alpha$  y utilizando la ubicación geográfica del punto de medición *ma*, definido en la Fig. 7.8, se determina la ecuación de la recta que representa la dirección estimada del avión, para el fragmento analizado. La pendiente de dicha recta queda definida a partir de la ecuación siguiente:

$$m_{ad} = tan(90 + \theta + \alpha) \tag{7.3}$$

A partir de las dos rectas obtenidas mediante las ecuaciones (7.2) y (7.3) se calcula el punto de intersección entre ellas, que corresponde a la localización geográfica del avión para el fragmento de señal analizado. La Tablas 7.8 y 7.9 muestran los

resultados de la estimación de la ubicación geográfica del avión, para los fragmentos de las mediciones 2 y 4 respectivamente.

	Áng	gulos	Ubicación del avión		
	α	θ	Latitud	Longitud	Distancia
Fragmento uno	68.70º	66.79º	19° 26' 26.12" N	99° 4' 1.52" O	637.66 m
Fragmento dos	68.70°	72.03º	19° 26' 29.13" N	99° 3' 56.18" O	509.10 m
Fragmento tres	68.70°	94.920	19° 26' 33.94" N	99° 3' 47.62" O	255.30 m

Tabla 7.8: Estimaciones de la ubicación del avión para cada fragmento de la medición 2.

Tabla 7.9: Estimaciones de la ubicación del	avión para cada fragmento de la medición 4
---	--

	Ángulos		Ubi	Ubicación del avión		
	α	θ	Latitud	Longitud	Distancia	
Fragmento uno	68.70º	60.20º	19° 26' 21.43" N	99° 4' 9.87" O	1161.22 m	
Fragmento dos	68.70º	66.79º	19° 26' 26.12" N	99° 4' 1.52" O	698.33 m	
Fragmento tres	68.70º	81.13º	19° 26' 31.86" N	99° 3' 51.32" O	362.56 m	
Fragmento cuatro	68.70°	105.910	19° 26' 34.93" N	99° 3' 45.83" O	217.67 m	

En el anexo C se muestran los resultados de las estimaciones de la localización de la fuente sonora puntual equivalente, para las mediciones 1, 5 y 8.

#### 7.4. Conclusiones.

Para cada fragmento de señal, definido en una de las mediciones analizadas (2 o 4), se obtuvo un valor diferente para el TDOA calculado mediante la correlación cruzada, lo cual significa que a partir de cada fragmento se obtiene una posición diferente de la fuente puntual equivalente que representa la aeronave.

La ubicación estimada de la fuente puntual equivalente que representa al avión, para cada fragmento de señal analizado, es una posición promedio relativa al tramo recorrido en el lapso de tiempo para el cual se define dicho fragmento.

La variación en la dirección y la distancia estimada de un fragmento a otro no es constante. Esto se debe, fundamentalmente, a las componentes horizontal y vertical de la trayectoria que describe el avión durante su despegue, lo cual es un comportamiento esperado.

Las variaciones obtenidas en la dirección y la distancia, entre el avión que despega durante la medición 2 y el que despega durante la medición 4, no son iguales a pesar de que son el mismo tipo de aeronave. Esto ocurre por la diferencia en el ángulo de ascenso que se observa en cada uno de los despegues.

Por lo expuesto anteriormente se cumplió el objetivo del capítulo.

# 8. GENERACIÓN DE LOS MAPAS DE RUIDO PARA EL CASO DE ESTUDIO.

En este capítulo se describe el procedimiento para la generación de los mapas de ruido, a partir de las mediciones y resultados obtenidos en el capítulo anterior. Se describe el algoritmo para la caracterización acústica de la fuente puntual equivalente, que representa al avión para cierto fragmento de señal. También se presenta la implementación del sistema de información geográfica y las pruebas para la comprobación del modelo computacional propuesto.

# 8.1. Caracterización acústica de la fuente de ruido localizada.

Dada la definición del caso de estudio y las características de los escenarios que tienen lugar, se establece que el avión durante su despegue es la fuente predominante, puesto que enmascara cualquier otro sonido. Por lo tanto, se puede considerar como la única fuente sonora en dichos escenarios. Aplicando el proceso que se describe en la norma ISO 9613, para estimar el nivel sonoro continuo equivalente (ver sección 2.1.2.2) en un determinado punto, se debe conocer:

- La ubicación de la fuente sonora que contribuye al ruido generado en el punto.
- Las características acústicas de la fuente sonora (Nivel de potencia sonora por banda de octava).

La Fig. 8.1 muestra el algoritmo seguido para la obtención de los mapas.



Fig. 8.1 Algoritmo para la obtención del mapa acústico para un fragmento de señal.

### 8.1.1. Calculo del nivel de potencia sonora por banda de octava.

Uno de los puntos principales en el proceso para la obtención de los mapas de ruido, además de la estimación de la ubicación de la fuente, es la caracterización acústica de la misma. El procedimiento para caracterizar la fuente de ruido que se implementa a continuación, se apoya en las características que define la ISO 9613 para las fuentes sonoras y en la particularidad de los escenarios analizados donde existe una fuente predominante.

Al igual que en el capítulo 7 se trabajó con los fragmentos definidos a partir de las mediciones 2 y 4 de la Tabla 7.2. El primer paso para determinar las características acústicas de la fuente sonora (avión), es obtener los espectros en bandas de octava de los fragmentos de señales obtenidos en los micrófonos del arreglo. Las Figs. 8.2 – 8.5 muestran los espectros en bandas de octava calculados para el fragmento uno de la medición 2. Asimismo, los valores de presión sonora por banda de octava obtenidos para todos fragmentos de la medición 2, se muestran en las Tablas 8.1 – 8.3.

Con el fin de obtener una mayor exactitud en las estimaciones, en vez de utilizar algún espectro en específico, se determina uno que represente la media de los anteriores. Para ello, se promedian cada una de las bandas equivalentes de todos los espectros. Sin embargo, antes de calcular la media, el valor de presión sonora de cada banda, que está en dBA (escala logarítmica), debe ser llevado a presión acústica (escala lineal). Una vez hallado el promedio con los valores de presión acústica entre las bandas correspondientes, se convierte el resultado a dBA. Los valores obtenidos al estimar dicho espectro se muestran en el último renglón de las Tablas 8.1 – 8.3.



Fig. 8.2 Espectro en bandas de octava del fragmento uno de la medición 2 correspondiente al micrófono 0.



Fig. 8.3 Espectro en bandas de octava del fragmento uno de la medición 2 correspondiente al micrófono 1.



Fig. 8.4 Espectro en bandas de octava del fragmento uno de la medición 2 correspondiente al micrófono 2.



Fig. 8.5 Espectro en bandas de octava del fragmento uno de la medición 2 correspondiente al micrófono 3.

		Frecuencia central de la banda de octava en Hz						
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Micrófono 0	60.3129	68.1686	69.7115	80.9721	80.9366	77.3203	61.2494	43.9447
Micrófono 1	55.4492	63.3983	65.5279	76.8727	78.0566	75.4621	60.0754	43.5225
Micrófono 2	51.5252	58.9816	59.2161	69.6035	70.5421	66.9142	50.8233	34.8041
Micrófono 3	53.887	61.8884	63.3745	74.5944	75.3725	72.7609	56.8826	42.531
MEDIA	55.9194	63.7676	65.2693	76.4396	77.0158	73.9089	58.0876	41.8737

Tabla 8.1: Nivel de presión sonora por banda de octava para el fragmento uno de la medición 2.

Tabla 8.2: Nivel de presión sonora por banda de octava para el fragmento dos de la medición 2.

		Frecuencia central de la banda de octava en Hz							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Micrófono 0	61.9191	66.5895	74.5596	82.9164	85.8599	83.736	72.627	50.3933	
Micrófono 1	57.3627	62.2907	69.7575	78.4906	82.5487	82.0089	72.4657	49.9137	
Micrófono 2	53.4976	58.0058	63.6854	71.7918	74.4271	73.1066	62.87	40.9202	
Micrófono 3	55.8827	60.8081	68.0268	76.8834	79.4742	78.9415	68.7655	48.4021	
MEDIA	57.7324	62.4926	69.8753	78.399	81.5329	80.2886	69.9760	48.1158	

Tabla 8.3: Nivel de presión sonora por banda de octava para el fragmento tres de la medición 2.

		Frecuencia central de la banda de octava en Hz							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Micrófono 0	61.6675	75.4782	83.8606	89.0718	89.5985	87.4917	81.6484	61.4612	
Micrófono 1	56.6151	70.8251	79.3049	84.848	86.4051	85.6886	81.0594	60.8167	
Micrófono 2	52.6777	66.1704	73.5232	77.7469	78.395	76.4915	71.6082	51.2543	
Micrófono 3	55.0509	69.0819	77.4698	82.8206	83.1164	81.8725	77.6944	58.2203	
MEDIA	57.1616	71.0649	79.3333	84.5377	85.3115	83.8099	78.8056	58.7450	

Rescribiendo la ecuación (3.X) se tiene:

$$L_w = L_{fT}(DW) - D_c + A \tag{8.1}$$

Donde:

 $D_c$ : es la corrección por directividad en decibeles. Como estamos considerando que la fuente a caracterizar es puntual omnidireccional,  $D_c = 0 \ dB$ .

*A*: Es la atenuación por banda de octava que ocurre durante la propagación de la fuente al receptor. Para el caso de estudio, se toman en cuenta solamente la divergencia geométrica y la absorción atmosférica, por lo tanto  $A = A_{div} + A_{atm}$ . Sin embargo, a futuro se pueden agregar los otros factores de atenuación que utilizan en la norma ISO 9613 sin afectar el procedimiento.

 $L_{fT}(DW)$ : Es el nivel de presión sonora continuo equivalente por banda de octava en la posición del receptor (punto de medición), el cual es obtenido de los espectros calculados y presentados en las Tablas 8.1 - 8.2.

Teniendo en cuenta que el avión durante su despegue es la fuente predominante en las mediciones obtenidas por el arreglo de micrófonos, se puede establecer que el nivel de potencia sonora por banda de octava  $(L_w)$ , para la fuente puntual a caracterizar, se calcula a partir de la ecuación (8.1). Los valores de la atenuación por divergencia geométrica y de absorción atmosférica son calculados utilizando la distancia estimada anteriormente entre el punto de medición y la ubicación del avión. De los coeficientes de absorción atmosférica mostrados en la Tabla 3.x, se seleccionaron los correspondientes a la temperatura de 20 °C y 70% de humedad relativa. Esta selección se basó en las condiciones obtenidas del reporte METAR (Reporte meteorológico de aeródromo) para el aeropuerto AICM, al momento de las mediciones.

En la Tabla 8.4 se muestra el nivel de potencia sonora por banda de octava del espectro estimado, correspondiente a la fuente puntual equivalente. Estos valores corresponden a los fragmentos de la medición 2.

		Frecuencia central de la banda de octava en Hz						
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Fragmento uno	123.07	131.04	133.06	145.31	147.29	146.73	139.77	157.80
Fragmento dos	122.91	127.77	135.56	144.95	149.21	150.00	146.76	152.24
Fragmento tres	116.32	130.28	138.75	144.39	145.72	145.24	143.79	137.43

 Tabla 8.4: Nivel de potencia sonora por banda de octava de la fuente puntual equivalente estimada en cada uno de los fragmentos de la medición 2.

El mismo análisis presentado anteriormente se realizó para la medición 4. Los valores calculados para los fragmentos dicha medición se muestran en las Tablas 8.5 – 8.9.

		Frecuencia central de la banda de octava en Hz							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Micrófono 0	63.2804	68.9288	73.9794	82.0775	83.2274	78.7666	62.2403	33.3551	
Micrófono 1	56.9291	64.0479	69.9354	77.9066	79.8406	77.0544	61.0922	32.2935	
Micrófono 2	53.3015	59.7461	63.5862	70.4463	71.2505	68.1964	51.429	24.7414	
Micrófono 3	55.5655	62.3556	67.4508	75.2109	76.1497	73.0791	56.7047	31.8147	
MEDIA	58.1259	64.4436	69.5482	77.3996	78.6873	75.1469	58.8036	31.1226	

Tabla 8.5: Nivel de presión sonora por banda de octava para el fragmento uno de la medición 4.

		Frecuencia central de la banda de octava en Hz							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Micrófono 0	64.6299	71.3282	77.3233	84.1465	83.8523	80.9341	70.1685	42.1079	
Micrófono 1	57.628	65.8102	72.6643	79.7071	80.4071	78.9456	69.9131	42.1468	
Micrófono 2	53.0004	60.1912	66.8506	72.5678	72.2154	69.9956	59.986	32.3044	
Micrófono 3	55.7641	62.7994	70.6023	77.4612	77.1837	75.1622	64.3137	37.6783	
MEDIA	58.9041	66.0633	72.6872	79.4400	79.4101	77.1714	67.0403	39.3995	

Tabla 8.6: Nivel de presión sonora por banda de octava para el fragmento dos de la medición 4.

Tabla 8.7: Nivel de potencia sonora por banda de octava para el fragmento tres de la medición 4.

		Frecuencia central de la banda de octava en Hz						
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Micrófono 0	63.3777	75.2596	83.8843	87.5359	86.9315	83.9357	74.9139	50.0554
Micrófono 1	58.7021	70.7023	79.2028	83.358	83.7361	82.1277	73.7576	49.5115
Micrófono 2	54.4044	66.1733	72.9872	76.0323	75.4089	73.1028	64.5917	40.1139
Micrófono 3	56.6517	69.1783	77.2562	81.1616	80.3858	78.6022	70.5189	46.995
MEDIA	58.9431	70.9647	79.2080	82.9683	82.5962	80.3284	71.7629	47.4421

Tabla 8.8: Nivel de potencia sonora por banda de octava para el fragmento cuatro de la medición 4.

		Frecuencia central de la banda de octava en Hz							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Micrófono 0	71.3407	81.6302	88.6705	91.3031	89.5729	86.4864	79.6346	57.4213	
Micrófono 1	66.8124	76.9482	84.0118	86.8269	86.0564	84.4103	78.343	56.9866	
Micrófono 2	63.1082	72.0763	77.8042	79.5602	77.7311	75.4188	68.9182	47.4665	
Micrófono 3	65.498	74.8418	81.3315	84.7439	83.046	80.881	75.2286	54.1662	
MEDIA	67.2293	77.0982	83.8664	86.5940	85.1163	82.7163	76.3964	54.7957	

 Tabla 8.9: Nivel de potencia sonora por banda de octava de la fuente puntual equivalente estimada en cada uno de los fragmentos de la medición 4.

		Frecuencia central de la banda de octava en Hz						
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Fragmento uno	130.53	137.08	143.12	152.94	156.78	157.89	157.69	192.36
Fragmento dos	126.85	134.15	141.33	149.27	150.78	151.33	150.91	160.77
Fragmento tres	121.16	133.25	141.79	146.16	146.59	145.77	142.25	137.39
Fragmento cuatro	125.00	134.91	141.85	144.95	143.95	142.42	139.13	129.22

#### 8.2. Generación de los mapas acústicos.

Una vez que se tiene la ubicación del avión y está caracterizada la fuente puntual equivalente, se puede generar el mapa de ruido correspondiente, para cada fragmento de señal, utilizando las ecuaciones de propagación del ruido descritas en la norma ISO 9613. Como el avión es la fuente predominante, se puede reescribir la ecuación 3.X como sigue:

$$L_T(DW) = 10 \log \left\{ \sum_{j=1}^8 10^{0.1 [L_{fT}(ij)]} \right\} dB A$$
(8.2)

Donde:

- *j*: es un índice indicando las 8 bandas de octava con frecuencias centrales desde 63Hz hasta 8kHz.
- $L_{fT}(ij)$ : es el nivel de presión sonora continuo equivalente generado por la fuente en la banda j.

A partir de la ecuación (8.2) se estima cual es el ruido que genera el avión, a 1000 m a la redonda del punto de medición. Las Figs. 8.6 – 8.8 muestran los mapas generados para los fragmentos de señal de la medición 2, mientras que las Figs. 8.9 – 8.12, los correspondientes a los fragmentos de señal de la medición 4. Estos mapas contienen la información siguiente:

- Capa vectorial geo-referenciada del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. En esta se muestran las pistas de aterrizaje, calles de rodajes y áreas de construcciones y estacionamientos.
- Capa vectorial geo-referenciada de las calles y áreas alrededor del aeropuerto involucradas en el caso de estudio.
- Ubicación geográfica del punto de medición. Está representada con un círculo.
- Ubicación geográfica relativa del avión, para el fragmento de señal analizado. Está representada con una X.
- Leyenda de colores con base al nivel sonoro continuo equivalente, expresado en dBA.
- Distribución geo-referencia del ruido en la zona de estudio.
- Foto extraída del video tomado durante la medición. En esta se muestra la ubicación aproximada del avión en el despegue, que corresponde al fragmento analizado.

Para obtener estas fotografías se comparó el audio de los videos grabados y la señal obtenida por uno de los sensores. Esto incluyó la aplicación de la correlación cruzada entre ambas señales para determinar el instante de tiempo donde son más similares. Con ello se obtiene una correspondencia en la línea de tiempo entre el video y los fragmentos de la señal.

Por otra parte, los mapas acústicos están generados teniendo en cuenta la información geográfica siguiente:

- Sistema de coordenadas proyectado: UTM Z14N
- Proyección: Transverse Mercator
- Sistema de coordenadas geográficos: WGS 1984
- Primer meridiano: Greenwich
- Escala aproximada: 1:10,000



Fig. 8.6 Mapa de ruido generado para el fragmento de señal uno de la medición 2.



Fig. 8.7 Mapa de ruido generado para el fragmento de señal dos de la medición 2.



Fig. 8.8 Mapa de ruido generado para el fragmento de señal tres de la medición 2.



Fig. 8.9 Mapa de ruido generado para el fragmento de señal uno de la medición 4.



Fig. 8.10 Mapa de ruido generado para el fragmento de señal dos de la medición 4.



Fig. 8.11 Mapa de ruido generado para el fragmento de señal tres de la medición 4.



Fig. 8.12 Mapa de ruido generado para el fragmento de señal cuatro de la medición 4.

En el anexo E se muestran los mapas generados para las mediciones 1, 5 y 8. Los mapas obtenidos en el resto de las mediciones muestran resultados similares.

#### 8.3. Implementación del sistema.

El sistema cuenta de tres módulos principales: módulo de adquisición, módulo de análisis de señal y el módulo de generación de mapas de ruido. La Fig. 8.13 muestra el esquema simplificado que integra los módulos en el modelo computacional propuesto.



Fig. 8.13 Esquema simplificado que integra los módulos en el modelo computacional propuesto

El modelo de adquisición, desarrollado en LabVIEW, está compuesto por el sistema de medición y el software creado para la obtención de las mediciones (ver capítulo 4). A partir de este módulo se obtienen cuatro señales en tiempo cuyos valores de amplitud están en mV. En el módulo de análisis de señal, desarrollado también en LabVIEW, se describe el procesamiento aplicado a las señales (ver sección 6.1.1 y 8.1.1). El módulo de generación de mapas de ruido, desarrollado en JAVA, describe el proceso para la obtención de los mapas de ruido. Estos últimos dos módulos intercambian información a través de un canal de comunicación implementado mediante sockets TCP/IP, con lo cual se logra integrar dos módulos elaborados en plataformas diferentes y crear un sistema con características distribuidas. Los datos que se envían entre módulos son los TDOA entre los pares de micrófonos analizados y el espectro en frecuencia por bandas de octava, obtenido de la señal de cada micrófono. Parte importante en el proceso de obtención de los mapas de ruido es la generación de una malla de puntos que represente la zona de estudio. Para cada punto de esta malla se estima el nivel sonoro continuo equivalente, mediante la implementación del método descrito en la norma ISO 9613. Asimismo, a partir del sistema de coordenadas descrito en la sección 8.2 y una escala de colores se geo-referencian los puntos de la malla y se obtiene la capa raster del ruido. El mapa de ruido generado es una combinación de cuatro capas de información:

- Capa raster del ruido.
- Capa vectorial de las calles.
- Capa vectorial de las áreas del aeropuerto.
- Capa vectorial de los puntos de ubicación (punto de medición y avión).

En el anexo F se muestran algunas pantallas del sistema y parte del código fuente del mismo.

#### 8.4. Pruebas de evaluación.

Las pruebas de evaluación se realizaron utilizando un método que consiste en la medición simultánea en cuatro puntos de comprobación y en el punto de medición. En los puntos de comprobación se utilizaron tres sonómetros (dos *Clase 1* y uno *Clase 2*) y un sistema de medición con un sensor de presión acústica *Clase 1*, una tarjeta de adquisición de datos y una computadora portátil (SMP).

Para el análisis de las mediciones se dividieron las señales en fragmentos de dos segundos. El comienzo del primer fragmento coincide con el inicio sincronizado de las mediciones. Los sonómetros miden el nivel sonoro continuo equivalente, durante los primeros dos segundos de la medición en un despegue; que corresponde al primer fragmento de la señal, lo cual facilita la sincronización. El *SMP* mide durante todo el *proceso de despegue*.

En cada una de las mediciones se comparó por fragmento, el nivel sonoro continuo equivalente obtenido en los puntos de comprobación, con los valores correspondientes a dichos puntos, en los mapas generados.

En la Fig. 8.14 se muestra la ubicación de los puntos de comprobación. Estos puntos se nombraron de la manera siguiente:

- Sonómetro UNO.
- Sonómetro DOS.
- Sonómetro TRES.
- Computadora portátil.



Fig. 8.14 Ubicación de los puntos de comprobación.

En la Tabla 8.10 se presenta las coordenadas geográficas de los puntos de comprobación y la distancia aproximada al punto de medición.

Punto	Latitud	Longitud	Distancia al punto de medición
Sonómetro UNO	19° 26' 46.39" N	99° 3' 47.78" O	160 m
Sonómetro DOS	19° 26' 44.62" N	99° 3' 45.13" O	85 m
Sonómetro TRES	19° 26' 45.16" N	99° 3' 43.47" O	110 m
Computadora portátil	19° 26' 43.44" N	99° 3' 40.92" O	130 m

Tabla 8.10: Coordenadas geográficas de los puntos de comprobación.

Durante las pruebas de comprobación se analizaron mediciones para diecinueve despegues, efectuados en el mismo día, los cuales se muestran en la Tabla 8.11.

Medición	Tipo de aeronave	Pista de despegue
1	Airbus A320	5R
2	Embraer ERJ-145LU	5R
3	Boeing 737	5L
4	Embraer ERJ-145LU	5L
5	Boeing 737	5R
6	Boeing 737	5R
7	Airbus A320	5L
8	Airbus A320	5R
9	Airbus A340	5R
10	Embraer ERJ-145LU	5R
11	Airbus A320	5L
12	Boeing 737	5R
13	Airbus A320	5L
14	McDonnell Douglas MD-80	5L
15	Boeing 737	5R
16	Boeing 737	5R
17	Embraer EMB-145LR	5L
18	Embraer ERJ-145LU	5R
19	Airbus A320	5R

Tabla 8.11: Relación de aeronaves que despegaron durante las pruebas de evaluación.

En las Tablas 8.12 – 8.14 se muestra la comparación realizada para las mediciones 7,10 y 11, mientras que en las Fig. E.8 – E.10 se muestran los mapas generados, respectivamente. Con el resto de las mediciones se obtuvo resultados similares.

Tabla 8.12: Comparación del Leq obtenido en cada punto de comprobación contra el obtenido en el mapa
generado, para cada fragmento de la medición 7 de la Tabla 8.11.

	Sonómetro UNO Valor mapa	Sonómetro DOS Valor mapa	Sonómetro TRES Valor mapa	Computadora portátil <b>Valor mapa</b>
Fragmento uno	79.20 <b>81.99</b>	78.90 <b>81.77</b>	78.30 <b>81.23</b>	76.30 <b>80.95</b>
Fragmento dos	-	-	-	78.90 <b>82.11</b>
Fragmento tres	-	-	-	82.30 <b>85.00</b>
Fragmento cuatro	-	-	-	85.80 <b>88.07</b>

	Sonómetro UNO Valor mapa	Sonómetro DOS <b>Valor mapa</b>	Sonómetro TRES Valor mapa	Computadora portátil <b>Valor mapa</b>
Fragmento uno	58.30 <b>61.99092</b>	58.80 62.509003	58.50 62.054802	58.90 62.3524
Fragmento dos	-	-	-	66.10 69.39098
Fragmento tres	-	-	-	66.60 <b>69.70669</b>
Fragmento cuatro	-	-	-	70.60 73.35892

Tabla 8.13: Comparación del Leq obtenido en cada punto de comprobación contra el obtenido en el mapagenerado, para cada fragmento de la medición 10 de la Tabla 8.11.

Tabla 8.14: Comparación del Leq obtenido en cada punto de comprobación contra el obtenido en el mapagenerado, para cada fragmento de la medición 11 de la Tabla 8.11.

	Sonómetro UNO Valor mapa	Sonómetro DOS Valor mapa	Sonómetro TRES Valor mapa	Computadora portátil <b>Valor mapa</b>
Fragmento uno	76.10	76.40	75.50	75.40
	79.90037	79.89045	79.164154	78.93182
Fragmento dos	-	-	-	79.40
				82.83772
Fragmento tres	-	-	-	83.60
				86.89404

En las pruebas de evaluación no se analizaron las mediciones en las cuales existieron ruidos inesperados, provenientes de otras fuentes, tanto en los puntos de comprobación como en el de medición. Por ejemplo, un automóvil o camión transitando, un perro ladrando o un comerciante pregonando, entre otras.

### 8.5. Conclusiones.

Las pruebas de evaluación realizadas, utilizando mediciones en tiempo real con un arreglo lineal de cuatro micrófonos en un punto y una dirección de referencia para los despegues, indican que el método desarrollado en este trabajo es válido para:

- Estimar la ubicación una fuente sonora puntual equivalente predominante (dirección y distancia).
- Caracterizar acústicamente la fuente sonora puntual equivalente localizada, con base en la ISO 9613.
- Generar mapas de ruidos correspondientes para intervalos de un despegue.

En los mapas generados para un despegue, se observa que a medida que el avión se acerca al punto de medición, aumenta el nivel sonoro continuo equivalente recibido en dicho punto y en las zonas urbanas cercanas al mismo, lo cual es un comportamiento esperado. A medida que el avión avanza durante el despegue, el nivel sonoro continuo equivalente en la superficie del suelo disminuye, lo cual se aprecia en la reducción del diámetro del círculo de mayor nivel sonoro (rojo) en los mapas generados. Esto se debe, al ascenso que describe el avión.

La diferencia en el ángulo de ascenso entre despegues y la variación del mismo durante esta etapa, generan distintos patrones en el ruido estimado al nivel del suelo, incluso para un mismo tipo de avión.

De las pruebas de evaluación podemos concluir que las estimaciones del ruido obtenidas en los mapas tienen errores menores a 6 dB.

Por lo expuesto anteriormente se cumplieron los objetivos 2 y 3, planteados para el caso de estudio en la sección 7.1.
## ANEXO A - CARACTERÍSTICAS DE LOS DISPOSITIVOS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.

	MDA 321	Sarial No.	libonte	
	WIFA251	Serial No.:	4000-15	
Ai	MP231	Serial No.: _	46192	
BSWA TECH	MA211	Serial No.:	466167 -	
MPA2	31 Sensitiv	vity: <u>46.3 1</u> - <u>28.8</u> dB re	mV/Pa a 1 V/Pa	
Signa	ture:	Date:	02:25:200	
	BSWA Teo	chnology Co., I	td.	
	E-mail: int	fo@bswa-tech.com	n	
1111				

Fig. A.1 Hoja de calibración del dispositivo MPA231 para el sensor 1.

A: Calil	bration Chart
Model: MP 231	Serial No: 46192
Open Circuit Sensitivity L	evel:
<u>-28.4 dB</u> ref 1 V/Pa	or <u>38.0</u> mV/Pa @ 250Hz
Signature: Jals	Date: 02/16/2009
Test Conditions:	
Polarization Voltage :	0 V
Relative Humidity:	30%
Temperature:	<u>20</u> °C
BSWA Technology Ltd.	www.bswa-tech.com

Fig. A.2 Hoja de calibración del dispositivo MP231 para el sensor 1.



Fig. A.3 Respuesta en frecuencia del micrófono MP231 para el sensor 1.

	MPA231	Serial No.: 140022
Ai	MP201	Serial No.: 46199
DSWA TECH	MA211	Serial No.: 465043
MPA	231 Sensitiv	$\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{2}$
Sign	ature: <u>fe</u>	<u>Date: 02.25:200</u>
	BSWA Te	chnology Co., Ltd.
	Web: www	v.bswa-tech.com.cn
	E-mail: in	fo@bswa-tech.com

Fig. A.4 Hoja de calibración del dispositivo MPA231 para el sensor 2.

A. Cali	bration Chart
BSWA TECH	
Model: MP 231	Serial No: 46199
Open Circuit Sensitivity	Level:
<u>-28.6</u> dB ref 1 V/Pa	or <u>37.2</u> mV/Pa @ 250Hz
Signature: Jore	Date: 02/16/2009
Test Conditions:	
Polarization Voltage :	0 V
Relative Humidity:	30%
Temperature:	<u>20</u> °C
BSWA Technology Ltd.	www.bswa-tech.com

Fig. A.5 Hoja de calibración del dispositivo MP231 para el sensor 2.



Fig. A.6 Respuesta en frecuencia del micrófono MP231 para el sensor 2.

	MPA231 Serial No.: 4600	st
BSWA TECH	MP201 Serial No.: <u>4696</u> MA211 Serial No.: <u>46506</u>	2
MPA23	1 Sensitivity: <u>Ub-2 mV/Pa</u> or -2b.7 dB re 1 V/Pa	•
Signat	ure: $4a/6$ Date: $62.23$	2009
	BSWA Technology Co., Ltd. Web: www.bswa-tech.com.cn	1

Fig. A.7 Hoja de calibración del dispositivo MPA231 para el sensor 3.

Cali	bration Chart
Model: MP 231	Serial No: 46196
Open Circuit Sensitivity	Level:
<u>-26.4</u> dB ref 1 V/Pa	or <u>47.9</u> mV/Pa @ 250Hz
Signature: Yould	Date: 02/16/2009
Test Conditions:	
Polarization Voltage :	0 V
Relative Humidity:	30%
Temperature:	<u>20</u> °C
BSWA Technology Ltd.	www.bswa-tech.com

Fig. A.8 Hoja de calibración del dispositivo MP231 para el sensor 3.



Fig. A.9 Respuesta en frecuencia del micrófono MP231 para el sensor 3.

Specifications The following specifications are typical for the range 0 to 60 °C unless otherwise noted.

#### Input Characteristics

Number of channels	4 analog input channels
ADC resolution	24 bits
Type of ADC	Delta-sigma
	(with analog prefiltering)
Data rate (fs)	
Minimum	2 kS/s
Maximum	50 kS/s
Master timebase (internal)	
Frequency	12.8 MHz
Accuracy	±100 ppm max
Input coupling	AC
AC cutoff frequency	
-3 dB	0.5 Hz typ
-0.1 dB	4.2 Hz max
AC voltage full-scale range	
Typical	5.4 V <sub>peak</sub>
Minimum	5 V <sub>peak</sub>
Maximum	5.8 Vpeak
Common-mode voltage	
(Al- to earth ground)	±2 V
IEPE excitation current	
Minimum	2.0 mA
Typical	2.2 mA
IEPE compliance voltage	19 V max
Overvoltage protection (with respect to	chassis ground)

IEPE excitation current Minimum 2.0 mA
Minimum 2.0 mA
Typical 2.2 mA
IEPE compliance voltage 19 V max
Overvoltage protection (with respect to chassis ground) For an IEPE sensor connected
to Al+ and Al ±30 V
For a low-impedance source connected
to Al+ and Al6 to 30 V
Input delay (in seconds)
Input delay (in seconds) ≤ 25 kS/s 12.8 / fs
Input delay (in seconds) ≤ 25 kS/s

		Passt	and	
6	Freq	Flatness (nk-to-nk max)	Freq	Phase
<25.15/+	0.45 . 6	0.05/8	0.45.6	-3.1º
>25 kS/s	0.42.6	0.05 dB	0.41.6	+1.39
720 K0/0	0.42 - 10	0.00 00	0.41 - 12	21.0
	Ste	opband	Oversample	Alias-Free
fs	Freq	Attenuation	Rate	Bandwidth
≤25 kS/s	0.58 · fs	95 dB	128 - fs	0.42 - fs
>25 kS/s	0.68 · fs	92 dB	64 · fs	0.32 · fs
Nonpaired c Common-mode Minimum Typical Spurious-free dynamic rang	channels e rejection rat e ge (SFDR)	-110 tio (CMRR) 	dB at 1 kHz B, <i>fin</i> ≤ 1 kHz B, <i>fin</i> ≤ 1 kHz dB ( <i>fin</i> = 1 kH	: : 17 -60 dB FS)
die channel no	oise and noise	e density		2, 00 02 10,
die channel no Idle Channel	oise and noise 50 k	e density S/s 25	k\$/s	2 kS/s
dle channel no Idle Channel Noise	Dise and noise 50 k 95 de	e density <b>S/s 25</b> BFS 98	k\$/s dB FS	2 kS/s 102 dB FS
dle channel no Idle Channel Noise Noise density	50 k 50 k 95 di 400 n	e density \$/s 25 B FS 98 //\Hz 400	<b>kS/s</b> dBFS nV/√Hz	2 kS/s 102 dB FS 900 nV/vHz
Ile Channel no Noise Noise density nput impedan Differential AI- (shield) Distortion Harmonic (T	50 k 50 k 35 di 400 nV CCE (AC) to chassis gri HD)	e density <b>S</b> /s 25 B FS 96 //\Hz 400 	k\$/s dBFS nV/√Hz ) kΩ 2	2 kS/s 102 dB FS 900 nV/vHz
Ide channel no Noise Noise density nput impedant Differential AI- (shield) Distortion Harmonic (T	50 k           50 k           95 dt           95 dt           400 m           cce           (AC)           to chassis gn           HD)           1 kd	e density S/s 25 BTS 98 //\Hz 400 ound	kS/s dB FS nV/\Hz ) kΩ 2 kHz o 70 °C	2 kS/s 102 dB FS 900 nV/vHz 10 kHz, -40 to 25 °C
Ile Channel no Ide Channel Noise Noise density nput impedant Differential AI- (shield) Distortion Harmonic (T -1 dB FS	50 k           50 k           95 dt           95 dt           400 m           cce           (AC)           to chassis gn           HD)           1 kd           -40 to           -90	e density S/s 25 BTS 98 //\Hz 400 ound	k\$/s dB FS dB	2 kS/s 102 dB FS 900 nV/vHz 10 kHz, -40 to 25 °C
Ide channel no Ide Channel Noise Noise density nput impedant Differential AI- (shield) Distortion Harmonic (T -1 dB FS -20 dB FS	So k     So k	e density S/s 25 B FS 96 //\Hz 400 	k\$/s dB FS dB FS NV/\Hz ) kΩ 2 kHz, 570 °C -80 dB 0 dB	2 kS/s 102 dB FS 900 nV/vHz 10 kHz, -40 to 25 °C -80 dB

-93 dB

Fig. A.10 Especificaciones de la tarjeta NI USB-9233.

1:1 amplitude ratio.

🔁 Lectura 4 sensores.vi			_ 🗆 🔀
File Edit Yiew Project Operate Tools Window Help			2
Array of Waveform	Calibracion 0 Calibracion 1 64.7477 229.4363 , Leq 0 Leq 1 0 J0 Exponencial 0 Exponencial 1 0 0 0 Peak 0 0 Peak 1 0 0	Calbracion 2 Galbracion 2 Galbracion 3 Galbracion 3 Calbracion 3 Galbracion 3 Ga	
	Running Leq 0 Running Leq 1 0 0	Running Leq 2 0 0	

Fig. A.11 Panel frontal del programa para la adquisición de las señales.

# ANEXO B - RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA DIRECCIONALIDAD DE LOS MICRÓFONOS.



Fig. B.1 Resultado de la interpolación IDW 15 con la fuente a 30 grados.



Fig. B.2 Resultado de la interpolación LP 25 con la fuente a 30 grados



Fig. B.3 Resultado de la interpolación con splines cúbicos con la fuente a 30 grados.



Fig. B.4 Resultado de la interpolación IDW 15 con la fuente a 60 grados.



Fig. B.5 Resultado de la interpolación LP 25 con la fuente a 60 grados.



Fig. B.6 Resultado de la interpolación con splines cúbicos con la fuente a 60 grados.



Fig. B.7 Fuentes utilizadas en los experimentos.

	Fuentes fm <sub>1</sub> , fm <sub>2</sub> y fm <sub>3</sub>	Leg	
	1 kHz		
Micrófono 0	76.67	75.96	
Micrófono 1	79.94	78.75	
Micrófono 2	75.92	74.38	
Micrófono 3	83.75	82.12	

Tabla B.1: Resultados de la Prueba 3 de la Tabla 5.4.

	Fuentes fm <sub>1</sub> , fm <sub>2</sub> y fm <sub>3</sub>	Leq	
	2 kHz		
Micrófono 0	76.32	76.32	
Micrófono 1	78.25	78.18	
Micrófono 2	73.78	73.44	
Micrófono 3	82.46	80.90	

## ANEXO C - RESULTADOS DE LA LOCALIZACIÓN DE LA FUENTE SONORA PUNTUAL EQUIVALENTE PARA LOS DESPEGUES DE LAS MEDICIONES 1, 5 Y 8.



Fig. C.1 Señal en tiempo y espectro en frecuencia obtenidos de la medición 1 de la Tabla 7.2.



Fig. C.2 Señal en tiempo y espectro en frecuencia obtenidos de la medición 5 de la Tabla 7.2.



Fig. C.3 Señal en tiempo y espectro en frecuencia obtenidos de la medición 8 de la Tabla 7.2.

	Ángulos		Ubicación del avión		
	α	θ	Latitud	Longitud	Distancia
Fragmento uno	68.70º	83.11º	19° 26' 15.27" N	99° 4' 0.19" O	930.40 m
Fragmento dos	68.70º	92.95°	19° 26' 19.30" N	99° 3' 53.05" O	733.58 m
Fragmento tres	68.70º	102.20º	19° 26' 21.86" N	99° 3' 48.52" O	625.62 m
Fragmento cuatro	68.70°	118.670	19° 26' 25.06" N	99° 3' 42.83" O	523.79 m
Fragmento cinco	68.70°	131.500	19° 26' 27.03" N	99° 3' 39.35" O	488.75 m

Tabla C.1: Estimaciones de la ubicación del avión para cada fragmento de la medición 1 de la Tabla 7.2.Los fragmentos se eligen a partir del segundo 4.

Tabla C.2: Estimaciones de la ubicación del avión para cada fragmento de la medición 5 de la Tabla 7.2.Los fragmentos se eligen a partir del segundo 6.

	Ángulos		Ubicación del avión		
	α	θ	Latitud	Longitud	Distancia
Fragmento uno	68.70º	97.55°	19° 26' 20.68" N	99° 3' 50.62" O	673.31 m
Fragmento dos	68.70º	107.28º	19° 26' 22.96" N	99° 3' 46.54" O	585.17 m
Fragmento tres	68.70º	128.93º	19° 26' 26.66" N	99° 3' 40.01" O	493.36 m
Fragmento cuatro	68.70°	143.10º	19° 26' 28.67" N	99° 3' 36.45" O	480.61 m

Tabla C.3: Estimaciones de la ubicación del avión para cada fragmento de la medición 8 de la Tabla 7.2.Los fragmentos se eligen a partir del segundo 6.

	Ángulos		Ubicación del avión		
	α	θ	Latitud	Longitud	Distancia
Fragmento uno	68.70º	92.29°	19° 26' 19.09" N	99° 3' 53.43" O	743.30 m
Fragmento dos	68.70º	106.94º	19° 26' 22.90" N	99° 3' 46.66" O	587.44 m
Fragmento tres	68.70º	130.20º	19° 26' 26.84" N	99° 3' 39.68" O	491.16 m
Fragmento cuatro	68.70°	144.770	19° 26' 28.90" N	99° 3' 36.03" O	481.21 m

## ANEXO D - FUNCIONES DE CORRELACIÓN CRUZADA, OBTENIDAS EN LA MEDICIÓN 2.



Fig. D.1 Función de correlación cruzada entre los micrófonos 0 y 1 para el fragmento uno.



Fig. D.2 Función de correlación cruzada entre los micrófonos 0 y 1 para el fragmento dos.



Fig. D.3 Función de correlación cruzada entre los micrófonos 0 y 1 para el fragmento tres.



Fig. D.4 Función de correlación cruzada entre los micrófonos 1 y 2 para el fragmento uno.



Fig. D.5 Función de correlación cruzada entre los micrófonos 1 y 2 para el fragmento dos.



Fig. D.6 Función de correlación cruzada entre los micrófonos 1 y 2 para el fragmento tres.



Fig. D.7 Función de correlación cruzada entre los micrófonos 2 y 3 para el fragmento uno.



Fig. D.8 Función de correlación cruzada entre los micrófonos 2 y 3 para el fragmento dos.



Fig. D.9 Función de correlación cruzada entre los micrófonos 2 y 3 para el fragmento tres.

## ANEXO E - OTROS MAPAS GENERADOS PARA DESPEGUES DE AVIONES.



Fig. E.1 Mapa de ruido generado para el fragmento de señal que inicia en el segundo 4 de la medición 1 de la Tabla 7.2.



Fig. E.2 Mapa de ruido generado para el fragmento de señal que inicia en el segundo 6 de la medición 1 de la Tabla 7.2.



Fig. E.3 Mapa de ruido generado para el fragmento de señal que inicia en el segundo 8 de la medición 1 de la Tabla 7.2.



Fig. E.4 Mapa de ruido generado para el fragmento de señal que inicia en el segundo 10 de la medición 1 de la Tabla 7.2.



Fig. E.5 Mapa de ruido generado para el fragmento de señal que inicia en el segundo 12 de la medición 1 de la Tabla 7.2.



Fig. E.6 Mapas de ruido generados para los fragmentos tomados a partir del segundo 6 de la medición 5 de la Tabla 7.2.



Fig. E.7 Mapas de ruido generados para los fragmentos tomados a partir del segundo 6 de la medición 8 de la Tabla 7.2.



Fig. E.8 Mapas de ruido generados para los fragmentos tomados a partir del segundo 0 de la medición 7 de la Tabla 8.11.



Fig. E.9 Mapas de ruido generados para los fragmentos tomados a partir del segundo 0 de la medición 10 de la Tabla 8.11.



Fig. E.10 Mapas de ruido generados para los fragmentos tomados a partir del segundo 0 de la medición 11 de la Tabla 8.11.

#### ANEXO F - PANTALLAS DEL SISTEMA Y CÓDIGO FUENTE.



Fig. F.1 Pantalla del programa para el análisis digital de señales.



Fig. F.2 Pantalla del programa para generar los mapas de ruido.

```
public class ModeloC {
  //Características de salida del mapa
  public static final float DISTANCIA ESTIMACION = 1000f;
  //20° y 70%
  private final float CAT 63HZ = 0.0001f;
  private final float CAT 125HZ = 0.0003f;
  private final float CAT 250HZ = 0.0011f;
  private final float CAT 500HZ = 0.0028f;
  private final float CAT_1000HZ = 0.0050f;
  private final float CAT_2000HZ = 0.0090f;
  private final float CAT 4000HZ = 0.0229f;
  private final float CAT 8000HZ = 0.0766f;
  //Velocidad del sonido en m/s
  private final float c = 343f;
  //Punto de medición
  private PuntoMedicion punto medicion;
  //Fuentes virtuales
  private ArrayList<Fuente> fuentes virtuales;
  //Malla estimada
  private float[][] valores;
  //Elementos relacionados con conversiones
  private AffineTransform pantalla real;
  private MathTransform utm longlat;
  private GeodeticCalculator calculador;
```

public ModeloC(ReferencedEnvelope envelope) {

#### try {

//Obtenemos la transformación de coordenadas de pantalla a coordenadas en el CRS del envelope pantalla real = RendererUtilities.worldToScreenTransform(envelope, new Rectangle(0, 0,

MapaC.ANCHO MAPA, MapaC.ANCHO MAPA)).createInverse();

//Obtenemos la transformación de coordenadas UTM a Longitud Latitud utm longlat =

CRS.getProjectedCRS(envelope.getCoordinateReferenceSystem()).getConversionFromBase().getMathTransf orm().inverse();

//Obtenemos un ellipsoide que nos permite calcular distancias entre dos puntos en Longitud Latitud

```
calculador = new GeodeticCalculator(CRS.getEllipsoid(envelope.getCoordinateReferenceSystem()));
} catch (Exception e) {
```

System.exit(0);

//Fuentes virtuales

fuentes virtuales = new ArrayList();

//Creamos el punto de medición

Microfono microfono\_cero = new Microfono("Micrófono 0");

Microfono microfono uno = new Microfono("Micrófono 1");

Microfono microfono dos = new Microfono("Micrófono 2");

Microfono microfono tres = new Microfono("Micrófono 3");

OrientacionArreglo orientacion = new OrientacionArreglo(new Point2D.Float(493438.7628121148f, 2150065.3246728787f), new Point2D.Float(493432.3570547098f, 2150067.859651902f),

envelope.getCoordinateReferenceSystem());//(C1,C2,CRS)

Arreglo2Lineal arreglo uno = new Arreglo2Lineal(microfono cero, microfono uno, 0.401f, orientacion);

Arreglo2Lineal arreglo dos = new Arreglo2Lineal(microfono uno, microfono dos, 0.402f, orientacion); Arreglo2Lineal arreglo tres = new Arreglo2Lineal(microfono dos, microfono tres, 0.398f, orientacion);

punto medicion = new PuntoMedicion(new Point2D.Float(493435.5599331877f, 2150066.5921621053f));//Real

punto\_medicion.agregar\_arreglo(arreglo\_uno); punto\_medicion.agregar\_arreglo(arreglo\_dos); punto\_medicion.agregar\_arreglo(arreglo\_tres);

//Calculamos el valor del punto a cierta distancia de las fuentes conocidas a través del método de la ISO9613

#### private float calcular iso(Point2D punto) { //Variables auxiliares float LW, A, AATM, ADIV, NPS; **float** distancia = 0; Banda banda; //Calculamos la distancia del punto en la malla al punto de medición Point2D punto longlat = null; Point2D PM longlat = null; try { //Convertimos el punto a coordenadas en el sistema de referencia del envelope pantalla real.transform(punto, punto); //Convertimos la ubicación del punto de estimación a Longitud Latitud punto longlat = ((GeneralDirectPosition) utm longlat.transform(new DirectPosition2D(punto), null)).toPoint2D(); //Convertimos la ubicación del punto de medición a Longitud Latitud PM longlat = ((GeneralDirectPosition) utm longlat.transform(new DirectPosition2D(punto medicion.get posicion()), null)).toPoint2D(); //Calculamos la distancia entre puntos calculador.setStartingGeographicPoint(PM longlat); calculador.setDestinationGeographicPoint(punto longlat); distancia = (float) calculador.getOrthodromicDistance(); } catch (Exception e) { return 0f: } //Calculamos el NPS con respecto a todas las fuentes que existen NPS = 0: if (distancia <= ModeloC.DISTANCIA ESTIMACION){ for (int i = 0; i < fuentes virtuales.size(); i++){ distancia = calcular dfp(fuentes virtuales.get(i), punto longlat, PM longlat);//Calculamos la distancia de la fuente al punto de estimación ADIV = calcular ADIV(distancia); //Banda 63 banda = fuentes virtuales.get(i).get espectro().getBanda 63(); AATM = calcular AATM(distancia, banda.get FC());A = ADIV + AATM: LW = banda.get NPS() - A;NPS += Math.pow(10f, LW / 10f); //Banda 125 banda = fuentes virtuales.get(i).get espectro().getBanda\_125(); AATM = calcular AATM(distancia, banda.get FC()); A = ADIV + AATM;LW = banda.get NPS() - A;NPS += Math.pow(10f, LW / 10f); //Banda 250 banda = fuentes virtuales.get(i).get espectro().getBanda 250(); AATM = calcular AATM(distancia, banda.get FC()); A = ADIV + AATM;LW = banda.get NPS() - A;NPS += Math.pow(10f, LW / 10f); //Banda 500

```
banda = fuentes virtuales.get(i).get espectro().getBanda 500();
       AATM = calcular_AATM(distancia, banda.get_FC());
       A = ADIV + AATM;
       LW = banda.get NPS() - A;
       NPS += Math.pow(10f, LW / 10f);
       //Banda 1000
       banda = fuentes virtuales.get(i).get espectro().getBanda 1000();
       AATM = calcular AATM(distancia, banda.get FC());
       A = ADIV + AATM;
       LW = banda.get NPS() - A;
       NPS += Math.pow(10f, LW / 10f);
       //Banda 2000
       banda = fuentes_virtuales.get(i).get_espectro().getBanda_2000();
       AATM = calcular AATM(distancia, banda.get_FC());
       A = ADIV + AATM;
       LW = banda.get NPS() - A;
       NPS += Math.pow(10f, LW / 10f);
       //Banda 4000
       banda = fuentes virtuales.get(i).get espectro().getBanda 4000();
       AATM = calcular AATM(distancia, banda.get FC());
       A = ADIV + AATM;
       LW = banda.get NPS() - A;
       NPS += Math.pow(10f, LW / 10f);
       //Banda 8000
       banda = fuentes virtuales.get(i).get espectro().getBanda 8000();
       AATM = calcular AATM(distancia, banda.get FC());
       A = ADIV + AATM;
       LW = banda.get NPS() - A;
       NPS += Math.pow(10f, LW / 10f);
  }else{
    NPS = Float.NaN;
  }
  return 10f * (float) Math.log10(NPS);
//Calcula la divergencia geométrica Adiv como establece la ISO9613 20\log(r/r_0) + 11 donde ro = 1m
private float calcular ADIV(float distancia) {
  if (distancia == 0f)
    return 0f;
  else
    return 20f * (float) Math.log10(distancia) + 10f * (float) Math.log10(4 * Math.PI);
//Calcula la absorción atmosférica de acuerdo a la distancia y al coeficiente de absorción atmosférica
private float calcular AATM(float distancia, float frecuencia) {
  if (frecuencia == 63f) {
    return distancia * CAT 63HZ;
  else if (frecuencia == 125f) 
    return distancia * CAT 125HZ;
  else if (frecuencia = 250f) 
    return distancia * CAT 250HZ;
  else if (frecuencia == 500f) 
    return distancia * CAT 500HZ;
  else if (frecuencia = 1000f) 
    return distancia * CAT_1000HZ;
  else if (frecuencia == 2000f)
```

}

}

```
return distancia * CAT 2000HZ;
    else if (frecuencia == 4000f) 
       return distancia * CAT 4000HZ;
     else if (frecuencia == 8000f) 
       return distancia * CAT 8000HZ;
     } else {
       return 0f;
  }
  //Calcula la distancia entre el punto y la fuente
  private float calcular dfp(Fuente fuente, Point2D punto longlat, Point2D PM longlat) {
    Point2D posicion fuente;
    calculador.setStartingGeographicPoint(PM longlat);
    calculador.setDirection(fuente.get_angulo(), fuente.get_distancia());
    posicion fuente = calculador.getDestinationGeographicPoint();
    calculador.setStartingGeographicPoint(posicion fuente);
    calculador.setDestinationGeographicPoint(punto longlat);
    return (float) Math.sqrt(Math.pow(calculador.getOrthodromicDistance(), 2) +
Math.pow(fuente.get altura(), 2));
  //Crea los valores del raster para mostrar
  public float[][] crear malla(int alto, int ancho) {
    valores = new float[ancho][alto];
    int i,j;
    for (i = 0; i < alto; i++)
       for (j = 0; j < ancho; j++)
         valores[i][j] = calcular iso(new Point2D.Float(j,i));
    return valores;
  //Locacliza la fuente
  public Point2D caracterizar fuente(boolean pista05L) {
    //Establecemos el valor de la diferencia en tiempo de arribo
    //Promedio entre todos los micrófonos
    float tdoa = 0:
    tdoa += punto medicion.get arreglo(0).get correlacion();
    tdoa += punto medicion.get arreglo(1).get correlacion();
    tdoa += punto medicion.get_arreglo(2).get_correlacion();
    tdoa = 3f;
    //Establecemos la distancia entre los micrófonos
    //Para este caso el promedio de todas las distancias
    float d mic = 0;
    d mic += punto medicion.get arreglo(0).get distancia();
    d mic += punto medicion.get arreglo(1).get distancia();
    d_mic += punto_medicion.get_arreglo(2).get_distancia();
    d mic \neq 3f:
    //Establecemos el espectro medido para caracterizar el de la fuente
    //Para este caso se saca el promedio entre c/u de las bandas correspondientes de los 4 mic
    EspectroOctava espectro medido = new EspectroOctava();
    EspectroOctava espectro cero = punto medicion.get arreglo(0).get primer mic().get espectro();
    EspectroOctava espectro uno = punto medicion.get arreglo(0).get segundo mic().get espectro();
    EspectroOctava espectro dos = punto medicion.get arreglo(1).get segundo mic().get espectro();
    EspectroOctava espectro tres = punto medicion.get arreglo(2).get segundo mic().get espectro();
     //Banda 63
    float valor_banda = 0f;
```

valor banda += Math.pow(10, espectro cero.getBanda 63().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor\_banda += Math.pow(10, espectro\_uno.getBanda\_63().get\_NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda += Math.pow(10, espectro dos.getBanda 63().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda  $\pm$  Math.pow(10, espectro tres.getBanda 63().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda = 4f; espectro medido.getBanda 63().set NPS((float) (20 \* Math.log10(valor banda / 0.000020f))); //Banda 125 valor banda = 0f; valor banda  $\pm$  Math.pow(10, espectro cero.getBanda 125().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda += Math.pow(10, espectro uno.getBanda 125().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda += Math.pow(10, espectro dos.getBanda 125().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda += Math.pow(10, espectro tres.getBanda 125().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda = 4f; espectro\_medido.getBanda\_125().set\_NPS((float) (20 \* Math.log10(valor\_banda / 0.000020f))); //Banda 250 valor banda = 0f; valor banda += Math.pow(10, espectro cero.getBanda 250().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda  $\pm$  Math.pow(10, espectro uno.getBanda 250().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda += Math.pow(10, espectro dos.getBanda 250().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda  $\pm$  Math.pow(10, espectro tres.getBanda 250().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda = 4f: espectro medido.getBanda 250().set NPS((float) (20 \* Math.log10(valor banda / 0.000020f))); //Banda 500 valor banda = 0f; valor banda += Math.pow(10, espectro cero.getBanda 500().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda  $\pm$  Math.pow(10, espectro uno.getBanda 500().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda += Math.pow(10, espectro dos.getBanda 500().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda += Math.pow(10, espectro tres.getBanda 500().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda = 4f: espectro\_medido.getBanda\_500().set\_NPS((float) (20 \* Math.log10(valor banda / 0.000020f))); //Banda 1000 valor banda = 0f: valor banda += Math.pow(10, espectro cero.getBanda 1000().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda += Math.pow(10, espectro uno.getBanda 1000().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor\_banda += Math.pow(10, espectro\_dos.getBanda\_1000().get\_NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda += Math.pow(10, espectro tres.getBanda 1000().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda = 4f;espectro medido.getBanda 1000().set NPS((float) (20 \* Math.log10(valor banda / 0.000020f))); //Banda 2000 valor banda = 0f; valor banda  $\pm$  Math.pow(10, espectro cero.getBanda 2000().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda += Math.pow(10, espectro uno.getBanda 2000().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor\_banda += Math.pow(10, espectro\_dos.getBanda\_2000().get\_NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda += Math.pow(10, espectro tres.getBanda 2000().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda = 4f; espectro\_medido.getBanda\_2000().set\_NPS((float) (20 \* Math.log10(valor\_banda / 0.000020f))); //Banda 4000 valor banda = 0f; valor banda  $\pm$  Math.pow(10, espectro cero.getBanda 4000().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda += Math.pow(10, espectro uno.getBanda 4000().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda += Math.pow(10, espectro dos.getBanda 4000().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda += Math.pow(10, espectro tres.getBanda 4000().get NPS()/20f) \* 0.000020f; valor banda = 4f; espectro\_medido.getBanda\_4000().set\_NPS((float) (20 \* Math.log10(valor\_banda / 0.000020f))); //Banda 8000 valor banda = 0f;
```
valor banda \pm Math.pow(10, espectro cero.getBanda 8000().get NPS()/20f) * 0.000020f;
    valor_banda += Math.pow(10, espectro_uno.getBanda_8000().get_NPS()/20f) * 0.000020f;
    valor banda += Math.pow(10, espectro dos.getBanda 8000().get NPS()/20f) * 0.000020f;
    valor banda \pm Math.pow(10, espectro tres.getBanda 8000().get NPS()/20f) * 0.000020f;
    valor banda = 4f;
    espectro medido.getBanda 8000().set NPS((float) (20 * Math.log10(valor banda / 0.000020f)));
    //Elementos relacionados con la pista
    Point2D punto rw1, punto rw2;
    if (pista05L){
       //Puntos en la pista 05L
       punto rw1 = new Point2D.Float(490592.316f, 2148181.316f);
       punto rw2 = new Point2D.Float(493940.701f, 2150161.804f);
     }else{
       //Puntos en la pista 05R
       punto rw1 = new Point2D.Float(490875.038f, 2147986.416f);
       punto rw2 = new Point2D.Float(494250.294f, 2149991.683f);
    float m rw = (float) ((punto rw2.getY() - punto rw1.getY()) / (punto rw2.getX() - punto rw1.getX()));
    float n rw = (float) (punto rw1.getY() - m rw * punto rw1.getX());
    //Elementos relacionados con le punto de medición
    Point2D punto c1 = punto medicion.get arreglo(0).get orientacion().get punto uno();
    Point2D punto_c2 = punto_medicion.get_arreglo(0).get_orientacion().get_punto_dos();
    float alfa = 0;
    try {
       punto c1 = ((GeneralDirectPosition) utm longlat.transform(new DirectPosition2D(punto c1)))
null)).toPoint2D();
       punto c2 = ((GeneralDirectPosition) utm longlat.transform(new DirectPosition2D(punto c2),
null)).toPoint2D():
       calculador.setStartingGeographicPoint(punto c1);
       calculador.setDestinationGeographicPoint(punto c2);
       alfa = 90f - (float) calculador.getAzimuth();
     } catch (Exception e) {
    float teta = (float) Math.toDegrees(Math.acos((c * tdoa)/d mic));
    float m d = (float) Math.tan(Math.toRadians(alfa + teta));
     float n d = (float) (punto medicion.get posicion().getY() - m d *
punto medicion.get posicion().getX());
    //Calculamos el punto de intersección
    float x = (n d - n rw)/(m rw - m d);
    float y = m d * x + n d;
    Point2D punto avion = new Point2D.Float(x,y);
    //Estimamos el espectro de la fuente
    float angulo fuente = 0f;
    float distancia fuente = 0f;
    try {
       calculador.setStartingGeographicPoint(((GeneralDirectPosition) utm longlat.transform(new
DirectPosition2D(punto medicion.get posicion()), null)).toPoint2D());
       calculador.setDestinationGeographicPoint(((GeneralDirectPosition) utm longlat.transform(new
DirectPosition2D(punto avion), null)).toPoint2D());
       angulo fuente = (float) calculador.getAzimuth();
       distancia fuente = (float) calculador.getOrthodromicDistance();
     } catch (Exception e) {
    espectro medido.calcular NPS();
```

```
EspectroOctava espectro_fuente = new EspectroOctava();
```

float A, AATM, ADIV; ADIV = calcular ADIV(distancia fuente); //System.out.println(ADIV); //Banda de 63 AATM = calcular AATM (distancia fuente, 63f);A = espectro medido.getBanda 63().get NPS() + ADIV + AATM;espectro fuente.setBanda 63(new Banda(63, A, Banda.OCTAVA)); //Banda de 125 AATM = calcular AATM (distancia fuente, 125f);A = espectro medido.getBanda 125().get NPS() + ADIV + AATM;espectro fuente.setBanda 125(new Banda(125, A, Banda.OCTAVA)); //Banda de 250 AATM = calcular AATM (distancia fuente, 250f); A = espectro medido.getBanda 250().get NPS() + ADIV + AATM;espectro fuente.setBanda 250(new Banda(250, A, Banda.OCTAVA)); //Banda de 500 AATM = calcular AATM (distancia fuente, 500f);A = espectro medido.getBanda 500().get NPS() + ADIV + AATM;espectro fuente.setBanda 500(new Banda(500, A, Banda.OCTAVA)); //Banda de 1000 AATM = calcular AATM (distancia fuente, 1000f); A = espectro medido.getBanda 1000().get NPS() + ADIV + AATM;espectro fuente.setBanda 1000(new Banda(1000, A, Banda.OCTAVA)); //Banda de 2000 AATM = calcular AATM (distancia fuente, 2000f); A = espectro medido.getBanda 2000().get NPS() + ADIV + AATM;espectro fuente.setBanda 2000(new Banda(2000, A, Banda.OCTAVA)); //Banda de 4000 AATM = calcular AATM (distancia fuente, 4000f);A = espectro medido.getBanda 4000().get NPS() + ADIV + AATM; espectro fuente.setBanda 4000(new Banda(4000, A, Banda.OCTAVA)); //Banda de 8000 AATM = calcular AATM (distancia fuente, 8000f); A = espectro medido.getBanda 8000().get NPS() + ADIV + AATM;espectro\_fuente.setBanda\_8000(new Banda(8000, A, Banda.OCTAVA)); //Agregamos la fuente estimada espectro fuente.calcular NPS(); fuentes virtuales.clear(): fuentes virtuales.add(new Fuente(distancia fuente, angulo fuente, espectro fuente)); return punto avion; //Devuelve el punto de medición public PuntoMedicion get pm(){ return punto medicion; 2 //Devuelve la coordenada con respecto a la pantalla en coordenadas del sistema de referencia usado public Point2D pantalla real(Point2D punto pantalla) return pantalla real.transform(punto pantalla, null); public float evaluar punto(Point2D punto longlat){ try { //Convertimos el punto en UTM punto longlat = ((GeneralDirectPosition) utm longlat.inverse().transform(new DirectPosition2D(punto longlat), null)).toPoint2D(); //Convertimos el punto de UTM a las coordenadas de la pantalla (de la matriz valores)

```
pantalla_real.inverseTransform(punto_longlat, punto_longlat);
return valores[Math.round((float) punto_longlat.getY())][Math.round((float) punto_longlat.getX())];
} catch (Exception ex) {
return 0;
}
}
```