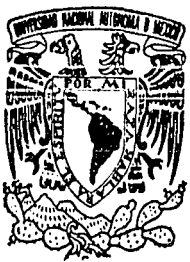


68
2º ej.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO



FACULTAD DE INGENIERIA

INSTRUMENTACION DE UN
METODO PARA MEDIR
POTENCIA SONORA EN UNA
CAMARA REVERBERANTE

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
AREA DE INGENIERIA ELECTRICA Y
ELECTRONICA

P R E S E N T A :
ARTURO GUTIERREZ REED

ASESOR: M. EN C. RICARDO RUIZ BOULLOSA



México, D. F.

1992

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

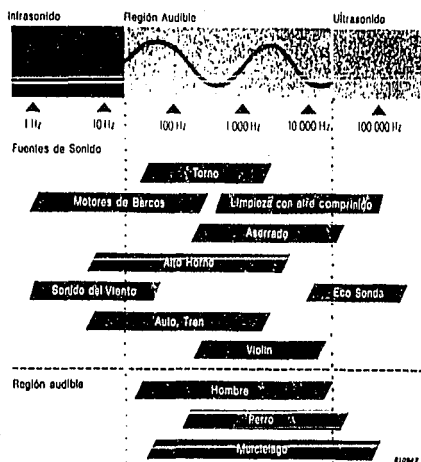
INDICE

INTRODUCCION	1
1 EXPLICACION BREVE DE ALGUNOS CONCEPTOS RELACIONADOS CON LA TESIS	4
1.1 Sonido	4
1.1.2 Ecuación de onda	5
1.2 Intensidad y potencia	7
1.2.1 ¿Presión o potencia?	10
1.3 Propagación con simetría esférica	12
1.3.1 Fuente simple	13
1.4 Campos sonoros	16
1.4.1 Campo libre	16
1.4.2 Campo cercano	16
A) Campo cercano geométrico	17
B) Campo cercano hidrodinámico	17
1.4.3 Campo lejano	17
1.4.4 Campo sonoro directo	20
1.4.5 Campo reverberante	20
1.4.6 Campo difuso	20
1.5 Algunos fenómenos de transmisión	21
1.5.1 Absorción	21
1.5.2 Transmisión	23
1.5.3 Reflexión	23
1.6 Reflejos	23
1.6.1 Reverberación	25
1.7 Algunas características de recintos reverberantes	25
1.7.1 Tiempo de reverberación	26
a) Fórmula de Sabine	26
b) Fórmula de Norris y Eyring	27
c) Fórmula de Knudsen	27
1.7.2 Recintos rectangulares	28
a) Modos axiales	29
b) Modos tangenciales	30
c) Modos oblicuos	30

1.7.3 Breve descripción de la evolución de un sonido prolongado y estable dentro de un recinto	33
1.8 Conclusión	39
1.9 Referencias	40
2 ALGUNOS DATOS Y CARACTERISTICAS DE LA CAMARA REVERBERANTE DEL LABORATORIO DE ACUSTICA-CI (SU CONCORDANCIA CON LAS NORMAS)	42
2.1 Descripción general	42
2.2 Algunas cifras	43
2.3 Placas difusoras	47
2.4 Diseño de la cámara	52
2.4.1 Volumen y forma	52
2.4.2 Tiempo de reverberación	56
2.4.3 Absorción	56
2.4.4 Ruido de fondo	67
2.4.5 Temperatura y humedad	67
2.5 Conclusión	68
2.6 Referencias	69
3 METODOS DE PRECISION PARA DETERMINAR NIVELES DE POTENCIA SONORA DE UNA FUENTE DE RUIDO EN UNA CAMARA REVERBERANTE, CONFORME A NORMAS	70
3.1 Normas para determinar niveles de potencia sonora de una fuente de ruido en una cámara reverberante	70
3.2 ANSI S1.31-1980	74
3.2.1 Niveles promedio de presión sonora	75
3.2.2 Método directo o absoluto	78
3.2.3 Método de comparación	78
3.2.4 Información	78
3.2.5 Procedimientos opcionales	80
3.2.6 Ponderación A	83
3.3 ANSI S1.32-1980	83
3.3.1 Procedimiento alternativo	85
3.4 Una aclaración sobre las normas que se usaron	87
3.5 Conclusión	88
3.6 Referencias	89

4	DISPOSITIVOS E INSTRUMENTOS PARA LAS MEDICIONES	91
4.1	Instrumentos de medición	91
4.1.1	Micrófono	91
4.1.2	Preamplificador	95
4.1.2.1	Cables de extensión	99
4.1.3	Multiplexor de canales	99
4.1.4	Filtro pasa-bandas	101
4.1.5	Amplificador de medición	105
4.2	Accesorios y equipo acústico	108
4.2.1	Calibrador acústico	109
A)	Calibrador de nivel sonoro	109
B)	Fonopistón	110
4.2.2	Fuente de referencia	112
4.2.3	Higrotermógrafo	114
4.2.4	Barómetro diferencial	116
4.2.5	Para calcular tiempos de reverberación.	117
4.3	La computadora y el programa de control	118
4.3.1	Computadora	118
4.3.2	El programa de control	118
4.4	Conclusión	128
4.5	Referencias	129
5	PROCEDIMIENTOS PARA PODER DETERMINAR NIVELES DE POTENCIA SONORA DE UNA FUENTE DE RUIDO EN LA CAMARA REVERVERANTE DEL CI-UNAM	130
5.1	Introducción	130
5.2	Instrumentos y accesorios indispensables	131
5.2.1	Interconexiones	132
5.3	Características de la fuente de prueba	136
5.4	Micrófonos	139
5.4.1	Ubicación de micrófonos	140
	-Distancia entre un micrófono y una fuente de ruido	140
	-Distancia entre un micrófono y cualquier superficie reflejante	143
	-Distancia entre micrófonos	144
5.4.2	Instalación de micrófonos	144
5.4.3	Aclaración	149

5.5 Antes de encender los aparatos	151
5.5.1 Amplificador de medición Tipo B&K-2636	151
5.5.2 Filtro pasa-banda Tipo B&K-1617	152
5.5.3 Multiplexor de 8 canales Tipo B&K-2811	152
5.5.4 Encendido y apagado de los instrumentos	152
5.6 Calibración	152
5.7 Programa SCIMPSEPS	155
5.8 Método directo	157
5.9 Método de comparación	161
5.10 Comentarios	165
5.11 Referencias	167
6 EJEMPLOS DE MEDICION	168
6.1 Algunas características de la fuente	168
6.2 Método directo	170
6.3 Método de comparación	176
6.4 Comentarios sobre los ejemplos	182
6.5 Archivos de datos	185
6.6 Referencias	192
7 COMENTARIOS FINALES Y RECOMENDACIONES	193
APENDICE 1	195
APENDICE 2	200
APENDICE 3	207
APENDICE 4	208
ANEXO (resumen sobre un artículo)	218



Límites aproximados para los rangos audibles de diferentes mamíferos y rangos de frecuencias de diferentes fuentes de sonido. [5]

INTRODUCCION

Muchas de las máquinas y aparatos domésticos, así como la maquinaria industrial, producen ruido que, además de ser molesto, puede dañar el sistema auditivo de las personas.

En las fábricas, representa un grave riesgo, para el obrero, estar expuesto durante horas a ruido intenso en su área de trabajo; es por eso que los patrones tienen la obligación de proteger a sus trabajadores ya sea proporcionándoles filtros acústicos o disminuyendo el ruido que producen las máquinas. En cuanto a los aparatos domésticos, los fabricantes se preocupan cada vez más por lanzar al mercado máquinas y aparatos menos ruidosos; por ejemplo, es notable lo silencioso que son las motocicletas o las lavadoras actualmente. El anhelo de un entorno menos ruidoso surge del interés de la sociedad contemporánea por combatir la contaminación ambiental.

Las protestas populares por el deterioro del equilibrio ecológico han puesto al industrialismo en crisis: por un lado, es estimulado con el crecimiento de las sociedades de consumo y con los avances científicos y tecnológicos acelerados; por otro lado, las mismas sociedades tratan de frenarlo intentando, con esto, revertir el proceso de degradación del medio ambiente. La misma sociedad que busca la comodidad que brindan muchos productos de la industria moderna, rechaza la depredación -en muchos casos necesaria- que la industria hace de los recursos naturales.

Gracias a la lucha de grupos ecologistas de los países más industrializados, algunos gobiernos han obligado a las industrias a cumplir reglamentos de protección para el ambiente. Muchos de esos reglamentos están orientados a la reducción de la contaminación por ruido. Pero, para que puedan ser aplicados, deben sustentarse con criterios claros y objetivos. Por lo tanto, desde hace poco más de treinta años, se han estado elaborando normas de alcance nacional e internacional para cuantificar el ruido. Claro está que estas normas se han ido modificando de acuerdo a los avances científicos y tecnológicos más recientes en Acústica y Electrónica.

Una manera de cuantificar objetivamente el ruido que produce una máquina o un aparato, es "midiendo¹ la potencia sonora" que radía. Actualmente existen varias normas para medir potencia sonora y se clasifican de acuerdo al ambiente donde se hacen las mediciones; la elección de una norma, en este caso, depende, generalmente, del tamaño o de las características de la fuente y de las facilidades para transportarla. Las normas también pueden clasificarse de acuerdo a los distintos tipos de ruido que es posible medir (banda ancha, impulsos, tonos, etc.). Inclusive las hay muy especializadas, dedicadas a un sólo tipo de fuente como, por ejemplo: turbinas, vehículos automotores con motor diesel, etc.

Acerca de los ambientes de prueba, estos pueden ser de tres tipos distintos para medir diferentes tipos de fuente. Si la fuente es pequeña y portátil, entonces puede ser llevada a un laboratorio especializado y allí ser medida en un ambiente controlado, ya sea dentro de una cámara reverberante o dentro de una cámara anecoica. Cuando la fuente de ruido es muy voluminosa, muy pesada o no puede ser movida del lugar donde opera, entonces las mediciones deberán hacerse *in situ*.

La tesis se desarrolló en base a las normas internacionales ISO-3741, "Acoustics. Determination of sound power levels of noise sources. Precision methods for broad-band sources in reverberation rooms", e ISO-3742, "Acoustics. Determination of sound power levels of noise sources. Precision methods for discrete-frequency and narrow-band sources in reverberation rooms". Pero además, como las normas estadounidenses ANSI S1.31, "Precision methods for the determination of sound power levels of broad-band sources in reverberation rooms" y ANSI S1.32, "Precision methods for the determination of sound power levels of discrete-frequency and narrow-band noise sources in reverberation rooms", son muy similares a las normas internacionales que se acaban de mencionar, no fue

¹ Si se le llama medir a "...una serie de actividades y procedimientos que se llevan a cabo con el objeto de cuantificar alguna propiedad física o de evaluar alguna variable de un fenómeno." (p. 5 en la ref. [2] del cap. 6), entonces es correcta la expresión.

difícil lograr que la instrumentación de los métodos de medición fuese válida para las cuatro normas.

Para mencionar la causa que motivó la realización de esta tesis conviene hacer, antes, un poco de historia. A finales de 1987 se inauguró un nuevo Laboratorio de Acústica en el Centro de Instrumentos de la UNAM (CI-UNAM), sin estar ninguna de sus cámaras (reverberante, anecoica y de transmisión) totalmente terminada. A principios de 1989, la cámara reverberante era la única que estaba casi terminada y ya podía ser usada para realizar algunos trabajos en los que no se exigía un buen acondicionamiento del recinto. A mediados de 1990, aprovechando que la cámara reverberante estaba lista para dar servicio, se solicitó respaldo económico a la Dirección General de Apoyo al Personal Académico (DGAPA) de la UNAM, para realizar un proyecto en el que participarían investigadores, técnicos y pasantes de licenciatura, haciendo trabajos de investigación así como trabajos de infraestructura relacionados con la cámara reverberante. El proyecto se llamó "Caracterización de las Cámaras Acústicas del Centro de Instrumentos /IN-102589". Uno de los trabajos de infraestructura que formaron parte del proyecto y del cual nació esta tesis, consistió en instrumentar un método para medir, de acuerdo a normas internacionales, los niveles de potencia sonora de una fuente de ruido dentro de la cámara reverberante.

Los datos de potencia sonora de una fuente de ruido, pueden ser utilizados para clasificar la fuente, para llevar a cabo medidas de control de ruido, para predecir los niveles de presión que produciría la fuente en distintos ambientes o para determinar si la fuente cumple con un límite superior especificado de ruido.

Como se puede inferir, este trabajo está destinado a formar parte de los servicios que presta el Centro de Instrumentos a la comunidad universitaria y al público en general. Así mismo, puede encontrar aplicación como una herramienta para futuras investigaciones en el Laboratorio de Acústica.

I EXPLICACION BREVE DE ALGUNOS CONCEPTOS RELACIONADOS CON LA TESIS

Este capítulo tratará sobre algunos conceptos básicos para comprender la terminología usada en la tesis. Está dirigido a quienes no estén familiarizados con el estudio de la Acústica y se vean en la necesidad de hacer mediciones de potencia sonora. No se pretende hacer una explicación exhaustiva de cada término, sino que el lector tenga noción de lo que va a medir. Si el lector quisiera ahondar en el tema, se le sugiere buscar en los primeros libros que se mencionan como referencia para este trabajo.

1.1 Sonido.

Las perturbaciones que producen sonido son aquellas que provocan la vibración de las partículas que conforman la sustancia o medio. Cuando esta vibración se da en fluidos poco viscosos como aire o agua es más adecuado hablar de cambios de presión en el medio. En forma concisa, se puede decir que el cambio de presión en medios compresibles debido al paso de ondas sonoras se produce por el movimiento oscilatorio de las partículas en la dirección de propagación. Otra característica importante, que se desprende de las ya mencionadas, es que no existe sonido en el vacío, pues las ondas sonoras son de tipo mecánico. La fuerza que tiende a restaurar el estado inicial del medio es capaz de propagar la onda.

Con las afirmaciones del párrafo anterior es posible hacer una definición de lo que es el sonido. El sonido es una perturbación mecánica que se propaga en un medio elástico produciendo la vibración de las partículas que encuentra a su paso.

Muchos autores hacen énfasis en llamar sonido a las vibraciones del tipo ya mencionado si se dan en el rango de frecuencias audibles para el ser humano sano; se considera un rango de entre 16 ó 20 [Hz] hasta 20 [KHz] dada la vasta información en cuanto a estudios de audiometría que se han realizado. Por arriba de este rango se le conoce como ultrasonido, y hacia abajo se estudia como infrasonido. De hecho esta consideración es la más generalizada en la mayoría de las definiciones.

Al sonido, a veces, se le denomina ruido. El ruido no es más que sonido indeseado. Por ejemplo, Fulano está analizando ruido blanco; Zutano, dentro del mismo laboratorio, prende un radio-receptor para escuchar música. En este caso, el ruido es una señal sonora que interfiere a otra evitando una recepción clara (para Fulano, la música es ruido). Desde el punto de vista psicoacústico, el ruido es una señal sonora que provoca malestar o incluso dolor en el escucha. Otra consideración menos subjetiva, es que en el espectro de una señal de ruido no se pueden reconocer componentes armónicas¹. No es raro encontrar que en muchos textos relativos a Acústica se usen indistintamente ambos términos.

Las ondas sonoras en un fluido compresible se propagan longitudinalmente; es decir, la propagación de la onda y el desplazamiento de la partícula, tienen la misma dirección. O dicho de otro modo, el desplazamiento de cada partícula del medio es normal al frente de onda. Las ondas sonoras en fluidos compresibles se comportan como ondas longitudinales. Entiendase por partícula a un volumen de moléculas de la misma naturaleza, lo suficientemente grande como para ser considerado un medio continuo u homogéneo y a la vez, tan pequeño que todas las variables acústicas puedan mantenerse con variaciones insignificantes dentro del volumen.

El sonido, como todos los fenómenos ondulatorios, tiene características mensurables y varias propiedades asociadas a estas. El sonido, entonces, tiene amplitud, longitud de onda, frecuencia, período y velocidad de propagación.

1.2.1 Ecuación de onda.

La velocidad de la partícula y la presión sonora son dos parámetros que dependen de la amplitud, la fase y la frecuencia de la onda. Siendo así, a través de sus expresiones y valores, es

¹En la referencia [13] se define el ruido como "un sonido aleatorio compuesto de muchas frecuencias diferentes no relacionadas armónicamente. Si el ruido tiene una intensidad demasiado elevada, impedirá la inteligibilidad de la palabra y de la música, reduciendo el placer de la escucha".

posible saber las características de la onda sonora. Ambos pueden ser usados para expresar la ecuación de onda, pues varían temporal y espacialmente. Es lógico pensar que las ecuaciones para calcular la energía, la intensidad o la potencia sonoras los involucre. Otro parámetro que podría describir a la onda sonora es la densidad de la partícula; sin embargo no se conoce hasta ahora ningún sensor capaz de detectarlo. También se utiliza una función escalar conocida como potencial de velocidad, que no es más que un artificio matemático para expresar escalarmente la velocidad de la partícula en un punto del campo de flujo. Esta función es útil en algunos desarrollos teóricos.

La medición de la velocidad de la partícula es algo complicada y requiere de técnicas especiales. Es tan reciente su desarrollo que, por ejemplo, no existen normas que estandaricen los métodos de medición de intensidad sonora por medio de este parámetro.

Otra manera de conocer las características del sonido es midiendo la presión sonora. Muchos micrófonos funcionan como transductores de presión sonora. Esto facilita las mediciones y permite el uso de aparatos de medición electrónicos de alta resolución que despliegan resultados con muy bajo porcentaje de error. Muchos métodos de medición de ruido en ambientes diversos y para distintos propósitos, están normalizados, y en todos ellos se utiliza el dato de presión sonora para llegar a los resultados requeridos. La presión sonora es una cantidad escalar, por lo tanto la información que se obtenga será de este tipo.

Lo más común es encontrar la ecuación de onda en base a la presión sonora,

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1.1)$$

donde ∇^2 es el operador laplaciano, $\nabla \cdot (\nabla f)$, c es la velocidad de propagación o de fase. La velocidad de fase es la distancia que recorre, por unidad de tiempo, un frente de onda. La ecuación está expresada en tres dimensiones ($\nabla^2 p = (\partial^2 p / \partial x^2) + (\partial^2 p / \partial y^2) + (\partial^2 p / \partial z^2)$), si la onda se propagara en un plano normal a cualquiera de los ejes coordenados o en una sola dirección sobre alguno de los ejes,

bastaría con expresarla con dos o uno de los sumandos del laplaciano según sea el caso. Quien desee saber como se llega a esta expresión se le recomienda consultar las referencias [1][10][14].

La ecuación (1.1) está expresada en coordenadas cartesianas. Puede expresarse en coordenadas esféricas, elípticas o cilíndricas, según convenga, para facilitar el análisis dependiendo de la forma de propagación. La referencia [9] presenta una lista de ecuaciones de onda junto a sus respectivas soluciones en casi todos los sistemas coordinados hasta ahora conocidos, tanto para ondas progresivas como estacionarias.

Las soluciones de la ecuación (1.1) son funciones que definen movimientos ondulatorios progresivos o estacionarios. Una onda progresiva es la que transfiere energía en la misma dirección en la que viaja. Una onda estacionaria es una onda que se forma debido a la interferencia de dos o más ondas progresivas produciéndose formas de onda que, en apariencia, no se desplazan (no viajan).

La mayoría de los libros de texto explican estas ondas a partir de su formación en un tubo rígido. Ni el comportamiento del sonido ni la medición de parámetros acústicos dentro de un tubo son tema de la tesis; sólo se dirá que la manera más común en la que se forma una onda estacionaria es por la interferencia de una onda progresiva con su reflejo. Esto, por supuesto, ocurre en lugares confinados, como un tubo de impedancias o una región cercana a una pared rígida. También puede lograrse haciendo interferir dos ondas provenientes de distintas fuentes.

En un campo producido por una onda estacionaria se reconocen regiones donde los cambios de presión acústica son máximos (antinodos) y regiones que permanecen en equilibrio (nodos); lo mismo sucede con el campo de velocidad, hay regiones en que esta es mayor que en otras [2][8].

1.2 Intensidad y potencia.

Ya se mencionó que los fenómenos que se propagan ondularmente

no acarrear materia, solamente energizan el medio en el que se propagan, ya sea realizando trabajo sobre las partículas en una pequeña región del medio o radiando energía térmica indicadora de que el medio disipa energía. La energía sonora, entonces, viaja con la onda sonora o rayo sonoro a la velocidad del sonido (en la referencia [11] se hace una comprobación matemática al respecto).

La intensidad acústica es la rapidez con que la energía cruza un área de un metro cuadrado, normal a la dirección de propagación. Sus unidades en el sistema internacional son $[W/m^2]$. Al desglosar las unidades de intensidad puede llegarse a lo siguiente: $[W/m^2] \equiv [N \cdot m/s \cdot m^2]$, para decir también que la intensidad es la rapidez con la que un elemento de fluido hace trabajo por unidad de área sobre otro elemento adyacente. Se tiene el producto de la presión y la velocidad de partícula, pu , que promediado en el tiempo da la intensidad para cualquier onda sonora en un punto del campo sonoro,

$$I = \langle pu \rangle_t = \frac{1}{T} \int_0^T pu \, dt \quad (1.2)$$

donde pu son los valores instantáneos. Para evaluar la integral es necesario conocer las ecuaciones para p y u de la onda de interés.

Por un momento, suponga el lector que en el campo sonoro se tiene ondas esféricas (ecuación 1.6). Si se mide la intensidad a una distancia r de la fuente y después a una distancia mayor a r se encontrará que ha disminuido; esto se debe a que las ondas que se propagan son divergentes y por lo tanto la misma energía radiada por la fuente se distribuirá en áreas cada vez mayores conforme la perturbación se aleje de su origen (fig. 1.1). Esto no ocurre con las ondas planas, pues en ellas se mantiene siempre la misma área superficial durante la propagación. La intensidad en una onda plana es

$$I = \frac{1}{2} \cdot PU = \frac{1}{2} \cdot P^2 / (\rho c) \quad , \quad (1.3)$$

el signo de la ecuación depende del sentido de propagación, y las letras mayúsculas indican valores pico.

El otro concepto importante que se infiere del de energía sonora es el de potencia sonora. La potencia sonora no es más que la

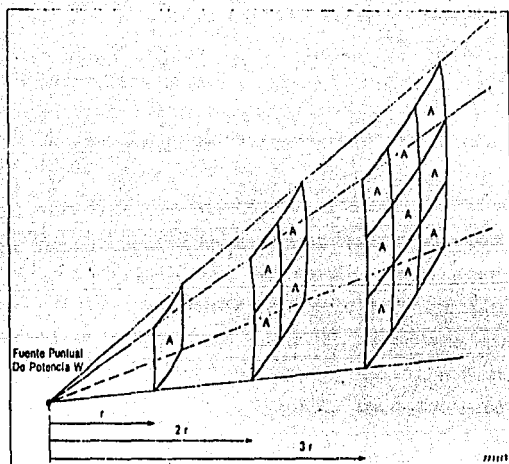


Fig. 1.1. Dispersión del sonido de una fuente puntual. [5]

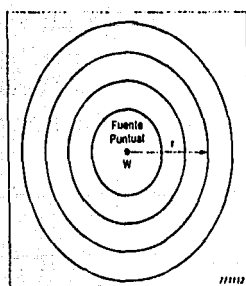


Fig. 1.2. Propagación de frentes de onda esféricas generados por una fuente puntual. [5]

cantidad de energía radiada por una fuente, por unidad de tiempo. Se expresa generalmente en Watts.

La potencia sonora, en general, puede ser expresada como

$$W = \int_A I \, dA \quad , \quad (1.4)$$

donde A es una superficie que rodea a la fuente. Lo más usual es suponer una superficie esférica; pueden elegirse otras superficies que se adecuen mejor a las circunstancias del caso en particular. Las áreas esféricas son adecuadas para fuentes que radian con la misma intensidad en todas direcciones (v. gr. una esfera pulsante o una fuente puntual). Pero cuando la fuente radia más en una dirección que en otra, esta suposición ya no es tan acertada. Habrá que introducir un factor de directividad que tome en cuenta la propensión de la intensidad a una dirección [1]. Para el caso que ocupa a esta tesis, el factor de directividad no es importante, pues al estar una fuente sonora en un campo difuso la información sobre directividad resulta imposible de obtener. Lo referente a campos será tratado en la sección 1.4 de este capítulo.

1.2.1 ¿Presión o Potencia?

Se preguntará el lector por qué no dar como resultado de la medición la presión sonora en vez de la potencia sonora, siendo que la primera puede medirse directamente.

La respuesta es muy fácil. La presión sonora es un indicador virtual de la magnitud del ruido que produce una fuente. La presión sonora o nivel de presión sonora que se mida, dependerá de la distancia entre el observador y la fuente; del ambiente acústico, y de la posición de los transductores al momento de hacer las mediciones. Por el contrario, la potencia sonora es una cantidad intrínseca de la fuente. La fuente transmitirá siempre con la misma potencia en cualquier ambiente en el que se encuentre; lo que cambiará de un ambiente al otro será la presión sonora, pues el ambiente representa una impedancia de carga al radiador. Se puede afirmar que la potencia es causa y la presión es efecto. Para

comprender un poco mejor la diferencia, se puede hacer el siguiente ejercicio de imaginación.

Supongase que dentro de un cuarto hay una licuadora funcionando. La licuadora está muy cerca de una de las esquinas del cuarto y hace un ruido insoportable; usted instintivamente se tapa las orejas. Después de un rato se cansa de tener las manos en alto y desesperado decide cortar un pedazo de alfombra y tapar con él la licuadora. Conforme más se acerca a la licuadora más fuerte se oye el ruido; lo pone a usted muy molesto. Cuando logra taparla, la licuadora apenas se oye; ya puede estar dentro del cuarto tranquilamente. Usted en ningún momento cambio la velocidad de la licuadora para que hiciera mayor o menor ruido. Lo que cambio fue la posición de usted respecto a la licuadora y las condiciones del ambiente en que esta se encontraba. Los cambios de presión sonora también se pudieron deber a la ubicación de la fuente dentro del cuarto; si se le hubiese ocurrido poner la licuadora cerca de la ventana abierta, posiblemente la oyera menos fuerte. Ahora suponga que alguien se lleva la licuadora a un bosque y la deja funcionando. En este bosque hay, curiosamente, un contacto eléctrico en el que se puede enchufar la licuadora; el contacto recibe la misma energía eléctrica que el contacto del cuarto, entonces el motor de la licuadora gira con la misma velocidad que en el cuarto. Usted quiere recuperar su licuadora y se va al bosque, pero llega en la noche. No se ve nada y trata de localizarla con el oído. En ese momento sopla un viento fuertísimo que le impide oír la licuadora. Como se dará cuenta el lector, la licuadora emite sonido con la misma potencia que en el cuarto, lo que cambia drásticamente es el ambiente donde se encuentra. Esto hace que los niveles de presión sonora sean tan distintos para la misma fuente.

El oído humano responde a cambios de presión (al igual que los micrófonos de condensador). Sin embargo, si se quiere cuantificar la cantidad de ruido que emite un objeto, independientemente del ambiente en el que se encuentre, lo mejor es determinar su potencia sonora.

Para determinar confiablemente la potencia sonora hay que medir la presión en un ambiente controlado (por ejemplo, una cámara reverberante) ya que la presión depende de las condiciones del campo

sonoro. Cuando interesa conocer la dirección en que se radia mayor potencia, hay que calcular el factor de directividad.

Se mencionarán otros aspectos de la potencia sonora conforme se vayan desarrollando los temas de este trabajo.

1.3 Propagación con simetría esférica.

Una fuente puntual irradia en todas direcciones, por lo tanto los frentes de onda generados son esféricos (fig. 1.2). Para facilitar la localización de un punto en cualquiera de las superficies de fase constante concéntricas al punto, es mejor utilizar coordenadas esféricas. La ecuación de onda expresada en coordenadas esféricas es

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1.5)$$

El miembro izquierdo de la ecuación es parte de el laplaciano de p ($\nabla^2 \cdot p$) expresado en coordenadas esféricas. Las componentes angulares no han sido consideradas ya que p depende únicamente de la distancia a la fuente debido a la simetría de la onda, pues todas las superficies de fase y amplitud constantes son esféricas. r es el radio de la esfera.

$$p(r, t) = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (1.6)$$

De esta ecuación se ve que la amplitud de la presión sonora decrece conforme aumenta la distancia al origen (recuérdese que en una onda plana esto no ocurre, $p(r, t) = A e^{j(\omega t - kr)}$).

La intensidad para ondas armónicas esféricas es

$$I = P^2 / 2\rho_0 c \quad (1.7)$$

La expresión es exactamente igual a la que se dió para ondas planas. El resultado es de esperarse ya que se parte de una ecuación similar a la de ondas planas, donde rp es la variable dependiente. La única diferencia es que la amplitud de la presión, en este caso, decae como $1/r$ [1].

La velocidad promedio con que la energía fluye a través de una

superficie esférica de radio r , es

$$W = 4\pi r^2 I \quad (1.8)$$

con I medida a una distancia r de la fuente, considerando que esta última radia uniformemente en todas direcciones. Si se sustituye I por la ecuación (1.7), y a su vez se considera que $P = A/r$, queda que

$$\dot{W} = \frac{2\pi A^2}{\rho_0 C} \quad (1.9)$$

De esta ecuación es muy importante hacer notar que la potencia radiada no depende de la distancia al origen, lo cual confirma las afirmaciones anteriores al respecto.

1.3.1 Fuente simple.

Antes de llegar a la definición de fuente simple, hay que considerar que el poder² de una fuente esférica,

$$Q = 4\pi a^2 U_0 \quad , \quad (1.10)$$

de diámetro mucho más pequeño que la longitud de la onda que emite, es relativamente poco. U_0 es la velocidad de desplazamiento de la superficie esférica, y a es el radio promedio de la esfera. Esto implica que los detalles del movimiento de la superficie de la fuente no sean importantes, y por ende, da lo mismo tener una esfera o un radiador de forma irregular, siempre y cuando tengan el mismo poder. Cualquier fuente con estas características es llamada fuente simple.

Una *fente simple* es una fuente sonora que emite sonido cuya longitud de onda es mucho mayor a cualquiera de las dimensiones de la misma fuente.

² El poder de una fuente sonora se refiere a la rapidez con que la fuente pulsante desplaza un volumen de fluido. Cuando la fuente pulsante alcanza la máxima amplitud en su vibración (ha alcanzado sus dimensiones máximas), habrá desplazado el mayor volumen posible de aire; pero inmediatamente se contrae provocando un vacío que tratará de ser llenado por el aire. Por lo tanto hay un volumen de aire que es "empujado" y "jalado" por la fuente. El volumen de aire que la fuente jala o empuja en un segundo da idea del poder que tiene.

En Acústica existe un principio que, expresado matemáticamente, relaciona las propiedades de las fuentes con los receptores, y los campos sonoros con sus fronteras. Este principio es conocido como *principio de reciprocidad acústica*. En el caso de una fuente simple y un pequeño receptor localizados en un medio invariable, establece que se recibe la misma señal, aunque se intercambien de posición [1]. Si en lugar del receptor se tuviera otra fuente simple, se podría saber qué efecto produce una sobre otra y viceversa. Se supone que emiten con la misma frecuencia y se activan alternadamente. La conclusión a la que se llega, es que el efecto de la primera fuente sobre la segunda es idéntico al causado por esta última sobre la primera.

$$\frac{Q_1}{P_1(r)} = \frac{Q_2}{P_2(r)} \quad (1.11)$$

r es la distancia que separa a las fuentes, Q es el poder de la fuente y P es la amplitud de la presión.

Ya se dijo que no importa la forma de una fuente simple. Entonces, el campo de presión de una fuente esférica debe ser igual al campo producido por una fuente irregular con el mismo poder de fuente.

Si las fuentes están en el espacio libre y se sustituyen P y Q para ondas esféricas de radio pequeño —respecto de λ —, se llega a que

$$\frac{Q}{P} = \frac{2\lambda r}{\rho_0 c} \quad (1.12)$$

igualdad conocida como *factor de reciprocidad en campo libre* para fuentes simples.

Al despejar P de (1.12), quedará en función del poder de la fuente. Esta nueva expresión de la amplitud, sólo válida para fuentes simples, puede sustituirse en (1.9).

A partir de la presión en términos del poder de la fuente, se pueden calcular las demás variables acústicas. La potencia, por

ejemplo, es

$$W = \frac{\pi}{2} \rho_0 c \left(\frac{Q}{\lambda} \right)^2 \quad (1.13)$$

Es la potencia radiada por una fuente simple en el espacio libre. Nótese que mientras menor sea la frecuencia de emisión, menor será también la potencia radiada. Las ondas de alta frecuencia son más energéticas que las de baja frecuencia. Esta ecuación servirá para compararla con la siguiente y hacer algunas acotaciones.

Ahora se tiene una fuente simple muy cerca de una frontera plana rígida, inclusive asentada en ella. Si las dimensiones de la frontera son mucho mayores a la longitud de onda, la primera puede considerarse como de extensión infinita. Esta clase de frontera es llamada *pantalla acústica*. Una pantalla acústica muy común puede ser un piso de loza o marmol.

La pantalla acústica obliga que los frentes de onda sean semiesféricos. Al medir a una distancia r , la presión de uno de estos frentes, se encuentra que es el doble de la registrada para la misma fuente en el espacio libre. Esto se debe a que las ondas incidente y reflejada, se suman (están en fase). Obviamente, las demás variables acústicas también son afectadas.

La potencia de salida de la fuente ahora es dos veces más grande que en el campo libre,

$$W = \pi \rho_0 c \left(\frac{Q}{\lambda} \right)^2 \quad (1.14)$$

Este resultado parece contradecir todo lo que se ha dicho sobre potencia. Sin embargo, si se reflexiona un poco, se dilucidará la duda.

La fuente tiene el mismo poder, con o sin la presencia de la pantalla acústica. Es decir, su superficie se mueve con la misma velocidad en ambos casos; pero con la pantalla, la fuente trabaja contra el doble de fuerza. En consecuencia, tiene que utilizar más energía para mantener su propio movimiento. El gasto de energía se duplica ante la presencia de la presión acústica duplicada. Se puede esperar entonces, mayor potencia si la fuente es colocada muy cerca

de la unión de dos pantallas perpendiculares, y más aún, en la esquina formada por tres planos ortogonales entre sí.

1.4 Campos sonoros.

Un campo sonoro es definido como una perturbación de las cantidades acústicas que describen un medio a través del cual un sonido es transmitido. Se clasifican según el ambiente en el que se reconocen perturbaciones acústicas o a la distancia a la que se encuentra una onda sonora de la fuente que la produjo.

Serán descritos, de manera sucinta, varios campos algunos de los cuales ya han sido mencionados en secciones anteriores.

1.4.1 Campo libre.

En este campo se describe la propagación en el espacio libre bajo condiciones ideales. Las condiciones son que la región donde se propague la onda, sea un gas ideal, homogéneo, isotrópico y sin fronteras. El aire libre (sin cambios en la temperatura y en la velocidad del viento y a bastante altura del suelo) y las cámaras anecoicas presentan condiciones aproximadas a las que se requieren para la existencia de campo libre.

El campo sonoro generado por una fuente en un campo libre puede ser dividido en dos regiones: campo cercano y campo lejano. Esta división en el campo de radiación de una fuente se debe a la relación que tienen entre sí las variables acústicas respecto a la distancia que separa a la onda de su origen.

1.4.2 Campo cercano.

En la vecindad de una fuente, la velocidad de partícula y la presión sonora no se relacionan de manera simple. La partícula no se desplaza únicamente en la dirección de propagación de la onda; puede existir una componente apreciable de velocidad tangencial. La presión varía considerablemente de punto a punto alrededor de la fuente o a lo largo de un radio a partir de ella. La intensidad no

está relacionada de manera simple con la presión media cuadrática.

El campo cercano se divide, a su vez, en dos campos:

A) Campo cercano hidrodinámico.

En general, se considera que el campo cercano hidrodinámico es la región adyacente a la superficie vibrante de la fuente. La región se extiende hasta una distancia mucho menor a la longitud de onda. En este campo es característico que los movimientos de fluido no estén directamente asociados a la propagación de onda. Se producen turbulencias debido a la diferencia de fase en el desplazamiento de las partes adyacentes de superficie vibrante. La relación entre velocidad de partícula y presión sonora no es tan simple como en campo lejano. Esta región no es la indicada para determinar la potencia de una fuente.

B) Campo cercano geométrico o de Fresnell.

Este campo se encuentra inmediatamente después del hidrodinámico. En él predominan los efectos de interferencia producidos por las irregularidades en la superficie del radiador. Aquí, el nivel de presión sonora no decrece de manera uniforme conforme se aleja de la fuente; sin embargo, es posible localizar máximos y mínimos de presión. Los efectos de interferencia son más notables con tonos puros que con bandas de ruido. A partir de esta región, la velocidad de partícula y la presión sonora, están en fase. Es posible calcular la potencia sonora midiendo muchas veces el nivel de presión. La medición de directividad debe hacerse con mucho cuidado [3] ya que los vectores de intensidad y velocidad de partícula no están dirigidos, necesariamente, en forma radial desde la fuente [18].

1.4.3 Campo lejano.

Es la región que se localiza allende el campo geométrico hasta el infinito (en condiciones de campo libre). En el campo lejano, los niveles de presión decrecen uniformemente 6 dB cada vez que se duplica la distancia a la fuente [5][17]. En este campo, la directividad está bien definida. La velocidad de partícula y la intensidad están orientadas en dirección de la propagación de onda.

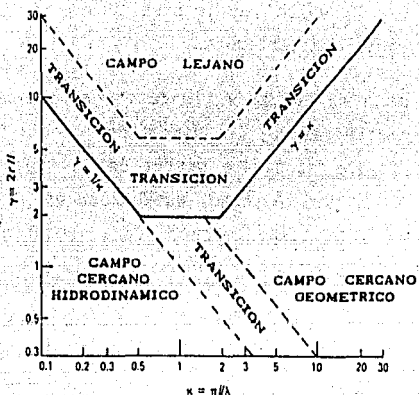


Fig. 1.3. Campo de radiación de una fuente. [3]

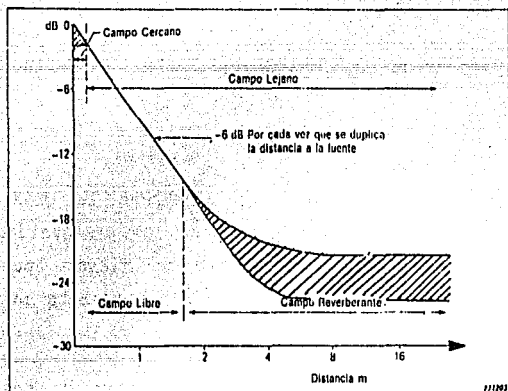


Fig. 1.4. Descripción del campo de sonido de una fuente en un cuarto con reverberación. [5]

La presión acústica y la velocidad de partícula están en fase. Es posible hacer mediciones confiablemente.

La distancia hasta la que se extiende el campo cercano de una fuente, depende de la frecuencia, las dimensiones de la fuente y las fases de radiación de las distintas partes de la superficie de la fuente. Resulta difícil, por lo tanto, establecer un límite general entre el campo lejano y el campo cercano. Para encontrar el límite es necesario explorar el campo sonoro experimentalmente [17].

En contraposición con lo del párrafo anterior, los autores de la referencia [3] para este capítulo, establecen algunos criterios para delimitar los campos: se tienen que satisfacer tres criterios para garantizar que las mediciones se hacen en campo lejano:

$$r \gg \lambda/2\pi \quad r \gg \ell \quad r \gg \pi \ell^2 / 2\lambda$$

donde r es la separación entre la fuente y el punto de medición; λ es la longitud de onda, y ℓ es dimensión mayor de la fuente. La condición "mucho mayor que" debe interpretarse como un factor de tres o mayor.

Para simplificar un poco las desigualdades, se define $\gamma = 2r/\ell$ y $K = \pi\ell/\lambda$, entonces

$$\gamma \gg 1/K \quad \gamma \gg 2 \quad \gamma \gg K$$

De acuerdo con estos criterios, se construye la gráfica 1.3. Finalmente señalan que "el cumplimiento de las desigualdades para asegurar que uno está en campo lejano no siempre pueden ser condición necesaria. Por ejemplo, una esfera pulsante muy grande sólo tiene campo lejano."³

En ninguna de las demás obras consultadas para la realización de este capítulo se definen los linderos entre campos sonoros con tanto detalle como en la referencia [3]. Se concretan a mencionar las características de cada campo y agregan que la extensión de cada campo depende del tipo de fuente en particular.

³ Op. Cit., p. 134.

1.4.4 Campo sonoro directo.

Este campo y los siguientes, tienen en común que se producen dentro de recintos cuyas superficies son muy reflejantes.

Es el que media entre la fuente y el receptor. Cuando en el receptor es mayor la influencia del sonido que procede directamente del radiador que la del sonido reflejado por alguna frontera, se dice que el campo sonoro es directo. También se le conoce como campo de arriba directo de la fuente.

1.4.5 Campo reverberante.

Cuando, en el receptor, el sonido reflejado es más intenso que el sonido que llega directamente de transmisor a receptor, entonces predomina un campo reverberante.

Si una fuente emite sonido continuamente dentro de un recinto, se forman, dentro de él, patrones de onda estacionarios, lo cual explica que en un campo reverberante se encuentren fluctuaciones de presión sonora respecto a la posición del receptor dentro del campo.

El campo reverberante y el campo directo son de suma importancia en el estudio de la Acústica Arquitectónica.

De manera semejante a como ocurre en el campo libre, dependiendo de la distancia entre emisor y receptor, este último se encontrará en el campo directo -cercano o lejano- o en el campo reverberante de un recinto. La figura 1.4 muestra la variación del nivel de presión sonora a lo largo de un radio que parte de una fuente de ruido típica en un recinto. Las áreas sombreadas indican fluctuaciones en el nivel de presión sonora.

1.4.6 Campo difuso.

Un campo reverberante es llamado campo difuso cuando un gran número de ondas reflejadas cruzan una región del espacio desde todas las direcciones posibles y se tiene, en consecuencia, una densidad de energía uniforme en toda esa región.

En otras palabras, en un campo difuso todas las direcciones de

propagación son igualmente probables. El nivel de presión sonora es igual en todo el campo e independiente de la distancia a la fuente. El nivel de presión sonora correspondiente al límite superior del área sombreada que se encuentra a la derecha en la figura 1.4, es independiente de la distancia desde 6 metros en adelante. A partir de esa distancia, se tiene un campo difuso (según el ejemplo que se ilustra).

El área sombreada, abajo de la línea de presión constante, indica que la condición de difusividad no puede ser alcanzada absolutamente para un amplio rango de frecuencias como se verá más adelante. Para lograr que en un recinto se pueda crear un campo difuso (o lo más próximo a un campo difuso) se conocen varias técnicas, una de ellas es colocar placas reflejantes que eviten la formación de patrones de onda estacionarios a ciertas frecuencias.

Es común en la literatura encontrar el término *campo difuso reverberante* (en inglés, *diffuse reverberant field*) para indicar la existencia de un campo difuso en una cámara reverberante.

Cuando un campo reverberante se aproxima a las condiciones de campo difuso, resulta muy apropiado para determinar potencia sonora ya que casi se logra un mismo nivel de presión en toda la región abarcada.

1.5 Algunos fenómenos de transmisión.

Cuando ocurren interacciones entre una onda sonora y alguna frontera u obstáculo en el medio, la onda sufre cambios ya sea desviándose, dispersándose, distorsionándose, etc.

Se describirán brevemente algunos de estos fenómenos; los que sean de mayor importancia para este trabajo. En todos los casos se asume la existencia de fronteras infinitas.

1.5.1 Absorción.

Es la disipación parcial de energía sonora cuando ha incidido en un material. Las pérdidas se presentan en el medio mismo y en las

fronteras (en caso de que existan).

Un parámetro que indica la proporción de la energía que es absorbida por el material, es el coeficiente de absorción (α).

$$\alpha = \frac{\text{Energía absorbida}}{\text{Energía incidente}}$$

α tiene valores entre 1 y 0. Cero, para reflectores acústicos perfectos; uno, para absorbentes de sonido perfectos (v. gr., se considera que una ventana abierta en un recinto es un absorbente perfecto, si las dimensiones de la ventana son mayores a la longitud de onda).

Existen tablas con valores de α para distintos materiales, en cierto rango de frecuencias [5][2]. Beranek [15] menciona tres tipos diferentes de coeficientes asociados con tres métodos distintos de medición de absorción; razón por la cual es imprescindible indicar en la presentación de resultados, las técnicas y métodos utilizados en la medición.

La absorción depende del ángulo de incidencia. El coeficiente medido para cierto ángulo γ se denota α_γ [5]. Este caso se da cuando se mide la absorción usando un tubo de impedancias ($\gamma=90^\circ$ ó sea α_{90}). Cuando se omite γ se sobreentiende que α fue determinada como el promedio para todos los ángulos de incidencia (caso único de campos reverberantes).

La absorción sonora de un material se expresa como el producto de su coeficiente de absorción α_i y su superficie absorbente S_i , $S_i \alpha_i$. La absorción sonora total en un recinto es igual a la suma de la absorción sonora de todos los materiales que se encuentran dentro del mismo,

$$A = \sum_i S_i \alpha_i \quad (1.15)$$

Aquí, el subíndice i indica la i -ésima superficie con su correspondiente coeficiente de absorción. Las unidades de A son los sabines métricos [m^2] o los sabines ingleses [ft^2].

El coeficiente de absorción promedio del recinto se define como

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum S_i \alpha_i}{\sum S_i} = \frac{A}{S} \quad (1.16)$$

En realidad se tienen dos promedios del coeficiente de absorción: el primero es un promedio para todos los ángulos de incidencia, y el segundo es un promedio para todas las superficies dentro de un cuarto.

El coeficiente de absorción promedio, $\bar{\alpha}$, es adimensional.

1.5.2 Transmisión.

Es la transferencia de energía sonora de un medio a otro.

1.5.3 Reflexión.

Es el rechazo de energía en la frontera entre dos medios de propagación distintos; la energía rechazada vuelve al medio de donde procede.

En suma, cuando una onda pasa de una sustancia a otra más densa, parte de su energía es absorbida, otra parte es transmitida y el resto es reflejado. El dibujo 1.5 ilustra lo anterior.

La energía de la onda incidente es igual a la suma de las energías de las ondas absorbida, transmitida y reflejada. Estas cantidades dependen de las impedancias características de los medios en los que ocurran estos fenómenos; las velocidades de sonido, y el ángulo de incidencia con la normal a la interface [1].

1.6 Reflejos.

El efecto que las ondas reflejadas produce en el recinto, depende de la cantidad de fronteras que se tenga, el material de las mismas y la distancia de ellas a la fuente y al receptor. Los reflejos pueden ser ecos, aleteos o reverberaciones. A continuación se hablará sobre estos últimos, ya que la medición de potencia se hace dentro de un campo reverberante. En la referencia [6] se

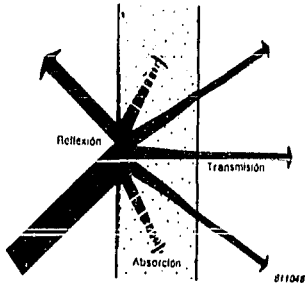


Fig. 1.5. Ilustración de los fenómenos de reflexión, absorción y transmisión. [5]

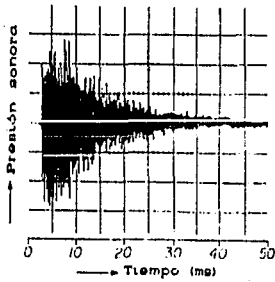


Fig. 1.6. Una serie de reflexiones en una cámara reverberante. [6]

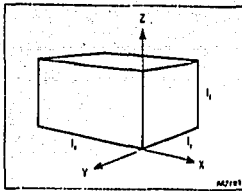


Fig. 1.7. Recinto de paredes rectangulares y paralelas. [5]

explican de manera clara los otros dos.

En la explicación se asume que la frontera es perfectamente rígida (pantalla acústica).

1.6.1 Reverberación.

Se define como una multiplicidad de ecos decrecientes en intensidad y muy seguidos uno de otro. Cuando un emisor de sonido es desactivado dentro de una cámara reverberante el sonido persiste, decreciendo su intensidad, hasta perder toda su energía debido a absorciones.

La reverberación se presenta en recintos cerrados. La persistencia se explica por la gran cantidad de reflexiones y por la excitación de los modos normales de vibración del recinto [1][2][10]. Se entiende que cuanto más rígidas sean las paredes del recinto, mayor será la cantidad de reflexiones y más tardará la onda en disiparse.

En la figura 1.6 se muestra un oscilograma de un sonido reverberante.

1.7 Algunas características de recintos reverberantes.

Para conocer las propiedades acústicas de un recinto, se han investigado las relaciones existentes entre un campo sonoro y las características de un recinto como son: material de construcción, dimensiones, muebles, dimensiones de la fuente sonora, etc. La primera relación conocida fué deducida empíricamente por Sabine⁴

$$T_{60} \propto \frac{V}{A} \quad (1.17)$$

Esta relación involucra tiempo de reverberación (T_{60}); volumen del cuarto (V); absorción sonora total (A). Desde entonces, este modelo ha sido modificado, sin perder su esencia, tomando en cuenta otras variables acústicas.

⁴ Sabine, Wallace Clement Ware (1868 - 1919). Físico estadounidense; considerado fundador de la Acústica Arquitectónica.

Existe una vasta bibliografía sobre este tema para el lector que desee mayor información (p. e., la referencia [6] del capítulo 2). Las exposiciones que a continuación se presentan son sólo para explicar someramente algunos conceptos relacionados con la tesis.

1.7.1 Tiempo de reverberación.

Es el tiempo en el que el nivel de presión sonora dentro de un recinto cae 60 dB una vez que el emisor ha sido desactivado.

Se representa como T_{60} . Sabine fue el primero en definir este parámetro. En sus investigaciones iniciales, Sabine utilizaba una fuente excitadora a 512 Hz. Por costumbre, y dada la importancia de esos primeros trabajos, siempre que se dan valores al tiempo de reverberación sin especificar alguna frecuencia, se asume que esos resultados fueron obtenidos a 512 Hz (recientemente se ha optado por 500 Hz).

Con fundamento en la relación (1.17), existen diversas fórmulas para calcular el tiempo de reverberación. En la práctica se escogerá la fórmula que mejor se adecue a las condiciones de la medición y a la precisión que se quiera. A continuación se presentan tres de ellas:

a) Fórmula de Sabine.

Sabine supone que la absorción se produce uniformemente en todo el recinto una vez que la fuente ha sido desactivada. El tiempo que le lleva al nivel de sonido caer sesenta decibels es

$$T_{60} = \frac{55.3}{c} \cdot \frac{V}{S\bar{\alpha}} \quad (1.18)$$

De la igualdad 1.16 y considerando que la velocidad del sonido en el aire es 343 m/s a 20 °C, la fórmula se reduce a

$$T_{60} = 0.161 \frac{V}{A} \quad (1.19)$$

que es como se encuentra en muchas publicaciones. En la referencia [1] se presenta el desarrollo matemático para llegar a la ecuación.

b) Fórmula de Norris y Eyring.

En casos extremos en que $\bar{\alpha} = 1$ para todos los materiales, T_{60} en vez de ser cero es un valor diferente de cero. Norris y Eyring resuelven este problema modificando el denominador de la fórmula de Sabine.

$$T_{60} = \frac{0.161 \cdot V}{S \cdot [-2.3 \log(1 - \bar{\alpha})]} \quad (1.20)$$

\log significa logaritmo en base diez. La modificación surge de considerar que el decaimiento de energía no es continuo, como lo considera Sabine sino que cae en forma intermitente con cada reflexión [7][2]. La fórmula de Sabine es tan precisa como ésta cuando $\bar{\alpha} < 0.2$ (en la tabla 3.6 de la referencia [7] se hace una comparación).

c) Fórmula de Knudsen.

En recintos pequeños, la energía sonora es absorbida casi totalmente por las paredes. En cambio, en recintos cuyo volumen es grande (auditorios, teatros, etc.), el tiempo que pasa la onda en el aire entre cada reflexión es mayor, por lo cual la absorción en el aire juega un papel importante. También es importante cuando las superficies son muy reflejantes, sobre todo a altas frecuencia (se consideran arriba de 1000 Hz, en este caso) debido a las pequeñas longitudes de onda [2].

$$T_{60} = \frac{0.161 \cdot V}{S \bar{\alpha} + 4mV} \quad (1.21)$$

m es un término que involucra la absorción en el aire. Una aproximación aceptable de m es

$$m = 5.5 \times 10^{-4} (50/h) (f/1000)^{1.7} \quad (1.22)$$

para humedades relativas, h , entre 20 y 70%, y frecuencias, f , entre 1.5 y 10KHz.

También se tiene

$$T_{60} = \frac{0.161 \cdot V}{S \cdot [-2.3 \log(1 - \bar{\alpha}) + 4mV]} \quad (1.23)$$

\log significa logaritmo en base diez; m se obtiene de manera

distinta a la fórmula (1.22). Según la referencia [2], la constante de atenuación de energía, m , consta de dos partes: "Una parte se debe a los efectos de viscosidad y conducción de calor en el gas, y la otra parte surge de los efectos de absorción molecular y dispersión en gases poliatómicos..."⁵ Para el aire, la primera parte de la constante viene dada por

$$m_1 = 4.24f^2 \times 10^{-11}$$

donde f es la frecuencia de onda en [Hz]. La segunda parte, m_2 , se determina con ayuda de un nomograma⁶. Por último, se hace la suma de ambas partes quedando

$$m = m_1 + m_2$$

expresada en [m^{-1}].

La primera de las fórmulas está tomada de la referencia [1] donde se plantea a partir de la fórmula de Sabine. En la referencia [2], se plantea la segunda fórmula a partir de la de Norris y Eyring. Hay pequeñas diferencias en los valores de m determinados por los dos procedimientos, especialmente en los rangos que señala el primero. Sin embargo, se debe tener presente que ambos son para obtener una aproximación burda al valor real de m . No se comentará más sobre estas dos últimas fórmulas ya que no serán utilizadas para el desarrollo de la tesis.

Existen otras fórmulas como la de Millington y Sette [5][1][4], por ejemplo, que toma en cuenta la distribución del material absorbente dentro del recinto. Esta fórmula en algunos libros es llamada tiempo de reverberación para absorción asimétrica.

En el siguiente capítulo se trata, de nuevo, el tema de la absorción, pero enfocado a la cámara reverberante del Laboratorio de Acústica del Centro de Instrumentos-UNAM.

1.7.1 Recintos rectangulares.

La ecuación de onda ha sido resuelta para recintos de geometría

⁵Op. Cit., p. 309.

⁶Op. Cit. p.309, fig. 10.17.

simple — como espacios hemisféricos o paralelepípedos rectangulares— lo cual ha permitido comprender mejor el comportamiento del sonido dentro de un recinto.

Un sistema de referencia para el recinto puede ser el que se muestra en la figura 1.7. La ecuación que describe el comportamiento de la presión sonora dentro del recinto es

$$P_{lmn} = A_{lmn} \cos k_x x \cos k_y y \cos k_z z e^{j\omega t} \quad (1.24)$$

Las componentes de \vec{k} (vector de propagación de onda⁷) quedan definidas por las condiciones de frontera en $x=L$, $y=M$, $z=N$ (vea la fig 1.7). Para los tres casos se tiene

$$k_x = \frac{\ell\pi}{L} \quad k_y = \frac{m\pi}{M} \quad k_z = \frac{n\pi}{N} \quad (1.25)$$

donde $\ell = m = n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Las frecuencias de vibración serán

$$f_{lmn} = \frac{c}{2} \left[\left(\frac{\ell}{L} \right)^2 + \left(\frac{m}{M} \right)^2 + \left(\frac{n}{N} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1.26)$$

Las frecuencias definidas así, son eigenfrecuencias especificadas por los enteros ordenados (ℓ, m, n) . Si se observa la solución a la ecuación de onda, es una función definida por los enteros ordenados; cada eigenfunción tiene su propia eigenfrecuencia.

Al dar valores a los enteros ordenados (ℓ, m, n) se obtienen analíticamente las frecuencias de los modos normales de vibración del recinto (de las paredes del recinto). Dependiendo de los valores de estos enteros, se pueden clasificar los modos de vibración en tres clases:

a) Los *modos axiales* se presentan cuando dos de los enteros son iguales a cero. La onda se propaga en el sentido de uno de los ejes coordenados; el frente de la onda es paralelo a dos paredes

⁷ A la magnitud del vector de propagación de onda se le conoce como "número de onda", y lo simboliza la letra k . $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ donde ω es la frecuencia angular de la onda; c es la velocidad de fase de la onda (velocidad del sonido); λ es la longitud de la onda.

opuestas. Los modos axiales son los que originan aleteo ("flutter echo"). Como las ondas, en este modo, recorren mayor distancia que en los otros dos, su amortiguamiento será menor y por lo tanto, su tiempo de reverberación será mayor. Como ejemplo para ilustrar este modo, se tiene un esquema del modo (4,0,0) en la figura 1.8.

b) Los *modos tangenciales* ocurren cuando la onda se propaga tangencialmente a un par de superficies, pero es reflejada por los otros dos pares. Las frecuencias a las que se presentan se obtienen haciendo uno de los enteros igual a cero. Debido a que las reflexiones ocurren entre dos pares de paredes, el amortiguamiento de la onda es algo mayor al del modo axial y el tiempo de reverberación es menor. La figura 1.9 muestra el modo (2,0,1).

c) Los *modos oblicuos* se forman por las reflexiones en las seis paredes del cuarto. La trayectoria de la onda es oblicua a los tres pares de paredes. Estos modos se definen para el caso en que el trío de enteros es diferente de cero. Estos modos provocan el mayor número de reflexiones en la onda, lo cual conlleva mayor amortiguamiento y el menor tiempo de reverberación de los tres modos. Se ilustra el modo (2,1,1) en la figura 1.10.

En la figura 1.11 se dibuja la trayectoria de una onda para los distintos modos, todos originarios de un punto.

Beranek [2] ilustra los diferentes grupos modales mediante gráficas de nivel. A manera de ilustración se incluye la figura 1.12.

Para determinar la potencia sonora de alguna fuente es importante evitar la preponderancia de unos modos sobre otros al momento de las mediciones, pues se producirían regiones muy marcadas dentro del cuarto donde existan nodos o antinodos de presión. Este efecto provoca que las mediciones sean imprecisas pues la colocación de micrófonos dentro del cuarto puede coincidir con puntos máximos o mínimos de presión. Existen técnicas para disminuir el efecto de estos modos, como la instalación, dentro de la cámara, de placas reflejantes.

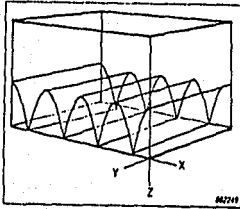


Fig. 1.8. Modo axial $(4,0,0)$.
[5]

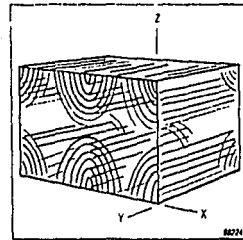


Fig. 1.9. Modo tangencial $(2,0,1)$.
[5]

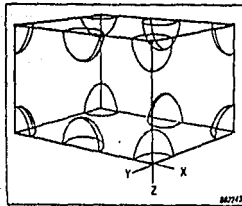


Fig. 1.10. Modo oblicuo $(2,1,1)$. [5]

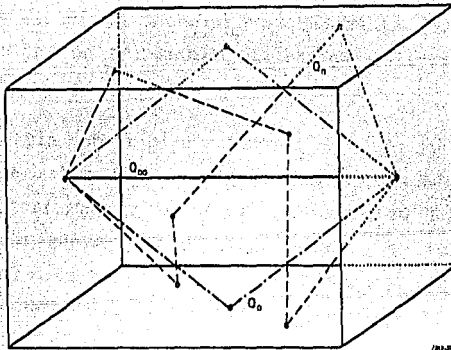


Fig. 1.11. Dibujo donde se muestra una trayectoria típica de modos axial, tangencial y oblicuo; todos originarios de un sólo punto. En el dibujo se identifica al modo axial con Q_{00} ; al tangencial, con Q_0 ; al oblicuo, con Q_n . [16]

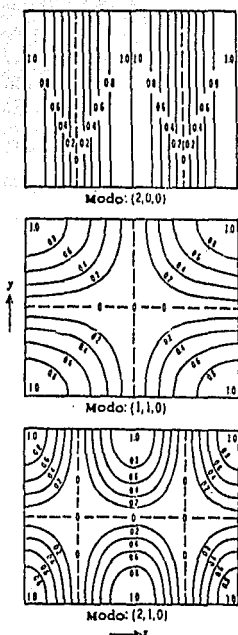


Fig. 1.12.
Gráficas de contorno en un corte longitudinal de una cámara reverberante. Los números en los contornos indican niveles relativos de presión. [2]

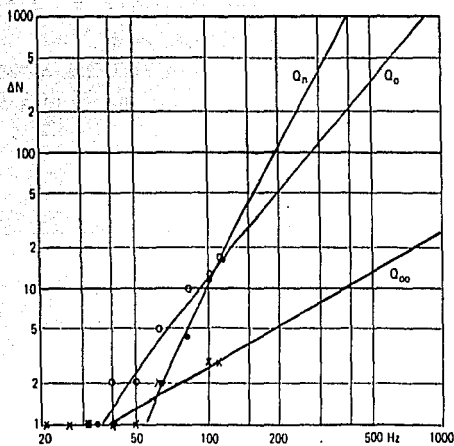


Fig. 1.13.
Cantidad de eigenmodos en una cámara de 240 m³. ΔN es el número de modos normales cuyas frecuencias están dentro de un rango Δf centrado en f . Puntos, círculos y cruces indican la cantidad exacta de modos (calculada con fórmula). Las letras Q significan lo mismo que para la figura 1.11. [16]

El cálculo de el número de modos que es posible excitar hasta la frecuencia f es

$$N = \frac{1}{8} \cdot \frac{4}{3} \pi f^3 [(c/2) \cdot (1/LMN)]^{-1} = \frac{4}{3} \pi \frac{f^3 V}{c^3} \quad (1.27)$$

(para una mejor comprensión del origen de esta fórmula, consulte la referencia [10]). Nótese que a altas frecuencias, la cantidad de modos es sorprendentemente grande (figura 1.13); las respuestas del recinto a altas frecuencias se traslaparán haciendo irreconocible un modo en particular. Para ver más claramente esto, se diferencia (1.27) respecto a f y se obtiene que "el número de modos normales ΔN que tienen frecuencias en una banda de ancho ΔF centrada en f " [1], es

$$\Delta N \approx \frac{4\pi V}{c^3} f^2 \Delta F \quad (1.28)$$

Conforme mayor sea el ancho de la banda, mayor será la cantidad de modos excitados, y conforme más grande sea la frecuencia habrá mayor cantidad de modos en el recinto. Aunque se tenga una banda angosta, si la frecuencia central es alta, se excitarán muchísimos modos; La gráfica 1.14, extraída de la referencia [16], muestra el crecimiento en la cantidad de modos de cada tipo conforme aumenta la frecuencia de excitación. La referencia [16] contiene sendas expresiones para los tres tipos de modos, las cuales se omiten en este trabajo por no ser de interés; al respecto sólo se dirá, para informar al lector, que Meyer y Neumann [6] dicen que para frecuencias altas o volúmenes grandes de recinto, las fórmulas se aproximan a la forma aquí presentada. También dan un ejemplo de la cantidad de modos normales que puede haber en un ancho de banda de 1 Hz (de 1000 a 1001 Hz), que es de 25000.

1.7.2 Breve descripción de la evolución de un sonido prolongado y estable dentro de un recinto.

Se ha mencionado que en cada reflexión una fracción de energía acústica es absorbida hasta que el sonido se deja de percibir. A la rapidez con que el sonido "encerrado" se va extinguiendo se le denomina decaimiento. El decaimiento de sonido se debe, entonces, a pérdidas de energía, y estas últimas se deben, principalmente, a que

las paredes no son perfectamente rígidas. Las eigenfunciones (1.24) deben ser modificadas para adecuarse a este hecho.

Ya que los modos normales decrecen en el tiempo, la frecuencia natural debe ser reemplazada por una frecuencia compleja [1]

$$\omega_{lmn} = \omega_{lmn} + j\beta_{lmn} \quad (1.29)$$

donde la parte real es la frecuencia angular del movimiento y β es conocido como *coeficiente de absorción temporal* de cada uno de los modos normales. Como la frecuencia angular y el vector de propagación están relacionados entre sí, el vector de propagación debe ser complejo también,

$$\omega_{lmn}^2 = |\vec{k}|^2 c^2 \quad (1.30)$$

\vec{k} , por lo tanto, indica que hay amortiguamiento espacial en las tres direcciones; se compone de la constante de propagación, en la parte real y de el coeficiente de absorción -espacial-, en la parte imaginaria ($k_x = k_{x1} + j\alpha_{x1}$, igual se tiene para la direcciones y y z).

Considerando los amortiguamientos, se tiene que la ecuación para los modos normales amortiguados es

$$p^D = A_{lmn} \cos(k_{xx} + \phi) \cos(k_{yy} + \phi) \cos(k_{zz} + \phi) e^{j\omega t} \quad (1.31)$$

Recuérdese que $A = Ae^{j\phi} = A\cos\phi + jA\sin\phi$, donde ϕ es la constante de fase. Después se procede igual que con la ecuación (1.24); se igualan las partes reales y las partes imaginarias y se resuelven simultáneamente para ω y β , haciendo las suposiciones de que la amplitud de la señal tarda muchos ciclos en decaer ($\beta \ll \omega$) y de que el coeficiente de absorción es pequeño. Finalmente se llega a que $\omega_{lmn} \approx |\vec{k}|c$ y que $\beta_{lmn} \approx |\alpha|c$. Los valores de k, α y ϕ se encuentran aplicando condiciones de frontera.⁸

⁸No se intenta en esta tesis comprobar todas las ecuaciones matemáticas relacionadas con el tema; además algunos desarrollos no son simples, como lo menciona Kinsler[1]. Es por eso que al lector interesado en comprobar esta ecuación y las siguientes, se le sugiere

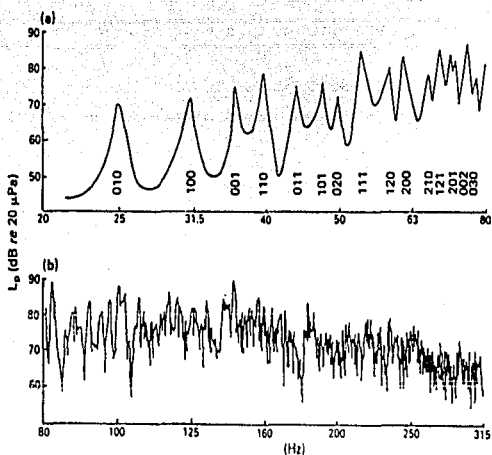


Fig. 1.14. Respuesta en frecuencia típica de un cuarto reverberante rectangular de 180 m³. a) En este rango de frecuencias las resonancias del cuarto pueden ser identificadas con modos. b) En este rango de frecuencias, los picos en la respuesta del cuarto, no pueden ser asociados con modos del mismo. [3]

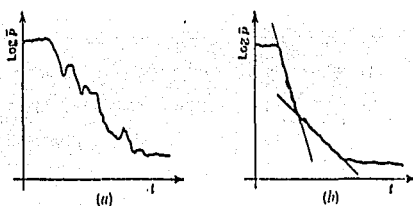


Fig. 1.15. Curvas de decaimiento o gráficas de T₆₀. a) Decaimiento escabroso asociado con una distribución no uniforme del sonido. b) Decaimiento con doble pendiente debido a que unos modos son absorbidos más rápidamente que otros. (Referencia [6] del capítulo 2.)

Dentro del recinto se presenta absorción temporal y absorción espacial. α indica que conforme la onda avanza en el aire, pierde energía; la amplitud rms de la presión sonora, por ejemplo, se comportará como $P(x) = P(0)e^{-\alpha x}$, $P(0)$ es el valor promedio de la presión en un punto de referencia $x=0$ y $P(x)$ es la presión en cualquier punto alejado de la referencia en el sentido positivo. Por otro lado, el amortiguamiento temporal significa que si se sitúa un medidor en un punto fijo en el espacio, se registrará cada vez menos amplitud en el sonido una vez que se apaga la fuente; el comportamiento será, siguiendo el ejemplo anterior, $P(t) = P(0)e^{-\beta t}$, aquí $P(0)$ es el valor de la presión en un punto cuando la fuente se apaga en el tiempo $t=0$ después de que ha estado prendida por mucho tiempo; $P(t)$ es la presión medida en el mismo punto en cualquier tiempo t posterior. Supóngase que el recinto tiene de largo L metros en la dirección x y dentro de él, en uno de los extremos, se genera un pulso con longitud $2L$. El pulso completo hace un viaje de ida y regreso a la velocidad del sonido dentro del cuarto en un tiempo $T = 2L/c$ siguiendo una dirección paralela al eje x . En el cuarto se tienen dos micrófonos en la trayectoria de la onda, uno donde empieza y termina su viaje y el otro en cualquier punto alejado del primero. En un tiempo anterior a $T/2$ se mide la presión en los micrófonos y se observa que en el primer micrófono se registra mayor presión que en el segundo. En el tiempo T , en el segundo micrófono se registra mayor energía que en el primero (en el trayecto de un micrófono a otro, la onda ha perdido energía); la onda se ha absorbido espacialmente como $P(x)=P(0)e^{-\alpha 2L}=P(0)e^{-\alpha T}$. También se nota que en ambos micrófonos se registraron distintas presiones en los dos momentos de medición, y que en la segunda medición las presiones registradas fueron menores a las primeras; la onda se ha absorbido temporalmente. En el primer micrófono, en el tiempo T se tiene que la presión es $P(t)=P(0)e^{-\beta T}$. En el primer micrófono, cuando el pulso ha hecho todo el recorrido, se tiene $P(x)=P(0)e^{-\alpha ct}$ y $P(t)=P(0)e^{-\beta t}$. La amplitud es la misma para ambas absorciones en $x=2L$ y $t=T$ ($P(x) = P(t)$), por lo que

$$P(0)e^{-\alpha ct} = P(0)e^{-\beta T}, \quad (1.32)$$

consultar las referencias [4] o [14] principalmente.

por lo tanto se llega a que $\alpha = \beta/c$. En este caso, los dos coeficientes de absorción tienen relación entre sí. Se puede decir que los modos normales dependen, principalmente, de la forma y dimensiones del recinto, y que la rapidez de amortiguamiento depende, en gran parte, del material de las fronteras. Esta peculiaridad hace que el cálculo de los modos normales del recinto se haga tomando en cuenta las condiciones de frontera más sencillas —paredes rígidas, como ya se vió—, y considerar la absorción de energía de los modos como una perturbación de estas condiciones [1].

Una forma más simple de escribir los modos normales amortiguados es la siguiente:

$$p^D = P(x, y, z) e^{-\rho t} e^{j\omega t} \quad (1.33)$$

donde $P(x, y, z) = A \cos k_x x \cos k_y y \cos k_z z$.

Otra modificación importante a la función de modos normales, se hace cuando se considera la presencia de la fuente dentro del recinto. Considerando que no hay sonido dentro del recinto, cuando se prende la fuente, el sonido emitido por ella hará que el nivel de presión sonora en cualquier punto del cuarto, comience a crecer hasta alcanzar un valor máximo límite, llamado presión de estado estable (en forma general, valor o amplitud de estado estable). Este límite está marcado por la cantidad de energía absorbida por segundo; de no existir un límite, la densidad de energía dentro del cuarto crecería infinitamente mientras la fuente siguiera prendida.

La fuente emite a una frecuencia ω_0 , por lo cual la amplitud de las ondas estacionarias dependerá de la diferencia entre la frecuencia de excitación, ω_0 , y la frecuencia natural del sistema, ω . La función que describe el crecimiento de la onda dentro del recinto es

$$p^S = P^S(x, y, z) e^{j\omega_0 t} \quad (1.34)$$

donde $P^S = \frac{B \cos k_x x \cos k_y y \cos k_z z}{[(2\beta/\omega)^2 + (\omega_0/\omega - \omega/\omega_0)^2]}$; B es una constante que

depende de la forma y la posición de la fuente.

Para describir analíticamente el crecimiento y decrecimiento del sonido de una fuente dentro de un recinto, es más conveniente escribir la solución de la ecuación de onda en la forma siguiente:

$$p = \sum_{l,m,n} (p^D + p^S) \quad (1.35)$$

Para un recinto reverberante, se aproxima la solución a

$$p = \sum_{l,m,n} P^S(x,y,z) [e^{j\omega \cdot t} - e^{-\rho t} e^{j\omega t}] \quad (1.36)$$

Dentro de los paréntesis cuadrados se tienen los factores que representan el crecimiento y el decrecimiento del sonido producido por una fuente dentro del recinto. Si la fuente se enciende, inmediatamente se excitarán algunos modos de vibración y a la vez comenzarán a amortiguarse; pero la fuente excitará en mayor medida aquellos modos cuyas frecuencias de resonancia se acerquen más a las frecuencias producidas por la fuente, por lo tanto, hay fluctuaciones durante el crecimiento de la presión sonora promedio en un punto dentro del cuarto. Unos modos decaerán más rápidamente que otros, si $\omega_0 \approx \omega$ el crecimiento será menos aspero. Estas fluctuaciones de presión se deben a la interferencia de unos modos con otros, y a que la energía en unos se pierde más rápidamente que en otros.

Mientras más tiempo pasa, como el emisor sigue activado, antes de que el sonido pierda toda su energía, la fuente contribuye con más. La cantidad de energía proporcionada por la fuente al campo debe ser mayor a la capacidad de absorción de las paredes para poder alcanzar una presión promedio estable, suponiendo que la señal emitida también es estable. Cuando se alcanza esta situación es cuando conviene medir la potencia sonora emitida por la fuente pues se asegura que la presión sonora promedio no fluctúa considerablemente.

Si la fuente se apaga, todos los modos naturales comenzarán a decaer. Decaerán más rápido los modos débilmente excitados; aquellos que sean más energéticos tardarán más tiempo en ser absorbidos. De ahí que en las curvas en las que se muestra el decaimiento de sonido se vean fluctuaciones y más de una pendiente, sobre todo a bajas

frecuencias, ya que es reducido el número de modos excitados (vease la última figura, 1.15, de este capítulo), por eso resulta tan difícil determinar el tiempo de reverberación en estas frecuencias. De la ecuación (1.36) sólo se tendrán los modos amortiguados.

Como puede observar el lector, la evolución de un sonido prolongado y estable dentro de un recinto depende de varios factores: el ancho de banda de la emisión, las dimensiones del recinto, la forma del recinto, la mayor o menor difusividad del sonido. Estas y otras circunstancias como la ubicación de los micrófonos, por mencionar alguna de las ya citadas en secciones anteriores, hay que tenerlas en cuenta al momento de diseñar o de hacer mediciones.

1.8 Conclusión.

Para asociar los distintos aspectos teóricos mencionados en este capítulo con el propósito de la tesis, se puede recalcar lo siguiente:

- a) Se debe tener un ambiente controlado donde se pueda recrear un campo reverberante. El ambiente lo constituye un recinto construido especialmente para realizar pruebas acústicas. A tales recintos se les conoce como cámaras reverberantes.
- b) Al activar un emisor de ruido continuo (apéndice 1) dentro de una cámara reverberante el nivel de presión sonora aumenta hasta alcanzar un nivel estable, al llegar a ese nivel es cuando se deben hacer mediciones para determinar niveles de potencia.
- c) En los campos creados en cámaras reverberantes se detectan variaciones espaciales de la cantidad de energía que hay en ellos. Para evitar mediciones inexactas, es necesario medir en distintos puntos dentro del campo y calcular el promedio de dichas mediciones. De ser necesario, habría que acondicionar la cámara.
- d) No se deben hacer mediciones en campo cercano o en campo directo. Los transductores deben colocarse alejados del radiador de sonido toda vez que se garantice la presencia de campo reverberante.

1.9 Referencias.

- [1] KINSLER, L.E./ FREY, A.R./ COPPENS, A.B./ SANDERS, J.V.
Fundamentos de Acústica. 1^a Ed. en español
Traducción: Ricardo Ruiz Boullosa
Editorial Limusa. México, 1988
- [2] BERANEK, L.L.
Acoustics (Electrical and electronic engineering).
McGraw-Hill Book Company USA, 1954
- [3] BIES, D.A./ HANSEN, C.H.
Engineering Noise Control
Unwing Hyman GB, 1988
- [4] PIERCE, A.D.
Acoustics. An Introduction to Its Physical Principles
and Applications.
McGraw-Hill Book Company USA, 1981
- [5] MORENO, J.N.R.
Introducción al Control de Ruido.
Brüel & Kjør Dinamarca, 1990
- [6] MEYER, E./ NEUMANN, E.B.
Physical and Applied Acoustics (an Introduction).
Traducción: John M. Taylor, Jr.
Academic Press USA, 1972
- [7] SMITH, B.J./ PETERS, R.J./ OWEN, S.
Acoustics and Noise Control. Reimpresión
Longman Group Limited. Singapore, 1985
- [8] RESNIK, R./ HALITDAY, D.
Física (parte 1) 7^a Ed. Español
Traducción: Raúl González Gómez.
Cía. Editorial Continental. México, 1984
- [9] COULSON, C.A./ JEFFREY, A.
Waves: A Mathematical Approach to the Common Types
of Wave Motion. 2^a Ed.
Longman Group Limited. GB, 1977
- [10] MORSE, P.M.
Vibration and Sound. 2^a Ed.
American Institute of Physics for The Acoustical
Society of America. USA, 1983
- [11] DOWLIN, A.P./ FLOWERS, J.E.W.
Sound and Sources of Sound.
Ellishorwood Publishers. GB, 1983
- [12] SPIEGEL, M.R.
Mathematical Handbook of Formulas and Tables.
Schaum's outline series.
McGraw-Hill Book Company USA, 1968

- [13] SETEVEN, S./ WARSHOFKY, F.I./ Y LOS REDACTORES DE
LOS LIBROS TIME-LIFE.
Sonido y Audición.
Offset Multicolor, S.A. México, 1971
- [14] MALECKI, I.
Physical Foundations of Technical Acoustics.
Traducción: Irena Bellert. 1ª Ed. Inglés
Pergamon Press. GB, 1969
- [15] BERANEK, L.L.
Acoustical Measurements. 2ª Ed.
Acoustical Society of America USA, 1988
- [16] BRÜEL, V.
Discrepancies Between Sound Power Measurements
in an Anechoic Chamber and a Reverberation Room.
Brüel & Kjær. Technical Review #3. Denmark, 1978
- [17] BERANEK, L.L.
Noise Control.
McGraw-Hill Book Company. USA, 1971
- [18] FAHY, F.J.
Sound Intensity.
Elsevier Applied Science. GB, 1989

2 ALGUNOS DATOS Y CARACTERISTICAS DE LA CAMARA REVERBERANTE DEL LABORATORIO DE ACUSTICA - CI. (SU CONCORDANCIA CON LAS NORMAS.)

En este capítulo se mencionarán las características técnicas de la cámara reverberante que tiene el Laboratorio de Acústica del Centro de Instrumentos-UNAM. El método para determinar la potencia de una fuente se adecuó, en gran parte, a esta cámara.

2.1 Descripción general.

La cámara reverberante es un recinto rectangular amplio, con paredes muy rígidas, gruesas, bastante pulidas y bien pintadas. Está aislado acústicamente del edificio que lo alberga, inclusive de los cimientos del mismo. El acceso a la cámara es a través de un pequeño puente flanqueado por un barandal. Sus puertas, gruesas y pesadas, son de acero, están rellenas de arena y cierran herméticamente. La ventilación consiste en tres pequeños extractores de aire, dispuestos equidistantemente, en la parte alta de la pared trasera; estos extractores funcionan sólo en caso necesario. La iluminación se logra con bombillas de filamento candente pues producen mucho menos ruido que las lámparas fluorescentes. Colgados del techo hay varios paneles o placas de material semiflexible cuya función consiste en lograr mayor difusividad en el campo; la altura a la que se encuentran las placas puede variarse manualmente mediante contrapesos¹. Cerca del piso, en la pared frontal, existe un ducto que conecta la cámara con el laboratorio de control; en el ducto caben hasta seis cables de extensión para interconectar micrófonos y aparatos de medición; también cabe una extensión, de menor calibre, para alimentar una fuente de sonido. En la parte inferior de la pared lateral derecha, en el centro, hay cuatro contactos con salida polarizada de voltaje de línea y conexión a tierra física.

¹ Se buscó una colocación adecuada de los difusores, de manera que se lograra "buena" difusividad del sonido en un amplio rango de frecuencias. Por este motivo se consideró que ya no eran imprescindibles los contrapesos; en su lugar, se pusieron unos ganchos en los cuales se pueden colgar y descolgar fácilmente los difusores.

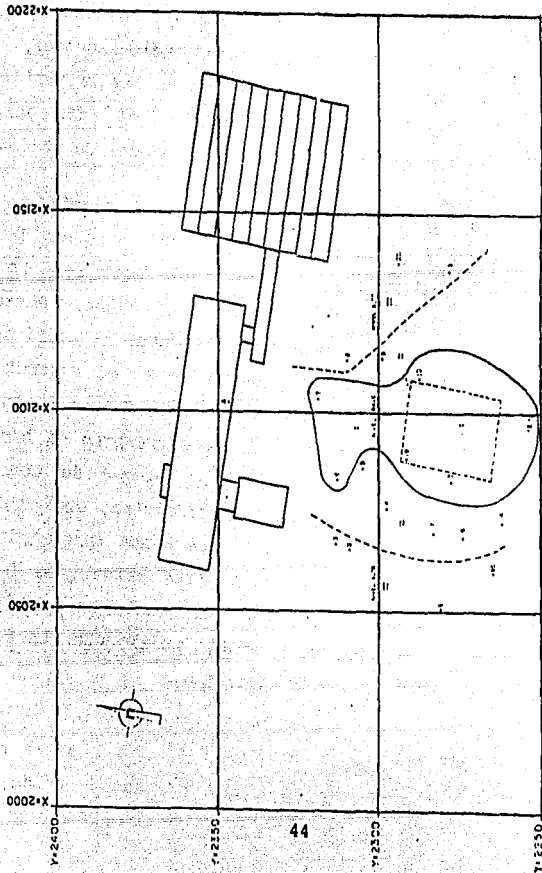
En el laboratorio de control se encuentran los instrumentos de medición necesarios y una computadora con sus periféricos. Con esto se consigue comodidad y seguridad para el investigador o el técnico cuando hace sus mediciones.

2.2 Algunas cifras.

El terreno donde se ubica el Laboratorio de Acústica, en la jurisdicción del Centro de Instrumentos, es una zona que recibe poca influencia del ruido generado en las instalaciones del propio C.I. y del ambiente exterior (i. e., vías de tránsito, otros edificios, etc.). En la figura 2.1 se presenta un plano donde se muestra, dentro de un contorno de nivel bajo de ruido (I), la ubicación actual del laboratorio. Los niveles medios y altos están indicados con II y III respectivamente. Los puntos numerados señalan la elevación de terreno en metros sobre el nivel del mar.

El recinto fue construido de concreto armado. Sus paredes tienen un grosor de 30cm; se encuentran separadas 60cm de las paredes del edificio; este también tiene paredes gruesas en la parte que rodea a la cámara. La loza superior está separada 1.5m de la azotea del edificio. La loza inferior descansa sobre seis pilastras de 1.62m de altura. Entre las pilastras y la loza, hay unos cojines de neopreno gruesos, aproximadamente 10cm.

La cámara se construyó con doble pared, con la intención de obtener un buen aislamiento del exterior. Con esto se consiguió que el ruido de fondo dentro de la cámara fuera de un nivel bajo, adecuado para hacer mediciones precisas. De paso, se logró que el ruido bajo estudio no disturbara en el resto de las instalaciones. La transmisión de ruido a través de dos paredes es menor que a través de una pared. En la gráfica 2.2 se ilustra la reducción de ruido que se logra con este artificio. A muy bajas frecuencias la diferencia apenas es notable; conforme aumenta la frecuencia de emisión se reduce mucho más el ruido con la pared doble. La línea punteada indica el límite hasta el que es posible medir el ruido transmitido; pasando el límite sólo se registra ruido de fondo. Las



PUNTO	ELEVACION
1	2299.89
2	2298.11
3	2305.00
4	2299.12
5	2298.70
6	2298.70
7	2293.38
8	2298.22
9	2298.16
10	2297.49
11	2298.76
12	2298.84
13	2298.46
14	2301.22
15	2301.43
16	2299.08
17	2298.30
18	2297.13
19	2299.12
20	2297.72

LOCALIZACION DE LOS PUNTOS PARA LA MEDICION DEL NIVEL DE RUIDO

DISEÑO

1:500 3/2/82 C. SAUCO LP-01

SIM. C. SAUCO LP-01

Fig. 2.1. Plano que muestra la orientación y ubicación del Laboratorio de Acústica del Centro de Instrumentos-UNAM. Al norte del Laboratorio se localiza el edificio principal del Centro (punto A), y al noreste, los talleres del mismo. Los niveles de ruido se indican con números romanos. La elevación está en metros sobre el nivel del mar.

paredes del recinto que trata este capítulo tienen una separación casi seis veces menor a la del ejemplo; pero son tres veces más gruesas, lo cual ayuda a tener un buen aislamiento.

Las vibraciones originadas en el exterior, también pueden afectar las mediciones. Esta es otra razón por la que se deja el espacio libre entre paredes y se pone neopreno bajo la loza del piso. Las paredes exteriores, las del Laboratorio, no pueden transmitir mecánicamente sus vibraciones a las paredes del cuarto ya que no están en contacto. Por otra parte, las transmisiones que pueda haber de las pilastras al piso de la cámara y viceversa, son amortiguadas satisfactoriamente por el neopreno.

En el interior del recinto, la altura es de 4.66m; ancho, 5.74m; largo, 8.12m (véanse los planos). Se diseñó para que su volumen fuera de 200m^3 ; sin embargo, como suele suceder, las dimensiones de la construcción difieren un poco de las proyectadas, por lo cual el volumen real del cuarto es de 217.5m^3 aproximadamente. La superficie interior cubre alrededor de 222.36m^2

Se pulieron las superficies interiores para disminuir las pérdidas de energía por rugosidad en la interfase, y además fueron pintadas con varias capas de pintura impermeable para reducir aún más su porosidad. De manera que se logró un recinto que, además de ser de paredes muy rígidas, es altamente reflejante. El coeficiente de absorción del concreto armado es pequeño, y si el concreto es pintado, el coeficiente se reduce más. En la tabla 2.1, extraída de las referencias [4] y [5], se comparan los coeficientes de bloques de concreto. Aunque la tabla no incluye al bloque de concreto armado, puede servir para hacer algunas comparaciones. Obsérvese la diferencia entre los coeficientes de el bloque hueco (prefabricado) solamente por la pintura, y la diferencia entre estos y el bloque sólido (colado). Puede afirmarse, tomando como referencia la tabla 2.1, que el concreto del recinto es altamente reflejante. La figura 2.3 muestra dibujos de ambos tipos de concreto.

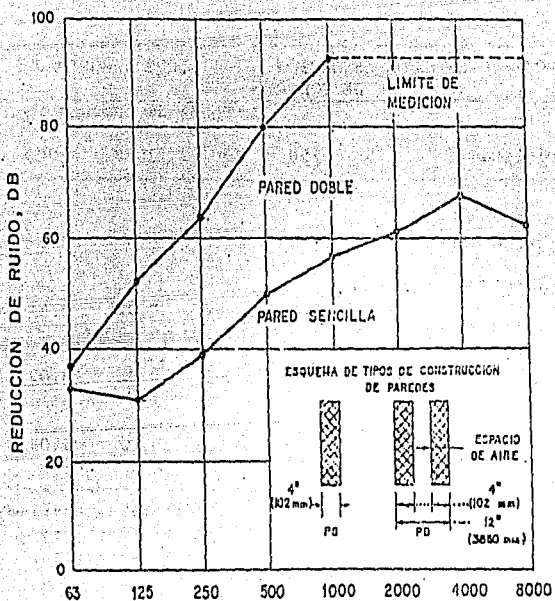


Fig. 2.2. Diferencia en la reducción de ruido lograda con una pared sencilla de concreto y una pared doble. Mediciones en bandas de octava (unidades, en la gráfica: Hz).

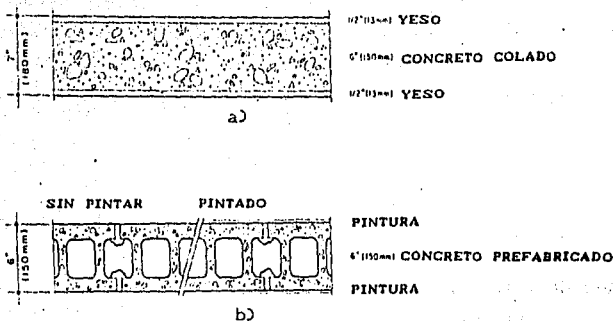


Fig. 2.3. Esquemas de bloques de concreto típicos. a) concreto colado (bloque sólido). b) concreto prefabricado (bloque hueco). [3]

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN (α) TÍPICOS APROXIMADOS DE CONCRETO						
Característica	Banda de frecuencia					
	125	250	500	1000	2000	4000
Bloque hueco sin pintar	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3
Bloque hueco pintado	0.1	0.05	0.06	0.07	0.1	0.1
Bloque colado sin pintar	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Bloque colado pintado *	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02

* Valores colectados y promediados por Carlos Rosado Rodríguez, autor de Acústica 1, producción de Editorial Trillas, México, 1974. Los valores que proporciona Rosado para otros materiales, coinciden con los que presentan otros autores.

Tabla 2.1. Valores de coeficientes de absorción para bloques de concreto. Esta tabla es para dar idea de la poca absorción sonora del concreto. El efecto de la pintura sobre el coeficiente de absorción es apreciable en el bloque hueco (prefabricado).

Algunos otros datos sobre el material de construcción (el concreto) que no son relevantes para este trabajo, pero que pueden ser de interés, son los siguientes: el módulo de elasticidad [N/m^2], es 19.6×10^9 ; la densidad de volumen, $1700 \text{Kg}/m^3$; velocidad del sonido, $3400 \text{m}/s$.

2.3 Placas difusoras.

El cuarto tiene actualmente catorce paneles de estireno ($1.2 \times 1.8 \times 0.0027 \text{m}$) colocados a distintas alturas. Cada uno está colgado de tres puntos como se muestra en la figura 2.4; como las placas son flexibles se logra mucho pandeo y, subsecuentemente, asimetría respecto a las seis superficies interiores de la cámara. Esto evita la presencia de aleteos [5][6].

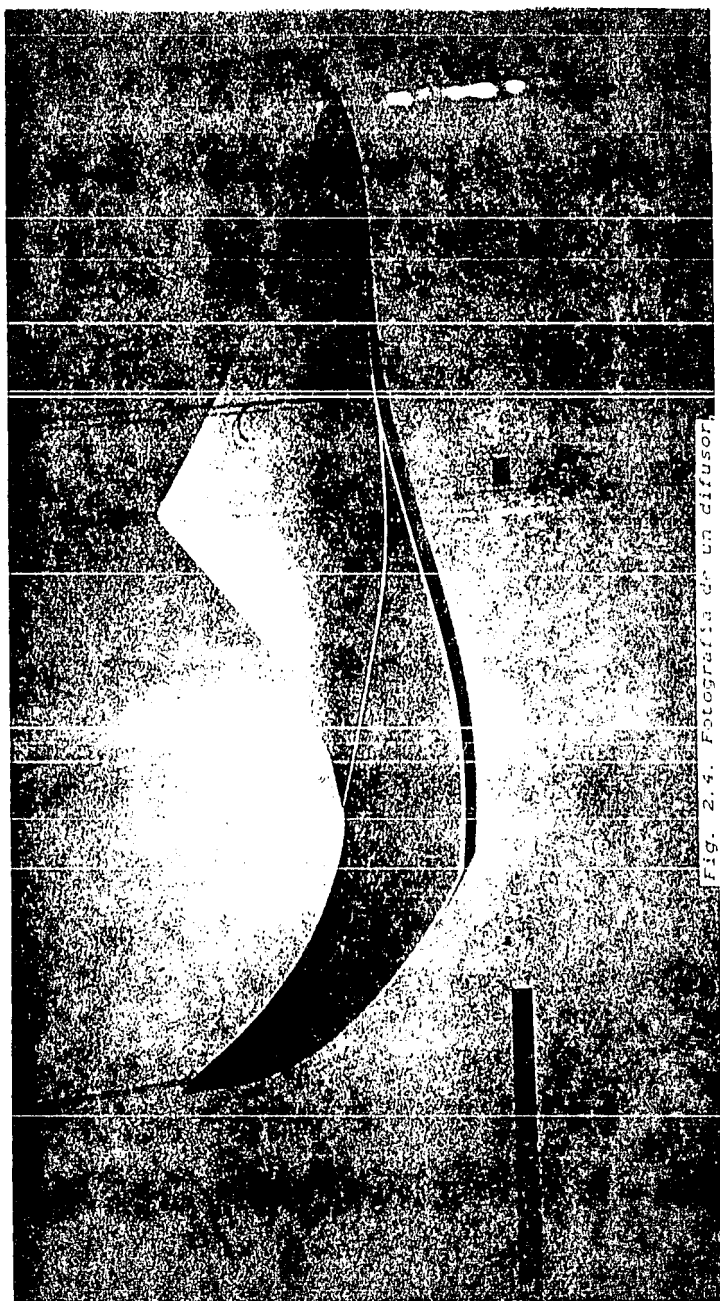


Fig. 2.4. Fotografia de un difusor.

En el capítulo anterior, se mencionó que, a bajas frecuencias, el cuarto tiene pocos modos de vibración. Además, la separación entre ellos permite que sean fácilmente distinguidos en una gráfica de frecuencia contra nivel de presión. Lo anterior significa que la energía no está igualmente distribuida en el recinto. Para lograr distribuir equitativamente la energía en todo el volumen del cuarto, se colocan placas de material que sea reflejante. El grado de absorción o reflexión depende de la consistencia del material. La superficie reflejante de cada difusor abarca un área de 4.32m^2 ; si se desea saber el área reflejante de n difusores, simplemente debe multiplicarse 4.32 por n .

El hecho de que la absorción sea algo mayor a bajas frecuencias implica que las resonancias individuales (cada modo) tengan un ancho de banda mayor llegando a traslaparse y consiguiéndose, con esto, "emparejar" el nivel de presión sonora (la diferencia entre picos y valles disminuye considerablemente). A manera de ejemplo vea la figura 2.5. El espectro de la fuente sonora, a bajas frecuencias, quedará mejor representado por el nivel de presión sonora total en el campo reverberante al incrementar ligeramente la absorción.

En las gráficas 2.6 y 2.7 se muestra una respuesta en frecuencia típica de la cámara reverberante. Comparando estas gráficas se observa que la "densidad modal" a bajas frecuencias es menor que a altas y que, a pesar de los difusores, la separación entre modos es mayor a bajas frecuencias. A frecuencias más altas resulta difícil distinguir un modo de otro; el nivel de sonido "se va emparejando" (en el capítulo 1, sección 7.2, se trata este tema). La medición de potencia en la cámara se realiza a partir de 100Hz en $1/3$ de octava; si se necesitara medir por abajo de 100Hz, los resultados obtenidos tendrían mucha mayor incertidumbre. Las gráficas 2.6 y 2.7 fueron obtenidos por personal del laboratorio [1], ulteriormente al trabajo de esta tesis, de la manera como lo muestra la figura 2.8.

En otro trabajo, desarrollado en el Laboratorio de Acústica, se analizaron distintos materiales (aluminio, acrílico y estireno) para elegir, de entre ellos, el más conveniente para las placas difusoras [1]. El material debía ser tal que "la energía absorbida del campo

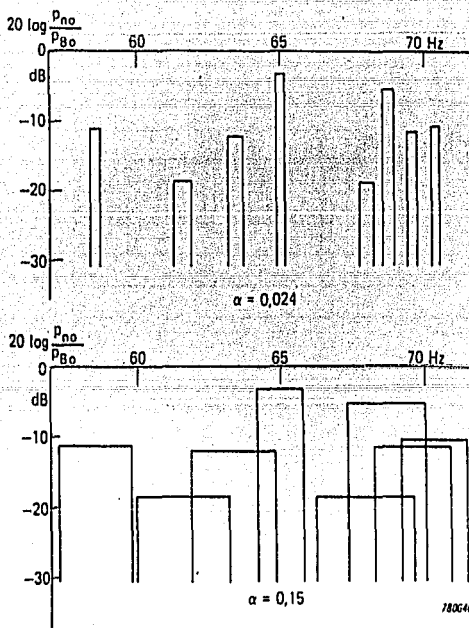


Fig. 2.5. Niveles y anchos de banda efectivos de ocho modos normales (eigenmodos) en la banda de 1/3 de octava con frecuencia central de 63 Hz.
 a) Coeficiente de absorción igual a 0.024.
 b) Coeficiente de absorción igual a 0.15.
 En el eje de las ordenadas se tiene que p_{n0} es la presión efectiva de cada modo, y p_{B0} es la presión total de la banda de un tercio de octava. [2]

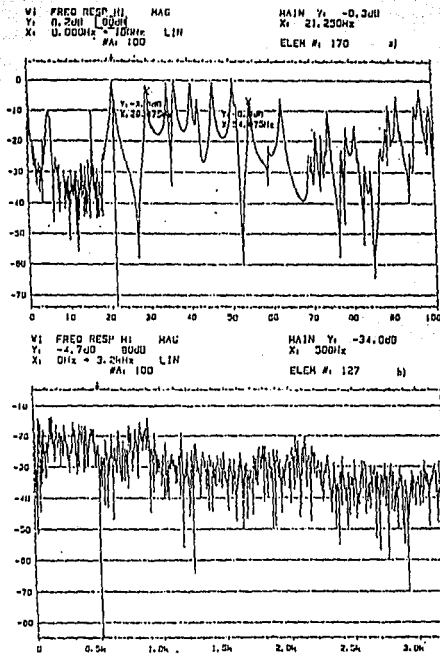


Fig. 2.6. Respuesta en frecuencia típica de la cámara reverberante. a) Ancho de banda: 100 Hz. b) Ancho de banda: 3.2 KHz. [1]

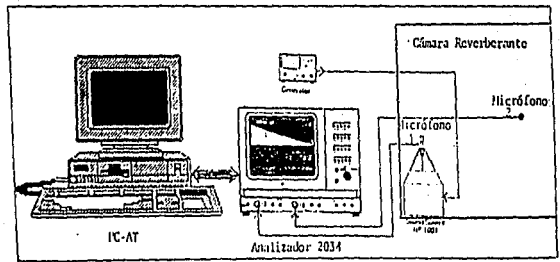


Fig. 2.7. Diseño experimental para medir el campo acústico dentro de la cámara reverberante. [1]

sonoro en forma de vibración sea devuelto en su mayor parte en forma de sonido rerrradiado por la placa. Esto se traduce en que la energía absorbida y disipada en el material debe ser mínima y la energía rerrradiada máxima". El material elegido para las placas difusoras fue el estireno.

Dieciocho placas abarcan una superficie total de 77.76m^2 . Como dato adicional, pero sin relevancia para la tesis, se encontró que la velocidad del sonido en el estireno es de 170m/s aproximadamente (entre 1400 y 1730m/s).

2.4 Diseño de la cámara.

En el apéndice, tanto de la norma ISO² 3741-1975 como de la ANSI³ S1.31-1980, se presentan guías para el diseño de cuartos reverberantes para poder determinar, con exactitud, el nivel de potencia sonora de una fuente de sonido. En general, el recinto debe tener: volumen y forma adecuados; elementos difusores apropiados; coeficientes de absorción de sonido convenientemente pequeños, en el rango de frecuencias de interés; niveles de ruido suficientemente bajos.

2.4.1 Volumen y forma.

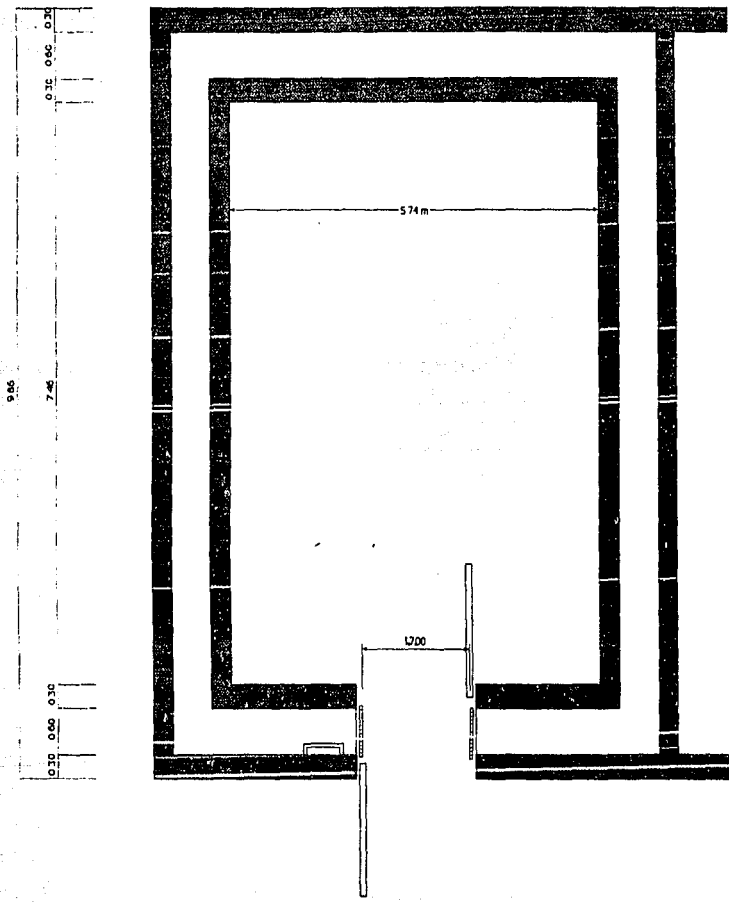
Se dijo anteriormente que la cámara se proyectó de 200m^3 . El volumen está calculado en función de la banda de interés de frecuencia más baja. Según las normas⁴, esta banda de frecuencia es 125Hz en octavas ó 100Hz en tercios de octava. También advierten que el volumen no debe exceder los 300m^3 si las mediciones se planea hacerlas a más de 3KHz , y que para volúmenes mayores a 200m^3 la absorción en el aire puede ser importante.

Las proporciones entre las dimensiones del cuarto son

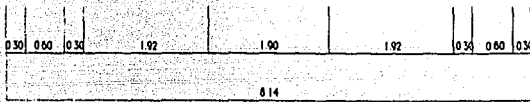
² Anexo D.

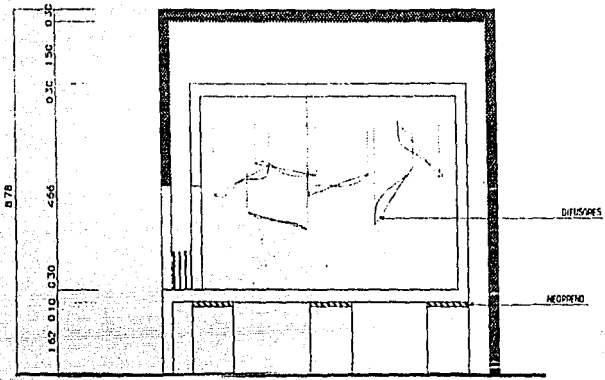
³ Apéndice A.

⁴ ISO 3741-75, en el anexo A, nota 1.
ANSI S1.31-80, apéndice A, nota 1.

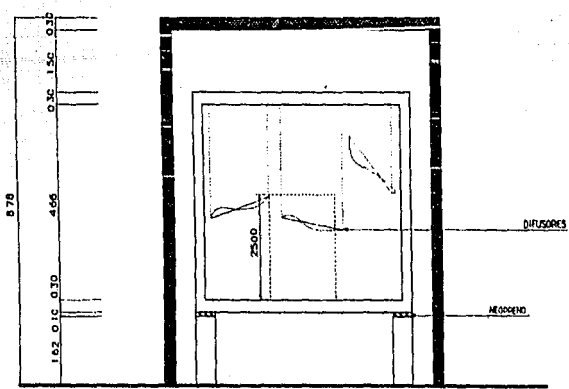
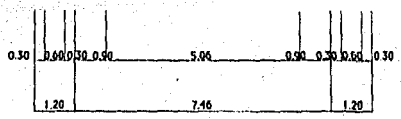


PLANTA CAMARA REVERBERANTE

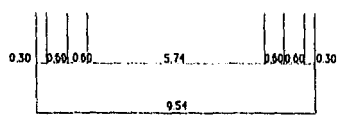


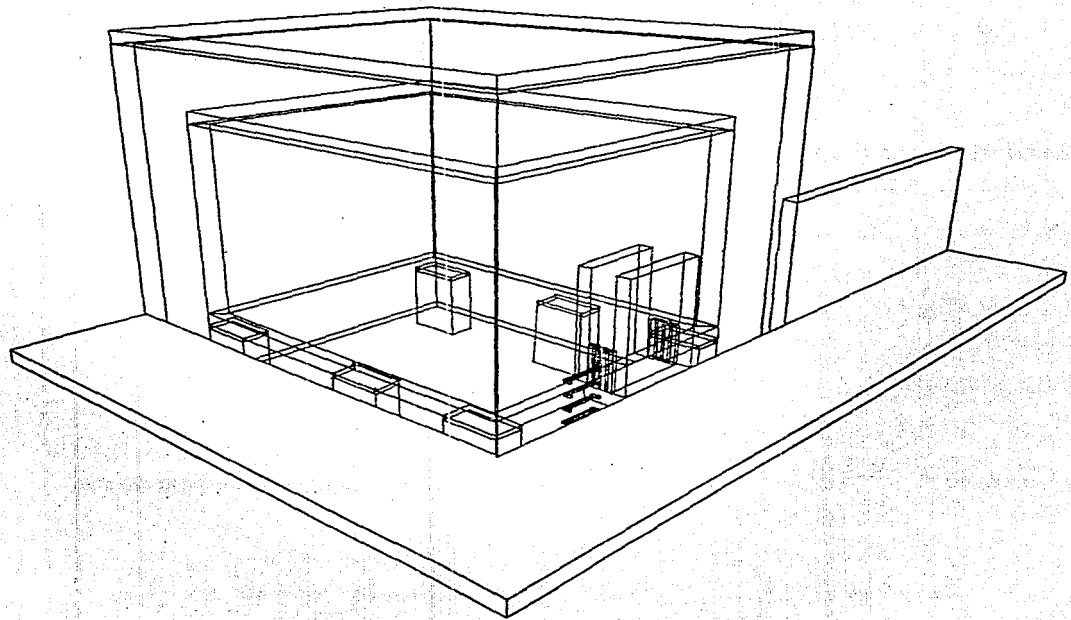


CORTE LONGITUDINAL CAMARA REVERBERANTE



CORTE TRANSVERSAL CAMARA REVERBERANTE





1:1.23:1.60, correspondientes al ancho, largo y alto (en ese orden), referidas al ancho del recinto, que es la dimensión de menor magnitud. Las dos normas listan⁵ las proporciones recomendables que debe haber entre dos dimensiones de una cámara reverberante cuyo volumen interior es aproximadamente 200m³. Las proporciones se dan entre ancho y largo y entre alto y largo; la cámara tiene ancho/largo=0.77 y alto/largo=0.62, las cuales están de acuerdo a las recomendaciones. La máxima dimensión y la mínima dimensión no exceden la relación 3:1 (límite marcado por ANSI).

2.4.2 Tiempo de reverberación.

Según se indica en ISO⁶-3741(1975), los tiempos de reverberación deben ser mayores a V/S , donde V es volumen del cuarto y S es el área total de superficies reflejantes dentro del mismo. O sea que

$$T_{60} > 0.725s \text{ con 18 difusores}$$

$$T_{60} > 0.987s \text{ con 0 difusores}$$

6

en cualquier banda de frecuencia de interés. En las tablas 2.2 aparecen los tiempos de reverberación, los cuales cumplen con este criterio. Más ilustrativa, la gráfica 2.A muestra los T_{60} de la cámara con 18 difusores y sin difusores; nótese que en la cámara vacía, como no hay elementos que impidan la formación de ondas estacionarias, estas son más abundantes haciendo que el sonido perdure más, principalmente a las frecuencias más bajas del rango de interés.

2.4.3 Absorción.

Antes de continuar, es importante hacer una aclaración: el coeficiente de absorción recibe distintos nombres según el criterio para calcularlo. Los dos más importantes y comunes son el de Sabine y el de Norris y Eyring. Sabine asumía que el sonido dentro de un recinto decae continuamente (fórmula 1.19); en cambio Eyring y

⁵ ISO 3741(1975), Anexo A, tabla 8.

ANSI S1.31(R1986), Apéndice A, tabla A2.

⁶ Sección 4.

Banda de frecuencia en 1/3 de octava [Hz]	Tiempo de reverberación [s]	* Coeficiente de absorción promedio de Sabine $\times 10^3$
100	13.82	8.4
125	17.32	6.7
160	13.75	8.5
200	11.96	9.8
250	11.09	10.5
315	9.66	12.1
400	10.60	11.0
500	11.07	10.5
630	9.20	12.7
800	8.51	13.7
1000	8.64	13.5
1250	8.17	14.3
1600	7.51	15.5
2000	6.45	18.1
2500	5.69	20.5
3150	4.78	24.4
4000	3.91	29.8
5000	3.02	38.6
6300	2.47	47.2
8000	2.06	56.6
10000	1.94	60.1

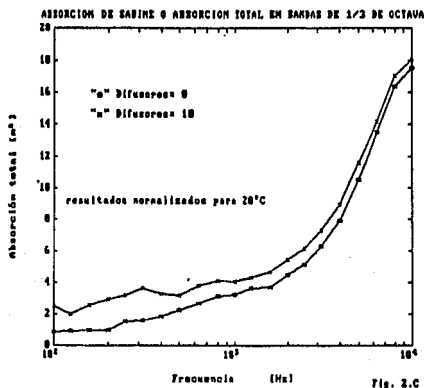
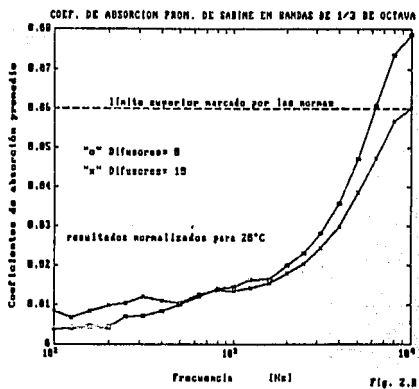
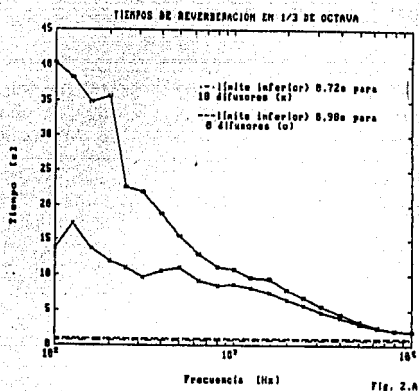
*Resultados normalizados para 20°C

Tabla 2.2. A) Tiempos de reverberación y coeficientes de absorción promedio de la cámara reverberante del Laboratorio de Acústica del Centro de Instrumentos-UNAM. Las mediciones fueron hechas a temperatura de 22°C y humedad relativa del 60%. Con 18 difusores.

Banda de frecuencia en 1/3 de octava [Hz]	Tiempo de reverberación [s]	Coefficiente de absorción promedio de Sabine X10 ⁻¹
100	40.39	3.9
125	38.25	4.1
160	34.86	4.5
200	35.66	4.4
250	22.66	6.9
315	21.91	7.2
400	18.79	8.4
500	15.61	10.1
630	13.02	12.1
800	11.18	14.1
1000	10.78	14.6
1250	9.65	16.3
1600	9.48	16.6
2000	7.88	20.0
2500	6.85	23.0
3150	5.59	28.2
4000	4.42	35.6
5000	3.34	47.1
6300	2.59	60.8
8000	2.14	73.6
10000	2.00	78.7

*Resultados normalizados para 20°C

Tabla 2.2. B) Tiempos de reverberación y coeficientes de absorción promedio de la cámara reverberante del Laboratorio de Acústica del Centro de Instrumentos-UNAH. Las mediciones fueron hechas a temperatura de 19°C y humedad relativa del 64.5% (promedio). Sin difusores.



Norris consideraban un decaimiento intermitente debido a la incidencia del sonido en las superficies reflejantes del recinto (fórmula 1.20).

Al coeficiente de absorción de la fórmula 1.19 se le conoce generalmente como *coeficiente de absorción (sonora) promedio de Sabine*, para distinguirlo del *coeficiente de absorción sonora promedio en las superficies del recinto* que es como suele denominarse al de la fórmula 1.20. Sin embargo, después de revisar varios textos y artículos, se puede uno dar cuenta que a veces se usa indiscriminadamente el nombre *coeficiente de absorción promedio* para referirse a cualquiera de los dos coeficientes. Inclusive se llegan a encontrar nombres distintos a los mencionados (p. e., en la referencia [1] del capítulo 1). Conviene señalar que -en el supuesto caso de que se conociera $\bar{\alpha}$ - si los valores de T_{60} fueran calculados con las dos fórmulas, resultarían casi iguales mientras $\bar{\alpha}$ fuese menor a 0.2 aproximadamente⁷.

Una vez hecha la aclaración, ahora hay que identificar el coeficiente que piden las normas. La norma estadounidense es muy precisa al hacer hincapié en que el coeficiente de absorción promedio debe ser el de Sabine, inclusive lo define (ver apéndice 1). En cambio, la norma internacional no es tan explícita cuando llama al coeficiente con el nombre genérico de *coeficiente de absorción promedio*. La clave para saber a qué coeficiente en especial se refiere se encuentra en las instrucciones para determinar niveles de potencia sonora mediante el método directo (ver subsección 3.2.2) en donde se indica que los tiempos de reverberación deben medirse siguiendo la publicación⁸ ISO/R 354. En esta publicación se habla del coeficiente de absorción de Sabine.

Ya que se ha verificado la coincidencia de ambas normas respecto al coeficiente de absorción, hay que aclarar que a partir

⁷ En la tabla 3.6, referencia [7] del capítulo 1, se hace una comparación de las dos fórmulas.

⁸ En la segunda edición de la norma ISO-3741 se habla de ISO-354 ya no como recomendación, sino como norma.

de este párrafo hasta el final de la tesis, cada vez que se hable de coeficiente de absorción promedio, será con referencia únicamente al coeficiente de Sabine. En el capítulo 1 no se hizo esta distinción entre los coeficientes, para no confundir al lector.

Usando los datos de T_{60} obtenidos para parte de un trabajo [1] desarrollado paralelamente a esta tesis, se calcularon los coeficientes de absorción promedio (de Sabine). En esa ocasión había dieciocho difusores dentro de la cámara (el máximo de difusores dentro de la cámara colocados según la recomendación ISO/R 354). Tiempo después, al ir desarrollando esta tesis, surgió un problema de espacio: se ponían difusores según ISO/R-354 o se ponían micrófonos según ISO-3741 (ver capítulo 5). Se encontró que ISO-3741 é ISO/R-354 eran incompatibles en lo que se refiere al aprovechamiento del espacio dentro de la cámara. Para poder proseguir con el trabajo de esta tesis se decidió quitar los difusores y dejar establecidos, dentro de la cámara, los lugares donde deberían de ponerse micrófonos; aprovechando esta situación se determinaron, de nuevo, los T_{60} de la cámara y las $\bar{\alpha}$ respectivas, pero ahora sin difusores. Los resultados están tabulados en las tablas 2.2.A y 2.2.B. Los coeficientes de absorción promedio de Sabine fueron calculados usando la fórmula 1.18. En esta fórmula se ve que la humedad relativa no afecta directamente el valor del coeficiente; no así la temperatura ambiente que influye en la velocidad de propagación del sonido (c). La velocidad del sonido se obtuvo de la siguiente fórmula:

$$c = 331.6 \times (1 + \theta/273)^{1/2}$$

por lo cual $c = 343.5\text{m/s}$ para una temperatura $\theta = 20^\circ\text{C}$.

El coeficiente de absorción promedio debe ser lo suficientemente pequeño para asegurar un campo reverberante adecuado, y lo suficientemente grande para minimizar las variaciones espaciales del sonido dentro del cuarto.

Las normas indican⁹ que los coeficientes de absorción promedio

⁹ANSI S1.31 (R1986), apéndice A.

en todo el rango de frecuencias de interés, no deben ser mayores a 0.06 excepto en frecuencias menores a 332.57Hz ($f=2000/V^{1/3}$), en las cuales conviene aumentar un poco la absorción para incrementar el ancho de banda de las curvas de resonancia de los modos normales del cuarto. En este caso, el coeficiente de absorción promedio no debe exceder la cifra de 0.16.

$$\bar{\alpha} < 0.16 \quad \text{para} \quad f \leq 332.57\text{Hz}$$

Y

$$\bar{\alpha} < 0.06 \quad \text{para} \quad f > 332.57\text{Hz}$$

No se colocó material absorbente dentro de la cámara, por lo tanto se estuvo muy lejos de llegar al límite de 0.16.

Observando cuidadosamente la gráfica 2.B parece extraño que en el rango de 1 a 10KHz el coeficiente de absorción promedio de Sabine sea más pequeño con 18 difusores que sin difusores. Lo lógico sería que a mayor cantidad de objetos dentro de la cámara, mayor absorción de energía sonora. Para comprobar este razonamiento lógico, se calculó la absorción de Sabine o absorción total (fórmula 1.16) del recinto para ambos casos (0 y 18 difusores) y se compararon los resultados (figura 2.C). En la figura 2.C se ve claramente que la absorción de Sabine es mayor en todo el rango cuando hay difusores. Entonces ¿cómo explicar el comportamiento mostrado en la figura 2.B?

Reescribiendo la fórmula 1.19,

$$\bar{\alpha}_1 = \frac{0.161V}{T_{600} \cdot S_1}$$

matemáticamente resulta sencillo darse cuenta que, en los casos en que hay 18 difusores ($i=a$) y no hay difusores ($i=b$), si los tiempos de reverberación son muy parecidos ($T_{60a} \approx T_{60b} \approx T_{60}$) a partir de cierta frecuencia, un factor importante en la variación de $\bar{\alpha}$ será el área total de superficies reflejantes (S_1). Es decir, si V es constante y T_{60} casi constante, entonces los cambios en S_1 harán que cambie el coeficiente $\bar{\alpha}_1$. El área total del recinto, sin contar los difusores, es $S_b=222.36\text{m}^2$; la superficie abarcada por 18 difusores es de 77.76m^2 , lo que significa que

$$S_a = S_b + 77.76 = 300.12\text{m}^2$$

el cual es un incremento importante en la superficie S y, en consecuencia, una disminución en $\bar{\alpha}$.

Reflexionando sobre el curioso comportamiento mostrado en la figura 2.B, puede decirse que no obstante la presencia de los difusores dentro del recinto, la mayor parte de la energía sonora es absorbida en las superficies de la cámara. La desproporción en la absorción de Sabine (A) de ambas superficies (las del recinto y las de los difusores) es considerable a partir de 1000Hz, como lo muestra la figura 2.C: por ejemplo, a 10KHz apenas hay una diferencia de 0.54 sabines métricos; esto es, la absorción de Sabine en el recinto con 18 difusores es $A_a=18.05m^2$ y sin difusores es $A_b=17.51m^2$; por lo tanto, la absorción de Sabine debida únicamente a los 18 difusores es

$$A_d = A_a - A_b = 0.54$$

o sea, casi el 3% de la absorción total en todo el recinto (A_a).

Lo anterior hace suponer que a esas frecuencias (entre 1 y 10 KHz) el quitar o el poner un difusor apenas afecta a la absorción total del recinto o al tiempo de reverberación (figuras 2.A y 2.C). Para que la absorción de Sabine en los difusores sea de magnitud considerable debe haber muchos de ellos pues, individualmente, son malos absorbentes. El hecho de que haya muchos difusores dentro de la cámara implica que el área total de sus superficies reflejantes sea significativamente importante, lo que a su vez explica que el coeficiente de absorción promediado en el área total de superficies reflejantes sea bajo (ver fórmula 1.16).

En resumen se puede decir, de manera más general, que si dentro de la cámara, a partir de cierta frecuencia, hay varios objetos de poca o muy poca absorción, cuya área total de superficies reflejantes es considerable, las ondas sonoras no incidirán, por unidad de tiempo, en las superficies del recinto tan abundantemente como lo harían si el recinto estuviese vacío. Esto implica que muy poco de la energía se pierda en dichos objetos a pesar de tan grandes superficies involucradas en conjunto, ya que individualmente son malos absorbentes de sonido. Teniendo los objetos de mallas dentro de la cámara, la energía absorbida en promedio en todas las

superficies reflejantes será menor que sin la presencia de los objetos; pero en total, se absorberá más energía.

Cambiando de tema, si se vuelve a observar la figura 2.B, será notorio que después de 6300Hz prácticamente no es debido hacer mediciones cuando la cámara está vacía, pues se sobrepasa el límite de coeficiente de absorción marcado por las normas. Cuando se tienen 18 difusores dentro de la cámara, el límite se alcanza en 10000Hz; empero, no queda espacio suficiente para colocar los micrófonos. Para resolver este dilema había dos opciones: una, era seguir el procedimiento para calificación de cámaras reverberantes (ver capítulo 3); la otra, era hacer mediciones en la banda de 10000Hz registrando los cambios que ocurrieran después de cada reinstalación secuencial de difusores. La primera solución resultaba muy laboriosa pero muy precisa. La segunda, era menos laboriosa y más práctica, aunque no tan precisa. Se decidió hacer la segunda solución.

Para evitar el tener que normalizar los resultados como en las graficas 2.A, 2.B y 2.C, había que procurar hacer las mediciones a una misma temperatura escogiendo un día en el que no hubiera cambios climáticos significativos. Las mediciones fueron hechas entre las 10:10 y las 19:15hrs., hora local, habiendo dentro de la cámara, durante todo ese tiempo, 22°C de temperatura; la humedad relativa varió entre 54 y 59%. En la tabla 2.3 se presentan los resultados obtenidos, y en las figuras 2.D, 2.E y 2.F están graficados estos resultados.

	Cantidad de difusores							
	0	2	4	6	8	10	12	14
Coef. de absorción prom. $\times 10^{-3}$	78.2 (1.3)	75.7 (1.6)	71.3 (2.5)	68.7 (2.1)	67.4 (1.2)	63.3 (2.2)	63.7 (1.5)	62.1 (1.0)
Tiempo de reverb. (s)	2.01	2.00	2.04	2.05	2.02	2.07	1.99	1.98
Absorción de Sabine (m^2)	17.38	17.48	17.09	17.05	17.31	16.80	17.51	17.57

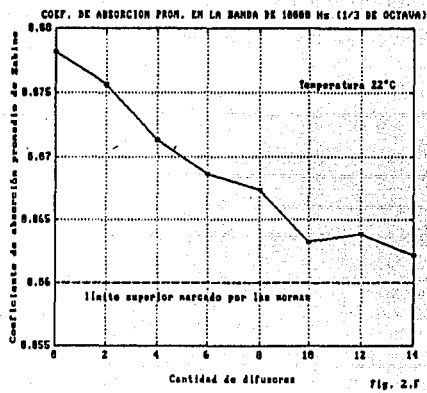
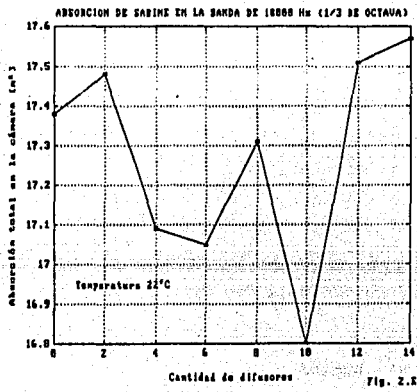
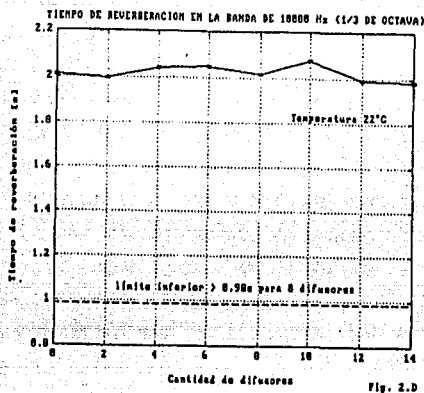
Tabla 2.3. Resultados de las mediciones hechas para determinar el límite superior del rango de frecuencias en las que se puede determinar niveles de potencia sonora. Todas las mediciones fueron en la banda de 10 KHz de 1/3 de octava. Temperatura, 22°C; humedad relativa, 54-59%. La superficie reflejante de cada difusor es de 4.32 m^2 . Entre paréntesis se indica la incertidumbre porcentualmente.

De la figura 2.D se ve que el tiempo de reverberación no baja de dos segundos hasta que con doce difusores comienza a disminuir ligeramente. El tiempo de reverberación de la cámara en esta frecuencia se encuentra muy por arriba del límite.

En la figura 2.E se aprecia un comportamiento inconsistente el cual pudo deberse a la imprecisión en las mediciones de tiempo de reverberación o a las variaciones en la humedad relativa del aire; sin embargo, de 0 a 2 y de 12 a 14 difusores se puede ver un comportamiento congruente: más difusores, más absorción.

La gráfica 2.F ilustra muy claramente las explicaciones dadas párrafos arriba acerca del comportamiento del coeficiente de absorción promedio. Esta gráfica, la que finalmente interesa, permite ver que prácticamente es posible hacer mediciones en la banda de 10KHz, sin incumplir las normas, teniendo instalados en la cámara 10 ó más difusores¹⁰. Aunque en todos los casos se rebasa el límite superior, se puede decir que, con 10 difusores o más, el coeficiente está en 0.06 si se toma en cuenta que en los textos y

¹⁰ No se hicieron mediciones con más de catorce difusores debido a que, aunque se cumpliera con las normas en el aspecto de absorción, se reduciría tanto el espacio disponible para micrófonos que ni siquiera se podría medir ruido de banda ancha.



artículos donde se presentan valores de coeficientes estos son redondeados a dos cifras decimales.¹¹ El redondeo implica un error del 6% en el peor de los casos (12 difusores) y del 3% en el mejor. Se llegó a los valores de $\bar{\alpha}$ con las incertidumbres que se indican en la tabla 2.3; es interesante notar que las mayores incertidumbres coinciden con los tiempos de reverberación más alejados de los resultados que se esperaban. De hecho, donde se registraron las mayores desviaciones típicas del conjunto de mediciones fue en las muestras para determinar esos tiempos. Por último hay que decir que la incertidumbre de T_{60} es la principal influencia en la incertidumbre de $\bar{\alpha}$.

2.4.4 Ruido de fondo.

Se recomienda¹² que el nivel de presión sonora de interés sea 12dB mayor al nivel de ruido de fondo en cada frecuencia de interés. En todas la mediciones llevadas a cabo hasta la fecha se ha cumplido con esta recomendación.

En casos críticos se permite una diferencia de 6dB, por lo menos. Cuando la diferencia es menor, las mediciones resultan difíciles y con mucha probabilidad de error.

2.4.5 Temperatura y humedad.

La temperatura y la humedad deben ser estables dentro del recinto pues la absorción de sonido por el aire varía con ellas, sobre todo a frecuencias por arriba de 1000Hz.

El producto $RH \times (\theta + 5^\circ\text{C})$ no debe variar más del 10% durante las mediciones, según ISO-3741¹³. RH es la humedad relativa (en porcentaje) y θ es la temperatura (en grados centígrados). Según

¹¹ Esto puede comprobarse fácilmente con los ejemplos resueltos de los libros de texto.

¹² ISO-3741(1975), sección 4.
ANSI S1.31(1986), sección 3.

¹³ Sección 4.

ANSI, los valores de los coeficientes de absorción no deben variar más del 10%, en las frecuencias de interés, durante las mediciones. Obviamente resulta muchísimo menos complicado registrar cambios en la temperatura y la humedad relativa que en los coeficientes de absorción; por lo cual, en este caso, el método presentado en esta tesis se apega a la advertencia de ISO.

En caso de que la variación sea mayor al 10%, se tendrá que indicar en la presentación de resultados. Dichos resultados no tendrán validez oficial.

2.5 Conclusión.

Se puede concluir que las dimensiones de la cámara, su forma, su aislamiento acústico y su baja absorción sonora cumplen con todas los preceptos, anexos en las normas ANSI S1.31-1980 e ISO 3741-1975 (ó 1988), de diseño de cuartos reverberantes. Las características acústicas de esta cámara hacen de ella un recinto adecuado para realizar mediciones de potencia sonora.

El rango de frecuencias en el que es posible determinar con precisión niveles de potencia sonora, va de 100 a 6300Hz si se tiene la cámara vacía, y de 100 a 10000 Hz habiendo en la cámara hasta 14 difusores.

2.6 Referencias.

- [1] RUIZ B., R./ PÉREZ R., S.J./ PÉREZ L., A./
CASTAÑEDA G., R./ GUTIÉRREZ R., A.
Informe Final del Proyecto "Caracterización de las Cámaras
Acústicas del Centro de Instrumentos/ IN-102589.
Centro de Instrumentos-UNAM México, 1991
- [2] BRÜEL, V.
Discrepancies Between Sound Power Measurements in an
Anechoic Chamber and a Reverberation Room.
Brüel & Kjør. Technical Review #3 Denmark, 1978
- [3] DOELLE, L.L.
Environmental Acoustics.
McGraw-Hill Book Company. U.S.A., 1972
- [4] MORENO R., J.N.
Introducción al Control de Ruido.
Brüel & Kjør. Dinamarca, 1990
- [5] KNUDSEN, V.O./ HARRIS, C.M.
Acoustical Designing in Architecture.
American Institute of Physics for the Acoustical Society
of America. U.S.A., 1978
- [6] CREMER, L./ MÜLLER, H.A.
Principles and Applications of Room Acoustics (Volume 1)
Traducción: Theodore J. Schultz.
Applied Science Publishers. G.B., 1982

3 METODOS DE PRECISION PARA DETERMINAR LOS NIVELES DE POTENCIA SONORA DE UNA FUENTE SONORA EN UNA CAMARA REVERBERANTE, CONFORME A NORMAS.

El presente trabajo de tesis fue hecho teniendo como marco de referencia las normas ISO y ANSI. Originalmente se pensó en seguir los lineamientos de ISO; sin embargo, dado que ANSI se define a sí misma como una norma "en armonía con ISO" y, en general, es mucho más clara en sus expresiones que esta última, se optó por acatar, también, la norma norteamericana. De hecho, el contenido de ambas normas es muy similar. Incluso el título de las secciones y subsecciones y el orden en el que están distribuidas es casi el mismo.

Al instrumentar el método de medición, se tuvo cuidado en verificar que al cumplir con las restricciones de ANSI también se cumpliera con ISO. Dicho lo cual, los resultados que se obtengan serán válidos tanto para la Organización Internacional para la Normalización, como para el Instituto Nacional Americano de Normas. Así es que en este capítulo se comentará sobre las normas ANSI ya sin aclarar que se trata de ellas, salvo que se señale lo contrario.

En el apéndice 1 se presenta la traducción de las definiciones que dan las normas de interés, así como las tablas que se mencionan en este capítulo. En la biblioteca del Centro de Instrumentos-UNAM se puede consultar dichas normas.

3.1 Normas para determinar niveles de potencia sonora de una fuente de ruido en una cámara reverberante.

Es preciso aclarar que para poder hacer las mediciones correctamente se necesitan dos normas. Estas son: ANSI S1.31-1980 y ANSI S1.32-1980 (sus similares son ISO 3741-88 e ISO 3742-88, respectivamente). La primera es para determinar los niveles de potencia de fuentes de ruido de banda ancha; la segunda, para fuentes de ruido de banda angosta y frecuencias discretas. Las dos normas son complementarias.

Existen varias normas que indican la manera de determinar la potencia sonora de una fuente. Cada una de ellas presenta un método

Norma estadounidense	Norma Internacional	Clasificación del método	Ambiente de prueba	Volumen de la fuente	Características del ruido	Niveles de potencia sonora obtenibles	Información opcional obtenible
SI. 31	ISO 3741	Precisión	Cámara reverberante con características específicas	Preferentemente menor al 1% del volumen interior de la cámara	Continuo, banda ancha	En bandas de una octava o de un tercio de octava	Nivel de potencia sonora ponderado en A
SI. 32	ISO 3742				Continuo, frecuencia discreta o banda ang.		
SI. 33	ISO 3743	Ingeniería	Cámara reverberante especial		Continuo, banda ancha, banda angosta, frecuencia discreta	Ponderación A y en bandas de octava	Otros niveles ponderados de potencia sonora
SI. 34	ISO 3744	Ingeniería	En recintos grandes o a la intemperie	Mayor dimensión lineal: 15 m; en otro caso, estará limitado por el ambiente de prueba	Cualquiera	Ponderación A y en bandas de octava o de una octava	Directividad y niveles de presión sonora en función del tiempo; otras ponderaciones de niveles de potencia sonora
SI. 35	ISO 3745	Precisión	Cámaras anecoicas o semi-anecoicas	Preferentemente, menor al 0.5% del volumen interior de la cámara	Cualquiera		
SI. 36	ISO 3746	Inspección	Entorno ambiente de prueba en especial	Sin restricciones limitando por el ambiente de prueba	Continuo, banda ancha, banda angosta, frecuencia discreta	Ponderación A	Niveles de presión sonora en función del tiempo; otras ponderaciones de niveles de potencia

Tabla 3.1. Normas internacionales y normas estadounidenses en las que se especifican varios métodos para determinar niveles de potencia de máquinas y emisores de ruido en general.
[4]

específico adecuado al ambiente de prueba. La tabla 3.1, donde se presenta todos estos métodos, sirve de guía para elegir el más apropiado a las necesidades y posibilidades de la medición. En las primeras dos columnas están los nombres de las normas internacionales y sus equivalentes estadounidenses. En la tercera columna se clasifican los métodos conforme a la incertidumbre que arroja la determinación de los niveles de potencia sonora mediante cada uno de ellos.

Una selección apropiada de la norma depende del tamaño y características de la fuente; la aplicación de los datos; el tipo de ambiente disponible, y la exactitud deseada.

En el caso del presente trabajo, para la selección de las normas, influyó importantemente el hecho de contar con una cámara reverberante construida expresamente para realizar trabajos de investigación y para dar, eventualmente, servicios de medición o calibración. Se descartó desde un principio la opción de instrumentar un método para campo libre o para campo libre con una superficie reflejante, pese a que los métodos más exactos son los que se aplican en dichos ambientes (tabla 3.2). El inconveniente de los métodos de precisión para campo libre es que requieren el uso de cámaras anecóicas o semianecóicas cuyo costo es muy elevado¹.

La norma ANSI S1.33 (ISO 3743) precisa, también, un campo reverberante. Pero, a diferencia de los métodos de precisión para campo reverberante, permite adaptar -de ser necesario- como cuarto de pruebas cualquier cuarto de paredes rígidas. Claro está que el cuarto que se elija debe cumplir con ciertas características acústicas prescritas en dicha norma. En cuanto a la manera de hacer las mediciones, es muy similar a la descrita en los métodos de precisión en campos reverberantes [11], aunque la incertidumbre de los resultados es mayor (tabla 3.2).

En consecuencia, si se cuenta con el ambiente adecuado para

¹En el Laboratorio de Acústica del CI-UNAM actualmente se construye una cámara anecóica diseñada de acuerdo a una norma internacional.

International Standard No.	Octave bands (Hz)	125	250	500	1 000 to 4 000	8 000	A
	1/3 Octave bands (Hz)	100 to 160	200 to 315	400 to 630	800 to 5 000	6 300 to 10 000	
3741 3742		3	2	1,5		3	-
3743		5	3	2		3	2
3744		3	2	1,5		2,5	2
3745	(Anechoic room)	1	1	0,5		1	-
	(Semi-anechoic room)	1,5	1,5	1		1,5	-
3746		-	-	-	-	-	5

Tabla 3.2. Incertidumbres máximas permisibles en la determinación de los niveles de potencia sonora de acuerdo a los distintos métodos normalizados. Las incertidumbres están expresadas como desviaciones estándar de acuerdo a como se presentan en la norma ISO 3740. [6]

métodos de precisión y, si la manera de medir del método de ingeniería es similar al método de precisión, resulta más conveniente y ventajoso usar los métodos de precisión.

Los principales inconvenientes de los dos métodos de precisión para campos reverberantes son que las mediciones deben hacerse en un laboratorio -lo cual implica transportar la fuente-, y que la fuente no debe ser voluminosa (máximo 1% del volumen interior de la cámara).

En la introducción de las normas ANSI S1.31-1980 y ANSI S1.32-1980 (ISO 3741-88 y ISO 3742-88, respectivamente) están expresadas las razones para obtener datos siguiendo sus lineamientos Textualmente son:

- "1) Clasificar aparatos conforme a su potencia sonora de salida.
- 2) Establecer medidas para control de ruido.
- 3) Predecir los niveles de presión sonora producidos por un dispositivo o una máquina en un ambiente dado."

3.2 ANSI S1.31-1980.

Esta norma describe dos métodos de precisión para determinar los niveles de potencia sonora de fuentes de ruido en cámaras reverberantes. Contiene definiciones y significados de símbolos, instrucciones acerca de la instalación y operación de la fuente, requisitos de los instrumentos necesarios, diseño y requerimientos del cuarto reverberante, instrucciones para el diseño de difusores rotatorios, características y calibración de la fuente de referencia y procedimientos para calcular la ponderación A de los niveles de potencia sonora.

Los niveles de potencia sonora pueden ser determinados mediante cualquiera de dos métodos: el Método Directo y el Método de Comparación. Sin embargo, la norma menciona que el método de comparación se usa casi exclusivamente en programas industriales de prueba, mientras que el método directo es usado frecuentemente en investigación.

La norma es aplicable únicamente para fuentes que producen sonido que está uniformemente distribuido en frecuencia y que sea continuo, por lo menos durante 30 segundos; empero, da las bases para medir y promediar los niveles de presión sonora y el uso de estos para determinar los niveles de potencia sonora para fuentes que producen sonido -también, por lo menos, durante 30 s- con componentes de banda angosta o de frecuencias discretas; de ahí que sirva de complemento para la norma ANSI S1.32 (ISO 3742).

La tabla² I contiene las desviaciones estándares permisibles de los niveles de potencia para fuentes de banda ancha.

Una de las secciones³ y un apéndice⁴ están dedicados a las instrucciones para diseño de cámaras reverberantes y a los requerimientos para poder hacer mediciones en ellas. De todo esto ya se escribió en el capítulo anterior.

Hay otra sección⁵ en la que se dictan las características que deben tener los instrumentos de medición y los sistemas que tengan que ver con la transducción y procesamiento de la señal sonora (micrófonos, preamplificadores, cables, etc.). Este tema se tocará en el siguiente capítulo.

En las dos siguientes secciones⁶ se dan instrucciones sobre dónde y cómo montar el emisor de ruido dentro del cuarto, así como los micrófonos. Además se indica la manera de hacer correcciones, la duración de los períodos de observación y el cálculo de los niveles de presión sonora promedio.

3.2.1 Niveles promedio de presión sonora.

La norma permite el uso de un micrófono móvil o de un arreglo

² ANSI S1.31-1980 (R1986); sección 1, p. 2.

³ *Ibidem*; sección 3, p. 4.

⁴ *Ibidem*; apéndice A, p. 17..

⁵ *Ib.*; sec. 4, p. 5.

⁶ *Ib.*; secciones 5 y 6, p.p. 6 y 7.

de micrófonos. Si se usan posiciones fijas de micrófonos -como en el caso de este trabajo-, los niveles (una vez corregidos) para cada banda de frecuencia de interés y para cada posición de fuente, deben ser promediados mediante la siguiente ecuación⁷:

$$L_m = 10 \log \left[\frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} 10^{L_i/10} \right] \quad (3.1)$$

donde

L_m → Nivel de presión sonora promediado sobre todas las posiciones de micrófono, para una sola ubicación de fuente; dB.

L_i → Nivel de presión sonora para la i -ésima posición de micrófono; dB.

N_m → Número de posiciones de micrófonos.

Si más de una ubicación de fuente es usada se debe promediar, entonces, sobre todas las posiciones de micrófono y sobre todas las ubicaciones de fuente⁸,

$$L_p = 10 \log \left[\frac{1}{N_s} \sum_{j=1}^{N_s} 10^{(L_m)_j/10} \right] \quad (3.2)$$

donde

$(L_m)_j$ → Nivel de presión sonora promediada sobre todas las posiciones de micrófono cuando la fuente está en la ubicación j -ésima; dB.

N_s → Número de posiciones de fuente.

Si se usa una sola posición de fuente $L_p = L_m$.

En la parte medular⁹ de las normas ANSI S1.31-1980 y ANSI S1.32-1980, se describen dos métodos, mencionados párrafos arriba, para determinar los niveles de potencia de un emisor. Ambos métodos se basan principalmente en los niveles de presión sonora medidos, promediados temporal y espacialmente, como lo indican las secciones

⁷ ANSI S1.31; p. 10.

⁸ Ib., p. 10.

⁹ Ib.; sec. 7, p. 10.

anteriores.

3.2.2 Método Directo o Absoluto.

Para este método deben tomarse en cuenta las propiedades sono-absorbentes del recinto mediante la medición del tiempo de reverberación para cada banda de frecuencia de interés, con la fuente presente. Las mediciones del tiempo de reverberación deberán hacerse de acuerdo a los procedimientos descritos en la norma ANSI/ASTM C423-77 (ISO/R 354, para la norma internacional), pero usando las ubicaciones de micrófono especificadas en la sección precedente.

El sistema de altavoces que se utilice para medir el tiempo de reverberación debe ser considerado parte del cuarto, y debe permanecer ahí durante las mediciones de presión sonora.

El nivel de potencia sonora para cada banda de frecuencia debe ser calculado de la siguiente ecuación:

$$L_w = L_p - 10 \log(T/T_0) + 10 \log(V/V_0) + 10 \log\{1 + (S\lambda/8V)\} - 10 \log(P_s/P_{s0}) - 14.0 \quad \dots(3.3)$$

aquí

L_p → Nivel promedio de la presión sonora; dB.

T → Tiempo de reverberación; s.

S → Area total de todas las superficies reflejantes del cuarto;
m².

λ → Longitud de la frecuencia central de la banda de 1/3 ó 1/1 de octava; m.

P_s → Presión atmosférica; KPa.

Los símbolo con subíndice cero son unitarios y representan cantidades de referencia, excepto $P_{s0} = 100\text{KPa}$.

Como puede verse, la fórmula (3.3) considera los efectos del volumen del cuarto y los de la presión atmosférica (altitud sobre el nivel del mar). El término que involucra λ considera el hecho de que

la densidad de energía es mayor en la cercanía de las superficies reflejantes del cuarto [11], aunque se pretende que las mediciones se hagan lejos de esas superficies.

3.2.2 Método de Comparación.

Este método consiste en medir los niveles de presión sonora de una fuente cuyas características acústicas están bien definidas por el fabricante; es decir, se tiene el dato de los niveles de potencia de la fuente en las bandas de 1/3 ó 1/1 de octava en el rango de frecuencias de interés. Una vez medidos y promediados los niveles de presión se corrigen los niveles de potencia como lo indique el fabricante. Acto seguido, se substituye la fuente de referencia por la fuente de prueba. Esta última debe colocarse donde se colocó la fuente de referencia dentro del cuarto. Se miden y promedian los niveles de presión de la fuente de prueba; se determinan sus niveles de potencia mediante la ecuación

$$L_M = L_{MR} + (L_p - L_{pr}) \quad (3.4)$$

L_M → Nivel de potencia sonora de la fuente de prueba; dB.

L_p → Nivel promedio de la presión sonora del ruido emitido por la fuente de prueba; dB.

L_{MR} → Nivel de potencia sonora de la fuente de referencia, conocida de la calibración de la fuente de referencia; dB.

L_{pr} → Nivel promedio de presión sonora de la fuente de referencia; dB.

Este método tiene la gran ventaja de que evita el medir los tiempos de reverberación para cada banda de frecuencia de interés en el rango de octavas o tercias de octava. Sin embargo, una desventaja es tener que hacer el doble de mediciones que con el método directo, pues se deben hacer unas para la fuente de referencia y otras para la fuente de prueba.

3.2.4 Información.

Ya que fueron hechas las mediciones por cualquiera de los dos

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

CAPÍTULO TRES

métodos y se realizaron los cálculos pertinentes, se debe seleccionar cierta información. Las características de esta información y la manera como debe ser clasificada, aparecen en las dos últimas secciones de la norma¹⁰, antes de las referencias. La información será destinada a reportes o a archivos.

La información que debe ser almacenada es:

- + Del emisor de ruido bajo prueba:
 - *Descripción de la fuente.
 - *Condiciones de operación.
 - *Condiciones de montaje.
 - *Localización dentro de la cámara.
- + Del ambiente acústico:
 - *Descripción de la cámara (dimensiones, tratamiento acústico de las superficies interiores, un esquema donde se muestre la situación en el interior del cuarto).
 - *Los valores de las muestras de la desviación estándar, s , calculada como parte para calificar la cámara.
 - *Temperatura del aire en grados celcius; humedad relativa en %, y presión barométrica en KPa, para todas las pruebas.
- + De la instrumentación:
 - *Equipo usado para las mediciones incluyendo nombre, tipo, número de serie y marca.
 - *Ancho de banda del analizador de frecuencia.
 - *Respuesta en frecuencia de los instrumentos.
 - *Calibración de la fuente de referencia (sólo método comparativo).
- + Datos acústicos:
 - *Orientación y ubicación del arreglo de micrófonos (puede ser incluida una fotografía o un dibujo).
 - *Corrección en decibeles, si la hay, aplicada en cada banda de frecuencia para la respuesta en frecuencia del micrófono, del

¹⁰ ANSI S1.31; secs. 10 y 11, p.p. 14 y 15.

filtro y del ruido de fondo.

- *Lecturas de los niveles de presión sonora, L_p .
- *El tiempo de reverberación como función de la frecuencia (sólo método directo) o los valores [L_{wr} - L_{pr}] como función de la frecuencia (sólo método de comparación).
- *Niveles de potencia tabulados o graficados, al entero más cercano en función de la frecuencia.

Información que debe ser reportada:

- *Fecha y hora en que todas las mediciones fueron llevadas a cabo.
- *Niveles de potencia para todas las bandas de interés y todas las condiciones de operación de la fuente.
- *Situación de la fuente de prueba respecto a las paredes, piso y techo del cuarto.
- *De la información almacenada, sólo aquella que se considere útil para alguna aplicación.
- *En el reporte debe quedar asentado que los niveles de potencia sonora fueron obtenidos de acuerdo al método directo o al método comparativo descritos en la norma.

3.2.5 Procedimientos opcionales.

Se han dejado para el final de esta exposición los comentarios sobre dos de las secciones, pues en la norma internacional se presentan como anexos. Una de las secciones¹¹ es un procedimiento de prueba para calificar el recinto y saber si es adecuado para hacer mediciones de sonido de banda ancha. La otra sección¹² trata sobre la calibración de la fuente de referencia y las características que debe tener.

Para calificar la cámara se deben medir los niveles de presión de una fuente de referencia de la manera como se indica en las secciones previas. Se debe cumplir con los mismos requisitos de

¹¹ ANSI S1.31; sec. 8, p. 11.

¹² Ib.; sec. 9, p. 12.

medición especificados para determinar los niveles de potencia; sin embargo en este caso, es necesario hacer ocho o más mediciones con un arreglo de micrófonos. Es decir, sin mover o modificar el arreglo de micrófonos, se debe colocar la fuente en ocho lugares distintos dentro del recinto. La distancia entre ubicaciones de fuente debe ser mayor a $\lambda/4$, donde λ es la longitud de onda de la frecuencia central más baja de la banda de interés. La fuente no debe colocarse en ningún lugar que esté dentro de $\pm 0.25\text{m}$ de cualquier línea central del recinto.

Para cada banda de frecuencia debe hacerse el siguiente cálculo¹³:

$$s_s = \left\{ \frac{1}{(N_s-1)} \sum_{j=1}^{N_s} [(L_{mj}) - \langle L_m \rangle]^2 \right\}^2 \quad (3.5)$$

donde

(L_{mj}) → Nivel de presión sonora promediado para todos las posiciones de micrófono cuando la fuente está en el j -ésimo lugar; dB.

$\langle L_m \rangle$ → Media aritmética de los valores (L_{mj}) promediados para todas las ubicaciones de fuente; dB.

N_s → Número de ubicaciones de fuente de referencia.

Los valores s_s no deben sobrepasar a los tabulados en la tabla¹⁴ IV.

Si la calificación del recinto es satisfactoria se puede afirmar, con mayor seguridad, que los valores de nivel de potencia sonora que se obtengan quedarán dentro de los rangos delimitados por las incertidumbres de la tabla¹⁵ I. El procedimiento es obligatorio para ANSI; opcional para ISO. Esta discrepancia no resulta problemática si se tiene en cuenta que si se calcula la desviación estándar de los niveles de potencia y resulta que estos caen dentro de los límites marcados en la tabla I, se tendrá que las mediciones

¹³ ANSI S1.31-1980 (R1986), p. 11.

¹⁴ Ib., p. 12.

¹⁵ Ib., p. 2.

son válidas y que, lógicamente, la cámara es adecuada para hacer, en ella, mediciones de sonido de banda ancha.

La fuente de referencia que se use para el procedimiento del párrafo anterior y para las mediciones por el método de comparación, debe tener ciertas características para asegurar que las mediciones de ruido que se hagan de ella cumplan con los requisitos de la norma.

La fuente de referencia no debe exceder 0.8m en cualquier dimensión; ISO reduce el límite a 0.5m. Debe tener aisladores de vibración para evitar que transmita energía vibratoria al plano o superficie donde esté montada. Debe producir ruido de banda ancha en, por lo menos, el rango de frecuencias de 100 a 10000Hz. La diferencia entre niveles de potencia adyacentes en frecuencia no debe ser mayor a ± 3 dB. El índice de directividad en cualquier banda de $1/3$ de octava, en el rango de 100 a 10000Hz, no debe exceder +9dB en un espacio semianecoico. En cuanto a la estabilidad de la fuente, los niveles de potencia, en tercios de octava para el rango de 200 a 5000Hz, no deben diferir por más de ± 0.5 dB de los niveles medidos durante la calibración. Los rangos de voltaje de línea y frecuencia de línea para los cuales los niveles de potencia no varían más de ± 0.3 dB (entre 200 y 5000Hz), deben ser indicados por el fabricante. Los rangos de temperatura, presión barométrica y humedad relativa para los cuales los niveles de potencia, en el rango de 200 a 5000Hz, no exceden ± 0.3 dB, deben ser establecidos por el fabricante; en caso de que no se incluyan estos rangos, el fabricante debe proporcionar valores de corrección.

La calibración de la fuente de referencia debe llevarse a cabo en una cámara semianecoica siguiendo las instrucciones de la norma ANSI S1.35-1979 (La norma internacional describe muy brevemente y de forma ambigua, la manera de calibrar la fuente). El proceso de calibración resulta muy laborioso y lento, afortunadamente los fabricantes de fuentes de referencia entregan, junto con su producto, una carta de calibración (ver apéndice 4) donde se indican el lugar y la fecha en que se realizó la calibración; las condiciones ambientales durante la calibración; los niveles de potencia en octavas y en tercios de octava -generalmente en el rango

de 0.1 a 10KHz 6 rangos mayores- y, el nivel de ruido ponderado en A. Todos los niveles con su respectiva tolerancia.

3.2.6 Ponderación A.

Sólo resta decir que la norma permite que en el reporte de resultados se presente opcionalmente -sin ser obligatorio- el nivel ponderado en A de la potencia sonora. La fórmula¹⁶ para calcularlo es la siguiente:

$$L_{WA} = 10 \log \left[\sum_{k=1}^K 10^{((L_w)_k + C_k) / 10} \right] \quad (3.6)$$

donde

$(L_w)_k$ → Es el nivel de potencia sonora en la k-ésima banda en octavas o tercias de octava en los rangos de 125 a 8000Hz y 100 a 10000Hz respectivamente; dB.

C_k → Factor de ponderación apropiado a la frecuencia de interés.

k → Número de bandas para las cuales hay datos disponibles en tablas (las tablas aparecen como parte de la descripción de este procedimiento). $k_{\max} \equiv K = 7$ para octavas y $K = 21$ para tercias de octava.

El resultado ponderado en A representa la magnitud del nivel de potencia relativo a la manera como percibe el oído humano, en el rango de frecuencias de interés, la presión sonora producida por la fuente.

3.3 ANSI S1.32-1980.

Esta norma especifica requerimientos, adicionales a los de ANSI S1.32-1980, para determinar los niveles de potencia sonora de fuentes de ruido de banda angosta y de frecuencias discretas. Se describen los instrumentos necesarios para cumplir con estos

¹⁶ ANSI S1.31; p. 19.

requerimientos, y se dan definiciones de algunos conceptos y significados de los símbolos usados en las fórmulas.

En esta norma se presentan los criterios¹⁷ para clasificar el ruido generado por una fuente en cada una de las bandas de frecuencia de interés; es decir, si la fuente emite ruido de banda ancha, de banda angosta o frecuencias discretas. En la norma se definen estos tres conceptos (ver apéndice 1).

La clasificación se hace estimando la desviación estándar de los niveles de presión sonora.

$$s_n = \left(\frac{1}{(N_n - 1)} \sum_{i=1}^{N_n} (L_{i1} - \langle L_{i1} \rangle)^2 \right)^{1/2} \quad (3.7)$$

donde

L_{i1} → Es el nivel de presión sonora, corregido para el nivel de ruido de fondo de acuerdo con los procedimientos de ANSI S1.31-1980, para la i -ésima posición de micrófonos; dB.

$\langle L_{i1} \rangle$ → Media aritmética de los valores L_{i1} promediados sobre todas las posiciones de micrófonos; dB.

N_n → Número de posiciones de micrófonos.

N_n debe ser igual a 6. La magnitud de s_n depende de las propiedades del campo sonoro dentro del cuarto de prueba.

Además de presentar un procedimiento para clasificar el ruido emitido por la fuente, indica la cantidad de micrófonos dependiendo del valor de la desviación y un valor constante para poder calcular la cantidad de lugares donde deberá ponerse la fuente¹⁸.

Para encontrar el número de ubicaciones necesarias para la fuente, se recurre a la siguiente inecuación:

$$N_s \geq K \cdot [0.79(T/V)(1000/F)^2 + (1/N_n)] \quad (3.8)$$

¹⁷ ANSI S1.32-1980 (R1986); p. 4.

¹⁸ Ib.; tabla III, p. 5.

donde

T → Tiempo de reverberación; s.

V → Volumen de la cámara; m³.

f → Frecuencia del tono discreto o frecuencia central de la banda en la cual se encontró una frecuencia discreta o una componente de ruido de banda angosta; Hz.

K → Constante empírica adimensional, dada también en la tabla III.

N_s → Número de posiciones de micrófonos, como indica la tabla III.

La constante de 0.79m³/s fue determinada empíricamente. El valor de N_s debe ser redondeado al entero mayor más cercano.

Una vez obtenidos la cantidad de ubicaciones de micrófono y de fuente, deben seguirse los procedimientos indicados en ANSI S1.31-1980 para medir los niveles de presión y determinar, mediante cualquiera de los dos métodos descritos (directo o de comparación), los niveles de potencia sonora para cada banda de frecuencia en el rango de interés ya sea en tercios de octava o en octavas. Si se desea, también se puede calcular el nivel de ponderación A de la potencia sonora. La información que debe almacenarse y la que debe presentarse, también se indican en esa norma.

3.3.1 Procedimiento alternativo.

Como alternativa a las instrucciones para determinar si la cámara es apropiada para hacer mediciones en ella, se pone a consideración un procedimiento de calificación para asegurar que en el ambiente de medición (recinto, arreglo de micrófonos, difusores, fuente) es factible llevar a cabo mediciones de componentes discretos de frecuencia sin revasar los límites de incertidumbre listados en la tabla¹⁹ I. Este procedimiento alternativo consiste en

¹⁹ ANSI S1.32-1980 (R1986), p. 2.

medir sonidos de frecuencia discreta usando una o más ubicaciones específicas de fuente y un arreglo de micrófonos. Las desviaciones permisibles de las muestras están listadas en la tabla²⁰ IV, de 100 a 10000Hz en 1/3 de octava y de 125 a 8000Hz en octavas. Para realizar la prueba de calificación debe usarse, entre otras cosas, un altavoz de 200mm de diámetro. Este altavoz debe ser sometido a pruebas dentro de una cámara semianecoica. Con un micrófono, a 20mm por arriba de la bocina, se debe medir el nivel de presión sonora para cada una de las 15 frecuencias señaladas en el encabezado de la tabla²¹ V. La diferencia en el nivel de presión sonora medido no debe exceder a 1dB, entre frecuencias adyacentes. Una vez elegido el altavoz, deberá ser colocado dentro de la cámara reverberante en el lugar -o lugares- donde se piense poner la fuente de prueba. También, dentro de la cámara se coloca un arreglo de micrófonos. Se hacen mediciones de nivel de presión en todas las frecuencias de la tabla V (365 frecuencias), y se calculan las desviaciones estándares. Para que el ambiente de prueba sea calificado de adecuado, las desviaciones no deben ser mayores a las que indica la tabla IV.

El procedimiento alternativo que se acaba de describir no se ha realizado hasta el momento debido a las condiciones especiales que debe tener el recinto donde se tienen que hacer las mediciones; a la gran cantidad de mediciones que deben realizarse, y a que se debe tener a disposición varios altavoces para seleccionar el más adecuado. Es un procedimiento que llevaría mucho tiempo y mucho esfuerzo llevar a cabo; pero tiene la ventaja que, si se hace correctamente, evita el estar calculando el número de ubicaciones de micrófono y de fuente cada vez que se presenten frecuencias discretas o sonidos de banda angosta en las mediciones. Se dejaría un arreglo fijo para medir los tres tipos de ruido que definen las dos normas complementarias de las que se ha estado tratando.

²⁰ Ib., p. 7.

²¹ Ib., p. 8.

3.4 Una aclaración sobre las normas que se usaron.

La tesis se empezó a desarrollar en base a la norma internacional ISO-3741(1975); no se tenía la parte complementaria (ISO-3742). Al poco tiempo, la biblioteca del Centro de Instrumentos adquirió las normas estadounidenses ANSI S1.31(R1986) y ANSI S1.32(R1986). Según se declara en estas dos normas, el contenido de ambas "armoniza" con las normas ISO correspondientes editadas en 1975 ; las normas estadounidenses, además de estar completas, resultaban un buen elemento para comparar con ISO. Había algunas diferencias en algunos límites, criterios e instrucciones, no obstante se procedió de manera que se satisficiera a ambas normas (la internacional y la estadounidense). La diferencia más importante entre ISO-3741(1975) y ANSI S1.31(R1986) era, sin duda, la fórmula para calcular nivel de potencia mediante el método directo (fórmula 3.3). El término que involucraba a la presión atmosférica, era positivo en ISO y negativo en ANSI. ¿Cómo saber cuál era la fórmula correcta si no se señala error tipográfico? Era difícil pensar que difirieran en algo tan importante. Se consultaron muchos textos y artículos. En algunos aparecía copiada la fórmula, ya fuera de una norma o de otra, pero no se desarrollaba; en otros, aparecía una fórmula casi igual excepto que no consideraban el término de la presión atmosférica; en algunos artículos anteriores a 1975 se desarrollaban versiones primitivas de la actual fórmula. Como la búsqueda resultaba inútil, se optó por desarrollar la fórmula de potencia sonora en campo reverberante, hasta llegar a la fórmula de nivel de potencia sonora en campo reverberante; para lograrlo se tomaron datos de distintos artículos (principalmente de [8], [9] y [10]). Se comprobó finalmente a que la fórmula correcta es la de la norma estadounidense.

Tiempo después, cerca del final de este trabajo, se adquirieron las ediciones más recientes, 1988, de ISO-3741 e ISO-3742. La primera de ellas presentaba muchos cambios respecto a la edición anterior. Entre esos cambios se observó con satisfacción que la nueva ISO-3741 presenta la misma fórmula para calcular niveles de potencia por el método directo, que la norma estadounidense. Además,

el contenido de las nuevas ediciones de ISO es muy similar al de las normas estadounidenses; esta similitud facilitó mucho las decisiones para instrumentar el procedimiento de medición. La única diferencia importante entre ISO y ANSI, es la manera de determinar la distancia mínima entre micrófono y fuente, para el método de comparación.

3.5 Conclusión.

Hasta el momento no existe una norma mexicana que establezca algún método para determinar niveles de potencia sonora dentro de una cámara reverberante. Sin embargo, México está adscrito al método propuesto por la Organización Internacional para la Normalización (ISO); luego entonces, todos los resultados que se obtengan por medio de los métodos descritos en las normas ISO 3741 e ISO 3742, tendrán validez tanto en el país como en las naciones que aprobaron dichas normas.

En los Estados Unidos se ha estado haciendo, desde hace muchos años, investigación importante en Acústica. De hecho, los métodos para determinar los niveles de potencia de un emisor de ruido en una cámara reverberante, han sido desarrollados, en gran parte, por científicos e ingenieros norteamericanos. Es importante tener en cuenta la influencia norteamericana, en cuanto a normas se refiere, debido al prestigio científico de que goza la Sociedad Americana de Acústica (ASA), encargada de la elaboración de las normas ANSI S1.31 y ANSI S1.32; también por nuestra vecindad con los Estados Unidos, la cual propicia mayor comunicación con investigadores de ese país.

Afortunadamente, las normas internacionales y las normas norteamericanas que sirvieron de guías para instrumentar el método que se presenta en esta tesis, concuerdan en casi todos sus preceptos. Esta armonía entre ambas normas permite que los resultados, obtenidos mediante el método instrumentado en el Laboratorio de Acústica del CI-UNAM, sean presentados de acuerdo a una u otra norma según convenga al investigador o técnico.

3.6 Referencias.

- [1] ISO 3741 (1988) Acoustics. Determination of Sound Power Levels of Noise Sources. Precision Methods for Broad-band Sources in Reverberation Rooms. 2^a Ed.
International Organization for Standardization.
Switzerland, 1988
- [2] ISO 3742 (1988) Acoustics. Determination of Sound Power Levels of Noise Sources. Precision Methods for Discrete-frequency and Narrow-band Sources in Reverberation Rooms. 2^a Ed.
International Organization for Standardization.
Switzerland, 1988
- [3] ISO 3741 (1975) Acoustics. Determination of Sound Power Levels of Noise Sources. Precision Methods for Broad-band Sources in Reverberation Rooms. 1^a Ed.
International Organization for Standardization.
Switzerland, 1975
- [4] ANSI S1.31 (R1986) Precision Methods for the Determination of Sound Power Levels of Broad-band Noise Sources in Reverberation Rooms.
American Institute of Physics for the Acoustical Society of America. USA, 1986
- [5] ANSI S1.32 (R1986) Precision Methods for the Determination of Sound Power Levels of Discrete-frequency and Narrow-band Noise Sources in Reverberation Rooms.
American Institute of Physics for the Acoustical Society of America. USA, 1986
- [6] ISO/DIS 3740 Acoustics. Determination of Sound Power Levels of Noise Sources. Guidelines for the Use of Basic Standards and for de Preparation of Noise Test Codes.
Draft International Standard Switzerland, 1976
- [7] ISO 2204 Acoustics. Guide to International Standards on the Measuremen of Airborne Acoustical Noise and Evaluation of Its Effects on Human Beings.
International Organization for Standardization.
Switzerland 2^aEd. 1979
- [8] YOUNG, W.R.
Sabine Reverberation Equation and Sound Power Calculations.
J. Acoust. Soc. Am., 31 #7, pp 912-921. USA, 1959
- [9] LUBMAN, D.
Precision of Reverberant Sound Power Measurements.
J. Acoust. Soc. Am., 56 #2, pp 523-533. USA, 1974
- [10] WATERHOUSE, V.R.
Interference Patterns in Reverberant Sound Fields.
J. Acoust. Soc. Am., 27 #2, pp 247-258. USA, 1955

CAPÍTULO TRES

- [11] BERANEK, L.L.
Noise and Vibration Control.
McGraw-Hill Book Company
USA, 1971
- [12] HASSALL, J.R./ ZAVERI, R.
Acoustic Noise Measurements.
Brüel & Kjær.
4^a Ed.
Denmark, 1979



4 DISPOSITIVOS E INSTRUMENTOS PARA LAS MEDICIONES

Los instrumentos necesarios para medir, también deben cumplir con ciertos requisitos normalizados. De entre los instrumentos disponibles en el Laboratorio de Acústica CI-UNAM, se eligieron los más convenientes. Se explicarán los criterios por los cuales fueron seleccionados.

El uso de una computadora es necesario para poder aplicar el método presentado en esta tesis. Si se prescindiera de la primera, el trabajo de medición y promediación sería excesivamente tedioso; se llevaría a cabo en varias semanas, y se requeriría más de una persona para hacerlo.

La computadora controla a todos los instrumentos de medición; demanda datos, los procesa y entrega resultados. Todo esto es posible gracias a un programa desarrollado, precisamente, para tal fin. El programa está escrito en lenguaje de alto nivel.

4.1 Instrumentos de medición.

Básicamente se necesitaría un micrófono con su respectivo preamplificador, un filtro paso bandas y un medidor de niveles de presión sonora. Sin embargo, para seleccionar los instrumentos en cantidades y con cualidades apropiadas, hay que tomar en cuenta las características de la cámara, los aparatos que hay disponibles en el laboratorio y las restricciones impuestas por las normas.

4.1.1 Micrófonos.

De la gran variedad de micrófonos que se conocen, los que han demostrado ser los más eficientes para mediciones precisas, son los piezoeléctricos y los de condensador (referencia [3] del capítulo 1).

Ambos micrófonos tienen una respuesta en frecuencia casi uniforme en el rango audible, y su sensibilidad se mantiene estable por mucho tiempo. El micrófono de condensador generalmente da mediciones más finas y consistentes, pero su precio es mucho más

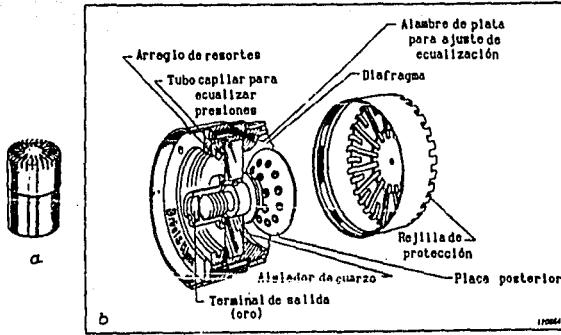


Fig. 4.1. Micrófono B&K-4166. a) Aspecto externo. b) Corte longitudinal. [4]

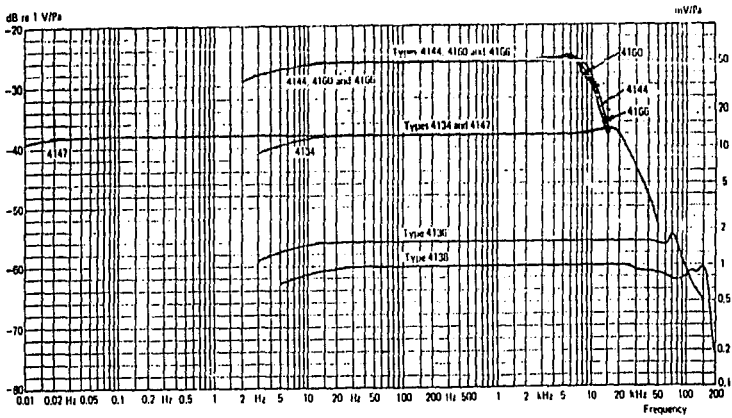


Fig. 4.2. Respuestas en frecuencia típicas de diferentes micrófonos de medición de la marca B&K. [4]

Calibration Chart for
Condenser Microphone
Cartridge Type 4166
Serial No. 1201096



Open Circuit Sensitivity at 1013 mbar, 23°C and
95% RH,
-22.6 dB re 1 V per Pa or -86.8 mV per Pa

The Calibration is traceable to the National Bureau of
Standards, Washington D.C.

Open Circuit Correction Factor
K_o's = -2.6 dB

Cartridge Capacitance
C = 22.3 pF

Leakage Resistance based on 95% relative humidity
= 13 MΩ

Frequency Response Characteristics
The 200 Hz curve of the open circuit pressure response
is 77 dB re 10⁻⁵ N/m² at 250 Hz
The 100 Hz curve of the open circuit pressure response
is 75 dB re 10⁻⁵ N/m² at 250 Hz

1. Between the span of the generator and span of the load from
40 to 100 Hz, the open circuit pressure response is 77 dB re 10⁻⁵
N/m² at 250 Hz.
2. At 100 Hz, the open circuit pressure response is 75 dB re 10⁻⁵
N/m² at 250 Hz.
3. At 100 Hz, the open circuit pressure response is 75 dB re 10⁻⁵
N/m² at 250 Hz.

MSK-13

Comments of Tester:

Frequency Range: 200 Hz
Frequency: 200 Hz
Amount Pressure: 1000 mbar
Relative Humidity: 97 %
Temperature: 23 °C

Date: 11 Jun 1973 Signature: [Signature]

Summarized Specifications

Outside Dimensions
0.34 in (11.2 mm) with mounting ring
0.30 in (7.6 mm) without mounting ring
Cable Mounting Thread: 1/8 in UNF-28
0.30 in (7.6 mm) UNF-28
Frequency Response Characteristics (Reference Pressure)
Frequency Range: 20 to 20,000 Hz
Level: 1000 mbar (±2 dB) as determined by
pressure calibration check, verified at between 1 Hz and
2 Hz
Resonance Frequency: 200 Hz, 114 Hz (over-damped)
Equivalent Air Volume: 40 cm³ at 1013 mbar
and 23°C
Ambient Pressure Coefficient
Approx. -0.01 dB/mbar at 1013 mbar and 23°C
Temperature Coefficient: approx. -0.007 dB/°C
Range: -10 to 50°C at 250 Hz
Humidity Coefficient: approx. 0.20 dB/% RH, at 23°C
and 250 Hz
Dynamic Range: Sound Pressure Level below which the
total harmonic distortion remains less than 2%, 140 dB

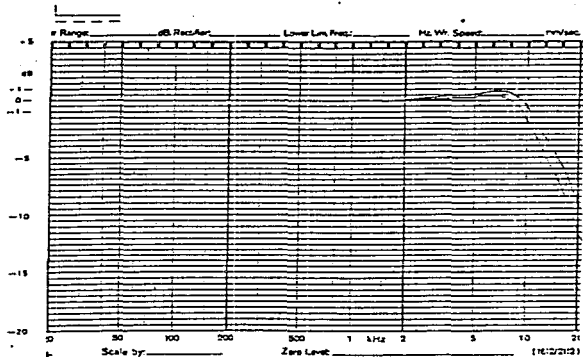


Fig. 4.3. Carta de calibración de uno de los micrófonos B&K-4166 utilizados en el procedimiento.

CAPÍTULO CUATRO

elevado debido a su construcción. Al contrario de los micrófonos piezoeléctricos, los de condensador son muy sensibles al polvo y a la humedad, por lo que se recomienda guardarlos en lugares secos y limpios. Los micrófonos de condensador pueden trabajar con temperaturas elevadas; los piezoeléctricos no. Los micrófonos piezoeléctricos son sensibles tanto a sonido como a vibraciones; los de condensador no responden tan sensiblemente a las vibraciones.

De acuerdo a la brevísima comparación hecha arriba, conviene más usar micrófonos de condensador para medir presión sonora a temperatura ambiente en un campo reverberante.

La norma ANSI S1.31 dice¹ que el micrófono debe tener los requisitos necesarios para poder ser usado en un medidor de nivel de presión sonora del Tipo 1 especificado en la norma ANSI S1.4-1971 (R1976) y recomienda un micrófono de 13mm (1/2") de diámetro. En cambio, ISO 3741 es más explícita; dice² que debe ser usado un micrófono de condensador o cualquier otro con precisión, estabilidad y respuesta en frecuencia equivalentes. La respuesta en frecuencia del micrófono debe ser plana en el rango de frecuencias de interés para sonido aleatorio incidente. ISO sugiere el uso de micrófonos de 1" usados en medidores de nivel sonoro que cumplan con lo impreso en la Publicación 179 de IEC.

Tomando en cuenta ambas consideraciones, lo siguiente es recurrir a un catálogo de micrófonos de medición [4]. El fabricante proporciona datos técnicos y una explicación sinóptica de cómo funcionan y para qué ambiente de prueba son adecuados sus micrófonos.

Se decidió que los micrófonos más apropiados son los Micrófonos de Medición Tipos 4143 y 4166, ambos de 1/2" de diámetro, fabricados por Brüel & Kjær.

El micrófono 4143 responde en forma plana desde 10 hasta

¹ P. 5.

² Sección 5.3.

20000Hz. Su sensibilidad es de 13.4mV/Pa aproximadamente.

El 4166 tiene prácticamente una respuesta plana desde 10Hz hasta 10KHz, con sensibilidad de 50mV/Pa (equivalente a -26 dB re 1V/Pa). A partir de 2KHz su sensibilidad cambia progresivamente hasta poco más de 1dB re 1V/Pa, en casi 7KHz; de 7 a 10 KHz, su sensibilidad vuelve a disminuir gradualmente hasta el nivel que tenía en la respuesta plana. A mayores frecuencias su sensibilidad decrece abruptamente.

El 4143 resulta ser el micrófono apropiado debido al rango de frecuencias en que opera; sin embargo, en el Laboratorio de Acústica sólo se tienen dos de estos micrófonos. Esta cantidad de micrófonos es insuficiente para instrumentar los métodos para determinar niveles de potencia sonora. A corto plazo se tiene planeado adquirir más de estos micrófonos. Como alternativa, se eligió el micrófono 4166, el cual es aceptable si se hacen mediciones hasta 10KHz. Usualmente, las mediciones de potencia se hacen hasta 8KHz.

El fabricante entrega, junto con cada micrófono, una carta de calibración (figura 4.3). En dicha carta se muestra una gráfica de la respuesta en frecuencia del micrófono. Junto a la gráfica se dan las especificaciones del mismo.

4.1.2 Preamplificador.

Para que los micrófonos de Brüel & Kjør tengan buen desempeño, deben utilizarse con preamplificadores de la misma marca. Como hay preamplificadores de distintos tipos, el fabricante recomienda el más adecuado para el micrófono que se vaya a utilizar. Para el micrófono 4166 (o el 4134) se recomienda usar el Preamplificador Tipo 2639.

El 2639 es ideal para mediciones generales de niveles de sonido. Es compacto y pequeño. Tiene alta impedancia de entrada, baja impedancia de salida; un amplio rango dinámico. Puede ser utilizado, mediante adaptadores, con micrófonos de distintos diámetros. Trabajan en un rango grande de temperatura, humedad y otros efectos ambientales. Se alimenta con 120V CD.

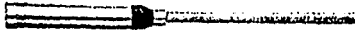


Fig. 4.4. Aspecto del ensamble micrófono-preamplificador. [4]

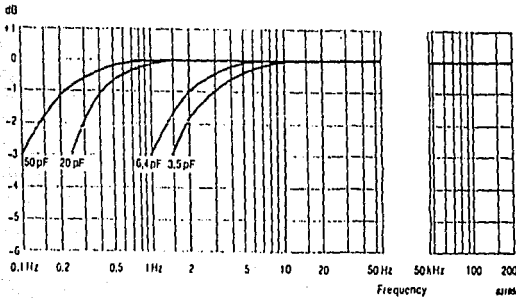


Fig. 4.5. Respuesta en frecuencia típica del preamplificador B&K 2639 para diferentes capacitancias de transductor (micrófonos) conectadas a la entrada. Al micrófono 4166 le corresponde una capacitancia de 20 pF. [4]

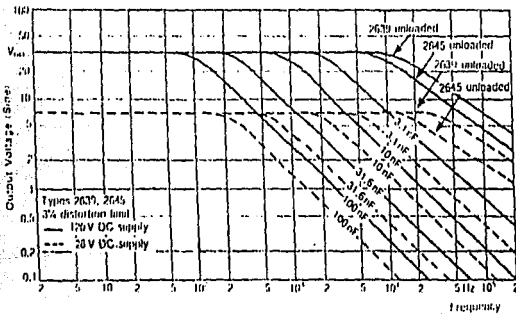


Fig. 4.6. Límite superior del rango dinámico (3% de distorsión) debido a la capacitancia de carga en función de el voltaje de salida y la frecuencia. Las gráficas se presentan para dos tipos de preamplificadores y para dos voltajes de alimentación distintos. [4]

CAPÍTULO CUATRO

Debido a su alta impedancia de entrada, virtualmente no presenta carga al micrófono (utiliza un FET en la etapa de entrada). La baja impedancia de salida permite la conexión de cables de extensión largos entre el preamplificador y un instrumento de medición.

Tiene integrado un elemento calefactor en la entrada para prevenir la posibilidad de condensación en el micrófono cuando es usado en ambientes muy húmedos. El contacto de la entrada es de oro blanco y está montado en un resorte para asegurar una buena conexión eléctrica con el cartucho del micrófono y disminuir, así, el nivel de ruido por contacto.

La respuesta en frecuencia y las características de salida del preamplificador dependen de la capacitancia del transductor (micrófono) conectada a la entrada del preamplificador, y de la carga capacitiva (debida a los cables de extensión) conectados a la salida.

La figura 4.5 muestra la respuesta en frecuencia a señales cuyos niveles de presión corresponden a voltajes de entrada menores al máximo permisible para el preamplificador. A la salida del preamplificador no fueron conectados cables de extensión. El micrófono de media pulgada tiene una capacitancia aproximada de 20pF. Nótese que la respuesta cubre un rango amplísimo de frecuencias.

La carga capacitiva, debida a los cables de extensión, influye en el valor del límite superior de la respuesta en frecuencia del preamplificador. La figura 4.6 muestra la influencia en el límite superior de la frecuencia de corte, correspondiente a diferentes capacitancias de transductor y a diferentes capacitancias de carga. Para comprender mejor esta gráfica, se deben conocer las características de los cables de extensión (vea la siguiente subsección). Para determinar la respuesta en frecuencia total del preamplificador, con cables de extensión y micrófono conectados, se debe usar esta gráfica junto con la anterior. Como se observa, el rango es amplísimo y lo que interesa es que el preamplificador tenga

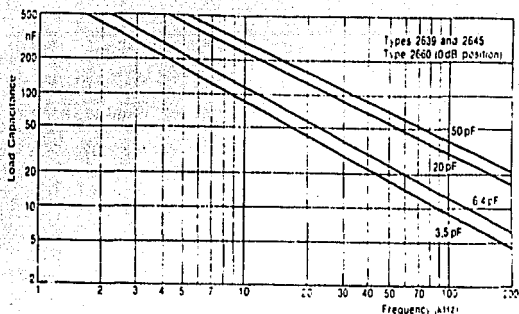


Fig. 4.7. Límite superior (-1dB) en función de la carga (capacitancia del cable de extensión) para los preamplificadores 2639, 2645 y 2660, con diferentes capacitancias de transductor conectadas a la entrada. [4]

Extension Cable	AO 0027	AO 0028	AO 0029
Length	3 m (10 ft.)	10 m (33 ft.)	30 m (100 ft.)
Diameter	6 mm (1/4")	9 mm (3/8")	9 mm (3/8")
Capacitance to ground of the signal conductor	300 pF (100 pF/m)	570 pF (57 pF/m)	1700 pF (57 pF/m)

Fig. 4.8. Tabla comparativa de longitud, diámetro y capacitancia a tierra del conductor de señal, para tres cables de extensión de la marca B&K. [4]

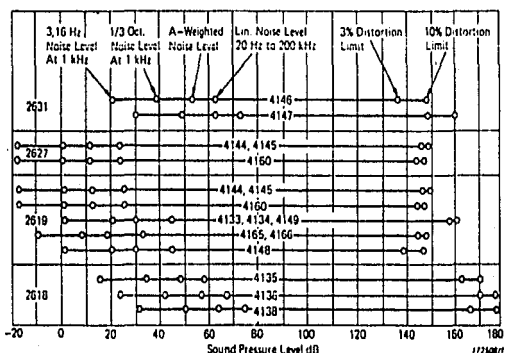


Fig. 4.9. Rangos dinámicos de micrófonos y preamplificadores B&K. El preamplificador 2619 es similar al 2639. [9]

una respuesta plana en el rango audible de frecuencias.

Si la corriente máxima de salida especificada para el preamplificador es excedida, la señal será distorsionada. La figura 4.6 presenta el límite superior del rango dinámico. El límite se determina cuando se presenta distorsión (disminución del 3% en la amplitud) debido a la capacitancia de carga (longitud del cable) como función del voltaje de salida y de la frecuencia. Es notorio que el cable de extensión debe ser exageradamente largo para producir distorsión a 100Hz. Teniendo el preamplificador sin carga, la señal alcanza mayores frecuencias, sin distorsionarse, hasta poco más de 10KHz. Al poner en práctica el método de esta tesis, si el voltaje a la salida del preamplificador se tiene razonablemente por abajo del límite superior del rango dinámico, la señal se mantendrá sin distorsión muy por arriba de 10KHz (cuando mucho se usan 20m de cable).

4.1.2.1 Cables de extensión.

Los cables de extensión utilizados en las mediciones son del Tipo AO 0028 de Brüel & Kjær. Estos cables presentan capacitancia muy baja y un aislamiento magnético excelente. Sus características capacitivas se presentan en la tabla 4.8. Su influencia en el preamplificador se muestran en las gráficas 4.6 y 4.7; para un sólo cable es necesario extrapolar.

4.1.3 Multiplexor de canales.

Para las mediciones se usa el Multiplexor de Ocho Canales Tipo 2811 de Brüel & Kjær. Este instrumento permite un control secuencial de hasta ocho micrófonos; además proporciona el voltaje de alimentación necesario para los preamplificadores, y el voltaje de polarización adecuado para los micrófonos. Pueden habilitarse o deshabilitarse los canales que se desee. El control sobre el tiempo de utilización de cada canal puede ser manual, automático o externo. El nivel máximo de salida es de $5V_{pico}$ (cuando se excede este voltaje, se enciende un LED como advertencia). Su respuesta en frecuencia va de 2Hz hasta 200KHz; en este rango no varía más de 0.5dB. En el rango de frecuencias audibles, 20Hz a 20KHz, la

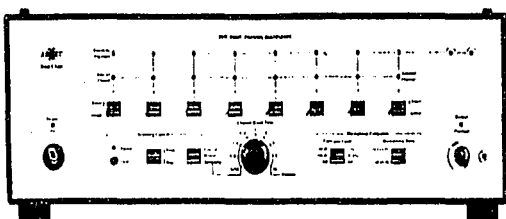


Fig. 4.10. Panel frontal del multiplexor de 8 canales Tipo 2811 de Brüel & Kjær. [1]

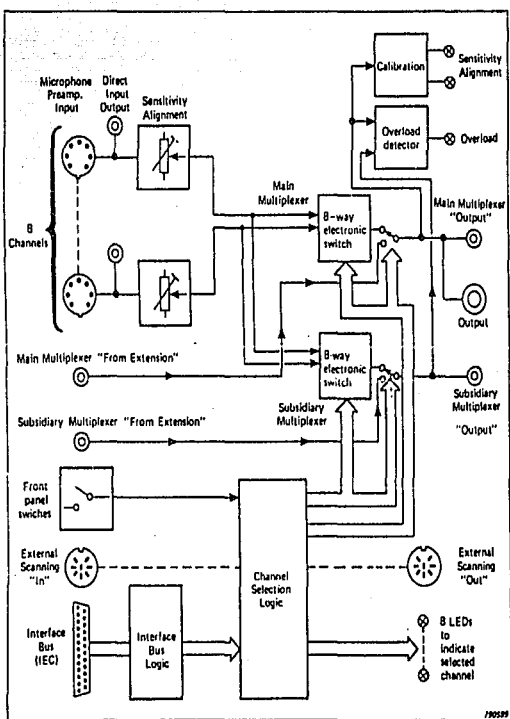


Fig. 4.11. Diagrama a bloques del multiplexor B6K-2811. [1]

respuesta es plana con variaciones máximas de $\pm 0.1\text{dB}$. Cada canal esta provisto de un ajuste de sensibilidad, en un rango de $\pm 3\text{ dB}$, dependiendo de la sensibilidad del micrófono.

El tiempo durante el cual se utiliza un canal habilitado, puede controlarse a discreción mediante una palanca que, al ser accionada, inhibe el canal habilitado e instantáneamente desinhibe el siguiente canal habilitado.

El multiplexor tiene integrado un cronómetro que limita el tiempo de medición para cada canal habilitado. Una vez que termina el tiempo de medición a través de un canal, este se inhibe para permitir hacer mediciones, durante el mismo tiempo, a través del siguiente canal habilitado. El proceso se repite hasta terminar con el último canal habilitado, para comenzar de nuevo con el primer canal. Se pueden establecer nueve tiempos distintos para el cronómetro (1/16 hasta 16s) mediante una perilla en la parte frontal del aparato.

El tiempo de barrido y las demás funciones del multiplexor, pueden ser controlados externamente por una computadora gracias a una interfase IEC de 25 vías que cumple con los requerimientos de la Publicación 625-1 IEC, y de las normas IEEE 488 y ANSI MC1.1-1975.

4.1.4 Filtro Paso-bandas.

En la norma ANSI³ S1.31-1980 dice que los filtros para bandas de octava deben ser de la Clase II y los filtros para bandas de un tercio de octava deben ser de la Clase III, según lo indica la norma ANSI S1.11-1966 (R1971). Por otro lado, ISO⁴ 3741-88 dice que los filtros para bandas de 1/3 o de 1/1 de octava deben cubrir los requisitos de la Publicación 225-IEC; además, las frecuencias centrales deben corresponder a las señaladas en ISO/R 226.

Un filtro que cumple con todos estos requisitos es el Filtro

³ P. 6.

⁴ Sección 5.5.

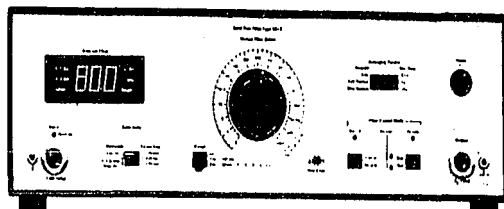


Fig. 4.12. Panel frontal del filtro paso banda por pasos de octava y de un tercio de octava, Tipo 1617 de Brüel & Kjør. [2]

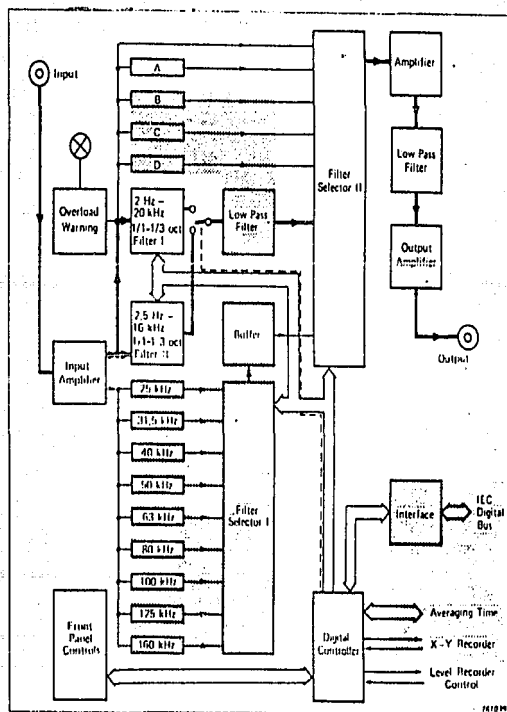
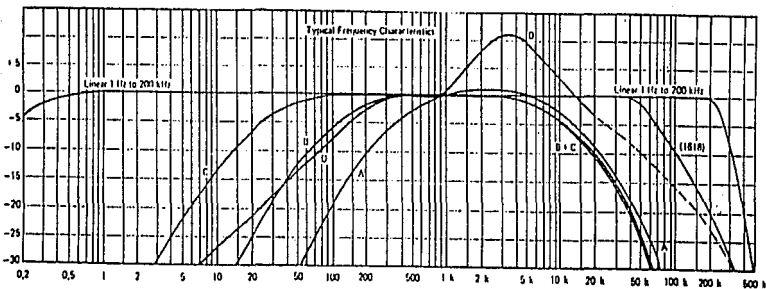


Fig. 4.13. Diagrama a bloques del filtro paso bandas BK-1617. [2]



Filter I Centre Frequency Hz	Filter II Centre Frequency Hz	1/3 Octave Bandwidth at 3,7 dB Hz Approx.
2		0,46
	2,5	0,50
3,15		0,73
	4	0,92
5		1,16
	6,3	1,45
8		1,83
	10	2,30
12,5		2,90
	16	3,70
20		4,80
	25	5,8
31,5		7,3
	40	9,2
50		11,6
	63	14,5
80		18,3
	100	23
125		28
	160	37
200		48
	250	60
315		73
	400	92
500		116
	630	145
800		183
	1000	230
1250		290
	1600	370
2000		480
	2500	580
3150		730
	4000	920
5000		1160
	6300	1450
8000		1830
	10000	2300
12500		2900
	16000	3700
20000		4800
		5800
31500		7300
		9200
40000		11600
	Additional 1/3-octave filters in 1617	14500
50000		18300
		23000
80000		29000
		37000
100000		
125000		
160000		

Fig. 4.14. Características típicas en frecuencia de las distintas redes de ponderación y de la función lineal. [2] (Arriba.)

Fig. 4.15. Frecuencias centrales de los filtros I y II (ver figura anterior), y ancho de banda de cada una de las bandas de un tercio de octava. Los números en negritas son las frecuencias centrales de las bandas de una octava. [2] (Al lado.)

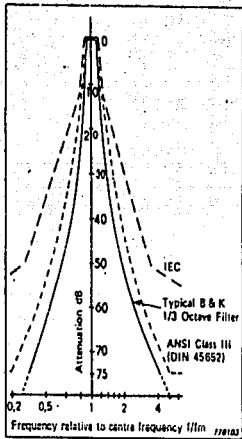


Fig. 4.16. Respuesta típica de el filtro de tercios de octava comparada con las respuestas recomendadas por algunas normas. [2]

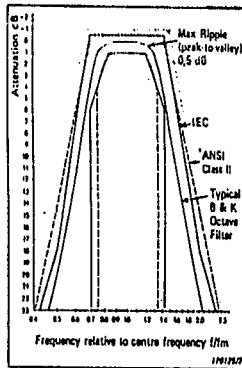
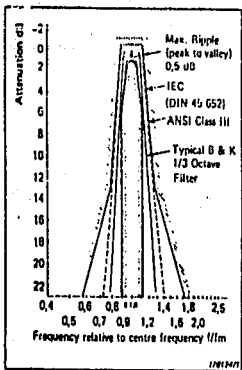


Fig. 4.17. Parte alta de la característica típica de: a) el filtro de tercios de octava, y b) del filtro de octavas. [2]

Paso Bandas Tipo 1617 de Brüel & Kjær. El filtro 1617 tiene 50 bandas de tercio de octava, en un rango de frecuencias centrales desde 2Hz hasta 160KHz; 17 bandas de octava con frecuencias centrales entre 2Hz y 125KHz. Tiene, integradas, redes de ponderación A, B, C y D. Despliega digitalmente la frecuencia central de la banda seleccionada o la red de ponderación elegida. Advierte, visualmente, de sobrecargas a la entrada (señales de entrada: $5V_{pico}$, máximo). Los tiempos de promediación, así como la selección de banda, es posible controlarlos por computadora vía la interfase IEC 625-1 (compatible con IEE 488).

En las figuras 4.13 y 4.16 se muestra el diagrama a bloques del filtro 1617 y una respuesta típica de uno de sus filtros, respectivamente; en esta gráfica se muestran los límites marcados por distintas normas. En la figura 4.17 se muestra sólo la parte alta de la característica del filtro. El rizo es de 0.5dB (de la cresta al valle) con atenuación de la señal entre ± 0.5 dB. Volviendo a la gráfica anterior, la atenuación de frecuencias por afuera de 5 veces y 1/5 veces la frecuencia central, es mayor que 75dB.

4.1.5 Amplificador de medición.

De entre los medidores de nivel sonoro disponibles en el Laboratorio de Acústica, el más versátil y que incorpora mayores adelantos técnicos para aplicarlo al método de medición, es el Amplificador de Medición Tipo 2636 de Brüel & Kjær.

El principal motivo para usarlo es que tiene una interfase digital conforme a IEC 625-1 (IEEE 448), lo que permite controlarlo integralmente con una computadora compatible.

Los resultados de la medición se transforman a señales digitales mediante un convertidor analógico/digital de 10 bits, y pueden ser transmitidos a una computadora o cualquier otro instrumento (graficadora, impresora, etc.) con interfase compatible. La transferencia de datos se puede hacer a intervalos de 10ms (la velocidad de transmisión es de 10ms/dato).

En las dos características mencionadas arriba, la interfase y

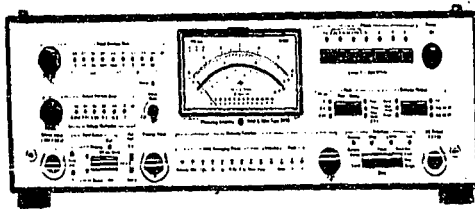


Fig. 4.18. Panel frontal del amplificador de mediciones Tipo 2636 de la marca Brüel & Kjær. [3]

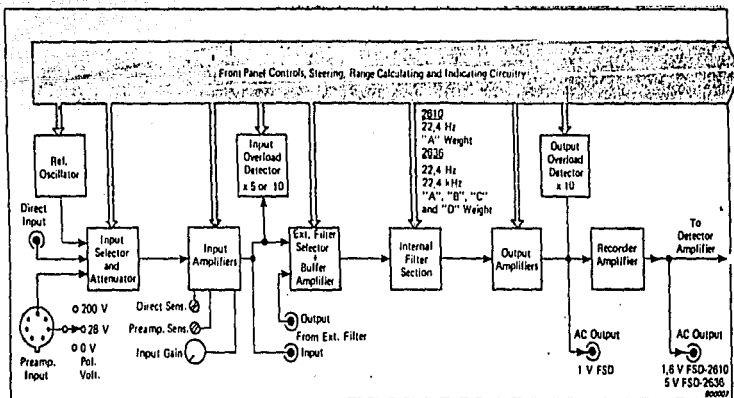


Fig. 4.19. A) Secciones de entrada y salida de la señal de AC en el amplificador 2636. [3]

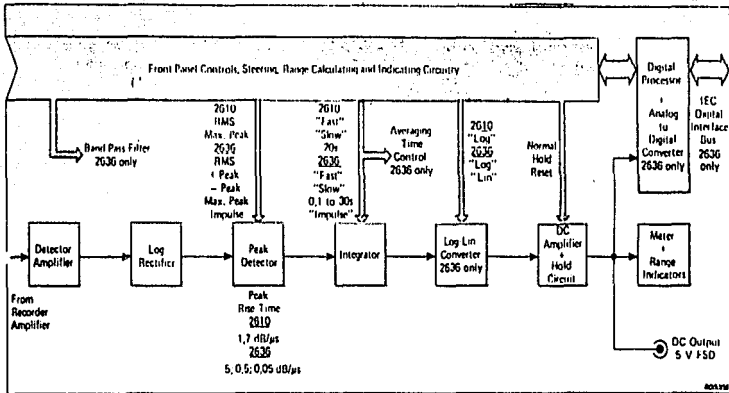


Fig. 4.19. B) B6K-2636. Secciones de rectificación y medición. Además, sección de procesamiento digital. [3]

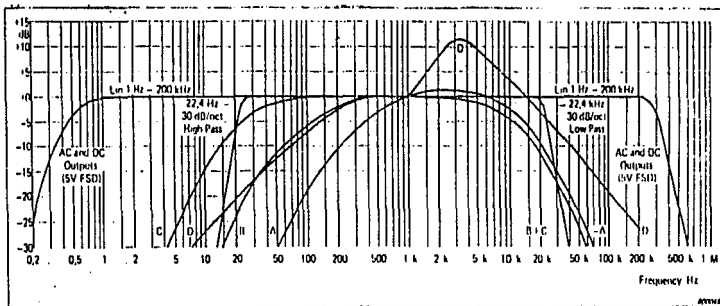


Fig. 4.20. Respuesta en frecuencia típica del 2636 con filtros o redes de ponderación y sin ellos. [3]

el convertidor A/D, radica el poder del 2636. Cuando el 2636 es asistido por una computadora, se pueden hacer mediciones con rapidez y eficacia. Además ayuda a que el 2636 pueda "autocontrolarse" cambiando la escala de sus atenuadores o la escala de tiempos de promediación u otras funciones, de acuerdo a los cambios registrados en el campo sonoro.

Usado como medidor de sonido (también puede usarse como voltmetro o medidor de vibraciones), el 2636 cumple con los requisitos Tipo 0 de la norma IEC R651. Trabaja en un rango de 1Hz hasta 200KHz. Tiene disponibles redes de ponderación A, B, C y D; un filtro paso altas de 22.4Hz, y uno paso bajas de 22.4KHz. Puede ser utilizado con filtros externos. Se puede elegir entre seis tiempos de promediación que van de 0.1 a 30s; también se cuenta con promediación "rápida" y promediación "lenta"; además la opción de establecer externamente el tiempo de promediación deseado, ya sea por medio del filtro 1617 o de una computadora. Tiene programa de autopruueba y calibración, de todas sus funciones analógicas. Indicador analógico con escala intercambiable. Tiene indicadores visuales (LED) sobre cada perilla de control. Tiene atenuadores (amplificadores) a la entrada y a la salida, en pasos de 10dB cuya ganancia va de -30 a +100dB re 20 μ Pa. Tiene muchas otras funciones que, por no ser utilizadas para aplicar el método de esta tesis, no serán mencionadas.

En las figura 4.19 se presenta el diagrama a bloques del amplificador de medición Tipo 2636, y en la figura 4.20 se muestra la respuesta en frecuencia del instrumento con y sin filtros internos y redes de ponderación.

4.2 Accesorios y equipo acústico.

Para la aplicación correcta de el método para determinar los niveles de potencia sonora de una fuente que emite sonido continuo (por lo menos durante 30s) en una cámara reverberante, es menester usar, además de los instrumentos de medición idicados en la sección anterior, algunos accesorios como pueden ser calibradores, fuentes

de referencia, altavoces, etc. En esta sección se describen algunos de ellos.

4.2.1 Calibrador acústico.

La calibración permite reducir los errores de exactitud. Acerca del calibrador, la norma ISO⁵ 3741 dice que durante cada serie de mediciones, debe ser aplicado a cada micrófono un calibrador acústico con exactitud de $\pm 0.2\text{dB}$, para lograr una calibración completa de todo el sistema de medición en una o más frecuencias dentro del rango de interés. El calibrador, a su vez, debe ser recalibrado por lo menos anualmente. Además, se debe hacer periódicamente una calibración eléctrica de los instrumentos de medición.

La norma ANSI⁶ S1.31 dice esencialmente lo mismo; aunque difiere de ISO en cuanto a la exactitud del calibrador. La norma norteamericana dice que el error de exactitud del calibrador no de ser mayor a $\pm 0.3\text{dB}$. Es más explícita al señalar que la recalibración del calibrador debe hacerse con un micrófono que ha sido previamente calibrado de acuerdo a los procedimientos señalados en la sección 4 ó 6 de la norma ANSI S1.10-1966 (R1971). Agrega que la calibración acústica de cada micrófono, en todo el rango de interés, debe llevarse a cabo, por lo menos, anualmente.

En el Laboratorio de Acústica del CI-UNAM, sólo se tiene un tipo de calibrador de la marca Brüel & Kjær. Sin embargo, conviene hablar del otro tipo de calibrador de la misma marca, por si lo llegase a adquirir el Laboratorio.

A) Calibrador de Nivel Sonoro. El Calibrador de Nivel de Sonido Tipo 4230 de Brüel & Kjær está diseñado para empalmar con los micrófonos de 1" y de 1/2". Es una pequeña fuente sonora alimentada por batería. Genera un tono de 1000Hz. 1000Hz es la frecuencia de referencia para cualquier red de ponderación (lineal, A, B, C ó D); es decir, el mismo nivel de presión, a esa frecuencia, es obtenido

⁵ Sección 5.6.

⁶ Sección 4.6, p. 6.

por cualquier red de ponderación.

En la figura 4.23 se muestra la configuración interna del 4230. El volumen en forma de resonador de Helmholtz, atrás del diafragma, sirve para eliminar las frecuencias indeseables provocadas por el aumento en la rigidez del diafragma metálico; rigidez provocada, a su vez, por cambios en la diferencia de presión entre la parte anterior y la parte posterior del diafragma. La frecuencia de resonancia del resonador depende de el volumen de la cavidad y de la longitud y área transversal de la constricción. Esto ayuda a que la frecuencia del calibrador sea independiente de la presión ambiental. No así su intensidad, la cual debe ser corregida.

El nivel calibrado de presión sonora a nivel del mar es de $94 \pm 0.3\text{dB}$ re $20\mu\text{Pa}$, que es igual a $1\text{Pa} = 10\text{ubar}$. El nivel calibrado de presión sonora debe corregirse cada vez que cambie la presión barométrica. Para la zona en la que se ubica el Laboratorio de Acústica se tiene que el nivel de presión del calibrador es de $93.4 \pm 0.3\text{dB}$.

B) Fonopistón (en inglés, pistonphone). El fonopistón Tipo 4220 de Brüel & Kjær es una fuente sonora de gran precisión. Empalma con micrófonos de $1"$, $1/2"$, $1/4"$ ó $1/8"$. En la fig. 4.22 se muestra el principio de operación del fonopistón 4220. Consiste en dos pistones que se mueven en direcciones opuestas.

El nivel de calibración es alto, $124 \pm 0.15\text{dB}$ re $20\mu\text{Pa}$ a nivel del mar. El 4220 cumple con las recomendaciones de IEC para calibrar medidores muy precisos de nivel de sonido. La frecuencia de calibración es 250Hz con error del 1% ; la frecuencia es controlada por medio de un circuito comparador. Variando el voltaje de la fuente de CD que lo alimenta, se puede lograr que el 4220 funcione en un rango de 30 a 320Hz , en dicho rango el nivel de sonido es independiente de la frecuencia. El nivel de sonido del 4220, debe corregirse para la presión ambiental en la que opera (rango de operación: 790 a 1040mbar s.n.m.).

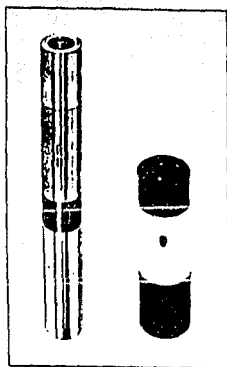


Fig. 4.21. Fonopistón Tipo 4220 y calibrador de nivel sonoro Tipo 4230. Ambos de la marca BGK. [1]

Fig. 4.22. Corte transversal del fonopistón mostrando su principio de operación. [1]

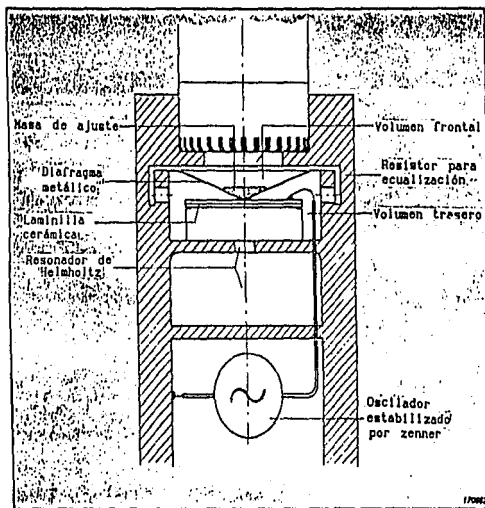
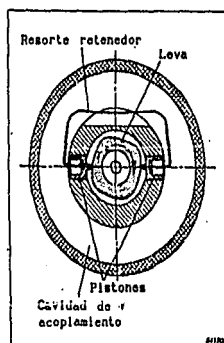


Fig. 4.23. Principio de operación del calibrador de nivel sonoro 4230. [1]

Como se puede apreciar, debido a su exactitud, el calibrador que cumple con las dos normas es el fonopistón; el calibrador de nivel sonoro 4230 sólo cumple con la norma norteamericana. Por el momento sólo se cuenta con el 4230 para realizar calibraciones en el Laboratorio de Acústica. Sin embargo, si se llega a tener ambos calibradores en el laboratorio, habrá que fijarse en el calibrador que se usa, ya sea que interese cumplir con las dos normas o sólo con ANSI. Sin ser tan estricto, se podría calibrar con el 4230 y hacer las mediciones conforme a ISO siempre y cuando se mencione esto en el reporte de resultados.

4.2.2 Fuente de referencia.

Si las mediciones se van a hacer por el método de comparación, debe ser usada una fuente de referencia. Las características de esta fuente deben cumplir con los requerimientos establecidos por ISO 3741 ó ANSI S1.31. Las características específicas que debe tener cualquier fuente de referencia ya fueron mencionadas en el capítulo anterior.

En el Laboratorio de Acústica se tiene la Fuente de Referencia Tipo 4204 de la marca Brüel & Kjær. La fuente consiste esencialmente en un ventilador centrífugo accionado por un poderoso motor asíncrono de rotor externo. Este rotor tiene una velocidad de rotación casi constante. El ensamble de motor y ventilador está rodeado por una rejilla cilíndrica de protección con dos agarraderas. La base en la que está montado el ensamble, tiene soportes de hule.

La 4204 trabaja en un rango de frecuencia de 100 a 10000Hz (figura 4.25). En este rango, la potencia acústica de salida es mayor a 70dB re 1pW, en cualquier banda de frecuencia de 1/3 de octava. La salida típica ponderada en A es de 95dB (con 60Hz de frecuencia en la línea). La característica direccional de la fuente, entre 100Hz y 10KHz, varía menos de 6dB en el plano vertical (figura 4.26). En el plano horizontal, la variación es menor a 0.6dB, medido en tercias de octava. La influencia de la temperatura en la potencia de salida es menor a ± 0.5 dB, en el rango de -10 hasta $+50^{\circ}$ C.

Fig. 4.24. Aspecto de la fuente de referencia
Tipo 4204 de Brüel & Kjær. [6]

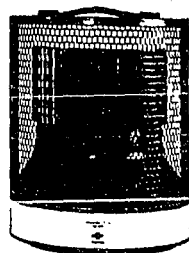


Fig. 4.25.
Respuesta en frecuencia
típica la fuente 4204
medida en bandas de 1/3
de octava desde 100
hasta 10000 Hz en una
cámara anecoica, con la
fuente puesta sobre una
superficie reflejante
operando con 220 V y 50
Hz de línea. [6]

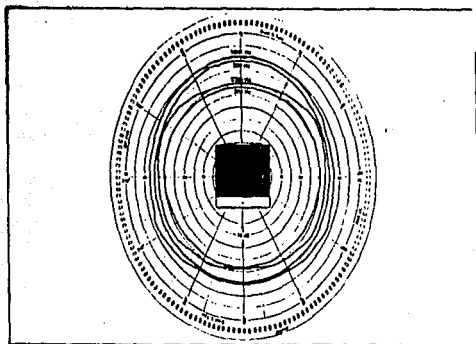
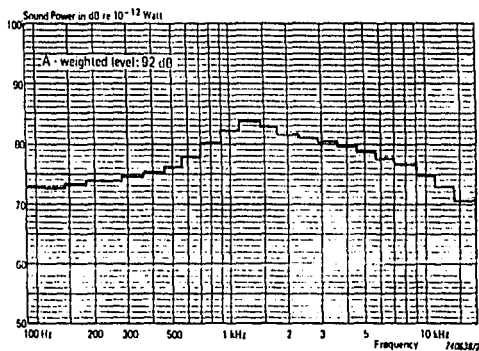


Fig. 4.26.
Característica típica en
dirección vertical de la
fuente 4204, medida con
filtros de 1/3 de octava
en una cámara anecoica.
[6]

Cada fuente es calibrada individualmente por el fabricante. Como todo estándar, junto con ella se entrega una carta de calibración (apéndice 3).

4.2.3 Higrotermógrafo.

La norma ISO⁷ 3741 dice que la temperatura, θ , y la humedad relativa, RH, deben ser controladas -de ser posible- durante las mediciones de niveles de presión sonora, sobre todo en frecuencia por arriba de 1 KHz. Para tal efecto se debe sondear el ambiente durante todo el tiempo de las mediciones y verificar que el producto

$$RH \times (\theta + 5^{\circ}\text{C}) \quad (4.1)$$

no difiera más del 10%.

La norma ANSI⁸ S1.31 menciona que la absorción total de Sabine, A, en el recinto reverberante no debe variar más del 10% durante las mediciones. Cuando no se cuenta con equipo para controlar las condiciones atmosféricas (temperatura, humedad relativa y presión atmosférica) dentro de la cámara, no es posible determinar empíricamente la absorción de Sabine. En tal caso se deben usar dos ecuaciones (una para el método directo y otra para el método de comparación): a) La ecuación para el método directo involucra la absorción de Sabine, el tiempo de reverberación, el coeficiente de absorción promedio del aire y la velocidad del sonido, en dos condiciones diferentes para cada banda de frecuencia; la primera de ellas es cuando se miden los tiempos de reverberación y, la segunda cuando se hacen las mediciones de niveles de presión. Los valores del coeficiente de absorción sonora debida al aire, como función de la temperatura y la humedad ambiente viene tabulada en la norma ANSI S1.26-1978. b) La ecuación para el método de comparación involucra la absorción de Sabine, el coeficiente de absorción sonora por el aire, el volumen interior del recinto, los niveles de potencia de la fuente de referencia y los niveles de presión sonora medidos para la fuente de referencia; las dos primeras variables

⁷ Sección 4.

⁸ Sección 3; p. 4.

para dos condiciones diferentes: la primera condición corresponde al ambiente prevaleciente durante las mediciones del nivel de sonido de la fuente de referencia; la segunda, corresponde a las condiciones ambientales durante las mediciones para la fuente de prueba. ANSI da unos ejemplos de como poder aplicar esas fórmulas; los ilustra para un caso en que la humedad relativa varió de 50% a 60%.

Comparando lo escrito en los dos párrafos anteriores, se puede notar que la norma internacional es mucho menos quisquillosa que la norteamericana; resulta más práctica y sencilla. Lo prescrito en la norma estadounidense implica el consultar tablas, hacer mediciones y cálculos extensos adicionales a los que requiere propiamente cualquiera de los dos métodos (especialmente el método de comparación); lo cual se traduce en consumo de tiempo, mayor esfuerzo, manejo de mayor cantidad de datos e información y mayor espacio de memoria en la computadora. Si se analiza cuidadosamente la expresión 4.1, se dilucidará que esta es tan estricta como simple, pues permite variaciones muy pequeñas de temperatura y de humedad relativa. Por otra parte, los cambios ambientales no son grandes dentro de la cámara reverberante debido a su aislamiento de el resto del laboratorio. En la práctica se han detectado cambios no mayores a 2°C ó 3% HR; de todos modos, conviene hacer las mediciones durante las horas del día en las que se crea que habrá menos cambios ambientales (ver siguiente capítulo). El método desarrollado con esta tesis se apega a la norma ISO pero hay que tener cierto criterio y pensar que si las condiciones ambientales varían muy poco (una unidad o menos) o la expresión 4.1 varía menos del 9%, se puede estar seguro de que se cumple con las restricciones de ANSI (analizando las ecuaciones que proporciona ANSI, se puede ver que permiten un margen de variación muy semejante al de ISO).

En el Laboratorio de Acústica se tienen varios termómetros e higrómetros; de entre todos ellos, el más conveniente para llevar la historia del ambiente durante las mediciones, es el Graficador Electrónico de Temperatura y Humedad Tipo CT485RS de la marca White Box.

El CT485RS es un instrumento de medición y grabación controlado por un microprocesador. El instrumento puede sensar a distancia

CAPÍTULO CUATRO

utilizando un cable de extensión de 163cm. Es ligero y portátil. Las gráficas se trazan en cartas circulares utilizando simultáneamente una plumilla roja para la temperatura y una plumilla azul para la humedad.

El medidor actualiza constantemente la temperatura ambiente, ya sea en °C ó en °F, y la humedad relativa. Su respuesta a los cambios en el ambiente es relativamente rápida (5 minutos para un cambio, de entre un 30 a un 80%, en la humedad ; 5 minutos para un cambio del 63% en la temperatura). Gráficas digitales en incrementos de 1°. Memorización y despliegue de lecturas pico. Selector para graficar durante 1, 7 ó 32 días. Trabaja con alimentación de CA o CD. Notifica en la gráfica la existencia de fallas en la alimentación de AC. Tiene una pantalla de cristal líquido de 2 1/2 dígitos.

La temperatura ambiente puede medirse en un rango de -17 a 49°C (2 a 120°F) con exactitud de ±1°C. La resolución en la pantalla de cristal líquido es de 1°C (1°F). Con el sensor remoto se puede medir de -20 a +50°C (0 a 122°F). El sensor es de tipo semiconductor de baja potencia con salida lineal de voltaje.

La humedad ambiental se puede medir desde 2 hasta 99% RH. La exactitud es ±3% RH, a 25°C, entre el 20% y el 90% del rango; ±5% RH abajo del 20% y arriba del 90% del rango, @25°C. La resolución en la pantalla es 1% RH. Con el sensor remoto aumenta el rango de medición, 0 a 98% RH. El sensor de humedad es un polímero Resistivo. La movilidad de iones en el polímero cambia con el contenido de humedad de la atmósfera circundante. El sensor presenta una impedancia que no es función lineal de la humedad relativa.

4.2.4 Barómetro diferencial.

Si se determinan los niveles de potencia ya sea por el método de comparación o por el método directo, será necesario el dato de la presión atmosférica existente durante las mediciones. En el método directo se sustituye el dato en la ecuación 3.3 para poder calcular los niveles de potencia. En el método comparativo, el dato es útil para hacer las correcciones a los valores de calibración de los

niveles de potencia sonora de la fuente de referencia. Además, la presión barométrica debe formar parte de la información que debe presentarse junto con los resultados finales.

Para poder conocer la presión atmosférica durante las mediciones se tiene un barómetro diferencial de mercurio, muy confiable.

El barómetro fue construido en el Laboratorio de Acústica. Tiene un rango dinámico de 540 mm Hg y su exactitud es de ± 0.05 mm Hg. Consiste en un tubo de vidrio de 0.5cm de diámetro exterior; 0.3cm de diámetro interior, y 13cm de longitud, doblado en U. Está montado en una base de madera y protegido por un gabinete de acrílico transparente, contra polvo, humedad y golpes. Debe estar colgado en una pared de modo que se tenga en posición vertical y se evite el estarlo moviendo de un lugar a otro, pues es muy frágil.

4.2.5 Para calcular tiempos de reverberación.

Los tiempos de reverberación del recinto de pruebas, para cada banda de un tercio de ocatava o una octava en el rango de frecuencias de interés, son datos imprescindibles para determinar los niveles de potencia mediante el método directo (ecuación 3.3).

Las mediciones para determinar tiempos de reverberación deben de hacerse conforme a la norma ISO/R 354 (ANSI/ASTM C423-77). La instrumentación de un método para determinar tiempos de reverberación resulta tan elaborada como la instrumentación de métodos para determinar los niveles de potencia sonora de una fuente; por lo cual resultaría desatinado incluir en esta tesis un análisis de dicha norma y una explicación del método instrumentado. El presente trabajo de tesis únicamente se atiene a las normas para determinar niveles de potencia sonora en una cámara reverberante. El método para determinar tiempos de reverberación fue instrumentado por personal del Laboratorio de Acústica. En el capítulo 5 se presenta en un diagrama a bloques la conexión de los distintos aparatos que deben usarse para medir, así como el nombre del programa que calcula los tiempos de reverberación.

4.3 La computadora y el programa de control.

La computadora utilizada en el método que presenta esta tesis tiene una interfase IEEE 488. Esto permite su comunicación digital con instrumentos de medición que tengan dicha interfase u otra compatible.

Los procesos de control y análisis se realizan gracias a un programa de computadora. Con este programa se controlan todas las funciones necesarias en cada instrumento de la cadena de medición para la adquisición de datos.

4.3.1 Computadora.

La computadora está catalogada, por el fabricante, dentro del grupo de computadoras técnicas. Se trata de la Computadora Técnica de Hewlett-Packard Tipo 9000 Serie 217. Las computadoras técnicas son computadoras que facilitan los trabajos de diseño, simulación, medición automatizada, monitoreo en tiempo real y control.

Las HP 9000 Serie 200 son especialmente adecuadas para controlar instrumentos. La HP 9000/217 está basada en el microprocesador MC68010 de Motorola . Tiene una velocidad de procesamiento de 12.5MHz; 2Mb de memoria principal; soporta los sistemas operativos de BASIC y Pascal, lo cual hace posible programar con los lenguajes correspondientes.

La HP 9000/217 tiene integrada la interfase HP-IB diseñada de acuerdo a la norma IEEE 488-1978 "Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation". Las siglas HP-IB son de "Hewelett-Packard Interfase Bus".

4.3.2 El programa.

El programa está hecho en HP BASIC 5.0/5.1. Esta versión de BASIC es poderosa ya que cuenta con comandos simples para realizar gráficas y para controlar activamente periféricos e instrumentos de medición.

NO Hay

pagina

No. 119.

El programa ocupa, aproximadamente, 115000 bytes de memoria principal. Hace llamados a varios subprogramas, y entre estos últimos, a su vez, se realizan enlaces ulteriores, funcionando todos en conjunto para lograr un mismo fin: determinar niveles de potencia sonora. Para darle un nombre al programa, se le denominó "Sistema de Control de Instrumentos para Medir Presión Sonora y Evaluar Potencia Sonora (SCIMPSEPS)". SCIMPSEPS puede ser usado en cualquier laboratorio que cuente con instrumental compatible con el utilizado en el Laboratorio de Acústica del CI-UNAM.

SCIMPSEPS es un programa interactivo que demanda respuestas del usuario mediante letreros, alarmas y símbolos gráficos, tendientes a facilitar las decisiones de quien realiza las mediciones.

La secuencia del programa se presenta resumida en el diagrama de flujo en la figura 4.28. El índice "Q" va indicando a cada subprograma el tipo de medición que se está llevando a cabo y, en consecuencia, el análisis que debe hacerse a esa medición; es decir, indica si la medición fue para determinar el ruido de fondo, para identificar el tipo de ruido que produce la fuente o para indicar si la medición es definitiva. El otro índice, "Z", habilita la repetición del proceso de medición en caso de que el usuario seleccione el método de comparación. La variable N₁ representa la cantidad de lugares donde debe colocarse un micrófono. N₂ es el número de ubicaciones para la fuente.

Cada vez que se inicia el programa, se borran los archivos que sirvieron de apoyo para la ejecución anterior, pero que no sirven para la presentación de resultados. A continuación se despliega un letrero que recomienda el encendido de los instrumentos anticipadamente, para dejar estable su temperatura de operación.

Se da la opción de hacer mediciones no normalizadas, en las que el usuario define la cantidad de micrófonos y la cantidad de ubicaciones de la fuente. Inmediatamente debe elegir entre hacer el análisis en tercias de octava o en octavas. Por último, tiene que indicar qué método de medición prefiere: directo o de comparación.

Independientemente del método seleccionado y de si la medición

se hará de acuerdo a las normas, lo primero que se mide es el ruido de fondo. Enseguida se toman algunas muestras del ruido emitido por la fuente, en cada una de las bandas de interés, para ser analizado y clasificado.

Una vez clasificado se hacen las mediciones definitvas, empezando con todas la bandas en las que se presentó ruido de banda ancha, después en las que hubo banda angosta y al último en las que se detectó frecuencia discreta.

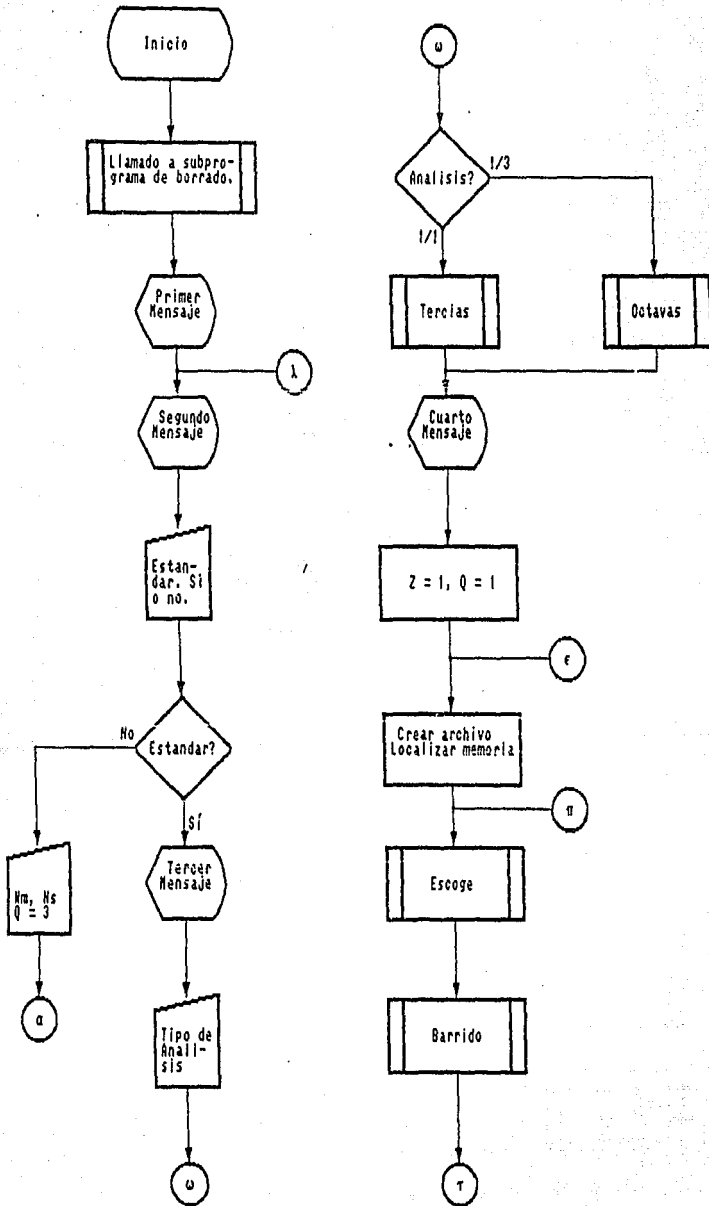
Terminado el barrido de frecuencias, se hacen las correcciones necesarias a cada una de las lecturas dependiendo del nivel registrado para el ruido de fondo.

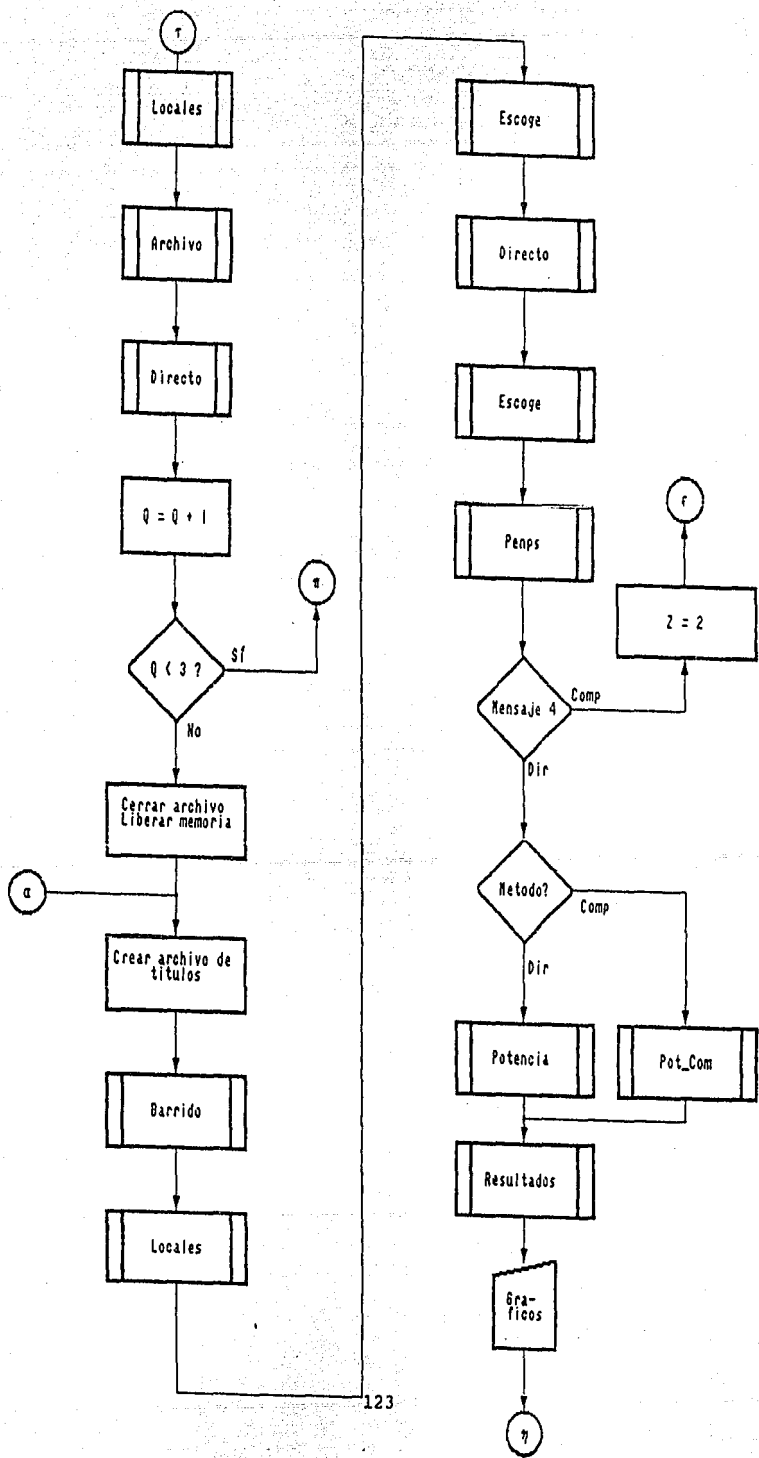
El siguiente paso, es calcular el nivel de presión sonora promedio para cada banda de interés. Este dato no es necesario en el reporte de resultados, pero sí es indispensable para calcular el nivel de potencia sonora.

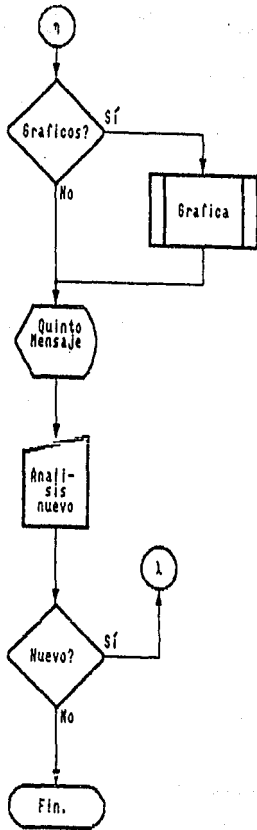
Si el usuario eligió el método de comparación, el proceso se repetirá a partir de la clasificación del tipo de ruido que produce la fuente, ya no se medirá el ruido de fondo. Durante la ejecución del programa se indica al usuario que primero debe medir la fuente de referencia y después la fuente de prueba.

Cuando las mediciones han finalizado y ya se determinó el nivel de presión sonora, el cálculo del nivel de potencia sonora se hace de acuerdo al método elegido. Si la medición se hizo por el método de comparación, se solicita al usuario los datos de temperatura (en grados celcius), presión atmosférica (en mm ó cm de mercurio) y frecuencia de rotación de la fuente de referencia (en ciclos por segundo). Con estos datos, es posible corregir los niveles de potencia de calibración entregados por el fabricante de la fuente y poder calcular la potencia emitida por la fuente de prueba. Si la medición se hizo por el método directo, también se solicita al usuario el dato de presión atmosférica y se le da la opción de alimentar a la computadora con los tiempos de reverberación (en segundos) a través del teclado o directamente de un archivo de

Fig. 4.28. Diagrama de flujo del programa SCIHPSSEPS.







datos.

Lo que sigue es tabular los resultados y presentarlos en impreso. Después se da la opción de graficarlos. Por último se pregunta al usuario si desea hacer mediciones en el tipo de análisis no seleccionado (tercias de octava u ocatavas). Si la respuesta es afirmativa, se repetirá todo el proceso para el nuevo análisis, sin importar el método (el método debe reelegirlo el usuario).

Antes de finalizar la ejecución del programa, se despliega un letrero en pantalla advirtiendo al usuario que si desea conservar los archivos de datos, generados durante la corrida, debe usar otro disco la siguiente vez que mida o debe cambiar nombre a los archivos. Esto, con referencia únicamente a los archivos cuyo título fue asignado por el programa, no por el usuario.

Los subprogramas y funciones que conforman a SCIMPSEPS son los siguientes:

*Monitoreo. Sirve para identificar el nivel de presión sonora a medir y, entonces, poder colocar los atenuadores del amplificador de medición B&K-2636 de tal modo que siempre se hagan cerca de la escala máxima. Selecciona la banda adecuada del filtro pasa bandas B&K-1617 en tercias de octava o en octavas. Dirige los cambios de micrófono hechos por el multiplexor de ocho canales B&K-2811.

*Mediciones. Está diseñado para capturar, durante el tiempo establecido por la norma⁹, los valores medidos. El período de observación (un barrido con seis micrófonos) para clasificar una fuente es menor al tiempo requerido para mediciones definitivas (42 y 7 segundos en total, respectivamente).

*Archivo. Crea archivos de datos, uno para cada banda de frecuencia. El nombre del archivo consiste en caracteres alfanuméricos: con letras está un nombre dado por el usuario; los dos dígitos siguientes indican la banda; después el número de ubicaciones de fuente, y al último la cantidad de bandas del

⁹ISO 3741-75, sec. 7. ANSI S1.11-80, sec. 6, p. 9.

análisis seleccionado (8 ó 24). El usuario sólo da nombre al primer archivo de primera banda, el programa se encarga de hacer las variaciones pertinentes al nombre para asignárselo a las bandas restantes.

*Nom_archi (función). Es una función utilizada por el subprograma Archivo. Sirve para pedir al usuario un nombre para un archivo y, de ser necesario, corregir este nombre de acuerdo a las demandas del sistema operativo en cuanto al formato de el mismo.

*Regresivo. Sirve para desplegar en la pantalla de gráficos del monitor, algunos trazos geométricos animados, muy simples, para advertir que la computadora está ocupada y evitar que se interrumpan las mediciones por intromisión de alguna persona.

*Volumen. Sirve para seleccionar el volumen (disco duro o disco flexible) donde serán guardados todos los archivos de datos y, obviamente, con el que interactuará la memoria dinámica de la máquina durante todo el proceso, con excepción de aquellas instrucciones donde se especifique el lugar de búsqueda de datos.

*Banda_ang. Subprograma para determinar el número de micrófonos y la cantidad de locaciones para la fuente dentro de la cámara cuando se presenta ruido de banda angosta¹⁰.

*Tono_disc. Subprograma para determinar el número de micrófonos y la cantidad de locaciones para la fuente dentro de la cámara cuando se presenta tonos discretos¹¹.

*Correcciones (función). Función que corrige los niveles de presión medidos. La corrección se hace depende de la diferencia entre el ruido de fondo y el ruido de la fuente¹².

*Ubicaciones (función). Función que calcula el número de

¹⁰ ANSI S1.32-1980, tabla III, p. 5.

¹¹ *Ibidem*.

¹² ANSI S1.31-80, tabla III, p. 9.

ubicaciones de la fuente dentro de la cámara tomando en cuenta el tipo de ruido generado. (Ver ecuación 3.8.)

*Penps. Subprograma con el que se calcula el nivel promedio de presión sonora en la banda de interés. (Ecuaciones 3.1 y 3.2.)

*Directo. Subprograma para determinar el tipo de ruido producido por la fuente en cada banda de frecuencia de interés, y para hacer las correcciones necesarias en los niveles de presión medidos dependiendo del ruido de fondo registrado. El subprograma realiza su trabajo enlazando con otros subprogramas y funcines satelites de menor importancia, pero indispensables. Los programas secundarios son: Desvío, Banda_ang, Tono_disc, y las funciones: Correcciones y Ubicaciones.

*Desvío. Encuentra la desviación de los niveles de presión sonora obtenidos en las mediciones. (Ecuación 3.7.)

*Pregunta_por. Esta subrutina averigua en qué bandas se presentó ruido de banda ancha, banda angosta o tono discreto. De acuerdo al tipo de ruido, agrupa los números correspondientes a las bandas y los asigna a un arreglo.

*Responde. Responde cuántas posiciones de micrófono deben usarse y cuantas ubicaciones debe tener la fuente. También asigna los valores adecuados a las variables utilizadas para controlar la puesta de filtro del B&K 1617 por medio de la computadora y por medio del B&K 2636.

*Potencia. Subprograma para calcular, por el método directo, el nivel de potencia sonora producido por la fuente. (Ec. 3.3.)

*Pot_com. Subprograma para calcular, por el método de comparación, el nivel de potencia sonora producido por la fuente. (Ec. 3.4.)

*Graficación. Subprograma para graficar los resultados. Las gráficas tienen escala logarítmica en el eje de las abscisas y lineal en el de las ordenadas. El rango de la gráfica se adecua al rango de los elementos a ser graficados. Al principio se

incluye un menú para elegir ya sea una gráfica de tiempo de reverberación, de niveles de presión sonora o de niveles de potencia sonora.

*Resultados. La información que debe ser reportada, la ordena en forma tabular y la manda a una impresora.

4.4 Conclusión.

La automatización de un método de medición es tarea complicada, y lo es más aún, si la manera de medir y los aparatos para medir, deben cumplir con ciertas restricciones normalizadas.

El uso de una computadora en las mediciones facilita enormemente el trabajo del investigador o técnico. Evita al usuario hacer cálculos rutinarios, interpolaciones y correcciones. Disminuye considerablemente, como se verá en el siguiente capítulo, el consumo de tiempo. Permite al usuario realizar otras actividades mientras los instrumentos hacen las mediciones. El tiempo que el usuario utiliza frente a los instrumentos, es mínimo en comparación con lo que duran las mediciones.

4.5 Referencias.

- [1] 8 Channel Multiplexer Type 2811. Instruction Manual.
Brüel & Kjær.
Nærum Offset Denmark, R 1985
- [2] Band Pass Filter Type 1617. Instruction Manual.
Brüel & Kjær.
Nærum Offset Denmark, R 1979
- [3] Measuring Amplifier Type 2636. Instruction Manual.
Brüel & Kjær.
Nærum Offset Denmark, R 1982
- [4] Master Catalogue. Electronic Instruments.
Brüel & Kjær.
K. Larsen & Sons Denmark, 1989
- [5] Test and Measurement Catalogue.
Hewlett-Packard. USA, 1983
- [6] Reference Sound Source Type 4204. Instruction Manual.
Brüel & Kjær.
Nærum Offset Denmark R 1985
- [7] Model CT485RS High Performance Microprocessor-based
Temperature/Humidity Recorder. Operator's Manual.
White Box. USA, 1989
- [8] Manuales de BASIC 5.0/5.1 para las computadoras HP 9000
series 200/300.
Hewlett-Packard USA, 1987-88
- [9] Microphones and Microphone Preamplifiers.
Brüel & Kjær.
Nærum Offset Denmark, 1985
- [10] HP 82906A Printer. Owner's Manual.
Hewlett-Packard USA, 1983
- [11] Sound Power Source Type 4205. Instruction Manual.
Brüel & Kjær.
Nærum Offset Denmark, R 1986

5 PROCEDIMIENTOS PARA PODER DETERMINAR NIVELES DE POTENCIA SONORA DE UNA FUENTE DE RUIDO EN LA CAMARA REVERBERANTE DEL CENTRO DE INSTRUMENTOS-U.N.A.M.

El capítulo 5 está elaborado no sólo como una especie de manual en el que se indica secuencialmente la forma de llevar a cabo las mediciones; en él también se comparan y analizan, de la manera como se hizo en el capítulo 3, algunos requerimientos que no fueron aludidos en ese capítulo pues se consideró más oportuno tratarlos aquí. Por tanto, el presente capítulo es muy extenso.

Entre otras cosas, se dan instrucciones para medir la frecuencia de rotación de la fuente de referencia y se muestra la colocación que deben tener los micrófonos dentro de la cámara reverberante.

En este capítulo se utilizan algunos conceptos que se definen en el apéndice 1 ó que ya fueron definidos en capítulos anteriores.

5.1 Introducción.

La evaluación de niveles de potencia sonora producidos por un emisor de ruido continuo dentro de una cámara reverberante se logra, básicamente, en dos etapas: en la primera de ellas se adquieren datos; en la segunda, se hacen cálculos. La primera etapa del proceso se realiza, principalmente, con la ayuda de transductores e instrumentos de medición de excelente desempeño. De la segunda etapa se encarga una computadora.

De entre los datos que son indispensables, el más importante es la presión sonora media cuadrática, promediada en el espacio, en cada una de las distintas bandas de frecuencia de interés en tercios de octava o en octavas. Estos datos deben ser obtenidos ya sea de: a) la fuente de ruido cuya potencia sonora necesita conocerse; b) del ruido de fondo en el ambiente de prueba -dentro de la cámara reverberante-, o c) de una fuente de referencia.

A grandes rasgos, las etapas por las que pasa la señal acústica

en el procedimiento de evaluación, son los siguientes:

a) Adquisición de datos. La señal sonora es captada y convertida en señal eléctrica por un micrófono. Después, la señal eléctrica se filtra y, finalmente, se rectifica para poder utilizarla en un medidor analógico (galvanómetro) y, simultáneamente, digitalizarla. El medidor indica los niveles de presión sonora efectiva para un tiempo de promediación dado.

b) Cálculos. La señal digitalizada es enviada a través de un "bus" hasta el puerto paralelo de una computadora. La computadora almacena la información; la corrige -en caso necesario- y la utiliza para calcular, finalmente, el nivel de potencia sonora correspondiente. Los resultados finales pueden presentarse gráfica o tabularmente.

Otros datos indispensables para determinar niveles de potencia sonora son: la temperatura, la humedad relativa y la presión atmosférica prevalecientes en el ambiente de prueba durante las mediciones.

En caso de que se utilice el método directo (ver capítulo 3) para llevar a cabo las mediciones, será necesario conocer el área total de superficies reflejantes dentro de la cámara (paredes, difusores, etc.); el volumen interior del recinto, y el tiempo de reverberación de la cámara en las distintas bandas de frecuencia de interés, en octavas o en tercios de octava. Estos datos, así como los mencionados en el párrafo anterior, deben ingresar en la computadora a través del teclado. Los tiempos de reverberación también pueden ser accesibles en un archivo de datos.

5.2 Instrumentos y accesorios indispensables.

De acuerdo al equipo disponible en el Laboratorio de Acústica, a continuación se presenta una lista de todo los aparatos básicos para hacer las mediciones.

Aparato	Marca	Tipo	Cantidad
Multiplexor de 8 canales	Brüel & Kjør	2811	1
Filtro pasa bandas	Brüel & Kjør	1617	1
Amplificador de mediciones	Brüel & Kjør	2636	1
Pr amplificador con cable de extensión	Brüel & Kjør	2639	6
Micrófono de medición	Brüel & Kjør	4166	6
Calibrador de nivel de sonido	Brüel & Kjør	4230	1
Computadora	Hewlett-Packard	9000 / 217	1
Impresora de punto	Hewlett-Packard	82906A	1
Higrotermógrafo	White Box	CT 485RS	1

Estos aparatos deben ser llevados al Laboratorio de Control de la Cámara Reverberante y de la Cámara de Transmisión¹.

Todos los instrumentos deben ser manipulados cuidadosamente pues, como todo instrumento de precisión, son muy costosos. Se sugiere tener a la mano los manuales de operación.

El equipo que se utiliza especialmente para aplicar un método de medición específico (directo o de comparación), será mencionado más adelante.

5.2.1 Interconexión.

Antes de interconectar, revise que la señalización del selector

¹ Este laboratorio es parte del Laboratorio de Acústica del Centro de Instrumentos-UNAN.

CAPÍTULO CINCO

de voltaje de línea de los aparatos coincida con el voltaje de línea para la Cd. de México (en este caso, 127V_{rms} CA; frecuencia de línea: 60Hz).

No encienda los aparatos hasta haber colocado los micrófonos, pues corre el riesgo de dañar irremediablemente los instrumentos o de sufrir lesiones fatales (los micrófonos se polarizan con 200V CD).

Se sugiere colocar los aparatos uno sobre otro en el siguiente orden ascendente: multiplexor, amplificador y filtro. Esta colocación ayuda a ocupar menos espacio sobre la mesa de trabajo y facilita las conexiones.

El diagrama a bloques de la figura 5.1 muestra la manera en que deben interconectarse los aparatos. En el diagrama se identifica a algunos de los cables que deben ser utilizados. Los cables para interconectar los puertos de los instrumentos son del tipo AO 0194, de la marca Brüel & Kjør, estandarizados conforme a IEC 625-1. Para conectar los instrumentos a la computadora se necesita un cable con adaptador IEC/IEEE, pues la computadora tiene un conector estándar del tipo IEEE-448.

En el panel posterior del B&K-2636 hay dos conectores identificados con el letrero: "FROM EXTERNAL FILTER". Uno debe conectarse a la salida y el otro a la entrada de un filtro externo -en este caso, el B&K-1617-. Debido a que se usa un filtro externo, el tiempo de promediación es controlado por él y no por el B&K-2636. Para tal efecto se usa el cable de control tipo AO 0145 de Brüel&Kjør; este permite la operación remota del B&K-2636 usando los programas de control de promediación del B&K-1617.

El B&K-2811 tiene un conector de salida en el panel frontal y otro en el panel posterior. Se recomienda usar el del panel posterior para evitar que haya cables colgando enfrente de los aparatos. El cable coaxial tipo BNC-B&K AO 0127 debe conectarse en la salida del multiplexor principal ("MAIN MULTIPLEXER") hacia la entrada, en el panel frontal, del B&K-2636.

SISTEMA PARA DETERMINAR NIVELES DE POTENCIA SONORA

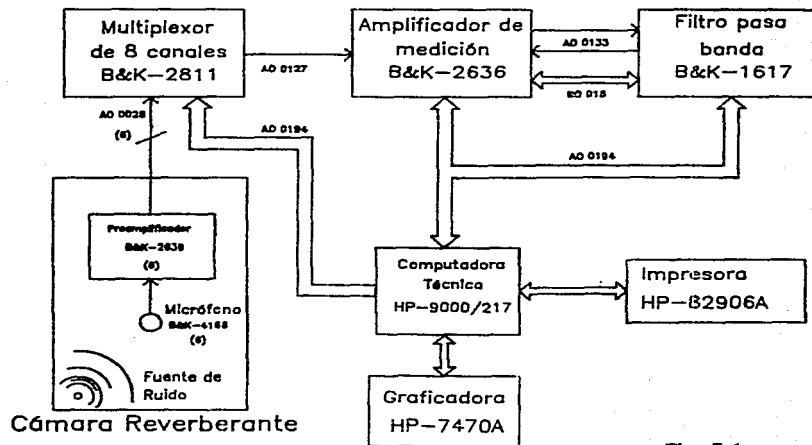


Fig. 5.1

Los aparatos, para poder ser controlados por el programa SCIMPSEPS, deben tener las siguientes direcciones:

B&K-2636 → 704
B&K-2811 → 707
B&K-1617 → 718

Estas direcciones se ponen con los microinterruptores que tiene cada aparato en el panel posterior. Junto a un grupo de microinterruptores del B&K-2636 se tiene una lista ("Address Switch Coding") con el significado de la posición de sus polos; deben ser puestos en las posiciones "Normal", "Calculator", "Format", "Addressable" y la dirección ya mencionada. El amplificador de mediciones tiene otro conjunto de microinterruptores ("Filter Switch Coding") para seleccionar el código de lectura elegido con el Filtro, estos microinterruptores se usan cuando la puesta inicial en banda del filtro y el tiempo de promediación es controlado por un programa propio del filtro y no por computadora; estos últimos microinterruptores no son necesarios para el procedimiento de medición.

La dirección del B&K-1617 se pone con los microinterruptores identificados por "Listen Address". Los microinterruptores del "PPR Selector" ("Paralell Pole Response") permiten que a través del puerto paralelo del filtro se pueda monitorear el estado del filtro en una computadora. Esta función esta implementada en la interfase del B&K-1617 y ayuda a monitorear las sobrecargas a la entrada enviando, cada vez que se solicite, un bit de información por el paralelo. Solamente un polo de los microinterruptores "PPR Selector" puede ser puesto en 1 (en este caso es el número ocho).

La puesta de los demás controles de los aparatos será indicada más adelante. Antes se darán las instrucciones para colocar el emisor de ruido y los micrófonos dentro de la cámara.

Antes de instalar los micrófonos se sugiere colocar la fuente de prueba para no golpear un micrófono accidentalmente con la fuente o jalar algún cable de extensión. Además, se sabrá con anterioridad en qué lugares se pueden poner los micrófonos más cercanos a la fuente.

5.3 Características de la fuente de prueba.

La fuente a la que se quiera determinar sus niveles de potencia sonora debe tener las siguientes características:

- Como se indica en la tabla 3.1, el volumen de la fuente debe ser menor al 1% del volumen interior de la cámara reverberante. (La cámara tiene un volumen de 217.5m^3 .)²
- El ruido que emita debe ser continuo (ver apéndice 1), de banda ancha, banda angosta o con componentes discretas.

La colocación e instalación de la fuente dentro de la cámara, debe ser semejante a la que tiene en el lugar donde habitualmente funciona³. Es decir, si el emisor de ruido generalmente funciona en una de las esquinas del lugar de trabajo, para la prueba deberá ser colocado en una de las esquinas de la cámara. Emisores de ruido que normalmente funcionen sobre una mesa o repisa, deben ser instalados similarmente en la cámara.

No existen espacios, a través de las paredes o el techo, donde se pueda colocar algún emisor de ruido como extractores de aire o ventiladores. Por lo tanto, en esta cámara reverberante en particular no se pueden hacer mediciones, como sugieren las normas, a fuentes que normalmente van montadas a través de ventanas, paredes o techos; a menos que se instale de otra forma y se notifique en el reporte de resultados.

² Una fuente de 2m^3 sería exageradamente voluminosa. Suponiendo que fuera un cubo -para imaginarla más fácilmente- dejaría muy poco espacio a los micrófonos, ya que entre los micrófonos y la fuente debe haber cierta separación (quedarían disponibles trece lugares, de treinta posibles, suponiendo que la fuente fuera medida solamente en un lugar dentro de la cámara y no hubiera difusores). Un criterio más sensato puede establecerse indicando que el espacio que ocupe la fuente no debe exceder al 1% del volumen disponible para los micrófonos dentro de la cámara (o sea el 1% de 60.7m^3).

³ ISO 3741-1988, sección 6.3.

ANSI S1.31 (R1986), sección 5.3.

Debe de asegurarse que el equipo auxiliar como conductores eléctricos, tuberías, ductos de aire, etc., necesario para la operación de la fuente, no emita cantidades significativas de energía sonora durante las pruebas. De ser posible, se debe colocar el equipo auxiliar fuera de la cámara.

Ninguna de las mayores superficies de la fuente debe estar paralela a la superficie más cercana de la cámara, a no ser que esta orientación sea típica en el montaje de la fuente.

Las condiciones especiales de montaje e instalación de la fuente dentro de la cámara, deben ser descritas cuidadosamente en el reporte de resultados.

En caso que no se especifique ninguna colocación o montaje especial para la fuente, esta deberá ser colocada a 1.5m de cualquier pared⁴ cuidando que ninguna de sus superficies más grandes quede paralela a cualquier pared.

En la cámara hay un marco rojo pintado en el piso. El marco está a 1.5m de las paredes y tiene 10cm de ancho. Una fuente que no requiera de colocación o montaje especial puede ser colocada dentro del área delimitada por el marco. Inclusive, es más recomendable colocarla sobre la línea roja, sin rebasar el límite exterior, ya que se da más espacio a los micrófonos.

En cada una de las cuatro paredes del recinto, hay unas líneas rojas pintadas a 1.5m del piso y de las paredes adyacentes. Tienen 5cm de ancho. Pueden ser útiles como referencia para fuentes que, sin requerir de montaje especial, normalmente funcionan recargadas o colgadas en la pared.

⁴ Existe un artículo publicado por la revista de Brüel & Kjer (referencia [16], capítulo 1, p. 26) en el que se muestran los resultados de un análisis empírico de la influencia de la impedancia en la potencia radiada por una fuente. El análisis se realizó midiendo los cambios en el nivel de presión sonora en medio de un cuarto reverberante mientras el emisor era colocado a diferentes distancias de una de las paredes.

Es importante considerar la manera en que va a funcionar el emisor durante las pruebas⁵. El emisor puede funcionar en las condiciones siguientes:

- a) con carga normal
- b) con carga completa
- c) sin carga
- d) condiciones de operación correspondientes a la máxima generación de sonido

Las condiciones de funcionamiento del emisor deben ser mencionadas en el reporte de resultados.

Antes de cualquier medición de ruido, la fuente debe estar funcionando establemente.

Durante la prueba, la fuente debe funcionar en un ambiente uniforme; o sea, sin cambios en la posición de los difusores, sin variaciones importantes de temperatura o humedad relativa, etc.

Un detalle muy importante que se debe tener en cuenta es que si se comienza las mediciones habiendo en la cámara muebles u objetos que no tengan nada que ver con la fuente o el procedimiento de medición, estos deben dejarse hasta el final de las mediciones para no alterar el ambiente de prueba. En caso de que así suceda, en el reporte se deben describir tales objetos y mencionar su colocación dentro de la cámara.

Cuando se necesite un operario para controlar el emisor, la persona que permanezca dentro de la cámara debe proteger sus oídos con unas orejeras o tapones de buena calidad, para evitar daños severos en su sistema auditivo. De ser posible, encienda los extractores de aire durante la prueba. En caso de que el ruido de los extractores sea de amplitud comparable a la de la fuente, se

⁵ ISO 3741-1988, sección 6.5.
ANSI S1.31 (1986), sección 5.5.

sugiere hacer las mediciones pausadamente para evitar que se envice el aire y el operario se adormezca y se arriesgue a sufrir algún accidente.

En los casos en que el ruido de fondo sea de magnitud cercana a la de la fuente (diferencia menor a 6dB) en alguna de las bandas de frecuencia bajo análisis, la medición de ruido no procede en dicha banda.

Cuando se escoja el Método de Comparación (ver capítulo 3) para medir, la fuente de referencia debe permanecer dentro de la cámara durante toda la prueba. La fuente de referencia debe colocarse en el piso, preferentemente sobre el marco rojo, a una distancia de, por lo menos, 1.5m de cualquier superficie como paredes, difusores, muebles o la fuente de prueba⁶. Al medir el ruido de la fuente de referencia, esta deberá ser colocada en el mismo lugar en el que se haya puesto la fuente de prueba y trasladar esta última al lugar que ocupara anteriormente la fuente de referencia. En pocas palabras, se deberán intercambiar de lugar para poderlas medir. Se dan más explicaciones al respecto en las indicaciones para aplicar el método de comparación.

Cuando la fuente de prueba presenta componentes discretas de frecuencia, es posible que sea necesario medirla en más de un lugar dentro de la cámara. Los puntos donde se mida la fuente pueden ser ubicados a $\lambda/2$ m ó más, uno de otro⁷. λ se define en siguiente sección.

5.4 Micrófonos.

Los micrófonos de medición utilizados son los llamados "de condensador". En el capítulo anterior se dan algunas de sus características generales; sin embargo, se recomienda consultar el manual de operación de estos micrófonos para usarlos adecuadamente.

⁶ ISO 3741-1988, sec. 8.3.2.
ANSI S1.31 (R1986), sec. 7.3.1.

⁷ ISO 3742(1988), sec. 4.2.2.
ANSI S1.31 (R1986), sec. 4.3

5.4.1 Ubicación de micrófonos.

Debe cumplirse con ciertas restricciones estandarizadas en cuanto a la distancia que debe haber entre micrófonos; entre un micrófono y cualquier superficie reflejante, y entre un micrófono y una fuente de ruido.

*Distancia entre un micrófono y una fuente de ruido.⁸

La distancia mínima entre la fuente de ruido y el punto más cercano de ubicación de un micrófono, sin importar el método de medición elegido, no debe ser menor a

$$d_{\min} = C_1 \sqrt{V/T} \quad (5.1)$$

donde $C_1 = 0.08$

$V \rightarrow$ Volumen de la cámara; m^3 .

$T \rightarrow$ Tiempo de reverberación; s.

En la norma internacional se añade la siguiente nota: "...para no sesgar la medición y minimizar el error debido al campo cercano, se recomienda firmemente que el valor de C_1 sea 0.16."⁹

La norma estadounidense hace una distinción entre la distancia mínima entre micrófono y fuente para el método de comparación y para el método directo. Para el método directo, presenta la misma ecuación que la norma internacional, excepto que C_1 es igual a 0.16. Para el método de comparación

$$d_{\min} = 0.8X10^{(L_{wr}-L_{pr})/20} \quad (5.2)$$

⁸ ISO 3741-1988, sec. 4.3.2.

ANSI S1.31 (R1986), sec. 6.2.2.

⁹ "Los errores ambientales son debidos a condiciones externas, estas podrían ser los efectos de... campos magnéticos, campos electrostáticos, humedad, suciedad, vibraciones y otras condiciones similares... (En cuanto a los métodos correctivos para eliminarlos, incluyen) el sitio donde se realicen las mediciones." Gloria Mata Hernández, Prácticas de Laboratorio de Medición e Instrumentación, Facultad de Ingeniería-UNAM, 1991.

donde L_{wr} es el nivel conocido de potencia sonora de la fuente de referencia, en dB. L_{pr} es el nivel promedio de presión sonora cuando la fuente de referencia está trabajando en la cámara, en dB. Se agrega que "...la distancia mínima debe ser determinada en todas las bandas de frecuencia de interés y el valor más alto, de los obtenidos, debe ser usado para las mediciones del nivel de presión sonora."¹⁰ Tres notas completan lo relativo a d_{min} en la norma estadounidense: la primera dice que para encontrar L_{pr} hay que hacer mediciones conforme a la norma, por lo tanto habrá de comenzarse por suponer un d_{min} y determinar L_{pr} . Una vez obtenido L_{pr} se calcula una nueva d_{min} , se reubican los micrófonos y se vuelve a medir para determinar otra d_{min} , etc. Para entusiasmar a quien siga ese procedimiento iterativo señala que "...debería (el procedimiento) converger rápidamente." La segunda nota dice que, si es posible, los micrófonos se pongan a una distancia mayor a d_{min} para minimizar la contribución del campo directo de la fuente. En la última nota se aconseja que, si se conoce el factor de directividad de la fuente, es posible hacer un ajuste de la distancia mínima que debe haber entre la fuente y un micrófono en la dirección en la que tenga mayor influencia el campo directo.

Es claro que seguir la norma estadounidense para determinar d_{min} , en general, es mucho más complicado que seguir la norma internacional; no obstante ambas presentan la misma fórmula para el método directo. Respecto al método de comparación la norma internacional acepta la fórmula 5.1, pero la norma estadounidense presenta otra fórmula cuya aplicación requiere mucha labor. Además, ANSI S1.31 pasa por alto que los niveles "conocidos" de potencia de la fuente de referencia deben ser corregidos para la presión atmosférica del lugar donde se hace la medición, pues el fabricante de dicha fuente da los resultados de las mediciones hechas en SU laboratorio. Más adelante, en este capítulo, se indicará la manera de hacer las correcciones.

En concordancia con la segunda nota para la fórmula 5.2, se

¹⁰ ANSI S1.31 (R1986), p. 8.

puede poner d_{\min} lo suficientemente grande como para obviar mediciones y cálculos adicionales. Se analizaron, para distintos casos, las dos fórmulas presentadas renglones arriba. La fórmula 5.1, con $C_1 = 0.16$, dando distintos valores de T . La fórmula 5.2 para distintos valores de $(L_{wr}-L_{pr})$. El valor máximo de d_{\min} está limitado por el número de elementos de un arreglo de puntos de medición, suponiendo que la fuente es relativamente pequeña y está colocada en cualquiera de las cuatro esquinas del marco rojo en la cámara reverberante.

Si se mira la tabla 2.2 se notará que el tiempo de reverberación disminuye al aumentar la frecuencia. Por otro lado, d_{\min} , en la ecuación 5.1, será más grande mientras T_{60} sea más pequeño. d_{\min} para $V = 217.5\text{m}^3$ y $T_{60} = 1.94\text{s}$ -que es el correspondiente a 10KHz- es igual a 1.69m. De 10KHz en adelante, hasta cubrir el rango audible, el tiempo de reverberación varía muy poco; suponiendo un caso extremo en que T_{60} sea igual a 1.50s, d_{\min} sería igual a 1.93m.

Ahora bien, a $d_{\min} = 1.93\text{m}$ en la fórmula 5.2, le corresponde una diferencia $(L_{wr}-L_{pr})$ de 7.65. Con los puntos de medición propuestos, se garantiza que el más cercano queda a poco más de 2m de distancia de la fuente¹¹ (figura 5.2). Cuando no sea necesario ocupar todos los puntos del arreglo se recomienda prescindir de los puntos más próximos a la fuente o, de ser posible, reubicarlos a mayor distancia que la sugerida por esta tesis. Los demás puntos de medición propuestos cumplen satisfactoriamente con la distancia mínima requerida por ANSI S1.31. La diferencia numérica $(L_{wr}-L_{pr})$ correspondiente a $d_{\min} = 2\text{m}$ es de 8. Por la experiencia adquirida durante las mediciones de ensayo se puede decir que $(L_{wr}-L_{pr})$ muy raras veces sobrepasa las 7 unidades; por lo general se encuentra en un rango de entre 3 y 6dB (ANSI S1.31 al ejemplificar uno de sus criterios pone una $[L_{wr}-L_{pr}]$ típica de 7dB).

¹¹ Sólo para el caso en que sea necesario ocupar todos los puntos de medición del arreglo y la fuente esté en cualquiera de las esquinas del marco rojo.

Como consecuencia de los análisis anteriores, se puede concluir que la disposición de los puntos de medición respecto a la fuente de ruido, cumple holgadamente con la restricción delimitada por la fórmula 5.1; es decir, se cumple con la norma internacional en la totalidad de este aspecto y con la norma estadounidense parcialmente. La parte complementaria, representada por la fórmula 5.2, para cumplir cabalmente con ANSI-S1.31 queda satisfecha con una diferencia numérica ($L_{nr}-L_{pr}$) < 9dB, sólo en el caso extremo en el que se utilicen todos los puntos de medición (30 en total). Cuando se utilicen menos puntos y se tenga la libertad de reubicarlos lo más alejados posible de la fuente, se tendrá la seguridad de que se cumple por amplio margen con la norma estadounidense.

*Distancia entre un micrófono y cualquier superficie reflejante.¹²

El micrófono no debe colocarse a una distancia menor a $\lambda/2$ ó 1m (la que sea menor) de cualquier pared; del piso o techo, o de cualquier otra superficie reflejante (o absorbente) como difusores, mesas, personas, etc. λ es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia central de la banda de interés de frecuencia más baja.

La inclinación entre un micrófono o un arreglo de micrófonos y cualquier superficie dentro de la cámara, debe ser mayor a 10° .

La banda de frecuencia más baja que es posible medir con precisión dentro de la cámara reverberante es 100Hz en tercios de octava¹³. A esta frecuencia le corresponde una longitud de onda de 3.435m @ 20°C, aproximadamente; lo que significa que $\lambda/2 \approx 1.72$. En consecuencia $\lambda/2 > 1$. Los micrófonos no deben ser colocados, como se dijo dos párrafos arriba, a menos de un metro de cualquier superficie de la cámara. Considerando esta condición y que dentro de la cámara no hay difusores, muebles u objetos de tamaño considerable, resulta que existe un espacio aprovechable por los

¹² ISO 3741-1988, sección 7.1.3.
ANSI S1.31 (R1986), sección 6.2.2.

¹³ ISO 3741-1988, anexo D.
ANSI S1.31 (R1986), apéndice A.

micrófonos. A este espacio se le llamará, en adelante, volumen o espacio útil.

El espacio útil para hacer mediciones es del 27.9% del volumen interior de la cámara. Es decir, 60.7m^3 aproximadamente.

*Distancia entre micrófonos.¹⁴

Un micrófono debe estar alejado de otro por lo menos a una distancia de $\lambda/2$ metros.

5.4.2 Instalación de micrófonos.

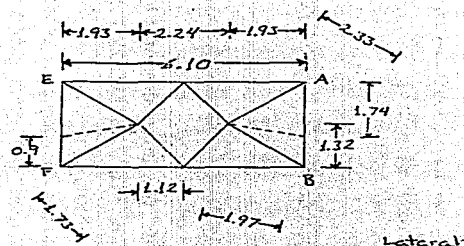
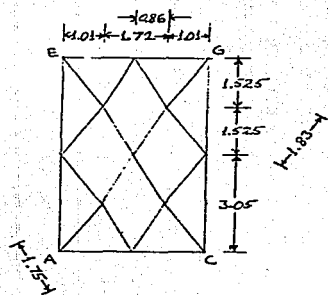
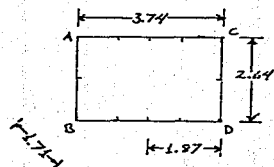
En caso de que una fuente de ruido presente componentes de frecuencia discreta prominentes se preve la utilización de un arreglo con 30 puntos de medición, como máximo, dentro del espacio útil. En cada uno de estos treinta puntos o lugares puede ser colocado un micrófono con el fin de coleccionar una gran cantidad de muestras del campo y obtener una buena aproximación. Entre cada punto del arreglo debe haber una separación de al menos $\lambda/2$ metros. Cuando la fuente emite ruido de banda ancha, las normas permiten un mínimo de tres puntos de medición; sin embargo, aprovechando que hay capacidad para explorar el campo hasta con seis micrófonos al mismo tiempo, la cantidad mínima de puntos de medición utilizados en el procedimiento que propone esta tesis es de seis.

En la figura 5.2 se muestra un croquis del arreglo de treinta puntos. El volumen rectangular representa el espacio útil. En las proyecciones, la intersección de dos o más líneas indica la existencia de un punto del arreglo. Las líneas sirven de referencia para saber la distancia que hay entre puntos adyacentes. Como se observa, estas distancias van desde 1.71 hasta 2.33 metros.

Recuerde que los micrófonos más cercanos a las superficies de la cámara, se deben poner a 1m de distancia. Es decir, los puntos

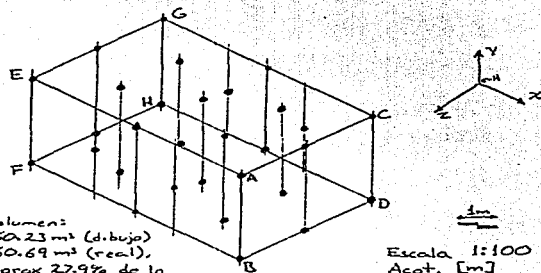
¹⁴ ISO 3741-1988, sección 7.1.1.
ANSI S1.31 (R1986), sección 6.2.

ARREGLO DE
30 PUNTOS DE MEDICIÓN



Frontal

Lateral



Volumen:
60.23 m³ (d.bujo)
260.69 m³ (real),
aprox 27.9% de la
Cámara Reverberante.

Escala 1:100
Acot. [m]

Fig. 5.2.- Croquis del arreglo de 30 puntos de medición dentro de un volumen útil de aproximadamente 60.7m³. Las líneas punteadas indican otra opción para los puntos B, D, F y H. El volumen se localiza a 1m de cualquier superficie interior de la cámara reverberante.

que se encuentran en las aristas del volumen útil (figura 5.2) o en la superficie de dicho volumen, se encuentran a 1m de la pared o superficie (piso o techo) más cercana. Por lo cual, si desea saber la ubicación de un punto del arreglo respecto a alguna de las superficies de la cámara, deberá sumar 1 a la cantidad que aparece vertical u horizontalmente en las proyecciones que están en el croquis. Absolutamente todos los elementos del arreglo de treinta puntos se encuentran en la superficie del volumen útil.

Al hacer las mediciones no siempre habrá necesidad de utilizar el arreglo de treinta puntos¹⁵. Se deja a la persona responsable de hacer mediciones la libertad de poner los micrófonos a la altura y en los hilos que desee cuidando siempre el cumplimiento de las normas respecto a la ubicación de los micrófonos. Inclusive, puede usarse parcialmente el arreglo para evitar medir o calcular las coordenadas del punto. Se permite el uso de tripiés para poner micrófonos en otros lugares dentro del volumen útil si así conviene al usuario, teniendo cuidado de cumplir con las normas.

La presencia de difusores dentro de la cámara es indispensable para lograr mayor uniformidad en la distribución de energía en el campo reverberante. Desafortunadamente, los difusores quedan dentro del volumen útil ocupando lugares asignados a los micrófonos. Esta desventaja hace que se reduzca considerablemente la cantidad de puntos de medición dentro de la cámara.

Teniendo los difusores instalados, sólo quedan disponibles los puntos que, proyectados en el piso, se encuentran dentro del área delimitada por el marco rojo. Es decir, el volumen útil se reduce considerablemente de 60.7 a 23.35m³. Las superficies de este nuevo volumen útil se encuentran a 1.5m de sus respectivas superficies de la cámara. Por lo tanto si se quiere localizar un punto de medición respecto a alguna de las superficies de la cámara, hay que sumar 1.5 a las distancias que aparecen acotadas vertical y horizontalmente en

¹⁵ Se hace referencia al arreglo presentado en la figura 5.2, ya que se considera nula otra posibilidad de acomodar, en forma totalmente distinta, treinta puntos en el espacio útil.

las proyecciones del croquis 5.3. Para este arreglo no se eligió $\lambda/2$ (1.75m aproximadamente) porque quedaría un espacio útil demasiado pequeño. En cambio, se eligió 1.5m por ser una distancia que, además de cumplir con las normas, permite librar el espacio ocupado por los difusores más próximos a las paredes; además de que se pueden usar las mismas referencias generales que sirven para la fuente (i. e., líneas rojas en paredes y piso).

Se puede disponer de este pequeño volumen útil como una limitada alternativa para realizar las mediciones, ya que solamente da cabida a un arreglo de nueve puntos como se puede observar en la figura 5.3. Obviamente, será insuficiente para medir fuentes de ruido que tengan componentes significativas de banda angosta o tonos puros. El punto más cercano a una fuente -si esta está colocada en una de las esquinas del marco rojo-, cuando se usa la totalidad del arreglo de nueve puntos, queda a 2.14m aproximadamente. Al igual que con el arreglo de treinta puntos, el usuario queda en libertad de poner los micrófonos a alturas distintas a las sugeridas e incluso ponerlos en tripiés en otros lugares, pero siempre cuidando que se cumpla con las normas.

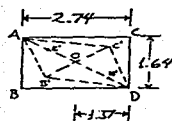
La tarea de colocar los micrófonos en los lugares adecuados dentro de la cámara reverberante, resulta sencilla. En la cámara hay colgados 17 hilos de nylon resistente a fuertes tensiones¹⁶. Cada hilo está colgado de una polea ordinaria, la cual permite que un objeto prendido al hilo pueda ser fácilmente puesto a distintas alturas. En la proyección tridimensional de los dos arreglos (figuras 5.1 y 5.2) los puntos de medición están dibujados sobre unas líneas verticales que representan los hilos. El arreglo de 30 puntos requirió de 17 hilos. El arreglo de nueve puntos requirió de nueve hilos.

Para poder sujetar un ensamble micrófono-preamplificador a uno de los hilos, fueron diseñados y construidos unos yugos o ahorcadores corredizos. Estos yugos sirven de soporte a unas pinzas.

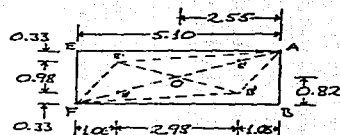
¹⁶ 18 Kg., 0.6 mm de diámetro.

ARREGLO DE
9 PUNTOS DE MEDICIÓN

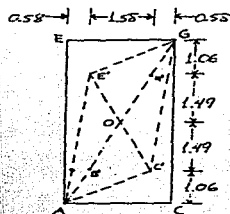
CA y similares: 3m.
DB y similares: 1.75m



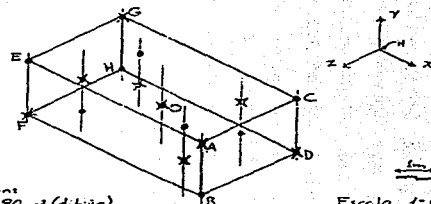
Frontal



Lateral



Superior



Volumen
22.90 m³ (dibuje)
~ 23.35 m³ (real)
aprox. 10.62% de
la Cámara Reverberante.

Escala 1:100
Acotado en metros

⊗ Ejemplo de un arreglo

Fig. 53.- Croquis de dos arreglos de 9 puntos de medición dentro de un volumen útil de aproximadamente 23.4m³. El arreglo ejemplificado lo comprenden los puntos A, B', C', D, O, E', F, G y H'. el otro arreglo lo componen los puntos sin cruz. El volumen útil se localiza a 1.5m de cualquier superficie interior de la cámara reverberante.

Las pinzas, sujetas con tornillo al yugo, tienen un movimiento angular de 0 a 180° respecto al hilo.

Los yugos pueden ser desplazados a lo largo de un hilo. Para liberar el hilo, ponga los dedos índice y medio en la parte superior del yugo, y el dedo pulgar en la parte inferior; oprímalo con fuerza hasta comprimir el resorte que hay dentro del yugo (el yugo se hace más pequeño). Para mover el yugo hacia abajo, sujete el hilo con la otra mano en la parte de arriba del yugo; ahora puede desplazar el ahorcador. Para mover el ahorcador hacia arriba debe seguir el mismo procedimiento, pero sujetando el hilo por abajo del ahorcador. Una vez que haya colocado el yugo a la distancia deseada, suéltelo. El yugo volverá a prensar el hilo y no se podrá desplazar.

No trate de poner a prueba los hilos o los yugos colgándose de ellos, porque puede echar abajo las sujeciones de las poleas o de los difusores.

Adherida al hilo, por arriba del ahorcador, hay una bolita de resina epóxica. Dicha bolita facilita la medición de longitudes de techo a piso. Además sirve como tope para obstruir el paso del hilo por la polea y disminuir la posibilidad de golpear el techo con el micrófono. La rueda de la polea está, aproximadamente, a 10cm del techo. Por lo cual, a la distancia que quiera colocar el micrófono del techo, debe restarle 10cm. Por ejemplo: si requiere poner un micrófono a 1 m del techo, lo que debe hacer es bajar la bolita de plástico y medir hacia abajo, a partir de ella, 90cm para que, sumados a los 10 cm que hay entre polea y techo, dé un total de 1m. Ponga el yugo, entonces, a 90cm de la bolita y coloque el micrófono. Finalmente, súbalo hasta el tope.

5.4.3 Aclaración.

Acercas de los lugares que ocupan los difusores dentro del espacio útil, surgió una controversia: si se quitaban algunos de ellos, se dejaría de cumplir con la recomendación ISO/R-354; si no se quitaban, no se podría medir, ni siquiera, ruido de banda ancha de la manera como lo señala la norma ISO-3741. Las dos publicaciones

imponen como condición de su aplicabilidad el uso de una cámara reverberante, pero no concuerdan respecto a la manera de acondicionarla. Es decir, el acondicionamiento que servía para aplicar una norma, no servía para aplicar la otra y viceversa. Aún más, ya que ISO-3741(1975) señala en uno de sus apartados que las mediciones de tiempo de reverberación deben hacerse conforme a ISO/R-354, el hecho de que no se cumpliera con esta última, implicaba el incumplimiento de la primera. La incompatibilidad de ambas publicaciones resulta incomprensible si se toma en cuenta que fueron preparadas por el mismo comité técnico (ISO/TC 43). Queda suponer que ese comité no reparó en este "detalle".

El problema hacía pensar que sería imposible aplicar el método directo totalmente apegado a lo que ordena ISO-3741. Sin embargo, había más libertad para resolverlo si se tenía en mente que el problema surgía de las mismas publicaciones de ISO y no del diseño de la cámara o de los difusores. La solución más razonable fue medir los tiempos de reverberación de un ambiente de prueba conformado para determinar potencia sonora (es ilógico medir los tiempos de reverberación de un ambiente de prueba distinto al ambiente en el que se va a medir una fuente de ruido).

Por causa del problema apenas mencionado, quedó al descubierto la necesidad de instrumentar en el futuro inmediato un método para medir tiempos de reverberación, que además sea compatible con los métodos para determinar niveles de potencia y que no consuma mucho tiempo. Lo primero que deberá de hacerse es conseguir la versión más actualizada de la norma ISO-354 (actualmente ya no se edita como recomendación), y ver si ya es compatible con la edición más reciente de ISO-3741 y hacer las modificaciones pertinentes al procedimiento desarrollado con la tesis; en caso de que sigan siendo incompatibles, deberá ser mejorado el actual procedimiento con que cuenta el Laboratorio o, definitivamente, instrumentar algún otro método.

5.5 Antes de encender los aparatos.

Es indispensable la puesta manual de algunos de los controles de los aparatos antes de que estos sean encendidos. Es importante tener los controles en las posiciones adecuadas para asegurar que el programa SCIMPSEPS funcione correctamente y para disminuir la posibilidad de descomponer los aparatos.

No prosiga con las instrucciones hasta haber cumplido con lo indicado en la subsección 5.2.1 y haber colocado la fuente y los micrófonos dentro de la cámara. Si ya lo hizo, NO ENCIENDA LOS APARATOS hasta que haya seguido las instrucciones de esta sección.

5.5.1 Amplificador de Medición Tipo B&K-2636.

Las perillas de las secciones de ganancia de entrada y ganancia de salida deben estar al máximo de atenuación; es decir, -30 y 0dB respectivamente. Hay que girarlas hacia la derecha hasta el tope. El potenciómetro adicional de la ganancia de entrada debe estar en la posición "Cal."(debe oírse un 'clic').

El voltaje de polarización (Pol. Volt., en el panel) debe ser de 200V.

Las palancas, junto al selector de voltaje de polarización, deben estar hacia abajo en las posiciones "Direct" y "Off".

En cuanto a los demás controles del B&K-2636, no es indispensable posicionarlos manualmente; de eso se encargará el programa. Sin embargo, para dar mayor confianza al usuario, se pueden poner los controles en las posiciones siguientes: en la sección de filtros, todos desactivados excepto la opción de filtro externo; el detector de salida puede usarse en modo normal y la escala con rango dinámico de 30dB (la escala que debe usarse es la Tipo SA 0262); el tiempo de promediación será controlado remotamente; por último, la palanca de enmedio de la sección de interfase debe estar en la posición "Front".

5.5.2 Filtro Pasa Bandas Tipo B&K-1617.

No importa en qué posiciones se tengan los controles. Unicamente, en el panel posterior, el selector de tiempo de promediación debe estar en la posición "Variable".

5.5.3 Multiplexor de 8 Canales Tipo B&K-2811.

Desinhiba únicamente aquellos canales que se vayan a utilizar; los demás deben estar inhibidos (en la posición "Inhibit").

El control de tiempo de exploración para cada canal será externo ("External").

Las palancas de la sección para calibrar los micrófonos deben estar en 50mV/Pa, la sensibilidad del micrófono, y en apagado, el nivel del calibrador.

5.5.4 Encendido y apagado de los instrumentos.

Una vez que haya puesto los controles en las posiciones indicadas encienda los aparatos en el siguiente orden recomendado para evitar que los transitorios de carga o descarga de corriente pasen por el amplificador y proteger de "agujazos" el indicador analógico: primero encienda el B&K-1617; luego, el B&K-2636; al último, el B&K-2811. El apagado debe hacerse en orden invertido: multiplexor, amplificador y filtro.

Espere de 10 a 15 minutos antes de comenzar la mediciones para que se establezca la temperatura de operación de los aparatos.

5.6 Calibración.

Cada vez que se vaya a realizar una serie de mediciones, los aparatos deberán ser calibrados¹⁷. La calibración del sistema de

¹⁷ISO-3741 (1988), sec. 5.6.

ANSI S1.31 (R1986), sec. 4.6.

medición puede hacerse con referencia a la sensibilidad del transductor o considerando el sistema como un analizador de voltaje utilizando un voltaje de referencia. Es más recomendable la primera forma de calibrar por ser más exacta ya que toma en cuenta la sensibilidad del micrófono y del preamplificador que se van a utilizar (ver referencia [3] del capítulo 4).

Para la calibración se usa una fuente de sonido cuya frecuencia y cuyo nivel de emisión son precisos. El Calibrador de Nivel Sonoro Tipo B&K-4230 es una fuente con esas características, por lo que deberá ser usado (el Fonopistón Tipo B&K-4220 también sería un buen calibrador; empero no se tiene disponible, hasta el presente, en el Laboratorio).

El Calibrador de Nivel Sonoro sirve para micrófonos B&K de 1" de diámetro y tiene un adaptador en el que pueden embonar micrófonos de 1/2". El micrófono queda muy ajustado en el calibrador por lo que en ocasiones resulta difícil zafar el micrófono. Para evitar movimientos bruscos al poner o quitar el calibrador, se recomienda girar el calibrador hacia la derecha mientras se empuja o jala. Tenga mucho cuidado de no girar hacia la izquierda porque se desatornilla el cartucho de protección del micrófono dejando libre la membrana de este último.

El procedimiento para calibrar se describe paso a paso en los manuales de operación del B&K-2636 y del B&K-2811; se sugiere consultarlos en caso de cualquier duda. A continuación se presenta el procedimiento para calibrar el sistema:

- 1) Haga los ajustes preliminares indicados en la sección 5.4. No encienda los aparatos.

- 2) Ponga en el indicador analógico del B&K-2636, la escala adecuada a la sensibilidad de los micrófonos (alrededor de 50mV/Pa). La escala es la Tipo SA 0262, con rango dinámico de 30dB. Para cambiar la escala graduada del B&K-2636, empuje hacia abajo y jale suavemente la lengüeta central en la parte superior del indicador; deslice hacia afuera la escala, jalando hacia arriba la lengüeta;

enganche la lengüeta a la escala nueva y deslicelas hacia adentro, cuidando de no dañar la aguja.

3) Los controles del B&K-2636 deben estar en las siguientes posiciones:

Input:	"Direct."
Pol. Volt.:	"200 V"
Ref.:	"Off"
Input Gain:	"Cal."
Input Section Gain:	Extremo derecho
Output Section Gain:	Extremo derecho
Filters:	"Linear 1-200 000Hz" (los 7 selectores hacia abajo)
Detector:	"Norm.", "Log 30dB"
Power:	"On"

4) Los controles del B&K-2811 deben estar en:

Power:	"On"
Scanning Control:	"Manual"
Calibrator Level:	"94 dB - 1Pa"
Microphone Sens.:	"50mV/Pa"

El canal apropiado puede seleccionarse ya sea pulsando "Step", en la parte de control de exploración ("Scanning Control") o desinhibiendo el canal apropiado. Los canales que no se estén usando deben quedar inhibidos.

5) Ponga el calibrador sobre el micrófono; active el calibrador. En el multiplexor, sobre cada selector de canal, hay unos potenciómetros y siguiendo la línea horizontal, en el extremo derecho, hay dos leds con flechitas arriba; de estos dos leds, el que esté encendido, le indicará en qué sentido debe girar el tornillo (use un desarmador con aislamiento). El canal del multiplexor quedará calibrado en el momento en que ninguno de los leds de sensibilidad quede encendido. Si al estar ajustando, se apaga el calibrador, vuelvalo a encender y continúe con el ajuste.

6) Gire la perilla de la sección de ganancia de entrada hacia la izquierda hasta que los leds de abajo de la escala graduada indiquen "70dB".

7) Ajuste el galvanómetro del B&K-2636 girando el cursor del potenciómetro "Sens. Adj." hasta poder leer 93.4dB en la escala. Verifique la sensibilidad del multiplexor; si se ha desajustado, repita el paso número 5.

8) Una vez que estén ambos aparatos ajustados, ponga la perilla de ganancia de entrada hasta el extremo derecho; cambie al siguiente canal en el multiplexor.

9) Repita los pasos 5 a 7 para cada canal.

10) Cuando la calibración de todos los canales en uso está completa, ponga el interruptor Calibrator Level, "Off"; y gire la perilla del Input Sección Gain en sentido horario hasta su posición extrema.

Ahora está listo para medir. La calibración debe hacerse antes de cada medición. Por otra parte, el calibrador debe ser revisado anualmente. Debe hacerse, periódicamente, una calibración eléctrica de la instrumentación en el rango de frecuencias de interés. La norma estadounidense agrega que a cada micrófono se le debe hacer una calibración acústica por lo menos una vez al año.

5.7 El programa SCIMPSEPS.

El programa Sistema para Controlar Instrumentos de Medición de Presión Sonora y Evaluar Potencia Sonora (SCIMPSEPS) puede cargarse en la memoria de la HP-9000/217 desde el directorio "POTENCIA", en disco duro, o directamente de disco flexible.

El programa SCIMPSEPS es propiedad intelectual del Centro de Instrumentos-UNAM, por lo que no se publica en esta tesis. Cualquier aclaración o consulta debe hacerse en dicha dependencia. En el capítulo 4 se mencionan algunas características de este programa.

Una vez instalado el programa en memoria, se recomienda indicar a la computadora mediante la instrucción MSI":700,1" trabajar con la unidad de disco flexible (esto es: guardar datos, y leer datos o archivos).

El programa es abundante en mensajes para el usuario advirtiéndole las precauciones que debe tomar y los pasos que debe seguir durante las mediciones. Es irrelevante repetir aquí esos mensajes, sólo baste señalar algunas precauciones que deben tomarse durante la medición:

- No mueva los atenuadores de su posición extrema derecha.
- No desinhiba canales desocupados.
- No abra o cierre las puertas de la cámara reverberante mientras se hacen mediciones.
- Si necesita abrir las puertas u olvidó cerrarlas, interrumpa el programa y transfiera el control del B&K-2636 al modo manual mediante la instrucción "LOCAL 707". Al hacerlo así, los atenuadores estarán al máximo (si es que no los movió manualmente) y no habrá riesgos de que se dañe la aguja al cerrar o abrir las puertas.
- Debe usarse un disco flexible por cada medición que se haga pues el programa crea algunos archivos cuyos nombres son fijos. Puede usarse un mismo disco si se mide primero en tercios de octava y luego en octavas, o viceversa.
- Si por cualquier causa interrumpe la ejecución del programa, debe borrar los archivos creados por él hasta ese momento; sólo así podrá comenzar las mediciones de nuevo. Si no desea borrarlos, entonces use otro disco.
- Antes de comenzar una nueva serie de mediciones, si tuvo necesidad de guardar los archivos en disco duro, copie todos los archivos a disco flexible y borre los del disco duro para que pueda reutilizarlo en caso necesario.
- Se pueden graficar o tabular los resultados de mediciones hechas hace tiempo y que se tengan en archivo. Los programas para hacerlo son: GRAFRES, TABRES y PRESRES; todos ellos en el directorio POTENCIA en el disco duro de la HP 9000/217.

Con la ayuda del programa SCIMPSEPS, las mediciones se hacen relativamente rápido. Por ejemplo, midiendo ruido de banda ancha por

el método directo, en tercios de octava se consumen aproximadamente 185 minutos y en octavas, 65 minutos; por el método de comparación, la medición de ruido de banda ancha en tercios de octava se hace aproximadamente en 285 minutos, y 95 minutos, en octavas. Estos tiempos aumentan, cuando se mide ruido de banda angosta o tonos discretos.

Gracias a la automatización de las mediciones, se requiere de la atención del usuario durante muy pocos minutos, en comparación con el tiempo que dura la medición. El usuario pasa más o menos 30 minutos frente a la computadora y los instrumentos, tomando en cuenta la instalación de micrófonos y la calibración del sistema de medición.

5.8 Método directo.

Cuando se ha decidido hacer las mediciones por el método directo, hay que escoger entre medir los tiempos de reverberación necesarios y obtenerlos de un archivo de datos.

Lo más correcto es medirlos porque se tendrá la certeza de que el ambiente de prueba será muy similar, si no es que igual, al que prevalecerá durante las mediciones de nivel de presión sonora. Esto, toda vez que se hagan ambas mediciones en una misma sesión.

Sin embargo, como puede suponer el lector, la sesión se prolongará considerablemente si se toma en cuenta que, para obtener una buena aproximación de los tiempos de reverberación en cada banda de frecuencia de interés, hay que medir varias veces en distintos lugares dentro del recinto y luego promediar esas mediciones. En tercios de octava, las mediciones de los tiempos de reverberación en el rango de 0.1 a 10KHz puede llevarse entre cuatro y seis horas; por abajo de 500Hz, las mediciones requieren de más cuidado y por tanto, de más tiempo. En octavas, las mediciones se llevan consumen entre una y dos horas.

En el Laboratorio de Acústica se desarrolló un método sistematizado semiautomático para medir tiempos de reverberación en base a lo establecido por la publicación ISO/R-354. Esta

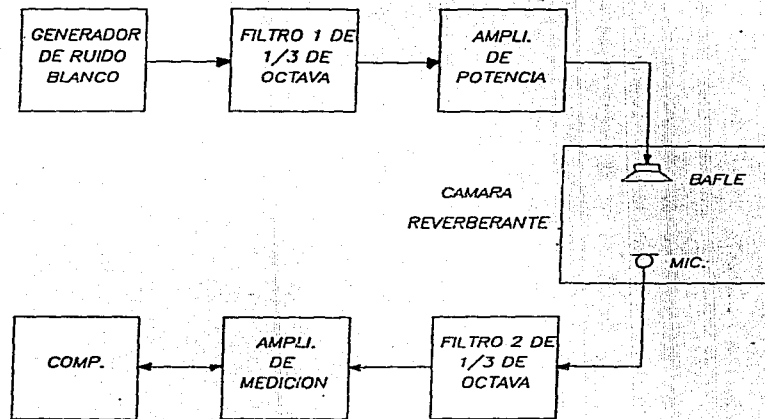


Diagrama a bloques de la cadena de medición.
(ref. [1] del cap. 2)

publicación¹⁸ puede ser consultada en la biblioteca del C. I. Queda fuera del propósito de esta tesis analizar la recomendación ISO/R 354.

En la figura 5.4 se muestra, con un diagrama esquemático, la manera como deben ir conectados los aparatos. Se utilizan casi los mismos aparatos que en la figura 5.1. En el esquema habría que agregar el multiplexor B&K-2811 entre la salida del ensamble micrófono-preamplificador y la entrada del filtro 2 (6 del amplificador). Como Filtro 1 de 1/3 de octava se debe usar el B&K-1616; puede usarse el amplificador Toyama-WA/70A; la caja acústica es JBL Modelo CONTROL-5. Si se requiere hacer un análisis en octavas, debe usarse el filtro pasivo B&K-1613 como filtro 1. El generador de ruido blanco es B&K-1405 y debe ser el primero en la cadena de instrumentos.

El programa para adquisición y análisis de datos se llama "CAM_REVE". Este programa es escaso en instrucciones y letreros para el usuario por lo que será conveniente indicar aquí, de manera resumida, la manera como deben hacerse las mediciones:

1) Instale los aparatos de la manera como se indica en la figura 5.4 y en la sección 5.2. No los encienda hasta haber colocado los micrófonos. Pueden instalarse 1 ó más micrófonos (de preferencia más de uno).

2) La distancia entre micrófonos debe ser mayor a $\lambda/4$. Esa misma distancia debe haber entre un micrófono y cualquier superficie de la cámara. Entre la fuente de ruido y un micrófono debe haber, por lo menos, $\lambda/2$ metros de separación. λ es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia central de la banda de frecuencia más baja en el rango de interés.

¹⁸ La letra R antes del número sirve para indicar que se trata de una Recomendación; la cual no es propiamente una norma. En la actualidad ya no se publica como recomendación sino como norma (ISO-354).

3) La caja acústica debe ser colocada en una de las esquinas de la cámara.

4) No es indispensable calibrar los instrumentos de acuerdo a la sensibilidad de los micrófonos ya que las mediciones son relativas. Sin embargo, puede ser necesario cuando el indicador analógico del B&K-2636 arroje lecturas de niveles negativos (dB negativos). La manera de calibrar se describe en la sección 5.5.

5) Antes de cerrar las puertas de la cámara, verifique que el B&K-2636 tenga las ganancias de entrada y salida al máximo de atenuación o que esté apagado.

6) Durante las mediciones se tiene control manual sobre todos los instrumentos excepto, momentáneamente, en el B&K-2636 del cual sólo deberán seleccionarse las ganancias convenientes según lo exija el nivel de sonido. El programa "REV_CAM" controla nada más por medio de la computadora al B&K-2636. Los cambios de banda de frecuencia y de canal los debe hacer el usuario.

7) El programa indica el momento en que deben hacerse los cambios en los atenuadores.

8) Para interrumpir la emisión de sonido inhíba, en el amplificador de potencia, el sistema (A o B) al que está conectada la caja acústica, así evitará la aparición de un pico de voltaje que se traduciría en un impulso sonoro.

La norma ISO recomienda¹⁹ que en frecuencias de 250Hz y menores, se determine el tiempo de reverberación en la parte inicial del decaimiento, sobre los primeros 10dB de caída²⁰. En frecuencias mayores a 250Hz, los tiempos de reverberación deben ser determinados de la pendiente que se encuentre entre -5 y -35dB.

¹⁹ ISO 3741(1988), sec. 8.2.1.

²⁰ La diferencia entre la potencia sonora en campo libre y en campo reverberante es menor usando T60 determinado en los primeros 10dB que determinado en un rango de 30dB. En la referencia [16] para el primer capítulo se presenta una demostración experimental.

El sistema de altavoces que se utilice para medir los tiempos de reverberación, debe ser considerado parte del ambiente de prueba.

Para poder calcular los niveles de potencia, SCIMPSEPS solicita al usuario los siguientes datos: presión atmosférica en mm Hg ó en cm Hg, y la cantidad de difusores. Este último, para poder calcular el área total de superficies reflejante dentro de la cámara (ver capítulo 3).

5.9 Método de comparación.

Este método requiere el uso de una fuente de referencia, la cual debe funcionar en presencia de la fuente de prueba. Así mismo, la fuente de prueba debe funcionar en presencia de la fuente de referencia. No deben estar encendidas simultáneamente.

El método tiene la ventaja de que no es necesario medir los tiempos de reverberación. Sin embargo, el tiempo de medición para determinar los niveles de potencia sonora se doblan no importando cual de los análisis se haga (en tercios de octava o en octavas). Aumenta al doble el tiempo de medición porque hay que medir la fuente de prueba y la fuente de referencia, de la misma manera. Ya se explicó en capítulos anteriores cómo hacer las mediciones (ver capítulo 3).

Al hacer las mediciones, primero se analiza la fuente de referencia. Es decir, primero se mide el ruido de fondo; después se analizan algunas muestras de ruido de la fuente de referencia para saber que tipo de ruido se registra y cuantos micrófonos deben utilizarse²¹; el tercer paso es medir los niveles de presión sonora (NPS) producidos por la fuente de referencia; lo siguiente, es tomar muestras del ruido producido por la fuente de prueba; por último, se miden los NPS de la fuente de prueba.

²¹ Estrictamente debe registrarse ruido de banda ancha en todo el rango de interés; sin embargo, a veces pueden estar mal ubicados algunos micrófonos o la fuente, lo que causa que se registren variaciones espaciales de energía considerables en el campo.

El fabricante de la fuente de referencia, al hacer entrega de su producto, proporciona una carta de calibración que contiene los niveles de potencia sonora de la fuente en un amplio rango de frecuencias, en tercios de octava y en octavas; la frecuencia de rotación de la fuente; la presión atmosférica, y la temperatura ambiente, entre otros datos no tan importantes. En el penúltimo apéndice de esta tesis, se muestra una copia de la carta de calibración de la fuente B&K-4204 propiedad del Laboratorio de Acústica.

La potencia acústica de salida de la fuente varía ligeramente cuando se mide en condiciones distintas a las que anotó el fabricante en su carta de calibración. Las variables físicas que contribuyen de manera más importante a estos cambios son: la temperatura ambiente, la presión barométrica y la frecuencia de rotación. De las tres variables, la más significativa es la última, ya que depende de las características del voltaje de línea que alimenta a la fuente. La segunda variable en importancia es la segunda; recuerdese que a mayor altitud es menor la presión atmosférica y la fuente hace menos gasto de energía para radiar (ver capítulo 1). Las aspas de la fuente producen una turbulencia de aire la cual, a su vez, produce el ruido característico de la fuente; a mayor temperatura en el ambiente, mayor será la agitación de aire y mayor el ruido producido; a pesar de ello, la temperatura no es un factor tan importante ya que es del orden de milésimas de dB, mientras que los otros dos son del orden de décimas de dB.

El fabricante indica, paso a paso, la manera de hacer las correcciones (ver la referencia [6] para el capítulo 4). Independientemente de que se consulte el manual de operación de la fuente, a continuación se menciona brevemente la manera de hacer las correcciones:

- 1) Mida la temperatura ambiente (T) y sustitúyala en la fórmula

$$\Delta L_T = 5 \log \left(\frac{T_{cal}}{T} \right),$$

donde T es la temperatura ambiente, en °K, y T_{cal} es la temperatura

ambiente dada en la carta de calibración.

2) Mida la presión atmosférica y calcule el siguiente factor de corrección:

$$\Delta L_p = 10 \log \left(\frac{B}{B_{cal}} \right),$$

donde B es la presión ambiental, en mbar, y B_{cal} es la presión barométrica dada en la carta de calibración.

3) Mida la frecuencia de rotación de la fuente de ruido B&K-4204 como se muestra en la figura 5.5. Antes de encufar la fuente, para máxima seguridad de operación, fíjese que el cable café vaya conectado al vivo de la línea y el cable azul al neutro. En la parte superior de la fuente hay pintados dos sectores circulares color turquesa que contrastan con el fondo negro. Estas marcas facilitan la medición de la frecuencia de rotación de la fuente usando un estroboscopio o un fotodetector. El estroboscopio con el que cuenta el Laboratorio es de baja resolución (1Hz) por lo que es más conveniente medir con un fotodetector.

La manera de medir con fotodetector se muestra en la figura 5.5. El fotodetector debe colocarse perpendicular a las marcas a una distancia de 4mm, de preferencia donde las marcas tengan 10 mm de ancho o menos (ver la página 12 de la referencia [1]). Es importante montar el fotodetector en una base fija, así se evita algún accidente. Para quitar la malla protectora de la fuente, se debe usar llave milimétrica M#17 de 2.5mm.

El uso del analizador de frecuencias permite determinar la frecuencia de rotación con una exactitud de hasta milésimas de Hz; pero es suficiente si se obtiene el dato con exactitud de décimas de Hz, que es como lo registra el fabricante.

Una vez que haya medido, ponga la rejilla de protección a la fuente. Ahora puede calcular el factor de corrección con la siguiente fórmula:

**SISTEMA PARA MEDIR LA FRECUENCIA
DE ROTACION DE LA FUENTE
SONORA DE REFERENCIA**

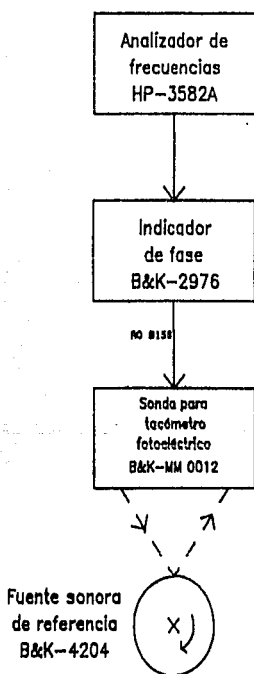


Fig. 5.5

$$\Delta L_f = 0.5 \cdot (f - f_{cal}),$$

donde f es la frecuencia de rotación, en Hz, y f_{cal} es la frecuencia de rotación dada en la carta de calibración.

4) Ya que tiene el valor de cada uno de los factores, la corrección total es

$$\Delta L = \Delta L_f + \Delta L_P + \Delta L_r$$

y debe ser sumada a los niveles de potencia dados en la carta de calibración.

5) El cálculo de los factores de corrección, así como las correcciones, son hechos por el programa SCIMPSEPS. El usuario sólo tiene que ingresar los datos obtenidos de las mediciones; es decir, B, T y f únicamente.

6) Se recomienda medir la frecuencia de rotación fuera de la cámara reverberante para evitar daños auditivos.

Esta medición se realiza en media hora, aproximadamente.

5.10 Comentarios.

No hay duda de que la aplicación del procedimiento de medición, apegado a normas, desarrollado en esta tesis facilita mucho la tarea de determinar los niveles de potencia sonora de una fuente de ruido en una cámara reverberante. Poner micrófonos y ubicarlos dentro de la cámara resulta sencillo pues se cuenta con poleas en lugares estratégicos, lo cual evita la molestia de estar midiendo distancias y de llenar con tripiés la cámara reverberante. Colocar fuentes de ruido que normalmente funcionan en el suelo también es tarea simple y rápida si se utilizan las líneas rojas de referencia. Colgar y descolgar difusores tampoco es difícil pues se usan ganchos.

Por otro lado, el programa SCIMPSEPS permite que las mediciones de nivel de presión sonora, las correcciones pertinentes y la evaluación de los niveles de potencia sonora sean realizados casi totalmente por la computadora; por lo cual el usuario dedica muy

pocos minutos frente a la computadora o los instrumentos, siendo que la medición dura horas.

En cuanto a la medición de la frecuencia de rotación de la fuente de referencia, se puede decir que es más el tiempo que lleva armar el sistema para medir que hacer la medición.

El único "problema serio" es la medición de los tiempos de reverberación ya que consumen entre tres y siete horas, según el tipo de análisis que se haga y la exactitud que se quiera. Una solución es usar los tiempos de reverberación que se tenga en archivo, no obstante que hayan sido medidos en otras condiciones ambientales; obviamente los resultados no serán muy confiables. La solución más conveniente, propuesta por esta tesis, es revisar el procedimiento de medición y hacerle modificaciones -conforme a la norma ISO 354- hasta automatizarlo al máximo; para lograr tal objetivo habría que utilizar una fuente de sonido que pudiese ser activada y desactivada remóticamente desde la computadora.

5.11 Referencias.

[1] Phase Indicator Type 2976. Instruction Manual.

Brüel & Kjær
Nærum Offset

Denmark, 1981

6 EJEMPLOS DE MEDICION

Se presentan los reportes de resultados de dos mediciones hechas como ejemplo. Un reporte completo comprende: una tabla de resultados, un croquis de la cámara para la localización de los puntos de medición, un cuestionario, una gráfica de tiempo de reverberación, una gráfica de niveles promedio de presión sonora y una gráfica de niveles de potencia sonora. El reporte de resultados o informe es muy explícito; si hay dudas se pueden revisar los capítulos 3 y 5.

La fuente de ruido fue medida y analizada en bandas de un tercio de octava mediante los dos métodos de medición que proponen tanto las normas internacionales como las estadounidenses.

Durante su ejecución, el programa SCIMPSEPS crea varios archivos de datos los cuales contienen información que se utiliza en el reporte final o que, sin necesidad de ser reportada, puede ser de interés para un trabajo en particular. Se incluye en este capítulo una breve descripción de los distintos archivos para que el usuario pueda hacer un programa para leerlos.

6.1 Algunas características de la fuente.

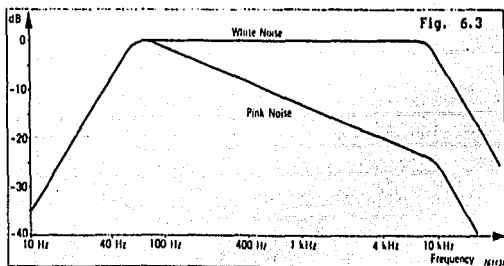
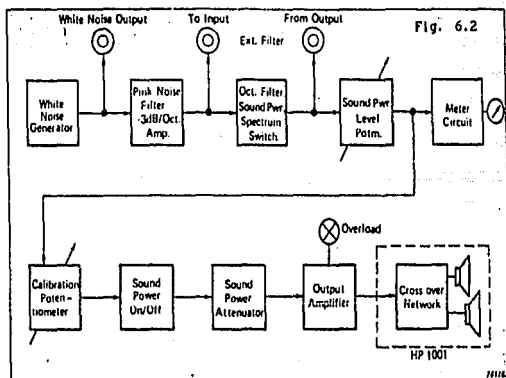
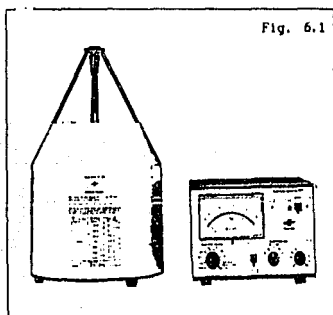
Para las pruebas se utilizó la Fuente de Potencia Sonora Tipo 4205, de la marca Brüel & Kjær. Consiste de dos unidades separadas: el Generador (B&K-4205), conteniendo todos los controles, filtros, amplificadores, medidores, etc., y la Fuente Sonora HP-1001, conteniendo dos bocinas y una red de cross over.

La potencia acústica de salida de la fuente puede ser variada continuamente en un rango de 40 a 100dB (re 1pW). Puede emitir ruido blanco en un rango de frecuencias desde 100Hz hasta 10KHz; ruido rosa en un rango de 0.1 a 10KHz, y ruido filtrado en bandas de octava, desde 125 hasta 8000Hz.

Para las mediciones se puso el atenuador en 90dB y el potenciómetro de ajuste fino en la posición 6. Se seleccionó un espectro de banda ancha en el rango de 100Hz a 10KHz. Empleando la carta de calibración de la fuente HP-1001 se corrigió, con un valor

de +1.14dB, la potencia de salida. Esta corrección se debe a la variación de la impedancia acústica del aire, ρc , con la temperatura (ver página 17 de la referencia [4]).

En la figura 6.1 se muestra la apariencia de la fuente B&K-4205; en la figura 6.2, un diagrama a bloques simplificado de la fuente, y en la figura 6.3, las salidas típicas de ruido blanco y ruido rosa. (Las figuras fueron extraídas de la referencia [4].)



6.2 Método directo.

A continuación se presenta el reporte de los resultados obtenidos de las mediciones hechas a la fuente B&K-4205 mediante el método directo.

**NIVELES DE
POTENCIA SONORA
(ANÁLISIS POR TERCIOS DE OCTAVA)**

Banda No.	Frec. [Hz]	Tiempo de Reverb. [s] ±Sx	Mediciones (NnXNs)	Nivel de Presión Sonora Lp [dB](re 20µPa)	Nivel de Potencia Sonora Lw [dB](re 1pW)
20	100	18.6 ±3.4	6 X 1 *	83.5	83.5
21	125	17.5 ±3.3	6 X 1 *	84.5	84.0
22	160	16.3 ±1.4	6 X 1 *	82.5	82.0
23	200	15.9 ±0.8	6 X 1 *	80.5	80.0
24	250	12.4 ±0.4	6 X 1 *	80.0	80.5
25	315	12.4 ±0.5	6 X 1 *	80.0	80.0
26	400	13.0 ±0.5	6 X 1 *	80.5	80.0
27	500	12.3 ±0.3	6 X 1 *	82.5	82.5
28	630	10.2 ±0.4	6 X 1 *	85.0	85.5
29	800	9.1 ±0.2	6 X 1 *	87.5	88.5
30	1000	8.8 ±0.1	6 X 1 *	86.5	87.5
31	1250	8.6 ±0.1	6 X 1 *	83.0	84.0
32	1600	7.9 ±0.1	6 X 1 *	83.0	84.5
33	2000	6.8 ±0.1	6 X 1 *	81.0	83.0
34	2500	6.0 ±0.1	6 X 1 *	80.5	83.0
35	3150	5.0 ±0.1	6 X 1 *	79.5	83.0
36	4000	4.0 ±0.1	6 X 1 *	79.0	83.5
37	5000	3.1 ±0.0	6 X 1 *	78.5	84.0
38	6300	2.4 ±0.0	6 X 1 *	77.0	83.5
39	8000	2.1 ±0.0	6 X 1 *	74.0	81.0
40	10000	2.0 ±0.0	6 X 1 *	70.0	77.5

Método de medición: directo

Temperatura promedio: 20.0°C (68.0°F)

Humedad relativa promedio: 66.0%

Presión atmosférica: 583mm Hg (777.3mbar) (77.73kPa)

Fecha: 7/jul/1992

Hora: 15:23 hrs.

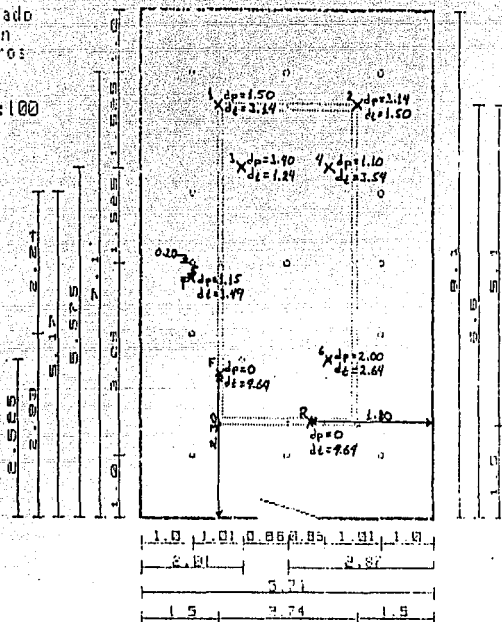
TIPO DE RUIDO:
#Banda ancha
+Banda angosta
X Tono discreto

LAS MEDICIONES FUERON HECHAS CONFORME A LAS NORMAS
ISO-3741(1988), ISO-3742(1988) Y ANSI-S1.31(R1986), ANSI-S1.32(R1986)

NOTA: Ns: número de lugares donde se colocó la(s) fuente(s).
Nn: número de puntos de medición donde se puso el receptor.
Sx: desviación estándar.

Acotado
en
metros:

1.35:100



PLANO EN EL QUE SE INDICA LA UBICACION DE LOS PUNTOS PROPUESTOS DE MEDICION Y PRUEBA.

Marque con una cruz los puntos donde puso micrófono; enumérelos e indique, al lado de c/u, la distancia al piso (dp) y al techo (dt). Si se pusieron micrófonos en lugares no propuestos, marque la distancia a dos paredes adyacentes. Haga lo mismo para marcar la(s) ubicación(es) de la fuente(s); así como de objetos ajenos al ambiente de medición que se encontraban dentro de la cámara.

Si el espacio es insuficiente, indica las distancias en los renglones de abajo.

F: FUENTE DE PRUEBA

R: FUENTE DE REFERENCIA (DESACTIVADA)

Características de la fuente de prueba: FUENTE DE POTENCIA SONORA TIPO B&K-7205
SALIDA VARIABLE: 40 - 100 dB (C) (PW). CONSTA DE DOS UNIDADES: GENERADOR
Y FUENTE DE RUIDO TIPO HP-1001

Condiciones de operación de la fuente de prueba: BANDA ANCHA: 100 Hz A 10 KHz.
CORRECCIÓN: +14 dB. CONTROLES: ATENUADOR EN 40 dB; POT. AJUSTE FINO, EN 6.

Cantidad de difusores dentro de la cámara: 12

¿Se requirió de algún operario para vigilar la fuente? Si ___ No

¿Hubo objetos ajenos al procedimiento de medición dentro de la cámara? Si ___ No

En caso afirmativo, escriba sus características y su ubicación _____

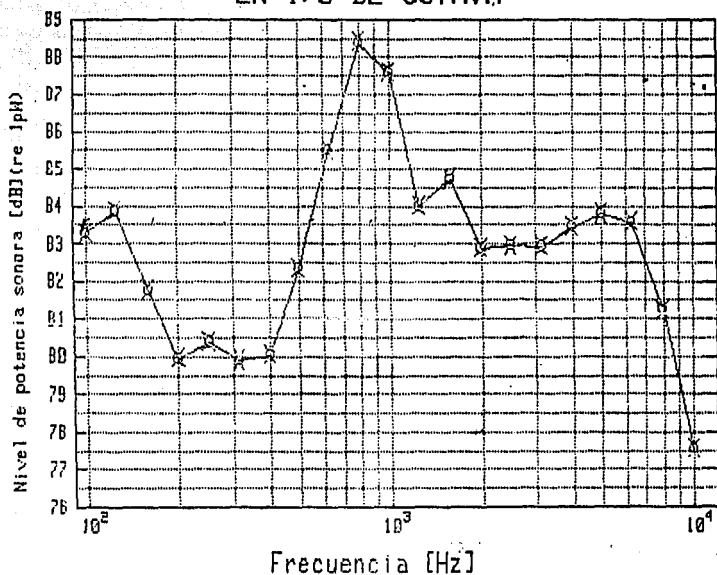
Responsable: AGR

Comentarios: SE USÓ TRIPIÉ PARA EL MIC. 5

LABORATORIO DE ACUSTICA DEL CENTRO DE INSTRUMENTOS
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

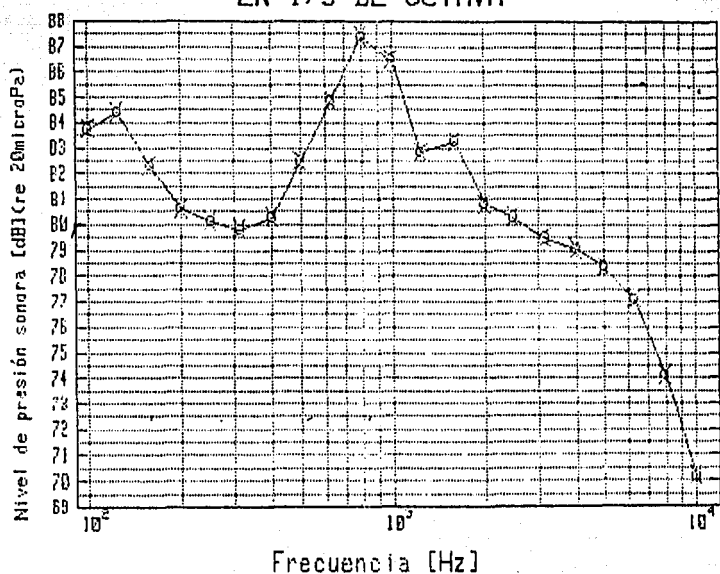
NOTA: Los difusores, en este caso, son placas de poliestireno de 1.2x1.8 metros.
Si puso difusores de otro material, indíquelo.

NIVEL DE POTENCIA SONORA
EN 1/3 DE OCTAVA



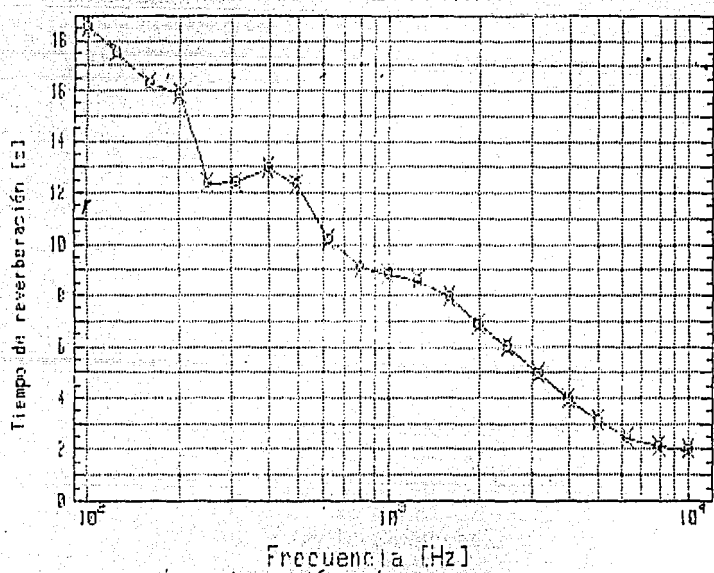
Método directo

NIVEL DE PRESION SONORA EN 1/3 DE OCTAVA



Método directo

TIEMPO DE REVERBERACIÓN
EN 1/3 DE OCTAVA



6.3 Método de comparación.

A continuación se presenta el reporte de los resultados obtenidos de las mediciones hechas a la fuente B&K-4205 mediante el método de comparación.

**NIVELES DE
POTENCIA SONORA
(ANÁLISIS POR TERCIOS DE OCTAVA)**

Banda No.	Frec. [Hz]	N. de Pres. Lpr [dB] (re 20 Pa)	Mediciones (NmXNs)	Nivel de Presión Sonora Lp [dB] (re 20 μPa)	Nivel de Potencia Sonora Lw [dB] (re 1pW)
20	100	77.0	6 X 1 *	84.0	86.5
21	125	78.5	6 X 1 *	84.5	86.5
22	160	78.5	6 X 1 *	82.5	85.5
23	200	79.0	6 X 1 *	80.5	82.5
24	250	78.0	6 X 1 *	80.0	82.5
25	315	77.5	6 X 1 *	80.0	82.5
26	400	78.5	6 X 1 *	80.5	82.0
27	500	78.5	6 X 1 *	83.0	84.5
28	630	78.5	6 X 1 *	85.0	87.0
29	800	80.0	6 X 1 *	87.5	90.0
30	1000	81.0	6 X 1 *	86.5	89.5
31	1250	82.0	6 X 1 *	83.0	86.0
32	1600	82.5	6 X 1 *	83.5	86.5
33	2000	82.0	6 X 1 *	81.0	84.5
34	2500	80.5	6 X 1 *	80.5	84.0
35	3150	78.5	6 X 1 *	79.5	85.0
36	4000	77.5	6 X 1 *	79.5	85.0
37	5000	76.0	6 X 1 *	78.5	85.5
38	6300	74.0	6 X 1 *	77.5	85.0
39	8000	71.0	6 X 1 *	74.5	83.5
40	10000	67.0	6 X 1 *	70.5	82.0

Método de medición: de comparación

Fuente de referencia: B&K-4204. Frecuencia de rotación: 57.8Hz
Factor de corrección para la fuente de referencia: -1.04dB (re 1pW)

Temperatura promedio: 20.5°C (68.9°F)

Humedad relativa promedio: 63.3%

Presión atmosférica: 583mm Hg (777.3mbar) (77.73kPa)

Fecha: 18/jul/1992
Hora: 18:48 hrs.

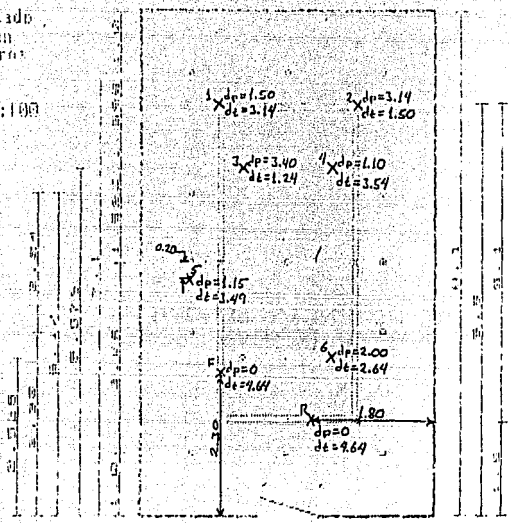
TIPO DE RUIDO:
*Banda ancha
+Banda angosta
X Tono discreto

LAS MEDICIONES FUERON HECHAS CONFORME A LAS NORMAS
ISO-3741(1988), ISO-3742(1988) Y ANSI-S1.31(R1986), ANSI-S1.32(R1986)

NOTA: Ns: número de lugares donde se colocó (a)s fuente(s).
Nz: número de puntos de medición donde se puso micrófono.
Lpr: nivel promedio de presión sonora de la fuente de referencia.

Acotado en metros

1.75:1969



PLANO EN EL QUE SE INDICA LA UBICACION DE LOS PUNTOS PROPUUESTOS DE MEDICION Y PRUEBA.

Marque con una cruz los puntos donde puso micrófonos; enumérelos e indique, al lado de c/u, la distancia al piso (dp) y al techo (dt). Si se pusieron micrófonos en lugares no propuestos, marque la distancia a dos paredes adyacentes. Haga lo mismo para marcar la(s) ubicación(es) de la fuente(s); así como de objetos ajenos al ambiente de medición que se encontraban dentro de la cámara.

Si el espacio es insuficiente, indique las distancias en los renglones de abajo.

F: FUENTE DE PRUEBA
R: FUENTE DE REFERENCIA

Características de la fuente de prueba: FUENTE DE POTENCIA SONORA TIPO B&K 4205 SALIDA VARIABLE: 40-100 dB (cc 1pW). CONSTA DE DOS UNIDADES: GENERADOR Y FUENTE DE RUIDO TIPO HP-1001

Condiciones de operación de la fuente de prueba: BANDA ANCHA: 100 Hz a 10 KHz CORRECCIÓN: +1.14 dB. CONTROLES: ATENUADOR, 90 dB; AJUSTE FINO, 6.

Cantidad de difusores dentro de la cámara: 12

¿Se requirió de algún operario para vigilar la fuente? Si No

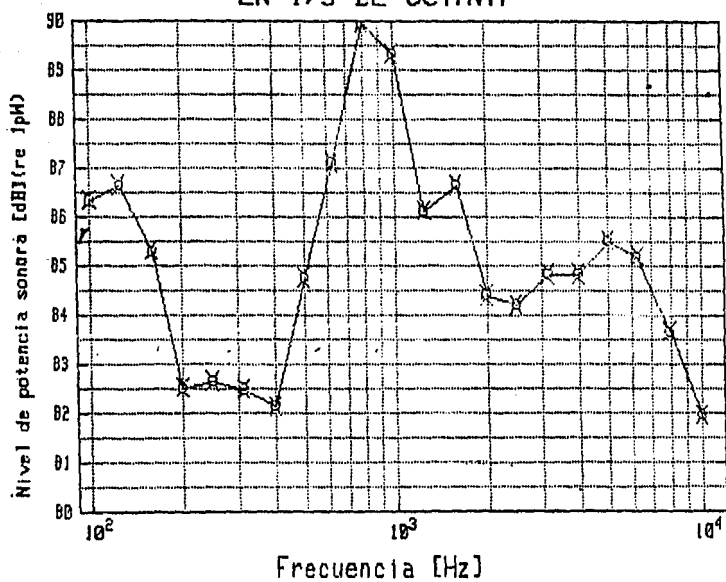
¿Hubo objetos ajenos al procedimiento de medición dentro de la cámara? Si No
En caso afirmativo, escriba sus características y su ubicación

Responsable: AGR
Comentarios: SE USÓ TRÍPODE PARA EL MIC. 5

LABORATORIO DE ACUSTICA DEL CENTRO DE INSTRUMENTOS
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

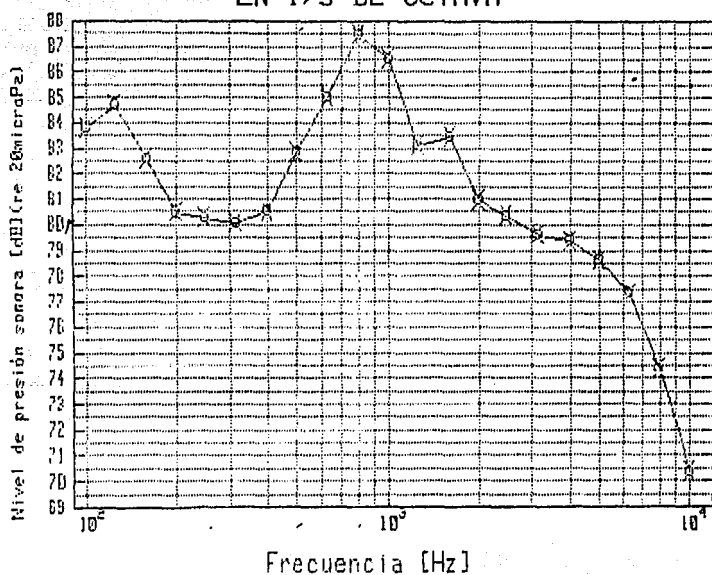
NOTA: Los difusores, en este caso, son placas de poliestireno de 1.2x1.8 metros.
Si puso difusores de otro material, indíquelo.

NIVEL DE POTENCIA SONORA
EN 1/3 DE OCTAVA



Método de comparación

NIVEL DE PRESION SONORA
EN 1/3 DE OCTAVA



Método de comparación

6.4 Comentarios sobre los ejemplos.

Los niveles de potencia y de presión reportados están redondeados al medio decibel más cercano, tal y como lo exigen las normas¹. Es decir, para poder ser presentados en un informe de resultados, los niveles deben ser redondeados, según su valor, al número real más próximo cuya parte fraccionaria sea de 0.5dB, o a la cantidad entera más próxima. Una de las razones para redondear es que no tiene sentido reportar los resultados con tanta exactitud cuando, en la actualidad [1], los aparatos más sensibles -como el utilizado para estas mediciones- permiten la obtención de con una exactitud de hasta $\pm 0.5\text{dB}$. Otra razón es que una diferencia de $\pm 0.1\text{dB}$ en un sonido es casi insignificante pues corresponde a $20.2\mu\text{Pa}$ ó 1.02pW ; valores muy próximos a los de referencia ($20\mu\text{Pa}$ ó 1pW) que, como ya se sabe, corresponden a la fluctuación de la presión media y a la potencia del sonido audible más débil a una frecuencia de 1000Hz . Además, considerando el uso que se le puede dar a los datos (ver capítulo 3), es obvio que sería infructuoso esmerarse en obtener resultados con una precisión de céntesimas o, inclusive, de una décima de decibel.

Se debe señalar que las tablas de los ejemplos son sólo una manera de presentar los datos. Estas tablas tienen más información de la que exigen las normas para un reporte final. De hecho, en la mayoría de los casos, debe ser suficiente, para el solicitante del servicio, un reporte con los niveles de potencia sonora graficados y tabulados; algunos comentarios sobre las condiciones en las que operó la fuente y las condiciones ambientales durante la prueba; un croquis con la localización de la fuente de prueba; la fecha y la hora en las que se llevó a cabo la medición, y el nombre de las normas conforme a las cuales se midió (pueden ser las internacionales o las estadounidenses o ambas). Puede añadirse más información, en caso necesario.

De cualquier forma, SCIMPSEPS, antes de terminar su ejecución, elabora un reporte como el de los ejemplos. Este reporte puede ser

¹ ISO 3741(1988), sec. 9.
ANSI S1.31(R1986), sec. 10.

guardado por el Laboratorio para ir formando un archivo con la historia de cada una de las mediciones que se vayan realizando.

Para poder comentar un poco más sobre la calidad de las mediciones hechas como ejemplo siguiendo los métodos propuestos por las normas, se muestran a continuación unas tablas de los niveles de potencia (L_w) y de presión (L_p) sin el redondeo necesario para el reporte final y con sus incertidumbres o sus desviaciones asociadas.

Banda de Frecuencia [Hz]	Método Directo		Método de Comparación	
	Nivel de Potencia Sonora L_w [dB] (re 1pW)	Incert. en el cálculo de L_w [dB]	Nivel de Potencia Sonora L_w [dB] (re 1pW)	Incert. en el cálculo de L_w [dB]
100	83.3	2.2	86.3	1.1
125	83.9	1.8	86.6	1.2
160	81.8	1.5	85.3	1.2
200	80.0	0.8	82.5	0.3
250	80.4	1.0	82.6	1.3
315	79.9	0.7	82.5	1.4
400	80.0	0.7	82.1	1.0
500	82.3	0.5	84.7	0.8
630	85.5	0.7	87.1	0.9
800	88.4	0.6	89.9	1.0
1000	87.6	0.6	89.3	1.3
1250	84.0	0.4	86.1	1.2
1600	84.7	0.2	86.6	1.2
2000	82.9	0.5	84.4	1.1
2500	82.9	0.3	84.2	1.1
3150	82.9	0.2	84.8	1.0
4000	83.4	0.4	84.8	1.0
5000	83.8	0.4	85.5	0.9
6300	83.6	0.6	85.2	1.1
8000	81.2	0.8	83.6	0.9
10000	77.6	0.9	81.9	1.0

Banda de Frecuencia [Hz]	Método Directo		Método de Comparación	
	Nivel de Presión Sonora L_p [dB] (re 20 μ Pa)	Desviación Estándar de L_p [dB]	Nivel de Presión Sonora L_p [dB] (re 20 μ Pa)	Desviación Estándar de L_p [dB]
100	83.7	1.4	83.8	1.5
125	84.4	1.0	84.7	0.8
160	82.3	1.1	82.6	1.2
200	80.6	0.6	80.5	0.3
250	80.1	0.9	80.2	0.9
315	79.8	0.5	80.1	0.7
400	80.3	0.5	80.5	0.5
500	82.5	0.4	82.8	0.3
630	84.9	0.5	85.0	0.3
800	87.4	0.5	87.5	0.5
1000	86.5	0.5	86.5	0.5
1250	82.8	0.3	83.1	0.4
1600	83.2	0.2	83.4	0.4
2000	80.8	0.4	80.9	0.3
2500	80.3	0.3	80.3	0.3
3150	79.5	0.2	79.6	0.3
4000	79.0	0.3	79.4	0.4
5000	78.3	0.3	78.6	0.3
6300	77.1	0.5	77.3	0.6
8000	74.1	0.8	74.4	0.7
10000	70.2	0.9	70.3	1.1

Primeramente, omitiendo la exactitud de los resultados, puede afirmarse que estos fueron conseguidos con precisión satisfactoria; así lo demuestran las incertidumbres cuyos valores están muy por abajo de los límites impuestos por las normas² (tabla 1 del apéndice 2). Además, es notable la excelente precisión que se logra por el método directo, exceptuando las cuatro primeras bandas de frecuencia; recuerdese que el método directo encuentra mayor aplicación en laboratorios de investigación, mientras que el método de comparación se usa frecuentemente en pruebas industriales (capítulo 3).

En lo que se refiere a la exactitud de los resultados, si se cotejan los niveles de potencia, se puede observar que aquellos que fueron determinados mediante el método directo son menores que los encontrados mediante el método de comparación. Las diferencias van

² ISO 3741(1988), sec. 1.3.

ANSI S1.31(R1986), sec. 1.3,

desde 1.3 hasta 3dB, excepto en 160 y 10000Hz donde son de 3.5 y 5.3dB respectivamente. Estas discrepancias parecen ser consistentes en ciertos rangos de frecuencias: entre 100 y 500Hz, las diferencias van desde 2 hasta 3dB; entre 630 y 6300Hz, se encuentran entre 1 y 2dB. La relativa estabilidad de las diferencias indica que hubo errores sistemáticos [1] en las mediciones. Se descartan como posibles causas una calibración deficiente o alguna falla en el funcionamiento del sistema de medición pues, no obstante las diferencias en los niveles de potencia, los niveles de presión (L_p) medidos fueron prácticamente los mismos; esto quiere decir que las diferencias se debieron a cualquiera de las otras variables que intervinieron en los cálculos de las potencias sonoras por cualquiera de los dos métodos.

Debido a que nada más se hizo una medición de la fuente por cada método, no es posible estimar la desviación estándar de los niveles de potencia, sólo se puede especular acerca de cuál de los dos resultados es más digno de credibilidad. Se puede decir que el método directo es más confiable, en este caso, ya que el investigador o técnico debe medir con el mayor cuidado posible todas las variables que intervienen en la evaluación de los niveles de potencia. En cambio, por el método de comparación, se utilizan datos que no fueron tomados por la persona responsable de la medición; aunque se tenga una fórmula para corregir la carta de calibración que proporciona el fabricante, existen otros factores que podrían hacer inservible dicha fórmula. Estos factores o errores pueden ser producidos por el envejecimiento de la fuente o por falta de mantenimiento adecuado. Por ejemplo, puede haber piezas que no estén bien sujetas o tornillos mal apretados que al vibrar produzcan ruido; puede vibrar también el eje del rotor debido al desgaste de los baleros, etc.

Para que realmente fuese confiable el método de comparación empleando la fuente de referencia que se tiene en el Laboratorio, habría que medir la fuente varias veces, mediante el método directo, y hacer una nueva carta de calibración. Esta carta de calibración permitiría al usuario aplicar confiadamente los factores de

corrección que señala el fabricante.

La "recalibración" de la fuente de referencia aportaría dos ventajas: una, es que se elaboraría una carta de calibración apegada a las características actuales de la fuente; la segunda, que se averiguaría qué exactitud se logra con el ambiente de prueba disponible.

6.5 Archivos de datos.

Antes de comenzar las descripciones se debe aclarar que las porciones de nombre de archivo que aparezcan entre paréntesis cuadrados tienen denominación variable, generalmente elegida por el usuario. La letra que aparece entre corchetes, da a entender que el archivo es exclusivamente del método directo {d} o del método de comparación {c}.

a) Archivos que almacenan nombres de archivos:

TITULOS_[análisis]

[análisis] puede ser T (de Tercias) u O (de Octavas). TITULOS_[..] guarda los títulos de cada uno de los archivos de datos donde se almacenaron los niveles promedio de presión sonora. El orden en que son guardados corresponde con el orden en que se hacen las mediciones; es decir, primero todas aquellas bandas en las que se registró ruido de banda ancha, luego aquellas en que hubo ruido de banda angosta y al último, las que tenían componentes discretas; a la vez, son ordenadas en orden creciente de frecuencia. Para la fuente de referencia se usa exclusivamente el archivo TIT_REF_[análisis]{c}. Ejemplos de este archivo son: TITULOS_O, TIT_REF_T.

FUEN_FON_[análisis]

FUEN_FON_[..] guarda los títulos de los archivos donde se guardaron los niveles de presión del ruido de fondo, y de las muestras para determinar el tipo de ruido que produce la fuente de prueba. Ejemplos: FUEN_FON_O, FUEN_FON_T.

MEDICION_[análisis]

Antes de calcular el promedio espacial de los niveles de presión sonora (NPS) en cada banda de frecuencia, se reordenan ascendentemente, de acuerdo a la frecuencia, los datos del archivo TITULOS_[análisis] (ó TIT_REF_[análisis]{c}), pero ahora haciendo caso omiso del tipo de ruido. Sirve de ayuda para crear el archivo NIPRESON_[análisis] (archivo tipo d). Para la fuente de referencia se tiene MED_REF_[análisis]{c}. Ejemplos: MEDICION_T, MED_REF_T.

b) Archivos relacionados con las mediciones de ruido de fondo y con la determinación del tipo de ruido que produce la fuente:

{fondo}_[análisis]

Archivo donde se guardan los datos promediados de las mediciones de NPS del ruido de fondo. El nombre no debe ser mayor a ocho caracteres. Ejemplos: FON_O, R_FON_T, BN_O.

{muestras}_[análisis]

El archivo {muestras}_[análisis] almacena las muestras de ruido de la fuente para ser comparadas con el ruido de fondo y posteriormente analizadas. Ejemplos: NRDW_T, HUES_T, M_REF_O.

DIFO_[análisis]

En este archivo se guardan las diferencias en dB, que existen entre los niveles promedio de las muestras obtenidas de la fuente y los niveles promedio del ruido de fondo, en cada banda de interés. A la fuente de referencia le corresponde DI_REFO_[análisis]{c}. Ejemplos: DIFO_O, DI_REFO_O, DIFO_T.

CORRECO_[análisis]

De acuerdo a la diferencia almacenada en DIFO_[análisis], se harán correcciones a los datos de NPS recién obtenidos. Si la diferencia esta entre 6 y 12 dB, la corrección se hace interpolando en la Tabla III de la norma ANSI S1.31(Tabla 5, ISO 3741) y en el archivo se guarda la cadena de caracteres "[6,12]", para indicar que la

diferencia estuvo entre estos valores y fue necesario corregir. Si la diferencia es mayor a 12 dB, no es necesario corregir y se guarda la cadena ">12". Cuando la diferencia es menor que 6 dB, no procede la medición según el criterio de las normas, por lo cual tampoco se hacen correcciones; se guardan los caracteres "<6xx". Para la fuente de referencia se tiene el archivo CO_REF0_[análisis]{c}. Ejemplos de estos archivos son: CORRECO_T, CO_REF0_O.

RESTAO_[análisis]

Guarda el valor que debe ser restado a los NPS recién obtenidos. Este valor es extraído de la tabla mencionada en el párrafo anterior. Cuando no se hacen correcciones, en el archivo se guardan solamente ceros. Para la fuente de referencia, las correcciones se guardan en RE_REF0_[análisis]{c}. Ejemplos: RESTAO_T, RE_REF0_O.

DESVIO_[análisis]

Después de haber sido corregidas las muestras, se calcula su desviación típica y se almacena en este archivo. Fuente de referencia: DES_REF_[análisis]{c}. Ejemplos: DESVIO_O, DES_REF_T.

RUIDO_[análisis]

Dependiendo de la desviación típica de las muestras, que fue almacenada en DESVIO_[análisis] y con ayuda de la Tabla II de ANSI S1.32 (Tabla 3, ISO 3741), se identifica el tipo de ruido que produce la fuente en cada una de las bandas de interés. En el archivo se guarda cualquiera de las siguientes cadenas: "B. Ancha", "B. Angosta", "T. Discreto". En el caso de la fuente de referencia, estas cadenas se guardan en RUI_REF_[análisis]. Ejemplos: RUI_REF_T, RUIDO_O.

UBICA[análisis]

Después de haber encontrado el tipo de ruido que se produce en cada banda de frecuencia, se busca el número de micrófonos (Nm) en la Tabla III de ANSI S1.32 (Tabla 4, ISO 3742) y se calcula el número

de lugares donde deberá ser colocada la fuente de ruido (Ns). En UBICA[análisis] se almacenan por pares los Nm y Ns, en ese orden, para cada banda de frecuencia del análisis. UBICA[análisis]_REF{c} es semejante a UBICA[análisis] solo que el primero guarda Nm y Ns para la fuente de referencia. Ejemplos: UBICAT, UBICAO_REF.

c) Archivos relacionados con las mediciones definitivas de los niveles de presión sonora (NPS) producidos por la fuente de ruido.

[NPS][banda][# fuentes]_[análisis]

Este archivo guarda los NPS promediados por punto de medición en una banda de frecuencia. [NPS] es elegido por el usuario; el programa designa [banda] y [# fuentes]. Ejemplos: MEDIS201_T, quiere decir que el usuario hizo un análisis en tercios de octava en la banda número 20 y midió la fuente en un sólo lugar dentro de la cámara; NIVEL333_O, este archivo tiene guardados los NPS promediados en cada punto de medición correspondiente a cada una de las tres ubicaciones donde se midió la fuente, en la banda número 33 en octavas.

DIF[banda]_[análisis]
 DI_REF[banda]_[análisis]{c}
 CORREC[banda]_[análisis]
 CO_REF[banda]_[análisis]{c}
 RESTA[banda]_[análisis]
 RE_REF[banda]_[análisis]{c}

Son semejantes a los archivos tipo b, salvo que ahora se crea un archivo por cada banda de interés. En vez de cero en el nombre se tienen cifras que representa el número de banda de frecuencia. Algunos ejemplos son: RESTA21_O, CO_REF20_T, DI_REF33_T, CORREC40_O.

d) Archivos relacionados con los resultados finales.

NIPRESON_[análisis]

En este archivo se almacena el promedio espacial de los NPS, en las bandas de interés, registrados en todos los puntos de medición utilizados para medir la fuente en todas las ubicaciones que tuvo.

El total de puntos de medición puede calcularse multiplicando Nm por Ns. De características semejantes, pero relativo a la fuente de referencia es NIPREREF_[análisis]{c}. Ejemplos: NIPREREF_0, NIPRES0N_0.

[potencia]_[análisis]

En este archivo se guardan los niveles de potencia sonora producidos por la fuente en cada una de las bandas de frecuencia de interés. Ejemplos: POTDD_T, POT_COM_T, POTDIR_0.

Otros archivos que se usan para la presentación de resultados son DESVIO_[análisis] y los de tipo e.

e) Archivos cuyos datos son aplicados directamente en las fórmulas para calcular los niveles de potencia y que no son creados por SCIMPSEPS.

CENTRAL

Contiene las frecuencias centrales, en Hz, de veinticuatro bandas de frecuencia en el rango de 100 a 20000 Hz, dividido en tercios de octava.

TIEMREV_T{d}
TIEMREV_O(d)

Estos archivos contienen los tiempos de reverberación medidos en bandas de un tercio de octava (T) y en octavas (O). Estos archivos pueden ser modificados por el usuario siempre que considere tener datos más precisos. El uso de estos archivos evita al usuario medir cada vez los tiempos de reverberación; sin embargo, el usuario debe de tener en cuenta que los datos extraídos de TIEMREV fueron obtenidos en condiciones ambientales distintas a las presentes.

DESTIEM_T{d}
DESTIEM_O(d)

Contienen las desviaciones estándar de los tiempos de reverberación almacenados en TIEMREV. Deben ser modificados cada vez que se cada

vez que se modifique TIEMREV.

CAL_REF_T{c}
CAL_REF_O{c}

Guardan los niveles de potencia sonora de la fuente de referencia, proporcionados por el fabricante en su carta de calibración.

Al término de la ejecución del programa SCIMPSEPS se habrán creado 107 archivos de datos si es que la medición se hizo por el método directo en tercios de octava; 191 si se hizo por el método de comparación en tercios de octava; 41, por el método directo en octavas, y 79, por el método de comparación en octavas. Se alcanzarán estas cantidades siempre y cuando los análisis se hagan en un rango de 100 a 10000 Hz, en tercios de octava, o entre 125 y 8000 Hz, en octavas.

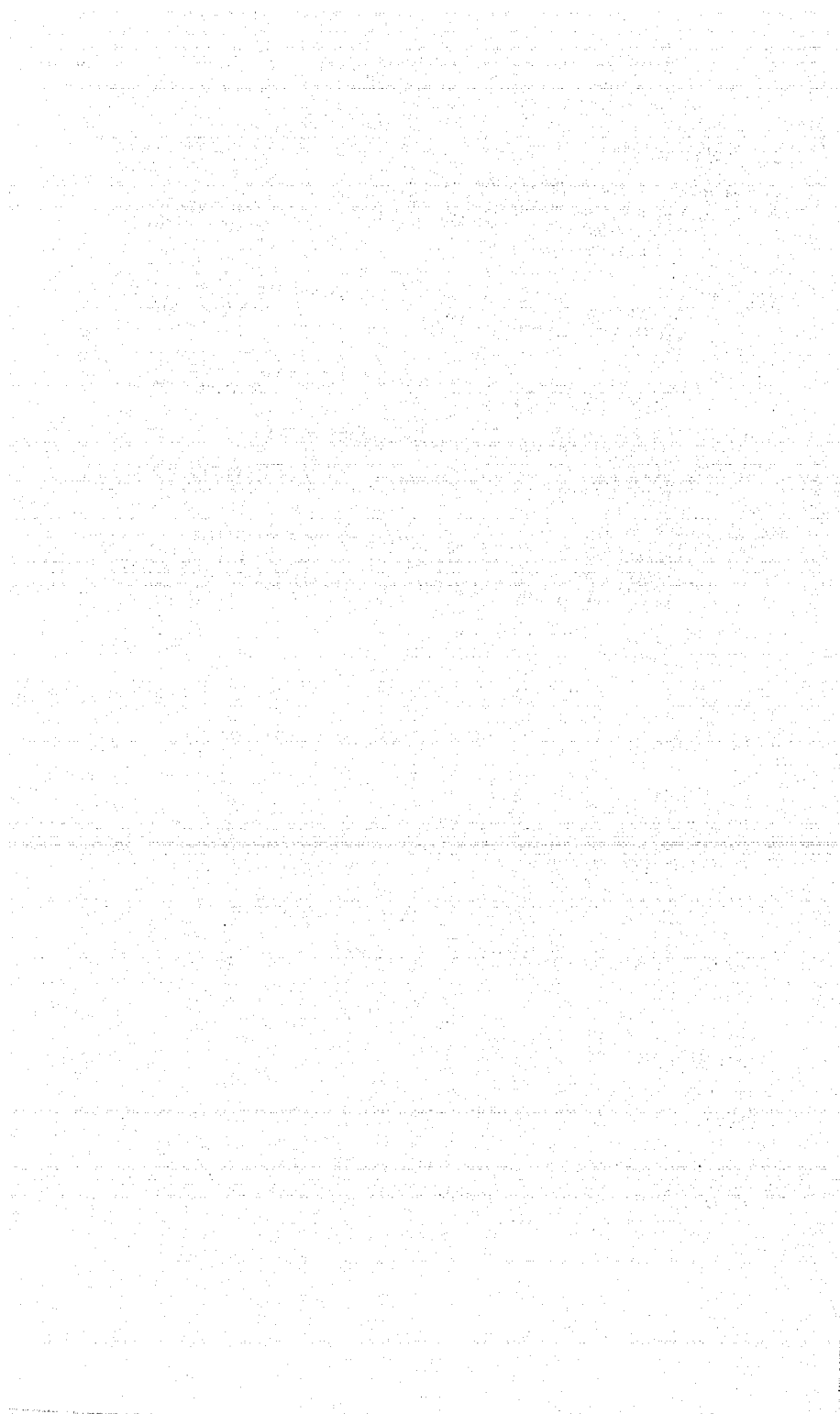
La longitud de los archivos depende del tipo de análisis y del tipo de ruido. El análisis por octavas genera casi tres veces menos archivos que el análisis por tercios de octava. Cuando se ha medido en octavas los archivos tipo a son de menor longitud. Por otro lado, recuerdese que si el tipo de ruido que se midió no fue de banda ancha, significa que se tuvieron que ocupar más de seis puntos de medición o que hubo necesidad de poner la fuente en más de un lugar; esto, por supuesto, implica un aumento en el número de datos que deben ser almacenados.

Para que el usuario pueda darse una idea del tipo de dato que se guarda y la cantidad de datos que hay en cada archivo, puede revisar el catálogo (o directorio) de su disco de datos. En el catálogo, las cuatro primeras columnas tienen: el nombre del archivo ("File Name"); el tipo de archivo ("Type"), o sea, si es de datos (BDAT), de programa (PROG), etc.; el número de datos o registros por archivo ("REC/FILE"), y el número de bytes por registro ("BYTE/REC"). En la cuarta columna aparece un 2 cuando el archivo almacena números enteros; un 8 cuando se trata de números reales, y

cualquier otro número, cuando almacena cadenas de caracteres (un carácter tiene longitud de un byte). Si se desea conocer la cantidad de bytes que ocupa un archivo, se debe multiplicar el número de registros que hay en el archivo por el número de bytes de cada registro. Es decir, $REC/FILE \times BYTE/REC = BYTE/FILE$. Por ejemplo, si se tiene un archivo que almacena 126 números reales, entonces el archivo ocupa 1008 bytes de memoria.

6.6 Referencias.

- [1] HOLMAN, J.P./ GAJDA, W.J.
Métodos experimentales para ingenieros.
Traducción: Julio Fournier Gonzales. 1^a Ed. Español
McGraw-Hill Company México, 1986
- [2] ODA, B.
Introducción al Análisis Gráfico de Datos Experimentales.
Facultad de Ciencias, UNAM. México, 1987
- [3] MATA, G. H.
Prácticas de Laboratorio de Medición e Instrumentación.
Facultad de Ingeniería, UNAM. México, 1991
- [4] Sound Power Source Type 4205. Instruction Manual.
Brüel & Kjør
Nærum Offset. Denmark, 1983
- [5] BARTEL, T.W
Interactive Computer Program for the Determination
of Sound Power. NBSIR 77-1384.
Institute of Basic Standards. National Bureau of Standards
USA, 1977



7 COMENTARIOS FINALES Y RECOMENDACIONES

Puede decirse que se alcanzó el objetivo de la tesis no obstante lo impracticable de algunas instrucciones de las normas. Tal es el caso de la medición de tiempos de reverberación, o de la gran cantidad de micrófonos y de sitios dentro de la cámara, necesarios para medir una fuente de ruido con componentes discretas o de banda angosta. A pesar de estos problemas, y de otros de menor importancia, el programa SCIMPSEPS tiene la capacidad de llevar a cabo mediciones de cualquiera de los tres tipos de ruido que permiten medir las normas; ya sea que se utilicen seis o treinta lugares para micrófonos o más de cuatro sitios donde medir la fuente dentro de la cámara.

En relación a las normas, no está por demás decir que no son infalibles. Se llegaron a detectar errores importantes (algunos de ellos tipográficos, otros no); instrucciones impracticables o poco sensatas, y cambios notables de una edición a otra. La aplicación de una norma demanda suspicacia y sentido común, para no caer en interpretaciones vagas, rigideces absurdas o acciones desatinadas.

La automatización de las mediciones lograda con el programa SCIMPSEPS, aporta las siguientes ventajas:

- La medición es relativamente rápida.
- Se requiere de la atención del usuario durante pocos minutos.
- Se procesan los datos inmediatamente después de las mediciones.
- Se presentan los resultados gráfica y tabularmente.
- Se almacenan datos y resultados.

En cuanto a los resultados, se logra buena precisión en las mediciones y, en general, muy baja incertidumbre en la determinación de los niveles de potencia, cumpliéndose holgadamente con las restricciones que al respecto imponen las normas.

Por otro lado, como consecuencia de las dificultades que surgieron durante el elaboración de la tesis, se abrió la

posibilidad de desarrollar trabajos tendientes a mejorar algunos procedimientos de medición vigentes en el Laboratorio de Acústica. En orden de importancia, los trabajos a realizar son los siguientes:

-Instrumentación del procedimiento alternativo para determinar niveles de potencia, propuesto por la norma ISO-3742 (ANSI S1.32). La instrumentación de este procedimiento será rápida y sencilla si se aprovechan algunos elementos que aporta esta tesis tanto del programa de automatización como del acondicionamiento de la cámara. El trabajo realmente difícil será el de someter a prueba varias bocinas para elegir de entre ellas la más adecuada para hacer las pruebas de calidad de la cámara.

-Recalibración de la fuente de referencia B&K-4204.

-Adquisición de la edición más reciente de ISO-354 (o su equivalente norteamericano, ANSI/ASTM-C423) y revisión minuciosa de esta norma para saber si ya es compatible con ISO-3742 (ANSI S1.32). En caso de que haya armonía entre ambas normas, hacer las modificaciones pertinentes dentro de la cámara y optimizar el programa para medir tiempos de reverberación.

-En caso de no haber concordancia entre las normas ISO-354 e ISO-3742, entonces se tendrá que optimizar el proceso actual para medir los tiempos de reverberación o instrumentar otro método.

Conviene señalar aquí, y ya para finalizar, que el trabajo con el que se desarrolló esta tesis no pretende ser definitivo. Está sujeto a mejoras, cambios o revisiones, según lo vayan exigiendo las ediciones más recientes de las normas; la utilización de otros instrumentos, o alguna modificación importante de la cámara reverberante.

APENDICE I

La segunda sección de las normas ANSI S1.31, ISO 3741 y ANSI S1.32 presenta las definiciones de algunos de los conceptos que se utilizan en sus cláusulas. En este apéndice se presenta la traducción de esas definiciones. La mayoría de las definiciones se apoya en el hecho de la existencia de una cámara reverberante.

sonido reverberante. En el cuarto de pruebas, el sonido que ha sido reflejado repetida o continuamente por los límites del cuarto y de los objetos que haya en él, tales como difusores.

campo de sonido reverberante. Es aquella porción del campo sonoro, dentro del cuarto de prueba, en la cual la influencia de el sonido recibido directamente de la fuente es despreciable.

tiempo de reverberación (T). Es el tiempo promedio requerido para que el nivel de presión sonora decaiga 60dB, en una banda de frecuencia específica, después de que ha sido desactivada una fuente de banda ancha en el cuarto de pruebas. Unidad: segundo (s).

cuarto reverberante. Es un cuarto de pruebas que cumple con los requerimientos de esta norma¹ y que está diseñado de modo que la variación espacial de el sonido reverberante, dentro él, está minimizada para el estado estable cuando una fuente de ruido está encendida, y para el período de decaimiento cuando la fuente de sonido a sido desactivada.

sonido directo. Es el sonido, dentro del cuarto de pruebas, que llega directamente sin reflexión en cualquier superficie externa a la fuente.

fuentes sonora de referencia. Es una fuente de ruido de banda ancha que cumple con los requerimientos de esta norma² y cuyos niveles de potencia sonora deben ser conocidos en el rango de frecuencias de interés.

¹ ISO 3741 ó ANSI S1.31.

² *Ibidem.*

rango de frecuencias de interés. En general, un rango de frecuencias de interés incluye bandas de octava con frecuencias centrales desde 125 hasta 8000Hz o bandas de un tercio de octava con frecuencias centrales desde 100 hasta 10000Hz. Cualquier banda puede ser excluida si en ella el nivel de presión sonora, debido a la fuente de ruido, es menor que 40dB del nivel más alto de presión sonora (en el rango de interés). Para propósitos especiales, pueden definirse otros rangos de interés dependiendo de las características de la fuente de ruido, en caso de que el cuarto de prueba pueda ser usado satisfactoriamente en el rango de frecuencias apropiado.

longitud de onda (λ). De una onda sonora, es la distancia, en la dirección de propagación, entre las partes del medio que están en la misma fase. Para propósitos de esta norma³, la longitud de onda es igual, numéricamente, al cociente de la velocidad del sonido y la frecuencia central de la banda de interés, en octavas o en tercios de octava.

ruido de fondo. Es el ruido total que interfiere con las mediciones de un sonido en particular. El ruido de fondo puede estar conformado por sonido en el aire, vibraciones estructurales y ruido eléctrico en los instrumentos.

nivel de ruido de fondo. Es el nivel aparente de presión sonora, en una banda de frecuencia específica, medido en el cuarto reverberante cuando la fuente de prueba⁴ no está en operación. Unidad: decibel (dB).

componente discreta de frecuencia. Es una componente de sonido, que tiene una presión sonora instantánea que varía con el tiempo, esencialmente como una función senoidal simple.

componente de banda angosta. Es una componente de sonido cuyo ancho de banda es lo suficientemente angosto para que la variación

³ ISO 3741 ó ANSI S1.31.

⁴ O la fuente de referencia.

espacial del sonido dentro del cuarto sea lo bastante grande como para que las mediciones hechas usando el procedimiento de esta norma, resulten con incertidumbres inaceptablemente grandes⁵.

sonido de banda ancha. Es un sonido que está uniformemente distribuido en frecuencia, y que no incluye componentes prominentes de frecuencia discreta o de banda angosta.

presión sonora. Es una presión fluctuante superimpuesta en la presión estática por la presencia de sonido. Su magnitud puede expresarse de varias maneras, tales como presión sonora instantánea o máxima presión sonora; pero, en esta norma⁶, se presenta la raíz cuadrada de la media al cuadrado de la presión sonora. Unidad: pascal (Pa).

presión sonora media-cuadrática. La presión sonora promediada en el espacio y en el tiempo sobre una base media-cuadrática es denotada como $\langle p^2 \rangle$. En la práctica, la promediación en el espacio-tiempo sobre una trayectoria fija o un número fijo de ubicaciones de micrófonos, tanto como las desviaciones de el campo reverberante ideal, permiten sólo una estimación de $\langle p^2 \rangle$, llamada p_{av}^2 , en esta Norma Internacional⁷.

nivel de presión sonora (L_p). Es diez veces el logaritmo en base 10 de la proporción entre la presión media cuadrática de un sonido y el cuadrado de la presión sonora de referencia. A esta cantidad se le denota por L_p . El ancho de la banda de frecuencia elegida debe ser indicado; por ejemplo, nivel de presión sonora de una banda en octava, nivel de presión sonora de una banda en tercios de octava, etc. La presión sonora de referencia es de $20\mu\text{Pa}$. Unidad: decibel (dB).

potencia sonora. En una banda de frecuencia específica, es la rapidez con la cual la energía sonora es radiada por una fuente sonora. Unidad: watt (W).

⁵ Se da una definición similar en ANSI S1.32.

⁶ ISO 3741 ó ANSI S1.31.

⁷ ISO 3741.

nivel de potencia sonora (L_W). Es diez veces el logaritmo en base 10 de la proporción entre una potencia sonora dada y la potencia sonora de referencia. A esta cantidad se le denota por L_W . El ancho de la banda de frecuencia elegida debe ser indicado; por ejemplo, nivel de potencia sonora de una banda en octava, nivel de potencia sonora de una banda en tercios de octava, etc. La potencia sonora de referencia es de $1\mu W$ Unidad: decibel (dB).

Método de Comparación. Es un método para determinar el nivel de potencia sonora comparando el nivel promedio de presión sonora producido en el cuarto reverberante por la fuente de prueba, con el nivel producido en el cuarto por una fuente de referencia cuyo nivel de potencia de salida es conocido. La diferencia en niveles de potencia es igual a la diferencia en niveles de presión cuando las condiciones en el cuarto son las mismas para ambas mediciones.

Método Directo. Es un método para determinar el nivel de potencia sonora por medio de los niveles de presión sonora producidos por la fuente de prueba en un cuarto reverberante y del tiempo de reverberación y el volumen del cuarto reverberante.

La lista que enseguida se muestra es la traducción de algunas definiciones publicadas en la norma internacional ISO 2204-1979 "Acoustics-Guide to International Standards on the measurement of airborne acoustical noise and evaluation of its effects on human beings" (Acústica-Guía de Normas Internacionales para la medición de ruido acústico en el aire y evaluación de sus efectos en seres humanos). Esta lista sirve de complemento a la anterior.

ruido continuo. Es un ruido con fluctuaciones despreciables de nivel en el período de observación.

ruido discontinuo. Es un ruido cuyo nivel cambia significativamente durante el período de observación.

ruido fluctuante. Es un ruido cuyo nivel varía continuamente y en bastante grado, durante el período de observación.

ruido intermitente. Es un ruido cuyo nivel cae repentinamente hasta el nivel del ruido de fondo, en varias ocasiones durante el período de observación. El tiempo en el cual el nivel permanece constante con un valor diferente al del ruido del ambiente puede ser del 1s ó más.

campo libre. Es el campo sonoro en un área alejada de superficies reflejantes.

campo reverberante. Aquella porción de campo sonoro, dentro de un cuarto de prueba, en la cual es despreciable la influencia del sonido radiado directamente por la fuente.

campo semireverberante. Es el campo sonoro que prevalece en un recinto grande con superficies moderadamente reflejantes.

[The page contains extremely faint and illegible text, likely due to low contrast or poor scan quality. The text is arranged in several paragraphs, but no specific words or phrases can be discerned.]

APENDICE 2

A continuación se presentan las tablas a las que se refiere el capítulo 3.

1 Tablas que aparecen en la norma ANSI S1.31-1980 (R1986).

TABLE I. Estimated standard deviation of sound power level determinations for broad-band sources in reverberation rooms.

Octave-band center frequency (Hz)	One-third octave-band center frequency (Hz)	Standard deviation (dB)
125	100 to 160	3.0
250	200 to 315	2.0
500 to 4000	400 to 5000	1.5
8000	6300 to 10 000	3.0

Tabla I. Desviación estándar estimada para los niveles de potencia sonora, determinados para fuentes de banda ancha en cuartos reverberantes.

TABLE II. Relative tolerances for the instrumentation system.

Frequency (Hz)	Tolerance limits (dB)
100 to 4000	± 1.0
5000 to 8000	± 1.5
10 000	± 2

Tabla II. Tolerancias relativas para el sistema de instrumentación.

TABLE III. Corrections for background noise level.

Difference between sound pressure level measured with sound source operating and background noise level alone (dB)	Correction to be subtracted from sound pressure level measured with sound source operating to obtain sound pressure level due to sound source alone (dB)
6.0	1.3
6.2	1.2
6.5	1.1
7.0	1.0
7.5	0.9
8.0	0.8
8.5	0.7
9.0	0.6
9.5	0.5
10	0.4
11	0.3
12	0.3
> 12	No correction required

Tabla III. Correcciones para niveles de ruido de fondo. Del lado izquierdo se tiene la diferencia entre el nivel de presión sonora medido en la cámara cuando la fuente de ruido está activada y el nivel medido cuando la fuente está desactivada (ruido de fondo únicamente). En el lado derecho se dan las correcciones que deben ser substraídas de el nivel de presión sonora, medido cuando la fuente está activada, para obtener los niveles de presión debidos únicamente a la fuente.

TABLE IV. Maximum allowable sample standard deviation, s_s .

Octave-band center frequencies (Hz)	One-third octave-band center frequencies (Hz)	Standard deviation, s_s (dB)
125	100 to 160	1.5
250 and 500	200 to 630	1.0
1000 and 2000	800 to 2500	0.5
4000 and 8000	3150 to 10 000	1.0

Tabla IV. Desviaciones estándar máximas permisibles, s_s (ecuación 3.5, capítulo 3), para calificar la cámara reverberante.

TABLE A1. Preferred minimum room volume as a function of the center frequency for the lowest frequency band of interest.

Center frequency for the lowest band of interest	Preferred minimum room volume (m ³)
125-Hz octave or 100-Hz one-third octave	200
125-Hz one-third octave	150
160-Hz one-third octave	100
250-Hz octave or 200-Hz one-third octave and higher	70

NOTE: The preferred minimum room volumes given here take into account the requirement of greater accuracy in the 250-Hz octave or 200-Hz one-third octave band inferred from the maximum desired measurement uncertainties in Table I.

Tabla A1. Volumen mínimo preferente para la cámara, como función de la frecuencia central más baja de la banda de frecuencia de interés.

TABLE A2. Recommended room dimension ratios for rectilinear rooms.

l_x/l_y	l_x/l_z
0.83	0.47
0.83	0.65
0.79	0.63
0.68	0.42
0.70	0.59

l_x , l_y , and l_z are the length, width, and height of the room.

Tabla A2. Proporciones recomendables para las dimensiones de cámaras reverberantes rectangulares. l_x , l_y y l_z son largo, ancho y alto, del recinto.

k	One-third octave-band center frequency, (Hz)	C_k (dB)
1	100	-19.1
2	125	-16.1
3	160	-13.4
4	200	-10.9
5	250	-8.6
6	315	-6.6
7	400	-4.8
8	500	-3.2
9	630	-1.9
10	800	-0.8
11	1000	0
12	1250	0.6
13	1600	1.0
14	2000	1.2
15	2500	1.3
16	3150	1.2
17	4000	1.0
18	5000	0.5
19	6300	-0.1
20	8000	-1.1
21	10000	-2.5

k	Octave-band center frequency, (Hz)	C_k (dB)
1	125	-16.1
2	250	-8.6
3	500	-3.2
4	1000	0
5	2000	+1.2
6	4000	+1.0
7	8000	-1.1

Tablas que aparecen en el apéndice C. La primera tabla sirve para calcular, con los datos C_k y k para bandas de octava, el nivel de ponderación A de potencia sonora (ec. 3.6). La segunda tabla sirve para calcular, con los datos C_k y k , para bandas un tercio de octava, el nivel de ponderación A de potencia sonora.

2 Tablas que aparecen en la norma ANSI S1.32-1980 (R1986).

TABLE I. Estimated standard deviation of sound power level determinations for discrete-frequency and narrow-band noise sources in reverberation rooms.

Octave band center frequency (Hz)	One-third octave band center frequency (Hz)	Standard deviation (dB)
125	100 to 160	3.0
250	200 to 315	2.0
500 to 4000	400 to 5000	1.5
5000	6300 to 10 000	3.0

Tabla I. Desviación estándar estimada para los niveles de potencia sonora, determinados para fuentes de banda angosta y frecuencias discretas en cuartos reverberantes.

TABLE II. Characterization of the presence of discrete-frequency or narrow-band components, based upon the spatial variation of the sound field.

Standard deviation, s_m (dB)	Characterization	Number of microphone positions, N_m (or microphone path length l)	Number of source locations, N_s
$s_m < 1.5$	Assume broad-band source (use procedures of S1.31)	$N_m = 3$ [or l computed from Eq. (2) for a continuous path]	$N_s = 1$
$1.5 < s_m < 3$	Assume that a narrow band of noise is present	N_m determined from Table IV [or l computed from Eq. (2) for a continuous path]	Use half the number of source locations computed from Eq. (3)
$s_m > 3$	Assume that a discrete tone is present	N_m determined from Table IV [or l computed from Eq. (2) for a continuous path]	Compute N_s from Eq. (3)

Tabla II. Caracterización de la presencia de componentes de frecuencia discreta o de banda angosta, basada en la variación espacial del campo sonoro. Si $s_m \leq 1.5$ se asume que la fuente emite ruido de banda ancha. Si $1.5 \leq s_m \leq 3$ se asume la presencia de ruido de banda angosta. Si $s_m > 3$ se asume que el ruido tiene componentes discretas. N_m se determina con ayuda de la tabla IV de esta misma norma. N_s se calcula con la desigualdad 3.8 (cuando se tiene banda angosta, N_s debe ser la mitad del valor calculado).

TABLE III. Number of microphone positions required and values of the constant K for determining number of noise source locations [see Eq. (3)].

Octave band (and one-third octave band) center frequency (Hz)	Number of microphone positions, N_m , if $1.5 < s_m < 3$ dB	Number of microphone positions N_m , if $s_m > 3$ dB	Constant K , for Eq. (3), for determining number of noise source locations
125 (100, 125, 160)	3	6	5
250 (200, 250, 315)	6	12	10
500 (400, 500, 630)	12	24	20
1000 (800, 1000, 1250) and up	15	30	25

Tabla III. Número de ubicaciones requeridas para un micrófono, y valores de la constante k para calcular el número de ubicaciones de la fuente de ruido (ver la desigualdad 3.8).

TABLE IV. Maximum allowable sample standard deviations, s_r .

Octave band center frequency (Hz)	One-third octave band center frequency (Hz)	Maximum allowable standard deviation (dB)
125	100 to 160	3.0
250	200 to 315	2.0
500	400 to 630	1.5
1000 and 2000	800 to 2500	1.0
4000	3150 to 5000	1.5
8000	6300 to 10 000	2.0

Tabla IV. Desviaciones estándar máximas permisibles, s_r . La tabla está incluida en el procedimiento alternativo para calificar la cámara (subsección 3.3.1). s_r se calcula con la siguiente ecuación:

$$s_r = \left(\frac{1}{(n-1)} \sum_{k=1}^n [(L_p)_k - \langle L_p \rangle]^2 \right)^{1/2}$$

donde

$(L_p)_k$ → Nivel promedio de presión sonora producida en el cuarto de prueba por el altavoz cuando es excitado en la k -ésima frecuencia de prueba. Promediado sobre todas las ubicaciones de micrófono (y, si es necesario, sobre todas las ubicaciones de fuente); dB.

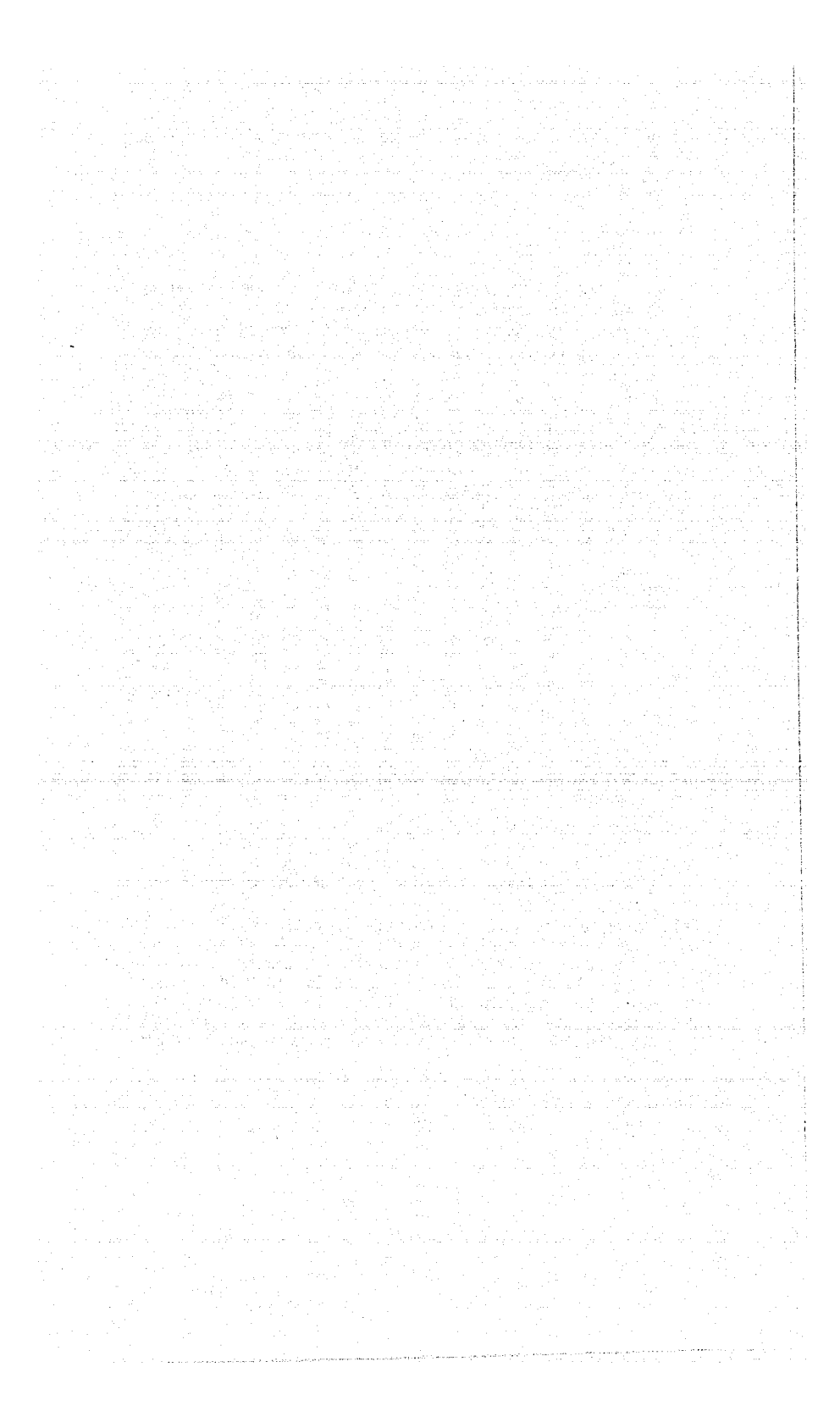
$\langle L_p \rangle$ → Media aritmética de $(L_p)_k$, promediada sobre todas las n frecuencias de prueba.

n → Número de frecuencias de prueba en una banda de tercios de octava (ver tabla V).

TABLE V. Test frequencies for alternative qualification of reverberation room facility for measuring sound power levels of noise sources containing significant discrete-frequency components.

		Center frequency of one-third octave bands, Hz															
		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	
...	...	...	...	147	...	...	...	361	...	...	...	...	...	1470	...	...
...	113	148	...	226	364	1130	1480	...	2260
...	114	149	...	228	...	...	...	367	445	564	712	...	1140	1490	...	2280
90	115	150	180	230	285	370	450	570	720	900	1150	1500	1800	2300			
91	116	151	182	232	288	373	455	576	728	910	1160	1510	1820	2320			
92	117	152	184	234	291	376	460	582	736	920	1170	1520	1840	2340			
93	118	153	186	236	294	379	465	588	744	930	1180	1530	1860	2360			
94	119	154	188	238	297	382	470	594	752	940	1190	1540	1880	2380			
95	120	155	190	240	300	385	475	600	760	950	1200	1550	1900	2400			
96	121	156	192	242	303	388	480	606	768	960	1210	1560	1920	2420			
97	122	157	194	244	306	391	485	612	776	970	1220	1570	1940	2440			
98	123	158	196	246	309	394	490	618	784	980	1230	1580	1960	2460			
99	124	159	198	248	312	397	495	624	792	990	1240	1590	1980	2480			
		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	
101	126	161	202	252	318	403	505	636	808	1010	1260	1610	2020	2520			
102	127	162	204	254	321	406	510	642	816	1020	1270	1620	2040	2540			
103	128	163	206	256	324	409	515	648	824	1030	1280	1630	2060	2560			
104	129	164	208	258	327	412	520	654	832	1040	1290	1640	2080	2580			
105	130	165	210	260	330	415	525	660	840	1050	1300	1650	2100	2600			
106	131	166	212	262	333	418	530	666	848	1060	1310	1660	2120	2620			
107	132	167	214	264	336	421	535	672	856	1070	1320	1670	2140	2640			
108	133	168	216	266	339	424	540	678	864	1080	1330	1680	2160	2660			
109	134	169	218	268	342	427	545	684	872	1090	1340	1690	2180	2680			
110	135	170	220	270	345	430	550	690	880	1100	1350	1700	2200	2700			
111	136	171	222	272	348	433	555	696	888	1110	1360	1710	2220	2720			
...	137	172	...	274	...	...	...	702	...	...	1370	1720	...	2740		
...	138	173	...	276	...	...	...	439	...	...	1380	1730	...	2760		
Increment, Hz	1	1	1	2	2	3	3	5	6	8	10	10	10	20	20		
Tolerance of Increment, Hz	±0.3	±0.3	±0.3	±0.5	±0.5	±1	±1	±1.5	±2	±3	±3	±3	±5	±5	±5	±5	
Number of test frequencies, n	22	26	27	22	26	22	27	23	24	23	22	26	23	22	26		

Tabla V. Frecuencias de prueba para la calificación alternativa de la cámara reverberante para medir niveles de potencia sonora de fuentes de ruido que contengan bastantes componentes de frecuencia discreta. Se tienen n tonos en cada una de las bandas de tercios de octava que aparecen en la tabla. La incertidumbre en la frecuencia de cada tono no debe ser mayor a la que se indica en la tabla. (En ISO-3742, esta tabla está ampliada hasta 10000Hz.)



APENDICE 3

Carta de calibración para la fuente de referencia B&K-4204.

CALIBRATION TABLE FOR REFERENCE SOUND SOURCE 4204

Sound power is measured in 1/3 oct. bands.
1/1 oct. values and A-weighted value are calculated.

The sound source is placed in a free field above a reflecting plane.

Calibration accuracy : 100 - 160 Hz : +/- 1.0 dB
: 200 - 4000 Hz : +/- 0.5 dB
: 5000 - 10000 Hz : +/- 1.0 dB

Serial No.	1359548	Air Temperature	20 C
Date	19 May 1987	Barometric Pressure	1009 mbar
Sign.	Hans Christensen	Rel. Humidity	44 %

Sound Power in dB re. 1 μ W

Line frequency Freq. of rotation	50.0 Hz		60.0 Hz	
	48.8 Hz		57.6 Hz	
Center freq. (Hz)	1/3 Oct. (dB)	1/1 Oct. (dB)	1/3 Oct. (dB)	1/1 Oct. (dB)
100	76.5		80.7	
125	76.7	81.7	81.3	86.2
160	77.6		82.2	
200	77.4		81.9	
250	76.8	81.7	81.2	86.2
315	76.5		81.0	
400	77.0		80.8	
500	77.1	81.9	81.1	85.9
630	77.3		81.3	
800	79.1		83.4	
1000	80.5	85.6	84.9	89.7
1250	82.3		86.1	
1600	82.8		86.5	
2000	82.0	86.5	86.3	90.9
2500	80.1		85.3	
3150	80.0		84.4	
4000	79.2	84.2	83.8	88.8
5000	78.9		83.9	
6300	77.8		82.8	
8000	76.1	81.0	81.3	86.2
10000	74.2		79.6	
12500	72.0		77.6	
16000	69.5	74.8	75.2	80.4
20000	67.0		72.8	
Curve A :		91.8		96.1

APENDICE 4

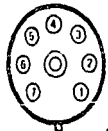
Especificaciones de algunos de los instrumentos de medición.

Specifications

Type No.	4132, 4149	4134	4147	4185	4186	4180
Nominal Diameter	1/2"					
Frequency Response Characteristic	Free-Field 0° Incidence	Random Incidence & Pressure	Random Incidence & Pressure	Free-Field 0° Incidence	Random Incidence & Pressure	Pressure
Open Circuit Frequency Response ^{a)} (± 2 dB)	4 Hz to 40 kHz	4 Hz to 20 kHz	0,4 Hz to 18 kHz ^{d)}	2,6 Hz to 20 kHz	2,6 Hz to 10 kHz	up to 20 kHz ± 1,5 dB
Open Circuit Sensitivity ^{a)}	mV/Pa	12,5	1,6	50	12,5	12,5
Open Circuit Sensitivity ^{a)}	dB re 1 V/Pa	-38	-56	-26	-38	-38
Lower Limiting Frequency, -3 dB	1 to 3 Hz		10 ⁻³ to 5 × 10 ⁻³ Hz	1 to 2 Hz		1 to 3 Hz ^{a)}
Cartridge Thermal Noise (dB(A))	20	18		14,5	15	18
Open Circuit Distortion Limit, 3%, at 100 Hz (dB re 20 µPa)	> 160			> 148		> 160
Resonance Frequency ^{****}	24 kHz	23 kHz		14 kHz	11 kHz	23 kHz
Polarization Voltage (V)	200		28	200		
Polarized Cartridge Capacitance at 150° Hz ^{a)}	18 pF	18,5 pF	19,5 pF	19 pF	21 pF	17,5 pF
Mean Temperature Co-efficient (at 250 Hz) -10 to +50°C (dB/°C)	-0,002		-0,007		-0,002	
Equivalent Air Volume at 250 Hz, 1 atm. (mm ³)	10		40		9,3	
Expected Long Term Stability	at 20°C	> 1000 years/dB (> 200 years/dB ^{b)})		> 600 years/dB		> 400 years/dB
	at 150°C	> 2 hours/dB (> 20 min./dB ^{b)})		> 1 hour/dB		
Influence of Static Pressure at 250 Hz (dB/mbars)	-0,0007		-0,00035	-0,001		-0,0007
Influence of 1 m/s ² Axial Vibration (dB re 20 µPa) ^{c)}	67		60		65	
Typ. Influence of 50 Hz, 30 A/m magnetic field (dB re 20 µPa)	20		30		20	
Influence of Relative Humidity	< 0,1 dB in the absence of condensation			0,004 dB/% RH		0,0008 dB /100% RH
Height of Cartridge:	Without Protection Grid		Without Protection Grid		Without Protection Grid	
	11,5 mm		15,2 mm		12 mm	
	With Protection Grid		With Protection Grid		With Protection Grid	
	12,6 mm		18,3 mm		13,2 mm	
Diameter of Cartridge:	Without Protection Grid		Without Protection Grid		Without Protection Grid	
	12,7 mm		12,7 mm		13,2 mm	
	With Protection Grid		With Protection Grid		With Protection Grid	
	12,7 mm		12,7 mm		13,2 mm	
Thread for Protection Grid or Coupler Mounting	12,7 mm — 60 UNS					—
Thread for Pre-amplifier Mounting	11,7 mm — 60 UNS					

^{a)} Not for random incidence
^{b)} Type 418
^{c)} Type A value
^{d)} With pre-amplifier Type 2639
^{e)} Individually calibrated
^{f)} With frequency response compensation network built-in to Pre-amp or Type 2640
^{g)} A-weighted noise level of combined assembly (4178 + 2640)
^{h)} 90° phase shift of pressure characteristics

Specifications 2639

Preamplifier		2639	
Type No.	120 V DC Power	28 V DC Power	
Frequency Range:	2 Hz to 200 kHz ± 0.5 dB		
Input Impedance (typ.):	23 G Ω /0.15 pF	23 G Ω /0.25 pF	
Output Impedance:	~ 50 Ω		
Max. Output Current (peak):	1.5 mA (at $V_{out} \sim 4.2 V_{peak}$)	1.3 mA (at $V_{out} \sim 1.4 V_{peak}$)	
Max. Output Voltage (peak):	45 V (at $I_{out} < 0.5 mA_{peak}$)	8.5 V (at $I_{out} < 0.5 mA_{peak}$)	
Attenuation:	< 0.025 dB		
Output Characteristics:	See Fig. 20		
Phase Linearity: unloaded (20 Hz to 20 kHz) (2 Hz to 200 kHz)	within $\pm 2^\circ$ within $\pm 15^\circ$ (20 pF)		
Input Noise: with dummy microphone A: A-weighted Lin. Linear 20 Hz to 20 kHz			
50 pF (1" microphone):	A: < 1.0 μ V, typ. 0.9 μ V Lin.: < 6 μ V, typ. 3.8 μ V	(with adaptor DB 0375)	
20 pF (1/2" microphone):	A: < 2.2 μ V, typ. 1.7 μ V Lin.: < 8 μ V, typ. 5.5 μ V	(no adaptor required)	
6.4 pF (1/4" microphone):	A: < 5.5 μ V, typ. 4.5 μ V Lin.: < 20 μ V, typ. 13 μ V	(with adaptor UA 0035)	
3.3 pF (1/8" microphone):	A: < 15 μ V, typ. 10 μ V Lin.: < 30 μ V, typ. 25 μ V	(with adaptor UA 0036)	
Vibration Sensitivity (typ.): with dummy microphone. $1 ms^{-2}$ in di- rection of greatest sensitivity			
50 pF (1" microphone):	400 μ V	(with adaptor DB 0375)	
20 pF (1/2" microphone):	20 μ V	(no adaptor required)	
6.4 pF (1/4" microphone):	400 μ V	(with adaptor UA 0035)	
3.3 pF (1/8" microphone):	1 mV	(with adaptor UA 0036)	
Magnetic Field Sensitivity: with dummy microphone $80 ms^{-2}$, 50 Hz magnetic field	typically 4 μ V		
Temperature Range:	-20 to +60°C (-4 to 140°F)		
Pin Connections:	 <p>pin 1: Ground pin 2: 200 V DC Pol. Voltage pin 3: Ground pin 4: Signal Output pin 5: 120 V DC Power Supply pin 6: 28 V DC Power Supply pin 7: Heater Supply Housing: Ground</p> <p>802750 soldering side of plug JP8715 shown</p>		
Dimensions:	$\varnothing 12.7 \times 83$ mm ($\varnothing 0.5 \times 3.3$ in)		
Cable Length:	2 m (6.6 ft.)		

Assembly		Dynamic Range						
Preamplifier Type	Microphone Type	Lower Limit			Upper Limit			
		3.16 Hz at 1 kHz (dB)	1/2 octave at 1 kHz (dB)	A-weighted Level (dB)	Linear 20 Hz to 20 kHz (dB)	< 3% distortion (dB)	< 10% distortion (dB)	
2639	1/2"	4133	-11	8	22	28**	160	164
		4134						
		4147	-13	6	21	26	160	164
		4180						
		4149	-12	7	22	26	160	164
		4165	-18	1	15	17	146	152
		4166	-19	0	15	17	146	152

** Linear 20 Hz to 200 kHz

Common Specification 2610 and 2636

<p>Amplifier Response: Measuring Ranges: 10 μV to 30V FSD with LED indication of particular meter range selected. 100 μV to 300V with 10.1 Attenuator Probe ZC 0016 supplied with 2636</p> <p>Frequency Range (without filters): 2 Hz to 200 kHz (± 0.5 dB) — 2610 only 1 Hz to 200 kHz (± 0.5 dB) — 2636 only 10 Hz to 50 kHz (± 0.2 dB) — 2610, 2636</p> <p>Phase Deviation (without filters): $\leq \pm 5^\circ$ between any two 2610's or 2636's in 20 Hz up to 20 kHz range</p> <p>Overall Gain (for 1 V FSD Output): From -30 to $+100$ dB selectable in 10 ± 0.05 dB steps, plus extra 0 to 10 dB gain for continuous adjustment between steps. LED indication of particular gain setting selected</p> <p>Direct Input: Via standard B & K coaxial socket</p> <p>Impedance: 1 MΩ \parallel 70 pF (2610) or 1 MΩ \parallel 90 pF (2636)</p> <p>Max. Input Voltage: 42 V RMS in accordance with IEC 348, but can withstand up to 220 V RMS (50 to 60 Hz), 400 V peak including DC component</p> <p>Preamp. Input: Via standard B & K 7 pin microphone preamplifier socket. Supplies following</p> <p>Microphone Polarization: 0, ± 28 and ± 200 V from 20 MΩ source</p> <p>Preamplifier Voltage: ± 150 V (2 mA max.), 2 kΩ source</p> <p>Heater Voltage: ± 6 V (at 200 mA) from 30 Ω source or ± 12 V (200 mA max.) from 100 mΩ source</p> <p>Internal Reference: Facilities calibration of 2610 and 2636 for sound, vibration and voltage measurements</p> <p>Reference Signal: 50 mV RMS (≈ 94 dB re 1 μV), 1 kHz sine wave</p> <p>Amplitude Stability: Better than 2% between $+5$ and 40°C (± 41 and $\pm 104^\circ\text{F}$)</p>	<p>Ext. Filters: Provision for connecting external filters in series with internal filters and weighting networks via two BNC sockets on rear panel</p> <p>To (Ext. Filter) Input: 1 V RMS nominal, 10 V peak max. output. Max. load 5 kΩ \parallel 200 pF</p> <p>From (Ext. Filter) Output: 1 V RMS nominal, 10 V peak max. input. Input impedance 1 MΩ \parallel 50 pF</p> <p>AC Outputs: From Output Section Amplifier via standard B & K coaxial socket on front panel</p> <p>1 V FSD Output: 10 V peak max. with max. load of 10 kΩ \parallel 200 pF</p> <p>Output Impedance: $\sim 100\Omega$</p> <p>From Recorder Amplifier via BNC socket on rear panel</p> <p>1.5 V FSD Output (2610 only): 16 V peak max. with max. load of 10 kΩ \parallel 200 pF</p> <p>5 V FSD Output (2636 only): 50 V peak max. load of 10 kΩ \parallel 200 pF</p> <p>Output Impedance: $\sim 50\Omega$</p> <p>Overload Warning: Gain indicators flash when Input and (or) Output Section is overloaded by positive or negative signal peaks of too high level</p> <p>Input Overload Level: Equivalent to 5 or 10 times FSD on meter. Level selectable using switch on rear panel</p> <p>Output Overload Level: Equivalent to 10 times FSD on meter</p> <p>Min. Overload Duration: 200 μs</p> <p>Duration of Warning: 0.5 s or longer</p> <p>Harmonic Distortion: Input Section: $< 0.01\%$ at 1 kHz, $< 0.1\%$ at 50 kHz. Max. load 5 kΩ \parallel 200 pF</p> <p>Output Section: $< 0.1\%$ at 1 kHz, $< 0.3\%$ at 50 kHz. Max. load 10 kΩ \parallel 200 pF</p>	<p>Noise Referred to Input: Max. amplification with input shorted</p> <p>Input Section Noise: Lin 2 (or 22.4) Hz to 200 kHz $< 5 \mu$V Lin 2 (or 22.4) Hz to 22.4 kHz $< 1.5 \mu$V A, B and C Weighting $< 1.5 \mu$V D Weighting $< 2.5 \mu$V</p> <p>Output Section Noise: Lin 2 Hz to 200 kHz $< 50 \mu$V</p> <p>Signal to Noise Ratio: Approximately 100 dB in "100 mV" reference position</p> <p>Influence of Magnetic Fields: Input section with maximum gain and input short circuited $< 10 \mu$V at 80 A/m 50 Hz</p> <p>Temperature Range: Operation: $+5$ to $+40^\circ\text{C}$ (± 41 to $\pm 104^\circ\text{F}$) Storage: -25 to $+70^\circ\text{C}$ (-13 to $\pm 158^\circ\text{F}$)</p> <p>Humidity: 0 to 90% RH non condensing</p> <p>Power Requirements: Complies with IEC 348 Safety Class II</p> <p>Supply Voltage: 100, 115, 127, 200, 220, 240 V (50-60 Hz) $\pm 10\%$ AC</p> <p>Power Consumption: ~ 25 VA nominal (2610 only) ~ 31 VA nominal (2636 only)</p> <p>Cabinet: Supplied as model A (light-weight metal cabinet), B (model A in mahogany case), or model C (as A but with flanges for standard 19 inch rack)</p> <p>Dimensions: Metal cabinet excluding knobs and feet Height: 133 mm (5.2 in) Width: 430 mm (16.9 in) Depth: 200 mm (7.9 in)</p> <p>Weight: 2610: 5.2 kg (11.5 lb) 2636: 6.5 kg (14.3 lb)</p>
---	--	---

Additional Specifications 2636 Only

<p>Filter Modes:</p> <p>22.4 Hz: High pass filter with low frequency attenuation slope of more than 30 dB/octave (100 dB/decade)</p> <p>22.4 kHz: Low pass filter with high frequency attenuation slope more than 30 dB/octave (100 dB/decade)</p> <p>A; B; C and D Weighting: In accordance with IEC 651 (Type O) for precision sound level meters</p> <p>Ext.: See Common Specification</p> <p>Meter Indication:</p> <p>Moving coil meter with interchangeable scales and LED indication of measurement and scale range selected</p> <p>Measurement Ranges: 10 μV to 30 V FSD selectable in accurate 10 \pm 0.05 dB steps. 100 μV to 300 V FSD with 10:1 Attenuator Probe ZC 0016 supplied</p> <p>Lin Mode Indicating Ranges: 0 to 10 and 0 to 31.6 Lin graduated amplitude ranges, plus ∞ to \pm 20 dB range</p> <p>30 dB Log Mode Indicating Ranges: 0 to 10 and 1 to 30 Log graduated amplitude ranges, plus 0 to 30 dB Lin graduated range</p> <p>60 dB Log Mode Indicating Ranges: 0.3 to 300 and 1 to 1000 Log graduated amplitude ranges, plus 0 to 60 dB Lin graduated range</p> <p>Detector Characteristics:</p> <p>For Meter and DC output</p> <p>RMS Mode:</p> <p>In accordance with IEC 651 Type O except for meter overswing with the Log 60 dB indicating mode</p> <p>Crest Factor Capability: 10 at full scale; up to 50 for lesser deflections</p> <p>Dynamic Range: \pm20 to $-$50 dB re FSD</p> <p>Accuracy: \pm0.2 dB typ. \pm0.5 dB overall</p> <p>Averaging: "Fast" and "Slow" to IEC 651 (Type O), plus 0.1; 0.3; 1; 3; 10 and 30 s averaging times</p>	<p>Positive, Negative and Max. Peak Modes:</p> <p>Dynamic Range: \pm 20 to $-$40 dB re FSD</p> <p>Accuracy: \pm 0.2 dB typ. See Fig. 6</p> <p>Rise Rate: 5; 0.5 and 0.05 dB/μs corresponding to rise time of 8, 80 and 800 μs for 40 dB change in signal level</p> <p>Decay Rate: "Fast" (43.4 dB/s); "Slow" (4.34 dB/s) and 0.5 s Max. Hold</p> <p>Impulse Mode: In accordance with IEC 651 (Type O impulse) for precision sound level meters</p> <p>Max. Hold Mode: Meter and DC Output hold Max. RMS, Impulse and Peak level of signal. Hold decay $<$ 0.2 dB/minute at 25°C</p> <p>Reset Mode: Meter and DC Output reset to zero with \sim 0.3 s delay before meter indication and DC output voltage restored</p> <p>DC Output:</p> <p>From Detector Amplifier via BNC socket on rear panel</p> <p>Log. Mode Output: 100 mV/dB; 5 V DC re FSD; 7 V (10 mA) max</p> <p>Lin. Mode Output: 5 V DC re FSD, 12 V (10 mA) max</p> <p>Digital Section:</p> <p>Accuracy: \pm 0.1 dB (Log) at 25°C</p> <p>\pm 0.3% (Lin) of FSD</p> <p>Gain Error: \pm 0.2 dB at FSD at 5 to 40°C</p> <p>Conversion Time: 10 ms \pm 0.1%</p> <p>IEC Digital Interface:</p> <p>Conforms to IEC 625-1, compatible with IEEE Std. 488 interface</p> <p>IEC Functions Implemented: Source Handshake (SH 1), Acceptor Handshake (AH 1), Talker (T 5), Talk Only, Listener (L 4), Remote Local (RL 1), Service Request (SR 1)</p> <p>Data: Format for calculator or printer may be selected. Data transmitted via A/D converter every 10 ms</p> <p>Code: ISO 7 bit code (i.e. ASCII, but without parity bit)</p>	<p>Remote Control: Front panel settings selectable via standard interface</p> <p>Special functions included:</p> <p>1617-2636 Control: Program for automatic operation with 1617 Band Pass Filter and averaging time selection with 2636, plus readout of frequency and measurement results to printer</p> <p>Self Test: Program for automatic self test and basic check out of 2636. Checks front panel switch functions, attenuator and detector linearity, detector time constants, filter attenuation and noise. Check out time approximately 3 minutes</p> <p>Accessories included:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr><td>1 Power Cable</td><td style="text-align: right;">AN 0020</td></tr> <tr><td>2 BNC plugs</td><td style="text-align: right;">JP 0035</td></tr> <tr><td>2 B & K coaxial plugs</td><td style="text-align: right;">JP 0101</td></tr> <tr><td>2 Banana plugs</td><td style="text-align: right;">JB 0002</td></tr> <tr><td>1 10:1 attenuator probe</td><td style="text-align: right;">ZC 0016</td></tr> <tr><td>1 B & K to DNC Adaptor</td><td style="text-align: right;">JP 0144</td></tr> </table> <p>Various fuses and lamps</p> <p>Accessories Available:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr><td>1617 Filter Control Cable</td><td style="text-align: right;">AO 0034</td></tr> <tr><td>Averaging Time Control Cable</td><td style="text-align: right;">AO 0145</td></tr> <tr><td>IEC 625-1 Interface cable (2 m)</td><td style="text-align: right;">AO 0194</td></tr> <tr><td>IEC (male, slide-lock) to IEC 625-1 Interface Cable (2 m)</td><td style="text-align: right;">AO 0184</td></tr> <tr><td>Adaptor to Convert IEEE instrument) to IEC 625-1</td><td style="text-align: right;">AO 0195</td></tr> </table> <p>Meter Scales Included:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr><td>Volts, dB (Lin)</td><td style="text-align: right;">SA 0259</td></tr> <tr><td>Volts, dB (30 dB Log)</td><td style="text-align: right;">SA 0260</td></tr> <tr><td>Volts, dB (60 dB Log)</td><td style="text-align: right;">SA 0261</td></tr> <tr><td>dB SPL (20 - 89 mV/Pa)</td><td></td></tr> <tr><td>(30 dB Log)</td><td style="text-align: right;">SA 0262</td></tr> <tr><td>dB SPL (5 - 16 mV/Pa)</td><td></td></tr> <tr><td>(30 dB Log)</td><td style="text-align: right;">SA 0263</td></tr> <tr><td>dB re 1 μV universal (Lin;</td><td></td></tr> <tr><td>30 and 60 dB Log)</td><td style="text-align: right;">SA 0267</td></tr> <tr><td>ms⁻² universal (30 dB Log)</td><td style="text-align: right;">SA 0270</td></tr> </table> <p>See General Accessories Product Data for other scales available</p>	1 Power Cable	AN 0020	2 BNC plugs	JP 0035	2 B & K coaxial plugs	JP 0101	2 Banana plugs	JB 0002	1 10:1 attenuator probe	ZC 0016	1 B & K to DNC Adaptor	JP 0144	1617 Filter Control Cable	AO 0034	Averaging Time Control Cable	AO 0145	IEC 625-1 Interface cable (2 m)	AO 0194	IEC (male, slide-lock) to IEC 625-1 Interface Cable (2 m)	AO 0184	Adaptor to Convert IEEE instrument) to IEC 625-1	AO 0195	Volts, dB (Lin)	SA 0259	Volts, dB (30 dB Log)	SA 0260	Volts, dB (60 dB Log)	SA 0261	dB SPL (20 - 89 mV/Pa)		(30 dB Log)	SA 0262	dB SPL (5 - 16 mV/Pa)		(30 dB Log)	SA 0263	dB re 1 μ V universal (Lin;		30 and 60 dB Log)	SA 0267	ms ⁻² universal (30 dB Log)	SA 0270
1 Power Cable	AN 0020																																											
2 BNC plugs	JP 0035																																											
2 B & K coaxial plugs	JP 0101																																											
2 Banana plugs	JB 0002																																											
1 10:1 attenuator probe	ZC 0016																																											
1 B & K to DNC Adaptor	JP 0144																																											
1617 Filter Control Cable	AO 0034																																											
Averaging Time Control Cable	AO 0145																																											
IEC 625-1 Interface cable (2 m)	AO 0194																																											
IEC (male, slide-lock) to IEC 625-1 Interface Cable (2 m)	AO 0184																																											
Adaptor to Convert IEEE instrument) to IEC 625-1	AO 0195																																											
Volts, dB (Lin)	SA 0259																																											
Volts, dB (30 dB Log)	SA 0260																																											
Volts, dB (60 dB Log)	SA 0261																																											
dB SPL (20 - 89 mV/Pa)																																												
(30 dB Log)	SA 0262																																											
dB SPL (5 - 16 mV/Pa)																																												
(30 dB Log)	SA 0263																																											
dB re 1 μ V universal (Lin;																																												
30 and 60 dB Log)	SA 0267																																											
ms ⁻² universal (30 dB Log)	SA 0270																																											

Specifications 1617 and 1618

Band Pass Filters:

In accordance with IEC 225 1966, DIN 45651 and 45652, and ANSI S1 11-1966 best classes

The total integrated random white noise power passed by the filters in these instruments is equal to that which would be passed by an ideal filter

Centre Frequencies 1617:

1/3 oct: 2 Hz to 100 kHz (50 bands)
1/1 oct: 2 Hz to 20 kHz (41 overlapping bands at 1/3 octave intervals covering 14 octaves)

Centre Frequencies 1618:

1/3 oct: 2 Hz to 20 kHz (41 bands)
1/1 oct: 2 Hz to 20 kHz (41 overlapping bands at 1/3 octave intervals covering 14 octaves)

Attenuation Outside Pass Band:

1/3 oct: > 75 dB at 5* and 1/5 centre frequency
1/1 oct: > 60 dB at 8* and 1/8 centre frequency

Attenuation at Centre Frequency (f_m):

1/3 oct and 1/1 oct: 0 dB ± 0.5 dB
Maximum Peak-to-Valley Ripple:
1/3 oct: 0.5 dB
1/1 oct: 0.5 dB

Overall Selective Frequency Range:

1617: 1.4 Hz to 180 kHz
1618: 1.4 Hz to 22 kHz

Linear Pass Band (Available from Range switch or Manual Filter Selector):

1617:
1.6 Hz to 160 kHz attenuation is 0 dB ± 0.3 dB
1 Hz to 200 kHz attenuation is 0 dB ± 0.5 dB
1618:
1.0 Hz to 22.5 kHz attenuation is 0 dB ± 0.3 dB
1 Hz to 28.2 kHz attenuation is 0 dB ± 0.5 dB

Filter Selection:

Type 1617:
2 Hz to 160 kHz
2 Hz to 40 kHz, D, A, B, C, Linear
Type 1618:
2 Hz to 20 kHz, A, Linear
Switching control:
Manual: from "Manual Filter Selector"
Automatic: from a Level Recorder
Automatic: to control an X-Y Recorder (1617 only)
(When scanning octave filters, either full-octave or third-octave stepping can be selected)
Automatic: via the IEC interface bus (1617 only)

Weighting Networks:

Curves A, B, and C are in accordance with IEC R 051 (Type D) for precision sound level meters (1618 has A-weighting only)
Curve D is in accordance with IEC 537

Averaging Time Programmes (1617 only):

Used with Measuring Amplifiers that feature remote controlled averaging times (Type 2607)
Programmes Available:
See Table 3 and Fig 8

Input:

Via B & K coaxial socket on front panel, paralleled by BNC socket on rear
Impedance:
1 MΩ || 100 pF
Voltage:
1 V RMS nominal
5 V peak maximum
5.6 V (±0.3 V) overload warning lamp lights

Distortion:

Band Pass Filters:
< 0.1% with 1 V signal level
< 0.3% with 3.6 V signal level
Linear Range:
< 0.1% with 1 V signal level
< 0.3% with 3.6 V signal level

Noise:

< 150 μV (typ. 100) Band Pass Filters
< 110 μV (typ. 80) A, B, and C-weighting networks
< 250 μV (typ. 180) D-weighting network
< 100 μV (typ. 80) Linear range

Output:

Via B & K coaxial socket on front panel, paralleled by BNC socket on rear
Impedance:
< 50 Ω
Minimum Load Impedance:
5 kΩ || 1 nF for less than ±0.2% reading error

DC Ramp Output (1617 only):

Used for controlling the X-axis of an X-Y Recorder
0 V at the starting frequency
0.208 V per 1/3 octave increase rate
10.4 V maximum output
Load impedance > 10 kΩ

IEC Digital Interface (1617 only):

Conforms to IEC 625-1 standard, compatible with IEEE std. 488
IEC Functions Implemented:
Acceptor Handshake (AH 1)

Listener (L 2)

Remote Local (RL 2)
Parallel Port (PP 2)

Temperature Range:

Operation: 5 to 40°C (41 to 104°F)
Storage: -25 to +70°C (-13 to +158°F)

Humidity:

0 to 90% RH (non-condensing)

Electromagnetic Compatibility:

Complies with Class B computing device of the American FCC (Federal Communications Commission) Rules

Power Requirements:

Complies with Safety Class II of IEC 348
Supply Voltage: 100, 115, 127, 200, 220, 240 V (50 - 60 Hz) ± 10% AC
Power Consumption: ~37 VA (1617)
~30 VA (1618)

Cabinet:

Supplied as model A (light weight metal cabinet), B (model A in a mahogany cabinet), or C (as A but with flanges for standard 19" rack mounting)

Dimensions:

Height: 133 mm (5.25 in)
Width: 430 mm (16.9 in)
Depth: 200 mm (7.9 in)

Weight:

1617: 6.5 kg (14.3 lb)
1618: 6.3 kg (13.9 lb)

Accessories Included:

1 X Power Cable AN 0020
1 X 25 pin IEC 625-1 Bus
Connector Kit UA 0793
2 X Banana Plugs JB 0002
2 X BNC Coaxial Plugs JP 0035
1 X 7-pin DIN Plug JP 0703
1 X 8-pin DIN Plug JP 0802
2 X 200 mA Fuses VF 0017
2 X 400 mA Fuses VF 0039

Accessories Available:

25-pin IEC 625-1 Interface
Cable (2m) AO 0194
25-pin IEC (male) to IEC 625-1
Interface Cable (2m) AO 0194
Adaptor to convert IEEE
instrument to IEC 625-1 AO 0195
Averaging Time Control Cable AO 0145

ESPECIFICACIONES

CT485-RS

SECTION 3 SPECIFICATIONS

MEASUREMENT INPUT: Temperature and humidity, with probe in external sensor. Removable for remote location (up to six feet)

TEMPERATURE

RANGE: 2° to 120°F, -17° to 49°C
Accuracy: ±1°C
Sensor: Solid State
Response Time: 5 minutes for 611 step change
Display Resolution: 1°/1°C

HUMIDITY

Range: 24 to 98% RH
Accuracy: ±2% ± 25%, between 20% and 90% of range; ±5% below 20%, above 90% ±25%
Sensor: Resistive polymer
Response Time: 5 minutes for a 10% to 80% step change
Display Resolution: 1% RH

DISPLAY

Type: 2 1/2 digit LCD, 0.5" high; low battery and parameter indications; independent time of day clock
Display Modes: User-switchable between °F, °C and %RH for continuous display; max/min storage for both temperature and humidity

ELECTRONICS

Type: Microprocessor-controlled and linearized HI & LO Peak Hold for both temperature and humidity; reinitiates position at every chart change (every time door is opened)

16

SPECIFICATIONS (CONT.)

CHART

Type: 8 inch circular, with linear radial divisions; 1, 7 and 22 day with both °F and °C scales

CASSETTE DRIVE

Type: Quartz clock stepper drive
Range: 1, 7, 22 day; switchable
Accuracy: 1% of rotation
Chart Paper Held Down: Magnetic hub lock

RECORDING PENS

Type: Disposable fiber-tip; red for temperature, blue for humidity

PEN DRIVE

Type: Motorized linear screw drive
Deadband: 1.5°F, 1.5% RH
Zero: Automatic zero during chart change
Pen Area: Clear plastic to allow full chart viewing
Swalift: Automatic on door opening; pens are door scanted and move away from the chart whenever door is opened.

OPERATING CONDITIONS (RECORDER)

Temperature: 32° to 120°F (0° to 50°C)
Humidity: 0% to 90% RH, non-condensing

SPECIFICATIONS (CONT.)

OPERATING CONDITIONS (SENSOR REMOTE)

Temperature: 0 to 122°F (-10 to +50°C)
Humidity: 0% to 98% (should not be operated continuously in condensing conditions)

POWER

Battery: Four (4) "D" alkaline cells; greater than 1 month continuous operation DC in 22 day mode
Power Requirements: 400 mA "normal" during pen movement; 1.25 A max. surge
DC Power Jack Voltage: 7.2-14 Vdc, 1.25 A; 1V 1 A transformer supplied

MECHANICAL

Dimensions: H:12" x W:10" x D:2.5"
Weight: Approx. 7 lbs, including alkaline batteries
Mounting: T-slots for wall mount
Case: Rugged ABS plastic, charcoal gray color; computer white optional
Miscellaneous: Retractable handle, swing-out desk stand for benchtop use, and 6 ft sensor extension cord for remote sensing

Specifications 2811

Preamplifier Inputs:

Connector: Accepts B & K 7-pin plug JP 0701 as used on B & K microphone preamplifiers

Signal Impedance: 300k Ω in parallel with 50pF

Power Supplies: + 6.3V DC heater supply and + 12.6V DC supply (each supply 480mA total for all eight sockets); + 150V DC (2mA) supply; and choice of 0, + 28V DC or + 200V DC polarization voltage

Maximum signal: 3.5 to 7V Peak depending on setting of Sensitivity Alignment

Direct Input/Outputs:

Connector: Accepts standard BNC plug JP 0035

Signal: As for Preamplifier Inputs (corresponding sockets are wired in parallel)
Impedance: When used as monitor with Microphone Preamplifier Type 2619, less than 25 Ω

"From Extension" Inputs:

Connector: Accepts standard BNC plug JP 0035

Impedance: Matches Multiplexer "Output"
Maximum Signal: 5V Peak

Multiplexer Outputs:

Connectors: Accepts standard BNC plugs JP 0035. Main Multiplexer output available on front panel socket accepting B & K standard coaxial plug JP 0101
Impedance: Less than 20 Ω . May be loaded with minimum 5k Ω in parallel with maximum 1nF
Maximum signal: 5V Peak

Automatic Scanning Control:

9 switch-selectable dwell times, 1/16 s to 16 s. Accuracy \pm 1%

Manual Scanning Control:

Facilities: Selection of any channel, inhibition of any channel during scanning, stepwise scanning, reset to beginning

External Scanning "In" and "Out":

Pair of standard 8-pin DIN sockets accepting plug JP 0802 and control cable AQ 0034, for cascade interconnection of up to four 2811 s, carrying all scanning control signals

"In" interfaces fully to the Type 7507 Sound Power Calculator and the Type

4418 Building Acoustics Analyzer, and may be used for other combinations (open-collector TTL-compatible)

Both "In" and "Out" carry a signal (pin 5) which may be set (low) and reset (high) via the Interface Bus

Interface Bus (IEC):

Connector: 25-way male connector accepting cables AO 0194 and AO 0184. Conforms to IEC 625-1, compatible with IEC Std. 488/ANSI MC1.1

Functions implemented: Source Handshake (SHS), Acceptor Handshake (AHS), Talker (T), Listener (L2), Service Request (SRQ), Remote Local (RL1), Parallel Poll (PPQ), Device Clear (DCQ), Device Trigger (DTQ), Controller (CQ)

Main Multiplexer Facilities: Selection of a specified channel, Selection of "From Extension" input, Stop to next channel, Reset to first channel

Subsidiary Multiplexer Facilities: Selection of a specified channel (1 to 8), Selection of "From Extension" input

Start/Stop Instructions: Commands to another instrument via External Scanning sockets (pin 5)

Signal Characteristics:

Frequency Response: 2 Hz to 200 kHz \pm 0.5 dB, 20 Hz to 20 kHz \pm 0.1 dB
Max. total harmonic distortion:

Sine Output Level	2 Hz to 20 kHz	2 Hz to 200 kHz
1 V RMS	0.03%	0.2%
3.5 V RMS	0.1%	0.3%

Maximum crosstalk: -80 dB, 2 Hz to 20 kHz; -60 dB, 2 Hz to 200 kHz (with 50 Ω source impedance at all inputs)

Maximum broadband noise: 12 μ V, 2 Hz to 20 kHz; 12 μ V, 20 Hz to 20 kHz; 30 μ V, 2 Hz to 200 kHz

Interference rejection: 100 A/m magnetic field increases broadband noise in the audio range (20 Hz to 20 kHz) to not more than 20 μ V

Calibration Facility:

Enables alignment of connected microphones to within \pm 0.1 dB relative to each other, and to output selectable, 12.5 or 50 mV/Pa \pm 0.25 dB (plus callibrator deviation), dependant on sensitivity of connected microphones. Range of adjustment \pm 3 dB

Temperature Range:

Operating: 5° to 40°C (41° to 104°F)
Storage: -25° to 70°C (-13° to 158°F)

Humidity Range:

0 to 90% relative humidity providing there is no condensation

Dimensions (net):

Height: 132.6 mm (5.22 in)
Width: 430 mm (16.9 in)
Depth: 200 mm (7.87 in)

Weight:

6.5 kg (14.3 lb)

Cabinet:

Supplied as model A (light-weight metal cabinet), B (mahogany cabinet), or C (as A but with flanges for mounting in standard 19-in rack)

Power Supply:

100, 115, 127, 200, 220, 240V single phase AC mains 50/60 Hz. Approximate power ratings are 13VA alone, 21VA with 8 Microphone Preamplifiers Type 2619, and 28VA with 8 Microphone Preamplifiers Type 2627. Complies with safety class II of IEC Publication 348 and requirements for U.S. FCC class B Computing Device in respect of electromagnetic compatibility

Accessories included:

1 mains cable	AN 0020
4 BNC plugs	JP 0035
1 B & K coaxial plug	JP 0101
2 8-pin DIN plug	JP 0802
2 100 mA fuses	VF 0026
3 200 mA fuses	VF 0012
2 4-mm banana plugs	JB 0002
1 screwdriver	QA 0001

Accessories Available:

Control cable	AQ 0034
IEC 625-1 Interface cable (2 m)	AO 0194
IEC (male, slide-lock) to IEC 625-1 interface cable (2 m)	AO 0184
Adaptor to convert IEEE	AO 0195
Instrument to IEC 625-1 BNC signal cable (0.6 m)	AO 0133
BNC signal cable (1.2 m)	AO 0087
BNC signal cable (3 m)	AO 0142
Coaxial screened cable in free length	AC 0002
Screened 7-core cable	AC 3029

Specifications 4204

APÉNDICE CUATRO

<p>Sound Power Output: Measured in 1/3 octaves from 100Hz to 10kHz: > 70dB re 1pW</p> <p>Sound Power Output: A-weighted: 91dB re 1pW (50Hz line frequency) 95dB re 1pW (50Hz line frequency)</p> <p>A-weighted Sound Level (diffuse field in a room with an equivalent absorption area of 10m²): 91dB(A) (60Hz) 87dB(A) (50Hz)</p> <p>Variation of Sound Intensity with Direction: (100Hz to 10kHz measured in 1/3 octaves under free field conditions): Vertical Plane: < 6 dB Horizontal Plane: < 0,6 dB</p>	<p>Variation of Sound Power Output with Supply Voltage: (± 10% (50Hz) and ± 5% (60Hz) of nominal voltage) < ± 0,2 dB (50Hz line Frequency) < ± 0,3dB (60Hz line Frequency)</p> <p>Variation of Sound Power Output with Barometric Pressure: The sound power output is proportional to the barometric pressure</p> <p>Power Supply: Complies with safety Class I of IEC 348</p> <p>Supply voltage: 100, 115, 127, 150, 220 or 240V AC, 50 or 60Hz</p> <p>Thermal Protection: The motor is protected with a thermorelay with automatic reset</p>	<p>Temperature Range: -10°C to +50°C</p> <p>Power Consumption: 50Hz: 500VA 60Hz: 700VA</p> <p>Dimensions: Height: 300mm (11,8in) Diameter: 300mm (11,8in)</p> <p>Weight: 21 kg (46 lb)</p> <p>Accessories Included: 3 Spare fuses (1 fuse of 6,3 Amp; 2 fuses of 12,5 Amp)</p>
--	---	---

Specifications 4220

<p>SOUND PRESSURE LEVEL: (Individually calibrated) 124dB re 2 x 10⁻⁵Pa ± 0,2 dB at Ambient Pressure: 1013mbar Ambient Temp.: 20°C Ambient Humidity: 65%RH Effective Load Volume: 1,333cm³</p> <p>CALIBRATION ACCURACY: ± 0,15dB</p> <p>FREQUENCY: Pos. "On": 250Hz ± 1% between +5 and +45°C (+41 to +131°F). 250Hz ± 2% between -10 and +55° (+14 to +131°F) Pos. "Batt.": approximately 320Hz with new batteries</p> <p>NOMINAL EFFECTIVE COUPLER VOLUME: 19,733cm³ (at 250Hz) Including Nominal Effective Load Volume 1,333 cm³</p> <p>DISTORTION: < 3% at 250Hz</p>	<p>TEMPERATURE RANGE: Operation: With batteries: -10 to +55°C (+14 to +131°F) With external power supply: -30 to +55°C (-22 to +131°F)</p> <p>INFLUENCE OF: Ambient Pressure: SPL is proportional to the ambient pressure, (corrections read from Barometer supplied) Ambient Temperature: < ± 0,002dB/°C from -10 to +55°C Ambient Humidity: -12 x 10⁻³ dB per % Relative Humidity Effective Load Volume: See Manual</p> <p>BATTERIES: 6 batteries IEC LR6 If frequency (speed of motor) increases when switching from "On" to "Batt." position, then battery voltage is sufficient</p> <p>DIMENSIONS: Length: 224mm (8,7in) Diameter: 36mm (1,4in)</p>	<p>WEIGHT: Pistonphone with batteries 0,7 kg (1,5lb) Total weight of case containing pistonphone, adaptors and correction barometer: 1,6kg. (3,5lb)</p> <p>CORRECTION BAROMETER UZ 0003 SPECIFICATIONS: Pressure Range: 790 to 1040mbar Accuracy (1 year): better than ± 0,1dB at 20°C; ± 0,2dB from -10°C to +50°C</p> <p>ACCESSORIES INCLUDED: 6 alkaline batteries IEC LR6, size AA.....QB0013 1 battery container.....DH0236 1 adaptor for 1/2" microphones.....DB0311 1 adaptor for 1/4" microphones.....DR0319 1 adaptor for 3/8" microphones.....DB0352 1 Correction Barometer.....UZ0003</p>
---	--	---

Specifications 4230

<p>SOUND PRESSURE LEVEL: 94 dB re 2 x 10⁻⁵Pa (or 1 Pa)</p> <p>ACCURACY OF SPL: At 1013 mbar when loaded with 1,333 cm³ (corresponding to B & K microphones with protecting grid, and their respective adaptors) ± 0,3 dB at 23°C ± 3°C (68 to 79°F) ± 0,4 dB between 10 and 40°C (50 to 104°F) ± 0,5 dB between 0 and 50°C (32 to 122°F)</p> <p>FREQUENCY: 1000 Hz ± 1,5%</p> <p>EQUIVALENT COUPLER VOLUME: VI > 140 cm³ at 23°C (73,4°F) VI > 70 cm³ between 10 and 40°C (50 to 104°F) VI > 35 cm³ between 0 and 50°C (32 to 122°F)</p> <p>DISTORTION: < 1%</p>	<p>INFLUENCE OF STATIC PRESSURE: ± 0,05dB/100mbar from 500mbar to 1100mbar</p> <p>LONG TERM STABILITY: Better than ± 0,1dB/year (expected for normal field use)</p> <p>MICROPHONE TYPES: 1" directly 1/2" with supplied adaptor</p> <p>POWER SUPPLY: Internal supply from 1 x 9V transistor (IEC 6LF22, NEDA 1604) battery</p> <p>OPERATION: With a new battery the signal will last for up to one minute after contact is released</p> <p>BATTERY CHECK: As long as the signal continues for a few seconds after the contact is released the change in SPL is less than 0,05 dB</p>	<p>DIMENSIONS: (including leather case) Length: 115 mm (4,5") Diameter: 44mm (1,7")</p> <p>WEIGHT: (including leather case) 260 g (0,57 lb)</p> <p>ACCESSORIES INCLUDED: Adaptor for 1/2" microphones.....DB 0311 Leather case.....KE 0065 Battery 9V transistor IEC 6LF22.....QB 0016 Instruction Manual</p> <p>ACCESSORIES AVAILABLE: 1/2" to 1/4" Adaptor.....DB 0310 1/2" to 3/8" Adaptor.....DB 0352 Service Manual</p>
--	--	--

Specifications 4205

ACOUSTICAL:					
SOUND POWER LEVEL: Range: 40 to approx. 100 dB re 1 pW in 10 dB steps (attenuator), continuously variable		within each step (potentiometer). Overload Indication for max. sound power level		On/Off Control: suppresses the A-weighted Sound Power Level to below 30 dB re 1 pW (2-position toggle switch)	
Sound Power Level dB re 1 pW	Octave			Wideband	
	125 Hz	250 Hz - 2 kHz	4 kHz - 8 kHz		
	40 to 50	± 2 dB	± 1.5 dB		± 2 dB
	50 to 90	± 1.5 dB	± 1 dB		± 1.5 dB
90 to 95	-2.5 to +1.5 dB	± 1 dB	± 1.5 dB	± 1.5 dB	
95 to max. level	-3 to +1 dB	-1.5 to +1 dB	-2 to +1.5 dB	-2 to +1.5 dB	
DIRECTIONAL CHARACTERISTICS: See Figs. 5 and 6					
SOUND POWER SPECTRUM: Wide band noise in the frequency range 100 Hz to 10 kHz (see Fig. 4) Octave band noise in 7 freq. bands: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz					
ELECTRICAL:					
EXTERNAL FILTER: To Input: Signal: Pink noise in the freq. range 100 Hz to 10 kHz (Fig. 3) Output Voltage: 0.7 V RMS ± 0.1 V Freq. Response: ± 1.5 dB Output Impedance: < 10 Ω Min. Load Impedance: 500 Ω | 2 nF From Output: Input Impedance: 150 kΩ | 40 pF Input Voltage for full defl.: 115 mV RMS Max. Input Voltage: 10 V peak		WHITE NOISE: Freq. Range: 50 Hz to 10 kHz (Fig. 3) Output Voltage: 1 V RMS ± 0.1 V Freq. Response: ± 1 dB Output Impedance: < 10 Ω Min. Load Impedance: 5kΩ | 2nF REMOTE CONTROL: Sound Power Level on/off may be remotely controlled: 0 - 0.6 V: Off 2.5 - 5 V: On		THERMAL PROTECTION: The instrument is protected against damage during overload by thermal shutdown of internal supply voltages FILTER CHARACTERISTICS: Conform to ANSI S1.11-1966, Class 1	
GENERAL:					
POWER SUPPLY: Internal: from 6 NiCd-cells in Battery Box ZG 0146 or from Power Supply ZG 0199 External: +6.8 to +15 V, approx. 12 W N.B. Dry cells should not be used with this instrument		TEMPERATURE RANGE: +5 to +40°C		ACCESSORIES INCLUDED: 1 Sound Source HP 1001 1 Battery Box ZG 0146 6 NiCd cells QB 0008 1 Cable AQ 0160 1 7-pin plug JP 0703 1 8-pin plug JP 0002 2 Fuses 3,15 A VF 0019 1 Dust cover KF 0079 Instruction Manual	
BATTERY CHECK: When the "Bat. Check" push button is pressed the supply voltage is indicated on the meter		AIR PRESSURE RANGE: 700 mm Hg to 800 mm Hg			
OPERATING TIME: (with fully charged NiCd cells) Approx. 2 hours at max. Sound Power Level Approx. 10 hours at 80 dB re 1 pW Sound Power Level		DIMENSIONS: Generator: Height: 132.6 mm (5.2 in) Width: 209.5 mm (8.3 in) Depth: 200 mm (7.9 in)			
RECHARGING OF NiCd-Cells: From Power Supply ZG 0199 From Battery Charger Type ZG 0113 or from an ordinary 12 V car battery Charging time is approx. 14 hours		WEIGHT: Generator: 3.0 kg (6.6 lb) Sound Source: 3.5 kg (7.7 lb)			
		CABINET: B & K modular cabinet, 1/2 of 19" rack module			
		ACCESSORIES AVAILABLE: Power Supply ZG 0199 Battery Charger ZG 0283 Cable (for charging cells with ZG 0199) AQ 0033 Charging Adaptor AQ 0157 Service Manual			

ANEXO

Este anexo es un resumen de artículo **Error propagation analysis of four sound-power measurement techniques** (Análisis de propagación de error de cuatro técnicas de medición de potencia sonora) por G. A. Russell, publicado en *The Journal of the Acoustic Society of America*, volumen 67 #2.

Aunque el artículo se refiere a cuatro diferentes métodos de medición, aquí sólo se mencionarán dos: el método de comparación y el método directo.

El cálculo de potencia sonora tiene una incertidumbre, la cual es función de las incertidumbres asociadas con cada una de las variables implicadas (presión sonora, distancia, etc.). La manera en que los errores en la medición individual de esas variables influye en el error que se obtiene al calcular la potencia sonora, puede ser examinada mediante un análisis de propagación de errores aplicado a la ecuación para calcular potencia sonora.

Los distintos métodos usados para encontrar la potencia sonora, están basados en ecuaciones diferentes. En estas ecuaciones se relacionan de manera particular la potencia sonora con las variables evaluadas experimentalmente; por lo tanto, la propagación de errores dependerá de la técnica de medición que se use.

Resulta especialmente interesante la propagación asociada con el nivel promedio de presión sonora ya que esta variable está involucrada en todas las técnicas para medir potencia sonora y está sujeta, por efectos prácticos, a errores considerables.

-Método de fuente de referencia (método de comparación).

La potencia sonora de la fuente sometida a examen (en cierta banda de frecuencia) es la siguiente:

$$W = W_r \cdot p^2 / p_r^2$$

donde

W_r → potencia sonora de la fuente de referencia; Watts.

p → raíz media cuadrática del promedio espacial de la presión

sonora de la fuente de prueba; N/m^2 .

p_r → raíz media cuadrática del promedio espacial de la presión sonora de la fuente de referencia; N/m^2 .

Expresada en forma rms, la incertidumbre en la determinación de la potencia sonora es:

$$\frac{\Delta W}{W} = \left[\left[\left(\frac{\Delta W_r}{W_r} \right)^2 + 4 \left(\frac{\Delta p}{p} \right)^2 + 4 \left(\frac{\Delta p_r}{p_r} \right)^2 \right] \right]^{1/2}$$

Es razonable pensar que el error debido a la medición de p es igual a el error asociado con p_r , por lo cual la expresión anterior queda como

$$\frac{\Delta W}{W} = \left[\left[\left(\frac{\Delta W_r}{W_r} \right)^2 + 8 \left(\frac{\Delta p}{p} \right)^2 \right] \right]^{1/2}$$

Este último resultado define el error porcentual esperado en el cálculo de potencia cuando se emplea la técnica de medición de fuente de referencia.

-Método de tiempo de reverberación (método directo).

Sin tomar en cuenta la presión atmosférica durante la medición, el nivel de potencia sonora se calcula de

$$PWL = SPL + 10 \log \{ V/T \cdot [1 + (S\lambda/8V)] \} - 13.5$$

donde

PWL → nivel de potencia sonora; dB re $10^{-12}W$.

SPL → nivel de presión promedio rms; dB re $2 \times 10^{-5} N/m^2$.

V → volumen de la cámara reverberante; m^3 .

T → tiempo de reverberación de la cámara; s.

S → área superficial de la cámara; m^2 .

λ → longitud de onda de la frecuencia central de la banda de análisis; m.

Si se asume que los errores asociados con la medición de S, V y λ son despreciables, entonces estas variables y la constante pueden ser agrupadas en un sólo factor K para facilitar los cálculos de incertidumbre. Reescribiendo la ecuación, pero ahora expresada en

Watts, queda

$$W = K(p/T)$$

lo que conduce a

$$\frac{\Delta W}{W} = \left[\left(\frac{\Delta p}{p} \right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T} \right)^2 \right]^{1/2}$$

-Discusión.

Es interesante notar como la presión promedio influye en el error porcentual de la potencia sonora. En el método de comparación, $\Delta p/p$ está multiplicado por ocho; mientras que en el método directo, el multiplicador es uno. Esto sugiere que si los demás errores de medición fuesen despreciables ($\Delta T/T$ y $\Delta W_r/W_r$) y si en los dos métodos se empleara el mismo $\Delta p/p$, entonces el método directo arrojaría el menor error porcentual para el cálculo de la potencia sonora, W .

El error $\Delta W/W$ nunca podrá ser menor que $\Delta p/p$ en la técnica de medición de tiempo de reverberación, y no podrá ser menor que $8^{0.5}(\Delta p/p)$ en el procedimiento de fuente de referencia. Beranek¹ menciona algunas dificultades para obtener con la mayor exactitud posible el promedio espacial de las mediciones de presión sonora y dice que puede esperarse una incertidumbre de 1 ó 2 dB en el nivel de presión sonora promedio.

-Conclusión.

Los resultados del análisis de propagación de error pueden ser usados para planear mejor los experimentos, de forma que los errores excesivos en el cálculo de potencia sonora puedan ser evitados.

¹ El autor cita dos referencias:

-J.P.Holman, "Experimental Methods for Engineers"
(McGraw-Hill, New York, 1971), p. 38.

-L.L.Beranek, "The Measurement of Power Levels and Directivity Patterns of Noise Sources", in "Noise and Vibration Control", edited by L.L.Beranek (McGraw-Hill, New York, 1971), pp. 138-163

ERRATAS.

En la página 117, segundo párrafo, dice:

"...13cm de longitud,...". Debe decir:

"...130cm de longitud,..."

En la página 116, penúltimo renglón, dice:

"En el método comparativo...". Debe decir:

"En el método de comparación..."