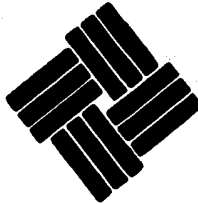


88/217
2
2e'



VINCE IN BONO MALUM

UNIVERSIDAD ANAHUAC

**ESCUELA DE INGENIERIA
CON ESTUDIOS INCORPORADOS A LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**EL ANALIZADOR DE ESPECTRO
DE AUDIO Y SUS APLICACIONES**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

(AREA SISTEMAS ELECTRICOS Y ELECTRONICOS)

P R E S E N T A :

LUIS ALBERTO BUSTAMANTE VILLARREAL

MEXICO, D. F.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1989



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

EL ANALIZADOR DE ESPECTRO DE AUDIO Y SUS APLICACIONES

I N D I C E

Objetivos y Limitaciones	5
Introducción	7
Capítulo 1 El análisis de espectro	10
1.1 El espectro de frecuencia	10
1.1.1 El espectro electromagnético	10
1.1.2 El espectro mecánico	13
1.2 El análisis de espectro y sus aplicaciones ...	14
1.2.1 El análisis del espectro eletromagnético	14
1.2.2 El análisis del espectro mecánico	16
Bibliografía	17
Capítulo 2 El analizador de espectro de audio	18
2.1 ¿Qué es un analizador de espectro de audio? ...	18
2.2 Diferentes tipos de analizadores de audio	20
2.2.1 El analizador de tiempo real	20
2.2.2 El analizador de filtro examinador	23
(Scanning-Filter Analyzer)	
2.2.3 El analizador superheterodino	23
2.2.4 El analizador de filtro dispersivo	26
2.3 Selección del analizador a construir	27
Bibliografía	28
Capítulo 3 Construcción del prototipo	29
3.1 Diagrama a bloques del dispositivo	29
3.2 Descripción, explicación y cálculos del circuito de cada bloque	30
3.2.1 Transductor	30

EL ANALIZADOR DE ESPECTRO DE AUDIO Y SUS APLICACIONES

3.2.2	Preamplificador	33
3.2.3	Amplificador	40
3.2.4	Filtros	43
3.2.5	Red de retardo y de promedio	55
3.2.6	Circuito de detección de nivel y pantalla	59
3.2.7	Generador ruido rosa - Definición de ruido rosa y ruido blanco	66
3.2.8	Fuente de alimentación	70
3.3	Ajustes del dispositivo	73
3.4	Diagrama general de todo el dispositivo	77
3.5	Lista de componentes	78
3.6	Dibujos de las placas de circuito impreso	80
3.7	Evaluación económica del dispositivo	83
Bibliografía		88
Capítulo 4	Aplicaciones del analizador de espectro	90
4.1	El sonido y la percepción de éste por el oído humano	90
4.1.1	El sonido	91
4.1.2	La medición del sonido; los decibeles	95
4.1.3	El comportamiento del sonido en el medio ambiente	98
	- Propagación, pérdida y absorción del sonido	
4.1.4	Reflexión del sonido	101
4.1.5	Refracción del sonido	102
4.1.6	Difracción del sonido	104
4.2	El sistema auditivo humano	105
4.3	Los instrumentos de medición y el oído	112
4.3.1	Tono	113
4.3.2	Sonoridad y niveles de sonoridad	113

EL ANALIZADOR DE ESPECTRO DE AUDIO Y SUS APLICACIONES

4.3.3	Sonoridad contra intensidad	117
4.3.4	Timbre contra espectro	119
4.4	Aplicaciones del analizador de espectro	119
4.4.1	Reducción y control del ruido	120
	- Efectos del ruido sobre el ser humano	
	- Control del ruido	
4.4.2	Acústica arquitectónica	140
	- Comportamiento del sonido en un local	
	- El coeficiente de absorción de un material	
	- La distribución del sonido	
	- Aislamiento acústico	
4.4.3	Análisis de las vibraciones y mantenimiento de máquinas	158
	- ¿Qué son las vibraciones?	
	- La elección del analizador de espectro	
	- El mantenimiento de las máquinas	
	- Las vibraciones y el cuerpo humano	
4.4.4	Aplicaciones generales del analizador de espectro	165
	- En medicina	
	- En electrónica	
	- En veterinaria	
	- En el aprendizaje de idiomas	
	- En alta fidelidad y electroacústica	
	- En control de calidad	
4.4.5	Algunas aplicaciones del analizador de espectro construido	167
	a) Igualación o equalización de un recinto o local	
	b) Conocer la respuesta del control de tonos de un preamplificador	
	c) Desempeño de una grabadora de audio	
	d) Ajuste de la inclinación (azimuth) de la cabeza de una grabadora y la corriente de polarización (bias)	
	e) Eliminación de la retroalimentación acústica en un local	
	f) Uso didáctico del analizador	
	g) Otros usos generales	
	Bibliografía	177
	Conclusiones	180

EL ANALIZADOR DE ESPECTRO DE AUDIO Y SUS APLICACIONES

Apéndice A	Instructivo de operación y servicio	200
Apéndice B	Tablas de coeficientes de absorción de algunos materiales	214

EL ANALIZADOR DE ESPECTRO DE AUDIO Y SUS APLICACIONES

OBJETIVOS

- 1.- Reafirmar y ampliar conocimientos en electrónica, filtros activos, acústica y audio.
- 2.- Escribir sobre el tema de la acústica para demostrar la importancia de esta materia.
- 3.- Escribir sobre algunas de las aplicaciones de los analizadores de espectro, para demostrar la utilidad de estos dispositivos en muchas áreas.
- 4.- Construir un prototipo sencillo, práctico y económico, que muestre algunas de las aplicaciones de los analizadores de espectro.

LIMITACIONES

- 1.- No voy a profundizar en la teoría de filtros activos porque mi intención no es hacer un tratado sobre este tema.
- 2.- Al exponer ciertos conceptos sobre acústica, tampoco voy a profundizar, ni a extenderme demasiado, porque éste es un tema para otra tesis.
- 3.- Al escribir sobre las aplicaciones de los analizadores de espectro, no voy a explicar detalladamente como se utiliza el analizador, porque esto depende de cada caso en particular y del tipo de analizador de espectro del que se disponga.

EL ANALIZADOR DE ESPECTRO DE AUDIO Y SUS APLICACIONES

LIMITACIONES. Cont.

4.- El analizador que pienso construir no va a tener las impresionantes especificaciones, ni las características de funcionamiento de los analizadores profesionales. El prototipo tendrá la intención de que yo aplique ciertos conocimientos de electrónica y de demostrar algunas de las aplicaciones de los analizadores de espectro de audio. Y, como el título lo indica, sólo dentro del rango de audio será útil el prototipo que se construirá. Tampoco tengo pensado construir este prototipo para comercializarlo.

INTRODUCCION

En esta época, donde los avances tecnológicos y científicos han permitido el desarrollo e invento de dispositivos para facilitarnos, prolongarnos y, hacernos más placentera la vida; también se han ocasionado problemas como la contaminación por ruido, del aire, de las aguas, publicitaria, etc. Creo que muchos de estos problemas podrían resolverse a través de la educación, investigación, deseos reales de resolverlos, ética e imaginación.

Por eso pienso que el tema del analizador de espectro y sus aplicaciones me da la oportunidad de exponer algunos problemas a los que nos enfrentamos en nuestra vida diaria y que afectan nuestra salud y desempeño y que con la ayuda del analizador de espectro y la aplicación de ciertos conceptos de acústica, se pueden disminuir o eliminar. He notado que en el diseño técnico, mecánico y arquitectónico; se ha descuidado el aspecto acústico, porque primordialmente se ha buscado la funcionalidad, la belleza y el bajo costo. Esto ha provocado la construcción de oficinas, fábricas, tiendas, etc. sumamente ruidosas, que contribuyen a la fatiga y al posible daño físico y psíquico, de las personas que ahí desempeñan sus labores; salones de clase con eco o acústicamente " muertos "; que impiden la inteligibilidad de las palabras; máquinas que al vibrar, no sólo generan ruido, sino que además desperdician energía y se desgastan más rápido; vehículos automotores muy ruidosos, etc.

En el campo del audio y de la alta fidelidad, podría ser gracias a las nuevas técnicas digitales para la grabación y reproducción y a los sistemas para el reforzamiento del sonido, un medio

bastante fiel para la reproducción de la música.

Por desgracia el desconocimiento de acústica y de lo que realmente es alta fidelidad, hace creer a mucha gente, que un sistema que reproduce el sonido con mucha intensidad es magnífico. Probablemente algunas personas piensen que para darle tanta importancia a la reproducción fiel de la música, habiendo otras cosas más necesarias; pero para mí, la música, cuando realmente es música y no ruido; como sucede con algunos de los " grupos musicales " actuales, es una de las expresiones artísticas más grandes que el Hombre ha creado y desarrollado y, por lo tanto, merece reproducirse lo más fielmente posible. De otra manera, sería como si observáramos una obra de arte plástica a través de un vidrio sucio o rayado o, como si una persona con problemas de dicción nos leyera poesía.

Para lograr los objetivos de este trabajo recepcional, lo he dividido en cuatro capítulos.

En el capítulo uno, explicaré brevemente lo que es el análisis de espectro, tanto mecánico como electromagnético, de que tratan y en que se aplican cada uno de ellos.

En el capítulo dos, voy a explicar brevemente los principios de operación de algunos analizadores de espectro y selecciono de entre ellos el tipo de analizador a construir, justificando las razones de dicha elección.

El capítulo tres es una explicación de los elementos que forman el analizador. En este mismo capítulo, explico como se construye, se calcula y se ajustan los elementos para cumplir con los

objetivos fijados.

También se hace un pequeño análisis del costo del prototipo.

El capítulo cuatro empieza con una breve explicación sobre nociones de acústica y sobre todo como funciona el aparato auditivo humano. La razón de esto, es comprender mejor la segunda parte de este capítulo, que habla sobre las aplicaciones del analizador de espectro de audio.

Al final de cada capítulo daré la bibliografía empleada para su elaboración y como apéndices, un instructivo de operación del aparato construido y unas tablas de coeficientes de absorción.

CAPITULO 1

EL ANALISIS DE ESPECTRO

CAPITULO 1

EL ANALISIS DE ESPECTRO

1.1 El espectro de frecuencia.

Podríamos decir que el término espectro, se refiere a la representación de un rango muy grande de frecuencias emitidas por algún tipo de energía radiante.

Aunque en este trabajo el espectro de frecuencia que me interesa analizar, es el de audio, también voy a hablar brevemente del espectro electromagnético y de algunas de sus aplicaciones, por ser de una gran utilidad en la tecnología y la ciencia.

1.1.1 El espectro electromagnético.

El espectro electromagnético lo podemos dividir en regiones que tengan propiedades en común o, que sean útiles para la ciencia y la tecnología.

Cerca del límite inferior del espectro, las radiaciones se designan en términos de bandas de frecuencia, siendo la mayor parte de ellas útiles para las radiocomunicaciones.

Las regiones en que se ha dividido el espectro electromagnético y que tienen propiedades similares, son las siguientes :

Bandas de baja frecuencia.- Comprendiendo el rango de 1 a 1000 ciclos/Seg. En esta porción del espectro, el restringido ancho de banda, impide su uso en comunicaciones. Aunque se ha tratado de usar para comunicación con submarinos.

Bandas de frecuencias bajas de radio.- Comprende el rango de 1000 a 200,000 c/Seg. Esta banda de frecuencias es particularmente útil para comunicaciones a larga distancia, donde la confiabilidad de la transmisión es importante.

Para transmitir en esta banda, se requiere disponer de suficiente potencia de radiación. Esta banda se utiliza principalmente en radiotelegrafía.

Bandas de frecuencias medias.- Comprendidas entre $200,000$ y 2×10^6 ciclos/Seg. (Hz).

La porción de frecuencias bajas de esta banda, se utiliza para transmisiones que requieran de una estabilidad razonable, de día y de noche, en distancias moderadas. En esta banda, se requiere de un campo de radiación lo suficientemente potente, para evitar ruido atmosférico.

La parte de frecuencias altas de esta banda, se utiliza para transmisiones de radio, radiocomunicación marítima, navegación aérea y para radioaficionados.

Banda de frecuencias altas.- Desde 2×10^6 c/Seg. a 30×10^6 c/Seg.

Esta banda de frecuencias se emplea para el mismo tipo de transmisiones, que la banda anterior, pero con la diferencia de que requiere de menor potencia de radiación. Pero esta banda, depende de las perturbaciones de la ionósfera.

Banda de frecuencias muy altas y ultra altas frecuencias.- Comprende el rango de 30×10^6 a 3000×10^6 c/Seg. (Hz).

Esta banda es adecuada para comunicaciones a distancias relativamente cortas y servicios de transmisión muy detallada, incluyendo radar, televisión, investigación espacial, radioastronomía, telemetría y rastreo, comunicaciones via satélite, etc.

Microondas.- Comprende el rango de 3×10^9 a 300×10^9 c/Seg. (Hz).

Esta porción del espectro se utiliza en radar de alta definición, televisión y otros servicios similares, que requieran anchos de banda capaces de conducir considerables cantidades de información

Región infrarroja.- Aproximadamente de 300×10^9 a 400×10^{12} c/Seg.

El límite inferior de esta banda no está bien definido y, en ocasiones se extiende a la región de microondas del espectro.

El espectro infrarrojo, el visible y porciones del ultravioleta, son utilizados para identificar moléculas por medio de su emisión espectral, etc.

Zona visible del espectro (Luz).- 395×10^{12} a 790×10^{12} c/Seg.

Esta es una parte relativamente pequeña del espectro, cubre solo una octava, pero es extremadamente importante. Esta banda contiene toda la energía visible al ojo humano, comunmente se divide en siete regiones o colores.

Espectro Ultravioleta.- 700×10^{12} a 300×10^{14} c/Seg. Junto con las radiaciones infrarrojas, esta parte del espectro puede usarse para comunicaciones muy especiales.

Espectro de Rayos X.- 3×10^{16} a 10^{19} c/Seg. En medicina, biología y en la industria, se utilizan los rayos X. Estos rayos han ayudado a la comprensión de la estructura de la materia. La espectroscopia de rayos X es una herramienta invaluable en el estudio de las transiciones de las órbitas interiores de los átomos, que ocurren cuando éstos absorben mucha energía.

Espectro de rayos Gamma.- 10^{19} a 10^{21} c/Seg. Esta parte del espectro es útil para el estudio de las transiciones nucleares.

En ocasiones a la parte alta de esta banda del espectro, de 10 en adelante, se le llama espectro de rayos c3smicos.

La Fig. 1.1., muestra la composici3n del espectro electromagn3tico. Las lneas horizontales muestran aproximadamente los rangos espectrales y sus diferentes aplicaciones.

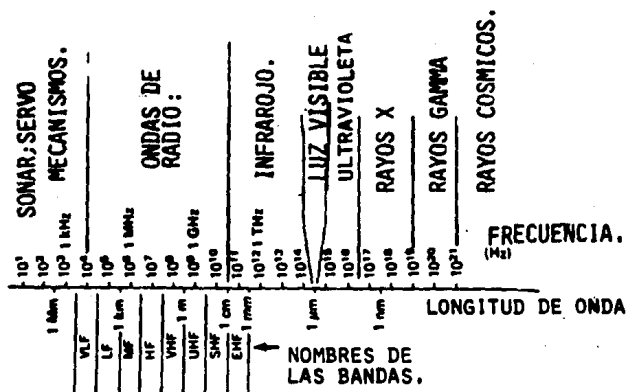


Fig. 1.1. El espectro electromagn3tico

Las lneas verticales indican los rangos aproximados de varios fen3menos fisis y sus aplicaciones pr3cticas.

1.1.2 El espectro mec3nico.

Este tipo de espectro est3 presente cuando existe alg3n tipo de vibraci3n en un cuerpo, sea 3ste s3lido, lquido o gaseoso.

Al espectro mec3nico lo podemos dividir en tres zonas :

-La de bajas frecuencias, de 0 a 20 c/Seg., que no la podemos percibir como sonido, sino que sólo sentimos las vibraciones producidas.

- La parte audible del espectro, es decir la zona comprendida entre 20 y 20,000 c/Seg. (En el capítulo cuarto, se verá porque es éste el rango audible por el ser humano).

- Por último, la zona de frecuencias por arriba de 20,000 c/Seg.; llamada por algunos ultrasónica. Estas frecuencias altas son detectadas por algunos animales como los perros, que oyen hasta 30,000 c/Seg. y, los murciélagos, que usan frecuencias de hasta 90,000 c/Seg., como sistema de navegación, (Radar acústico). El espectro audible por el ser humano, se verá más adelante.

1.2 El análisis de espectro y sus aplicaciones.

La ciencia, la medicina y la tecnología le deben mucho al análisis de espectro, por eso como dije al principio del capítulo, aunque el espectro electromagnético no es el que me interesa analizar en este trabajo; por la gran importancia que tiene, mencionaré algunas de las aplicaciones de este tipo de análisis.

1.2.1 El análisis del espectro electromagnético.

Los inmensos progresos de la Química orgánica, son debidos por una buena parte a la introducción de métodos físicos y particularmente espectroscópicos. Estos métodos sirven sobretodo para determinar la estructura de las moléculas; así como para la evaluación de sus reacciones. Los químicos tienen la tendencia a abandonar los métodos antiguos tradicionales, substituyéndolos por la espectroscopia: que es más simple, precisa y no destruye la substancia analizada.

La espectroscopia es el estudio de las interacciones de un rayo electromagnético con la materia. El más común es el espectro de absorción; cuantos de energía son transportados por las ondas electromagnéticas que inciden sobre una muestra en estudio y son absorbidos. La cantidad de energía absorbida depende de la longitud de onda del rayo incidente, porque dependiendo del valor de la frecuencia de la radiación electromagnética, diferentes transiciones pueden producirse entre los diversos estados de energía, propios de las moléculas en estudio. Si se representa la energía absorbida en función de la frecuencia, por lo general se encuentran una serie de bandas de absorción; su posición, intensidad, ancho y la forma, dicen muchas cosas a un químico.

El análisis espectral es de extraordinaria sensibilidad; por medio de él, puede determinarse en una mezcla, la presencia de un cuerpo que entre en su composición, en una proporción tan pequeña como la de una millonésima.

Como ya se dijo, la espectroscopia ha sido de gran utilidad en Química y Física, pero también lo ha sido en Medicina, permitiendo hacer análisis de sangre y de otras sustancias.

En Astronomía, la espectroscopia ha permitido estudiar la composición y la temperatura del sol, de estrellas y de planetas lejanos. Aplicando el efecto Doppler y la espectroscopia, se ha podido determinar si una estrella o una galaxia se acerca o se aleja de nosotros al mirar, si sus líneas de absorción se han corrido hasta el rojo (se aleja) o al violeta (se aproxima); aunque este método no es aceptado por todos los astrónomos.

La espectroscopia de absorción es sólo una entre una variedad de tipos de análisis espectroscópicos.

Existen por mencionar algunos : El de resonancia paramagnética electrónica, espectroscopia de microondas, infrarroja, de masa, etc. Pero dado que estos tipos de análisis son complejos y no son de interés para este trabajo; solo los he mencionado para demostrar que el análisis espectroscópico de la energía electromagnética es de gran difusión y utilidad.

1.2.2 El análisis del espectro mecánico y sus aplicaciones.

El análisis del espectro mecánico se hace por medio de un transductor que convierte las vibraciones mecánicas en una señal eléctrica y esta señal se analiza en un espectógrafo.

Existen muchos tipos de transductores. En la acústica se utilizan micrófonos, auriculares telefónicos, captadores de vibraciones, palpadores, etc.

El análisis del espectro mecánico es de gran utilidad para geólogos, ingenieros mecánicos, arquitectos, ingenieros civiles, médicos, militares, en el estudio de la Química Coloidal, pruebas no destructivas de material, etc.

Bibliografía Capítulo 1

- 1.- H.J. PURKIS. " BUILDING PHYSICS ACOUSTICS "
Pergamon Press
- 2.- G. KENNEDY. " ELECTRONIC COMMUNICATION SYSTEMS "
Mc. Graw-Hill
- 3.- D. FINK. " ELECTRICAL ENGINEERING HANDBOOK "
Mc. Graw-Hill
- 4.- WERNER BURK. " MANUAL DE MEDIDAS ACUSTICAS PARA EL CONTROL DEL RUIDO "
DEL RUIDO "
- 5.- PAUL HAMLYN. " LAROUSSE ENCYCLOPEDIA OF ASTRONOMY "
Capítulo : Spectroscopic analysis and it's Astronomical Applications.
London Press
- 6.- P. LASZLO y P.J. STANG. " SPECTROSCOPIE ORGANIQUE "
Collection Herman Méthodes. Paris 1972.
- 7.- N.B. COLTHUP, L.H. DALY AND STEPHEN E. WIBERLEY.
" INTRODUCTION TO INFRARED AND RAMAN SPECTROSCOPY "
Academic Press. 1964. International Edition.
- 8.- LEO L. BERANEK. " ACUSTICA "
Editorial Hispano Americana, S.A.
Buenos Aires, Argentina 1961
- 9.- WILLI FURRER. " ROOM AND BUILDING ACOUSTICS AND NOISE ABATEMENT "
London Butterworths 1964

CAPITULO 2

EL ANALIZADOR DE ESPECTRO

CAPITULO 2

EL ANALIZADOR DE ESPECTRO DE AUDIO

2.1 ¿Qué es un analizador de espectro de audio ?

El analizador de espectro de audio es un aparato que divide la señal en sus componentes de frecuencia y los analiza. Este instrumento mide la energía que está presente en la frecuencia especificada.

El análisis de espectro muestra las amplitudes de oscilaciones individuales, haciendo distinción entre la frecuencia fundamental y sus armónicas. El tono, la nota y el ruido pueden distinguirse en base a su diferente espectro. Para entender mejor esto, es conveniente hablar del análisis en el campo o dominio de la frecuencia.

En 1822, el matemático Joseph Fourier (1768-1830), mostró que cualquier forma de onda compleja, puede representarse por una serie de senos y/o cosenos.

En una señal cualquiera, la más baja frecuencia se denomina fundamental y las otras frecuencias son múltiplos de ésta o armónicas. Existen un número infinito de dichas armónicas. Esto quiere decir, que una onda no sinusoidal, por ejemplo de 200 c/Seg. está constituida por una onda sinusoidal fundamental de 200 c/Seg y armónicos de 400, 600 o 800 c/Seg., etc. Estas armónicas son las que distinguen a los instrumentos por ejemplo, la nota " La " de una trompeta tiene el sonido característico de este instrumento, porque sumado a la frecuencia fundamental de 440 c/Seg., están sus armónicos. Si no existieran estos armónicos, la trompeta sonaría como el silbido de un tono puro.

Como regla general, las armónicas conforme van aumentando de grado van disminuyendo en magnitud, es por ello que dichas armónicas se desprecian por considerarse que su contribución es mínima o imperceptible. Teniendo en cuenta todo esto, supongamos que quisieramos analizar la nota " La ", de la trompeta, sabemos que su fundamental es la frecuencia de 440 c/Seg.; pero ¿cuanta energía se necesita en cada una de sus armónicas para reproducir esta nota?. Un método para analizar esta nota sería grabarla en una cinta magnética, para poder reproducir ésta cuantas veces sea necesario. La señal eléctrica de salida de la grabadora, se aplica a la entrada de un filtro pasabanda; en el cual se puede seleccionar la frecuencia de resonancia. A la salida de éste filtro se conectaría un voltímetro, para medir la magnitud de cada uno de los armónicos. Al principio seleccionaríamos la frecuencia de 440 c/seg., tomaríamos nota de la medida en el voltímetro. Después iríamos variando la frecuencia del filtro para cada una de las armónicas, midiendo en cada caso la amplitud de la señal. Ahora ya sabríamos cuánto se necesita de cada armónica para reproducir la nota " La " de la trompeta. Este tipo de análisis es muy tardado y requiere de una grabadora para poder reproducir la señal a analizarse el número de veces que sea necesario.

En resumen, cuando la señal que se desea analizar es compleja, es necesario utilizar un analizador de espectro.

Existen varios tipos de analizadores de espectro, a continuación mencionaré algunos de los más comunmente usados.

2.2 Diferentes tipos de analizadores de Audio.

2.2.1 Analizador de Tiempo Real.

En este tipo de analizador mostrado en la Fig. 2.1, la señal que se desea estudiar se aplica a un mismo tiempo a un conjunto de filtros entonados a diferentes frecuencias. Con esto puede analizarse una señal en diferentes bandas de frecuencia bien delimitadas.

En general, en esta clase de analizadores, se utilizan tres tipos: de ancho de banda constante, de ancho de banda constante en tanto por ciento y, de octava, media octava o tercio de octava. El primero, de ancho de banda constante, tiene un filtro cuya banda pasante tiene un ancho igual a un número fijo de ciclos por segundo. Los anchos de banda comunes, están comprendidos entre 5 y 200 c/Seg.. Este tipo se utiliza principalmente para determinar los componentes armónicos de un sonido, cuando sus frecuencias son lo suficientemente estables como para que sus componentes se mantengan dentro de la estrecha banda de medición.

El segundo tipo, el de ancho de banda constante en tanto por ciento, tiene un ancho de banda que es un tanto por ciento determinado de la frecuencia central de cada banda. Así, en las frecuencias altas, el ancho de banda en ciclos por segundo es mayor que en las frecuencias bajas, de modo que se necesita tomar menos lecturas con este tipo de analizador que con el de ancho de banda constante.

El tercer instrumento, es el analizador de octava, media octava o tercio de octava. Este tipo de analizador también forma parte de los de banda constante en porcentaje.

* Octava : Una de las definiciones de octava es : Ocho notas musicales y también que es el intervalo entre dos sonidos o señales, teniendo una relación de frecuencia básica de dos. La relación de frecuencia correspondiente a un tono de octava, es aproximadamente pero no exactamente de dos a uno.

Tiene muchas aplicaciones en los casos en los que no se necesita un gran detalle en el análisis de ruidos de espectro continuo. Como su nombre lo indica, en el analizador por octavas, la frecuencia de corte superior de cada banda pasante, es dos veces mayor que la frecuencia de corte inmediata inferior. En el analizador de media octava y en el de tercio de octava, las relaciones de frecuencia de corte superior a la frecuencia de corte inferior, son respectivamente iguales a la raíz cuadrada y a la raíz cúbica de dos.

En cualquiera de estos analizadores, hay que asegurarse de que es satisfactoria la atenuación del filtro fuera de la banda pasante. Esto es particularmente importante cuando el espectro de ruido depende mucho de la frecuencia o cuando se mide un sonido de bajo nivel en presencia de otro de muy alto nivel. Este tipo de analizadores se llaman de tiempo real porque analizan todas las frecuencias de interés a un mismo tiempo.

Los analizadores de tiempo real (Real time analyzers), son un fenómeno físico natural. Nuestros ojos y oídos son capaces de hacer este tipo de análisis. Cuando los ojos ven una escena son capaces de identificar los colores (frecuencia) y la intensidad luminosa (amplitud). El oído también identifica la frecuencia y la intensidad del sonido.

La precisión con la que el dispositivo detecta la frecuencia, se

llama precisión en la calibración de frecuencia. Los ojos tienen una precisión bastante buena. Nosotros podemos identificar fácilmente el verde, el rojo, etc. En cambio, el oído no tiene igual precisión; sólo personas con oído muy bueno y entrenado identifican con precisión un tono determinado. La habilidad para diferenciar entre dos frecuencias muy próximas una de otra, se llama resolución del dispositivo de medición. El oído tiene mucha resolución, puede notar la diferencia entre dos notas que están separadas por unos cuantos cientos de hercios; en cambio el ojo no. Esto parecería que contradice el punto anterior, pero, no es lo mismo identificar un tono, que notar que es diferente de otro; al igual que distinguir dos colores.

La habilidad para trabajar en rangos de intensidad muy amplios, es decir desde pequeñas hasta grandes intensidades, se llama rango dinámico del dispositivo, tanto el ojo como el oído son una maravilla en este sentido. La banda de respuesta a la cual el dispositivo es sensible, se llama rango de frecuencia.

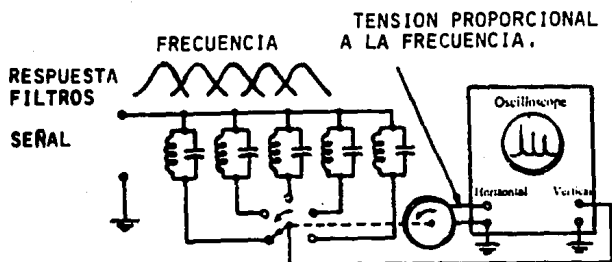


Fig. 2.1 Analizador de Tiempo Real

2.2.2 Analizador de filtro escudriñador o examinador

Cuando queremos analizar una señal con mucho detalle se requieren muchas bandas de frecuencia. Con un analizador de tiempo real sería necesario una cantidad muy grande de filtros; para evitar este problema, se utiliza el filtro examinador, mostrado en la Fig. 2.2. Este tipo de analizador, en lugar de tener varios filtros entonados (sintonizados) a diferentes frecuencias, tiene uno solo que se puede ajustar a una frecuencia deseada. El analizador presenta la magnitud de la amplitud de la tensión en el eje vertical de un osciloscopio. La frecuencia del filtro se varía eléctricamente dentro del rango de frecuencia y, la tensión proporcional de esta frecuencia se usa para variar la dirección horizontal del trazo del osciloscopio.

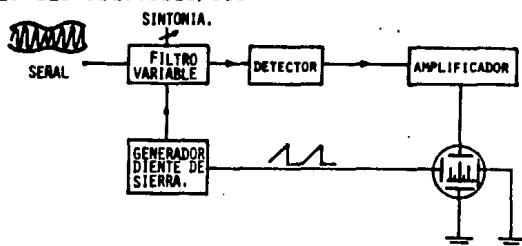


Fig. 2.2 Analizador de filtro examinador

El generador de sierra varía la frecuencia del filtro y desvía el trazo horizontal del osciloscopio.

La señal eléctrica que pasa por el filtro se detecta, amplifica y se conecta a la terminal de deflexión vertical del osciloscopio.

2.2.3 Analizador superheterodino.

Aunque el analizador examinador funciona bien, la fabricación de filtros entonados eléctricamente es muy difícil. Afortunadamente existe otro tipo de diseño que hace innecesario este tipo de

filtro. Este tipo de filtro se llama superheterodino (se muestra en la Fig. 2.3). Trabaja exactamente como el común de la familia de los radios de amplitud modulada con la excepción de que se sintoniza eléctricamente y que la salida va a un osciloscopio y no a una bocina. La portadora se genera en el oscilador local y la señal que se analiza es la señal moduladora.

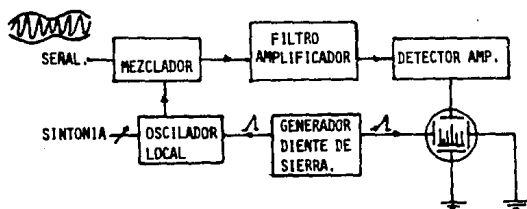


Fig. 2.3 Analizador Superheterodino.

Como se puede notar en la Fig. 2.3, este tipo de analizador es una expansión del analizador examinador. Se le han aumentado un mezclador y un oscilador local. La salida del mezclador es la frecuencia de la señal a analizar menos la frecuencia del oscilador local. El filtro se entona a esta diferencia de frecuencias y se fija. Aunque el filtro está fijo en frecuencia se puede diseñar para tener anchos de banda y pendientes de corte variables. El ancho de banda se ajusta por el usuario para obtener la resolución necesaria. El análisis se completa variando el oscilador local con el generador de diente de sierra. La frecuencia central alrededor de la cual el analizador examina, se

selecciona manualmente adicionando una tensión directa al generador de diente de sierra. En la Fig. 2.4, se muestra un tipo común de analizador superheterodino. En este diseño se aumentó un oscilador local y un mezclador. Aunque parezca una complicación del primer tipo de analizador superheterodino, en realidad estas adiciones simplifican el diseño. El primer oscilador local se usa para sintonizar el analizador. El segundo oscilador local hace el análisis y se sintoniza eléctricamente por medio del generador de diente de sierra. Al dividir estas funciones, el oscilador controlado por tensión se vuelve mucho más sencillo que en el primer caso, en el cual tenía que desempeñar dos funciones. La desventaja de este diseño es que el analizador está limitado por el ancho de banda del primer filtro.

Cuando se desea hacer análisis con anchos de banda tan amplios como el analizador sea capaz, el primer tipo de analizador superheterodino es recomendable. Cuando solo se desea analizar anchos de banda angostos, se utiliza el segundo tipo de analizador, el cual puede resultar menos costoso.

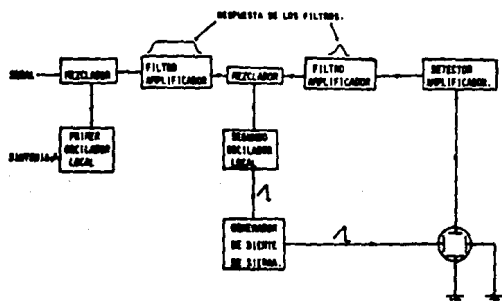


Fig. 2.4 Analizador superheterodino comúnmente empleado.

Ambos analizadores superheterodinos tienen una desventaja en relación al analizador de tiempo real. El analizador de tiempo real examina todas las frecuencias a las que responde a un mismo tiempo, mientras que los otros analizadores tienen la desventaja de que si el espectro analizado cambia rápidamente con el tiempo, se puede perder la detección de transitorios que ocurren, entre una banda y otra diferente a la que está sintonizada en ese instante. Una posible solución a esto sería acelerar la velocidad del análisis a través de la banda, perdiéndose con esto solo transitorios muy rápidos. Desgraciadamente existe una limitación para esta velocidad de análisis. Además mientras más rápido se haga el análisis, el ancho de banda del filtro se hace mayor. Debido a esto un análisis rápido, da como consecuencia un analizador de resolución pobre.

2.2.4 Analizador de filtro dispersivo.

Para ayudar a resolver la limitación de los analizadores superheterodinos, existen los de filtro dispersivo.

La diferencia básica que tienen este tipo de analizadores en relación al superheterodino, es que el filtro de banda angosta se substituye por uno de banda dispersiva. Un filtro de banda dispersiva es aquél que retarda la señal de las distintas frecuencias en lapsos de tiempo diferentes. Esto quiere decir que si una señal que contiene diferentes frecuencias al mismo tiempo se aplica a la entrada del filtro, éstas saldrán del filtro separadas en el tiempo.

Diseñados apropiadamente estos analizadores examinan la señal muy rápidamente, a causa de su ancho de banda y, además por las características dispersivas, que le dan una resolución como si su

ancho de banda fuera mucho más angosto. Este tipo de analizador se aproxima bastante a los de tiempo real en el examen de señales que cambian rápidamente. El problema de este tipo de analizador es la construcción del filtro dispersivo. Buenos filtros son difíciles de fabricar; es por eso que este tipo de analizador es muy especializado y costoso.

Existen otros tipos de analizadores hoy en día, utilizan computadoras y equipo muy elaborado y costoso; esto se verá en el capítulo cuatro.

2.3 Selección del tipo de analizador a construir

Para el prototipo he decidido hacer un analizador de tiempo real por octavas.

Este tipo de analizador es más económico que los otros y, como ya se vió, tiene la ventaja de poder analizar a un mismo tiempo varias frecuencias, ahorrando con esto tiempo en el análisis.

Su construcción es sencilla, los componentes que requiere se pueden conseguir en el país sin problemas; los ajustes, si se requieren, son mínimos.

El equipo necesario para armar, ajustar y probar el prototipo, se encuentra disponible en la Universidad. Además, el analizador de tiempo real, por octavas, es un dispositivo de fácil manejo, que no requiere de grandes conocimientos por parte del usuario y para las aplicaciones deseadas (Ver Capítulo cuatro), es bastante bueno.

Otra ventaja del analizador de espectro que pienso construir, es que no requiere de un osciloscopio para mostrar la frecuencia y la magnitud de ésta, ya que éste tendrá una pantalla fabricada con diodos emisores de luz (LEDS).

Bibliografía Capitulo 2

- 1.- H.J. PURKIS. " BUILDING PHYSICS ACOUSTICS "
Pergamon Press
- 2.- CLYDE F. COOMBS Jr. " BASIC ELECTRONIC INSTRUMENT HANDBOOK "
Mcgraw Hill Company
- 3.- WILLI FURRER. " ROOM AND BUILDING ACOUSTICS AND NOISE
ABATEMENT "
London Butterworths 1964
- 4.- SOUNDERS, DEREK A. " AUDITORY PERCEPTION OF THE SPEECH "
- 5.- D. FINK. " ELECTRICAL ENGINEERING HANDBOOK "
- 6.- G. KENNEDY. " ELECTRONIC COMMUNICATION SYSTEMS "
Mcgraw Hill 1977
- 7.- LEO L. BERANEK " ACUSTICA "
Editorial Hispano Americana, S.A.
Buenos Aires Argentina 1969

CAPITULO 3

CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO

CAPITULO 3
CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO

3.1 Diagrama a bloques del prototipo construido.

En este capítulo se verá como funciona el prototipo y como se construyó y calculó. Para empezar la explicación del dispositivo voy a ayudarme con el diagrama a bloques mostrado en la Fig. 3.1.

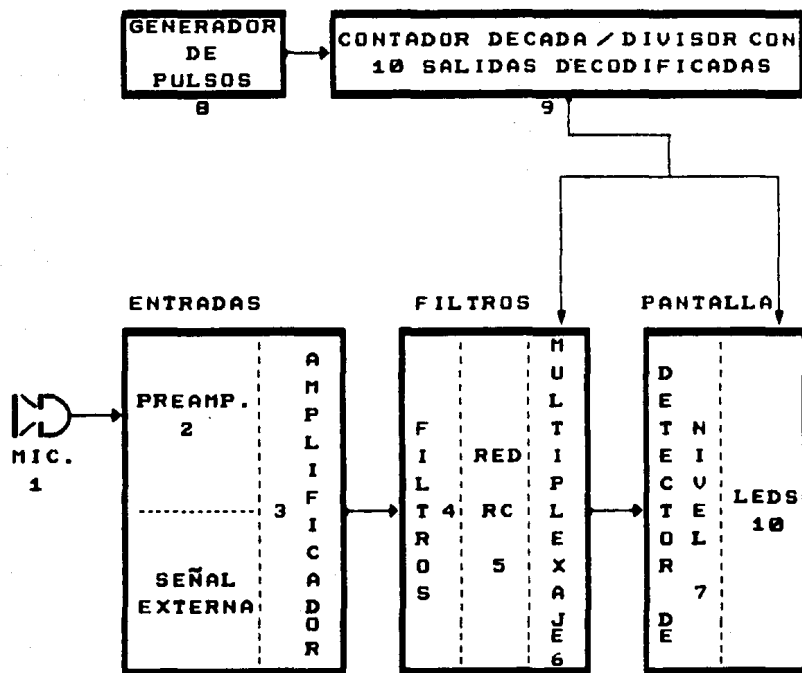


Fig. 3.1 Diagrama a bloques del prototipo construido

Para comprender mejor el funcionamiento del analizador, voy a explicar rápidamente el diagrama a bloques. (Fig. 3.1)

La señal a analizarse puede ser la que percibe el transductor integrado en el aparato o una señal externa que se aplica en la entrada 2. Cualquiera de estas señales se amplifica (bloque 3) y, de ahí pasa a un banco de filtros (4). A la salida de cada uno de estos filtros existe una red que promedia y retarda la señal de cada filtro; después viene la etapa de detección de nivel (8), que posteriormente enciende la columna (frecuencia) y el renglón (amplitud) de la pantalla formada por diodos emisores de luz (10).

3.2 Descripción, explicación y cálculo del circuito de cada bloque.

3.2.1 Transductor. (1)

En este caso el transductor es un micrófono. El micrófono convierte la energía mecánica del sonido en energía eléctrica. El micrófono convierte cambios de presión en el aire, en fluctuaciones similares (no necesariamente iguales) de tensión. Las ondas sonoras en el aire consisten en moléculas que vibran alrededor de sus posiciones de equilibrio. Dado que no se pueden hacer conexiones eléctricas con el aire, debe aprovecharse el movimiento de las moléculas, con el fin de desplazar un sólido. Normalmente una película delgada denominada diafragma. El diafragma puede ser una película de papel estirado, metálico, de vidrio o de cualquier otro material sólido y debe estar fija por los bordes: de forma que esté libre para vibrar cuando incide la onda sonora.

Para las aplicaciones que se requieren en este dispositivo, es

necesario que el micrófono tenga una respuesta bastante plana en el rango comprendido entre 30 y 16000 c/Seg., de un tamaño reducido, costo razonable y con una buena sensibilidad. Es por todo esto que he elegido un micrófono electrostático o micrófono de capacitor de electret. Este micrófono tiene una respuesta plana de 30 a 15000 c/Seg., es omnidireccional; tiene alta impedancia, lo cual lo hace sensible, es de tamaño reducido y es económico.

El micrófono de capacitor se usa mucho para medición de presión sonora y como micrófono de estudio para la grabación de música, con alta fidelidad.

El micrófono de capacitor consiste en un fino diafragma, detrás de éste, a muy poca distancia, se halla una placa (ver Fig. 3.2). El diafragma y la placa posterior se hallan eléctricamente aislados y forman un capacitor eléctrico. Cuando el diafragma vibra con el sonido, cambia la capacitancia; estos cambios se traducen en cambios de tensión.

Estos cambios se amplifican mediante un pequeño preamplificador integrado en el mismo micrófono.

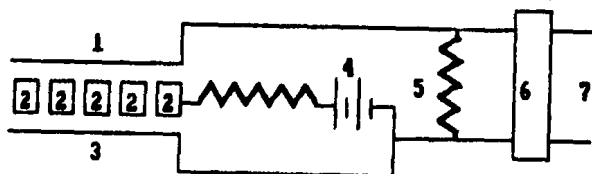


Fig. 3.2 Diagrama de un micrófono de capacitor.

Fig. 3.2 Diagrama de un micrófono de capacitor.

Descripción :

- 1.- Diafragma frontal
- 2.- Placa central rígida (perforada)
- 3.- Diafragma
- 4.- Tensión de polarización
- 5.- Resistencia (grande)
- 6.- Preamplificador
- 7.- Terminales del micrófono

La placa central está perforada para evitar que el delgado diafragma esté demasiado rígido, evitando que el diafragma resuene.

El micrófono de capacitor requiere de una tensión fija de polarización entre el diafragma y la placa, para poder trabajar. Esta tensión de polarización en los micrófonos de capacitor antiguos era muy alta, alrededor de 300 voltios; pero gracias al descubrimiento del electret, esta tensión disminuye considerablemente. Este micrófono sólo requiere de una tensión de 2 voltios como mínimo y de 10 voltios como máximo.

Este micrófono tiene un preamplificador integrado en la misma cápsula que también se alimenta de esta tensión de 2 a 10V. El motivo por el cual el micrófono va a ir interconstruido dentro del mismo armazón, es que este tipo de micrófono es muy sensible a ruidos eléctricos cercanos, como pueden ser los 60 ciclos de la línea de alimentación. Se recomienda utilizar este tipo de micrófono con cable muy corto para evitar pérdidas en altas frecuencias debidas a la capacitancia del cable.

Especificaciones del micrófono utilizado :

- Sensibilidad (La sensibilidad de un transductor microfónico se mide por el cociente entre el valor de la salida eléctrica y el valor de la entrada sonora) :

-65 dB + - 4 dB (0 dB REF 1V/ μ bar a 1 c/Seg.)

- Respuesta de frecuencia :

30 a 15000 + - 3 dB ó 20 a 20,000 c/Seg. +- 5dB

- Impedancia de salida : 1000 ohmios

- Respuesta omnidireccional

- Corriente de drenaje : 1 mA

- Tensión de polarización : 2-10 voltios

3.2.2 Preamplificador.

A pesar de que el micrófono tiene incorporado dentro de su misma cápsula un pequeño preamplificador, la señal eléctrica que entrega es muy pequeña y se recomienda conectarlo a otro preamplificador adicional para hacer esta señal lo suficientemente grande para que la detecte un amplificador. Este amplificador es muy sencillo, pequeño y económico. Consta de un amplificador operacional y de un transistor, ver Fig. 3.5.

Dado que en este preamplificador, en el amplificador y en los filtros, voy a utilizar amplificadores operacionales, siendo éstos de gran utilidad hoy en día; voy a dar un pequeño repaso de las principales características de este dispositivo electrónico.

El amplificador operacional es uno de los dispositivos más ampliamente usados hoy en día. Este tipo de amplificador se encuentra disponible en un circuito integrado y mediante el uso de componentes externos, se utiliza en innumerables aplicaciones como pueden ser: amplificación invertida y no invertida, adición, sustracción, diferenciación, integración, filtros, etc.

Alrededor de un tercio de los circuitos integrados lineales, son amplificadores operacionales. Al conectar resistores externos al amplificador operacional, es posible ajustar la ganancia de tensión y el ancho de banda, para cada exigencia en particular. Hay más de 2000 tipos de amplificadores operacionales disponibles en el mercado y casi todos son circuitos integrados monolíticos con disipaciones de potencia inferiores a un vatio, a la temperatura ambiente.

Si se observa el diagrama esquemático de un amplificador operacional característico, se encontrará que la mayor parte de sus etapas son amplificadores diferenciales, lo cual permite tener operación hasta frecuencia cero y proporcionar rechazo de modo común. La mayoría de los amplificadores operacionales tienen dos entradas (una inversora y la otra no) y una salida, como se muestra en la Fig. 3.3; donde se muestra un amplificador operacional ideal.

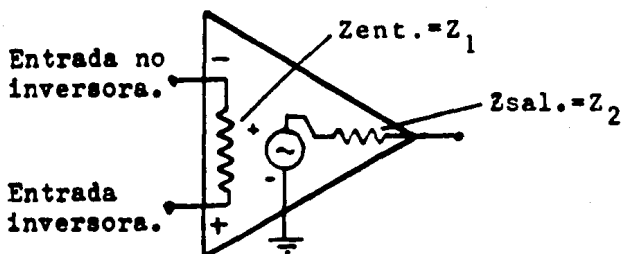


Fig. 3.3 Diagrama de un amplificador operacional ideal.

Un amplificador operacional ideal posee las siguientes características :

- Impedancia de entrada $Z_1 = \frac{V}{I}$ infinita.
- Impedancia de salida $Z_2 = 0$ nula.
- Ganancia infinita.
- Tiempo de respuesta nulo.

Obviamente ningún amplificador operacional cumple estos requisitos. El éxito de estos circuitos reside sobre todo en que las realizaciones prácticas de amplificadores operacionales se aproxima en gran medida a las características ideales mencionadas arriba. Por ello, su empleo simplifica enormemente el trabajo de diseño y la puesta a punto de los correspondientes circuitos electrónicos. Sin embargo, por razones de estabilidad, los amplificadores operacionales presentan todos, un defecto en común, al que hay que prestar atención. Este defecto consiste en que su ganancia en lazo abierto disminuye rápidamente, en función de la frecuencia, ver Fig. 3.6. Como esta reducción en la ganancia ocurre cuando se trabaja en lazo abierto, es decir sin ninguna retroalimentación que controle la ganancia del amplificador. Usando los resistores externos adecuados y sirviéndose de la curva de respuesta (Diagrama de Bode) proporcionada por el fabricante o conociendo el ancho de banda en ganancia unitaria, se puede ajustar la ganancia para hacerla constante dentro del intervalo de frecuencia que nos interesa. Para este trabajo voy a utilizar el amplificador LM 324, las razones para el empleo de este circuito integrado son :

- Ahorro de espacio, ya que este circuito integrado contiene cuatro amplificadores operacionales en una pastilla, Fig. 3.4.
- El ahorro de dinero, ya que sólo requiero de tres circuitos

integrados para todo el aparato, además de que este circuito es de bajo costo.

- Alta ganancia, Fig. 3.6.
- Compensado internamente en frecuencia.
- Como alimentación solo requiere de tensión positiva
- Su respuesta de frecuencia y la corriente de polarización están compensadas en temperatura.
- Su bajo consumo de corriente permite su uso con baterías.
- El circuito está protegido contra cortos circuitos, siempre y cuando estos sean de corta duración.
- Se encuentra en el país sin problemas de suministro.

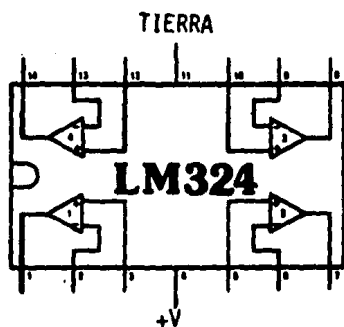


Figura 3.4 Diagrama esquemático del circuito integrado LM 324

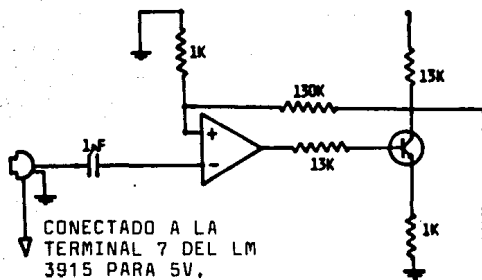


Figura 3.5 Diagrama del preamplificador a utilizar.

La ganancia de este amplificador es :

$$V_1 = R_1 i_1$$

$$A_v = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 131 = 42.34 \text{ dB}$$

$$V_2 = R_2 i_2 + R_1 i_1$$

Con esta ganancia, el amplificador operacional empieza a perder ganancia con la frecuencia, pero esta pérdida se compensa con el aumento de la del transistor, lo que asegura la relación ganancia - ancho de banda, del preamplificador. (Este preamplificador es el recomienda el fabricante del micrófono).

El ancho de banda del preamplificador se obtiene con la siguiente relación; según referencia 6). Cuando se usa la entrada inversora :

$$\text{Ancho de banda del amplificador} = \frac{\text{Ancho de banda con ganancia 1}}{\text{Ganancia del amplificador} + 1}$$

Por lo que el ancho de banda del preamplificador será :

$$\frac{1 \text{ Mhz}}{132} = 7575 \text{ Hz}$$

Esto se puede comprobar en la Fig. 3.6

Esta respuesta plana hasta 7575 Hz, aparentemente es insuficiente, pero el micrófono tiene una respuesta con un pico positivo de aproximadamente de 5 dB a 7000 Hz (Ver Fig. 3 en conclusiones). Este pico se compensa con la pérdida del amplificador.

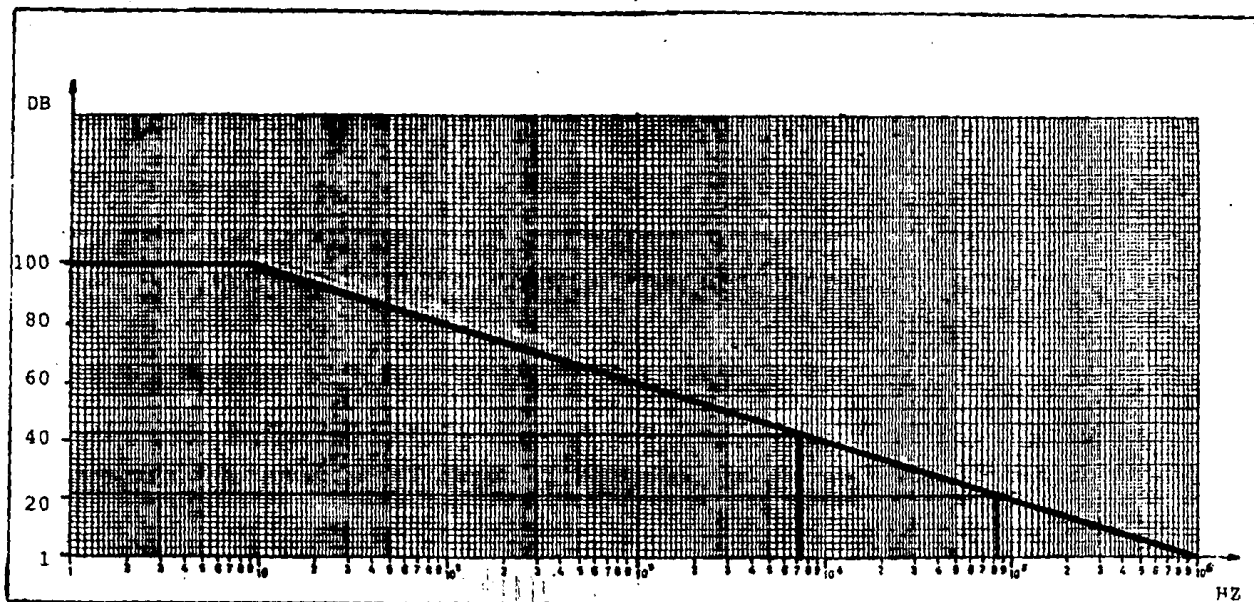


FIGURA 3.6 CURVA DE RESPUESTA DEL LM 324 EN LAZO ABIERTO.

3.2.3 Amplificador.

El analizador de espectro puede analizar una señal proveniente de su micrófono integrado, a través de su entrada exterior, en la cual se puede conectar un micrófono o generador de audio, o cualquier señal eléctrica que nos interese analizar. Cuando se utiliza la entrada exterior, la señal del micrófono interconstruido se desconecta automáticamente.

Ya sea que se utilice el micrófono integrado o la entrada exterior, la señal que se va a analizar pasa por un amplificador (Fig. 3.7), antes de entrar a los filtros pasabanda.

El nivel de la señal que entra al amplificador se ajusta por medio de un potenciómetro.

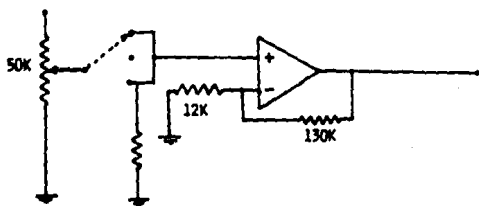


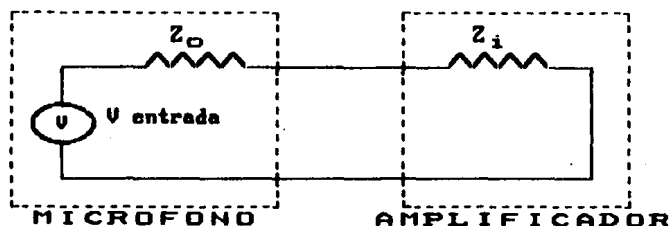
Fig. 3.7 Diagrama del amplificador utilizado.

La ganancia de este amplificador está dada por la relación :

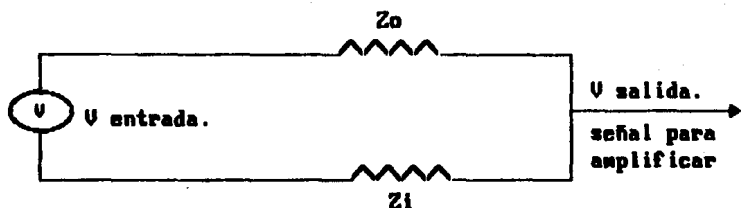
$$V_1 = R_1 i_1 \quad V_2 = (R_1 + R_2) i_2 \quad A = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

que para este caso será $A = 11.83$ o en decibelios $= 20 \log 11.83 = 21.46 \text{ dB}$. Con esta ganancia el amplificador tiene un ancho de banda adecuado, la fase no varía. La entrada al operacional se hace por la entrada no inversora, para que presente una alta impedancia de entrada. Esto es importante,

porque así se puede conectar cualquier micrófono exterior sin temor de que ocurran desadaptaciones entre el micrófono y el amplificador. Si conectamos un micrófono de mayor impedancia que la que presenta el amplificador, las pérdidas son muy grandes; esto se entiende mejor observando la Fig. 3.8



O TAMBIEN:



donde $V \text{ salida} = V \text{ entrada} \frac{Z_i}{(Z_i + Z_o)}$

Fig. 3.8 Diagrama de un micrófono con su impedancia interna Z_o y la impedancia de entrada de un amplificador Z_i (Ref. 2)

Por lo tanto, la condición para tener un valor mayor a la entrada del amplificador, es que la impedancia de éste sea mucho mayor que la del micrófono. No obstante, esto no asegura siempre una salida de óptima calidad ya que algunos micrófonos contienen

Circuitos eléctricos diseñados para corregir resonancias y tienen que conectarse a un amplificador cuya impedancia queda preestablecida en el instructivo del micrófono.

El ancho de banda o respuesta del amplificador está dado por la relación siguiente; la cual se utiliza cuando la entrada que se usa del amplificador es la no inversora (Ref. 6)

$$\text{Ancho de banda} = \frac{\text{Ancho de banda con ganancia unitaria}}{\text{Ganancia del amplificador}}$$

Por lo que la respuesta del amplificador será :

$$\frac{1 \text{ Mhz}}{11.8} = 84745.8 \text{ Hz}$$

Esta respuesta también puede ser comprobada con la Fig. 3.6

Esta respuesta es más que suficiente para el rango de audio que va a analizar el prototipo.

Para ajustar el nivel de entrada y evitar saturar el analizador, antes del amplificador (Ver Fig. 3.28), existe un potenciómetro y un resistor a tierra, para controlar la intensidad de la señal.

El valor de impedancia de esta red se determina con el siguiente criterio. Al construir este analizador tenía en mente entre otros objetivos; poder analizar la señal de mi grabadora, ecualizador y preamplificador. Estos, requieren una carga de salida de aproximadamente 45000Ω . La mayoría de los equipos de audio (excepto el amplificador), requieren entre 10000 y 50000Ω . Por lo que elegí el potenciómetro de 50000Ω y el resistor lo calculé de la siguiente forma :

Dado que el resistor a tierra está en paralelo con el

Potenciómetro :

$$R_{\text{total}} = 45\ 000 = \left[\frac{1}{\frac{1}{50000} + \frac{1}{x}} \right]^{-1}$$

de donde x = resistor en paralelo = 450 000 ohmios.

valor comercial más cercano $R = 470\ 000$ ohmios.

3.2.4 Filtros.

Para la detección de las frecuencias que me interesa analizar, es necesario utilizar filtros que sólo dejen pasar la banda de frecuencia deseada. Como el análisis que me interesa es por octavas, necesito filtros pasabanda que sólo dejen pasar las frecuencias de la octava en cuestión.

La Fig. 3.9a Muestra la forma en la que un filtro pasabanda ideal actuaría :

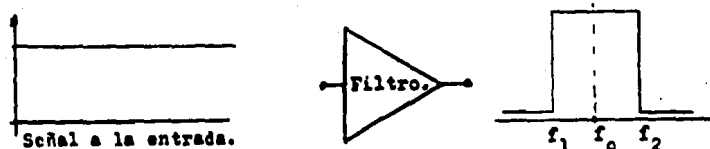


Fig. 3.9a Respuesta de un filtro ideal

La pendiente en un filtro pasabanda real no será tan abrupta y se parecerá más a la de la Fig. 3.9b.

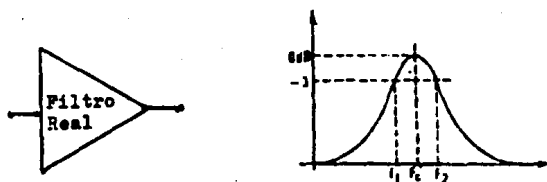


Fig. 3.9b Respuesta de un filtro real.

Para filtrar una señal, es decir para separar y seleccionar una señal eléctrica en función de su frecuencia, se pueden usar varios tipos de filtros. Estos diferentes tipos de filtros están clasificados según su tecnología. Normalmente los filtros se clasifican en dos clases : filtros pasivos y filtros activos.

Los filtros pasivos están formados por resonadores electromecánicos o piezoeléctricos, o por un circuito resonante eléctrico (inductancia - capacitor). En cualquier caso, el circuito de los filtros pasivos, es excitado mediante una fuente de energía exterior y si después se deja en reposo, dicho circuito pierde lentamente la energía que ha almacenado; oscilando en su frecuencia de resonancia. El circuito resonante disipa pasivamente la energía recibida.

Por el contrario, cuando se excita un circuito resonante constituido por resistores y capacitores asociados a elementos activos, como pueden ser los transistores o los amplificadores operacionales. Estos elementos activos suministran al circuito una energía más o menos considerable; la cual se opone al

decrecimiento de la oscilación original. Los filtros de este tipo son filtros activos.

Las ventajas de estos últimos filtros sobre los pasivos son :

- Su reducido volumen. Como en muchos casos se prescinde de las inductancias y éstas son voluminosas, sobretudo a bajas frecuencias. Además los filtros activos pueden ser diseñados para tener altos niveles de impedancia, reduciendo con ésto también el volumen de los capacitores.

- El peso se reduce, por todo lo anteriormente expuesto.

- Son más económicos. , Filtros que contienen inductancias son más costosos porque para fabricar bobinas de buena calidad, se requiere de núcleos magnéticos eficientes y en ocasiones, embobinadoras especiales.

- En frecuencias bajas, se obtienen mejores características que con filtros pasivos (Fig. 3.10a)

- La facilidad de los ajustes. En los filtros activos convencionales y de uso más común, se han desarrollado técnicas para ajustarlos fácilmente.

Por otra parte, algunas de las desventajas de los filtros activos, son :

- Cuanto mayor sea su selectividad (Q), mayor es su inestabilidad.

- Como la ganancia de los amplificadores operacionales decae conforme la frecuencia aumenta, la utilización de éstos, será limitada por ésta.

Las Figs. 3.10a y 3.10b, dan una idea del campo de aplicación de los diferentes filtros, en función de la frecuencia y la Q deseada.

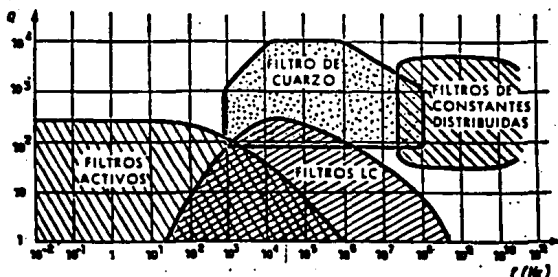


Fig.3.10a Campo de aplicación de los principales filtros. En ordenadas, figura el coeficiente de sobretensión de los circuitos resonantes que se utilizan

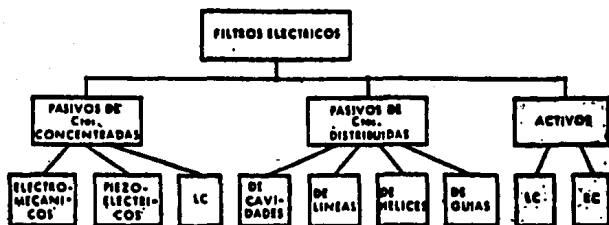


Fig. 3.10b Clasificación de los filtros según su tecnología

Como se puede deducir de todo lo anterior, para el aparato que pienso construir, la mejor elección es el empleo de los filtros activos.

Para la elección del filtro (ya sabiendo que va a ser activo y pasabanda) las consideraciones que hay que tener en cuenta son :

por una parte de carácter económico, el filtro debe ser fácil de ajustar y de una puesta a punto sencilla. Hay que tener en cuenta que cuanto mayor sea la selectividad de un filtro, mayor será la sensibilidad a una variación de un elemento del filtro. De acuerdo a los libros que consulté (Ver Bibliografía), tres tipos de filtros pasabanda me pueden servir; éstos se muestran en la Fig. 3.11

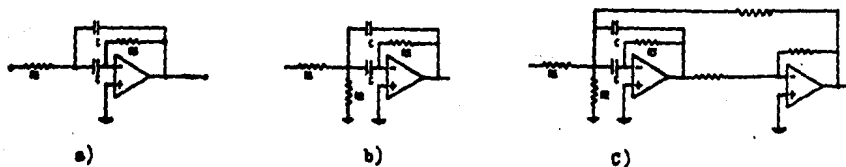


Fig. 3.11 Diagrama de filtros pasabanda que pueden usarse en el prototipo

Los filtros de las figuras 3.11 a y b, son practicamente iguales, pero al dividir la resistencia de entrada en dos (filtro b), tenemos un divisor de tensión que permite ajustar mejor la ganancia del filtro, por lo que el 3.11b es más recomendable que el 3.11a.

El filtro 3.11 b se utiliza para Q menores de 10 y el filtro 3.11c para mayores a 10; entonces me resta saber que Q debo elegir para mi filtro.

Según el autor del libro (18) de la Bibliografía, cuando se analiza por octavas, la Q se determina mediante la siguiente relación y la Fig. 3.12

$$f_1 = 0.5^{0.5} f_c \quad f_2 = 2^{0.5} f_c \quad f_2 - f_1 = \text{ancho de banda}$$

La Q está dada por $f_c / \text{ancho de banda}$

O sea que la Q será para el análisis por octavas como sigue :

$$\text{ancho de banda} = (2 - 0.5)^{0.5} f_c$$

$$Q = f_c / (2 - 0.5)^{0.5} f_c = 1 / (2 - 0.5)^{0.5} = 2^{0.5} = 1.4142$$

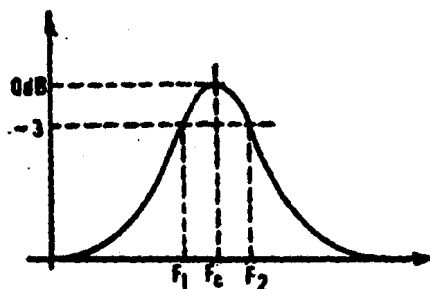


Fig. 3.12 Se muestra la respuesta de un filtro real y las frecuencias de corte a -3dB.

No importa cuales vayan a ser las frecuencias centrales de resonancia de mis filtros (f_c), la Q en el análisis por octavas es de 1.4142; por lo que la configuración que tendrán los filtros será la de la Fig. 3.11b. Este tipo de filtro tiene la ventaja de ser menos sensible a las variaciones de los componentes pasivos, pues contiene menor cantidad de ellos, es más económico y requiere poco espacio; pues además de que usa menos componentes pasivos, usa sólo un amplificador operacional.

Para calcular el valor de los componentes del filtro, es necesario fijar algunos parámetros como son la frecuencia central, la ganancia que van a tener los filtros, la Q y alguna de las resistencias o capacitores.

Las frecuencias centrales cuando se analiza por octavas, según la organización internacional de estándares (ISO), son : 31.25, 62.5, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 y 16000 c/Seg. Aunque el valor de la Q según los cálculos, debe ser de 1.4142, esta Q es muy baja, es decir, el filtro es poco selectivo y si se desea ajustar igualadores gráficos (ecualizadores), la diferenciación que pueden tener los filtros entre una octava y otra, es pobre con una Q de 1.4142.

En el análisis que se hace en el libro (4) de la Bibliografía, sobre los igualadores gráficos que utilizan filtros activos con la misma configuración que el filtro que voy a utilizar, seleccionan valores de la Q que varían entre 3.3.5 y 4 para igualadores de bandas por octavas, es decir como el analizador que pienso construir. Como uno de los objetivos de construir este aparato es el de analizar equipo electrónico de audio al igual que los igualadores gráficos y ya que deseo que el dispositivo

tenga la suficiente resolución para diferenciar entre octava y octava; la Q será de 3.75. Esta Q , según diversos autores, proporciona una selectividad adecuada, precisión en la medición y pone de manifiesto de una manera limpia; las frecuencias presentes en la señal que se analiza.

Para la elección de la ganancia del filtro, se recomienda que ésta no sea muy grande para evitar saturar el operacional y además hay que recordar que a mayor ganancia, menor ancho de banda. Se recomienda hacer a la ganancia varias veces menor que Q^2 , es decir :

$$Q = (3.75)^2 = 14.06 \gg A_0 = \text{Ganancia del filtro}$$

Algunos autores usan 12dB de ganancia, otros 6dB; si yo tomo 9dB :

$$9 = 20 \log \frac{e_s}{e_e}$$

Donde e_s , es igual a la tensión a la salida del filtro

y e_e , es igual a la tensión de entrada al filtro

$$\frac{e_s}{e_e} = 10^{.45} = 2.82 \text{ de ganancia; donde } Q / 2.82 = 5$$

lo cual cumple perfectamente con la condición de que la ganancia sea varias veces menor que Q^2 .

El filtro a calcular es el de la figura 3.13. Este filtro se llama de retroalimentación múltiple de dos polos, porque el denominador de su función de transferencia tiene dos raíces.

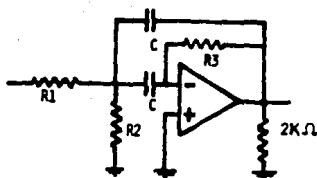


Fig. 3.13 Diagrama del filtro activo a emplear en el analizador de espectro

función de transferencia =

$$T(s) = \frac{sR_3 C}{s^2 R_1 R_2 C^2 + 2sR_1 C + (1 + R_1/R_2)}$$

Las ecuaciones de diseño para este tipo de filtro son :

$$(1).- R_1 = \frac{Q}{2 f_c A_o C \pi}$$

$$(2).- R_2 = \frac{Q}{(2Q - A_o) 2 f_c C \pi} = \frac{A_o R_1}{2Q - A_o}$$

$$(3).- R_3 = \frac{Q}{f_c C \pi}$$

$$(4).- A_o = \frac{R_3}{2R_1}$$

$$(5).- Q = f_c C R_3 \pi$$

$$(6).- f_c = \frac{1}{2\pi C \sqrt{\frac{R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_3}}}$$

$$(7).- \text{Ancho de banda} = \Delta B = f_2 - f_1 \quad Q = f_c / f_2 - f_1$$

$$\Delta B = 0.266 f_2 = 1.1424 f_c \quad f_1 = 0.8754 f_c$$

Además de fijar de antemano los parámetros Q , f_c , A_0 , para facilitar el diseño se elige el valor de los dos capacitores para que sean iguales y normalmente se fija el valor de éstos, porque hay menos valores estándar de capacitores que de resistores. Además los resistores son más baratos que los capacitores, ahorrando con esto espacio (al elegirlos de valor pequeño) y dinero. Como se puede ver en la ecuación (6), el valor de la frecuencia depende inversamente del valor de los capacitores, por lo que conforme aumente la frecuencia, disminuirá el valor de éstos.

Las tolerancias de los elementos pasivos será del cinco por ciento, para evitar que varíen considerablemente la Q , f_c y A_0 .

Como ya se vió cuales son las ecuaciones que se emplean para calcular los valores de los elementos pasivos, para ahorrar espacio sólo presentaré en la tabla 3.1 los valores correspondientes a cada filtro, estos valores ya serán los valores comerciales; es decir, si para la R_2 del primer filtro (31.25 c/Seg.) obtuve el valor de 14487 ohms, el valor que aparecerá en la tabla 3.1 será de 15000 ohmios, que es el valor comercial más cercano. Para comprobar si al utilizar estos valores comerciales no estoy cambiando mucho los parámetros dato del filtro, en la misma tabla 3.1 doy el valor de Q y A_0 calculado con estos valores comerciales.

TABLA 3.1

f1	f2	fc	C	R1	R2	R3	Ao	Q
27.37	35.7	31.25	0.047	130 K	15 K	750 K	2.88	3.7
54.7	71.4	62.5	0.047	68 K	7.5 K	390 K	2.86	3.8
109.5	142.75	125	0.047	36 K	3.9 K	180 K	2.77	3.9
219	285.5	250	0.047	18 K	1.8 K	100 K	2.77	3.9
438	571	500	0.047	8.2 K	910	47 K	2.86	3.7
876	1142	1000	0.01*	20 K	2.2 K*	100 K	2.5	3.14
1732	2284	2000	0.01	10 K	1.2 K	62 K	2.82	3.9
3504	4568	4000	0.0047	10 K	1.5 K	68 K*	3	4
7008	9136	8000	0.0022	12 K	1.2 K	68 K	2.83	3.41
14016	18272	16000	0.001	13 K	15 K*	75 K	2.88	3.76

* VER EL PUNTO SOBRE AJUSTES, YA QUE ESTOS VALORES SE CAMBIARON

A la salida de cada filtro hay un resistor de 2200 ohmios para estabilizar al amplificador operacional como lo recomienda el fabricante.

Los valores de los capacitores están dados en microfaradios.

La respuesta de todos los filtros se puede ver en la Fig. 3.14.

Las curvas de la Fig. 3.14, las obtuve inyectando una señal que variaba manualmente a la entrada del analizador y con la punta del osciloscopio, a la salida de cada filtro fui tomando nota de la tensión obtenida en diferentes frecuencias.

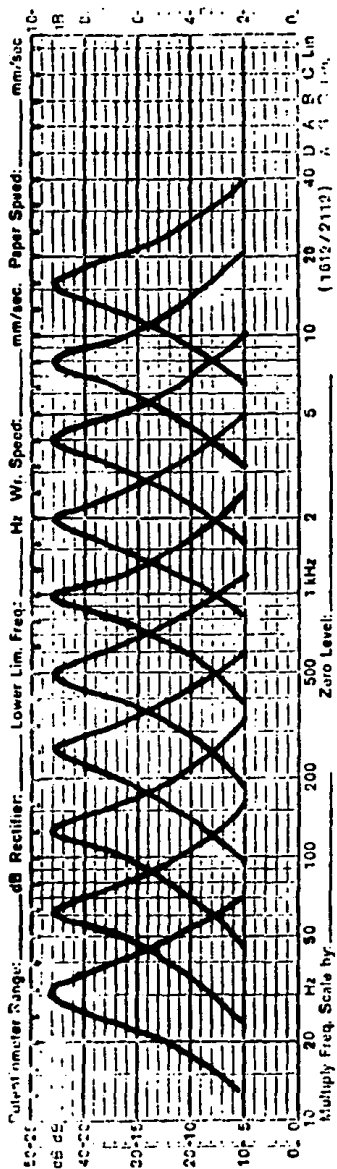


Fig. 3.14 RESPUESTA DE LOS FILTROS DEL ANALIZADOR DE ESPECTRO, CON UNA Q DE 3.75

3.2.5 Red de retardo y promedio.

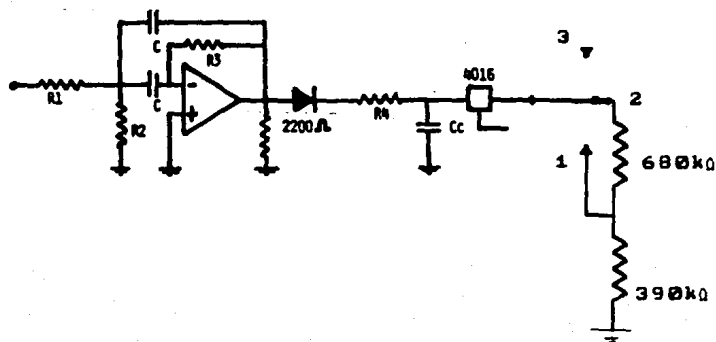
Cuando se analiza una señal, necesitamos que permanezca un cierto tiempo en la pantalla. En ocasiones tratamos de analizar señales que varían muy rápidamente con el tiempo y si no hacemos que esta señal permanezca en la pantalla, sería muy difícil analizarla.

Para lograr este retardo, utilizamos esta red RC de retardo, Fig. 3.15. Si colocáramos esta red directamente a la salida de cada filtro, estaríamos mandando las frecuencias altas a tierra, ya que una red de este tipo actúa como un filtro pasabajos, con la tensión alterna. Es por esto que antes de la red de retardo, rectificamos la señal con un diodo.

Como en ocasiones es necesario detener durante mucho tiempo la señal en pantalla y en otras es necesario ver los cambios rápidos que la señal tiene. Mediante un interruptor de tres posiciones, se puede seleccionar entre 3 diferentes tiempos de retardo : Rápido; en esta posición la señal en pantalla varía rápidamente. Lento; en ésta, la señal permanece en la pantalla durante varios segundos.

Detenido; en esta posición la señal permanecerá en pantalla por un tiempo indefinido (hasta que la fuga de los capacitores los descarga).

Esta red se muestra en la figura 3.15



- 1.-Rápido
- 2.-Lento
- 3.-Detenido

Fig. 3.15 Filtro activo con la red de retardo y promedio

Los valores de R_4 y C_c , se calculan con $f_c = \frac{1}{(R_4 C_c)}$ ó $T = R_4 C_c$

La red formada por R_f y C_c promedia con respecto al pico, toda la señal que pasa por el diodo. Esto hace más selectivo al filtro ya que sólo las señales mayores a 0.6 V (por la tensión de polarización del diodo) y que tenga un cierto nivel con respecto al pico de la señal, será detectado por el analizador. Esto se entiende mejor con la figura 3.16

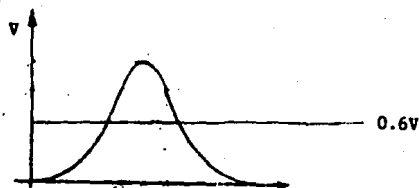


Fig. 3.16 La señal se detecta a partir de un cierto valor de tensión de polarización del diodo

Después de la red formada por R_f y C_c (como se muestra en la figura 3.15), un interruptor bilateral (CD 4016, Fig. 3.18a) se cierra y conduce cuando la entrada E del interruptor recibe un impulso (la manera en que se genera este impulso, se verá en la etapa de detección, Fig. 3.19). Cuando este interruptor conduce la señal almacenada en el capacitor, se descarga a través de los resistores de 680000 y 390000.

Cuando el interruptor está en la posición dos, la señal se descarga a través de los dos resistores, haciendo con esto que la constante de tiempo del capacitor (tiempo de descarga) sea mayor; en la posición uno, la señal se descarga sólo a través del resistor de 390K, por lo que será más rápido. En la tercera posición, se desconecta la descarga a tierra.

En esta última posición, la fuga del capacitor determinará el tiempo que dura la señal en la pantalla.

En paralelo a la salida del interruptor bilateral (4016) Fig. 3.18a, está la entrada al circuito detector. Como este circuito presenta una impedancia mucho mayor que la red formada por los

resistores de 680 000 y 390 000; esto no afecta el tiempo de descarga.

Cálculo de los resistores de descarga de los capacitores Cc.

$$V = 0 = R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q \quad \frac{dq}{q} = - \frac{dt}{RC}$$

integrando obtenemos :

$$\ln q = - \frac{t}{RC} + K \quad q = e^{- (t/RC)} e^K$$

para $t = 0$

$$q_0 = e^K \quad \text{por lo que} \quad \frac{q}{q_0} = e^{- (t/RC)}$$

Para calcular como se van a ir apagando los leds de la pantalla, lo especifico en decibeles por segundo. Es decir, después de que cesa la señal que ha iluminado la pantalla, a cuántos decibeles cae la señal en la pantalla después de un segundo. Para obtener la ecuación que me permita calcular los valores de R para la caída en db :

$$db = 20 \log \frac{q}{q_0} = 20 \log e^{- (t/RC)} = \frac{20}{2.3} \ln e^{- (t/RC)} = -8.7 \frac{t}{RC}$$

Los capacitores no se van a descargar continuamente sólo la décima parte del tiempo, ya que la lectura de los filtros se hace mediante un barrido, con el circuito de multiplexaje (formado por el reloj y los interruptores 4016).

Por lo anterior, la ecuación se convierte en :

$$\text{caída en db} = -87 / RC \text{ el capacitor lo elegi igual a } 10^{-5} \text{ F.}$$

Para la velocidad rápida deseo :

$$22 \text{ db/Seg.} = -87 \times 10^5 / R \quad R = 395 \text{ 000 ohmios.}$$

valor comercial R = 390 000 ohmios.

Para la velocidad lenta deseo

$$- 8 \text{ db/Seg.} = -87 \times 10^5 / R \quad R = 1 \text{ 087 500 ohmios.}$$

pero R = R1 + R2 donde R1 = 390 000 ohmios.

por lo que R2 = 1 087 500 - 390 000 = 697 500 Ω

valor comercial R2 = 680 000 ohmios.

3.2.6 Circuito de detección de nivel y pantalla.

Para detectar los diferentes niveles de la tensión que entrega cada filtro y, mostrar estos diferentes niveles en una pantalla, he seleccionado el circuito integrado monolítico LM 3915 N, que se muestra en la Fig. 3.17

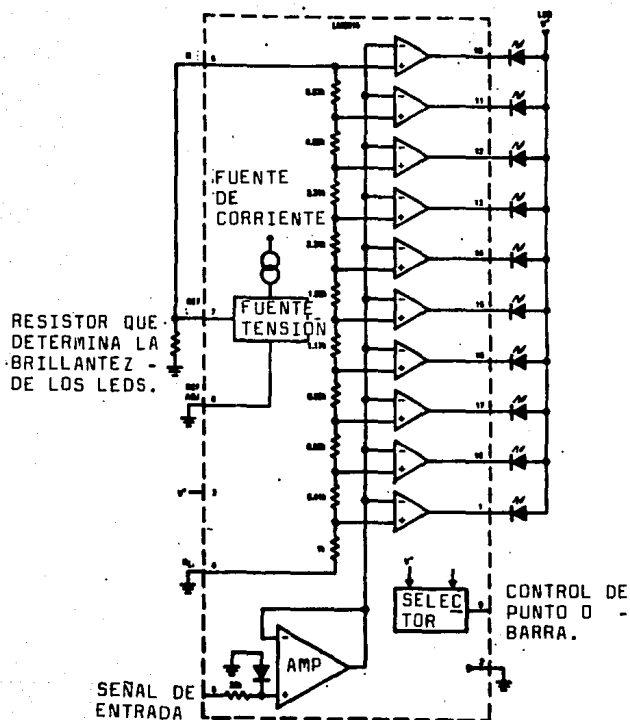


Fig. 3.17 Diagrama a bloques, del LM 3915

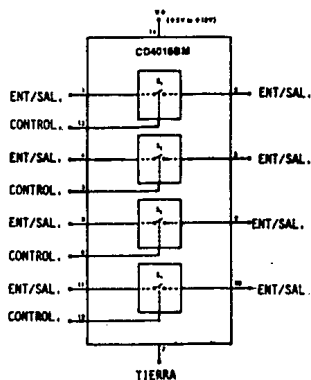
Algunas ventajas y características de este circuito son :

- Maneja diez diodos emisores de luz
- Presenta los diferentes niveles de tensión en forma

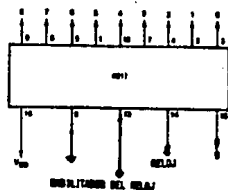
logaritmica (3dB c/nivel)

- Requiere sólo de tensión positiva y esta tensión puede ser desde 3V, hasta 25V.
- El circuito contiene una referencia de tensión ajustable (que en este caso se utiliza para dar la tensión de polarización del micrófono)
- Alta impedancia de entrada. Lo que le permite manejar señales desde 0V., hasta 1.5V, por encima de la tensión de alimentación.
- No requiere de protección contra señales de entrada que varien entre +- 35 V.
- Exactitud mejor a 1 dB.
- La corriente que entrega a los diodos emisores de luz está regulada y es programable.
- Puede trabajar en forma de barra o encender sólo un diodo (punto-Dot)

Este circuito posee un inconveniente, que es el siguiente : puede mostrar las variaciones de sólo un filtro a la vez. Para resolver este problema y poder mostrar en la pantalla la energía que está presente en cada filtro a un mismo tiempo; se hace uso de un circuito integrado CD 4017, Fig. 3.18b, que es un contador decimal CMOS y de tres circuitos integrados CD 4016, Fig. 3.18a, que contienen cada uno, cuatro interruptores bilaterales; el CD 4016 también es CMOS.



a



CD4017

b

Figs. 3.18 a y b Diagramas a bloques de los circuitos CD 4016 y CD 4017

A la salida de cada filtro y, después de rectificarse y pasar por la Rf y Cc, Fig. 3.15, se encuentra uno de los interruptores bilaterales (1/4 CD 4016). Como ya se explicó en la sección sobre la red de retardo; cuando la compuerta E del interruptor bilateral recibe un pulso, el interruptor se " cierra " y conduce; permitiendo con ésto, que la información contenida en ese filtro en particular se transmita al circuito detector LM 3915, Fig. 3.17.

Como sólo existen diez filtros y dispongo de 12 interruptores bilaterales, se utilizan los dos restantes para formar un generador de pulsos o reloj (clock); como se indica en la Fig. 3.19.

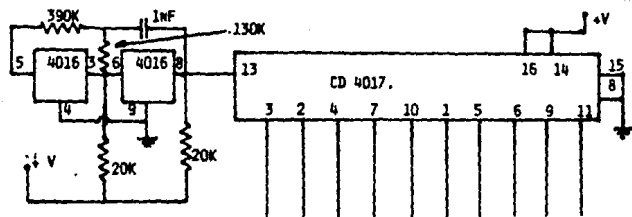


Fig. 3.19 Diagrama del generador de pulsos.

El tiempo de pulso será : $T = 2.2 (R_1 + R_2) C$

La frecuencia del reloj será $1/T$, para que el " barrido " del 4017 sea adecuado para " leer " los filtros; se recomienda sea de aproximadamente tres mil ciclos por segundo, es decir, un periodo de 0.33 ms. El valor del capacitor se elige de 0.001 microfaradios, es decir 1000 picofaradios.

$$f = 3000 \text{ c/Seg.} \quad T = 0.33 \text{ ms} \quad R_1 = 6.5 R_2 \quad (\text{Ref. 21})$$

$$0.00033 = 2.2 (7.5 R_1) 0.001 10^{-6} \quad \text{de donde resulta que}$$

$$R_1 = 20K \quad R_2 = 130K \quad R_3 = 390K$$

Con estos valores, el reloj va a generar pulsos con una frecuencia de aproximadamente 3 000 ciclos por segundo; digo aproximadamente, porque esta frecuencia no es critica (Puede ser mayor o menor). Esta frecuencia va a ser con la que el CD 4017 va a hacer el barrido de la pantalla (Fig. 3.20) y va a ir disparando los interruptores CD 4016. La pantalla va a estar formada como ya se dijo por diodos emisores de luz.

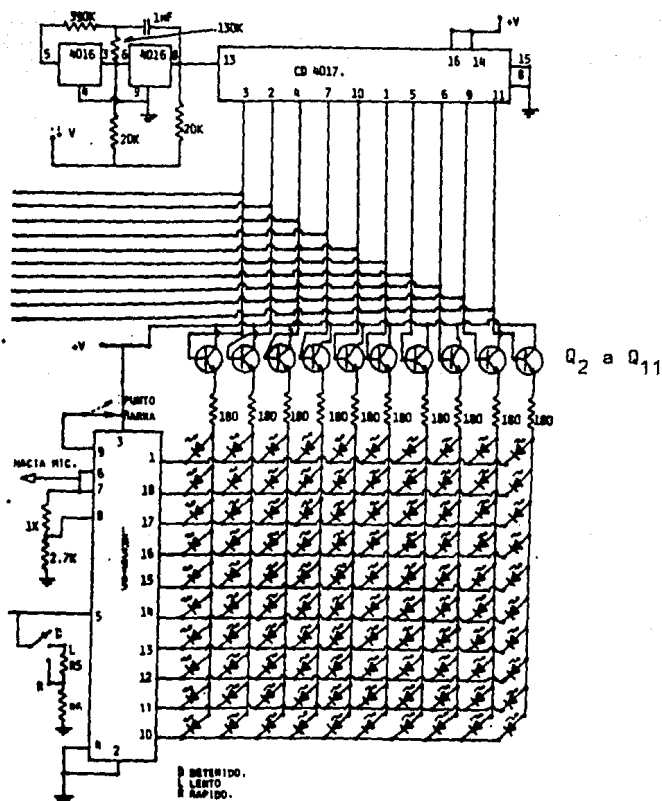


Fig. 3.20 Diagrama del circuito detector y la pantalla de diodos emisores de luz

El 4017 genera un barrido que va disparando uno a uno y sólo uno a la vez, los interruptores bilaterales. Al mismo tiempo, energiza una de las columnas de la pantalla de diodos. Antes de pasar por los diodos, la señal del CD 4017 se amplifica por medio de los transistores Q₂ a Q₁₁, las resistencias de ciento ochenta

ohmios sirven para evitar un exceso de disipación del circuito. Las diez salidas del contador decimal normalmente están en cero y suben en el periodo de tiempo decimal apropiado. Estos cambios suceden normalmente con el flanco de subida del pulso del reloj. Como el tiempo de ascenso del pulso del reloj es lento, es necesario enganchar (amarrar) al 4017 en el flanco de bajada del pulso. Para lograr ésto se conecta la entrada del reloj para 14, a un/uno lógico (+V) y la entrada 13, que es la habilitación de reloj (clock enable) al tren de pulsos proveniente del reloj (Ref. 21).

Como la pastilla del micrófono necesita de una tensión de polarización para poder funcionar, ésta se obtiene del LM 3915 que se puede programar para dar una tensión deseada, de la manera en la que se muestra en la Fig. 3.21.

Siendo V_r = Tensión de referencia.

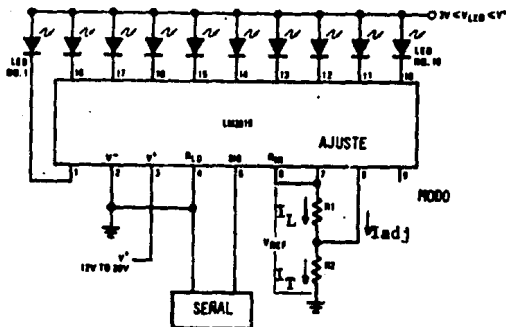
La V_r será igual a $= 1.25V (1 + R_2/R_1) + R_2 (I_{adj})$

$I = I_{led}$ $I = 1.25 \text{ mA}$ para que la corriente de los leds sea 12.5 mA
 $L \quad 10 \quad L$

Entre las terminales 7 y 8, existen nominalmente $1.25V$, por la resistencia R circula 1.25 mA y el voltaje es $1.25V$, por lo que $R_1 = 1000 \text{ ohmios}$.

I_{adj} , por sugerencia del manual debe ser $80 \mu A$. La V_{ref} va a servir para alimentación del micrófono, por lo que la $V_{ref} = 5 = 1.25 (1 + R_2/1000) + R_2 80 \mu A$.

La corriente total I_T va a circular por R_2 , esta I_T será igual a: $1.25 \text{ mA} + 80 \mu A = 1.33 \text{ mA}$. La tensión a través de R_2 es igual a $5 - 1.25 = 3.75$ y la corriente es de 1.33 mA , por lo que R_2 será igual a $2.81K$, el valor comercial más cercano es $2.7 K$.



V_r = Tensión de referencia.

La V_r será igual a $= 1.25 V (1 + R_2/R_1) + R_2 (I_{adj})$

Fig. 3.21 La forma de programar la tensión de referencia en el LM 3915

3.2.7 Generador de ruido rosa.

Para comprender la utilidad del ruido rosa y con ello la razón de la construcción del generador, primero es necesario definir en qué consisten el ruido blanco y el ruido rosa.

RUIDO BLANCO : Ruido de espectro continuo e igual densidad de energía por unidad de frecuencia.

RUIDO ROSA : Banda de sonido que mantiene constante la energía por octava.

El ruido blanco proporciona una respuesta plana cuando se analiza con un analizador de espectro de banda constante y se grafica linealmente, Fig. 3.22.

El ruido rosa proporciona respuesta plana con un analizador de espectro de filtros de ancho de banda proporcional a la

frecuencia central, como es el caso de los analizadores por octavas, Fig. 3.23. El analizador construido tiene un ancho de banda de aproximadamente un 26% de la frecuencia central. Este porcentaje se obtiene con $(1/Q) \times 100$; donde Q es igual a la frecuencia central del filtro, entre el ancho de banda del mismo. Si usamos un analizador de este tipo y además se grafica logarítmicamente, la respuesta del ruido rosa será plana, Fig. 3.23. El ruido rosa es ruido blanco con una atenuación de 3 dB por octava, Fig. 3.22. Esta atenuación es necesaria para obtener la lectura constante de energía en cada filtro de octavas en el cual el ancho de banda se vuelve del doble cada vez que aumentamos la octava, Fig. 3.23.

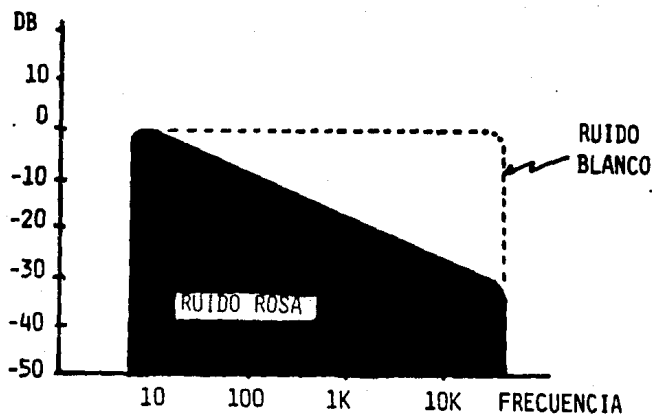


Fig. 3.22 Comparación del ruido blanco contra el rosa, graficado linealmente

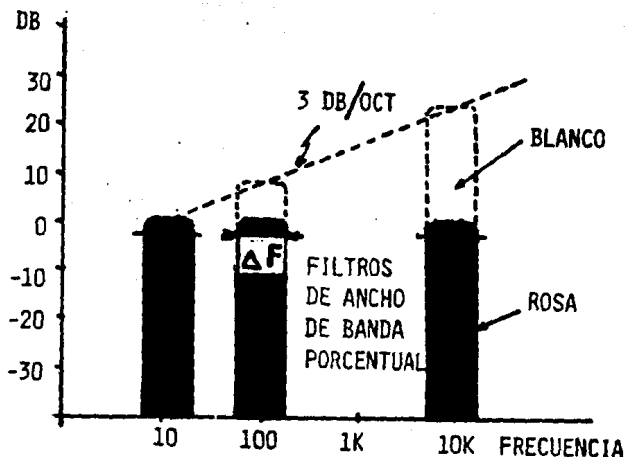


Fig. 3.23 Ruido blanco contra ruido rosa, como se verían en un analizador de espectro por octavas

La razón de porqué o para qué deseo el ruido rosa, se verá más claramente en el capítulo 4; en las aplicaciones del analizador de espectro de audio.

Para generar el ruido rosa, decidí elegir el circuito recomendado en el manual de National Semiconductor (Ref. 4). Este circuito además de ser sencillo, económico y fácil de construir, lo he visto en aplicaciones prácticas: lo cual indica que es confiable ya que empresas de reconocido prestigio lo utilizan como su referencia de ruido rosa.

Para generar este ruido, se utiliza un circuito integrado MM 5837

Fig. 3.25, que es una fuente de ruido digital, que produce ruido blanco, con ancho de banda amplio. Al contrario de generadores de ruido contruidos con semiconductores a base de unión, el MM 5837 produce ruido de calidad muy uniforme y amplitud de salida.

Como a la salida del MM 5837 tenemos ruido blanco y éste se caracteriza por un aumento de más tres decibeles (+ 3 db), en amplitud por cada cambio en frecuencia de octava (Cada vez que se duplica la frecuencia), es necesario conectar un filtro de menos tres decibeles por octava (- 3 db/oct) a la salida del generador de ruido blanco; Figs. 3.24 y 3.26.

Como la reactancia capacitiva varía en una proporción de menos seis decibeles por octava (- 6 db/oct), para lograr una atenuación de tres decibeles, se conectan diferentes etapas en cascada, de redes de compensación de retardo. Esto se realiza, de manera que los ceros de una etapa cancelen parcialmente los polos de la siguiente etapa.

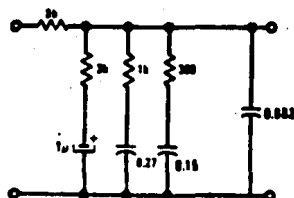


Fig. 3.24 Filtro de - 3dB / octava

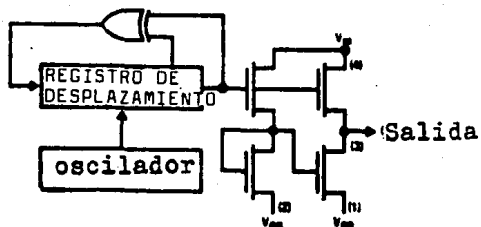


Fig. 3.25 Diagrama a bloques del circuito MM 5837

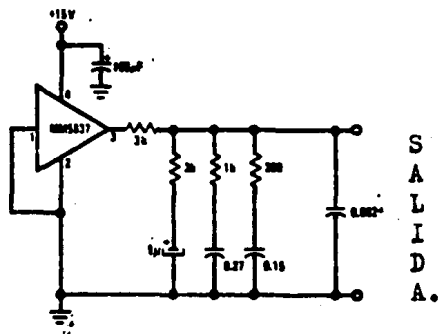


Fig. 3.26 Diagrama del generador de ruido rosa construido

3.2.8 Fuente de alimentación.

Para la fuente de alimentación, se puede decir que no existe ningún problema ya que todos los circuitos que se utilizan para este analizador trabajan bien en un rango de tensión bastante amplio. Como prueba de ello, lo siguiente :

Circuito	Rango de tensión en el que puede trabajar
LM 324	de 3 a 30 voltios
LM 3915	de 3 a 25 voltios
CD 4016	de 3 a 15 voltios
CD 4017	de 3 a 15 voltios
MM 5837	de 10 a 15 voltios

Esta amplia gama en la tensión de alimentación, evita la necesidad de fuentes reguladas de tensión o corriente. Además el bajo consumo de corriente de estos circuitos (los amplificadores operacionales consumen muy poco, al igual que el LM 3915 y el 4016 y 17 son CMOS). Esta ventaja adicional permite que el circuito puede ser alimentado mediante baterías o mediante un pequeño eliminador de éstas. Para facilitar el movimiento, este analizador va a estar alimentado por ocho baterías de 1.5 voltios tipo AA, que ocupan poco espacio y son de peso reducido. En el caso en que se desee ahorrar la energía de las baterías se puede conectar en una entrada especial, un eliminador de baterías.

Este conector de entrada de alimentación desconectará automáticamente a las baterías. Como el número de baterías de 1.5 V es ocho, la tensión será de 12 V.

La fuente de alimentación que construí para ahorrar la energía de las baterías se muestra en la Fig. 3.27. Esta fuente es de 12V - 100 mA.

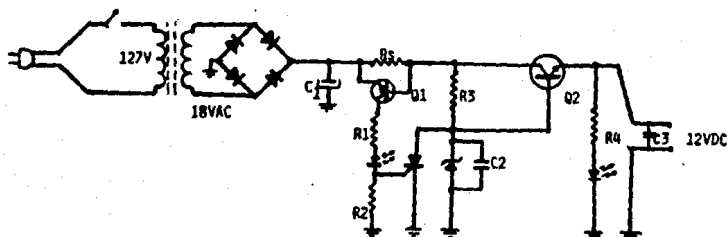


Fig. 3.27 Fuente de alimentación de 12 VDC

Para el analizador necesito un voltaje de entre 8 y 15 VDC, con una corriente de aproximadamente 80 mA. Para cumplir con esto, hice la fuente con las siguientes características :

D A T O S

A la salida 12V 100 mA, I_L de corto circuito 500 mA

Transformador de 127v (primario) 12 VRMS (secundario)

Voltaje pico 17V - caída de tensión diodos - caída de tensión devanado secundario $V_s = 15$ Vdc

Datos de Q HIT SS5000 $V_{ce} = 80$ V, $V_{cb} = 80$ V, $V_{eb} = 5$ v $I_c = 4$ A
2

$H_{fe} = 60$ típica $P_d = 40$ W. Para saber si Q soporta :
2

$P_d = (V_{max} - V_{min}) I_o = (15 - 12) 0.5 = 1.5$ W está bien, ya que el transistor

tiene 40 W de P_d . También podemos calcular con $P_d = V I_o$, $\frac{P_d}{I_o} = V$

para el caso de este transistor $V = 80$ V y yo voy a tener 12V.

Diodo Zener 12V 1 watt $P_{zmax} = 1$ $I_{zmax} = \frac{1}{12} = 83$ mA $I_{znom} = 21$ mA

Cálculo de R_3 , $I_o = 100$ mA $i_b = \frac{I_o}{H_{fe}} = \frac{100}{60} = 1.67$ mA

$I_3 =$ corriente que va a pasar por $R_3 = I_b + I_z = (1.67 + 25)$ mA

el voltaje en esta parte es 15 y la corriente es 26.67mA,

entonces $R_3 = 557$ valor comercial más cercano $560 = R_3$

CIRCUITO DE PROTECCION

Para que Q1 se active requiere de aproximadamente 0.6V entre la

base y el emisor, por lo que $R_s = \frac{0.6}{0.5} = 1.2$

Para calcular R_1 y R_2 deseo una corriente para el Led de 25 mA y

un voltaje para que se dispare la compuerta del SCR de 5V, entonces :

$$R2 = \frac{5V}{0.025} = 200 \text{ (Valor comercial más cercano 220)}$$

Para calcular R1

$$15V = V_{ce} (0.3 V) + 2V (\text{led}) + 5V (R2 \times 25 \text{ mA}) + R1 \times 25 \text{ mA}$$

$$15 - 7.3 = 7.7 = R1 \times 0.025 \quad R1 = \frac{7.7}{0.025} = 308 \Omega$$

el valor comercial más cercano 270 ohmios.

el SCR soporta un ampere de corriente por lo que está sobrado para este caso, ya que el máximo de corriente que va a pasar por él será de 29 mA.

Para la resistencia R4. Deseo que el Led se ilumine con 18 mA, por lo que :

$$R4 = \frac{12-2 \text{ (Led)}}{0.018} = 555 \text{ Valor comercial } 560 \Omega$$

$$C1 = 1000 \mu\text{F} \quad C2 = 0.1 \mu\text{F} \quad C3 = 1 \mu\text{F}$$

El valor de 1000 μF para C1 es lo que recomienda el Manual de audio para una aplicación de este tipo. (Ref. 4)

C2 sirve para evitar ruido que pudiera aparecer en el Zener y también tomé este valor de un manual de National (Linear). (Ref. 16)

C3 es para prevenir cualquier rizo que pudiera pasar.

C2 y C3 pueden no usarse, pero son para dar mayor seguridad en la calidad de señal al final de la fuente.

3.3 Ajustes del dispositivo.

Una de las ventajas de este analizador de espectro es que requiere de un mínimo de ajustes. La parte del circuito que podría presentarlos sería la sección de los filtros activos, es

recomendable montar en una tableta de prueba un amplificador operacional e ir variando los componentes pasivos para ir formando los diferentes filtros. Para que la variación en la Q deseada, la ganancia y la frecuencia central sea mínima, se recomienda que los componentes tengan una tolerancia máxima de cinco por ciento. Tolerancias mayores son difíciles de conseguir en el mercado y son más costosas.

Algunos valores de resistores que no fue posible conseguir, los ajusté raspando el cuerpo del resistor, hasta que la lectura en un ohmímetro fuera la deseada; después les di una pequeña capa de barniz. En cuanto a los capacitores tuve que hacer una selección con un puente de impedancias para elegir los más exactos.

Al ir armando los diferentes filtros, la variación en los valores esperados de Q , f_c y A_0 fue mínima en la mayoría de los casos.

En la tabla de los valores de componentes se ve que algunos tienen asterisco, esto quiere decir que estos valores fueron cambiados para ajustar el filtro correspondiente. En la frecuencia de 16 000 c/Seg. el resistor de 1.5 K (R_2) se cambió a 1.2 K para ajustar la ganancia. Por razones similares en la frecuencia de 4 000 c/Seg., se cambió el resistor R_3 de 68 K por 75 K. En el caso de la frecuencia de 1 000 c/Seg. es diferente, ni la Q , ni la ganancia quedaban bien; hubo necesidad de cambiar un valor de capacitor de 0.01 F a 0.033 F, $R_2 = 1\ 000$ ohmios y $R_3 = 75$ K. Para hacer las pruebas se emplea un generador de audio, que se conecta a la entrada de cada filtro y para determinar los niveles de tensión y verificar la Q y la f_c , se usó un osciloscopio de 2 canales. Una de las puntas se conecta a la entrada del filtro y la otra a la salida del mismo. En la f_c , el osciloscopio debe mostrar una medición máxima y con la

ganancia debida, verificando con esto la f_c y la A_o . Para verificar la Q , se aplica al filtro la f_2 y la f_1 (una sola a la vez, por supuesto) éstas deben estar 3dB por debajo del valor máximo (es decir a 0.7071 de la tensión de f_c). No es indispensable el uso del osciloscopio, se puede usar un voltímetro de CA, de exactitud confiable y que tenga la respuesta en frecuencia adecuada. El ajuste del filtro de 1000 c/Seg. se hizo en forma empírica.

Cuando todo el analizador de espectro estuvo totalmente terminado se volvió a verificar la f_c y la Q con un generador de funciones, pero esta vez, se uso la propia pantalla del dispositivo en lugar del osciloscopio y los resultados fueron los siguientes.

Todos los filtros tuvieron una Q aproximadamente de entre 3 y 4; algunos 3, otros (3.5,3.7,4,etc...) y las f_c fueron las siguientes :

f_c ideal	f_c real
31.25 c/Seg.	35 c/Seg.
62.5 c/Seg.	60 c/Seg.
125 c/Seg.	125 c/Seg.
250 c/Seg.	250 c/Seg.
500 c/Seg.	550 c/Seg.
1000 c/Seg.	1025 c/Seg.
2000 c/Seg.	2000 c/Seg.
4000 c/Seg.	4100 c/Seg.
8000 c/Seg.	8500 c/Seg.
16000 c/Seg.	16000 c/Seg.

con el LM 3915 es posible presentar en la pantalla el nivel de

tensión en forma de barra o de punto, esta posibilidad de cambio se hace desconectando la terminal 9 del circuito LM 3915 (respuesta en forma de un sólo punto) o conectándola a +V (respuesta en forma de barra) para lograr esto, utilice un interruptor de un polo y dos tiros, ver figuras 3.17 y 3.20.

3.4 Diagrama de todo el dispositivo.

En la Fig. 3.28 se muestra el diagrama del analizador completo, sin incluir la fuente ni el generador de ruido rosa.

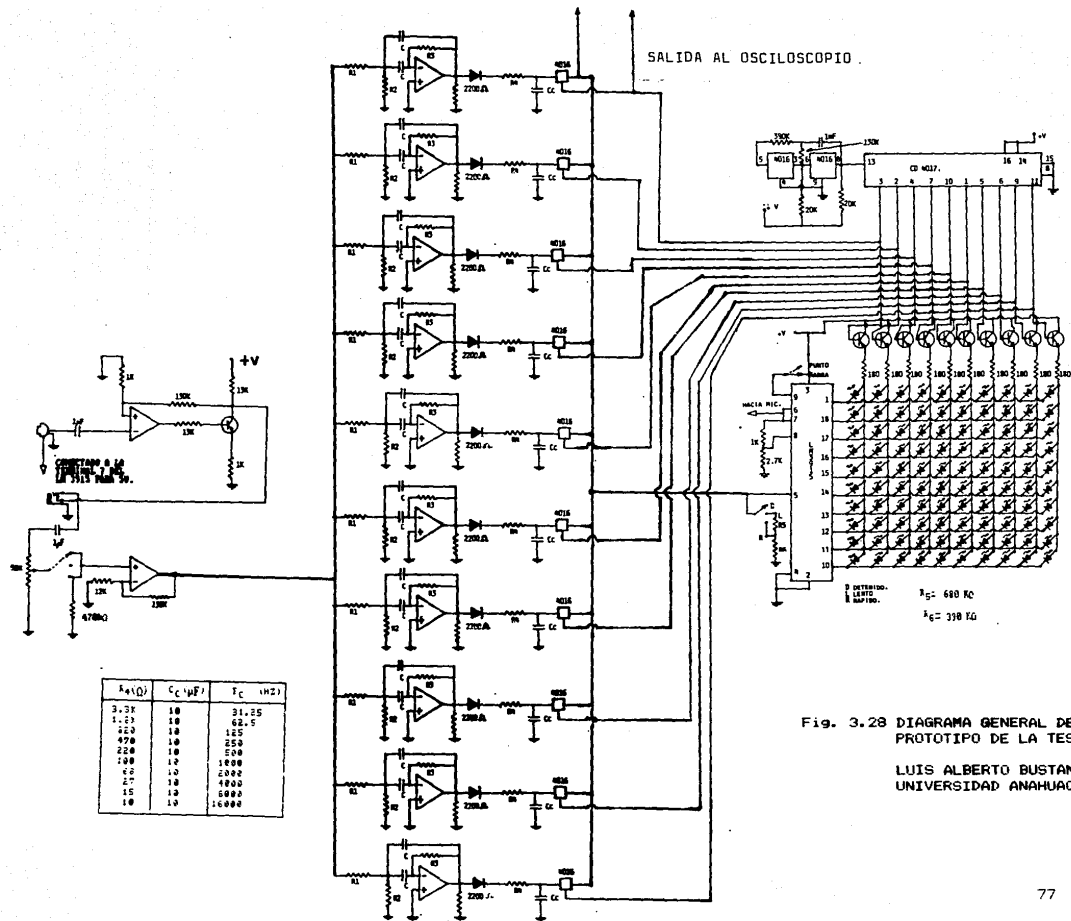


Fig. 3.28 DIAGRAMA GENERAL DEL ANALIZADOR DE ESPECTRO PROTOTIPO DE LA TESIS DE :

LUIS ALBERTO BUSTAMANTE VILLARREAL.
UNIVERSIDAD ANAHUAC, A.C.

3.5 Lista de componentes.

Para la construcción del analizador se utilizaron los siguientes componentes :

Resistores a 1/4 watio, 5% tolerancia.

Cantidad	Valor en ohmios
10	180
1	910 (820)
4	1000
3	1200
1	300 (270 raspada)
1	1,500
1	2,000 (1,800 raspada)
20	2,200
1	3,000 (2,700 raspada)
1	3,900
2	4,700
1	7,500
1	8,200
2	10,000
2	12,000
3	13,000
1	15,000
1	18,000
3	20,000
1	36,000 (33,000 raspada)
2	47,000
2	62,000
3	68,000

Cantidad	Valor en ohmios
6	75,000
2	100,000
5	130,000
2	200,000 (180,000 raspada)
5	390,000
1	620,000
2	750,000

CAPACITORES

Cantidad	Valor en microfaradios	Material
5	1.00	Tántalo
10	2.2	Tántalo
1	33.0	Electrolítico
1	100.0	Electrolítico
1	0.082	Mylar
1	0.25	Mylar
1	0.15	Mylar
10	0.047	Poliester
3	0.01	Poliester
1	0.033	Poliester
2	0.0047	Poliester
2	0.0022	Poliester
3	0.001	Poliester

10 diodos 1N 4148

10 arreglos de barra de diodos emisores de luz rojos

3 circuitos integrados (Amp. Op.) LM 324

- 3 circuitos integrados CD 4016
- 1 circuito integrado CD 4017
- 1 circuito integrado LM 3915
- 11 Transistores SS 0023
- 2 conectores miniatura
- 1 micrófono de capacitor Electret Radio Shack 270 - 092
- 1 MM 5837
- 3 tabletas de circuito impreso
- 3 metros de cable de diferentes colores
- 1 Conector tipo RCA, hembra
- 1 Potenciómetro de 50,000 ohmios
- 2 Interruptores de 2 polos, tres tiros
- 1 interruptor de 1 polo, dos tiros
- 2 porta baterías
- 8 baterías AA

Soldadura, perillas, tornillos, armazón, etc.

En resumen, todo lo necesario para terminar y poder armar el aparato.

3.6 Dibujo de placas de circuito impreso.

La placa número uno, Fig. 3.27, contiene los preamplificadores, los filtros, el circuito de retardo y la detección de nivel; la placa número 2 es la pantalla y la placa número 3 es el generador de ruido rosa.

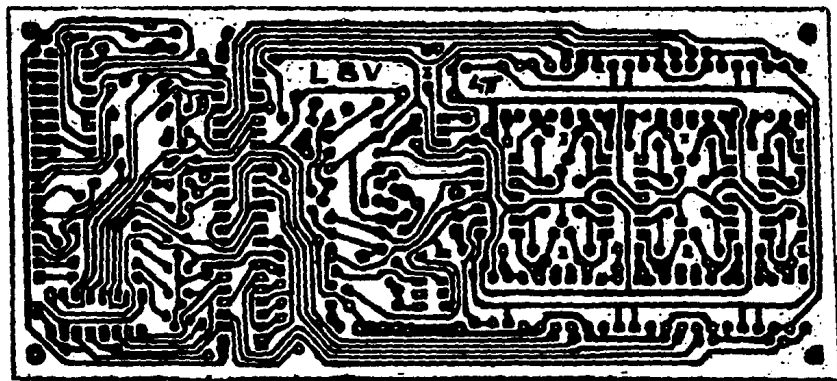


Fig. 3.29 Placa Núm. 1 de circuito impreso

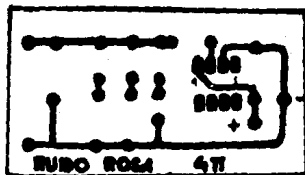
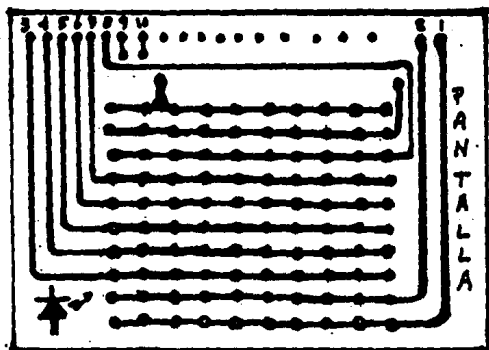


Fig. 3.30 Placa Núm. 3. Generador de ruido rosa

VISTA SUPERIOR



VISTA INFERIOR

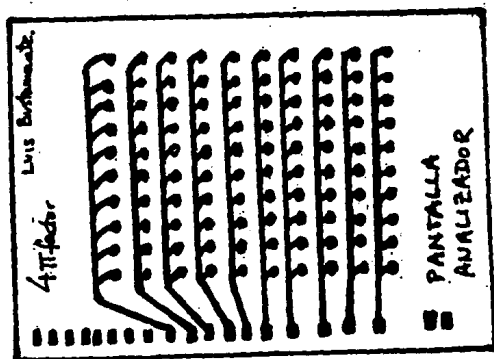


Fig. 3.31 Placa número dos, pantalla de diodos emisores de luz. Esta tableta de circuito impreso es de doble cara

3.7 Evaluación económica del dispositivo.

El costo del dispositivo, la fuente de alimentación y el generador de ruido rosa fue el siguiente. Estos precios están en dólares para evitar en lo posible que se vuelvan obsoletos con la inflación. Precio del dólar \$2,300.00 por un peso (Mayo 1988).

COMPONENTE (S)	PRECIO TOTAL
90 Resistores	1.96 USD
2 Capacitores electrolíticos	0.52 USD
1 Capacitor electrolítico	0.41 USD
14 Capacitores de tantaló	5.72 USD
25 Capacitores de poliéster	4.02 USD
14 Diodos	6.08 USD
10 Barras de emisores de luz (LEDS)	10.00 USD
3 LM 324	3.26 USD
1 SCR	0.40 USD
3 CD 4016	3.39 USD
1 CD 4017	1.08 USD
1 LM 3915	3.40 USD
11 Transistores	5.21 USD
1 Transistor SS5000	1.00 USD
3 Conectores hembra	0.76 USD
1 Micrófono	3.00 USD
1 MMS837	4.50 USD
Tableta de circ. impreso 1	10.00 USD
Tableta de circ. impreso 2	1.03 USD
Tableta de circ. impreso 3	0.38 USD
3 metros de cable	0.32 USD
1 conector RCA	0.35 USD

COMPONENTE (S)	PRECIO TOTAL
2 conectores hembra BNC	2.00 USD
1 potenciómetro de 50K	0.66 USD
3 interruptores de 1P1T	0.72 USD
1 interruptor de 1P2T	0.67 USD
2 interruptores de 2P3T	2.00 USD
2 portapilas	0.70 USD
8 baterías	3.00 USD
3 perillas	1.04 USD
1 caja para el analizador	2.99 USD
1 caja para el generador de ruido rosa	1.59 USD
1 transformador de 12V 500 mA	3.21 USD
1 diodo Zener 12V 1 W	0.89 USD
2 conectores macho	0.99 USD

T O T A L	87,15 USD

Este precio es por un sólo analizador de espectro, un generador de ruido rosa y una sola fuente de alimentación.

ANALIZADOR DE ESPECTRO	67.98 USD
GENERADOR RUIDO ROSA	10.45 USD
FUENTE DE ALIMENTACION	8.72 USD

Estos precios pueden variar un poco, dependiendo de la tienda.

Si se construyeran más de 100 analizadores, el precio de los componentes pasivos y de los circuitos integrados bajaría aproximadamente un 25% y si la tarjeta de circuito impreso principal Número 1 se hiciera en fenólico y 100 ó más; bajaría su precio en más del 70%.

Aparte de estos gastos, hay que considerar gastos de

electricidad, soldadura, cloruro ferrico, rapid circuit, pegamento, etc.

En el análisis del precio aclararé que era por el dispositivo y el precio resultante fue de 67.98 USD.

Si se deseara fabricar el analizador para la venta, existirían varios factores a considerarse, los cuales no enumeré y que a continuación mencionaré.

Después de investigar con varios proveedores, pude establecer el costo que tendría en volumen, el material que se requiere para el analizador y éste fue de 42.46 USD, es decir 37% menos que el prototipo. Sin embargo, para fabricar este analizador, al igual que para muchos otros productos, hay que considerar los siguientes costos :

- Mano de obra, incluyendo la capacitación, el tiempo para que se desarrolle la habilidad para fabricar el dispositivo.

Al considerar la mano de obra, hay que tener en cuenta el tiempo que requiere (Horas Hombre) para la fabricación y completo terminado de un analizador (Con las pruebas de control de calidad).

- Costo de herramientas y su depreciación.

- Consumo de electricidad (Esto también depende en parte de la mano de obra).

- Renta de un local (Este costo es muy variable)

- Material dañado o defectuoso

- Equipo de laboratorio para pruebas (Osciloscopio, Voltmetro, Generador, etc...) y la depreciación del mismo.

Gastos de transporte (Para recoger material y entregar producto)

- Material de empaque
- Gastos de publicidad y promoción
- Instructivos de operación y mantenimiento (Costo de impresión y diseño)
- Permisos de la SECOFIN

y otros gastos diversos que solamente realizando la fabricación del analizador sería posible determinar exactamente lo que costaría fabricarlo.

Lo que sí podría decir, es el precio aproximado en que se podría vender el analizador : 250 USD. La venta del analizador sería como complemento de equipo de alta fidelidad, no como instrumento de supervisión contra ruido u otra de sus aplicaciones, las cuales mencionaré en el capítulo 4.

Para determinar este precio de venta, realicé una pequeña encuesta como estudio de mercado para ver la aceptación del analizador entre la gente. Este cuestionario-encuesta lo hice en tiendas que venden equipo de audio de alta fidelidad, lo efectúe a clientes y vendedores; el número de personas entrevistadas fue de 35 y el cuestionario fue el siguiente :

- 1.-¿Tiene usted un equipo de alta fidelidad ?
- 2.-¿Si la respuesta es no, piensa usted comprar uno ?
- 3.-¿Tiene Ud. entre sus componentes de alta fidelidad, un ecualizador ?
- 4.-¿Sabe Ud. que es un analizador de audio ?
- 5.-¿Estaría Ud. dispuesto a invertir en un analizador de espectro si le demostrara que le ayudaría a mejorar la respuesta de su equipo en el local que ocupa actualmente ?
- 6.- Si su respuesta es afirmativa, ¿cuánto estaría dispuesto a

pagar por el analizador de espectro de audio ?

El precio de 250 USD, no incluye fuente ni generador de ruido rosa y sería el precio de venta al público.

Bibliografía Capítulo 3

- 1.- Alec Nisbett. " THE USE OF MICROPHONES ".
Media Manuals. Hastings House, Publishers. LONDON 1977
- 2.- I.R. Sinclair. " GRABACION ".
Serie Manuales prácticos, Editorial Alhambra, S.A. BARCELONA
- 3.- Leo L. Beranek. " ACUSTICA ".
Editorial Hispano Americana, S.A.
- 4.- MANUAL DE RADIO / AUDIO DE NATIONAL - SEMICONDUCTOR. 1980
- 5.- Mannie Horowitz. " HOW TO DESIGN AND BUILD AUDIO AMPLIFIERS "
TAB Books.
- 6.- Manual de aplicaciones lineales. " LINEAR APPLICATIONS HANDBOOK ". de NATIONAL - Semiconductor; sección " An Application Guide for Op. Amp." 1982.
- 7.- Albert Paul Malvino. " PRINCIPIOS DE ELECTRONICA ".
Mcgraw-Hill 1979.
- 8.- Revista " RADIO ELECTRONICS "; Artículo " How to properly use Op. Amp. ", por Mannie Horowitz. ENERO 1983
- 9.- Revista " RADIO ELECTRONICS "; Artículo " How to design filter circuits to match your needs ", por Mannie Horowitz. DICIEMBRE 1983
- 10.- Arthur B. Williams. " ELECTRONIC FILTER DESIGN HANDBOOK ".
Mcgraw-Hill, 1981.
- 11.- Paul Bildstein. " FILTROS ACTIVOS " & " FILTRES ACTIFS "
Editorial Paraninfo & Edition Radio, PARIS, FRANCE.

- 12.- Gene E. Tobey, Jerald G. Graeme, Lawrence F. Huelisman.
" AMPLIFICADORES OPERATIVOS ". Diseño y aplicación.
Editorial Diana 1979
- 13, 14, 15, 16.-
Manuales SKF, Radio Shack, ECG y National.
- 17.- J.L. Hilburn; D.E. Johnson. " MANUAL OF ACTIVE FILTER
DESIGN ".
Mcgraw-Hill 1973.
- 18.- Don & Carolyn Davis. " SOUND SYSTEMS ENGINEERING ".
Howard W. Sams & Co., Inc.
- 19.- Forrest M. Mims III. " ENGINEER'S NOTEBOOK II "
Integrated Circuit Applications.
Archer.
- 20.- Roger Cota y Lloyd Addington.
Revista " RADIO ELECTRONICS ", ABRIL 1985.
- 21.- Walter G. Junk. " I C TIMER COOKBOOK "
Howard W. Sams & Co., Inc.

CAPITULO 4

APLICACIONES DEL

ANALIZADOR DE ESPECTRO

APLICACIONES DEL ANALIZADOR DE ESPECTRO DE AUDIO

Para entender la necesidad del equipo para mediciones acústicas, como el analizador de audio, las propiedades del sonido y sus aplicaciones, es conveniente hablar un poco de lo que es el sonido; sobre cómo funciona el sistema auditivo humano y sobre acústica.

4.1 El sonido y la percepción de éste por el ser humano.

El sonido constituye una parte importante de nuestra existencia, aunque podríamos vivir sin él, nos perderíamos del placer de la buena música, el interambio rápido de conocimientos a través de la conversación, las advertencias de peligro, etc. El sonido también desempeña un papel primordial en la economía del Mundo; las principales industrias de la comunicación y las de entretenimiento, así como las industrias básicas de la electrónica y la electricidad, están vinculadas al sonido.

Además, todas las industrias anteriormente mencionadas, contribuyen a apoyar a muchos otros sectores importantes de la industria moderna.

Las empresas telefónicas por ejemplo, necesitan millones de kilogramos de cobre para cables, millones de dólares para material plástico, acero y aluminio para sus líneas; al igual que decenas de otros tipos de materiales. En resumen, se puede decir que un gran número de industrias dependen indirectamente del sonido, para subsistir.

En años recientes, los científicos descubrieron muchas aplicaciones adicionales del sonido, fuera del ámbito de las

comunicaciones; me refiero tanto al sonido audible, cómo al que no lo es.

Algunos de los principales adelantos de los últimos años, se registraron en el campo del ultrasonido (por encima de la frecuencia máxima audible). En este mundo de sonido silencioso, se inventaron instrumentos para soldar materiales, para ensayar la solidez de estructuras sin destruir ninguna de sus partes, para vigilar procesos químicos y, para colaborar con los médicos en el diagnóstico de enfermedades.

Por estos motivos, el conocimiento de la naturaleza y de la importancia del sonido, resultan muy valiosos para el Hombre en esta época. Es importante actualizarse en el tema, por los problemas que el sonido puede originar. El advenimiento de nuevas invenciones conlleva el problema de ruidos que perturban nuestros oídos y cerebro; éstos llegan a distraernos, no nos permiten desempeñar nuestra labor con eficiencia y además, no nos permiten disfrutar de nuestros ratos de ocio.

El sonido puede resultar dañino aunque no lo escuchamos. Es por esta razón, que la Humanidad tiene que incrementar sus conocimientos acerca de este tema, para hacer frente a sus peligros, buscando la manera de aislar a los seres vivos del excesos de ruido, aprovechando el sonido para su beneficio.

4.1.1 El sonido.

Lo que excita nuestro oído y se designa con el nombre de sonido es consecuencia del movimiento de los cuerpos sólidos, líquidos o gaseosos que arrastran el aire que los rodea y con su dilatación mecánica comprimen las capas de aire, con lo cual aumenta su densidad.

Esta densificación acompañada de un breve aumento de presión, intenta compensarse, difundiéndose las partículas de aire de la zona adyacente, con lo que se produce una variación alternada entre densificación y rarefacción a causa de la inercia y la masa del aire que ha entrado en movimiento a una mayor distancia del cuerpo sólido; se produce de nuevo un aumento de presión del aire (Fig. 4.1), que cada vez se aleja más del cuerpo del excitador, exactamente igual que una oruga reptando. El sonido por lo tanto, se propaga perpendicularmente a una superficie vibrante, bajo la forma de ondas de densificación; siendo su velocidad determinada por las propiedades mecánicas fijas de la mezcla gaseosa del aire (inercia y elasticidad de la masa). La velocidad de propagación de las ondas sonoras, por debajo de un límite extremadamente elevado, es independiente de la intensidad de la sobrepresión instantánea de excitación y recibe el nombre de Velocidad de propagación del sonido. Esta última, a presión y temperatura normales, es de unos 340 metros por segundo; aunque no es idéntica a la velocidad del flujo de las partículas de aire propiamente dichas; la cual, según la intensidad de la sobrepresión de excitación, posee valores muy diversos, generalmente muy pequeños (del orden de fracciones de milímetros por segundo).

Con la sobrepresión excitante y la velocidad de las partículas de aire, al igual que en los procesos eléctricos, se puede obtener, partiendo de tensión y corriente: la potencia (aquí llamada intensidad sonora), que se desplaza junto con la onda sonora, a través de una cierta superficie. No obstante, los experimentos han demostrado que la magnitud más importante para la sensibilidad

sonora del oído, no es ni la velocidad, ni la potencia transmitida, ni la velocidad de flujo de las partículas de aire; sino la sobrepresión de excitación, a la que responde básicamente nuestro oído. La onda sonora vija por el aire, en una serie ininterrumpida de compresiones y expansiones, Fig. 4.1a. Esta serie de compresiones y expansiones persiste mientras haya suficiente energía para mantener el movimiento hacia adelante. Cada compresión y expansión por lo tanto, consume cierta energía; de modo que con el tiempo, la onda sonora se extingue si no se cuenta con algún dispositivo que vuelva a empujarla para que siga propagándose.

La superficie terrestre, nuestro espacio vital; debido al efecto de la Gravedad, está cubierta con una capa de aire de una densidad media determinada, cuya presión (llamada presión atmosférica) es del orden de un Kg. por cm^2 ($1\text{Kg}/\text{cm}^2$) de superficie y que como presión uniforme, no puede excitar nuestro oído.

Pequeñas oscilaciones de la presión atmosférica, debidas a variaciones climáticas, también son inaudibles. Las diferencias de presión atmosférica en diversos puntos, producen corrientes (vientos) que sólo son audibles si son consecuencia de la formación de torbellinos; los cuales generan oscilaciones rápidas del aire y, con frecuencia cambian el sentido de la presión en intervalos de tiempo muy cortos. Por lo tanto, observamos que para que una sensación sea audible, no basta la existencia de sobrepresión y depresiones, sino que es imprescindible un cambio lo suficientemente rápido de la presión.

La combinación de una compresión, seguida de una expansión, se denomina ciclo.

Obviamente, si un objeto generador de sonido está vibrando, producirá muchos de estos ciclos; uno a continuación de otro, en un determinado lapso de tiempo. Esto nos lleva a la importantísima característica del sonido, llamada frecuencia (Fig. 4.1b)

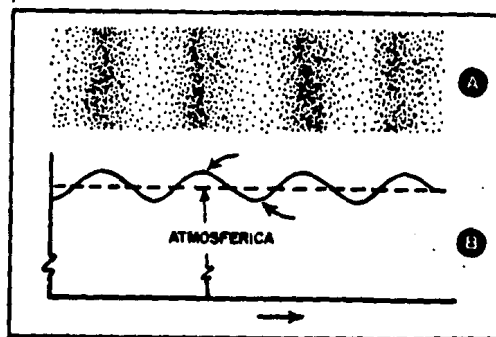


Fig. 4.1 Generación del sonido por la compresión y rarificación de las moléculas

La frecuencia es el número de ciclos de sonido que ocurren en una determinada cantidad de tiempo, por lo general en ciclos por segundo.

Los hombres de ciencia descubrieron que distintos cuerpos vibrantes generan o son capaces de generar, frecuencias comprendidas entre pocos ciclos hasta más de 100,000 c/Seg.

El oído humano sólo percibe una pequeña parte de esta gama de frecuencias, desde 20 hasta 20,000 c/Seg. (aproximadamente). Esto depende de la edad y el sexo; a mayor edad, menor es el límite de sonidos de alta frecuencia que capta el oído.

Para que nuestros oídos perciban el sonido, éste no sólo debe de estar dentro del rango de frecuencias mencionado; además, si la intensidad de las oscilaciones de presión se halla por debajo de cierto límite (umbral de audición), son inaudibles. Las moléculas del aire a temperatura normal vibran continuamente debido a la variación irregular de la temperatura, de tal forma que nuestro oído, si tuviese una sensibilidad ilimitada, percibiría estas mínimas variaciones de presión como un ruido continuo.

La unidad de presión Kg. sobre cm² recibe el nombre de BAR.

El umbral auditivo real para presiones acústicas se halla por término medio en 2×10^{-4} μ bars, por encima de la presión del aire, (1 μ bar es igual a 10^{-6} bars). El valor de la presión acústica de 2×10^{-4} μ bars se ha tomado como patrón internacional y valor de referencia de todas las mediciones acústicas.

4.1.2 Medición de sonido, los decibeles.

La magnitud de las presiones acústicas usuales, como la voz, música y ruido, oscila en un campo entre 10^{-1} (1/10) hasta unos 10^3 (1000) μ bars.

En la práctica, es incómodo el mencionar los valores de las presiones en las unidades anteriores, debido a lo elevado de las cifras, como son las potencias de 10 que hay que manejar. Existe la posibilidad de utilizar un aumento por multiplicación geométrica, por ejemplo 1,2,4,8,16..., con cifras sencillas que correspondan a las cifras de los exponentes de una misma base. A

la serie anterior corresponden a 2, 2¹, 2², 2³, 2⁴, etc. (base 2).

El avance de una potencia a la siguiente, es decir un aumento de 0 a 1, 1 a 2, etc., en este caso representa una multiplicación

por 2 (el mismo factor siempre). Si para simplificar escribimos sólo exponentes, es decir 0, 1, 2, 3, etc., tenemos la llamada escala logarítmica; que, cuando se utilizan grandes cantidades absolutas, se indican mediante cifras relativamente pequeñas como exponentes. Según este sistema, se pueden eliminar grandes valores - incómodos en la práctica, para magnitudes elevadas de la presión acústica. Se elige la presión del umbral de la audición de 2×10^{-4} μ bars, como " nivel acústico cero " y a la presión no es de potencia de base 2, sino de base $10^{.5}$.

Esta progresión, algo peculiar a primera vista, se debe a que al aumentar la presión acústica, que crece con el cuadrado de la presión, ha aumentado en un factor de 10 (de manera similar crece la potencia eléctrica en vatios, con el cuadrado de la tensión eléctrica en voltios).

Los exponentes de la base de la potencia 10, para diferenciarlos de las cifras sencillas de la base aritmética y para caracterizarlos de una manera especial, reciben el nombre de bel; 1 bel es una característica proporcional y significa 10 veces más potencia ó $10^{.5}$ más presión frente a cero bel. Por ejemplo, 2 bels es 100 veces más potencia ó 10 veces más presión.

La progresión de intervalos de $10^{.5}$ veces para la presión, es demasiado amplia para la práctica; por lo cual, se ha dividido este intervalo en 10 iguales, naturalmente logarítmicos y, se ha fijado la relación : 1 bel igual a 10 decibeles (dB). Con ello resulta que un aumento de presión de 10, corresponde a un aumento de 2 beles o decibeles. Si ahora fijamos, como se ha mencionado anteriormente, el umbral de la audición en cero decibeles y también 2×10^{-3} μ bar = 20 dB, 2×10^{-2} μ bar = 40 dB, 2×10^{-1} μ bar = 60 dB, 2μ bar = 80 dB, 20μ bar = 100 dB, etc. Los

valores intermedios se pueden obtener en la tabla 4.1.

Expresado bajo una fórmula matemática, el paso de una cierta presión acústica P_x , en μbars , al nivel acústico correspondiente (logarítmico) L en decibeles da la relación:

$$L = 10 \log \frac{P_x^2}{P_o^2} = 2 \log \frac{P_x}{P_o} \text{ dB.}$$

siendo P_o , la presión del umbral de la audición $20 \times 10^{-4} \mu\text{bars}$

TABLA 4.1.

Tabla de la relación entre la presión física sonora en μbar y el nivel acústico relativo en dB.					
$\mu\text{bar} = \text{dB}$		$\mu\text{bar} = \text{dB}$		$\mu\text{bar} = \text{dB}$	
$2,00 \cdot 10^{-4}$	0	$2,24 \cdot 10^{-4}$	21	2,24	81
$2,24 \cdot 10^{-4}$	1	.	.	.	.
$2,52 \cdot 10^{-4}$	2	.	.	.	.
$2,82 \cdot 10^{-4}$	3	$6,32 \cdot 10^{-5}$	30	6,32	90
$3,17 \cdot 10^{-4}$	4	.	.	.	.
$3,56 \cdot 10^{-4}$	5	.	.	.	.
$3,99 \cdot 10^{-4}$	6	$2,00 \cdot 10^{-4}$	40	$2,00 \cdot 10^0$	100
$4,48 \cdot 10^{-4}$	7	$2,24 \cdot 10^{-4}$	41	$2,24 \cdot 10^0$	101
$5,02 \cdot 10^{-4}$	8	.	.	.	.
$5,64 \cdot 10^{-4}$	9	.	.	.	.
$6,32 \cdot 10^{-4}$	10	$6,32 \cdot 10^{-4}$	50	$6,32 \cdot 10^0$	110
$7,10 \cdot 10^{-4}$	11	.	.	.	.
$7,96 \cdot 10^{-4}$	12	.	.	.	.
$8,93 \cdot 10^{-4}$	13	$2,00 \cdot 10^{-4}$	60	$2,00 \cdot 10^0$	120
$1,00 \cdot 10^{-3}$	14	$2,24 \cdot 10^{-4}$	61	$2,24 \cdot 10^0$	127
$1,13 \cdot 10^{-3}$	15	.	.	.	.
$1,26 \cdot 10^{-3}$	16	.	.	.	.
$1,42 \cdot 10^{-3}$	17	$6,32 \cdot 10^{-4}$	70	$6,32 \cdot 10^0$	130
$1,59 \cdot 10^{-3}$	18	.	.	.	.
$1,78 \cdot 10^{-3}$	19	.	.	.	.
$2,00 \cdot 10^{-3}$	20	2,00	80	$2,00 \cdot 10^0$	140

4.1.3 El comportamiento del sonido en el medio ambiente

El sonido cuando viaja en el aire o en algún otro medio que lo transmita, sufre cambios en su comportamiento.

Para simplificar la explicación del comportamiento del sonido, diré que, cuando se habla de un campo libre, se está uno refiriendo a una situación ideal, en la cual no existe nada que estorbe o impida la propagación del sonido.

4.1.3a Propagación, pérdida y absorción del sonido.

Supongamos que tenemos una fuente de energía acústica ideal, que envía sonido en todas direcciones, con energía uniforme (energía por unidad de área) (ver Fig. 4.2). Si medimos la intensidad sonora en incrementos sucesivos de distancia de la fuente, notaremos que la intensidad decrece con la distancia, lo cual no es sorprendente. Notamos, que si aumentamos la distancia que nos separa de la fuente sonora, al doble, la intensidad se reduce a la cuarta parte del valor inicial; y, si triplicamos la distancia, consecuentemente la intensidad se reduce a un noveno ($1/9$) del valor inicial. En caso de incrementar la distancia 4 veces, la intensidad se reducirá a $1/16$, ver Fig. 4.2.

Por lo anterior, se deduce que la intensidad del sonido es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. La ley del cuadrado inverso de la distancia, se aplica para intensidades acústicas.

Dado que la intensidad acústica es muy difícil de medir con instrumentos, se utiliza el nivel de presión sonora, en vez de la intensidad sonora. Ya se vió al principio de este capítulo, al hablar de los decibeles, que la intensidad sonora es proporcional al cuadrado de la presión sonora, por lo que la ley del cuadrado

inverso, se convierte en simplemente en ley del inverso; en otras palabras, la presión sonora varía inversamente con la distancia. Cada vez que duplicamos la distancia que nos separa de la fuente sonora, la presión acústica decrece 6 dB. Aparte de la reducción en intensidad que sufre el sonido con la distancia, existen muchos otros factores que afectan la propagación del sonido en un medio real como el aire. Los cambios de temperatura y velocidad del aire lo distorsionan y la viscosidad lo absorbe.

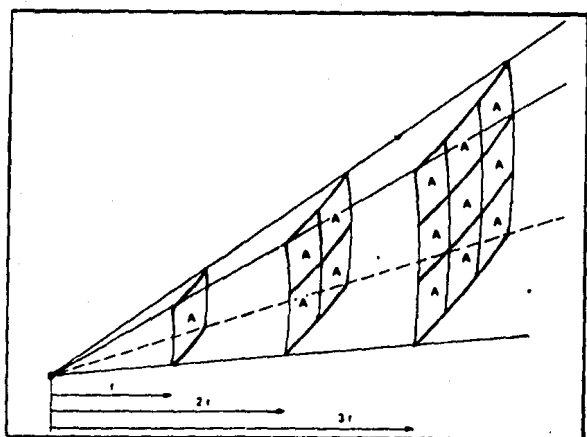


Fig. 4.2 Dispersión del sonido desde una fuente puntual y disminución de la intensidad conforme aumenta la distancia y el área

La absorción del sonido en el aire es mayor en las altas frecuencias que en las bajas, es decir que la atmósfera actúa como un filtro pasabajos. Esta absorción altera el espectro de un ruido y debe considerarse cuando se estudia una fuente sonora y sus efectos con la distancia. La humedad relativa también influye en la absorción del sonido. La Fig. 4.3 muestra la atenuación contra la humedad relativa.

También los árboles, el pasto, los sembradíos, el suelo muy accidentado, etc., absorben el sonido; por eso es conveniente reforestar en una ciudad como la ciudad de México, no sólo para purificar el aire, sino también para lograr una atenuación del ruido de la ciudad.

Estos tipos de absorción suceden en el exterior; cuando estamos en el interior de un local o recinto, existen otros factores que afectan el sonido, pero eso lo trataré en el tema de acústica arquitectónica.

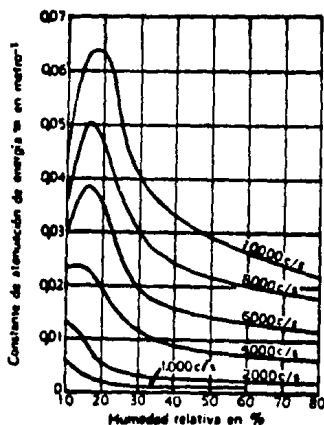


Fig. 4.3 Valores medidos de la constante de atenuación de energía en función de la humedad relativa, para diferentes frecuencias

4.1.4 Reflexión del sonido.

Cuando las ondas sonoras hacen contacto con una superficie, parte de la energía se refleja, otra parte se transmite a través de esta superficie y otra parte se absorbe (convirtiéndose en calor), Fig. 4.4. Si la absorción y transmisión del sonido en una superficie son bajas y, por lo tanto la mayor parte del sonido es reflejado, se dice que esta superficie es de material acústicamente duro y se puede considerar que refleja el sonido como un espejo refleja la luz.

Los efectos de la forma de la superficie y la distribución en un local, afectan la forma en la que el sonido se reflejará. En la Fig. 4.5, se muestran algunos efectos de la forma de la superficie reflejante.

Las consecuencias que crean estos efectos se verán en acústica arquitectónica.

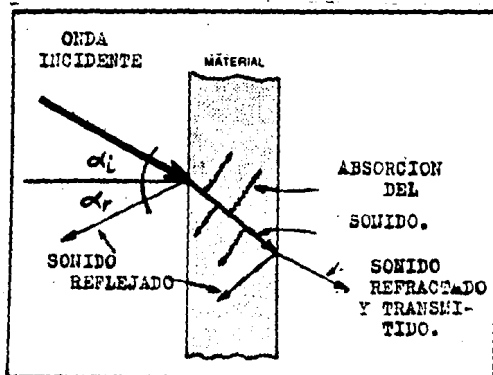


Fig. 4.4 Cuando el sonido choca contra una superficie una parte se refleja, otra se transmite y otra parte se absorbe

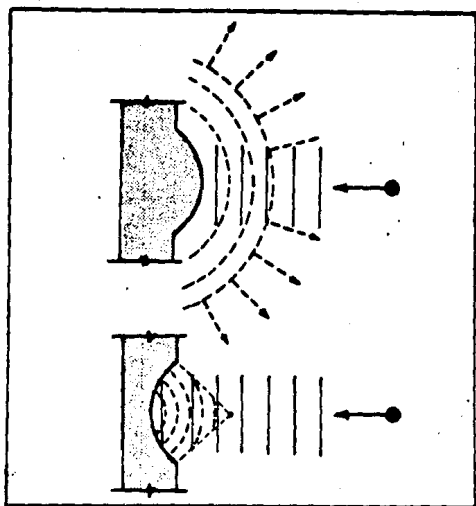


Fig. 4.5 En A la superficie se convexe y los rayos se dispersan.
 En B la superficie es concava y los rayos se "enfocan"
 hacia un punto.
 Las esquinas de 90 grados reflejan el sonido hacia su
 punto de origen, después de dos reflexiones.

Las superficies planas paralelas causan ondas estacionarias, lo cual trataré igualmente con más detalle, en acústica arquitectónica.

4.1.5 Refracción del sonido.

En la figura 4.4, se mostraba la forma en que se refleja y transmite el sonido. En la misma figura 4.4 se ve que el sonido sufre un cambio de dirección al atravesar la superficie. Este

cambio en la dirección del sonido al pasar a un medio de diferente densidad, se llama refracción (Fig. 4.6). Al cambiar la densidad del medio cambia también la velocidad de propagación del sonido y es por ello que sucede la refracción.

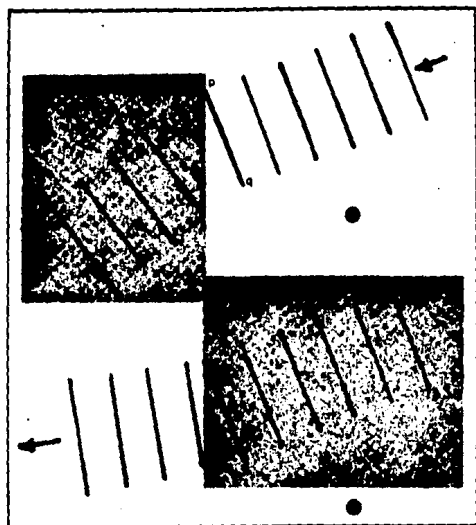


Fig. 4.6 Refracción del sonido al pasar de un medio de diferente densidad :

En A el sonido que viaja en el aire, entra en un material más denso (sombreado) y sufre un cambio en su dirección. En B, sucede lo opuesto, el aire cambia de un medio más denso a uno menos denso y vuelve a ocurrir la refracción

4.1.6 Difracción del sonido

Mucha gente confunde el término y concepto de difracción con refracción, suenan parecido y ambos efectos cambian la dirección del sonido, pero son completamente diferentes. La difracción es un cambio en la dirección del sonido cuando pasa alrededor de un obstáculo. Para ilustrar esto, pensemos en el ejemplo que se ilustra en la figura 4.7 en A y B.

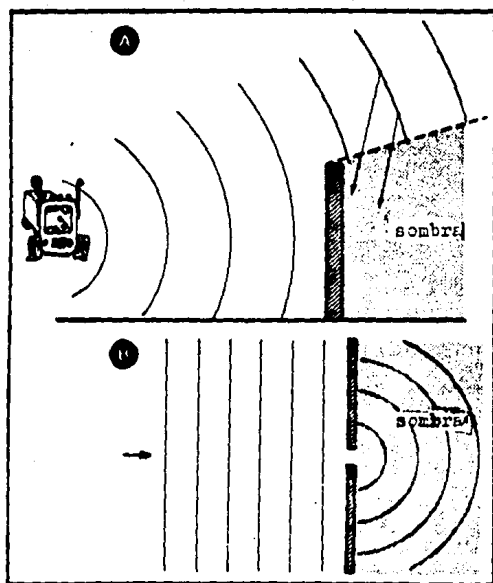


Fig. 4.7
(Descripción. página siguiente)

En A, se ve una onda que incide sobre una pared de ladrillo. El borde del muro actúa como una nueva fuente de sonido, radiando sobre la zona de sombra que forma el muro. El sonido resultante será de menor intensidad pero existirá. La longitud de onda de éste, es menor que las dimensiones de la pared. Si la longitud de onda fuera mayor que la pared, ésta no sería barrera para el sonido, pasaría como si no existiera el muro. Pero para longitudes de onda corta (frecuencias altas) el efecto de difracción es el responsable de que el sonido penetre en la zona de sombra.

En B, se ilustra el caso en que la pared tiene un hoyo. En este caso se considera el centro del hoyo como una nueva fuente de energía que difunde el sonido, en ondas esféricas.

Podemos decir que el efecto de difracción hace que el sonido " dé la vuelta " y lo envíe hacia la zona de sombra. La cantidad de sonido que va a penetrar la zona de sombra, dependerá de la longitud de onda del sonido comparada con las dimensiones de la pared. Cuando la pared es 30 veces más grande que la longitud de onda, el sonido se refleja; cuando es 10 veces mayor, algo del sonido pasa a la zona de sombra por difracción y, si la pared es 5 ó menos veces el tamaño de la longitud de onda, gran parte del sonido penetrará la zona de sombra por el efecto de difracción.

4.2 El sistema auditivo humano.

El mecanismo de la audición es el recipiente final de los sonidos producidos por los sistemas de audio. Los proyectistas de sistemas de sonido deben conocer la gama de frecuencias a las que responde este mecanismo y la manera como deben presentarse a los oyentes los sonidos vocales y musicales, si se quiere obtener una

cantidad razonable de información y satisfacción de la señal de audio. El mecanismo de la audición comprende las partes mecánicas del oído, el sistema nervioso auditivo, incluido el cerebro y el indicador de respuesta representado por todo el organismo humano. Ningún aparato físico pequeño posee propiedades tan notables como las del oído; sería muy interesante hablar detalladamente del sistema de audición, pero ocuparía demasiado tiempo y espacio.

El oído, figura 4.8, puede soportar los sonidos más intensos producidos por la naturaleza. (subrayo naturaleza porque las máquinas ruidosas inventadas por el Hombre, no son naturaleza) y en el otro extremo responde a presiones sonoras extremadamente débiles. Estas débiles presiones producen desplazamientos del tímpano, del orden de $19 \cdot 10^{-19}$ cm. en las frecuencias del orden

de 1000c/Seg. El mecanismo de la audición es más que un micrófono extremadamente sensible. Funciona como un analizador de considerable sensibilidad. Los sonidos de una frecuencia determinada pueden ser reconocidos en presencia de un ruido de fondo interferente; es decir el mecanismo de la audición funciona como si estuviera constituido por un grupo de filtros de bandas contiguas, Fig. 4.10. Aún más notable es la capacidad del oído para juzgar la sonoridad, el tono y la cualidad musical; funciones que desempeña de un modo asociado con el cerebro.

En forma simplificada, el sonido entra en el oído por el canal auditivo externo; las partes más conocidas de este aparato son las orejas, con sus pequeñas aperturas en ambos lados de nuestra cabeza. Una de las funciones de las orejas y de su forma, es la de captar y concentrar los sonidos para enviarlos al canal auditivo. Este canal es un pequeño conducto de alrededor de 2.5 a 3 cms. de longitud, Fig. 4.9a y un diámetro de aproximadamente

0.7 cms. Este conducto termina en un pequeño y fino trozo de piel, denominado membrana timpánica, Fig. 4.8 (3), ó simplemente tímpano. Las ondas sonoras llegan por el conducto hasta el tímpano y lo hacen vibrar de la misma manera que el sonido original, Fig. 4.9b.

Debido a la forma de las orejas y a la resonancia que tiene el conducto auditivo en ciertas frecuencias, estos componentes del sistema auditivo, no sólo transportan el sonido hasta el tímpano, sino que también lo amplifican. El rango de frecuencias donde se amplifica más el sonido es en la región comprendida entre 2000 y 4000 Hz. Lo sorprendente y maravilloso de ésto, es que en ese rango de frecuencias, se encuentra también lo más importante para la comprensión e inteligibilidad de la voz humana.

Además, el conducto auditivo protege al tímpano de las agresiones del polvo, del agua y de los cambios bruscos de temperatura.

Del otro lado del tímpano, está el sector aislado del oído que se denomina oído medio. El oído medio es una cavidad ocupada por aire, Fig. 4.9b, éste aire se encuentra a la presión atmosférica; cuando efectuamos la acción de tragar, permitimos que el aire del oído medio y el del exterior, se igualen en presión. El tubo de Eustaquio es el que permite la comunicación con el exterior, Fig. 4.8 (9); por eso, cuando viajamos en avión o sufrimos algún cambio en la presión externa, sentimos una sensación de sordera hasta que masticamos algo. Otra función del tubo de Eustaquio es la de drenar el oído cuando existe alguna infección en el mismo.

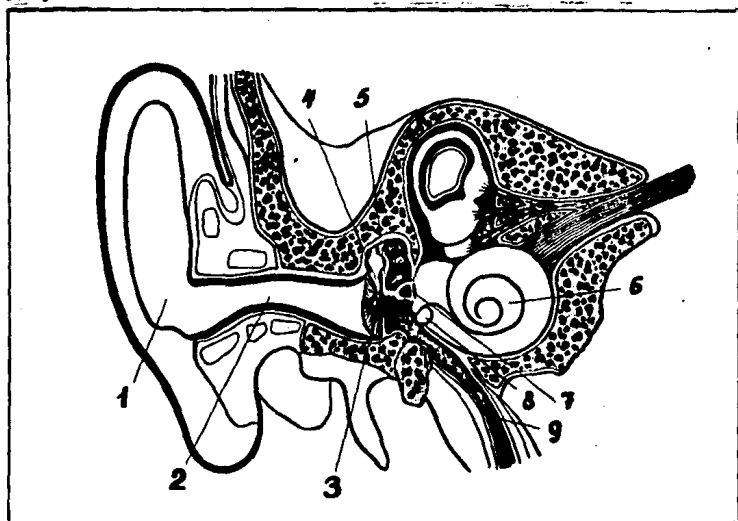
El tímpano funciona como un sistema de suspensión acústica actuando contra la compliancia del aire atrapado en el oído medio. En el oído medio se encuentran tres pequeños huesitos interacoplados. El primer hueso, que es el más grande de los

tres, se denomina martillo, Fig. 4.8 (4) y está conectado por un lado, al tímpano y por el otro, al siguiente hueso llamado yunque, Fig. 4.8 (5). El yunque por su parte, acciona el tercer hueso denominado estribo, Fig. 4.8 (6).

Por último, el estribo comunica sus movimientos a la ventana oval, Fig. 4.9. Esta ventana constituye la entrada al oído interno.

Los huesitos están sostenidos por unos músculos que se endurecen cuando el sonido es muy intenso, para proteger de esta manera al oído, de un posible daño. Desgraciadamente esta protección, sólo es efectiva en bajas frecuencias.

La ventana oval está situada en un extremo de la cóclea, Figs. 4.8 (6) y 4.9c



- | | | |
|----------------------------|---------------------|--------------------------------|
| 1.- Pinna (Oreja) | 2.- Canal auditivo | 3.- Tímpano |
| 4.- Martillo | 5.- Yunque | 6.- Cóclea o laberinto |
| 7.- Estribo y ventana oval | 8.- Ventana redonda | 9.- Tubo o trompa de Eustaquio |

Fig. 4.8 El oído y las partes que lo componen.

La cóclea es una pieza en forma de caracol, Fig. 4.9c y llena de un líquido incoloro.

Su forma espiral tiene una longitud de 35mm. y una sección transversal de cerca de 4mm^2 en el extremo conectado al estribo, decreciendo a la cuarta parte de esta medida en el otro extremo. Por la parte central, está dividida por la partición coclear, Fig. 4.9d, la cual se extiende a todo lo largo de la cóclea. Este tabique que la divide, es en parte óseo y en parte membrana gelatinosa llamada membrana basilar. La membrana basilar es más estrecha en el extremo más ancho de la cóclea.

Sobre la superficie de la membrana basilar, terminan alrededor de 25,000 filetes nerviosos o células piliformes, Fig. 4.9d (1), que forman el nervio auditivo principal, Fig. 4.9d (2).

La cámara llena de líquido está además dividida en dos partes por una membrana muy fina, llamada membrana de Reissner, Fig. 4.9d. Además de la ventana oval, que comunica la cámara de líquido situada encima de la partición coclear, hay una ventana redonda abierta en la mitad inferior de la cámara y que funciona como un igualador de presión.

El área de la ventana oval es de alrededor de 3mm^2 y el de la ventana redonda, es de alrededor de 2mm^2 . El volumen de aire contenido en el oído medio es de alrededor de 2cm^3 . La ganancia mecánica de los tres huesitos en la transmisión de las vibraciones del tímpano a la ventana oval es de alrededor de 1 : 3. Sin embargo, la relación efectiva de las áreas del tímpano y de la ventana oval, multiplicada por esta ganancia mecánica, provee de un aumento de presión sonora desde el tímpano al líquido coclear, del orden de 15 a 1. Esta transformación permite la transmisión de las vibraciones mecánicas en el aire (oído

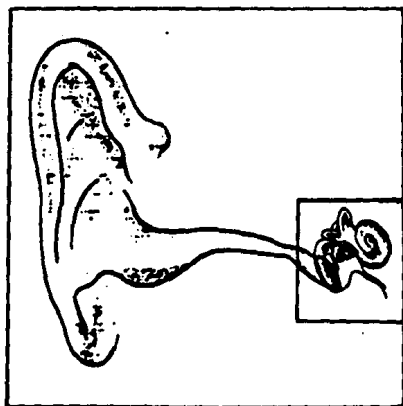
medio) al líquido del oído interno.

El movimiento de la ventana oval producido por el movimiento del timpano, Fig. 4.9b, establece una δ más ondas que se propagan a lo largo de la membrana y del líquido; dando por resultado, la existencia para cada frecuencia, de un punto de máxima excitación.

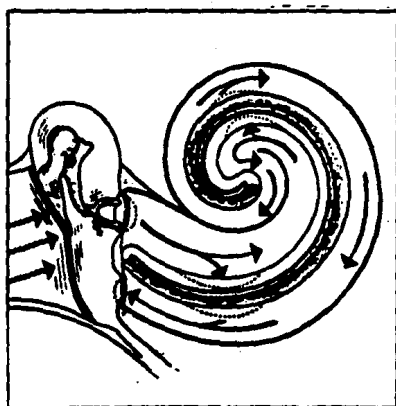
El extremo de la membrana más próximo a la ventana oval "resuena" a las frecuencias altas; mientras que el extremo más remoto lo hace a las frecuencias más bajas.

La combinación de células piliformes y el cerebro, sólo responde entre 20 y 20,000 c/Seg. (Ver Fig. 4.10).

Fig. 4.9 Sistema auditivo humano y su funcionamiento

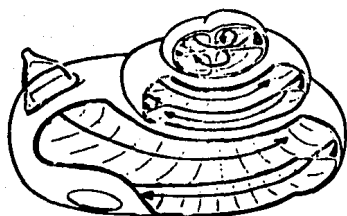


a. Representación del oído

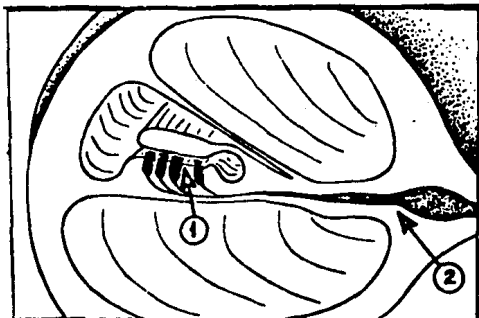


b. Acción del sonido sobre el oído

Fig. 4.9 Sistema auditivo humano y su funcionamiento



c. Representación de la cóclea y de la trayectoria que sigue el líquido del oído interno



d. Corte de la cóclea, que muestra las células piliformes (1) y el nervio acústico (2)

La membrana basilar es un filtro mecánico que descompone parcialmente los sonidos complejos en sus componentes. Por consecuencia, un grupo particular de nervios, es excitado más violentamente que los demás según la frecuencia (Ver Fig. 4.10). Parecería que el mecanismo del oído es un analizador bastante rudimentario ó poco selectivo ya que las curvas de resonancia son muy anchas, pero esta conclusión es errónea, ya que (aparentemente) el sistema nervioso lo agudiza.

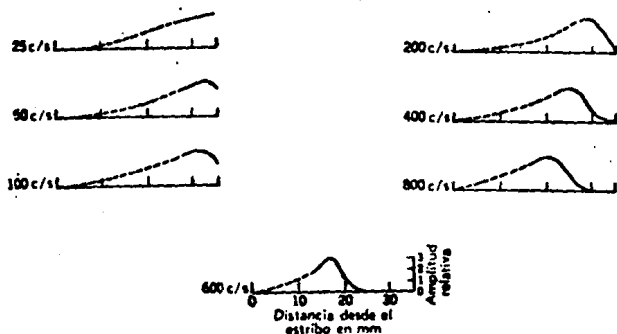


Fig. 4.10 Gráficas de las amplitudes relativas de vibración de la membrana basilar para varias frecuencias (según Békésy, Akust.)

4.2 Los instrumentos de medición y el oído.

Existe confusión entre la gente en lo que se refiere a juicios subjetivos y mediciones objetivas. Como un ejemplo podemos considerar los siguientes términos subjetivos.

CALIDAD DEL SONIDO	COLOR DEL SONIDO	CLARIDAD	DEFINICION
RIQUEZA DE TONO	SONORIDAD	BRILLANTEZ	BALANCE
VIVEZA, etc...			

Ninguno de estos términos se puede medir con un instrumento y varían de acuerdo a la persona. Las investigaciones que se llevan a cabo en el campo de la acústica y la psicoacústica, está tratando de hacer más clara la relación entre los términos subjetivos y los objetivos.

A continuación, definiré algunos términos que se emplean comúnmente.

4.3.1 Tono.

El tono es el aspecto de la sensación auditiva por el cual podemos ordenar los sonidos en una escala que va de los "graves" a los agudos; como por ejemplo, en la escala musical.

El tono es una magnitud subjetiva. Es principalmente función de la frecuencia del sonido, pero también depende de la presión sonora y de la composición del sonido. La unidad del tono es el MEL. Como referencia se ha tomado el valor de 1000 MELS, que se define como un tono de 1000 Hz a una presión sonora de 60 dB.

La intensidad del sonido afecta nuestra percepción del tono. Para frecuencias bajas, el tono se hace más grave cuando incrementamos la intensidad sonora. Lo opuesto ocurre con las frecuencias altas; el tono se hace más agudo al aumentar la intensidad sonora. El investigador Fletcher reportó un interesante resultado de un experimento que ilustra el efecto anterior. Al reproducir tonos de 168 y 318 Hz a niveles normales, el sonido resulta muy desagradable. Sin embargo, a niveles altos, nuestros oídos los perciben entre el rango de la octava 130-300 Hz y resulta muy placentero el mismo sonido, que antes era desagradable.

4.3.2 Sonoridad y niveles de sonoridad. (Loudness).

Cuando escuchamos un sonido, a menudo juzgamos su sonoridad. La manera más simple de hablar cuantitativamente de la sonoridad de un sonido, es compararlo con un sonido patrón. Como sonido patrón, se ha elegido un tono de 1000 Hz. El nivel de sonoridad de cualquier otro sonido se define como el nivel de presión sonora del tono de 1000 Hz, que tiene tanta sonoridad como el

sonido en cuestión. Se han hecho muchas mediciones para determinar los niveles de sonoridad de los tonos puros y de los ruidos de banda angosta en función de la frecuencia y los niveles de presión sonora.

Los resultados de los experimentos de los investigadores Fletcher y Munson y, posteriormente de Robison y Dadson, sobre el fenómeno de sonoridad, se muestran en la Fig. 4.11. En la gráfica de esta figura, las ordenadas expresan el nivel de presión sonora del sonido en dB. Los números puestos sobre los contornos, son los niveles de sonoridad del sonido y son los niveles de presión sonora de un tono de 1000 Hz, de igual sonoridad que el sonido en cuestión. Estos contornos se conocen habitualmente con el nombre de contornos de Fletcher - Munson.

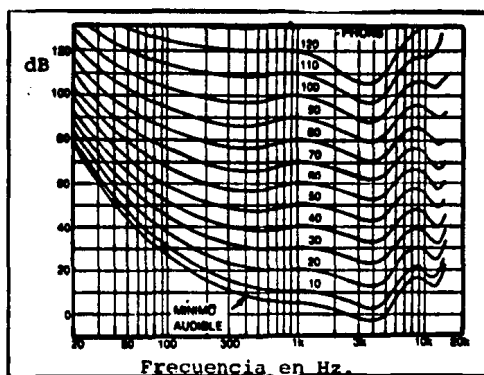


Fig. 4.11 Curvas o contornos de Fletcher y Munson

Las curvas o contornos de Fletcher y Munson, se obtuvieron, haciendo pruebas con un grupo de oyentes profesionales entrenados. Estos oyentes recibieron el sonido de frente y tenían que juzgar la sonoridad de un sonido de determinada frecuencia, con el tono de referencia de 1000 Hz. Cada contorno ó curva se denomina de igual sonoridad, referida a 1000 Hz; a la unidad para medir la sonoridad se la llama Phon ó Fon. Los límites de audición del oído están comprendidos entre las curvas de 0 Phons y 120 Phons. Por debajo de 0 Phons no percibimos sonido alguno y, por arriba de 120 Phons el oído sufre daño irreparable.

Lo sorprendente de estas curvas o contornos de Fletcher - Munson, es que revelan que la percepción de la sonoridad varía mucho con la frecuencia y la presión sonora. Por ejemplo, un sonido con una presión sonora de 30 dB que equivale a 30 Phons a 1000 Hz, requiere tener 88 dB a 20 Hz, para que sea igual de sonoro al oído. Este ejemplo se ilustra en la Fig. 4.12.

Estas curvas o contornos tienden a volverse más planas (os) a niveles más altos.

Por ejemplo, en la curva de 90 phons, mostrada en la Fig. 4.12 (= 90 dB a 1000 Hz) la diferencia de decibales en esta curva entre 20 y 1000 Hz, es de sólo 32 dB y no de 58 dB como pasaba en el caso anterior.

La Fig. 4.12 muestra la comparación de la respuesta del oído a 20 Hz en relación con la de 1000 Hz, a un nivel de 30 Phons; el nivel de presión sonora a 20 Hz necesita ser 58 dB mayor que el de 1000 Hz para que nos parezca igual de sonoro. A un nivel de 90 Phons, sólo se requiere de un aumento de 32 dB.

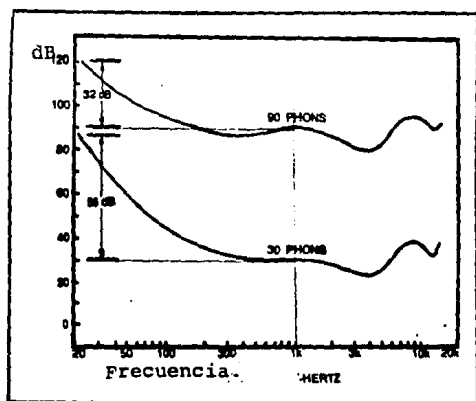


Fig. 4.12

Las curvas de igual sonoridad son de especial importancia en el diseño de equipo de audio.

En las salas de concierto, la música se ejecuta por lo general a niveles bastante altos. En cambio, en el Hogar, escuchamos la música a niveles más bien bajos.

En razón de que el oído discrimina en contra de tonos de baja frecuencia cuando los niveles son bajos, como lo muestran las curvas de igual sonoridad, la música parece perder sus componentes bajas y también las muy altas. A fin de reducir esto en la medida que sea posible, los diseñadores de amplificadores de alta fidelidad incluyen una red o circuito de compensación, que modifica automáticamente la curva de respuesta del amplificador, según el ajuste del control de volumen, de manera opuesta a como el oído modifica su respuesta al variar el nivel sonoro, este circuito compensatorio es el llamado " Loudness " de

los amplificadores de audio.

4.3.3 Sonoridad contra intensidad.

El Phon, como ya se vió, es la unidad de nivel de sonoridad y está referido al nivel de presión sonora a 1000 Hz. Las curvas de igual sonoridad son útiles, pero nos dicen poco respecto a la reacción del ser humano a la sonoridad. Necesitamos algún tipo de unidad subjetiva de la intensidad, referida al oído humano.

En múltiples experimentos que se han efectuado con personas, se ha podido concluir que cuando aumentamos el nivel de presión sonora de un sonido en particular, en 10 dB, la persona promedio lo percibe como un incremento en la sonoridad, del doble. De igual manera, una disminución de 10 dB se percibe como la reducción a la mitad de un sonido. Se ha adoptado como medida subjetiva de la sonoridad al Sone.

Un sone, se define como la sonoridad experimentada al escuchar un sonido de 40 Phons de sonoridad. Un sonido con 2 sones es el doble de sonoro; de 0.5 sone, es de la mitad de sonoridad. La tabla 4.2, da una idea de la relación entre la sonoridad en Phons y la sonoridad subjetiva en sones.

TABLA 4.2

Nivel sonoro en Phons	Nivel Subjetivo en sones	Ejemplo Típico
100	64	Ruido de Camión
80	16	Conversación fuerte
60	4	Conversación suave
40	1	Cuarto tranquilo
20	0.25	Un estudio muy silencioso

La relación entre la sonoridad en Sonos y el nivel en Phons.

$$S = 2^{(P-40)/10}$$

Esta relación (4.2) matemática se graficó en la Fig. 4.13 para una frecuencia de 1000 Hz.

En esta relación matemática , P está expresado en Phons, y S en sonos .

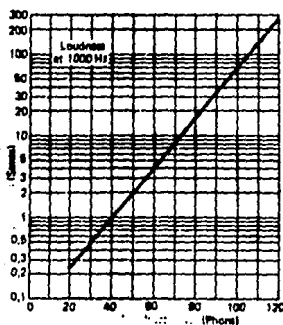


Fig. 4.13 Gráfica de la ecuación 4.2 para una frecuencia de 1000 Hz

Hay que hacer notar, que el Sone es una unidad subjetiva real, que está relacionada con el nivel de sonoridad en Phons, que a su vez se puede medir con instrumentos.

Existen métodos empíricos altamente desarrollados para calcular la sonoridad de un sonido, tal y como es percibido por el ser humano, utilizando instrumentos para medir el espectro. Por ejemplo, un analizador de espectro y un medidor de presión sonora. En todo lo que he escrito sobre sonoridad, he hablado de tonos, pero para determinar correctamente la sonoridad subjetiva, es necesario conocer todo el espectro del sonido en cuestión.

4.3.4 Timbre contra espectro.

El timbre se utiliza comunmente para referirse a un instrumento musical. Una flauta y un oboe suenan diferente aunque toquen la misma nota musical. El tono de cada instrumento tiene su propio timbre. El timbre está determinado por el número de parciales de la frecuencia fundamental. La calidad tonal está muy relacionada con el timbre y se podría decir que son sinónimos.

El timbre es otro término subjetivo y su contraparte física análoga es el espectro. Un instrumento musical produce una nota que está compuesta de una frecuencia fundamental y varias parciales o armónicas de ésta. Con un analizador de espectro, se puede analizar una nota musical para saber sus componentes (armónicas) y la intensidad de éstas. El espectro nos dirá como está distribuida la energía de las diferentes frecuencias que componen una nota musical reproducida por un instrumento en particular.

4.4 Aplicaciones del analizador de espectro

La principal función del analizador de espectro es medir y analizar el sonido. Pero, ¿Porqué hacemos esto?, Con qué fin?. Bueno, podríamos decir que los beneficios del análisis y medición del sonido son muchos. Han permitido mejoras en la acústica arquitectónica, diseño de bocinas, estudio de sonidos molestos, etc. Las mediciones acústicas también dan una indicación de cuando un sonido puede ser dañino y tomar medidas para corregirlo o evitarlo.

A continuación daré una explicación de las aplicaciones prácticas más comunes de los analizadores de espectro, que resaltarán la importancia que tienen los analizadores en el mundo actual.

4.1.1 Reducción y control del ruido

El desarrollo de la sociedad ha dado como resultado un incremento de fuentes sonoras cada vez más intensas. El ruido es uno de los problemas que más frecuentemente se presentan en nuestro medio ambiente.

El ruido afecta al Hombre, (Fig. 4.14), físicamente, psicológicamente y socialmente. El ruido puede causar entre otras cosas :

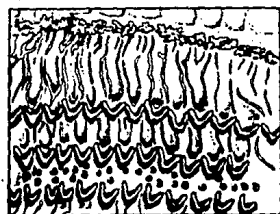
- Daño al sistema auditivo
- Interferencia en la comunicación
- Molestia, aumentado nuestra irritabilidad
- Reducción en la eficiencia (rendimiento)
- Jaquecas
- Cansancio, etc.

Todo esto sucede aunque el Hombre no esté siempre conciente de ello.

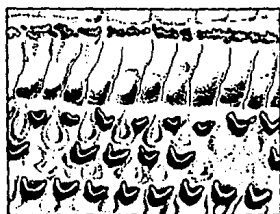
De igual manera, el ruido intenso o la permanencia durante un periodo de tiempo prolongado, en un medio altamente ruidoso, puede causar daño permanente al sistema auditivo; como lo muestra la Fig. 4.15



Fig. 4.14 Efectos del ruido sobre el Ser Humano



Células sin daño



Células dañadas (Aplastadas)

CON UN ACERCAMIENTO SE PUEDE
APRECIAR MEJOR EL DAÑO SUFRIDO
POR LAS CELULAS

- 1.- Terminales nerviosas que van al cerebro
- 2.- Célula piliforme sin daño
- 3.- Célula dañada (destruida)

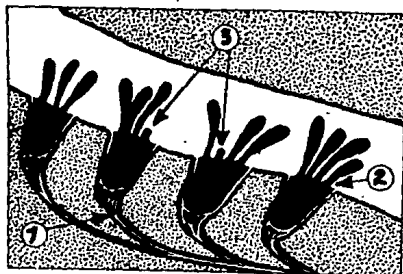


Fig. 4.15 Daños al sistema auditivo

Este tipo de daño no puede repararse. El riesgo que se tiene al estar expuesto al ruido, depende la intensidad, la frecuencia y el tiempo de exposición. Todo esto varía de individuo a individuo. Hay personas que sufren daño más fácilmente que otras.

Al ruido se le considera como un tipo de contaminación tan dañina como la del aire.

Por todo lo anterior, se ve la importancia de atacar al ruido. Una manera de hacerlo adecuadamente es analizándolo para conocer las frecuencias que contiene y la intensidad de cada una de ellas.

Esto es de importancia entre otras cosas porque como se vio anteriormente el oído es más sensible a ciertas frecuencias que a otras; además de que existen unos pequeños músculos dentro del oído que hacen más rígido al tímpano para protegerlo contra los sonidos graves de alta intensidad. Otra razón para conocer la frecuencia del ruido, es, para elegir mejor el método de atenuación o eliminación del mismo.

Conociendo la frecuencia, conocemos la longitud de onda del mismo; esto nos permite determinar las dimensiones de una pantalla protectora como también los materiales más adecuados para atenuar o absorber, ya que el coeficiente de absorción de un material varía con la frecuencia, como se ve en las tablas del Apéndice B, que están al final de esta tesis.

El oído también se va degradando con la edad; en la Fig. 4.16 se puede ver la pérdida de la facultad auditiva que sufre el ser humano promedio, con la edad.

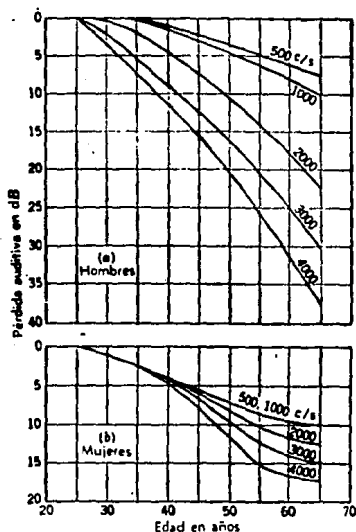


Fig. 4.16 Desplazamiento del umbral medio de audibilidad con la edad, en función de la frecuencia, para hombres y mujeres

Como se puede ver en la figura 4.16, el hombre pierde más su capacidad auditiva que la mujer. Los científicos responsabilizan al medio ambiente más ruidoso al que los hombres se encuentran normalmente expuestos. Sin embargo, en la actualidad, la mujer está desempeñando todo tipo de actividades y, por lo tanto está tan expuesta a perder el oído como el hombre. En estudios que se han hecho con tribus muy primitivas y que

viven en un medio ambiente natural, se ha encontrado que prácticamente no sufren pérdida auditiva con la edad. Esto nos hace pensar que todos los sonidos de alta intensidad a los que estamos expuestos en nuestra "civilización" tienen mucho que ver en la pérdida del oído.

Como ya dije, la pérdida del oído depende de la intensidad, frecuencia y tiempo de exposición al sonido, pero esto se aplica para el ruido estable; es decir que no tiene impulsos repentinos. Este tipo de ruido lo provocan las explosiones, las troqueladoras, los martillos, etc. El grave problema del ruido impulsivo es que el oído humano no alcanza a registrar conscientemente toda la intensidad del mismo si el sonido dura menos de 50 microsegundos, pero si daña severamente al oído (aún durando tan poco tiempo). El disparo de un arma de fuego cerca de los oídos puede dejar a una persona completamente sorda.

Al hacer un análisis espectral tanto del ruido estable como del impulsivo, podemos predecir cuales células de nuestros oídos son las que están en mayor peligro.

Todos estos estudios del ruido, los cuales se han realizado en países europeos, Japón y en los Estados Unidos de Norteamérica, han hecho que se desarrollara una norma de dosis de ruido permisible. La Fig. 4.17 muestra el nivel de espectro en octavas permitido para el tiempo de exposición, el cual se encuentra a la derecha de cada nivel espectral.

dB

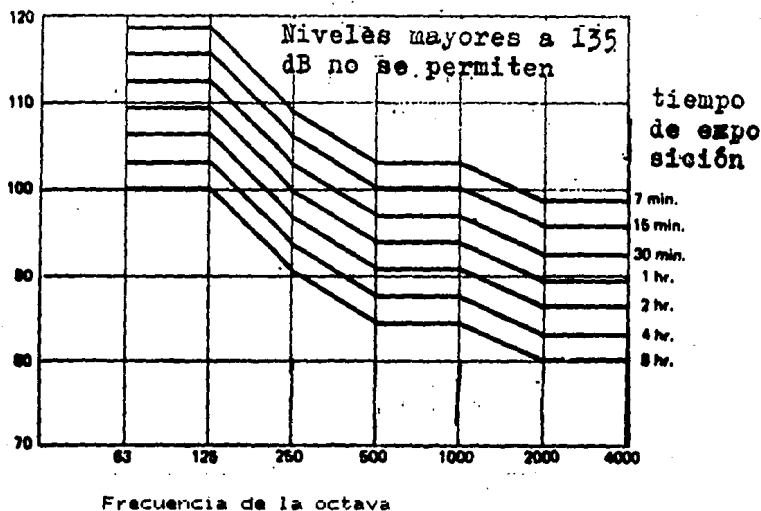
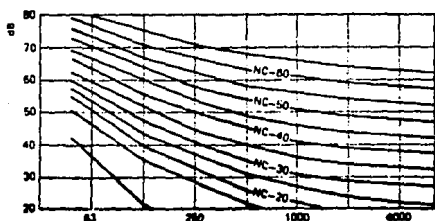


Fig. 4.17 Niveles de ruido expresados en bandas por octavas, contra el tiempo de exposición máximo permisible

La curva de la Fig. 4.17, muestra el nivel de intensidad de cada frecuencia en bandas por octava y el tiempo de exposición máximo recomendable. Estas curvas se llaman de riesgo de daño. Como se puede ver a 4 KHz, el nivel máximo permitido durante 8 Hrs. de trabajo, es de 80dB y aumenta conforme la frecuencia se reduce. Por cada incremento de 3 dB en intensidad, el tiempo de exposición deberá reducirse a la mitad.



Frecuencias Centrales de las bandas de octavas

Fig. 4.18 Curvas de criterio de ruido en octavas

Existen otras curvas que fueron desarrolladas por Beranek en los Estados Unidos de Norteamérica, las cuales muestran la intensidad de ruido en bandas por octava con un número NC en cada contorno ó curva (Ver Fig. 4.18). Estos valores se especifican en las normas legales de muchos países. Un ejemplo de los valores NC que recomiendan las normas americanas se dan en la tabla 4.3 a continuación.

TABLA 4.3

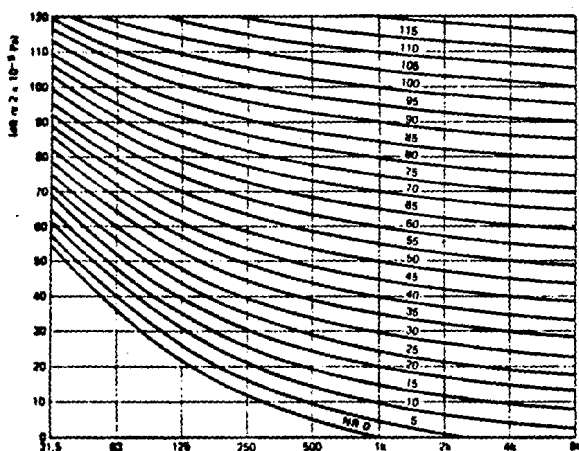
L U G A R	RANGO DE NC ACEPTABLE
Fábrica (Maquinaria ligera)	45-65
Fábrica (Maquinaria pesada)	55-75
Cocinas	40-50
Baños	35-50
Tiendas	35-45
Restaurantes, Bares , Cafeterías	35-45
Oficinas Mecanizadas	40-50
Oficinas en general	35-45
Oficinas privadas, librerías, salones de escuela	30-35

TABLA 4.3 Continuación...

L U G A R	RANGO DE NC ACEPTABLE
Casa y recámaras	25-35
Hospitales y Salas de hospitales	25-35
Cines	30-35
Teatros e Iglesias	25-30
Salas de concierto y de Ópera	20-25
Estudios de grabación y radio	15-20

En Europa se utiliza la norma ISO, que usa como norma las curvas de régimen o clasificación de ruido (Noise Rating Curves), Fig. 4.19.

LB



Frecuencia central de la Banda de Octava

Fig. 4.19 Curvas de régimen o clasificación de ruido

Las curvas ó contornos de la Fig. 4.19, muestran la intensidad en bandas de frecuencia por octavas y encima de cada contorno tienen un número NR; que como en el caso de los números NC, existen tablas en las normas europeas para recomendaciones sobre niveles aceptables. La tabla 4.4, a continuación, es una muestra de la aplicación de estas normas.

TABLA 4.4

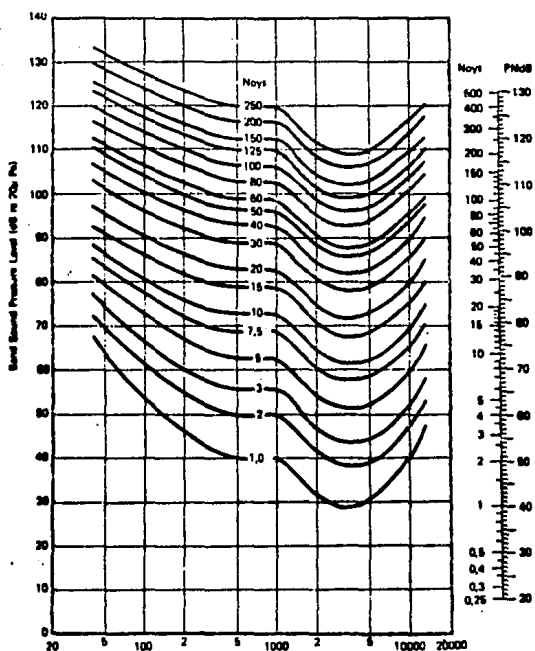
L U G A R	RANGO DE NIVEL NR
Talleres	60-70
Oficinas mecanizadas	50-55
Baños y gimnasios	40-50
Restaurantes, Bares y Cafeterías	35-45
Oficinas privadas, librerías	30-40
Cines, Hospitales, Iglesias y pequeñas salas de conferencia	25-35
Salones de clase, estudios de T V y grandes salones de conferencias	20-30
Teatros y salas de concierto	20-25
Clinicas de diagnóstico y cuartos para pruebas audiométricas	10-20

Todas estas curvas de criterio de ruido (NC), Tabla 4.3, Fig. 4.18 y clasificación de regímenes de ruido (NR), Tabla 4.4, Fig. 4.19; son lo que recomiendan para trabajar en estos lugares a gusto sin molestias ni quejas; sin problemas para hacerse entender, ni ruido que interfiera en el desempeño de las actividades. En estas curvas se ve que se le ha dado más importancia a las frecuencias altas. Estas curvas que se encuentran en la norma ISO R 1996, toman en cuenta la respuesta

del oído humano.

Al hacer mediciones con un analizador de espectro y pasar los resultados a una gráfica de este tipo, hay que verificar que no sobresalga en exceso alguna de las bandas porque de ser así, significaría que existen tonos puros destacados y eso, se castiga aún más.

Además de las curvas anteriores, se han desarrollado las curvas o contornos de igual ruido o "Noisiness Countours", Fig. 4.20. Estas curvas se utilizan para denotar la molestia de un ruido y la unidad es el NOY. Los ruidos que tienen frecuencias arriba de 1000 Hz y los tonos puros, son más molestos; al igual que el ruido intermitente e irregular o rítmico son más molestos, ya que, el ser humano se acostumbra al ruido estable y constante. Las curvas de igual sonoridad de ruido o Noys, se desarrollaron principalmente para reglamentar el vuelo, despegue y aterrizaje de los aviones en ciudades. El ruido se mide con un analizador de espectro en octavas ó tercio de octavas y, los Noys se convierten a nivel de ruido percibido - FNdB (a la derecha de la curva de Noys).



Frecuencias centrales de la banda de octavas
o tercios de octava

Fig. 4.20 Contornos de igual ruido o "Noisiness Contours"

Si el nivel del espectro no es parejo; es decir, tiene alguna frecuencia que sobresale de las otras, el ruido tiene tonos puros. Esto es muy frecuente al medir aviones, ya que comunmente las turbinas de éstos, los producen en altas frecuencias. Todos estos estudios y normas que se han desarrollado en otros países con el empleo del analizador de espectro, por desgracia, no se aplican en México. Las normas que teóricamente la

Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, dice utilizar, nadie de la propia dependencia gubernamental sabe de ellas y ni siquiera las conoce. Menciona esto por experiencia propia y, un ejemplo de ello, son los camiones y vehículos de la ciudad; así como las fábricas, que no cumplen con ninguna norma y que nos están dejando sordos a todos.

CONTROL DEL RUIDO

La primera regla en el control del ruido es la de diseñar o modificar la construcción de las máquinas, para hacerlas lo menos ruidosas posible. Otras maneras de reducir el problema del ruido, es cambiar el índice de directividad de las máquinas y, que de esta manera no radie hacia las personas. Otra, sería aumentar la distancia entre el objeto ruidoso y los oyentes potenciales.

En lo tocante a máquinas, también se puede encerrar o aislar acústicamente a una máquina, para que no radie su energía (Ver Fig. 4.22). A fin de que los ingenieros puedan aplicar cualquiera de estas técnicas cuantitativamente, debemos considerar los siguientes factores :

1) Determinación de la potencia acústica radiada por la fuente de ruido en cada grupo de frecuencias. Por lo general, las mediciones se hacen con un analizador de espectro de octavas o tercio de octavas, ó con un analizador de banda angosta. La selección del tipo de analizador dependerá de varios factores como la precisión deseada en el estudio del ruido, el factor económico, etc. (Ver Fig. 4.42).

Los resultados obtenidos con cualquiera de estos analizadores, se reducen en ocasiones, a los que se habrían obtenido con un analizador de 1 Hz. de ancho de banda.

Si la representación gráfica se hace en niveles de potencia (en dB) en función de la frecuencia, se llama nivel de potencia espectral.

- 2) Deben medirse las características direccionales de la fuente para varias frecuencias. Se pueden hacer mapas acústicos del local.
- 3) Deben estudiarse los caminos de transmisión o medio ambiente que acoplan el ruido producido, con el oyente.
- 4) La magnitud de reducción de ruido requerida.
- 5) Elegir el criterio que se utilizará para resolver el problema.

Si se desea cambiar el tipo de maquinaria empleada, se recomienda hacer un análisis espectral de las máquinas que se piensa substituir y otro de las máquinas propuestas para reemplazarlas, de ésta manera podemos comparar y ver si realmente son la solución más adecuada al problema; evitándonos el hacer una compra inútil.

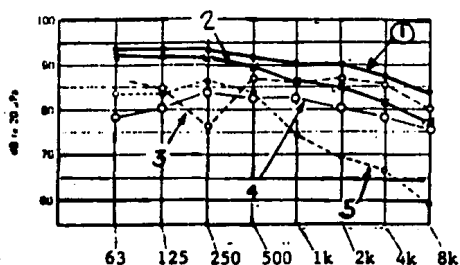
Otra forma de atacar el problema, sería tratar acústicamente el local donde está la maquinaria, Fig. 4.22. Sin embargo, para esto también necesitamos conocer el espectro que produce la maquinaria, para elegir el material más adecuado. En ocasiones, el análisis espectral nos revela que el problema son las vibraciones ó el acoplamiento de una máquina con una superficie que resuena a la misma frecuencia, Fig. 4.24. Trataré con más detalle este problema de las vibraciones, en el punto de " análisis de vibraciones y mantenimiento de maquinaria ".

Una nueva técnica que se está empleando en Estados Unidos de Norteamérica y en Europa, es la del antirruido. Este método consiste en analizar el ruido producido por una máquina con un analizador de espectro conectado a una computadora que controla un generador de antirruido. El ruido producido por la máquina debe ser estable, es decir, no debe ser impulsivo. Siendo el ruido estable, el análisis espectral le indica a la computadora qué frecuencias están presentes y con qué intensidad; entonces la computadora crea el antirruido, es decir el mismo ruido pero desfasado 180 grados, anulando de esta manera el ruido producido por la máquina. Actualmente ya se venden este tipo de sistemas antirruido con muy buenos resultados y cada día se investiga en este sentido ya que la industria militar está muy interesada en desarrollar e instalar este sistema en equipo militar, como tanques, submarinos, etc., para hacerlos acústicamente invisibles.

Resumiendo, el análisis espectral nos permite concentrarnos en las frecuencias problema y atacarlas de la manera más conveniente, de acuerdo a nuestras posibilidades.

Cuando se quiere rediseñar una máquina también es conveniente conocer las fuentes de ruido de esa máquina (Ver Figs 4.21 y 4.44); de esta manera podemos poner nuestra atención en el diseño de una parte en particular de la máquina ó posiblemente el problema no sea la máquina en sí. Pueden ser también los dispositivos conectados a ella, como el tubo de escape de un motor.

dB



Frecuencias centrales de la banda de octava

- 1.- Espectro total de la máquina
- 2.- Espectro del escape de los gases
- 3.- Ruido provocado por el rozamiento mecánico
- 4.- Ruido de la vibración de las partes de fundición del motor
- 5.- Ruido provocado por la admisión

La Fig. 4.21 muestra el análisis espectral de un motor de combustión interna y los diferentes espectros de las diferentes partes del motor que contribuyen al espectro total.

La Fig.4.22 muestra una máquina sin ninguna clase de tratamiento (a) y los cambios que van ocurriendo en su espectro (a la derecha) conforme se van efectuando diferentes cambios (de las figuras b a la h)

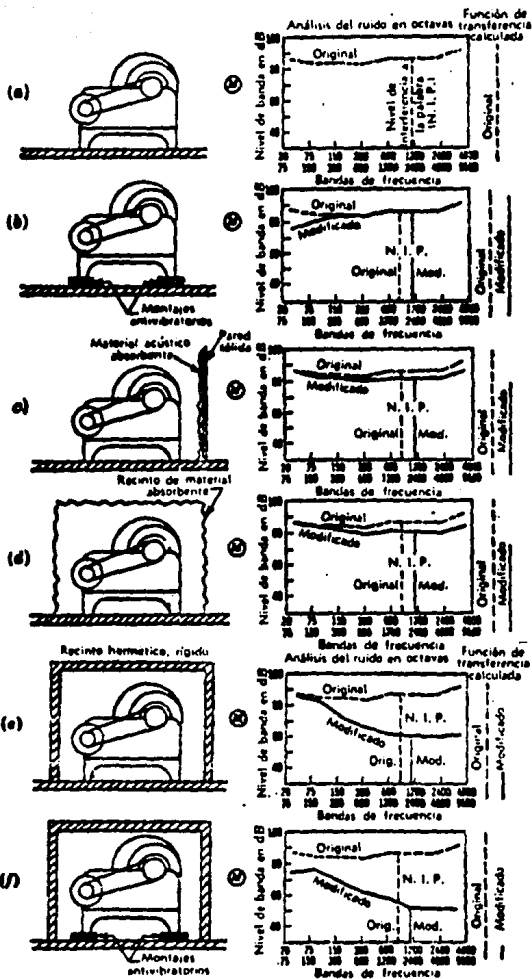


Fig. 4.22 Ejemplos de los grados de atenuación logrados en el espectro, utilizando diferentes métodos. La sonoridad calculada antes y después de la modificación está representada por las barras a la derecha de cada gráfica

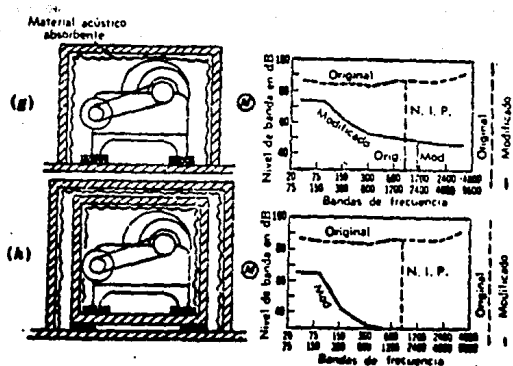


Fig. 4.22 (Cont.)

Otra forma de reducir el ruido, puede ser el modificar la forma ó proceso de trabajo.

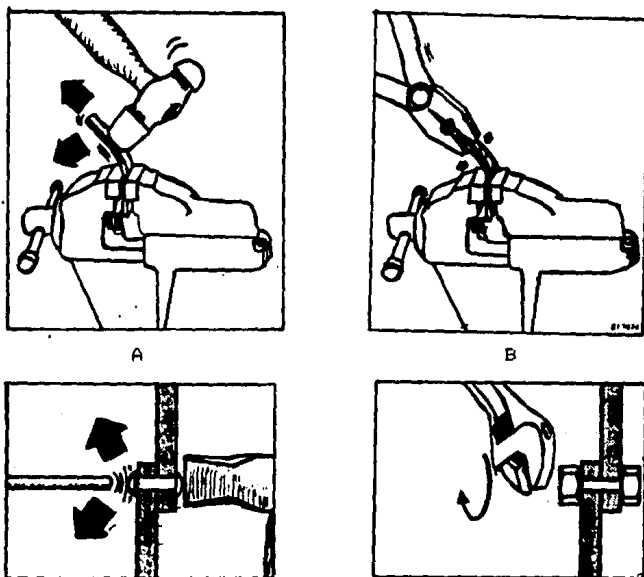


Fig. 4.23 Modificaciones en el proceso de manufactura pueden reducir substancialmente el nivel de ruido. A la izquierda el procedimiento es mucho más ruidoso que a la derecha

Las superficies que puedan radiar ruido y por lo tanto amplificarlo deben de evitarse. En el ejemplo de la Fig. 4.24, se ve cómo un panel de instrumentos acoplado a la mesa del motor vibra con el movimiento del mismo y, amplifica notablemente el ruido total. Quitando el panel de la mesa y pegándolo a una pared se evita.

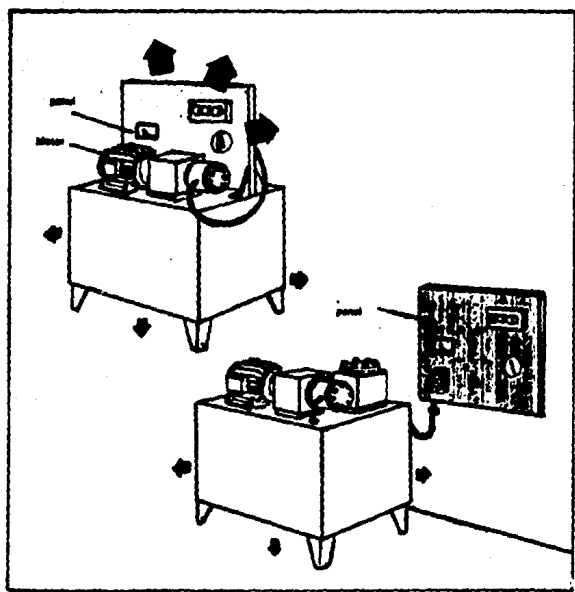


Fig. 4.24 Ejemplo de cómo una superficie acoplada a la fuente de vibraciones amplifica el nivel de ruido

En la Fig. 4.25, se ven dos ejemplos más sobre la reducción de ruido, todos estos ejemplos y mucho más vienen explicados ampliamente en el libro sobre reducción de ruido "Noise Control" (Ref. 8), editado por la compañía Brüel & Kjaer, de Dinamarca y contiene magníficos ejemplos de cómo reducir el ruido en muchas actividades de nuestra vida diaria ya que sin darnos cuenta lo producimos de forma innecesaria.

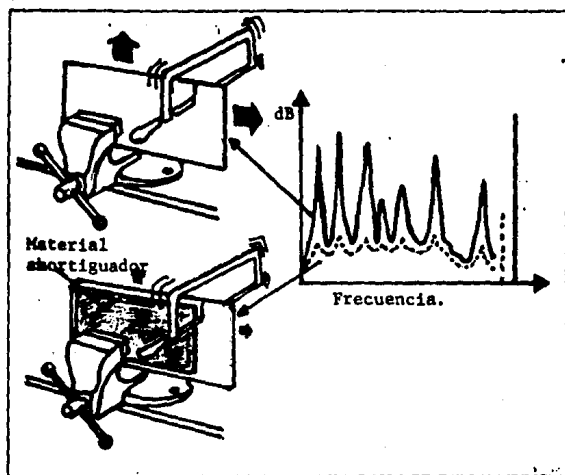


Fig. 4.25 Al cortar un pedazo de lámina, se atenúa notablemente el espectro del ruido producido si se coloca un material amortiguador entre la prensa y la pieza.

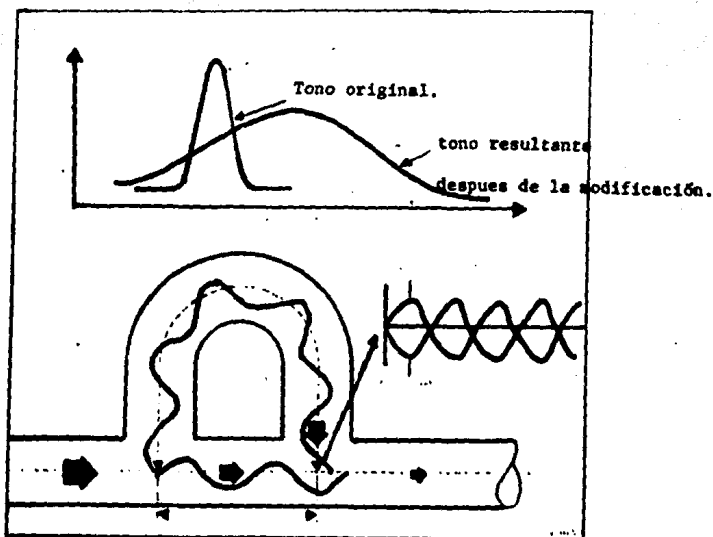


Fig. 4.26 En un tubo de escape, pueden existir tonos puros muy molestos, una manera de eliminarlos es hacer una pequeña desviación para que un tono desfasado 180 grados destruya la señal original. Este tipo de aplicación se usa en el diseño de tubos de escape y silenciadores industriales.

4.4.2 Acústica Arquitectónica.

La influencia de la acústica en el diseño de edificios puede observarse en todas las épocas; desde los teatros al aire libre en la antigua Grecia, hasta las casas y edificios de hoy en día, donde pasamos gran parte de nuestra existencia.

La gran diferencia entre la antigüedad y nuestra vida moderna, son ciudades sobrepobladas, con un alto índice de ruido producido por diversas fuentes como vecinos, tubería, elevadores, tráfico

de vehículos, etc.

En la acústica arquitectónica existen dos áreas principales; por un lado la acústica que se encarga de estudiar la distribución del sonido en salas, salones, etc., tenemos ejemplos como : la reproducción del sonido, la inteligibilidad de las palabras, los estudios del tiempo de reverberación, la absorción del sonido, etc. Por el otro lado, está la acústica que estudia el aislamiento, la transmisión del sonido y la reducción del ruido.

El comportamiento del sonido en un local.

El conocimiento del comportamiento del sonido en un recinto ó local es de suma importancia si queremos adaptar el cuarto para un uso específico, como puede ser; para conferencias, sala para música, salón de clases, oficinas, etc.

Los factores más importantes que determinan el comportamiento del sonido en un local, son :

a) La reflexión del sonido :

Como ya se vió en el tema de comportamiento del sonido en el medio ambiente, el sonido " rebota " ó es reflejado cuando incide sobre una superficie , Figs. 4.4, 4.5 y 4.27. Mencioné de igual forma, que parte de la energía acústica se transmite a través de la superficie. Lo importante en acústica arquitectónica, sobre esta reflexión es que él que escucha un sonido en un local, va a escuchar en primera instancia, el sonido directo de la fuente; es decir, el sonido que nos llega sin sufrir ninguna reflexión y, después de un tiempo, escuchamos el sonido reflejado. Esto se ilustra en la figura 4.27.

La importancia de tomar en cuenta el tiempo que se tarda en llegar a los oídos del oyente el sonido reflejado, estriba en que

si este tiempo es mayor a 50 microsegundos, la reflexión sonará como un eco y, si este tiempo es menor, incrementará la sonoridad aparente del sonido original (a este efecto se le llama efecto Haas). Esto es un punto importante, a considerar cuando se diseña un local.

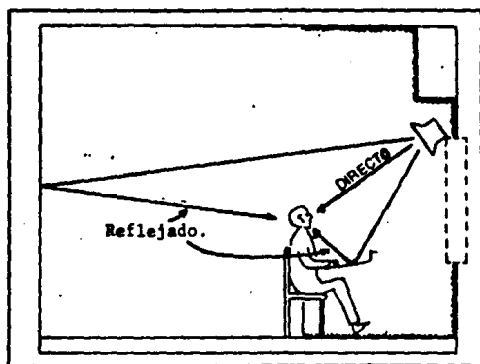


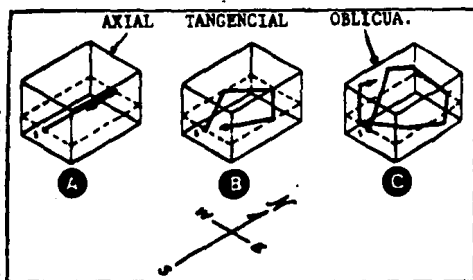
Fig. 4.27 Cuando escuchamos un sonido, parte de éste es directo y parte reflejado.

b) Modos de resonancia de un local ó recinto :

Cuando una fuente sonora se activa en un local, un cierto número de resonancias naturales ó modos de resonancia de este local se excitarán, Fig. 4.28. El tipo de modo excitado depende de cómo se refleja la onda inicial y regresa al punto de excitación en la misma fase y dirección que la onda inicial.

Si tenemos un local o cuarto y, todas las paredes que lo componen son paralelas entre sí (Fig. 4.24) y tenemos una fuente sonora en el centro de este cuarto, 3 tipos de modos se pueden excitar

aquí, Fig. 4.29. Estos modos de resonancia son :



1. Modo axial entre dos paredes paralelas
2. Modo tangencial entre cuatro paredes
3. Modo oblicuo entre las seis paredes del local

Fig. 4.28 Modos de resonancia de un local

Si nada más existieran dos paredes y por lo tanto sólo hubiera modos de resonancia axial, Fig. 4.29, la manera de calcular las frecuencias a las que va a resonar este local en modo axial, sería :

Para la frecuencia fundamental $F_0 = \frac{C}{2L}$ donde C, es la

velocidad del sonido y L, la distancia entre las dos paredes paralelas. El primer modo de resonancia axial, estaría en F_0 , el segundo en $2F_0$, el tercero en $3F_0$, así sucesivamente.

Presión
sonora

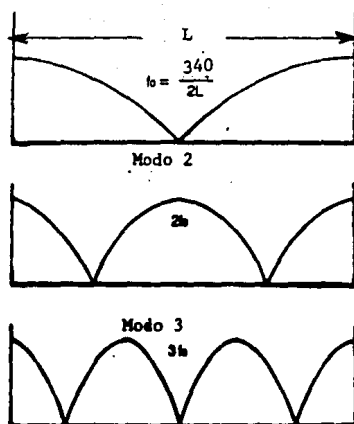


Fig. 4.29 Cuando sólo existen 2 paredes paralelas, tenemos modo axial :

Modo 1 ó Fundamental
Modo 2 = $2f_0$
Modo 3 = $3f_0$

El modo axial es para el caso de sólo dos paredes, pero cuando tomamos en cuenta las otras paredes que forman un cuarto rectangular; cada par de paredes va a tener sus frecuencias de resonancia y sus múltiplos. La combinación entre los diferentes modos de resonancia de un cuarto se manifiestan en una distribución espacial de presiones sonoras mínima y máxima. Uno puede considerar a un cuarto como un resonador con un cierto número de frecuencias naturales o modos asociados a la geometría del cuarto y a las frecuencias emitidas en el mismo. Para calcular los diferentes modos de resonancia de un cuarto, usamos

la siguiente ecuación (4.3), que es una solución de la ecuación de onda para el caso particular de un cuarto rectangular, con la fuente radiando en el centro del cuarto.

$$\text{FRECUENCIA} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{p^2}{L^2} + \frac{q^2}{W^2} + \frac{r^2}{H^2}}$$

donde la frecuencia es la del modo de resonancia en cuestión.

C es la velocidad del sonido que en condiciones normales es de 340 m/Seg.

L es la longitud del cuarto

W es el ancho del cuarto

H la altura del cuarto

p, q y r nos dan el modo de resonancia deseado.

Un ejemplo de la frecuencia de resonancia que tiene un cuarto con las siguientes dimensiones 7.85 x 6.25 x 4.95 se da en la Tabla 4.5 a continuación.

TABLA 4.5

n_x	n_y	n_z	f (Hz)	n_x	n_y	n_z	f (Hz)
1	0	0	21,7	1	1	2	77,0
0	1	0	27,2	2	2	1	77,6
0	0	1	34,3	3	1	1	78,4
1	1	0	34,8	2	0	2	81,2
1	0	1	40,6	0	3	0	81,6
2	0	0	43,3	1	3	0	84,4
0	1	1	43,8	3	2	0	84,7
1	1	1	48,9	2	1	2	85,6
2	1	0	51,1	4	0	0	86,6
0	2	0	54,4	0	2	3	87,6
2	0	1	55,3	0	3	1	88,5
1	2	0	57,6	1	2	2	90,3
2	1	1	61,1	4	1	0	90,8
0	2	1	64,3	1	3	1	91,1
3	0	0	65,0	3	2	1	91,4
1	2	1	64,9	2	3	0	92,4
0	0	2	68,7	4	0	1	93,2
2	2	0	69,5	3	0	2	94,5
3	1	0	70,4	4	1	1	97,1
1	0	2	72,0	2	2	2	97,7
3	0	1	73,5	3	1	2	98,4
0	1	2	73,9	2	3	1	98,6

Ejemplos de modos de resonancia de un cuarto con dimensiones : 7.85 Mts. x 6.25 Mts. x 4.95 Mts.

Los modos de resonancia con 2 ceros, son axiales; con un cero, son tangenciales y sin ningún cero, son oblicuos.

La representación de cómo se vería la presión sonora con diferentes tipos de modos de resonancia, se ilustran en las figuras 4.30,4.31,4.32,4.33 .

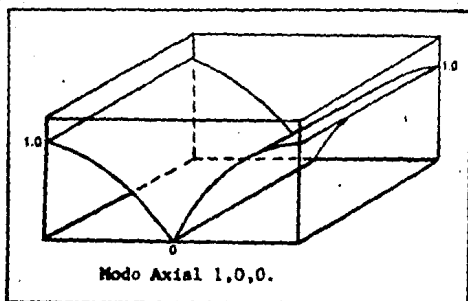


Fig. 4.30 Modo axial 1,0,0.

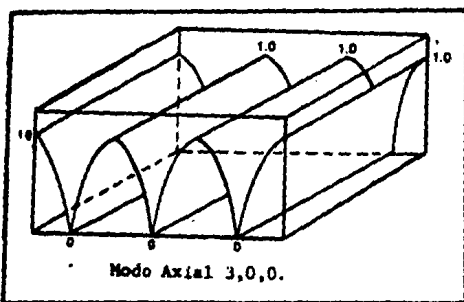


Fig. 4.31 Modo axial 3,0,0

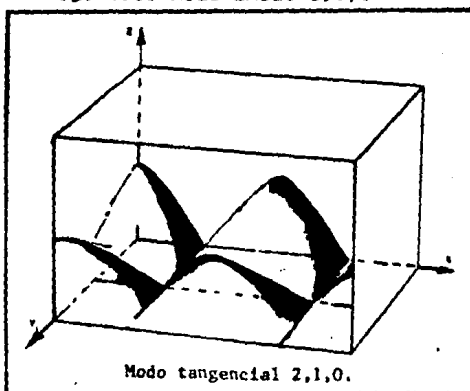


Fig. 4.32 Modo tangencial 2,1,0.

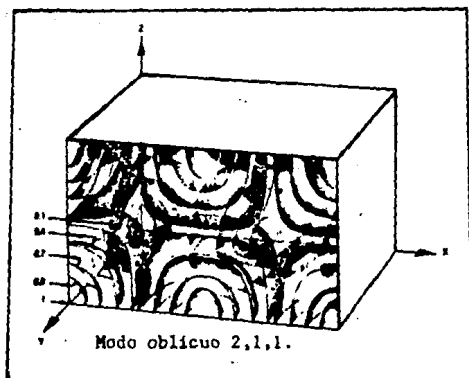


Fig. 4.33 Modo oblicuo

Los estudios de los modos de resonancia de un cuarto, son importantes cuando se estudia la distribución del sonido en un local al igual que el tiempo de reverberación, con el espectro; ya que en estas frecuencias específicas ocurren fenómenos especiales que se necesitan estudiar más a fondo para eliminar los efectos indeseables.

c) Absorción del sonido :

Cada vez que ondas sonoras tocan un obstáculo ó una superficie de un cuarto, una parte de la energía se absorbe, Fig. 4.4. Cuando la fuente sonora que excita un cuarto o local, se interrumpe, la energía gradualmente se reduce hasta extinguirse completamente. El tiempo que perdure la energía acústica en este local, va a depender de la absorción del material con el que está construido y recubierto el lugar.

El tiempo de reverberación

La reverberación se define como la prolongación del tiempo de duración de un sonido a consecuencia de las reflexiones en el

local, Fig. 4.34. Al tiempo de reverberación se le ha definido como el tiempo requerido para que el sonido disminuya a una milésima de su valor, después de que la fuente de energía sonora ha cesado. Este milésimo equivale a 60 decibeles.

Un sonido decae en un local de una manera exponencial cuando se grafica linealmente, como la Fig. 4.34.

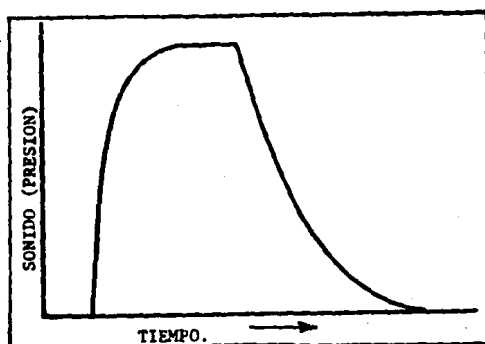


Fig. 4.34 Tiempo de reverberación graficado linealmente

Cuando la escala es logarítmica, la pendiente de caída es lineal, ver Fig. 4.35 y, es más fácil y práctica para su manejo.

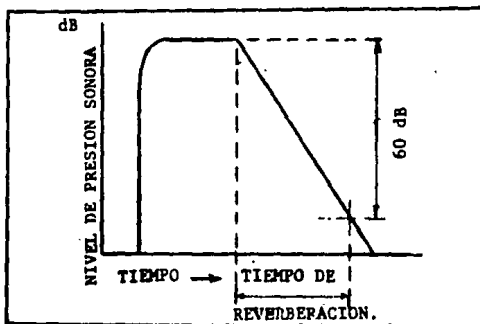


Fig. 4.35 Tiempo de reverberación graficado logarítmicamente

Cálculo del tiempo de reverberación.

A principios de este siglo, W. C. Sabine hizo muchos estudios e investigaciones de la acústica de locales y encontró la ecuación 4.4 empírica, que relaciona el tiempo de reverberación con el volumen del local y la cantidad de material absorbente del recinto. A esta ecuación (4.4) se le conoce como la fórmula Sabine y da una muy buena indicación del comportamiento del sonido en locales comúnmente usados. Para locales con mucho material absorbente como sería una cámara anecoica (Cuarto " sin nada " de reflexiones - sin ecos) esta relación ó fórmula de Sabine es inadecuada.

$$RT = \frac{0.161 V}{A} \quad \text{ec. 4.4}$$

donde : RT = Tiempo de Reverberación

V = el volúmen del local en Mts. cúbicos

A = es la absorción total del local expresada en Mts. cuadrados - sabins

0.161 es un valor empírico constante en sabins / metro

La absorción unitaria de un metro cuadrado - sabin representa una superficie capaz de absorber el mismo sonido que un m^2 de un material ó superficie absorbente, como por ejemplo una ventana de $1 m^2$.

La importancia del tiempo de reverberación en el diseño de un local.

En un cuarto donde la superficie de las paredes, techo y piso son sumamente reflejantes, el tiempo de reverberación es relativamente alto. Mientras que en una cámara anecoica, que está cubierta en todas sus superficies con material altamente absorbente, el tiempo de reverberación es prácticamente cero.

La cantidad de sonido que absorbe un material depende de la frecuencia. Las frecuencias más altas se absorben más fácilmente; las frecuencias graves son difíciles de absorber. Esta absorción es debida entre otras cosas a la longitud de onda. Es muy importante que el tiempo de reverberación sea el adecuado para el uso que se le intenta dar al local en cuestión. Con demasiado tiempo de reverberación, un local es inadecuado para conferencias, ciertos tipos de música y, favorece un ruido de fondo elevado. Un local con un tiempo de reverberación demasiado bajo lo convierte en un local acústicamente muerto; que sería inadecuado para escuchar música orquestal y, provocaría que un conferenciante ó maestro hiciera mucho esfuerzo para hacerse oír

bien.

El tiempo de reverberación se mide en función de la frecuencia.

Para medir el tiempo de reverberación, se utiliza un analizador de espectro y una computadora que nos dá una gráfica tridimensional dB-frecuencia-tiempo de reverberación, Fig. 4.36; para obtener una gráfica de este tipo, se usa un equipo como el mostrado en la Fig. 4.37.

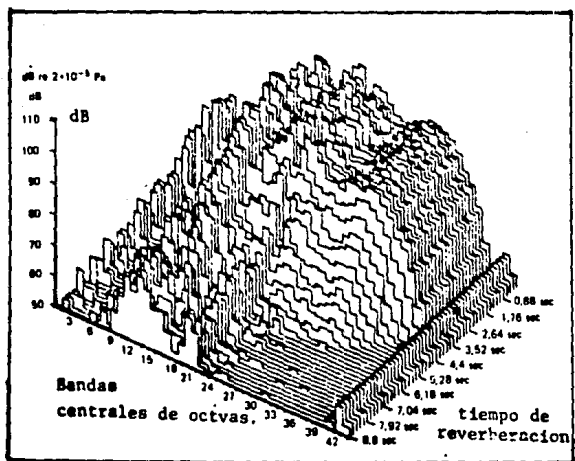


Fig. 4.36 Gráfica del tiempo de reverberación en función de la frecuencia y el nivel de presión sonora en decibales (referido a 20 micropascales).

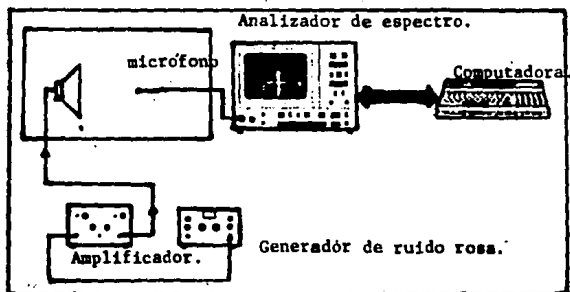


Fig. 4.37 Demostración de la manera en la que se medirá el tiempo de reverberación / equipo utilizado

El coeficiente de absorción de un material

El coeficiente de absorción de un material indica la porción de sonido absorbida por dicho material, en relación con el total de sonido que incidió sobre él. El coeficiente total de absorción de una superficie está dado por el coeficiente de absorción multiplicado por el área que ocupa el material en cuestión. El coeficiente de absorción varía con la frecuencia y el ángulo de incidencia del sonido. Existen tablas que indican el valor del coeficiente de absorción para incidencia aleatoria en función de la frecuencia. Estas tablas ayudan a elegir el material que nos es de utilidad para modificar la acústica de un local. Algunos ejemplos de estas tablas se encuentran al final de este trabajo como un apéndice. (Apéndice B).

La distribución del sonido.

La distribución adecuada y uniforme del sonido es de vital importancia en salones de clase, salas de conferencia, salas de

concierto, de Ópera, en teatros, etc; Fig. 4.38.

La distribución del sonido varía con la frecuencia; puede modificarse introduciendo materiales absorbentes ó superficies reflejantes que dispersen el sonido.

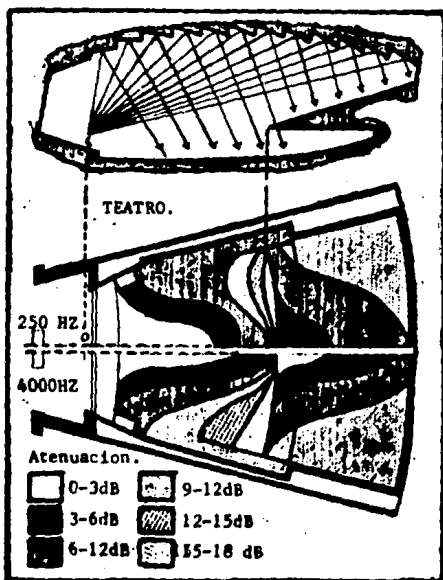


Fig. 4.38 Ejemplo de la distribución del sonido y la atenuación que sufre en un teatro para dos frecuencias

En la Fig. 4.38 (arriba), se ve el plano de distribución de sólo dos frecuencias, 250 y 4000 Hz., pero este tipo de planos de

distribución se hacen para todas las frecuencias centrales de los filtros de banda por octavas. Para obtener este tipo de plano, se excita la sala con ruido rosa desde el escenario y con un analizador de espectro, se recorre la sala en las diferentes secciones de interés. Mientras más lugares se eligen para medir, mejor será el plano obtenido de la sala.

Aislamiento acústico.

Uno de los ideales del ser humano, es poder aislar adecuadamente un local, para permitir a un maestro dar una clase sin intromisión de ruidos; escuchar un concierto de música sin ruidos extraños, tener una conferencia en forma privada y, sobretodo, no escuchar a los vecinos cuando queremos descansar en nuestras casas.

Este aislamiento es prácticamente imposible por los múltiples caminos que utiliza el sonido para difundirse, como pueden ser el aire, las paredes, pisos, ductos de aire acondicionado y de la instalación eléctrica, ventanas, puertas, etc.

La cantidad de sonido que se transmite entre locales y del δ hacia el exterior, también depende de la frecuencia. Para medir el grado de aislamiento de un local, se utiliza lo que se llama índice de reducción de sonido. Este índice de reducción se expresa en decibeles y significa el número de decibeles que la pared δ local en cuestión atenúa el sonido original. Para medir la reducción entre un local y otro; primero se excita el local con ruido rosa y se analiza la intensidad por banda de frecuencia en ese local, después se vuelve a medir el espectro, pero ahora en el lugar que deseamos conocer la atenuación que se obtiene. En la Fig. 4.39, se ve un ejemplo de cómo se mediría la atenuación

entre diferentes cuartos. En el inciso 1 de esta Fig. 4.39, la fuente sonora emite ruido rosa, se analiza la señal en este cuarto y se anota la intensidad en cada banda de frecuencias en el inciso 2, se vuelve a analizar la señal que se está emitiendo desde el cuarto número 1 y se compara la intensidad de la señal en cada banda. Con lo anterior, obtenemos la atenuación entre el cuarto 1 y 2. De igual manera hacemos en el cuarto número 3 y así sucesivamente si hubiera más cuartos.

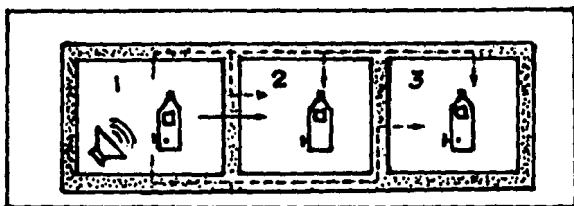


Fig.4.39 Medición del aislamiento acústico que existe entre los cuartos 1,2 y 3 usando ruido rosa y un analizador de espectro de audio

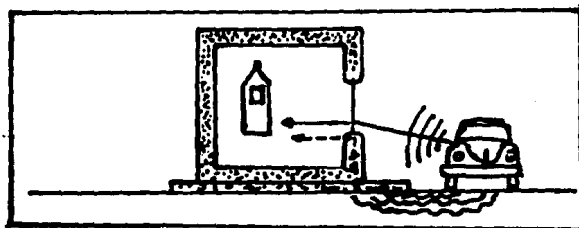


Fig. 4.40 Medición de la atenuación que existe entre el exterior y el interior de un local, usando un analizador de espectro

En la Fig. 4.40, se muestra la medición del aislamiento entre el exterior y el interior de un local. Para saber la atenuación que sufre el ruido de la calle y las vibraciones del paso de los vehículos, tomamos una medida en el exterior, posteriormente repetimos la medición, pero esta vez en el interior del local y, comparamos la medición para ver la atenuación que sufrió el ruido y la vibración en cada banda de frecuencia.

La Fig. 4.41 muestra el grado de aislamiento que debe haber entre las paredes de una vivienda y otra, según la norma ISO/R717 1968.

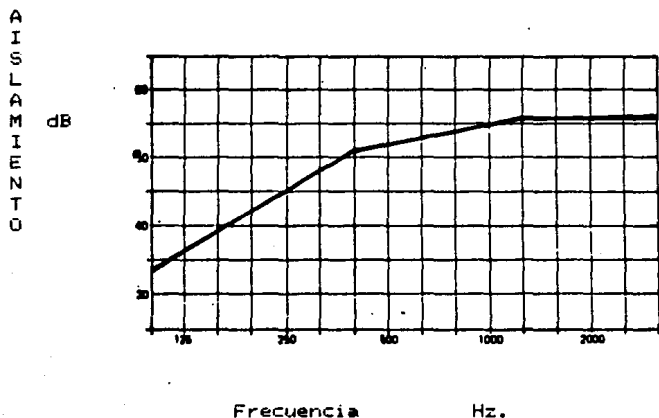


Fig. 4.41 Norma ISO/R717 - Niveles de aislamiento acústico que deben existir en viviendas contiguas

También existen normas para el grado de aislamiento entre la fachada de un edificio o una casa y la calle, el grado de aislamiento al ruido provocado por los pasos de un individuo, etc.

En resumen, en la acústica arquitectónica es de mucha utilidad el analizador de espectro de audio, permitiendo la detección de ecos, mejorar el posicionamiento de reflectores, mejorar la

inteligibilidad de la palabra en un local, medir el tiempo de reverberación, conocer la absorción del sonido, el índice de aislamiento, etc.

4.4.3 Análisis de vibraciones y mantenimiento de máquinas.

Desde que el Hombre utiliza motores para mover máquinas, un problema que ha surgido, son las vibraciones. En la práctica es muy difícil evitarlas. Se suelen producir por efectos dinámicos de las tolerancias de fabricación, las holguras, la fricción entre piezas y los desequilibrios de los elementos alternantes. En ocasiones, pequeñas fuerzas insignificantes, pueden excitar resonancias de elementos estructurales y convertirse en considerables vibraciones, ruido y, en el desgaste de las propias máquinas.

Para estudiar las vibraciones y ayudar a corregir el diseño de máquinas, planear el mantenimiento y tomar medidas adecuadas para reducirlos, se han desarrollado técnicas de medida adecuadas para el estudio de máquinas con grandes tensiones y velocidades. Con acelerómetros piezoeléctricos, que convierten el movimiento vibratorio en señal eléctrica, se pueden analizar las vibraciones (en función de su frecuencia).

¿ Qué son las vibraciones ?

Se dice que un cuerpo vibra cuando realiza un movimiento oscilante respecto a una posición de referencia. El número de veces por segundo que realiza el ciclo completo se llama frecuencia de oscilación. Las vibraciones suelen contar en la práctica con muchas frecuencias simultáneas, de forma que por simple examen de su relación de amplitud en el tiempo, no se

puede saber cuántos componentes existen y de qué frecuencia. Al analizar en frecuencia las vibraciones de una máquina, se suelen hallar ciertos componentes predominantes que están relacionados directamente con los movimientos fundamentales de diversas partes de la máquina. Con el análisis en frecuencia, se pueden identificar así las fuentes de vibración indeseadas.

La elección del analizador de espectro.

No existe respuesta concreta sobre el tipo de analizador a emplear en el estudio de las vibraciones. El analizador de espectro en octavas y tercio de octava, Fig. 4.42A., tienden a reflejar la respuesta natural de los sistemas mecánicos a las vibraciones forzadas y permiten presentar de una manera compacta, una extensa gama de frecuencias. Por ello, son los más utilizados en el estudio de las vibraciones.

El analizador de banda constante angosta, de mejor resolución en altas frecuencias cuando se presenta en escala lineal, es muy útil para estudiar conjuntos de armónicas. Por el largo tiempo que requiere el estudio con analizador de banda angosta constante, cuando se necesita abarcar una extensa gama de frecuencias, se suelen realizar primero análisis con banda ancha; de esta manera, podemos identificar las zonas de mayor interés y entonces sí, hacer uso de analizadores más selectivos en estas zonas en las que se requiere más detalle.

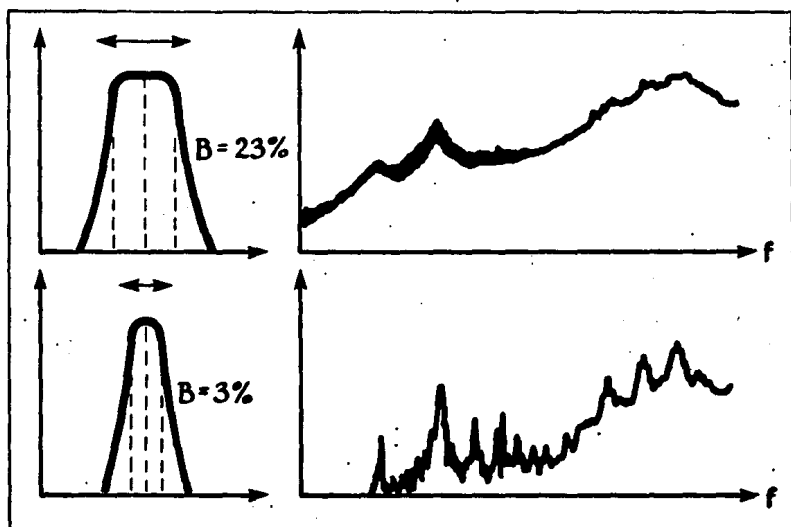


Fig. 4.42 Variación en la precisión obtenida con diferentes tipos de ancho de banda, en porcentaje de la frecuencia central.

El Mantenimiento de las máquinas.

El deterioro de una máquina normalmente es paulatino, rara vez sin dar síntomas antes del colapso. Uno de esos síntomas es el aumento en las vibraciones y ruido.

La política acostumbrada en las fábricas es la de dar mantenimiento después de un cierto tiempo é uso. Pero actualmente el mantenimiento llamado por nivel de actuación, Fig. 4.43A, permite dar mantenimiento sólo cuando es necesario y prever

cuando se necesitará hacer una reparación mayor. Esto ahorra tiempo cuando se descompone una máquina, ya que se previó con anticipación, el pedir refacciones y se planeó la producción considerando estos contratiempos. También se ahorra dinero al hacer sólo los mantenimientos necesarios. Cuando una máquina está nueva, se le hace un análisis espectral en frecuencia, este análisis se almacena para compararlo con otros posteriores; éstos últimos podrán detectar la necesidad de actuar y la causa de la perturbación. En la Fig. 4.43, se muestran el análisis espectral de una máquina y dos análisis posteriores de la misma; en ellos se puede ver el incremento de nivel que han tenido los espectros. En la Fig. 4.44, se ve una máquina y las partes que contribuyen a crear el espectro; si alguno de estos componentes del espectro aumentan posteriormente, se sabrá cual de las partes necesita reparación antes de desarmar la máquina.

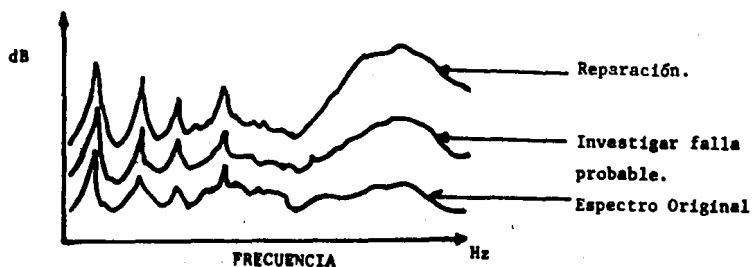


Fig. 4.43 Ejemplo de niveles de actuación de una máquina.

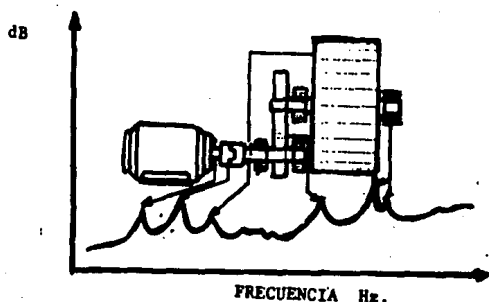


Fig. 4.44 Partes de la máquina que crean el espectro de la misma

Las vibraciones y el cuerpo humano.

Desde hace tiempo se ha reconocido que las vibraciones pueden ser nocivas para la salud. Los obreros pueden sufrir visión borrosa, pérdida de equilibrio, pérdida de concentración, etc. En algunos casos, vibraciones de ciertas frecuencias y niveles, pueden dañar de manera permanente a órganos internos del cuerpo. Ciertas actividades en las que están involucradas las vibraciones, producen la degeneración gradual de los tejidos vasculares y nerviosos, perdiendo el obrero la sensibilidad manual y su destreza. Actualmente, se preparan normas sobre vibraciones, que fijarán los espectros máximos tolerables en las asas de las herramientas mecánicas manuales. La primera recomendación internacional publicada sobre las vibraciones y el cuerpo humano, es la ISO 2631/1974, Fig. 4.45, que establece curvas límites para exposiciones que van desde un minuto hasta 12 horas, en la gama de frecuencias que se ha determinado de máxima sensibilidad para el ser humano y, que va de 1 a 80 Hz. La recomendación cubre casos en los que el cuerpo humano está sometido a vibraciones en

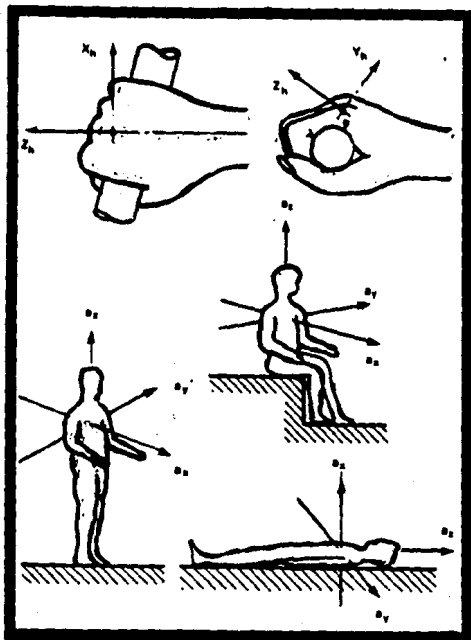
tres superficies de apoyo; los pies, para una persona de pie; las posaderas, para una persona sentada y toda la de apoyo, para una persona acostada, Fig. 4.45A. Se establecen tres criterios de severidad :

1) Un límite de comodidad reducida, aplicable al transporte de pasajeros y otros.

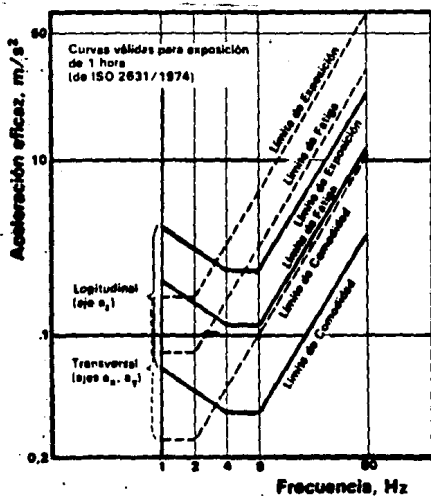
2) Otros con eficiencia reducida con fatiga, que se aplica a conductores de vehículos y operadores de máquinas

3) El de exposición límite, que representa peligro para la salud.

La Fig. 4.45A, muestra los " ejes " que se consideran como direcciones de las vibraciones en el cuerpo humano y las curvas que da la norma ISO 2631/1974 para exposición de 1 Hr. (Fig. 4.45B).



A



B

Fig. 4.45 ISO 2631/1974, para exposición a las vibraciones. Estas curvas son para una hora.

En conclusión, podemos afirmar que usando el análisis espectral en las máquinas se puede :

- Efectuar un control de calidad superior
- Mejorar el mantenimiento de la maquinaria
- Ahorrar tiempo y dinero por fallas inesperadas
- Mejorar el diseño de máquinas al detectar las causas específicas de las vibraciones
- Reducir el ruido
- Analizar el grado de aislamiento a las vibraciones en una construcción
- Asegurar la salud de las personas que trabajan con máquinas

4.4.4 Aplicaciones generales del analizador de espectro.

El analizador de espectro tiene muchas aplicaciones aparte de las descritas anteriormente, como el control del ruido, la acústica arquitectónica y las vibraciones. A continuación voy a enlistar algunas de las aplicaciones que se le da al analizador de espectro, para enfatizar la importancia de este tipo de dispositivos.

En medicina :

En el estudio del corazón, se ha visto que al analizar el espectro del corazón, se pueden detectar anomalías en el funcionamiento de válvulas y arterias provenientes del corazón. Para detectar estos sonidos, se utiliza un estetoscopio electrónico. También se utilizan los analizadores de espectro para descubrir fallas, defectos y enfermedades del habla; así como para estudios fisiológicos y neurológicos.

En electrónica :

Se utilizan para analizar la voz y mejorar los sintetizadores digitales. En el estudio del ruido producido por los thyristores que controlan motores eléctricos y que interfieren con las comunicaciones de radio.

En el análisis de interferencia electromagnética (el rango de frecuencia de estos analizadores es mayor al de audio).

En la medición de equipo de telecomunicaciones.

En veterinaria :

Al estudiar a las ratas y los sonidos que les parecen atractivos, se encontró que los cables de computadoras y otros dispositivos eléctricos generan ciertas bandas de frecuencia que atraen a las ratas y por ese motivo los muerden.

Para detectar e identificar a las abejas africanas. Se ha notado que la frecuencia que emiten las abejas africanas difiere en el espectro al espectro emitido por las abejas italianas (que son las que comúnmente conocemos), esta detección evita el tener que hacer un análisis visual detallado y, es más preciso.

Para aprender idiomas :

Se ha visto que con la ayuda de un analizador de espectro, se puede mejorar la fonética.

En la alta fidelidad y la electroacústica :

Para medir la distorsión armónica en amplificadores y bocinas.

Para medir la directividad de una fuente sonora en función de la frecuencia.

Para analizar la influencia de un local en la respuesta de bocinas.

- Para ajustar la alineación de cabezas en grabadoras,
- Para ajustar la corriente de polarización (Bias) y la ecualización en grabadoras.
- Para medir la diafonía en función de la frecuencia.
- Para analizar el ruido de un equipo de sonido.
- Para disminuir la retroalimentación acústica en un local.

Para acciones de control de calidad :

En el control de calidad de productos que generan ruido ó vibraciones (Fig. 4.46)

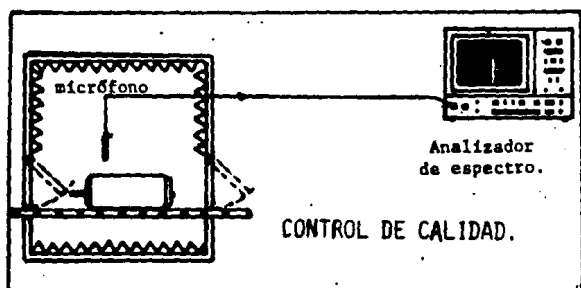


Fig. 4.46 En la línea de fabricación pasa por una cámara anecoica que prueba el ruido emitido por un motor eléctrico. Si este motor no cumple con el espectro que se da en las especificaciones (con su tolerancia) el producto se regresa a producción para que su corrección se efectúe.

El analizador de espectro tiene muchas otras aplicaciones. Cada día va ampliando su campo de acción convirtiéndose en una herramienta cada vez más poderosa al hacer uso de la tecnología digital y las computadoras. Todo esto encaminado a mejorar la vida del ser humano.

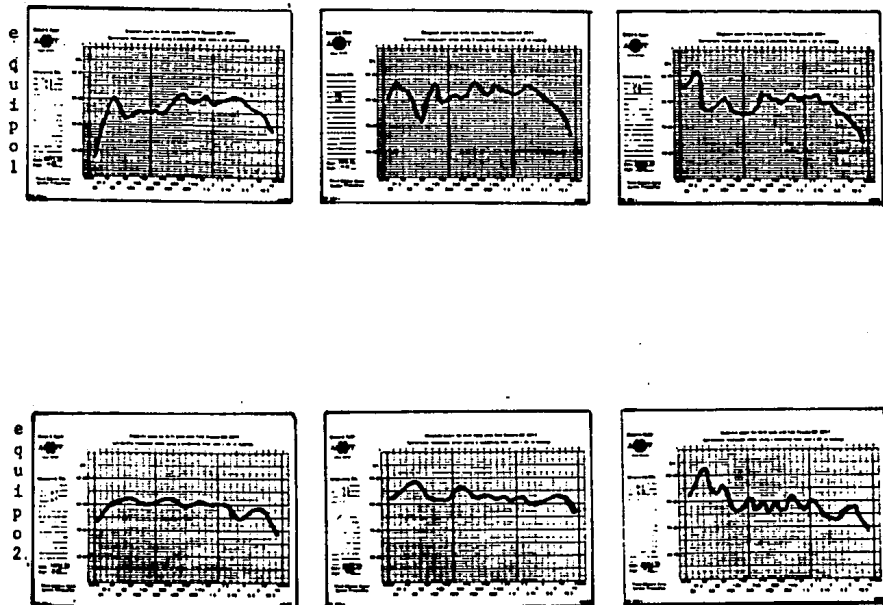
4.1.5 Algunas aplicaciones del analizador de espectro construido

a) Una de las aplicaciones prácticas del analizador de espectro

construido es la de ecualizar un recinto ó local.

El término ecualizar ó igualar, se refiere a la respuesta en frecuencias de equipo de audio en un local. Para que un equipo de audio no distorsione la música, al reproducirla lo ideal es que reproduzca todas las frecuencias de una manera similar ó igual, sin pérdidas ó atenuación, es por ello el término igualación o ecualización.

La respuesta de un equipo de alta fidelidad en un local se vé grandemente influenciada por las dimensiones del lugar, el material de las paredes, el equipo de audio, el material musical a reproducir, etc. El local donde se reproduce la música modifica severamente la respuesta de un equipo, como lo demuestran la Fig. 4.47 tomada de la nota técnica "Relevant loudspeaker test in studios in Hi-Fi dealers'demo rooms in home, etc., using 1/3 octave, pink weighted, random noise" de Henning Moller, B&K. (Ref.21)



Local 1

Local 2

Local 3

Fig. 4.47 Gráficas de un mismo equipo de sonido reproduciendo ruido rosa en tres locales. Podemos apreciar que la respuesta varía de acuerdo al local.

Para analizar la respuesta de un equipo de sonido en un local, conectamos el generador de ruido rosa a un amplificador de audio y a este amplificador conectamos las bocinas, esto por el lado de la reproducción y excitación del local. Para medir la respuesta utilizamos el analizador de espectro de audio construido como se muestra en la Fig. 4.48.

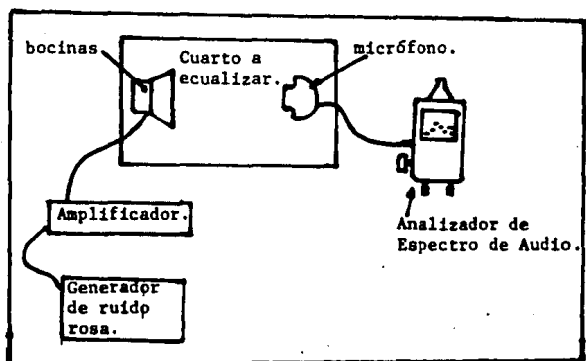


Fig. 4.48 Igualación ó ecualización de un local, usando ruido rosa para excitar el local y el analizador de espectro para hacer las mediciones.

Se utiliza el ruido rosa, por poseer varias ventajas sobre otros tipos de generadores de señal como podría ser un oscilador sinusoidal. Al excitar el local con una señal como el ruido rosa, que contiene muchas frecuencias simultáneamente, excitamos todos los modos de resonancia como lo haría la música que también está compuesta de muchas frecuencias.

Al encender el ruido rosa y empezar a hacer mediciones, lo más probable es encontrar que la respuesta del conjunto integrado de amplificador-bocinas-cuarto, está lejos de ser plana; para corregir esta respuesta se pueden hacer varias cosas como :

- Cambiar de posición las bocinas
- Modificar la acústica del local, ya sea poniendo ó quitando muebles, cortinas, etc.
- Instalando difusores

- Amplificando ó atenuando las frecuencias que provocan problemas
- Cambiando el diseño de las bocinas ó cambiando el equipo

Primero habria que empezar por lo más sencillo y económico; mover de lugar las bocinas para ver si ocurre alguna mejoría.

Modificar la acústica del local no es tan sencillo como parece, se requiere de experiencia y paciencia. Probar y medir; probar y medir, etc.

Entonces, el siguiente paso sería modificar la respuesta del equipo electrónicamente.

Para hacer esto, se puede disponer simplemente de los controles de tonos que usualmente tienen los amplificadores. Pero la respuesta de estos controladores de tonos (Fig. 4.49), no es la adecuada ó la suficiente, para corregir el problema ó probablemente no modifique la frecuencia que nos interesa.

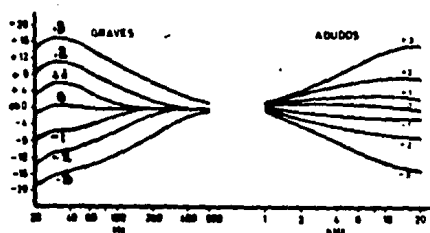


Fig. 4.49 Curvas de actuación típicas de los mandos graves y agudos de un preamplificador.

En los amplificadores modernos también pueden existir otro tipo de controles de tonos, como los ecualizadores gráficos ó los paramétricos, ó en su defecto se pueden conectar separadamente al amplificador, para hacerlo más versátil.

El ecualizador paramétrico se llama así porque permite modificar

parámetros del filtro, como el ancho de banda, la frecuencia central del filtro y la ganancia.

Como se puede deducir, estos ecualizadores permiten hacer muchas cosas con la respuesta del equipo, pero es muy difícil ajustarlos correctamente sin la ayuda de un analizador de espectro.

Los ecualizadores más comúnmente usados, son los gráficos, Fig. 4.50 y los hay en bandas de 5 frecuencias, por octavas, por tercio de octavas, etc.

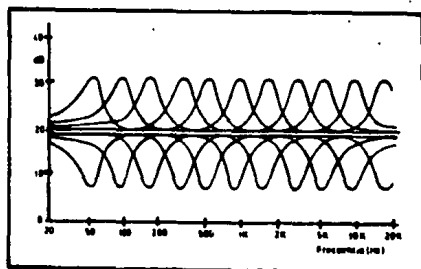


Fig. 4.50 Respuesta típica de un ecualizador por octavas.

Con los ecualizadores podemos remediar la respuesta de un equipo en un local, pero estamos limitados por dos factores :

1.- La potencia del amplificador.

Cada vez que deseamos amplificar una frecuencia ó señal en 3dB, necesitamos duplicar la potencia. Por ejemplo, si tenemos que amplificar una banda de frecuencias 12dB, necesitamos aumentar la potencia en esa banda 16 veces, lo cual no siempre es posible.

2.- La potencia eléctrica que soporten nuestras bocinas.

Probablemente quememos o echemos a perder una bocina; por ejemplo, un tweeter si amplificamos demasiado una banda de

frecuencia, en este caso los agudos.

Así que nos es tan fácil, obtener una respuesta plana de un equipo en un local.

Otro punto a considerar al ecualizar un local es que, por ejemplo, durante la grabación de una orquesta, un grupo musical, una ópera, etc., los micrófonos están cerca de los ejecutantes y artistas; por esto, capturan el sonido sin atenuación en las altas frecuencias, ni la reverberación de las bajas. Por lo que se recomienda tratar en lo posible de obtener una respuesta del equipo como la gráfica que se muestra, Fig. 4.51 para obtener una respuesta " natural del equipo de audio ".

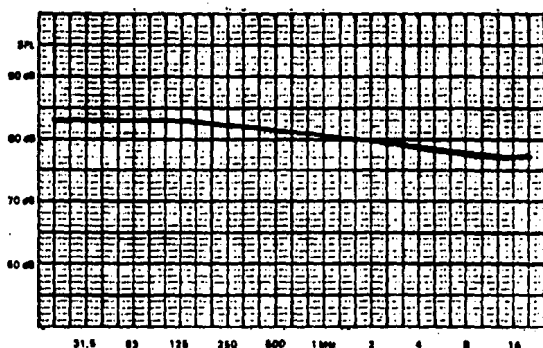


Fig. 4.51 Respuesta deseable a obtener en casa, al hacer la " ecualización " ó igualación

b) Otra aplicación de este analizador de audio, puede ser para conocer (sin gran precisión) la respuesta de los controles de tonos de nuestro preamplificador. Para medir esto, aplicamos la

señal de ruido rosa a la entrada de nuestro preamplificador y conectamos el analizador de espectro a la salida, el control de atenuación y ganancia del analizador de espectro en (los controles de tonos deben de estar en su posición central), es decir sin ganancia ni atenuación) cuando obtenemos una respuesta de 0dB, movemos los controles de tonos para ver la influencia que tienen sobre la respuesta en frecuencia. De esta manera, también verificamos la respuesta en frecuencia del amplificador o preamplificador.

c) Con el analizador también se puede constatar el desempeño de una grabadora de audio.

Primero grabamos el ruido rosa en una cinta con el medidor de nivel de grabación, en -20dB si es de cassette y -10dB si es de carrete abierto (esto es según las normas internacionales). Después reproducimos la cinta con el analizador de espectro conectado a la salida de la grabadora, esto prueba la respuesta de la grabadora y de las diferentes cintas, permitiéndonos elegir la que nos permita obtener las mejores grabaciones posibles con nuestra grabadora.

d) También se puede ajustar el azimuth (inclinación) de las cabezas de la grabadora; para esto es necesario tener una cinta grabada profesionalmente. Al reproducir dicha cinta y, con el analizador de espectro conectado a la salida de la grabadora, se mueve el botón de ajuste hasta obtener una lectura máxima en la banda, de 16 KHz. Al hacer este tipo de ajuste, también se puede ajustar la corriente de polarización de la cabeza (BIAS). Para hacer esto, grabamos una señal de ruido rosa y ajustamos la polarización para obtener la reproducción máxima en las bandas de

500 y 1000 Hz. El ajuste de las frecuencias altas se hace con el ajuste de ecualización.

e) Eliminación de la retroalimentación acústica en un local donde se usan micrófonos en una presentación en vivo.

Es muy común que en una presentación en vivo, donde una o varias personas hablan a través de micrófonos, al incrementar la ganancia del amplificador, se llegue a un punto donde se "vicia" ó retroalimenta acústicamente, produciendo un zumbido muy molesto que impide escuchar a las personas que están hablando. Este acoplamiento entre el altavoz y el micrófono a partir de cierta ganancia del amplificador limita y condiciona la potencia máxima a los altavoces. El efecto se produce precisamente en las zonas de frecuencias que favorece el local.

Para reproducir esta retroalimentación se reproduce en el local, ruido rosa a través de las bocinas; posteriormente se abren el ó los micrófonos y se aumenta la ganancia del amplificador hasta que aparezca la retroalimentación. Con el analizador de espectro vemos cual de las bandas de frecuencia tiene un pico; una vez identificado se atenúa con el ecualizador ó con un filtro trampa (que atenúa esta frecuencia problema).

Se vuelve a incrementar la ganancia del amplificador hasta encontrar otra frecuencia donde exista problema, se vuelve a atenuar la frecuencia problema.

Cuando incrementamos aún más la ganancia del amplificador y, la nueva retroalimentación aparece en más de tres frecuencias simultáneamente, se ha llegado al límite del control de la retroalimentación con un mínimo de efecto en la reproducción de la música. Ahora el sistema podrá operar a mayor potencia, sin

tantos problemas de retroalimentación. Estos ajustes se deben hacer con las personas que van a hablar enfrente de los micrófonos (en el sitio donde van a hablar), ya que su proximidad al micrófono causa ciertos corrimientos en los modos de resonancia y por lo tanto cambia la retroalimentación.

f) Un uso didáctico del analizador de espectro, puede ser el de mostrar a los estudiantes de música, el rango de frecuencias de diferentes instrumentos y la voz humana.

g) Otros usos de este analizador pueden ser : analizar ruido (para iniciar un programa de reducción de ruido), verificar el aislamiento entre un local y otro, medir las diferencias en la difusión de frecuencias en un local, etc.

Bibliografía Capítulo 4

- 1.- H.J. PURKIS : " BUILDING PHYSICS ACOUSTICS "
Editorial Pergamon Press
- 2.- WARNWER BÖRK : " MANUAL DE MEDIDAS ACUSTICAS PARA EL CONTROL DEL RUIDO "
Editorial Hispano Americana, S.A. 1969
- 3.- LEO L. BERANEK : " ACUSTICA "
Editorial Hispano Americana, S.A. 1969
- 4.- WILL FURRER : " ROOM & BUILDING ACOUSTICS AND NOISE ABATEMENT "
London Butterworths, 1964.
- 5.- SOUNDERS DEREK : " AUDITORY PERCEPTION OF THE SPEECH "
- 6.- F. ALTON EVEREST : " THE MASTER HANDBOOK OF ACOUSTICS "
TAB Books 1981
- 7.- F. ALTON EVEREST : " ACOUSTIC TECHNIQUES FOR HOME AND STUDIO "
TAB Books 1984
- 8.- " NOISE CONTROL "
Principles and Practice
Brüel and Kjaer DK 2850 Naerum, Dinamarca
- 9.- R.B. RANDAL B. : " APPLICATION OF B & K EQUIPMENT TO FREQUENCY ANALYSIS "
Brüel and Kjaer.
- 10.- K.B. GINN : " ARCHITECTURAL ACOUSTICS "
Brüel and Kjaer, Nov. 1978

- 11.- J.R. RASSALL AND K. ZAVARI : " ACOUSTIC NOISE MEASUREMENT "
Brüel and Kjaer, Enero 1979
- 12.- Nota Técnica, " MICROPHONE CALIBRATION FOR ACCURATE SOUND MEASUREMENT "
BR - 0092 de Brüel and Kjaer
- 13.- Folleto, " LA MEDIDA DEL RUIDO URBANO "
BR - 0166 Brüel and Kjaer
- 14.- Folleto, " MEASUREMENT IN BUILDING ACOUSTICS "
BR - 0178 Brüel and Kjaer
- 15.- Folleto, " MACHINE HEALTH MONITORING "
BR - 0267 -11
- 16.- Folleto, " LA MEDIDA DE LAS VIBRACIONES "
BR - 0101 Brüel and Kjaer
- 17.- Folleto, " MEASURING SOUND "
BR - 0047 Brüel and Kjaer
- 18.- " DIGITAL FILTER & FFT TECHNIQUE "
Revista Técnica de Brüel and Kjaer. (Primera de 1978)
- 19.- " AVERAGING TIME OF RMS MEASUREMENT "
Revista Técnica de Brüel and Kjaer, (Tercera de 1975)
- 20.- Folleto, " Examples of Industrial Application of vibration measurement "
Brüel and Kjaer 17 - 006

21.- HENNING MÜLLER. Nota de aplicación:

" RELEVANT LOUDSPEAKERS TEST IN STUDIOS, IN HI-FI DEALERS,
DEMO-ROOMS, IN HOME, ETC., USING 1/3 OCTAVE, PINK WEIGHTED
RANDOM NOISE "

22.- Revista, " NOISE CONTROL ENGINEERING " (Nota presentada en
Marzo/Abril 1977)

Artículo : " Do we measure damaging noise correctly ? "

23.- HENNING MOLLER, Nota de aplicación, " MULTIDIMENSIONAL
AUDIO "

Nota 17 - 206 Brüel and Kjaer

24.- " MANUAL DE ALTA FIDELIDAD Y SONIDO PROFESIONAL ",

Capitulos 2,8,10 y 13.

Perteneciente a la serie " Mundo Electrónico ".

Publicaciones Marcombo.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Al elegir como tema de tesis, el analizador de espectro de audio y sus aplicaciones, tenía como objetivo: aprender más acerca de : amplificadores operacionales, filtros activos, acústica, conocer más acerca de los analizadores de espectro y, construir un prototipo económico y práctico que me sirviera para hacer mis propias mediciones. Con estas mediciones esperaba mejorar ciertas características acústicas de locales y conocer la respuesta y el desempeño de algunos equipos de audio, como bocinas, amplificadores, grabadoras, etc.

El objetivo de conocer más acerca de amplificadores operacionales y filtros activos, se cumplió ampliamente, pero también me di cuenta que son temas que requieren de mucho estudio, experiencia, investigación, pruebas, etc., para poder decir que verdaderamente sabe uno emplearlos, calcularlos y aprovecharlos adecuadamente.

Cada día se descubren e inventan nuevas aplicaciones y tipos. La computación ha ayudado en el diseño y experimentación de estos dispositivos.

Respecto a la acústica, que es un tema que siempre me ha interesado y hasta podría decir sin exagerar, que me ha fascinado.

El leer e investigar sobre este tema me permitió no sólo conocer más sobre este tema sino que también me di cuenta que es una materia (como muchas otras), en la cual todavía falta mucho por investigar y, en la cual muchos de los conceptos se han producido empíricamente, por lo que existen diferentes criterios y normas con los que no todos los investigadores están de acuerdo.

Desgraciadamente para mí, en México fué difícil encontrar información y libros sobre este tema. Al visitar librerías, no

encontré libros especializados en el tema. En las bibliotecas de instituciones educativas que visité, no tenían muchos libros sobre este tema y muchos de estos libros estaban atrasados en sus conceptos ó carecían de información moderna. Ojalá que las investigaciones que se llevan acabo en este tema, nos permitan conocer cada día más y sus aplicaciones mejoren nuestra vida diaria y se utilicen en nuestro país (México).

Respecto a las aplicaciones del analizador de espectro, aprendí que existen mucho más de las que yo esperaba y son más útiles de lo que yo pensaba. Por desgracia el desconocimiento que existe sobre la utilidad de los analizadores de espectro, el alto costo de estos equipos y la falta de interés en mejorar ó resolver problemas han evitado el aprovechamiento de estos dispositivos. Muchas veces la falta de conocimiento, de visión y el exceso de ambición, contribuyen a que se desperdicien dispositivos como el analizador de espectro. Yo tuve la experiencia de conocer empresas, que viendo la utilidad que obtendrían con un analizador de espectro, para mejorar sus productos, reducir el ruido, mejorar diseños de máquinas, reducir mantenimientos, etc., no compraron uno, por considerar que existen inversiones que reditúan más en apariencia, porque creo que el analizador de espectro en ciertos casos ahorra dinero al contribuir a todas las mejoras que ya mencioné, reedituando dividendos económicos que pagan con creces la inversión original.

El último punto de mis objetivos, la construcción de un prototipo y la utilidad que obtuvé de él, se cumplieron en los siguientes grados :

En el aspecto de funcionamiento y costo estoy muy satisfecho, para ser sincero, funciona mejor y hace más cosas de las que yo

esperaba.

El costo fué bajo; la construcción ó armado del prototipo fué sencilla, una vez hechas las pruebas, ajustes necesarios y la corrección de algunas fallas. Respecto a la utilidad de las mediciones que se obtienen con este prototipo, tienen ciertas limitaciones que yo no había anticipado al iniciar el prototipo. Una de las limitaciones del prototipo es la precisión de las mediciones. Esta precisión se ve influenciada por todos y cada uno de los componentes del prototipo y, a continuación voy a enlistar las mejoras que considero se podrían hacer ó que serían de interés.

El micrófono. En general, existen dos clases de micrófonos ó mejor, dicho aplicaciones. Los que se emplean para grabaciones, conferencias, etc. y los de medición, siendo esta última clase, la que nos interesa; existen varios tipos que se clasifican por su precisión y calidad.

El micrófono tipo 0, esta clasificación se les dá a los micrófonos de muy alta precisión y exactitud y se emplean como referencia de laboratorio. Una de las características principales de estos micrófonos es su respuesta prácticamente plana desde pocos hertz hasta 50 ó mas KHz. Una gran sensibilidad, rango dinámico muy amplio, variación mínima en su respuesta, con los cambios de condiciones ambientales y con dispositivos de ajuste y calibración.

Los micrófonos tipo 1 son muy similares a los tipo 0, sólo que sus tolerancias son un poco más amplias, Figs. 1 y 2. Los del tipo 2, tienen más tolerancia, menor ancho de banda, rango dinámico menor, etc. Los micrófonos tipo 0, 1 y 2 se calibran y

prueban uno por uno. Al comprar un micrófono de estos tipos (0,1 y 2) el fabricante proporciona junto con el instrumento, la curva de respuesta, Fig. 1, sensibilidad, curva polar (que indica la directividad del mismo, Fig. 2), la impedancia, etc. Con estos datos y especificaciones podemos estar seguros de las características y del comportamiento esperado de este micrófono en particular. Por supuesto que estos micrófonos son sumamente costosos y delicados. El costo de estos micrófonos no incluye el preamplificador, asociado con estos instrumentos, la cápsula sola puede costar más de 1000 USD (dólares americanos), en algunos tipo 0.

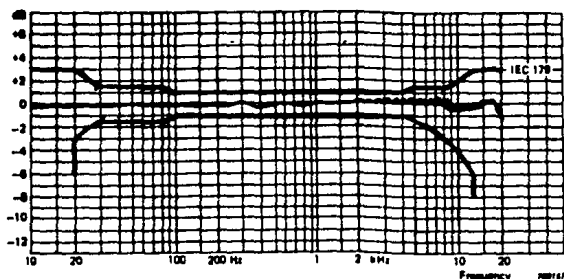


Fig. 1 RESPUESTA EN FRECUENCIA
 Muestra un ejemplo de la gráfica que proporciona el fabricante de un micrófono tipo 1. Las líneas que se ven arriba y abajo de la respuesta en frecuencia corresponden a la tolerancia que permite la norma IEC 179 para tipo 1

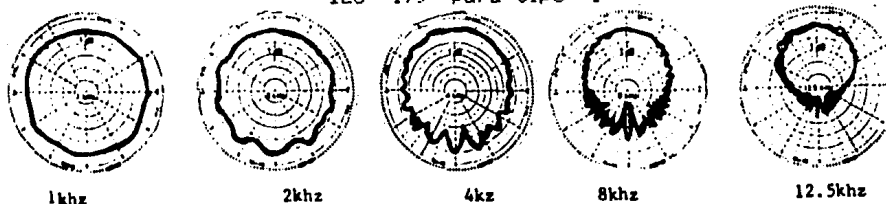


Fig. 2 Respuesta polar de cambio en la directividad con la frecuencia de un micrófono tipo 1

Los micrófonos tipo 3 y 4 son menos sensibles, su confiabilidad y respuesta en frecuencia son menores y, en general todas sus tolerancias son mayores.

Las normas que se aplican para los tipos 0, 1, 2 y 4 varían un poco dependiendo de si es norma IEC, ANSI, DIN, etc.

El micrófono que yo empleé en mi prototipo es tipo 4, las ventajas que tiene son : muy bajo costo, además de ser fácil de adquirir. El inconveniente que tiene, es que todas la información que proporciona el fabricante, son las especificaciones de un producto promedio, pero no las de mi micrófono en particular. La Fig. 3 es la respuesta en frecuencia que proporciona el fabricante. Si esta respuesta y las demás especificaciones que proporciona el fabricante se cumplen en mi micrófono, éste es bastante bueno.

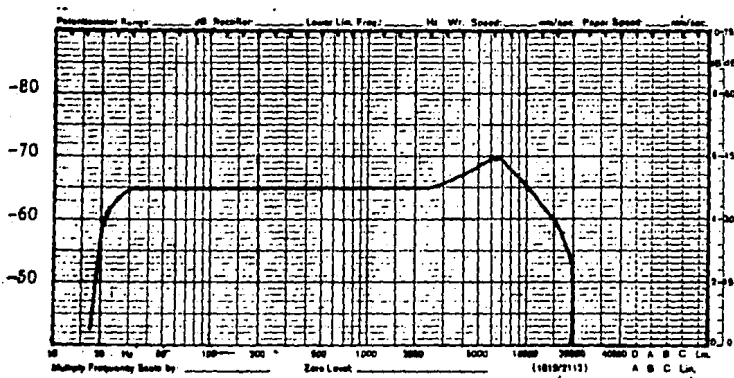


Fig. 3 Respuesta en frecuencia proporcionada por el fabricante del micrófono empleado en el analizador construido

Si yo quisiera conocer las características particulares de mi micrófono requeriría de una cámara anecoica, además de equipo

especial de laboratorio, Fig. 6. Desgraciadamente, empresas como el grupo Papartel y Piezo de México, que tienen el mejor equipo de laboratorio y cámaras anecoicas en México, no cumplen con los requisitos que exigen las normas internacionales para la medición de estos dispositivos. Además el costo de hacer una prueba de este tipo sería mayor que adquirir un mejor micrófono. Si se deseara obtener mayor precisión en las mediciones y estar seguro de las características del micrófono, se tendría que hacer una inversión de aproximadamente 20 veces más en uno tipo 3. Yo no recomendaría la inversión en micrófonos tipo 2, 1 ó 0, porque además del alto costo de éstos, se necesita comprar el preamplificador, el cual viene integrado a ellos.

El motivo de esto, es la alta impedancia de estos micrófonos (mayor a 100 M Ω) y de ciertos circuitos de compensación contra cambios ambientales. Los preamplificadores acoplan la alta impedancia del micrófono, Fig. 4 y como están completamente integrados a la cápsula, eliminan el ruido electromagnético que pudiera inducirse por la alta impedancia que presentan a la entrada estos preamplificadores.



CÁPSULA ó MICROFONO



PREAMPLIFICADOR

Fig. 4 Muestra de un micrófono tipo 1 y su preamplificador (descubierto). Cuando la cápsula se atornilla al preamplificador, quedan perfectamente acoplados impidiendo que se genere ruido. Todas las conexiones están chapeadas en oro para evitar la corrosión y los malos contactos

La mayoría de estos micrófonos son de capacitor y requieren de un voltaje de polarización, proporcionado por el preamplificador.

La precisión que puede obtenerse con el circuito que maneja la pantalla de mi prototipo no justifica el gasto en un micrófono tipo 0, 1 ó 2, ya que el LM3915 tiene una tolerancia de ± 1 dB y muestra los incrementos de 3 en 3 dB, por lo que las tolerancias de 1/2 ó de menos dB, no se justifican. Como dije anteriormente, de cambiar el micrófono de mi prototipo, lo haría por uno de tipo 3; para hacerlo más confiable y preciso. Otra adición que le haría, sería una pantalla antiviento para que al hacer las mediciones al exterior, el aire no interfiera con el sonido analizado.

El preamplificador. Un detalle del conjunto micrófono-preamplificador que no me gustó de mi prototipo, es que no se puede calibrar. Los micrófonos de alta calidad, tipo 0, 1, 2 y, algunos tipo 3, se pueden calibrar cada vez que se emplea el dispositivo, para asegurarnos que las mediciones son siempre iguales. Para calibrarlos se utiliza un dispositivo, Fig. 5, que genera una señal con una frecuencia e intensidad predeterminadas (normalmente 1 KHz a 94 dB). En el preamplificador existe un potenciómetro de ajuste (preset) de la ganancia. Si se cambiara el micrófono del prototipo por uno del tipo 3, se modificará el preamplificador para que se pudiera ajustar la ganancia y se comprara el calibrador adecuado para este nuevo micrófono permitiría corregir cualquier cambio que tuviera el instrumento por golpes, cambios de temperatura, etc. y, con esto sería aún más confiable el prototipo. También habría que graduar la perilla de ajuste de ganancia del amplificador de entrada con respecto a

la lectura de la pantalla. También al tener calibrado el prototipo, sabríamos aproximadamente el nivel de presión sonora presente y con ello sabríamos si el sonido analizado es peligroso o está fuera de las normas internacionales.

Otra ventaja de cambiar el micrófono y el preamplificador sería aumentar la sensibilidad del instrumento para poder medir señales de baja intensidad sonora.



CALIBRADOR

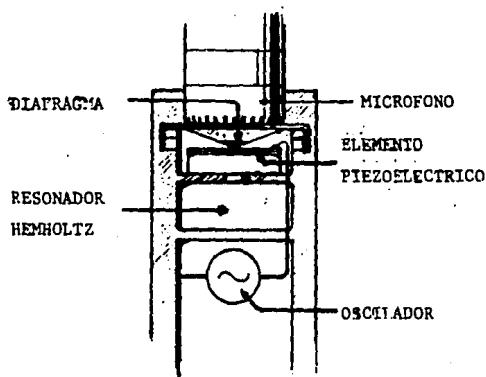


Fig. 5 Calibrador para micrófono.

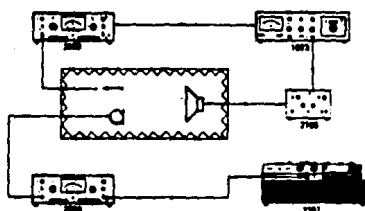


Fig. 6 Cámara anecoica y equipo de laboratorio empleados para determinar las características de un micrófono

Si desearamos utilizar este prototipo para analizar vibraciones, seria necesario construir otro preamplificador aparte de el que se usa para el micrófono.

Para medir las vibraciones, se utilizan normalmente como transductores, a los aceleradores piezoeléctricos, Fig. 7. El elemento piezoeléctrico se coloca en los acelerómetros, de forma que cuando el conjunto vibra, la masa aplicada sobre de él, es una fuerza que es proporcional a la aceleración de la vibración, según la ley : $Fuerza = Masa \times Aceleración$.

Para frecuencias muy por debajo de la resonancia del sistema muelle-masa, la aceleración de la masa es la misma que la de la base y la señal de salida, será proporcional a la aceleración a la que el acelerómetro está sometido.

Ordinariamente se usan dos tipos de acelerómetros :

- De compresión, Fig. 7a., en el que la masa ejerce una fuerza de compresión sobre el elemento activo y el de tipo cortadura, Fig. 7b., en el que la masa ejerce una fuerza de cortadura sobre el elemento activo.

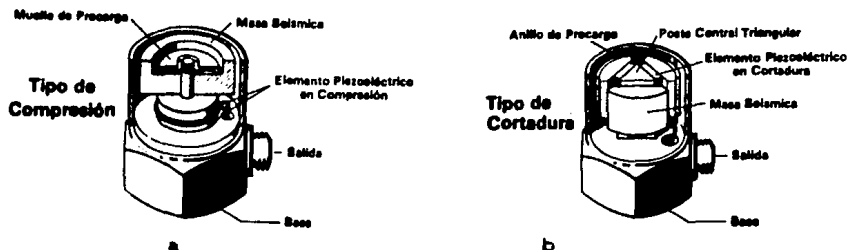


Fig. 7 Ejemplo de dos tipos de acelerómetros comúnmente usados para medir vibraciones

Estos acelerómetros requieren de un preamplificador especial por varias razones.

- 1) La señal que entregan es de muy pequeña intensidad.
- 2) Se necesita acoplar su alta impedancia, para que después se pueda filtrar (acoplamiento de impedancias).
- 3) Se necesitan calibrar.
- 4) Los preamplificadores de los acelerómetros contienen integradores para poder obtener la respuesta en frecuencia contra aceleración, velocidad ($= \int a dt$) y desplazamiento ($x = \int v dt$)

Todo esto debe considerar una persona que esté interesada en analizar vibraciones en función de la frecuencia. También hay que tener en cuenta que estos dispositivos son costosos y que existen de varios tipos según su precisión y aplicación, como en los micrófonos. Además del problema del costo, a los acelerómetros hay que saber donde colocarlos para obtener mediciones útiles.

Amplificador. El amplificador que tiene mi prototipo cumple con su función y trabaja adecuadamente. Antes de este amplificador se podría incluir una red de ponderación; específicamente, yo utilizaría la curva A. En la Fig. 8, se muestran algunas de las curvas de ponderación utilizadas internacionalmente.

Estas curvas de ponderación intentan reproducir la respuesta del oído a la sonoridad, al utilizarlas obtenemos una medición más apegada al efecto que tiene un sonido sobre el ser humano. La curva A es la más utilizada y aceptada para usarse en los dispositivos de medición, es aproximadamente el inverso de la curva de igual sonoridad a 40 Phons de sonoridad. La curva B, lo es a una sonoridad de 70 Phons y la C a 100 Phons. La curva de ponderación D, se usa para medir y analizar el ruido de aviones, como se puede observar, esta curva pondera (resalta o amplifica) las frecuencias comprendidas entre 1000 Hz y 15 KHz, que es la

región donde las turbinas de los aviones ocasionan más molestias. Las curvas E y SI propuestas por Stevens y Webster respectivamente, han sido pensadas para medir el grado de interferencia que un ruido ocasiona a la palabra ó conversación. Si se incluyera una red de ponderación tipo A en el prototipo, se podrían hacer mediciones de vigilancia de niveles de ruido peligrosos. Como estas curvas intentan reproducir la respuesta del oído humano resultan útiles para predecir si un sonido resultará nocivo ó molesto al ser humano. La curva más usada después de la A, es la C. La A se usa para sonidos de baja intensidad y la C, para sonidos de alta intensidad. Si no se adiciona esta red, se puede hacer la medición y restarle a cada banda de frecuencias el número de decibeles que la red atenuaría (ó amplificaría) la señal en esa banda en especial.

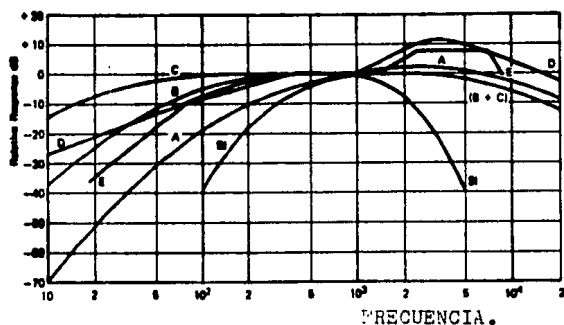


Fig. 4.8 Curvas de ponderación

Filtros. Los filtros de mi prototipo funcionan muy bien, mejor de lo que yo esperaba. La frecuencia central y la Q obtenidas, fueron practicamente las calculadas originalmente.

Existen diferentes métodos para calcular filtros activos, un mismo tipo de filtro lo calculan de una manera distinta los autores de los libros que consulté. Las ecuaciones que yo utilicé para calcular mis filtros (del manual de audio y radio de National, Ref. 4 Cap. 3) me dieron mejores resultados y estuvieron más apegadas a la realidad que las de otros autores. Esta experiencia me enseñó que cada autor considera y desecha ciertas variables que hacen más complicado el cálculo del filtro, esto provoca que en ocasiones exista un alejamiento de la realidad (entre la teoría y la práctica). En un tema como los filtros activos se le pueden dar muchos enfoques dependiendo de lo que deseamos obtener. Desde un principio hay que fijar los objetivos del filtro y estar consciente de las limitaciones que podemos y estamos dispuestos a tener. Entre estas limitaciones, se encuentran la materia prima con la que vamos a realizar el filtro. No se pueden obtener filtros de muy alta selectividad y precisión con componentes pasivos que tienen tolerancias de 10% ó más.

Para el diseño de filtros ya existen muchos programas de computadora que permiten calcular una gran variedad de filtros y preveer desde la teoría los posibles problemas que pudiera haber. Antes de hacer un filtro la computadora nos puede decir los pros y los contras de un cierto diseño. Si alguna persona estuviera muy interesada en este tipo de programas, existe un Software para computadoras personales y compatibles que vende Momentum Data Systems, Inc. del 1666 Newport Blvd., # 115 Costa Mesa CA 92627,

en los Estados Unidos de Norteamérica. Este Software cuesta 495 USD y, según dicen sus creadores, sirve para calcular todo tipo de filtros inclusive digitales.

Volviendo a mi prototipo, un punto que no me gustó mucho después de conocer la manera en que analiza el oído humano, es que éste lo hace de una manera similar al de filtros de tercio de octava, Fig. 9 y, mi analizador es por octavas.

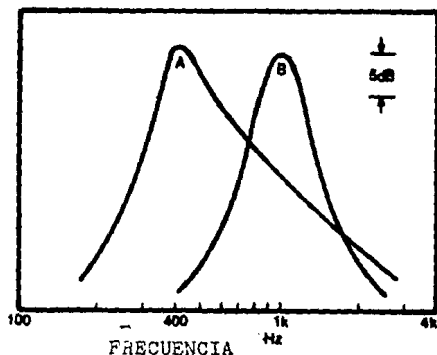


Fig. 9 Muestra la manera en la que analiza el oído (A) y el ancho de banda de un filtro de tercio de octava (B)

Si se construyera el analizador con filtros de tercio de octava, la precisión sería mucho mayor, ya que en lugar de dividir el espectro en 10 bandas, lo dividiríamos en 30 bandas. Empezando con 20Hz., incrementando cada banda por $2^{1/3}$ (en lugar de 2, como en las de octavas), hasta llegar a 20 KHz. Estos filtros son más selectivos y se obtienen más detalles con ellos. Para poder realizar estos filtros, se necesitan componentes de mayor exactitud y calidad. Es necesario utilizar componentes con tolerancias de 1% y valores no típicos de las series que se acostumbra usar en México. Al importar estos componentes y

triplicar la cantidad (3 veces más filtros) se aumentaría considerablemente el costo del prototipo. Aparte de ampliar las bandas del analizador, se puede normalizar la respuesta de cada uno de estos filtros.

Esta normalización no es otra cosa que obligar al filtro a que tenga una curva de respuesta dentro de ciertos parámetros de tolerancia. Para que la respuesta de un filtro pueda ser aceptada internacionalmente y se le clasifique dentro de alguna categoría o tipo, requiere cumplir con estas tolerancias.

Las figuras 10 y 11 muestran la respuesta que debe tener un filtro tipo 3 para tercios de octava según la norma ANSI y la respuesta que se obtendría de todos los filtros de tercio de octava al cumplir esta norma.

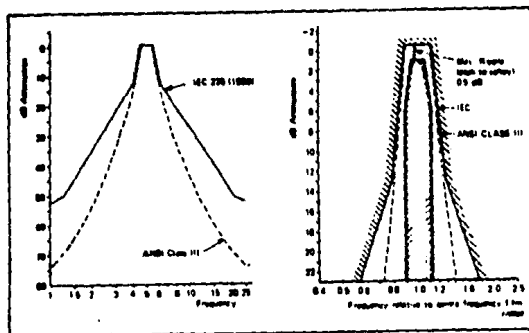


Fig. 10 Respuesta de un filtro de 1/3 de octava
Norma ANSI, clase 3

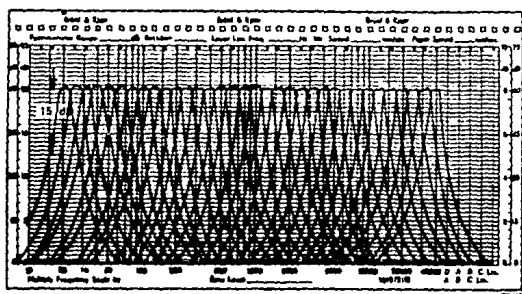


Fig. 11 Respuesta de todos los filtros de tercio de octava

También existen normas para la respuesta de filtro de octavas, en la Fig. 12, se muestra la respuesta de los filtros de octavas que cumplen con la norma ANSI. Estas normas se hicieron para estandarizar las mediciones mundialmente. De esta manera, una medición de ruido ó vibraciones, etc., es igual en todo el mundo y se puede uno referir a ella sin problemas de conversiones.

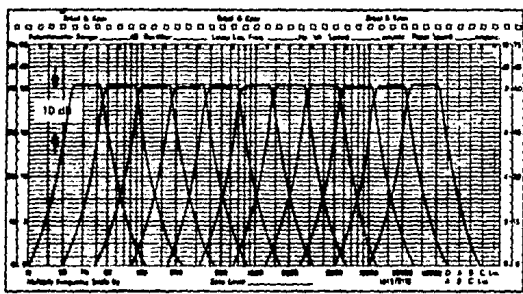


Fig. 12 Respuesta normalizada de filtros de octava.

Otra modificación que se podría hacer a los filtros sería que tuvieran salida individual externa. De esta manera si desearamos aislar cierta banda de frecuencias para estudiarlas con más detalle ó eliminar partes de una señal, etc.: podríamos hacerlo tomando la señal a la salida del filtro ó filtros que nos interese. También se puede conectar a la salida de estos filtros una interfaz para poder enviar la información de los filtros a una computadora ó a una graficadora a fin de estudiar, procesar ó comparar la información obtenida.

Si se desea aplicar el analizador para el estudio de las vibraciones, es conveniente que los filtros respondan desde muy bajas frecuencias (1 Hz) y además pensar en la posibilidad de poder modificar el ancho de banda de los filtros. Si originalmente los filtros tienen un ancho de banda del 23% de la frecuencia central (ancho de banda para tercio de octava) y después de hacer un análisis preliminar, podemos modificar este ancho de banda a 3% (Ver Fig. 4.42, Cap. 4) y, posteriormente al 1%, aumentamos la precisión y obtenemos mucha más información para aislar las frecuencias que nos interesa estudiar. Todas las modificaciones que se pueden hacer a los filtros, valen la pena si se modifican también el micrófono (por un tipo 3), el preamplificador y, además se calibra el instrumento.

La salida de los filtros que utilizo para ver la señal en el osciloscopio, tiene el problema de que su amplitud varía linealmente y el sonido, como se vió en el capítulo 4; es mejor graficarlo en decibeles (logarítmicamente), dado la gran gama de intensidades involucradas en el sonido. Sería conveniente usar un amplificador logarítmico antes del osciloscopio.

Después de los filtros, existe una red formada por un diodo, un resistor y un capacitor, Fig. 3.15; estos elementos promedian la señal, se podría modificar esta red para que nos permitiera obtener el valor eficaz de la señal. Con esto cumplirían con otra norma internacional que pide que los filtros entreguen la señal eficaz (true RMS value).

Sistema de detección de nivel y pantalla. El sistema de detección de nivel y la pantalla de mi prototipo son bastante buenos, trabajan adecuadamente, requieren de pocos componentes, son económicos, confiables, consumen poca energía y responden bien a los cambios de nivel de las señales analizadas. El problema que tuve con la pantalla y que me desagradó, fue el arreglo de diodos que conseguí (barras de leds). No tienen la eficiencia luminosa deseada. Si se pudieran cambiar por barras fluorescentes, se mejoraría no solamente la estética, sino que también haría más fácil la lectura de la pantalla con luz diurna. Aparte de este cambio, se puede hacer más precisa la pantalla, usando otro detector para que señale los incrementos en intervalos menores; podría ser de 1 dB en 1 dB, en lugar de 3 en 3 dB.

Sin embargo, esto último además de aumentar el costo, el volumen del dispositivo, disminuiría el rango dinámico, etc., requiere que todos los circuitos anteriores (empezando por el micrófono), sean más precisos para que valga la pena hacer el cambio.

Un punto sobre el que no he hablado, es la forma que debería de tener el analizador. Los investigadores de acústica han notado que cuando se introduce en un campo sonoro, un dispositivo de medición: éste influye en las ondas sonoras, por lo que la lectura del analizador se ve modificada por el propio

instrumento. Para disminuir esta influencia, se ha tratado de disminuir el volumen del analizador y darle una forma aerodinámica. Por ese motivo mi prototipo tiene un poco la forma de botella y el micrófono está en la punta. Esta forma que le di, es una copia un poco burda de los analizadores portátiles profesionales. Se pueden hacer modificaciones en la forma del analizador para disminuir la influencia sobre el sonido.

La recomendación de los fabricantes profesionales, es usar un cable de extensión para el micrófono y, de esta forma, ni el cuerpo del analizador ni el de la persona que ve la lectura, influyen en el campo sonoro.

Al principio de estas conclusiones, dije que las mediciones de mi prototipo estaban limitadas; están limitadas por la precisión de sus componentes. Los cambios que yo desearía hacer a mi prototipo son : mejor micrófono y preamplificador, filtros de tercio de octava y pantalla más luminosa.

Aún sin estos cambios y, a pesar de sus limitaciones, el prototipo permite conocer con una aproximación aceptable, la respuesta de un equipo de audio en un local, ecualizar locales (con las limitaciones que expliqué en el capítulo 4), ayuda a conocer el funcionamiento de un ecualizador paramétrico y a aprender a usarlo correctamente, a analizar ruido (sin cumplir con ninguna norma de medición internacional), reducir la retroalimentación acústica, etc.

Muchas mejoras se pueden hacer a mi prototipo como ya dije, desde cambiar el micrófono, hasta integrarle un microprocesador y usar filtros digitales, etc.; pero como ya dije, los limitantes serán, el costo y la dificultad para obtener los componentes necesarios.

Un punto del que he hablado mucho es acerca de las normas. Normas para dispositivos, normas para medir, para niveles de ruido y vibraciones, etc.,etc. Desgraciadamente en México, no hay normas de muchas cosas y, de las que hay, no se aplican en su mayoría; ya sea por desconocimiento, negligencia, apatía, ó corrupción. De lo anterior, tenemos muchos ejemplos; en el tránsito urbano, camiones, coches, camionetas Combi, inseguros, ruidosos,etc; fábricas que contaminan, que no tienen medidas de seguridad ni equipo anti-incendio, ni sistemas anti-ruido, ni protectores para los empleados y, cuando los hay no se usan. Las instalaciones eléctricas por lo general no cumplen ninguna norma por lo que son peligrosas y causan problemas al sistema de suministro de energía.

Cuando pregunte en la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, sobre la norma que utilizaban para medir el ruido urbano y la contaminación ambiental, me dijeron que no usaban ninguna norma internacional, porque "aquí elaboramos nuestras propias normas". Estas normas " nacionales " nadie las conoce ni las quiere proporcionar. Yo pienso que existe un falso nacionalismo en este asunto de las normas (y en muchos otros), si otros países han gastado mucho tiempo y dinero en investigaciones para elaborar una norma, ¿ Porqué no aprovechar esta experiencia ?.

Además en muchos otros aspectos no somos nacionalistas, copiamos costumbres, ropa, comida, etc.; pero, para copiar lo bueno somos muy orgullosos en nuestro nacionalismo. En este aspecto de las normas, al igual que en muchos otros aspectos de nuestro país, existe demagogia y corrupción. No podemos competir en los mercados internacionales si nuestros productos no cumplen normas

establecidas internacionalmente. Si realmente queremos ser nacionalistas y tener orgullo por el país, debemos usar las normas internacionales e inclusive mejorarlas; pero, sobretodo rechazar la demagogia y la corrupción; tener ética y sentir orgullo por hacer las cosas bien.

APENDICE A

**INSTRUCTIVO DE OPERACION
Y SERVICIO**

APENDICE A.

INSTRUCTIVO DE OPERACION Y SERVICIO

FIGURA 1.

MICROFONO. EL MICROFONO DEBE DIRIGIRSE HACIA LA FUENTE SONORA.

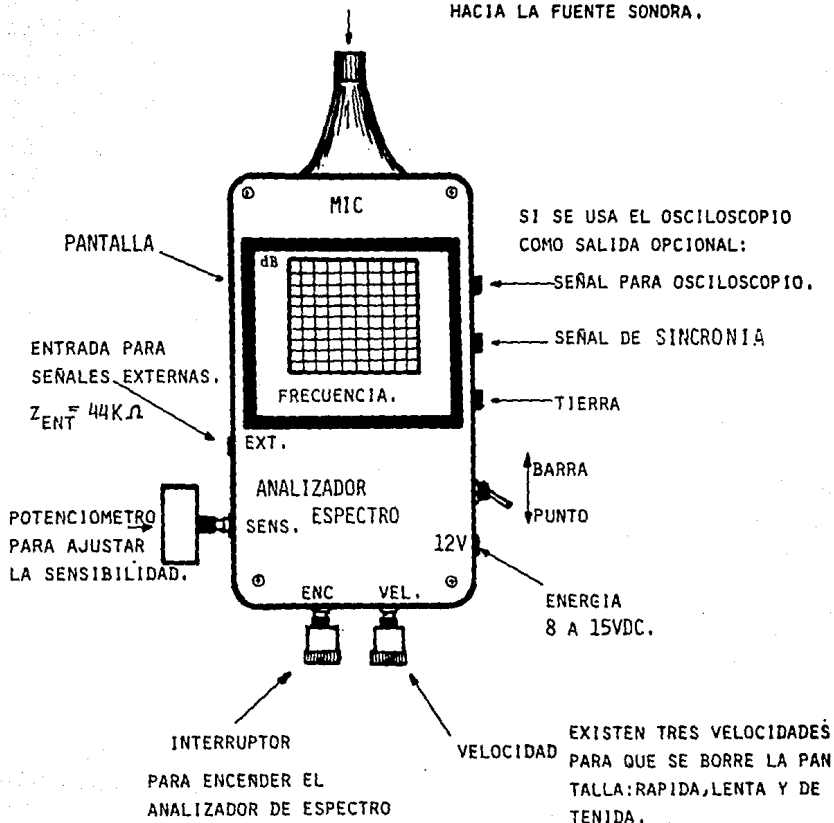
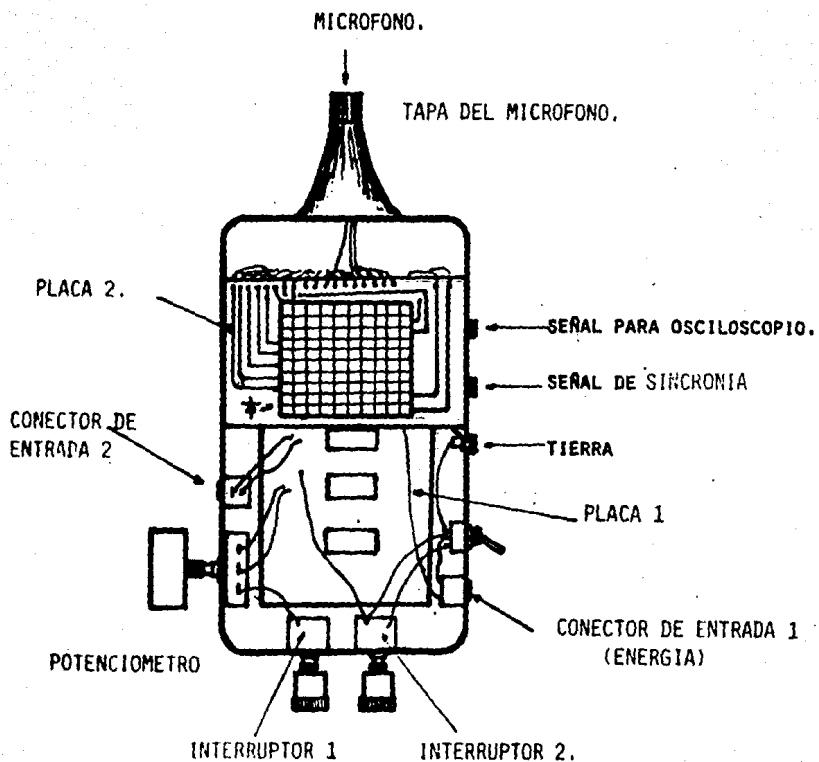


FIGURA 2
INTERIOR DEL ANALIZADOR.



INSTRUCTIVO DE OPERACION Y MANTENIMIENTO.

Para analizar el sonido hay que dirigir el micrófono hacia la fuente sonora que nos interesa y encender el analizador. Con el potenciómetro de ajuste de sensibilidad al mínimo vamos incrementando la sensibilidad, hasta obtener una lectura dentro del rango dinámico de la pantalla. Para analizar una señal eléctrica por ejemplo de una grabadora, se usa la entrada externa (conector 2), al usar esta entrada automáticamente se desconecta el micrófono. De igual manera, se utiliza el potenciómetro de ajuste de sensibilidad.

El control de velocidad se usa de la siguiente forma :

Para señales que varían muy rápido, se usa posición rápido.

Si la señal es estable y deseamos ver sus componentes sin variaciones repentinas, se usa lento.

Si deseamos tomar nota de la señal analizada, hacer una gráfica, comparar sonidos, etc., se puede detener la señal en la pantalla para que no se borre. Existe una salida opcional para el osciloscopio. Para poder ver la señal en el osciloscopio, se conecta la señal de sinc a la entrada de sincronización y poner el interruptor de " triggering source " en external trigger.

La terminal de tierra a la conexión del osciloscopio correspondiente.

El interruptor de barrido del osciloscopio (sweep time/div.) se ajusta hasta que aparezcan en la pantalla del osciloscopio una señal parecida a la Fig. 3. El ajuste de este barrido es de aproximadamente 3.3 ms.

Especificaciones :

Microfono de capacitor omnidireccional.

Frecuencias: 31.25, 62.5, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000,
16000 Hz.

Ganancia del preamplificador: 42dB.

Ganancia del amplificador: 21dB.

Impedancia de entrada $Z = 45000$ ohms.

Señales externas, acepta :

Mínimo 20 mV

Máximo 1.6V

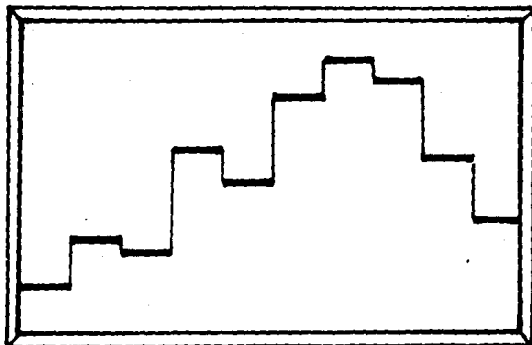


Fig. 3 Señal en la pantalla del osciloscopio

Servicio y Mantenimiento :

A continuación se enlistan posibles fallas que puede presentar el analizador y la posible solución al problema.

SINTOMA	POSIBLE CAUSA	SOLUCION
NO ENCIENDE	- Batería baja	Verificar con un voltmetro
	- Fuente apagada ó circuito de protección activado	que existan en el conector macho entre 8 y 15 Vdc.
	- Corto circuito en conector	Destapar el conector macho
	- Conector hembra MAL (Conector 1)	Destapar analizador y verificar el conector. 1
	SI NO SE CORRIGE SEGUIR PROCEDIMIENTO A	
NO ENCIENDE UN LED	- Falso contacto	Verificar Tableta 2
NO ENCIENDE UNA COLUMNA DE LA PANTALLA	- No hay señal en esa banda	Seguir Procedimiento 2

Para lo siguiente, ver figura 4

IC 1, 2, 3, son los amplificadores operacionales LM 324

IC 1	terminal	1	2	8	14
salida		amplifica- dor	Preamp.	filtro 31 Hz	filtro 250 Hz
IC 2	terminal	1	7	8	14
salida filtros :		500	1K	125	4K
IC 3	terminal	1	7	8	14
salida filtros :		8K	2K	63	16K

IC 4, 5, 6 (D 4016)

IC 4 interruptor de salida de filtros de 31, 125, 2K, 63Hz.

IC 5 interruptor de salida de filtros de 250, 500, 1K, 4KHz.

IC 6 interruptor de salida de los filtros de 8K y 16KHz.

además el IC 6 tiene en la terminal 8, la salida del reloj.

Como mantenimiento del analizador es conveniente limpiar el exterior con una franela limpia y limpiar el potenciómetro de ajuste de sensibilidad y los interruptores 1 y 2 con alcohol, para evitar falsos contactos. También es recomendable evitar exponer el analizador a temperaturas elevadas, al sol ó a la humedad excesiva.

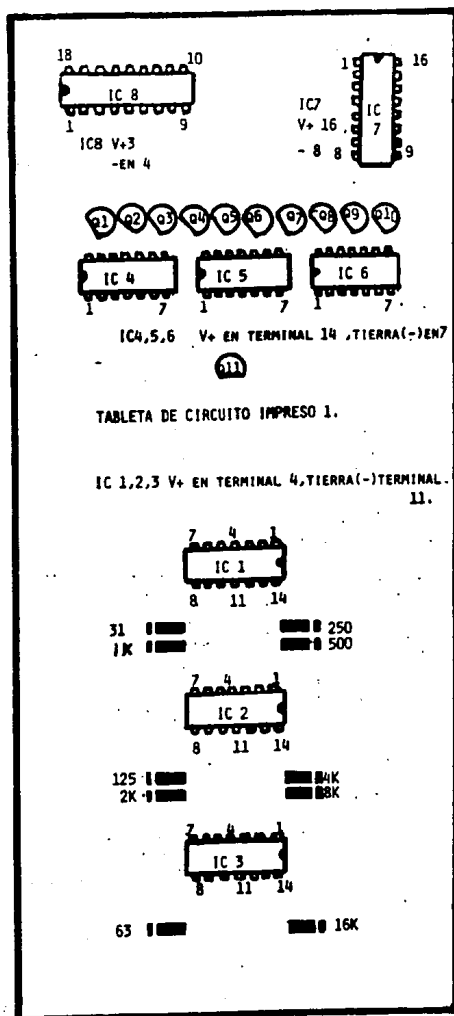
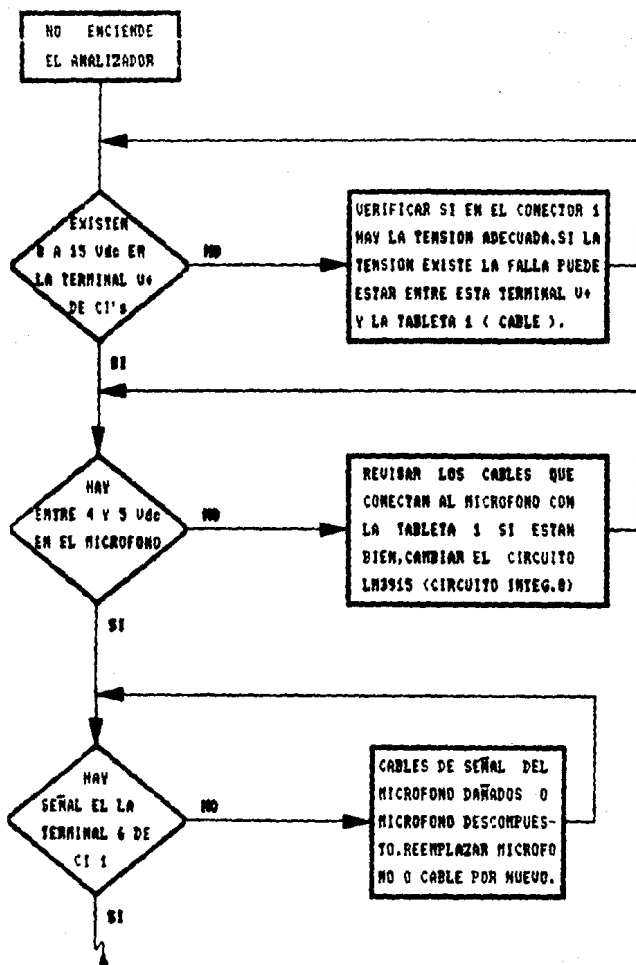


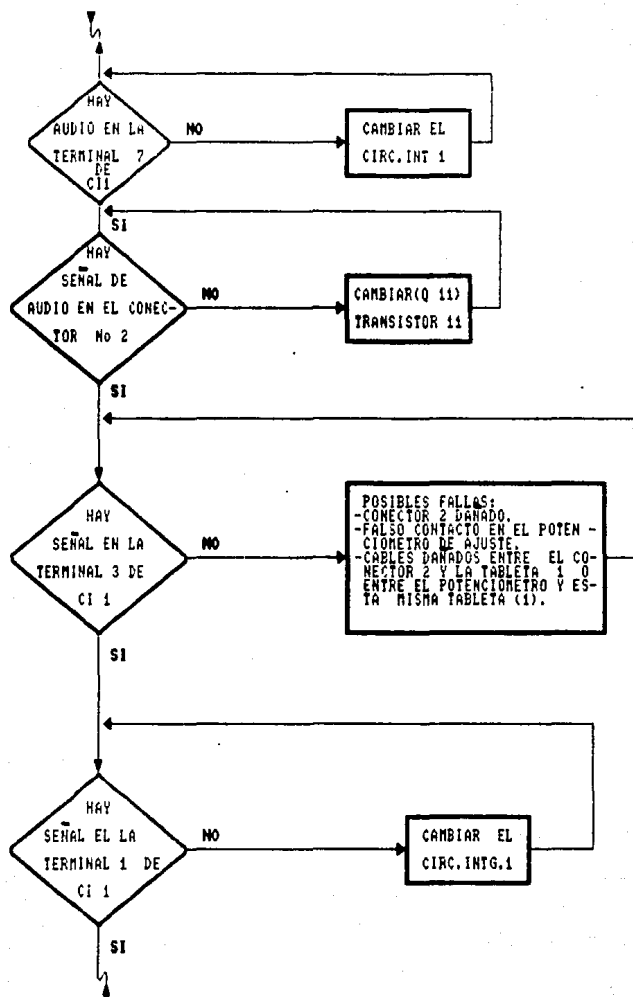
Fig. 4: muestra los componentes más significativos de la tableta 1

PROCEDIMIENTO A.

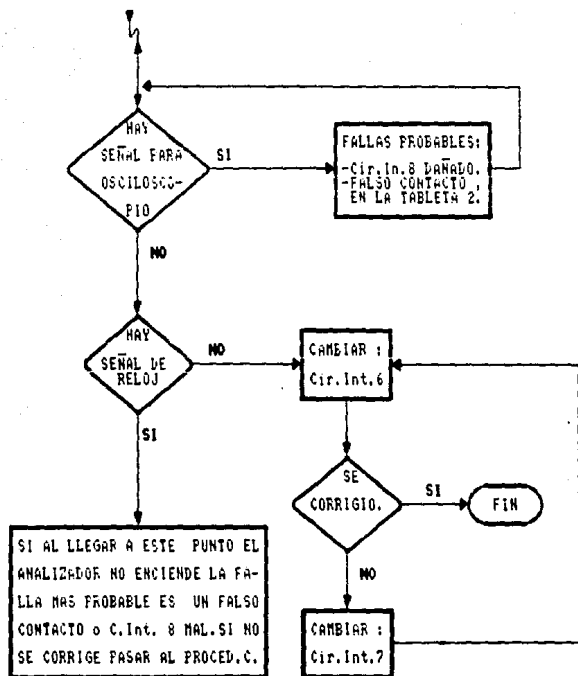


continua en la
página siguiente.

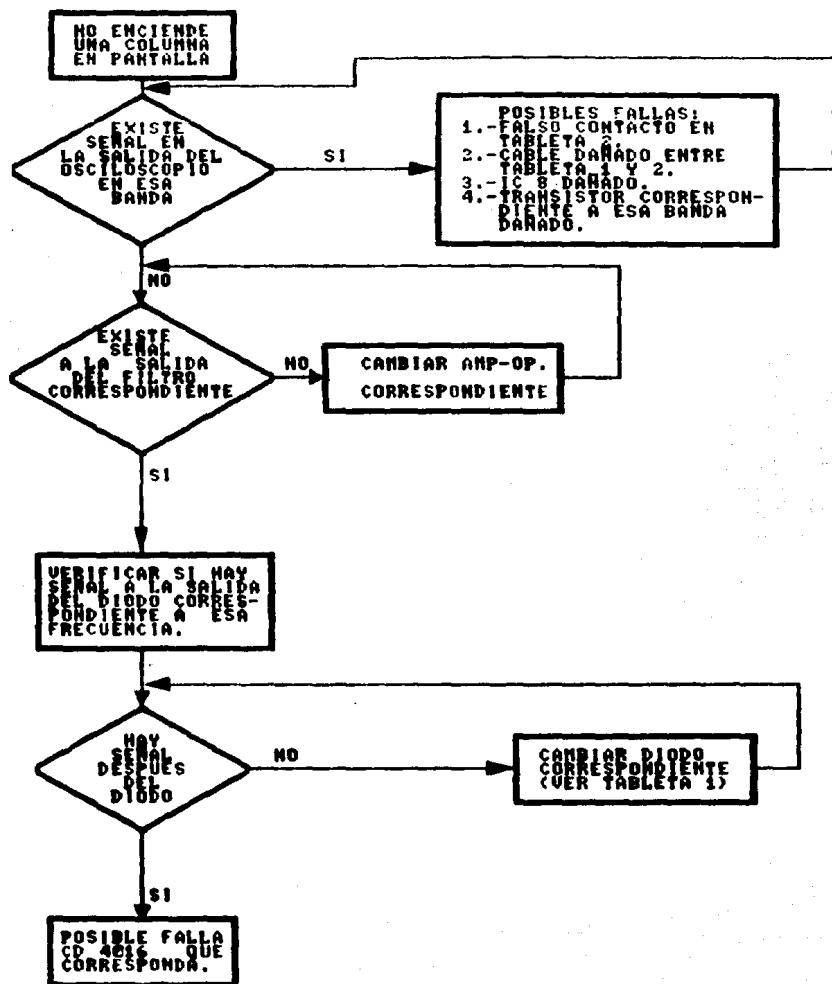
continuacion procedimiento A



continua en la siguiente pagina.



PROCEDIMIENTO B



PROCEDIMIENTO C

Si después de seguir los procedimientos A y/B, la falla persistiera con el empleo de un generador de audio y un osciloscopio seguir el siguiente procedimiento :

- Aplicar a la entrada del analizador (conector 2), una señal de la frecuencia que no enciende ó en el caso de que nada apareciera, usar 1000Hz; con el osciloscopio, seguir la señal (rastrearla). Después de salir del conector 2, la señal debe aparecer en la terminal 3 de CI 1. Si no aparece, la posible falla puede estar en el mismo conector, en el potenciómetro de ajuste ó en los cables que conectan con la tableta 1.

Si la señal aparece en la terminal 3 de CI 1 y, no sale por la terminal 1 de este mismo circuito, el preamplificador (terminal 1) del CI 1 también debe aparecer a la salida del filtro correspondiente, las terminales de salida de los filtros son las siguientes :

31.25 Hz	Terminal 8	CI 1
62.50 Hz	Terminal 8	CI 3
125 Hz	Terminal 8	CI 2
250 Hz	Terminal 14	CI 1
500 Hz	Terminal 1	CI 2
1000 Hz	Terminal 7	CI 2
2000 Hz	Terminal 7	CI 3
4000 Hz	Terminal 14	CI 2
8000 Hz	Terminal 1	CI 3
16000 Hz	Terminal 14	CI 3

Si la señal que nos interesa rastrear aparece a la salida del filtro, el amplificador operacional correspondiente está bien; de lo contrario hay que sustituirlo. Esto es muy fácil ya que están montados sobre bases para circuito integrado. Si la señal sale bien del operacional, debe también de pasar por el diodo correspondiente (ver tableta 1) (Fig. 4).

Si no tenemos señal después del diodo, hay que sustituirlo, si la señal pasa bien después del diodo debe aparecer en la salida que tiene el analizador para osciloscopio. Si la señal aparece en esta salida, el problema puede estar en CI 8 (LM 3915). Si no aparece la señal, entonces el problema puede estar en el CD 4016 (CI's 4, 5, 6) que le corresponde a esa frecuencia, hay que sustituirlo; si aún con ese cambio no se corrigiera la falla, el problema puede estar en un falso contacto en la tableta 2 ó el CI 7 puede estar fallando.

A continuación, se muestra la tableta 2 y la relación que existe entre los números y letras (columnas y renglones) para de esta manera, probar la tableta y localizar las posibles fallas ó falsos contactos.

Los números significan el nivel de intensidad ó renglón, siendo 1 el nivel más bajo y el 10 el más alto. Las letras son la columna ó frecuencia y, a continuación se enlista la relación entre la letra y la fc:

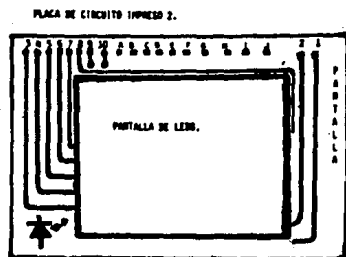


Fig. 5 Pantalla

A señal del cátodo	31.25 Hz
B señal del cátodo	62.50 Hz
C señal del cátodo	125 Hz
D señal del cátodo .	250 Hz
E señal del cátodo	500 Hz
F señal del cátodo	1000 Hz
G señal del cátodo	2000 Hz
H señal del cátodo	4000 Hz
I señal del cátodo	8000 Hz
J señal del cátodo	16000 Hz

Los números son la señal de los ánodos.

APENDICE B

COEFICIENTES

DE

ABSORCION

APENDICE B

MATERIAL	128Hz	256Hz	512Hz	1024Hz	2048Hz	4096Hz
CORCHO						
TIPO CORKOUSTIC 25MM	0.04	0.09	0.39	0.76	0.46	0.55
TIPO CORKOUSTIC 2.5CM	0.14	0.25	0.61	0.43	0.52	0.8
TIPO ABSORPHON 13MM	0.15	0.45	0.55	0.35	0.30	0.25
AGLOMERADO DE 25MM	0.14	0.25	0.40	0.25	0.34	0.2
PINTURAS						
FASERIT	0.05	0.04	0.07	0.10	0.12	0.18
FIBRAS MINERALES						
FIBRA DE VIDRIO 30MM	0.32	0.46	0.66	0.70	0.69	0.68
FIBRA DE VIDRIO 40MM	0.35	0.51	0.70	0.82	0.83	0.79
FIBRA DE VIDRIO 50MM	0.38	0.63	0.78	0.87	0.83	0.77
FIBRA DE VIDRIO 100MM	0.75	0.95	0.96	0.90	0.83	0.74
LANA DE ROCA 25 MM	0.26	0.45	0.61	0.72	0.75	----
FIBRA DE VIDRIO AFIEL- TRADA DE 50 MM.	0.41	0.60	0.99	0.99	0.84	0.81
FIELTRO DE LANA DE ROCA DE 25 MM.	0.12	0.45	0.85	0.87	0.90	0.83
FIELTRO DE LANA DE ROCA DE 25 MM. CON 10 CM DE CAMARA.	0.52	0.70	0.82	0.72	0.78	----
FIELTRO VITROFIB- TEL DE 50 MM.	0.15	0.33	0.61	0.84	0.75	0.70
PANEL DE VITROFIB- TEL DE 60 MM.	0.22	0.56	0.78	0.90	0.81	0.72
LOBETAS TRAVERTO- NE FIGURADO 19 MM.	0.08	0.32	0.79	0.93	0.87	0.80
LOBETAS TRAVER- TONE REPUJADO.	0.08	0.23	0.79	0.93	0.88	0.86
LOBETAS MINATO- NE CLASICO 13 MM	0.11	0.14	0.68	0.87	0.68	0.45
LOBETAS MINATO- NE CLASICO 16 MM	0.12	0.25	0.83	0.87	0.64	0.52

MATERIAL	128Hz	256Hz	512Hz	1024Hz	2048Hz	4096Hz
LOBETAS MINATONE DE 16MM CON CAMARA DE AIRE DE 25 CM.	0.46	0.44	0.68	0.80	0.72	0.56
LOBETAS TRAVERTONE FIGURADO DE 19 MM.	0.36	0.62	0.81	0.84	0.87	0.91
LOBETAS TRAVER- TONE REPUJADO	0.65	0.56	0.63	0.76	0.88	0.91
LOBETAS MINABOARD CLASICO DE 16 MM.	0.39	0.58	0.72	0.90	0.72	0.59
LOBETAS MINA- BOARD FIGURADO.	0.42	0.59	0.66	0.80	0.77	0.66
LOBETAS TRAVER- TONE SANTABLIO DE 19 MM.	0.73	0.54	0.55	0.76	0.84	0.87
LOBETAS MINABOARD GEORGIAN DE 13 MM	0.37	0.32	0.67	0.74	0.61	0.51
LOBETAS CERAMABOARD FIGURADO DE 16 MM.	0.16	0.22	0.66	0.88	0.79	0.69
REVOCOS						
ASBESTOSPRAY DE 10 MM DE ESPESOR	0.28	0.23	0.64	0.78	0.87	0.64
ASBESTOSPRAY DE 15 MM DE ESPESOR	0.31	0.26	0.81	0.88	0.90	0.91
ASBESTOSPRAY DE 25 MM DE ESPESOR	0.44	0.53	0.86	0.92	0.95	0.98
YEDO Y VERMICULITA	0.12	0.10	0.07	0.09	0.07	0.07
ENLUCIDO ESPECIAL SOBRE EL ANTERIOR	0.23	0.30	0.37	0.42	0.48	0.46
TIROLESA DE 18MM A BASE DE POMEX Y VERMICULITA	0.08	0.09	0.10	0.18	0.50	----
CEMENTO CELULAR DE 50 MM DE ESPESOR.	0.12	0.18	0.27	0.50	0.65	----

MATERIAL	128Hz	256Hz	512Hz	1024Hz	2048Hz	4096Hz
AMIANTO PROYECTADO DE 15 MM DE ESPESOR	0.30	0.35	0.45	0.50	0.55	0.60
<u>LOSETAS ACUSTICAS</u>						
PLACAS PERFORADAS MINERALES PERFOACOUSTIC	0.41	0.50	0.65	0.79	0.77	0.65
PLACAS MINERALIZA- DAS VIROTERM	0.09	0.24	0.94	0.29	0.55	----
PLACAS FIBROCEMEN- TADAS DURISOL.	0.12	0.30	0.60	0.54	0.55	0.60
PLACAS DE AGLOMERADO MINERAL PERMACOUSTIC (FORMANDO TECHO FALSO)	0.56	0.64	0.77	0.92	0.99	0.89
PLACAS DE AGLOMERADO MINERAL PERMACOUSTIC SOBRE PARED.	0.18	0.35	0.83	0.86	0.82	0.77
CELOTEX DE 13 MM DE ESPESOR DIRECTAMENTE SOBRE LA PARED.	0.09	0.15	0.61	0.77	0.70	0.64
CELOTEX DE 16 MM DE ESPESOR DIRECTAMENTE SOBRE LA PARED	0.09	0.26	0.69	0.86	0.67	0.62
CELOTEX DE 19MM	0.11	0.23	0.80	0.93	0.58	0.50
CELOTEX DE 25MM	0.18	0.35	0.86	0.87	0.63	0.56
CELOTEX DE 30MM	0.14	0.42	0.99	0.74	0.60	0.50
CELOTEX DE 13 MM COLOCADO CON 2.5 CM DE CAMARA	0.14	0.46	0.52	0.71	0.72	0.64
CELOTEX DE 16 MM EN IGUALES COND.	0.12	0.51	0.65	0.73	0.66	0.58
CELOTEX DE 19 MM. EN IGUALES COND.	0.12	0.45	0.79	0.89	0.61	0.60
CELOTEX DE 25 MM. EN IGUALES COND.	0.25	0.49	0.69	0.78	0.61	0.48

MATERIAL	128Hz	256Hz	512Hz	1024Hz	2048Hz	4096Hz
LOSETAS ACUSTICAS						
(continuación)						
CELOTEX DE 30 MM EN IGUALES COND.	0.25	0.58	0.99	0.75	0.58	0.50
PLACAS ECOTERMICAS	----	----	0.75	----	----	----
ESPUMAS SINTETICAS						
LAMINA DE ESPANDEX O ESTYROFO DE 15 MM CON 4 CM DE CAMARA	0.51	0.63	0.60	0.42	0.40	----
POREXPAN, IBEXPAN POLIGLAS.	DE	0.35	A	0.95		
CAPA DE ISOSCHAUM SOBRE PARED Y TRANSYU- TE TENSADO DE 30MM ESP.	0.12	0.35	0.62	0.78	0.85	0.75
CAPA DE ISOSCHAUM SOBRE PARED Y TRANSYU- TE TENSADO DE 40MM ESP.	0.17	0.52	0.80	0.88	0.92	0.83
CAPA DE ISOSCHAUM SOBRE PARED Y TRANSYU- TE TENSADO DE 50MM ESP.	0.22	0.66	0.86	0.55	0.95	0.92
CAPA DE ISOSCHAUM DE 30 MM ENTRE DOS YUTES TENSADOS, 5 CM DE CAM.	0.20	0.46	0.67	0.61	0.77	0.79
CAPA DE ISOSCHAUM DE 30 MM ENTRE DOS YUTES TENSADOS, 10 CM DE CAM.	0.30	0.55	0.72	0.58	0.80	0.78
CAPA DE ISOSCHAUM DE 30 MM ENTRE DOS YUTES TENSADOS, 15 CM DE CAM.	0.41	0.61	0.60	0.54	0.81	0.0
CAPA DE ISOSCHAUM DE 30 MM ENTRE DOS YUTES TENSADOS, 20 CM DE CAM.	0.52	0.51	0.60	0.70	0.70	0.0

(PARA CONSEGUIR ESTOS
COEFICIENTES DEL ISOSCHA-
UM, HAY QUE HACER UNAS PER-
FORACIONES SUPERFICIALES
DE 2 MM DE DIAMETRO Y DE
2 CM DE PENETRACION Y CU-
YA SUPERFICIE SUPONGA UN
5 % DE LA TOTAL).

MATERIAL	126Hz	256Hz	512Hz	1024Hz	2048Hz	4096H
<u>TEJIDOS</u>						
TEJIDO DE ALGODON DE 330 g/m SOBRE PARED (SIN PEGAR)	0.03	0.04	0.11	0.17	0.24	0.35
TEJIDO DE ALGODON DE 420 g/m SOBRE PARED (SIN PEGAR)	0.05	0.07	0.13	0.22	0.32	0.38
IGUAL QUE EL ANTERIOR PERO CON 475g/M FRUNCI- DO CON UN INCREMENTO DEL 50% DE LA SUPERFICIE APARENTE	0.07	0.31	0.49	0.81	0.56	0.54
TERCIOPELO DE 610 g/m LISO SOBRE PARED. (SIN PEGAR)	0.05	0.12	0.35	0.45	0.38	0.36
TERCIOPELO DE 610 g/m FRUNCIDO CON INCRE- MENTO DEL 50% DE LA SUPERFICIE APARENTE.	0.14	0.35	0.55	0.72	0.68	0.65
FIELTRO DE 25 MM ESP.	0.13	0.41	0.56	0.69	0.66	0.49
<u>PUBLICO Y ASIENTOS</u>						
MUSICO CON INSTRUMENTO.	0.40	0.45	0.50	0.60	0.55	0.63
PERSONA ADULTA	0.23	0.33	0.39	0.42	0.41	0.47
MUCHACHO.	0.18	0.20	0.27	0.30	0.36	0.36
PUBLICO MIXTO	0.30	0.32	0.37	0.44	0.36	0.36
BUTACA TAPIZADA TELA.	0.30	0.32	0.27	0.30	0.33	0.33
BUTACA DE MADERA.	0.01	0.02	0.02	0.04	0.04	0.04
BUTACA T. CON PLASTICO.	0.20	0.20	0.25	0.30	0.30	0.30
BUTACA DE MADERA TAPIZADO.	0.06	0.08	0.10	0.12	0.12	0.12
PUBLICO EN ASIENTO DE MADERA.	0.15	0.25	0.35	0.38	0.37	0.35
PUBLICO EN BANCO DE IGLESIA	0.20	0.25	0.31	0.35	0.33	0.30

MATERIAL	128Hz	256Hz	512Hz	1024Hz	2048Hz	4096H
=====						
PUBLICO EN ASIENTO CON RESPALDO TAPIZADO	0.30	0.33	0.38	0.46	0.39	0.35
PUBLICO EN ASIENTO TAPIZADO.	0.30	0.35	0.42	0.46	0.48	0.40
COLEGIAL EN PUPITRE	0.24	----	0.39	----	0.43	----
<u>SUELOS</u>						
GOMA DE 5 MM SOBRE CEMENTO.	0.04	0.04	0.08	0.12	0.03	0.10
GOMA ESPUMOSA DE 5 MM SOBRE CEMENTO.	0.08	----	0.35	----	0.60	----
LINDOLEUM S/CEMENTO.	0.02	----	0.03	----	0.04	----
CORCHO DE 20 MM SOBRE CEMENTO.	0.08	0.02	0.08	0.19	0.24	0.21
IGUAL PERO CON CERA.	0.04	0.02	0.05	0.11	0.07	0.02
PARQUET.	0.05	0.03	0.06	0.09	0.10	0.07
TARIMA DE MADERA	0.09	0.09	0.08	0.09	0.08	0.07
PARQUET S/LISTONES.	0.20	0.15	0.12	0.10	0.10	0.07
ALFOMBRA DE GOMA 5 MM.	0.04	0.04	0.08	0.12	0.03	0.10
ALFOMBRA FIBRA VEGETAL	0.08	----	0.17	----	0.30	----
ALFOMBRA FIBRA COCO	0.11	0.13	0.17	0.40	0.29	0.29
ALFOMBRA FERRADA DE FIELTRO DE 12 MM.	0.11	0.14	0.37	0.43	0.27	0.27
MOQUETA SOBRE CEMENTO	0.09	0.08	0.21	0.26	0.27	0.37
MOQUETA S/3 MM FIELTRO	0.11	0.14	0.37	0.43	0.27	0.25
<u>REVESTIMIENTOS DE MADERA</u>						
M. DE 15 MM BARNIZADA CON 5 CM DE CAMARA	0.10	0.11	0.10	0.08	0.08	0.11
MADERA DE 3 MM CON 5 CM DE CAMARA	0.25	0.34	0.18	0.10	0.10	0.06
IGUAL PERO CAMARA LLENA CON F/VIDRIO.	0.61	0.65	0.24	0.12	0.10	0.06

MATERIAL	128Hz	256Hz	512Hz	1024Hz	2048Hz	4096H
REVESTIMIENTOS DE MADERA						
(continuacion)						
CONTRAPLACADO DE 6 MM CON 5 CM DE CAMARA.	0.60	0.42	0.35	0.12	0.08	0.08
TERMOTEX DE 12.5 MM DIRECTAMENTE S/PARED	0.14	0.20	0.32	0.43	0.51	0.66
IGUAL PERO CON CAMA- RA DE AIRE DE 2.5 CM	0.26	0.32	0.34	0.43	0.45	0.51
TABLEX PERFORADO DE 3.5 MM CON 2.5 CM DE CAMARA DE AIRE.	0.18	0.20	0.26	0.29	0.31	0.20
IGUAL PERO EL TABLEX DURO	0.18	0.21	0.25	0.24	0.31	0.30
IGUAL PERO EL TABLEX DE 5 MM.	0.10	0.11	0.13	0.09	0.08	0.13
PANEL DE LANA DE MADERA DE 2.5 MM SOBRE LA PARED.	0.10	----	0.40	----	0.60	----
IGUAL PERO DE 75MM	0.20	----	0.80	----	0.80	----
IGUAL QUE EL ANTERIOR PERO CON 2 CM DE CAMARA	0.10	----	0.60	----	0.60	----
TELA FINA TIRANTE DIS- PUESTA A 1 CM DE UN EM- PANELADO DE MADERA DE 6 MM CON 4 CM DE CAMARA DE AIRE.	0.25	0.20	0.27	0.15	0.10	0.10
IGUAL QUE EL ANTERIOR PERO CAMARA RELLENA CON FIBRA DE VIDRIO.	0.50	0.40	0.50	0.25	0.10	0.10
LOSETAS CUSHIONTONE FIGURADO DE 14 MM SOBRE LA PARED.	0.14	0.23	0.60	0.73	0.83	0.64
IGUAL QUE EL ANTERIOR PERO S/ENLISTONADO.	0.17	0.60	0.52	0.71	0.81	0.71
LOSETAS CUSHIONTONE CLASICO DE 13 MM SOBRE LA PARED.	0.10	0.19	0.64	0.78	0.72	0.52

MATERIAL	128Hz	256Hz	512Hz	1024Hz	2048Hz	4096Hz
REVESTIMIENTOS DE MADERA						
(continuacion)						
IGUAL QUE EL ANTERIOR PERO S/ ENLISTONADO.	0.11	0.57	0.54	0.66	0.71	0.54
LOSETAS CUSHIONTONE CLASICAS DE 19 MM, SUSPENDIDAS	0.35	0.62	0.71	0.71	0.68	0.52
PLACAS Y PANELES						
PERFORADOS.						
PLACAS PERFORADAS DE FIBRAYESO INSONA	0.40	0.80	0.62	0.92	0.81	0.65
IGUAL PERO DE FONEX.	0.13	0.36	0.65	0.62	0.63	0.59
IGUAL PERO DE SCUNDEX	0.19	0.40	0.82	0.85	0.82	0.48
IGUAL PERO DE ECHOSTOP	0.10	0.30	0.50	0.92	0.98	0.51
IGUAL PERO DE INTERFON DE		0.40	A	0.95		
TECHOS METALICOS ACIERCOUSTIC.	0.66	0.69	0.94	0.95	0.76	0.54
TECHOS METALOACUSTICOS DE SKINPLATE CON 70 MM DE FIBRA DE VIDRIO.	0.65	0.51	0.80	0.95	0.92	0.85
PANELES RIGIDOS CON ORIFICIOS DE 1 CM CUYA SUPERFICIE SUPONE EL 1.1 % DEL TOTAL.	0.30	0.50	0.40	0.20	0.08	----
IGUAL PERO 2 %	0.40	0.67	0.58	0.35	0.20	----
COMO EL ANTERIOR PERO CON UN REVOCO POROSO A BASE DE UNA TIROLESA DE POMEX Y VERMICULITA.	0.54	0.60	0.60	0.54	0.70	----
PANEL DE YESO PERFORADO EN UN 12 % DE SUPERFICIE Y 20 MM DE FIBRA DE VIDRIO EN EL INTERIOR	0.40	0.60	0.80	0.60	0.60	----
PLACA DE ACERO PERFO- RADA AL 22 % CON 4.5 CM. DE LANA MINERAL.	0.38	0.87	0.93	0.86	0.84	0.85

MATERIAL	128Hz	256Hz	512Hz	1024Hz	2048Hz	4096H
----------	-------	-------	-------	--------	--------	-------

VARIOS

VENTANA ABIERTA	1	1	1	1	1	1
REJILLA VENTILACION.	0.50	0.50	0.40	0.35	0.30	0.25
ARENA SECA	0.15	0.35	0.40	0.50	0.55	0.30
ARENA HUMEDA	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
CAPA DE NIEVE	----	0.95	----	0.95	----	0.95
PUPITRE	0.04	----	0.04	----	0.04	----
AIRE POR METRO CUBICO HUMEDAD RELATIVA 40 %.	----	----	----	----	0.0016	0.009
IGUAL PERD 50%	----	----	----	----	0.0012	0.008
IGUAL PERD 60%	----	----	----	----	0.001	0.007

SUPERFICIES REFLEJANTES

VIDRIO	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02
MARMOL	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01
HORMIBON C/CEMENTO.	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01
PARED DE LADRILLO	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05
AGUA QUIETA.	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
YESO S/PARED.	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
REVOQUE DE CAL	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.07
ENLUCIDO RUGOSO DE CEMENTO.	0.02	0.02	0.06	0.08	0.04	0.05