

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ANALISIS Y CONTROL DE RUIDO INDUSTRIAL MEDIANTE
APLICACION DE UN SISTEMA ACTIVO**

**Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela**

Por el Br. Daniel A. Rivas A.

**Para optar al Título
de Ingeniero Mecánico**

Caracas, 2003

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ANALISIS Y CONTROL DE RUIDO INDUSTRIAL MEDIANTE
APLICACION DE UN SISTEMA ACTIVO**

TUTOR ACADEMICO: Prof. Jorge Barillas

**Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Daniel A. Rivas A.
Para optar al Título
de Ingeniero Mecánico**

Caracas, 2003

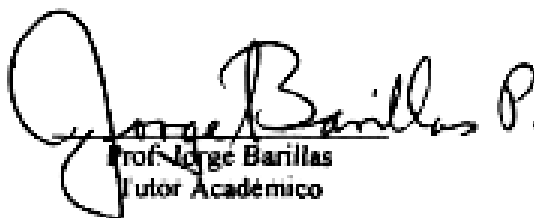
Caracas, 10 de noviembre de 2003

ACTA

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Daniel A. Rivas A. titulado:

"Análisis y control de ruido industrial mediante aplicación de un sistema activo"

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico, y sin que ella signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO


Prof. Jorge Barillas
Tutor Académico


Prof. Rodolfo Grullon
Jurado


Prof. Pedro Lecue
Jurado

VEREDICTO

Los suscritos miembros del jurado examinador designado por el consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Daniel Alejandro Rivas Aponte C.I. 13.201.445 el cual lleva por título

"ANÁLISIS Y CONTROL DE RUIDO INDUSTRIAL MEDIANTE APLICACIÓN DE UN SISTEMA ACTIVO"

Decidimos conferirle una **MENCION HONORIFICA** como premio al esfuerzo realizado y como estímulo a la actividad creativa demostrada en el transcurso de la elaboración de esta tesis de grado. El trabajo constituye un aporte importante e inédito al control del ruido industrial aplicando el método activo. El mismo se elaboró siguiendo una metodología rigurosa.

En fe de lo anteriormente expuesto se levanta la presente Acta en Caracas, a los diez días del mes de noviembre de dos mil tres, dejándose constancia que, de acuerdo a la normativa vigente, actuó como coordinador del jurado examinador el Prof. Jorge Barillas.


Prof. Jorge Barillas
Tutor Académico



Prof. Rodolfo Grullon
Jurado



Prof. Pedro Lecue
Jurado

VEREDICTO

Los suscritos miembros del jurado examinador designado por el consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller **Daniel Alejandro Rivas Aponte C.I. 13.201.445** el cual lleva por título

"ANÁLISIS Y CONTROL DE RUIDO INDUSTRIAL MEDIANTE APLICACIÓN DE UN SISTEMA ACTIVO"

Decidimos conferirle una **MENCION PUBLICACION** como premio al esfuerzo realizado y como estímulo a la actividad creativa demostrada en el transcurso de la elaboración de esta tesis de grado. El trabajo constituye un aporte importante e innovador al control del ruido industrial aplicando el método activo. El mismo aporta datos importantes para la elaboración de trabajos posteriores.

En fe de lo anteriormente expuesto se levanta la presente Acta en Caracas, a los diez días del mes de noviembre de dos mil tres, dejándose constancia que, de acuerdo a la normativa vigente, actuó como coordinador del jurado examinador el Prof. Jorge Barillas.


Prof. Jorge Barillas
Tutor Académico


Prof. Rodolfo Grullon
Jurado


Prof. Pedro Lecue
Jurado

DEDICATORIA

A mis padres Diego C. Rivas G. y Ligia A. Aponte de Rivas, por darme el cariño y la comprensión para lograr ser la persona que soy hoy. Los quiero mucho.

A mis hermanos Diego J. Rivas A. y Dieli M. Rivas A. por apoyarme siempre y colaborar conmigo en todo momento. Les deseo que logren todas sus metas que se propongan satisfactoriamente.

A mis familiares y amigos que de una u otra forma me han ayudado a seguir adelante.

Daniel A. Rivas A.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por iluminarme el camino a seguir y por darme las fuerzas para continuar en los momentos más difíciles.

Agradezco a mis padres Diego C. Rivas G y Ligia A. Aponte de Rivas por darme la vida y ofrecerme los consejos y el apoyo cuando los necesité.

A mi tutor académico profesor Ing. Jorge Barillas por haberme guiado en la realización de este trabajo, ofreciéndome su apoyo y conocimiento cuando lo requerí.

Le doy gracias a la Universidad Central de Venezuela por ofrecerme la oportunidad de formarme como Ingeniero Mecánico.

A mi hermano Diego J. Rivas A. por brindarme todo su apoyo y conocimiento cuando lo necesité.

A mi hermana Dieli M. Rivas A. por estar siempre a disposición de colaborar en todo lo que estaba a su alcance.

Al profesor Ing. Dan Montoya por ofrecerme sus conocimientos y ayudarme así a la culminación de mi trabajo.

Les agradezco a mis tías Zoraida y Milagros Rivas por las atenciones y el cariño que siempre me brindaron en todo momento, al igual que mi amiga Lucy por estar siempre pendiente de mí.

A mis amigos Maikol Molina, Marco A. Gonzáles y Edgar Morales por colaborar conmigo de manera incondicional en la realización de este trabajo.

Quiero agradecer a mis primos Mauricio Rivas, Gabriela Villavicencio y Adriana Medrano por apoyarme y colaborar en todo lo que estuvo a su alcance, así como también a mi tío Antonio Rivas por su atención y colaboración que siempre me brindó.

Finalmente a todos mis amigos que estuvieron pendientes de mí durante la realización de este trabajo.

Daniel A. Rivas A.

ANÁLISIS Y CONTROL DE RUIDO INDUSTRIAL MEDIANTE APLICACIÓN DE UN SISTEMA ACTIVO

Tutor Académico: Prof. Jorge Barillas.

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.

Año 2003, p.200

Palabras Clave: Ruido, Procesamiento de Señales Digitales, Simulación, Filtros FIR y IIR, Cancelación Activa de Ruido

Resumen. El objetivo fundamental de este trabajo fue mostrar otra alternativa para controlar el ruido presente en el área industrial, poniendo a disposición todo el conocimiento básico requerido para determinar la viabilidad de un sistema de control activo de ruido ante un posible problema ruido. Esto estuvo fundamentado principalmente en la seguridad e higiene industrial, debido a los elevados índices de sordera ocupacional encontrados recientemente en la industria. El control activo de ruido es una técnica que apunta a contrarrestar el ruido indeseado, introduciendo otro adicional electrónicamente en el campo de los sonidos; esta tecnología se ha llegado a implementar en equipos de protección personal. El estudio de este método y su comparación con el método pasivo, me permitió conocer tanto sus ventajas como sus limitaciones, así como también una metodología estructurada para lograr una aplicación lo mas óptima posible. Con esto se pretende lograr que futuras aplicaciones de este método activo, sean lo más eficiente y económicos posible.

ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

c: Velocidad del sonido.

CAR: Control activo de ruido.

C.A.D: Convertidor de analógico a digital.

C.D.A: Convertidor de digital a analógico.

cps: Ciclos por segundo.

cpm: Ciclos por minuto.

dB: Decibeles.

dB A: Decibeles en escala A.

dBV: Nivel de tensión eléctrica.

f: Frecuencias de la onda sonora.

F: Frecuencia Máxima.

F_c: Frecuencia de corte.

FFT: Transformada rápida de fourier.

FIR: Respuesta de impulso finito.

fs: Frecuencia de muestreo.

Hz: Hertzio.

IIR: Respuesta de impulso infinito.

M: Longitud de vector.

m: Metro.

mm: Milímetro.

N: Número de muestras.

L_p: Nivel de presión sonora (NPS).

L: Longitud.

P: Presión.

Pref: Presión de referencia.

P_{RMS} : Presión cuadrática media.

P.T: Pérdida por transmisión.

r: Radio.

T: Período.

V: Voltio.

W: Watios.

λ : Longitud de onda.

INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	VII
RESUMEN	IX
ABREVIATURAS Y SIMBOLOS	X
INDICE DE CONTENIDOS	XII
INDICE DE FIGURAS	XVII
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I:	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1.- ANTECEDENTES	3
1.2.-PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.3.- OBJETIVOS	5
1.3.1.- General	5
1.3.2.-Específicos	6
1.4.- ALCANCES	6
CAPITULO II:	8
RUIDO OCUPACIONAL	8
2.1.- LA NATURALEZA DEL SONIDO	8
2.1.1.-Ondas Sonoras	8
2.1.3.- Frecuencia	10
2.1.4.- Longitud de Onda	11
2.1.5.- Ondas Periódicas	11
2.1.7.- Espectro	12
2.1.8.- Intensidad Sonora	14
2.1.9.- Reflexión, Transmisión, Absorción y Difracción	14
2.1.9.1.- Reflexión y Transmisión	14
2.1.9.2.- Absorción	15

2.1.9.3.- Difracción	16
2.1.10.- Presión Sonora	18
2.1.11.- Divergencia	18
2.1.12.- Reverberación	18
2.2.-NIVELES SONOROS	18
2.2.1.- Nivel de Presión Sonora (NPS)	18
2.2.1.1.- Nivel Sonoro con Ponderación A	19
2.2.1.1.1.- Ponderación A y Efectos del Ruido	22
2.2.2.- Nivel de Banda Octava	25
2.2.2.1.- Banda Octava	25
2.2.3.- Combinación de Niveles (Suma Energética de Niveles)	25
2.2.4.- Directividad	27
2.2.5.- Enmascaramiento	28
2.3.- ENERGÍA E IMPEDANCIA	30
2.3.1.- Magnitud de la Energía Acústica	31
2.3.2.- Impedancia Verdadera e Imaginaria	31
2.4.- EFECTOS DEL RUIDO SOBRE EL ORGANISMO	31
2.4.1.- El oído Humano	31
2.4.1.1.- Anatomía, Fisiología y Patología	32
2.5.- EFECTOS DEL RUIDO SOBRE LA AUDICIÓN	34
2.5.1.- Exposición Breve a Ruidos de Alta Intensidad	34
2.5.2.- Exposición Prolongada	34
2.5.4.- Desplazamiento Transitorio del Umbral	35
2.5.5.- Sensibilidad al Ruido	35
2.6.- EFECTOS DEL RUIDO EN EL COMPORTAMIENTO	36
2.6.1.- Molestias	36
2.6.2.- Eficiencia, Rendimiento y Distracción	36
2.6.3.- Fatiga	37
2.7.- ELECTROACÚSTICA	37
2.7.1.- Aparatos de Medida Acústica como Elementos Físicos de Medida	37
2.7.1.1.- Altavoces	37
2.7.1.1.1.- Respuesta de un Cono de Altavoz a Frecuencias Distintas	38
2.7.1.1.2.- Revestimiento de los Altavoces	39
2.7.1.1.3.- Bocinas	39
2.7.1.1.5.- Características	42
2.7.1.2.- Micrófonos	42
2.7.1.2.1.- Definición y Tipos de Transductores	42
2.7.1.2.2.- Respuesta en Frecuencia	44
2.7.1.2.3.-Directividad y Diagramas Polares	44
2.7.1.2.4.- Máximo Nivel de Presión Sonora	47
2.7.1.2.5.-Sensibilidad	47
2.7.1.2.6.- Nivel de Ruido	47
2.7.1.2.7.- Límite de Saturación	48
2.7.1.2.8.- Efecto Proximidad	48
2.7.1.2.10.- Calibración	49
CAPITULO III:	50

ESTUDIO DE LOS CONTROLADORES USADOS EN UN SISTEMA DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO	50
3.1.- FUNDAMENTOS DEL REGULADOR	50
3.2.- CONTORNOS Y DEFINICIONES GENERALES PARA UN SISTEMA DE CONTROL	51
3.3.- LIMITACIONES FÍSICAS DEL SISTEMA	58
3.4.- PRINCIPIOS BASICOS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DIGITAL	60
3.4.1.- Usando el Interfase en un Sistema Digital	60
3.4.1.1.- Antecedentes	61
3.5.- APRECIACIÓN GENERAL DEL CONTROLADOR EN UN SISTEMA FEEDFORWARD ADAPTABLE	67
3.5.1.- Filtro Digital	69
3.5.1.1.- Especificando el Filtro Digital Apropriado	73
3.5.2.- Algoritmo Adaptable	74
3.5.2.1.- Antecedentes: Haciendo Uso de un Procesador de Señal adaptable	74
3.5.3.- Tasa de Muestreo	75
3.5.3.1.- Tasa de Muestreo Óptima	79
CAPITULO IV:	80
ANALISIS DE VIBRACION Y RUIDO GENERADO POR MAQUINARIAS ROTATORIAS INDUSTRIALES	80
4.1.- ASPECTOS GENERALES DE LAS VIBRACIONES EN MAQUINARIAS	80
4.1.2.- Vibración en Máquinas	81
4.1.2.1.- Vibración Mecánica	81
4.2.- CARACTERÍSTICAS DE LAS VIBRACIONES	82
4.2.1.- Frecuencia de Vibración	83
4.2.2.- Desplazamiento de Vibración	83
4.2.3.- Velocidad de Vibración	84
4.2.4.- Aceleración de Vibración	84
4.2.5.- Fase	84
4.3.- CAUSAS QUE ORIGINAN LAS VIBRACIONES	84
4.3.1.- Medición global de vibraciones	85
4.3.2.- Puntos de Medición	87
4.3.3.- Elección de la Señal a Medir	88
4.4.- ORIGEN DE LAS FRECUENCIAS DE LAS VIBRACIONES EN MAQUINARIAS	90
4.4.1.- Frecuencias Generadas	90
4.4.2.- Frecuencias Excitadas	90
4.4.2.1.- Influencia de las Vibraciones Externas	91
4.4.3.- Frecuencias Producidas por Fenómenos Electrónicos	91
4.5.- MONITOREO DE VIBRACIONES EN LA MAQUINARIA INDUSTRIAL	91
4.5.1.- Descripción de los Niveles de Vibraciones	92

4.5.2.- Dominios del Tiempo y la Frecuencia	93
4.5.2.1.- Análisis en el Dominio de la Frecuencia	93
4.5.3.- Filtros	94
4.5.3.1.- Filtro Pasa – Bajo	94
4.5.3.2.- Filtro Pasa – Alto	94
4.5.3.3.- Filtro Pasa – Banda	94
4.5.4.- Calibración de los Espectros	95
4.5.5.- Analizadores de Señales	95
4.5.5.1.- Características Prácticas del Instrumento Virtual	95
4.5.5.2.- Plataforma para el Análisis de Señales	96
4.7.- ANÁLISIS DIGITAL DE SEÑALES VIBROACUSTICA	97
4.7.1.- Frecuencia de Nyquist y el Aliasing	97
CAPITULO V:	100
EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL QUE UTILAZAN UN SISTEMA DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO	100
5.1.- PERDIDA DE LA AUDICION	100
5.2.- PROTECCION AUDITIVA	100
5.2.1.- Protectores Endoaurales	100
5.2.2.- Protectores de Copa	101
5.2.3.- Entrenamiento	102
5.2.4.- Factores que afectan el funcionamiento de un sistema de control activo de ruido (CAR) en un equipo de protección personal	102
5.2.4.1.- La “Exactitud” del Micrófono Receptor de Ruido	103
5.1.2.2.- La Sofisticación de los Procesos Electrónicos	105
5.1.2.3.- La Eficacia del Altavoz	106
5.2.5.- Perfil de Cancelación	107
5.2.5.1.- Profundidad	109
5.2.5.2.- Anchura	110
5.2.5.3.- Posición	110
5.2.5.4.- El Alzar	110
5.2.6.- Perfiles de Ruido	112
5.2.8.- Optimización del Receptor de Cabeza Físico para el Uso Experimental desde el Punto de Vista Ergonómico	115
5.2.8.1.- Ajustabilidad	118
5.2.8.2.- Comodidad	118
5.2.8.3.- Sellos de los Oídos	118
5.2.8.4.- Características Direccionales	120
CAPITULO VI:	
SIMULACION BASICA REALIZADA EN MATLAB, DONDE SE EJEMPLIFICA DE MANERA GENERAL COMO TRABAJA UN SISTEMA DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO	122
6.2.- SIMULACION EN MATLAB DE UN SISTEMA DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO	122

CAPITULO VII:	METODOLOGIA
ESTRUCTURADA PARA IMPLEMENTAR UN SISTEMA DE CONTROL	
ACTIVO DE RUIDO	131
7.1.- CONTROL DE RUIDO EN ESPACIO LIBRE	131
7.1.1.- Métodos de Control Activo	135
7.1.1.1.- Funcionamiento Físico del Control Activo	136
7.1.1.2.- Factores que Limitan la Cantidad (dB) de Ruido Cancelado	140
7.1.1.3.- Separación entre las Fuentes de Sonido	141
7.1.1.4.- Relación entre la Fuente Primaria y la Fuente de Control	142
7.1.1.5.- Efecto de la Colocación del Micrófono que Mide el Error	145
7.1.1.7.- Influencias de la Causalidad	148
7.2.- CONTROL DEL RUIDO EN ESPACIO CERRADO	151
7.2.1.- Origen del Ruido	151
7.2.2.- Salida del Sonido en un Recinto Cerrado	152
7.2.3.- Acondicionamiento del Campo de los Sonidos	153
7.2.4.- Control del Ruido por Métodos Pasivos	157
7.2.5.- Control del Ruido por Método Activo	158
APENDICE	171
ANEXOS	179

INDICE DE FIGURAS

FIGURA Nº 2.1. GENERACIÓN DE LAS FLUCTUACIONES DE LA PRESIÓN POR UNA SUPERFICIE VIBRANTE.	9
FIGURA Nº 2.2. ONDAS QUE SE GENERAN AL PASAR DE UN MEDIO A OTRO	15
FIGURA Nº 2.3. FRECUENCIA & ABSORCIÓN	15
FIGURA Nº 2.4. DATOS DE UN EJEMPLO REAL. A LA IZQUIERDA LA FUENTE DE RUIDO, A LA DERECHA EL OYENTE	17
FIGURA Nº 2.5. DIFRACCIÓN DE ONDAS SONORAS AL PASAR DE UNA ABERTURA	17
FIGURA Nº 2.8. NIVELES SONOROS Y RESPUESTA HUMANA	24
FIGURA Nº 2.9. AUMENTO CORRESPONDIENTE A DOS NIVELES L_1 Y L_2 ($L_1 > L_2$). L_T ES EL NIVEL TOTAL	26
FIGURA Nº 2.10. DISTINTOS VALORES DE Q_0 PARA UNA FUENTE PEQUEÑA NO DIRECCIONAL UBICADA EN UN CUARTO RECTANGULAR	28
FIGURA Nº 2.11. EFECTO DEL ENMASCARAMIENTO	29
FIGURA Nº 2.12. DIAGRAMA DEL OÍDO HUMANO	33
FIGURA Nº 2.13. EJEMPLO DEL ANCHO DE HAZ DE UNA BOCINA	40
FIGURA Nº 2.14. DISTRIBUCIÓN APROXIMADA DE LAS BANDAS DE FRECUENCIA HABITUALES	41
FIGURA Nº 2.15. RESPUESTA EN FRECUENCIA DE UN MICRÓFONO	44
FIGURA Nº 2.16. TIPOS DE RESPUESTA POLAR EN MICRÓFONOS	46
FIGURA Nº 2.17. EFECTO PROXIMIDAD EN LOS MODELOS 4011 Y 4012 DE LA MARCA DPA EN MICRÓFONOS	49
FIGURA Nº 3.1. EL “SISTEMA DE CONTROL FÍSICO” CONSISTE EN ALTAVOCES Y MICRÓFONOS, QUE SON LOS QUE ACTUALMENTE PRODUCEN Y MIDEN EL CAMPO DE SONIDO. EL “SISTEMA DE CONTROL ELECTRÓNICO” HACE LOS CÁLCULOS REQUERIDOS PARA GENERAR UNA CANCELACIÓN DEL CAMPO DE SONIDO	50
FIGURA NO 3.2. SISTEMA DE CONTROL DE LAZO ABIERTO	52
FIGURA NO 3.3. SISTEMA DE CONTROL DE LAZO CERRADO	53
FIGURA NO 3.3. SISTEMA DE CONTROL DE LAZO CERRADO. TAMBIÉN IDEADO FRECUENTEMENTE EN LA IMPLEMENTACIÓN EN UN SISTEMA DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO	54
FIGURA NO 3.5. ARREGLO DE UN SISTEMA DE CONTROL FEEDFORWARD	56
FIGURA NO 3.6. ARREGLO DE UN SISTEMA DE CONTROL FEEDFORWARD ADAPTABLE	56
FIGURA NO 3.7. ARREGLO DE UN SISTEMA DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO FEEDFORWARD ADAPTABLE	57
FIGURA NO 3.9. SUMA DISCRETA (DIGITAL) DE DOS ONDAS	63
FIGURA NO 3.10. UN FILTRO DE PASO BAJO REMOVERÁ LOS BORDES DE LOS PASOS (VALORES DISCRETOS) DE LA ONDA SENO	65
FIGURA NO 3.11. SISTEMA DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO FEEDFORWARD ADAPTABLE CON LOS REQUERIMIENTOS DE COMPONENTES DE SISTEMAS DIGITALES MOSTRADO EN FORMA DE BLOQUES	66
FIGURA NO 3.12. REPRESENTACIÓN DISCRETA DE UNA SEÑAL CONTINUA, COMO PROVENIENTE DEL MICROPROCESADOR POR EL C.A.D.	67
FIGURA NO 3.13. CONTROLADOR FEEDFORWARD ADAPTABLE	68
FIGURA NO 3.14. EL SISTEMA DE CONTROL DE LA FUNCIÓN TRANSFERENCIA DEBERÍA TENER LA MISMA AMPLITUD, PERO DE FASE INVERTIDA, COMO EL OBJETIVO DEL SISTEMA ACÚSTICO/ESTRUCTURAL	71
FIGURA Nº 3.16. MUESTREANDO LA RESPUESTA DE UN SISTEMA CON UN COMPONENTE DOMINANTE DE 1 HZ DE FRECUENCIA, CON TRES DIFERENTES	

RATAS DE MUESTREO: 2 HZ, 5 HZ, Y 10 HZ. NÓTESE QUE LAS CRUCES INDICAN EL VALOR MUESTREADO	78
FIGURA N° 4.1. CARACTERÍSTICAS DE LA VIBRACIÓN	83
FIGURA N° 4.2. ESQUEMA GENERALIZADO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN	86
FIGURA N° 4.3. RELACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS ESPECTROS	88
FIGURA N° 4.4. PLATAFORMA PARA EL ANÁLISIS DE SEÑALES VIBROACÚSTICA	96
FIGURA N° 5.1. EQUIPOS DE PROTECCIÓN AUDITIVA, (DE COPA Y ENDOAURALES)	101
FIGURA N° 5.2. NIVELES DE RIESGOS PARA LA AUDICIÓN	103
FIGURA N° 5.3. VISTA SUPERIOR Y LATERAL DE UN PROTECTOR DE COPA (TAPA OÍDOS) CONTROL ACTIVO DE RUIDO	105
FIGURA N° 5.4. PRUEBA DE AUDICIÓN DE UN OÍDO ARTIFICIAL (UN MICRÓFONO), PARA EVALUAR UN RECEPTOR DE CABEZA (TAPA OÍDO)	108
FIGURA N° 5.5. CUALIDADES DE UNA CURVA DE CANCELACIÓN PRESENTE EN RECEPTOR DE CABEZA ACTIVO	109
FIGURA N° 5.6. FENÓMENO DE ALZAR PARA VARIOS RECETORES DE CABEZA	111
FIGURA N° 5.7. DATOS ESPECÍFICOS DE RUIDO, PARA DOS AEROPLANOS DE UN SOLO MOTOR	113
FIGURA N° 5.8. ZONA DE RIESGO DE PÉRDIDA AUDITIVA	114
FIGURA N° 5.9. 10,20 Y 30 AÑOS PROYECTADOS EN FUNCIÓN A LA PÉRDIDA DE AUDICIÓN	115
FIGURA N° 5.10A DIMENSIONES PARA LA ANCHURA, LA ALTURA, Y LA POSICIÓN PRINCIPALES DEL OÍDO	117
FIGURA N° 5.10B TABLA DE DIMENSIONES PARA LA ANCHURA, LA ALTURA, Y LA POSICIÓN PRINCIPALES DEL OÍDO	117
FIGURA N° 5.11. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES USADOS PARA LA FABRICACIÓN DE SELLOS PARA LOS OÍDOS	119
FIGURA N° 5.12. CARACTERÍSTICAS DIRECCIONALES EN EL SER HUMANO	121
FIGURA N° 6.1. ESQUEMA GENERAL DE LA SIMULACIÓN REALIZADA EN MATLAB DE UN SISTEMA DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO	127
FIGURA N° 6.2A. ESQUEMA DE LA REPRODUCCIÓN DEL ARCHIVO DE AUDIO DEL LA PERTURBACIÓN PRIMARIA, A TRAVÉS DE UN BLOQUE MANEJADOR DE ONDAS	128
FIGURA N° 6.2B. ESQUEMA DE LA REPRODUCCIÓN DEL ARCHIVO DE AUDIO DEL RUIDO RESIDUAL, A TRAVÉS DE UN BLOQUE MANEJADOR DE ONDAS	128
FIGURA N° 6.3. GRÁFICA DE LA SUPERPOSICIÓN DEL ESPECTRO DEL RUIDO PRIMARIO (EN COLOR AZUL) Y EL ESPECTRO DEL RUIDO RESIDUAL (EN COLOR ROJO)	129
FIGURA N° 6.5. GRÁFICA GENERADA POR UN BLOQUE DE “SCOPE” DONDE SE REPRESENTA LA SUPERPOSICIÓN DE LA SEÑAL FILTRADA (EN AZUL) Y LA MISMA SEÑAL DESFASADA 180 GRADOS (EN ROJO)	130
FIGURA N° 7.1. GRÁFICA TÍPICA DE PÉRDIDA POR TRANSMISIÓN (P.T.) EN PANELES EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA	134
FIGURA N° 7.2. EFECTO DE COINCIDENCIA	135
FIGURA N° 7.3. SIMILITUD ENTRE LA INTERFERENCIA DE DOS ONDAS DE RUIDO COHERENTES	137
FIGURA N° 7.4. MÁXIMO NIVEL DE ATENUACIÓN POSIBLE PARA DOS PEQUEÑAS ONDAS DE RUIDO, TRAZADO EN FUNCIÓN A LA DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE ELLAS	142
FIGURA N° 7.5. POSIBLE ARREGLO PARA CONTROL ACTIVO DE RUIDO EN EL ESCAPE DE UN VEHÍCULO	144
FIGURA N° 7.6. RELACIÓN ÓPTIMA ENTRE LA SALIDA DE LA FUENTE DE CONTROL (CAUDAL) Y LA SALIDA DE LA FUENTE PRIMARIA (CAUDAL), PARA UNA REDUCCIÓN DE LA POTENCIA ACÚSTICA TOTAL	145
FIGURA N° 7.7. SEÑAL DE REFERENCIA COMO UNA MEDIDA DE LA ROTACIÓN DE LAS MÁQUINAS	149

FIGURA N° 7.8. CAMPO DE LOS SONIDOS EN UN ESPACIO CERRADO, MOSTRANDO UN PATRÓN DERECHO DE LA ONDA (LAS ÁREAS OSCURAS SON LOCALIZACIONES DE LA AMPLITUD DE ALTA PRESIÓN, LAS ÁREAS LIGERAS SON LOCALIZACIONES DE LA AMPLITUD DE BAJA PRESIÓN). OBSERVAR QUE HAY UNA MITAD DE LAS TRES LONGITUDES DE ONDA EXHIBIDAS EN EL MODO ANTES MENCIONADO 155

FIGURA N° 7.9. DISTRIBUCIÓN TANGENCIAL TÍPICA DE LA PRESIÓN DEL MODO DE RESONANCIA (EN UN ESPACIO CERRADO); EL MODO EXHIBIDO FORMA UN PATRÓN 3 X 2 NODAL "ÁREAS" 158

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el hombre se ha visto en la necesidad de usar diversos tipos de maquinarias y equipos, ya sea con propósitos industriales y/o de servicio, diseñado con miras a la búsqueda del confort. Lamentablemente, el uso de estos adelantos genera alteraciones en la acústica natural del ambiente. Estas alteraciones acústicas, sonidos indeseados, es lo que se define como ruido; pero es difícil discriminar el límite entre el ruido y el sonido, ya que los factores psicológicos y fisiológicos generan diferentes respuestas a la misma manifestación sonora.

El ruido posee una serie de características que lo diferencian de otros contaminantes, dificultando así la implementación de su control y monitoreo. Entre estas cualidades se pueden mencionar lo siguiente: requiere de muy poca energía para producirlo, es decir la energía acústica involucrada en la generación de altos niveles de ruido es poco significativa; es percibido por un solo sentido a diferencia de otros contaminantes, el ruido sólo se percibe a través del sentido del oído; no deja residuo ya que una vez que la fuente generadora de ruido deja de funcionar, la contaminación acústica desaparece. Esto nos obliga a cuantificar su magnitud en el mismo instante que se produce.

Las condiciones en el ámbito de trabajo se ven influenciadas directamente en el desarrollo de cualquier actividad productiva, ya sea de forma positiva o negativa. Cuando las condiciones del ámbito de trabajo son extremadamente desfavorables, se corre el riesgo de generar una enfermedad como consecuencia del trabajo, y por consiguiente un incremento de los accidentes.

Para controlar el ruido existen dos tipos de métodos, el método pasivo y el método activo. La manera tradicional de hacerlo es mediante técnicas pasivas, así como barreras o silenciadores que atenúan el ruido indeseable.

Los silenciadores pasivos usan ya sea el concepto de cambio de impedancia, logrado mediante una combinación de baffles y tubos; estos silenciadores reciben el nombre de silenciadores reactivos, o el de pérdida de energía, causado por la propagación del sonido a través de un tubo de material absorbente de ruido para así proporcionar el silenciamiento, estos silenciadores son conocidos como silenciadores resistivos. Los silenciadores reactivos se utilizan más en motores, mientras que los silenciadores resistivos son utilizados para ruidos en ductos de ventilación. Estos silenciadores pasivos son muy cotizados para ruidos con frecuencias de banda ancha, sin embargo son muy costosos, grandes e ineficientes para frecuencias bajas. En un esfuerzo para sobreponerse a estos problemas, se ha mostrado gran interés por el control activo de ruido (CAR), ANC por sus siglas en inglés (Active Noise Control). El sistema CAR consta a *grosso modo*, de un dispositivo electroacústico que cancela el sonido indeseable (ruido) generando un antisonido (antirruido) de igual amplitud, pero de fase opuesta (180° de desfaseamiento). El ruido original y el antirruido se combinan acústicamente, dando como resultado la cancelación de ambos sonidos.

El control activo de ruido es un área emocionante en la investigación y en el desarrollo de la ingeniería; considerando que este sea aplicado correctamente, a los problemas que requieren esta tecnología, este puede proporcionar resultados asombrosos. Esto es particularmente cierto para problemas de ruido de baja frecuencia, donde las técnicas pasivas tradicionales para el control de ruido requiere a menudo de mucho espacio y dinero. También hay que considerar como se dijo anteriormente que el uso correcto del control activo de ruido puede producir resultados increíbles, pero el uso incorrecto puede ser increíblemente decepcionante, desafortunadamente este último resultado es más probable que el primero; este es un problema que ha perseguido a esta tecnología en su empuje para la aceptación comercial. El uso de la tecnología del control activo de ruido o aun la consideración de su uso es generalmente una tarea complicada. El uso correcto del control activo de ruido requiere una integración de la física, de la ingeniería y del procesamiento de una señal digital.

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.- ANTECEDENTES

En los estudios realizados sobre el control activo de ruido se ha podido observar a través del tiempo muchas de las ventajas que han surgido de la aplicación de estos sistemas en comparación con los sistemas pasivos. En primer lugar, el método activo representa un gran rendimiento para frecuencias bajas, por consiguiente tienden a ser muy confiables cuando se requiera una reducción del ruido para las frecuencias por debajo de los 600 Hz aproximadamente. Mientras que los silenciadores convencionales o pasivos tienen características opuestas, son más efectivos para frecuencias más altas.

El principio de superposición establece que es posible cancelar el ruido con el uso del antirruído, es decir, que existe la posibilidad de atenuar el ruido bombardeando ofensivas con sus opuestos; así nace el control activo de ruido en el año 1934 con el científico alemán Paúl Lueg, pero es para el año de 1936 cuando obtuvo en Estados Unidos bajo la patente N° 2.043.416 el “Procesador de amortiguación de oscilaciones de ruido”. En esta patente Lueg hizo uso del hecho bien conocido, que la mezcla física arbitraria de ondas acústicas resulta en interferencia constructiva o destructiva, la cual causa aumento o debilitamiento del campo sonoro, respectivamente. Este fue uno de los primeros trabajos realizados en el control activo de ruido, y aunque no se encuentra en actual aplicación, Lueg entendió el principio básico que generó gran atractivo en el control activo de ruido; es decir que el tuvo como premisa básica que:

“La velocidad del sonido en el aire es muchísimo menor que la velocidad de los impulsos eléctricos. Esto significa que mientras una onda de sonido relativamente lenta esté moviéndose de un lugar donde ésta es detectada a un lugar a donde pueda

ser atenuada hay un tiempo amplio disponible dentro de un circuito electrónico para el procesamiento de señales y activación de elementos de control, para un mayor o menor grado, dependiendo del rango de frecuencias, tipo de ruido y alcance físico del sistema”.

En su patente Lueg probó dirigir este principio de superposición para la interferencia destructiva del ruido, así su patente de exploración introdujo el concepto de la atenuación activa del ruido con el uso de una onda producida artificialmente con el mismo ruido presentando un desfase de 180° , es decir, que según Lueg debido al comportamiento sinusoidal de las ondas sonoras, a partir de ellas es posible crear antirruidos con el solo desfase de 180° de dichas ondas.

La ventilación, la calefacción y el acondicionamiento del aire, fueron los primeros dispositivos en beneficiarse de la tecnología del control activo de ruido, que fue desarrollada en el laboratorio CNRS4 y los mecánicos en Marsella, Francia. Desde entonces la marina francesa ha adoptado la tecnología para tubos de aire en sus submarinos.

Los fabricantes de autos Renault tienen una gran experiencia en la investigación del control activo de ruido para diversos usos, como por ejemplo ruidos producidos por el motor; y otra gran mayoría de fabricantes de autos han comenzado recientemente la investigación. Comercialmente el control activo de ruido ha podido satisfacer con éxito a la industria de la aéreo-electrónica, que reducía el ruido dentro de la cabina.

Este método activo también se está estudiando dentro de algunas universidades (Tech de la universidad de Virginia, en el estado de Pennsylvania) y laboratorios del gobierno (Centro de investigación de la NASA Langley y laboratorios de propulsión de la NASA Glenn Aéreo-Acústica).

A nivel nacional es muy poco lo que se ha investigado en esta área, aunque en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela, se hizo un trabajo especial de grado sobre el “Diseño y construcción de un sistema atenuador de ruido aplicado a ductos de aire acondicionado”.

1.2.-PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El método pasivo ha sido la manera tradicional de controlar el ruido y las vibraciones no deseadas. Las técnicas pasivas trabajan lo mejor posible en el centro de las altas frecuencias, pero los tratamientos pasivos pueden ser recargados y pesados cuando se utilizan para frecuencias muy bajas. El tamaño y el espacio que representaría un tratamiento pasivo depende generalmente de la longitud de la onda acústica, haciéndolos más robustos para frecuencias más bajas. Por esta razón se pretende elaborar una investigación de los sistemas de control activo de ruido aplicados a la industria, con el fin de mostrar una nueva alternativa para atacar los problemas relacionados con el ruido que originan algunas maquinarias industriales en donde el método pasivo no pueda lograr de manera sencilla y eficiente los resultados esperados.

1.3.- OBJETIVOS

1.3.1.- General

- Diseñar una metodología sencilla estructurada para realizar control activo de ruido en el área industrial, con fines de seguridad industrial y salud ocupacional.

1.3.2.-Específicos

- Estudiar el funcionamiento de los controladores usados en un sistema de control activo de ruido.
- Analizar los diversos espectros de vibración generados por maquinaria industriales que generen ruidos en bajas frecuencias.
- Estudiar los diferentes algoritmos usados en los sistemas de control activo de ruido.
- Descripción de los equipos de protección personal que utilizan un sistema de atenuación activa de ruido.
- Realizar una simulación sencilla en matlab ejemplificando, de manera general, cómo trabaja un sistema de control activo de ruido.
- Estudiar y aplicar la metodología en la solución de un problema real en la industria.

1.4.- ALCANCES

- Establecer los costos aproximados de la implementación de un sistema de control de ruido en una industria.
- Establecer una comparación entre el método pasivo y el método activo aplicado a una industria.
- Simulación en matlab de un caso particular de atenuación de ruido industrial mediante un sistema de control activo de ruido.

- Selección de algunos de los controladores más usados en un sistema de control activo de ruido.
- Establecer las diversas limitaciones del método de control activo de ruido para una industria.

CAPITULO II: RUIDO OCUPACIONAL

Considerando el registro de enfermedades ocupacionales arrojado por el Ministerio del Trabajo, en conjunto con el Instituto Venezolano de los Seguros Sociales (anexo 5), se obtuvo que la enfermedad profesional llamada “sordera ocupacional” para los años 2000 y 2001 ocupó la tercera posición de mayor registro de casos con esta enfermedad, y para el año 2002 ascendió a la segunda posición. Estos registros son muy alarmantes, motivo por el cual en este trabajo se trata de incursionar en el método del “control activo de ruido” como otra alternativa para atacar el problema de la pérdida de audición y efectos psicológicos (estrés, irritabilidad, etc.) en el área industrial, de manera de obtener y garantizar mejores condiciones de trabajo en las organizaciones industriales.

2.1.- LA NATURALEZA DEL SONIDO

2.1.1.-Ondas Sonoras

El sonido es el resultado de una perturbación que se propaga en un medio elástico. Por ejemplo cuando en alguna región del aire se produce una perturbación de presión, en la forma de una compresión, dicha región tiende a expandirse hacia las regiones vecinas. Esto produce a su vez una compresión en dichas regiones, que volverán a expandirse creando una compresión más lejos todavía. Este proceso se desarrolla en forma continua haciendo que la perturbación original se propague a través del aire alcanzando en algún momento la posición que ocupa algún receptor (por ejemplo un micrófono o un oído). El exceso de presión característico de la perturbación descrita se denomina **presión sonora**.

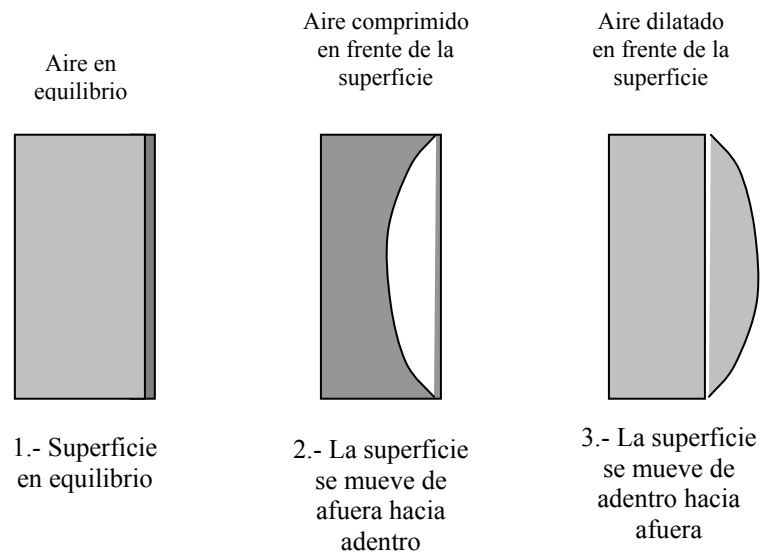


Figura N° 2.1. Generación de las fluctuaciones de la presión por una superficie vibrante.

Fuente: Scout D. Snyder, Active Noise Control. 2000

Este tipo de movimiento en el cual no es el medio en sí mismo sino alguna perturbación lo que se desplaza se denomina **onda**. Esto puede ser producto de fluctuaciones de la presión por una superficie vibrante, como se muestra en la figura N° 2.1.

Existen muchos otros tipos de ondas, tales como las ondas de radio, la luz, la radiación del calor, las ondas sobre la superficie de un lago, los movimientos sísmicos, etc. Cuando la onda tiene lugar en un medio líquido o gaseoso se denomina **onda acústica**. Cuando resulta audible, se llama **onda sonora**.

Un aspecto importante relativo a las ondas es que en las mismas hay algunas características o cualidades que se mantienen prácticamente constantes a lo largo del camino de propagación de las mismas. Entre estas características se encuentra la forma de onda y la energía total (siempre y cuando el medio sea no disipativo).

Las ondas acústicas viajan habitualmente a velocidad constante, la misma depende del medio de propagación y de las condiciones ambientales tales como la temperatura. A temperatura ambiente (20° C aprox.) la velocidad del sonido en el aire es:

$$c = 345 \text{ m/s.}$$

Esto significa que para recorrer una distancia de 345 m el sonido demora 1 s. En el agua el sonido viaja 4 veces más rápido que en el aire. Cuando hay gradientes de temperatura (variaciones de temperatura entre dos zonas), tal como sucede entre puntos distantes algunos cientos de metros, o que se encuentran a diferentes alturas, el camino que sigue el sonido es curvilíneo en lugar de recto. Esta es la razón por la cual nuestra percepción se confunde al intentar determinar auditivamente por dónde está pasando un avión.

2.1.2.- Ondas planas; Ondas Esféricas

Cuando las ondas sonoras tienen la misma dirección de propagación en todos los puntos, se denominan ondas planas, porque los puntos de compresión máxima forman superficies planas perpendiculares a la dirección de propagación. Los puntos de máxima depresión también son planos perpendiculares a la dirección de propagación. Estos planos de fase constantes se denominan frentes de onda. Muchas fuentes sonoras emiten ondas en que los puntos de máxima compresión forman esferas concéntricas.

2.1.3.- Frecuencia

Por definición, la frecuencia de un fenómeno periódico, como una onda sonora, es el número de veces que este fenómeno se repite a sí mismo en un segundo (el número de ciclos por segundo). Habitualmente la frecuencia se designa mediante un número seguido de la unidad hertzio (Hz).

2.1.4.- Longitud de Onda

La longitud de onda de un sonido es la distancia perpendicular entre dos frentes de ondas que tienen la misma fase. Esta longitud es la misma distancia que la recorrida por la onda sonora en un ciclo completo de vibración. La longitud de onda, que se designa con la letra griega lambda λ (en metros), esta relacionada con la frecuencia f (en hertzios) y la velocidad del sonido c (en metros por segundo) mediante la ecuación: $\lambda = c / f$ (mts).

En muchos problemas de control de ruido, la longitud real de las ondas sonoras no es una consideración importante, sino que más bien lo es la proporción entre la longitud de onda y alguna otra dimensión. Las propiedades direccionales de la fuente de un sonido dependen de la relación entre la longitud de onda del sonido radiado y las dimensiones de la fuente.

2.1.5.- Ondas Periódicas

En realidad, la mayoría de las ondas son el resultado de muchas perturbaciones sucesivas del medio, y no sólo una. Cuando dichas perturbaciones se producen a intervalos regulares y son todas de la misma forma, estamos en presencia de una **onda periódica**. En el caso de las ondas sonoras la frecuencia está entre 20 Hz y 20000 Hz. Las ondas acústicas de menos de 20 Hz se denominan **infrasonidos**, y los de más de 20000 Hz se llaman **ultrasonidos**. Por lo general, ni unos ni otros son audibles por el ser humano. Algunos animales (por ejemplo el perro) pueden escuchar sonidos de muy baja frecuencia, tales como los creados por las ondas sísmicas durante un terremoto.

Por esta razón los animales se muestran inquietos en los instantes previos a los terremotos: pueden escuchar la señal de advertencia que resulta inaudible para el ser humano. En forma similar, algunos animales escuchan ultrasonidos.

El murciélago es un caso notable, ya que escucha sonidos de más de 100.000 Hz, que le permite orientarse por medio de señales acústicas según el principio del **sonar** (semejante al conocido radar).

2.1.6.- Ondas Aperiódicas

Aun cuando muchos sonidos son aproximadamente periódicos, como los sonidos producidos por los instrumentos musicales de altura determinada (guitarra, flauta, piano), la inmensa mayoría de los sonidos naturales son **aperiódicos**, es decir, que las sucesivas perturbaciones no se producen a intervalos regulares y no mantienen constante su forma de onda. Esto es lo que técnicamente se denomina **ruido**. Las ondas aperiódicas en general no producen sensación de altura. Algunos ejemplos son el ruido urbano, el ruido del mar, y el sonido de muchos instrumentos de percusión tales como los tambores o los platillos.

2.1.7.- Espectro

El concepto de **espectro** es de importancia capital en Acústica. Cuando se mencionó el concepto de frecuencia, se dijo que las ondas periódicas tienen asociada una frecuencia. Sin embargo, por lo general dichas ondas contienen varias frecuencias a la vez. Esto se debe a un notable teorema matemático denominado Teorema de Fourier (en honor a su descubridor, el matemático francés Fourier), que afirma que cualquier forma de onda periódica puede descomponerse en una serie de ondas de una forma particular denominada **onda senoidal**, cada una de las cuales tiene una frecuencia que es múltiplo de la frecuencia de la onda original (**frecuencia fundamental**).

Así, cuando escuchamos un sonido de 100 Hz, realmente estamos escuchando ondas senoidales de frecuencias 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz, 500 Hz, etc. Estas ondas senoidales se denominan **armónicos** del sonido original, y en muchos instrumentos musicales (como la guitarra) son claramente audibles.

Cuando hablamos de un sonido original cuya forma de onda ya es senoidal y aplicamos el teorema de Fourier a una senoide, el resultado es que tiene un solo armónico, de la misma frecuencia que la senoide original, por supuesto. (Nótese que el Teorema de Fourier no dice que todas las formas de ondas deban tener varios armónicos, sino más bien que cualquier forma de onda puede obtenerse por superposición de cierta cantidad de senoides, cantidad que puede reducirse a una sola, que es lo que ocurre con las ondas senoidales). El hecho de que cada onda senoidal tiene una única frecuencia ha llevado a llamar también **tonos puros** a las ondas senoidales.

La descripción de las ondas senoidales que componen un sonido dado se denomina espectro del **sonido**. El espectro es importante debido a varias razones: Primero porque permite una descripción de las ondas sonoras que están íntimamente vinculadas con el efecto de diferentes dispositivos y modificadores físicos del sonido.

En otras palabras, si se conoce el espectro de un sonido dado, es posible determinar cómo se verá afectado por las propiedades absorbentes de una alfombra, por ejemplo. No puede decirse lo mismo en el caso en que se conozca sólo la forma de onda.

En segundo lugar, el espectro es importante porque la percepción auditiva del sonido es de naturaleza predominantemente espectral. En efecto, antes de llevar a cabo ningún otro procesamiento de la señal acústica, el oído descompone el sonido recibido en sus componentes frecuenciales, es decir, en las ondas senoidales que según el teorema de Fourier, conforman ese sonido.

El teorema de Fourier puede extenderse al caso de sonidos aperiódicos. Estos pueden ser tan simples como los sonidos de una campana o tan complejos como el así llamado **ruido blanco** (un ruido similar al que capta una emisora de FM en ausencia de señal).

En el primer caso, el espectro es discreto, vale decir un conjunto de frecuencias claramente diferenciadas, aunque no serán ya múltiplos de ninguna frecuencia. Podemos tener, por ejemplo, 100 Hz, 143,3 Hz, 227,1 Hz, 631,02 Hz. En el segundo caso, tenemos todas las frecuencias. Esto es lo que se denomina un espectro **continuo**.

2.1.8.- Intensidad Sonora

Existen algunos sonidos que son más intensos que otros, para ello hay muchas razones, pero la causa principal se atribuye a la amplitud. La **amplitud** de un sonido es el máximo exceso de presión (o presión sonora) en cada ciclo. En el caso de los sonidos aperiódicos, la amplitud puede estar cambiando continuamente. En este caso se acostumbra a obtener algún tipo de promedio. El más usual es la llamada presión cuadrática media: P_{RMS} .

2.1.9.- Reflexión, Transmisión, Absorción y Difracción

2.1.9.1.- Reflexión y Transmisión

Cuando una onda acústica incide sobre una superficie plana que separa dos medios, se producen dos ondas, una de reflexión y otra de transmisión. Cuando la inclinación de la onda incidente es superior a un ángulo dado (ángulo crítico), sólo se produce una onda reflejada. Cierta cantidad de energía pasa a formar parte de la onda reflejada y otra cierta cantidad pasa a ser parte de la onda transmitida, es función de la relación de impedancias acústicas entre el primer y el segundo medio.

La impedancia es la oposición que ejerce el medio al avance de la onda, algo así como la "dureza" del medio. Cuando se pasa del medio aéreo al acuático, casi toda la energía se refleja, debido a que las impedancias son muy diferentes. En cambio, entre una capa de aire frío y otra de aire caliente, casi toda la energía de la onda acústica pasa a formar la onda transmitida, ya que la impedancia acústica es parecida. En la figura N° 2.2, se muestra el efecto de las ondas al pasar de un medio a otro.



Figura N° 2.2. Ondas que se generan al pasar de un medio a otro

Fuente: Internet (conceptos generales de audio y acústica).

2.1.9.2.- Absorción

Una onda acústica implica el movimiento de partículas, las cuales rozan entre sí. Este roce consume parte de la energía, que se convierte en calor, disminuyendo la energía acústica total. La pérdida de energía, o absorción, depende de cada frecuencia, siendo generalmente mayor a altas frecuencias que a bajas frecuencias.

En medios fluidos como el aire o el agua se pueden dar los datos de absorción en función del camino recorrido por la onda acústica. La siguiente tabla muestra la absorción del aire a 20° centígrados y humedad del 70% para distintas frecuencias, en dB por kilómetro. Como se puede observar en la figura N° 2.3, la absorción es mucho mayor en las altas frecuencias que en las bajas.

Frecuencia (Hz)	31	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
Absorción (dB/Km.)	0.2	0.3	0.7	1.3	2.6	5.3	11.0	22.0	53.0	160

Figura N° 2.3. Frecuencia & Absorción

Fuente: Internet (conceptos generales de audio y acústica).

Por ejemplo, una onda acústica de frecuencia 500 Hz que recorre dos kilómetros sufre unas pérdidas por absorción del aire de 5.2 dB. Para calcular el nivel real, habrá que tener en cuenta las pérdidas por divergencia esférica.

También existe otro parámetro de la absorción, y es el que se usa en las especificaciones de materiales acústicos. Se suele llamar "coeficiente de absorción α ", es adimensional y sus valores van de 0 a 1, siendo cero equivalente a mínima absorción y uno máxima absorción. Este valor se usa principalmente para calcular los tiempos de reverberación de salas. El coeficiente α de un panel acústico depende principalmente del espesor, porosidad y forma que tenga.

2.1.9.3.- Difracción

Se entiende por difracción cualquier desviación de la propagación en línea recta debida a la presencia de algún obstáculo en el medio homogéneo. Por ejemplo, un muro que separa una zona residencial y una carretera, ya que no se interrumpe el medio de propagación, el aire. De forma parecida a como actúa la luz cuando se encuentra con un obstáculo, actúan las ondas acústicas. También se puede hablar de sombra acústica creada por un obstáculo. La sombra creada es distinta según la frecuencia de la que se trate.

Así las altas frecuencias "proyectan" una sombra más definida que las bajas frecuencias. Es decir, si entre el oyente y una fuente sonora que están en campo abierto, se sitúa un obstáculo, por ejemplo se levanta una pared de dos metros, el oyente percibirá una reducción de la intensidad del sonido total. Sin embargo, esta reducción será poca a las frecuencias próximas a 20 Hz (bajas frecuencias) y mucha a las frecuencias próximas a los 20 kHz (altas frecuencias), alrededor de 10 dB o más.

En este caso se podrá decir que las bajas frecuencias sufren más difracción que las altas, en otras palabras, su trayectoria se ha curvado más, rodeando el obstáculo, como se muestra en la figura N° 2.4.

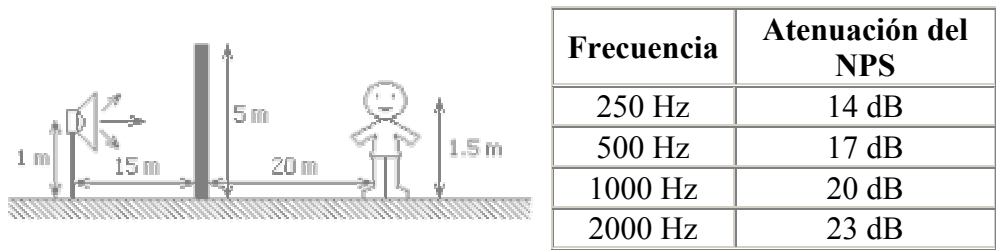


Figura N° 2.4. Datos de un ejemplo real. A la izquierda la fuente de ruido, a la derecha el oyente

Fuente: Internet (conceptos generales de audio y acústica).

Los efectos de difracción tienen importancia para micrófonos, altavoces, para la audición humana (difracción sobre la cabeza, que hace de obstáculo) y para el diseño acústico de recintos. Las sombras acústicas creadas por obstáculos son muy usadas en la lucha contra el ruido. En la figura N° 2.5 se muestra un ejemplo de la difracción.

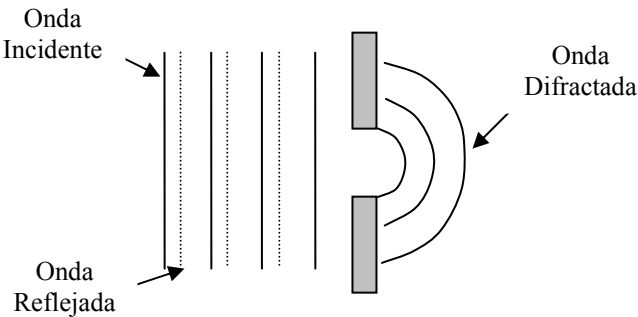


Figura N° 2.5. Difracción de ondas sonoras al pasar de una abertura

Fuente: Manuel Recuero, Ingeniería Acústica. 1994.

2.1.10.- Presión Sonora

Considerando un punto en el espacio cerca de una fuente de sonido, antes del paso de las ondas sonoras, la presión es igual a la presión atmosférica (estática) P . Cuando las ondas pasan por el punto de observación, la presión adicional p (presión sonora) debida al paso de estas es igual a: $p = p_0 \cdot \sin(2\pi f \cdot t)$, por lo que la presión total en ese punto es igual a la presión atmosférica más la presión sonora.

2.1.11.- Divergencia

Al aire libre, donde el sonido se propaga en todas las direcciones en forma de ondas esféricas, sin encontrar superficies reflectantes, la presión sonora se atenúa con la distancia a la fuente.

2.1.12.- Reverberación

Es la prolongación del sonido luego que la fuente ha cesado de emitir su sonido, esto ocurre por efecto de la reflexión de las ondas con superficies con bajo nivel de absorción de sonido.

2.2.-NIVELES SONOROS

2.2.1.- Nivel de Presión Sonora (NPS)

El hecho de que la relación entre la presión sonora del sonido más intenso (cuando la sensación de sonido pasa a ser de dolor auditivo), ha llevado a adoptar una escala comprimida denominada escala logarítmica.

Llamando **Pref** (presión de referencia a la presión de un tono apenas audible es decir 20 μPa) y **P** a la presión sonora, se define el nivel de presión sonora (**NPS**) **Lp** como: **Lp = 20 log (P / Pref)**, donde **log** significa el logaritmo decimal (en base 10). La unidad utilizada para expresar el nivel de presión sonora es el **decibel**,

abreviado **dB**. El nivel de presión sonora de los sonidos audibles varía entre 0 dB y 120 dB. Los sonidos de más de 120 dB pueden causar daños auditivos inmediatos e irreversibles, además de ser bastante dolorosos para la mayoría de las personas.

2.2.1.1.- Nivel Sonoro con Ponderación A

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

Cuando esta dependencia de la frecuencia de la sensación de sonoridad fue descubierta y medida (por Fletcher y Munson, en 1933, ver Figura N° 2.6), se pensaba que utilizando una red de filtrado (o ponderación de frecuencia) adecuada sería posible medir esa sensación en forma objetiva. Esta red de filtrado tendría que atenuar las bajas y las muy altas frecuencias, dejando las medias casi inalteradas. En otras palabras, tendría que intercalar unos controles de graves y agudos al mínimo antes de realizar la medición.

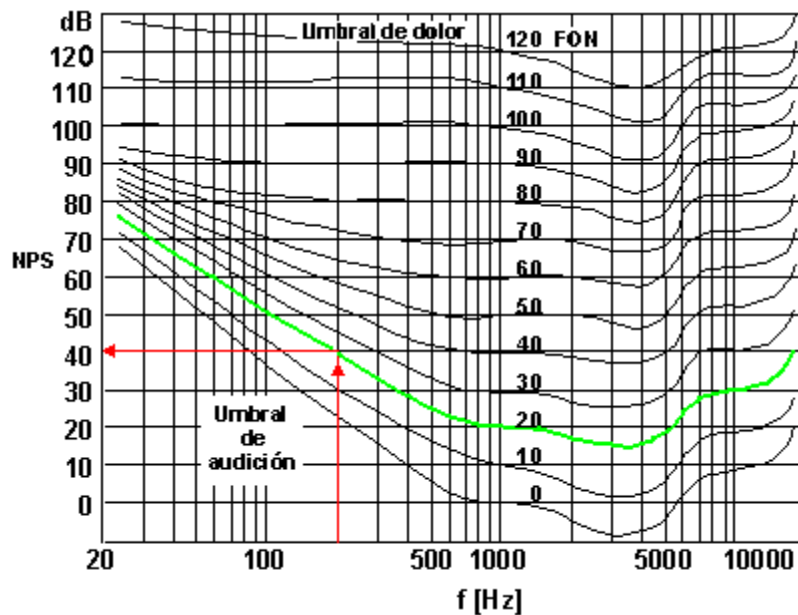


Figura N° 2.6 Curvas de Fletcher y Munson

Fuente: MIYARA, Federico. Niveles Sonoros 1998

Sin embargo, existieron algunas dificultades para implementar tal instrumento o sistema de medición. El más obvio era que el oído se comporta de manera diferente con respecto a la dependencia de la frecuencia para diferentes niveles físicos del sonido. Por ejemplo, a muy bajos niveles, sólo los sonidos de frecuencias medias son audibles, mientras que a altos niveles, todas las frecuencias se escuchan más o menos con la misma sonoridad. Por lo tanto, parecía razonable diseñar tres redes de ponderación de frecuencia correspondientes a niveles de alrededor de 40 dB, 70 dB y 100 dB, llamadas A, B y C respectivamente. La **red de ponderación A** (también denominada a veces red de compensación A) se aplicaría a los sonidos de bajo nivel, la red B a los de nivel medio y la C a los de nivel elevado (ver figura N° 2.7). El resultado de una medición efectuada con la red de ponderación A se expresa en **decibeles A**, abreviados **dB(A)** o algunas veces **dB(A)**, y análogamente para las otras.

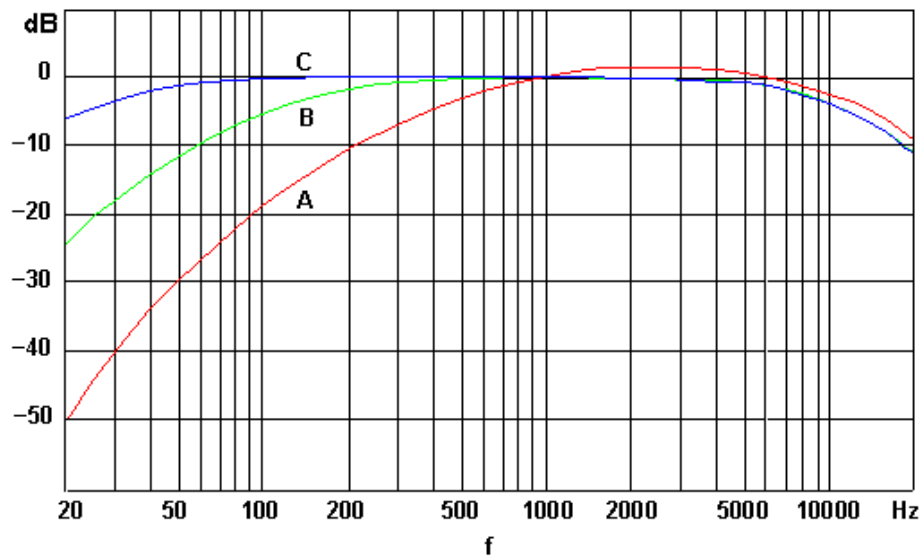


Figura N° 2.7. Curvas de ponderación A, B y C

Fuente: MIYARA, Federico. Niveles Sonoros 1998

Por supuesto, para completar una medición era necesaria una suerte de recursividad. Primero había que obtener un valor aproximado para decidir cuál de las tres redes había que utilizar, y luego realizar la medición con la ponderación adecuada.

La segunda dificultad importante proviene del hecho de que las curvas de Fletcher y Munson (al igual que las finalmente normalizadas por la ISO), son sólo promedios estadísticos, con una desviación estándar (una medida de la dispersión estadística) bastante grande. Esto significa que los valores obtenidos son aplicables a poblaciones no a individuos específicos.

La tercera dificultad tiene que ver con el hecho de que las curvas de Fletcher y Munson fueron obtenidas para **tonos puros**, es decir sonidos de una sola frecuencia, los cuales son muy raros en la Naturaleza. La mayoría de los sonidos de la vida diaria, tales como el ruido ambiente, la música o la palabra, contienen muchas frecuencias simultáneamente.

Esta ha sido tal vez la razón principal por la cual la intención original detrás de las ponderaciones A, B y C fue un fracaso.

Estudios posteriores mostraron que el nivel de sonoridad, es decir la magnitud expresada en una unidad llamada **fon** que corresponde al nivel de presión sonora (en decibeles sin ponderación) de un tono de 1 kHz igualmente sonoro, no constituía una auténtica escala. Por ejemplo, un sonido de 80 fones no es el doble de sonoro que uno de 40 fones. Se creó así una nueva unidad, el **son**, que podía medirse usando un analizador de espectro (instrumento de medición capaz de separar y medir las frecuencias que componen un sonido o ruido) y algunos cálculos posteriores. En la actualidad existen inclusive instrumentos capaces de realizar automáticamente la medición y los cálculos requeridos para entregar en forma directa la medida de la sonoridad en **son**.

2.2.1.1.1.- Ponderación A y Efectos del Ruido

Desde luego, lo anterior no responde la pregunta de cuán molesto o perturbador resultará un ruido dado. Es simplemente una escala para la sensación de sonoridad. Varios estudios han enfocado esta cuestión, y existen algunas escalas que cuantifica la ruidosidad bajo ciertas suposiciones, y por supuesto, en función del contenido de frecuencias del ruido a evaluar. Podemos apreciar, por lo tanto, que no hay disponible en la actualidad ninguna escala que sea capaz de dar cuenta exitosamente de la molestia que ocasionará un ruido a través de mediciones objetivas, simplemente porque la molestia es una reacción muy personal y dependiente del contexto.

¿Por qué, entonces, ha sobrevivido y se ha vuelto tan popular y difundida la escala de ponderación A? Es una buena pregunta. La razón principal es que diversos estudios han mostrado una buena correlación entre el nivel sonoro A y el daño auditivo, así como con la interferencia a la palabra. Sin otra información disponible, el nivel sonoro con ponderación A es la mejor medida disponible para evaluar y

juzgar problemas de ruido, y para tomar decisiones en consecuencia. También exhibe una buena correlación, según han revelado diversos estudios, con la disposición de las personas afectadas por contaminación acústica a protestar en distintos niveles.

Niveles Sonoros y Respuesta Humana		
Sonidos característicos	Nivel de presión sonora [dB]	Efecto
Zona de lanzamiento de cohetes (sin protección auditiva)	180	Pérdida auditiva irreversible
Operación en pista de jets Sirena antiaérea	140	Dolorosamente fuerte
Trueno	130	Muy fuerte
Despegue de jets (60 m) Bocina de auto (1 m)	120	Máximo esfuerzo vocal
Martillo neumático Concierto de rock	110	Extremadamente fuerte
Camión recolector Petardos	100	Muy fuerte
Camión pesado (15 m) Tránsito urbano	90	Muy molesto Daño auditivo (8 Hrs)
Reloj Despertador (0,5 m) Secador de cabello	80	Molesto

Restaurante ruidoso Tránsito por autopista Oficina de negocios	70	Difícil uso del teléfono
Aire acondicionado Conversación normal	60	Intrusivo
Tránsito de vehículos livianos (30 m)	50	Silencio
Dormitorio Oficina tranquila	40	Silencio
Biblioteca Susurro a 5 m	30	Muy silencioso
Estudio de radiodifusión	20	Muy silencioso
	10	Apenas audible
	0	Umbral auditivo

Figura N° 2.8. Niveles sonoros y respuesta humana

Fuente: MIYARA, Federico. Niveles Sonoros 1998. La tabla anterior pertenece a la Noise Pollution Clearinghouse (Hogar para la defensa en contra de la contaminación del ruido).

Es interesante observar que a pesar de que la escala de decibeles A fue originalmente concebida para medir sonidos de bajo nivel, ha demostrado ser más adecuada para medir daño auditivo, resultado de la exposición a ruidos de nivel elevado. El descubrimiento de esta relación, se pueda atribuir a la carencia de otros instrumentos de medición, a la suerte accidental, o al uso consciente de todos los

tipos de instrumentos disponibles para superar las circunstanciales fronteras del conocimiento.

La tabla N° 2.8 de decibeles (dB) a continuación compara algunos sonidos comunes y muestra cómo se clasifican desde el punto de vista del daño potencial para la audición. El ruido comienza a dañar la audición a niveles de alrededor de 70 dBA. Para el oído, un incremento de 10 dB implica duplicar la sonoridad.

2.2.2.- Nivel de Banda Octava

Una característica importante del ruido es su distribución en frecuencias. Los instrumentos empleados en la medida de la distribución del sonido a lo largo de frecuencias audibles son denominados analizadores de espectros. El analizador de espectros más habitual divide el rango de frecuencias audibles entre dos sonidos cuya razón de frecuencia es 2.

2.2.2.1.- Banda Octava

Una octava es el intervalo entre dos frecuencias que están en relación 2:1, entendiéndose así que una frecuencia es el doble de la otra. Las bandas de una octava que se usan comúnmente son 37.5 – 75, 75 – 150, 150 – 300, 600 – 1200, 1200 – 2400, 2400 – 4800 y 4800 – 9600 ciclos/seg. Una banda de un **tercio de octava** es una banda de frecuencias en la cual la relación de las frecuencias extremas es igual a la raíz cúbica de 2. Una banda estrecha es una banda cuya anchura es menor que un tercio de octava pero no menor que el uno por ciento de la frecuencia central.

2.2.3.- Combinación de Niveles (Suma Energética de Niveles)

A menudo es necesario combinar niveles, por ejemplo:

1. Para calcular el nivel sonoro que resulta de la combinación de diferentes fuentes de ruido.

2. Para determinar el nivel sonoro combinado de una fuente más el ruido de fondo.
3. Para calcular el nivel de presión sonora con ponderación “A” para un espectro determinado de banda octava.
4. Para calcular el nivel de presión sonora global a partir de niveles de banda de octava o niveles de banda de un tercio de octava.
5. Para combinar el nivel de presión sonora de dos o más fuentes.

El nivel de una combinación no es la suma de los niveles individuales. Por ejemplo, en un punto determinado, si una máquina produce un nivel sonoro de 50 dB y una segunda máquina también produce un nivel sonoro de 50 dB, mientras ambas están funcionando, el nivel sonoro combinado no es 100 dB, esto se debe a que el nivel sonoro en decibelios no sigue una escala lineal; la escala es logarítmica. En la Figura N° 2.9 se muestra como determinar la diferencia entre dos niveles (dB).

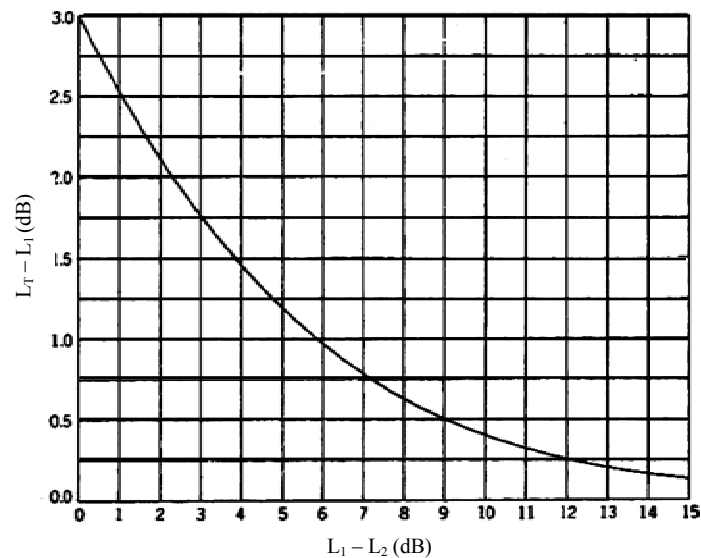


Figura N° 2.9. Aumento correspondiente a dos niveles L_1 y L_2 ($L_1 > L_2$). L_T es el nivel total

2.2.4.- Directividad

La mayoría de las fuentes de sonido exhiben características direccionales definidas; es decir, irradian más sonido en algunas direcciones que en otras. Las propiedades direccionales de una fuente de sonido pueden ser una consideración práctica importante en los problemas aplicados de control de ruido activo.

Aunque los patrones de irradiación de las distintas fuentes de sonido varían considerablemente, suelen exhibir las siguientes características generales:

1. Cuando la longitud de onda del sonido emitido es muy grande en comparación con las dimensiones de la fuente, el sonido se irradia uniformemente en todas direcciones; la fuente no es direccional.
2. Cuando la longitud de onda es pequeña comparada con las dimensiones de la fuente, el sonido irradiado desde la superficie de la fuente tiende a confinarse en un haz relativamente estrecho; así cuanto mayor es la frecuencia, más estrecho es el haz.

A menudo se emplea el término factor de Directividad para caracterizar la direccionalidad de una fuente sonora. El factor de Directividad “Q” se define como la relación entre la presión sonora cuadrática media existente a una distancia determinada y una dirección fija, y la presión sonora cuadrática medida en el mismo punto, pero calculada como si la onda sonora fuera esférica. La distancia debe ser lo suficientemente grande para que la fuente pueda considerarse concentrada en un punto llamado centro acústico de la fuente.

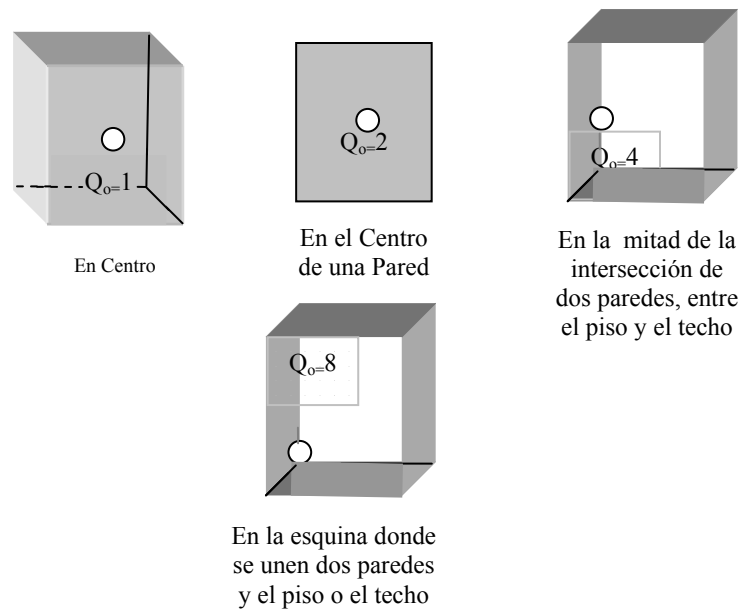


Figura N° 2.10. Distintos valores de Q_0 para una fuente pequeña no direccional ubicada en un cuarto rectangular

Fuente: El autor

Si se asume que se tiene una fuente de sonido que se traslada lejos de unas paredes y emite una tasa de energía constante (en Watts). La densidad de la energía es directa a la fuente: $D_0 = (W \cdot Q_0) / (4\pi \cdot r^2 \cdot c)$, donde r es la distancia a la que se encuentra la fuente y Q_0 es el factor de Directividad de la fuente para un ángulo θ determinado. En la suma, el valor de Q_0 para una fuente pequeña no direccional en las siguientes posiciones en un cuarto largo y rectangular es como se muestra en la figura N° 2.10.

2.2.5.- Enmascaramiento

El enmascaramiento de un tono o de un ruido de banda estrecha sobre otro, es una experiencia diaria. Cuando se encuentra dificultad o imposibilidad para escuchar algún sonido (música, habla...) porque otro sonido (considerado ruido) está presente en el mismo momento, estamos sufriendo enmascaramiento. Los procesos de enmascaramiento cumplen siempre ciertas características:

a) Una banda estrecha de ruido, produce más enmascaramiento que un tono puro de igual frecuencia central y misma intensidad.

b) Cuando el ruido es de bajo nivel, el enmascaramiento se produce en una banda de frecuencia estrecha alrededor de la frecuencia central del ruido.

c) El efecto de enmascaramiento no es simétrico en torno a la frecuencia central del ruido enmascarante. Las frecuencias superiores sufren más los efectos de enmascaramiento.

En la figura N° 2.11 que se muestra a continuación, se pueden ver los efectos b) y c). La línea curva inferior delimita el umbral medio de audición.

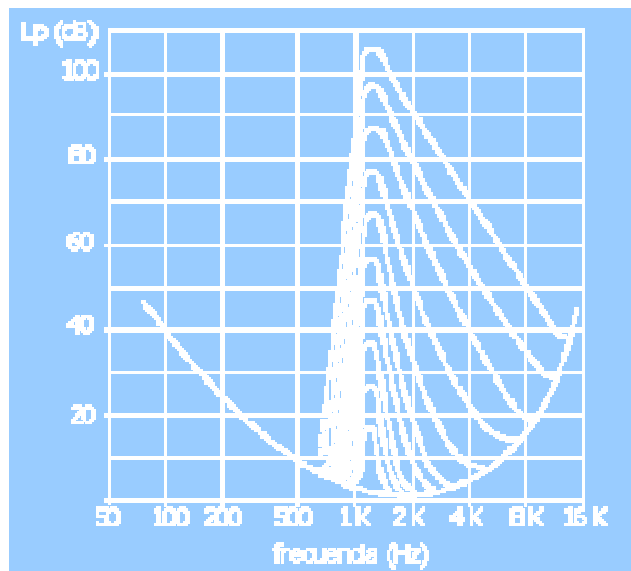


Figura N° 2.11. Efecto del enmascaramiento

Fuente: Manuel Recuero. Ingeniería Acústica. 1994

La figura N° 2.11 muestra las zonas que estarían bajo los efectos del enmascaramiento, con un ruido de banda estrecha centrado en 1200 Hz, y para distintos niveles de presión sonora del ruido. Para el caso más extremo, el ruido de

110 dB (la curva más alta), obtenemos la mayor zona enmascarada. Por ejemplo, en este caso, el oyente no detectaría un tono de 8 KHz y 50 dB de nivel de presión; tampoco detectaría un sonido de 4 KHz y 70 dB de nivel de presión.

2.3.- ENERGÍA E IMPEDANCIA

En la ingeniería y la ciencia, es común discutir fenómenos tales como acústica, electricidad, etc., eso implica el movimiento de algo (las ondas acústicas, los electrones, etc.) en términos de tres cantidades: una cantidad referente a una diferencia de potencial, una cantidad referente al flujo, y una cantidad referente impedancia.

Una cantidad común de la diferencia potencial es la presión: hay una diferencia en la presión del agua entre la salida de agua en un chorro conectado a una manguera (alta presión) y la salida del agua al final de la manguera (presión baja). Otra cantidad común de la diferencia de potencial es el voltaje.

Una tercera cantidad común de la diferencia de potencial, y que será importante al discutir un aspecto del control del ruido activo, es la fuerza.

Si un sistema tiene una alta impedancia, entonces el flujo se reduce, y por el contrario si un sistema tiene un punto de baja impedancia, el flujo aumentará.

Es muy común clasificar fuentes sonoras como “la presión constante” (diferencia de potencial constante) o “velocidad constante” (flujo constante). Un ejemplo de una fuente sonora de presión constante, sería un ventilador. Las láminas del ventilador que rotan a cierta velocidad comprimirán el aire indiferentemente de la cantidad de flujo de aire que pase por los alabes.

$$\text{Flujo} = (\text{diferencia de potencial})/(\text{impedancia})$$

2.3.1.- Magnitud de la Energía Acústica

La energía acústica es una cantidad muy pequeña comparada con otras formas de flujos de energía. Las fuentes sonoras domésticas son las más comúnmente encontradas, tales como los refrigeradores, tienen salidas de energía en un radio de acción de miliwatios.

2.3.2.- Impedancia Verdadera e Imaginaria

Hasta el momento se ha discutido acerca de la “impedancia” pero ¿cuál sería la diferencia entre la impedancia y la resistencia? Matemáticamente, la impedancia es una cantidad en números complejos, con un componente real y otro imaginario. La parte real a menudo etiquetada resistencia se relaciona con el flujo de energía acústica (o la energía acústica real), ésta es la cantidad que gobierna cuan lejos se mueve el sonido de la fuente. La resistencia o la “impedancia activa”, es la cantidad de mayor interés en el control de ruido. La parte imaginaria de la impedancia, o la “impedancia reactiva”, se relaciona con el sonido que no viaja lejos de la fuente. Este sonido se reduce naturalmente, como cuando uno se mueve lejos de la fuente, y generalmente no incomoda a la gente que no esta sentada inmediatamente al lado de la fuente.

2.4.- EFECTOS DEL RUIDO SOBRE EL ORGANISMO

2.4.1.- El oído Humano

El mecanismo de audición humano es esencialmente un transductor electroacústico altamente sensible que responde a ondas sonoras de un vasto alcance de frecuencias, intensidades y formas de onda. Este transforma las fluctuaciones de presión acústica en impulsos sobre el nervio auditivo. Estos impulsos son llevados al cerebro, el cual los interpreta e identifica, y los convierte en sensaciones (la percepción del sonido).

Como la respuesta del oído humano es puramente subjetiva no puede medirse directamente como una cantidad física. La respuesta del oído humano varía tanto con la frecuencia (20 – 20.000 ciclos/seg.) como por la intensidad del sonido. No obstante, el oído humano es más sensible a los cambios de frecuencia que a los de intensidad y más sensible a los sonidos de baja intensidad que a los de alta intensidad. A causa de su respuesta no lineal a las ondas sonoras, el oído humano capta realmente sonidos de varias frecuencias, y por esto la necesidad de usar la escala decibel que es una escala logarítmica. La pérdida de audición puede definirse como la diferencia en decibelios entre los umbrales de audición de una persona con audición deficiente y una que oye normalmente a una frecuencia dada. El mecanismo de audición es altamente elástico a cambios de intensidad y puede sobrecargarse. La sordera se mide generalmente por la cantidad de audición que se ha perdido en decibeles. La sordera conductiva es el deterioro de la audición debido a la obstrucción o anomalías del oído medio. La capacidad del oído humano para identificar o localizar la dirección de una fuente de sonido con gran exactitud se denomina audición binaural o localización auditiva. Se debe a la diferencia de intensidad sonora en los dos oídos causada por la difracción y por la diferencia de fase del sonido que llega en tiempos diferentes a los dos oídos.

2.4.1.1.- Anatomía, Fisiología y Patología

El órgano del oído humano se compone de tres partes: oído externo, oído medio y oído interno como se muestra en la figura N° 2.12. El oído externo se extiende hasta el tímpano, que se encuentra en el extremo de un conducto cilíndrico y oval de unos 4 cm. de longitud, formado de cartílago, membrana y de hueso, con un revestimiento cutáneo que contiene glándulas secretoras de cerumen. Este conducto dirige el sonido a la membrana del tímpano. Tiene ligera forma de S, lo que a veces dificulta la inserción de tapones protectores del oído; su diámetro varía de unos puntos a otros y es más estrecho en el extremo interior. Al hablar, al masticar o bostezar cambia la forma del conducto en el tercio exterior, lo que tiende a desplazar incluso tapones protectores bien ajustados.

La membrana del tímpano es elíptica, delgada y transparente y su unión al martillo la mantiene en tensión. El oído medio está formado por una cadena de tres pequeños huesos móviles, el martillo, el yunque y el estribo, llamados también los huesecillos del oído, y por dos músculos diminutos, el músculo del estribo y el tensor del tímpano. El estribo, denominado así por su forma, tiene una base plana que ajusta a la membrana de la ventana oval, y va unida a ella, de forma que le permite moverse como una articulación. La trompa de Eustaquio pone en comunicación la cavidad del oído medio con la faringe, lo que en un oído normal compensa la diferencia de presión atmosférica a ambos lados de la membrana del tímpano. Es necesario que esto sea así para que la membrana pueda vibrar cuando los sonidos llegan a su superficie. El grado de movimiento de la membrana depende además de otros factores: el tono de los músculos nasofaríngeos, la presencia o ausencia de congestión en el oído medio, el grado de protección que proporcionan los tapones, etc.

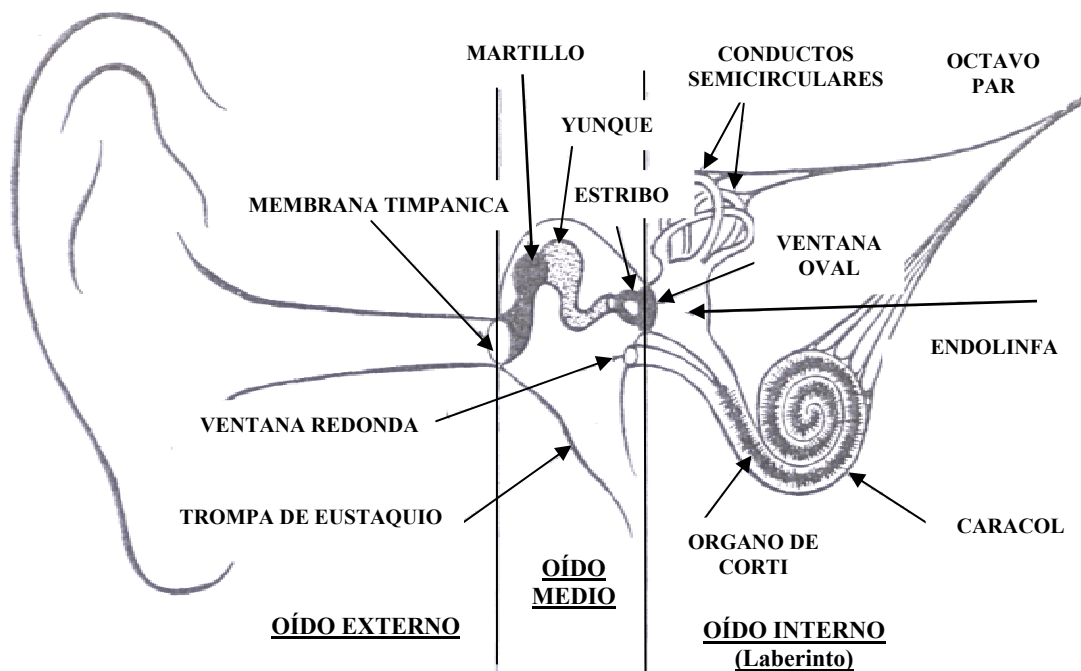


Figura N° 2.12. Diagrama del oído humano

El oído interno es un sistema complejo de cavidades situadas en el seno del peñasco del temporal. Comprende tres conductos semicirculares, dispuestos entre si en ángulos rectos, y la cóclea.

2.5.- EFECTOS DEL RUIDO SOBRE LA AUDICIÓN

2.5.1.- Exposición Breve a Ruidos de Alta Intensidad

Hay casos en que una breve exposición a un ruido muy intenso provoca la ruptura de la membrana del tímpano. La víctima suele experimentar un dolor agudo seguido a veces de una sordera prolongada para los tonos altos superiores a 9000 Hz. Si no aparece infección y la ruptura no es muy considerable, la curación de la membrana rasgada se produce sin dificultad.

2.5.2.- Exposición Prolongada

No cabe duda que una exposición prolongada al ruido puede causar la pérdida de la audición, aunque son pocos los casos en que esta pérdida es total. Puede ocurrir que el ruido no reúna las características necesarias (sonoridad, altura, periodicidad) o que la exposición no sea lo bastante prolongada. La sordera profesional afecta a los dos oídos, pero uno de ellos puede sufrir más que el otro.

2.5.3.- Caracteres Clínicos

En sus primeras fases, la pérdida de audición puede pasar totalmente inadvertida para el paciente y, en tales casos, el descubrimiento de la dolencia suele producirse durante un reconocimiento médico, por otra causa, o en el curso de otra enfermedad.

Se puede llegar a una sordera de un 40% en ambos oídos sin que el paciente se perciba de ella. Lo primero que se pierde es la capacidad de oír con claridad el lenguaje hablado. En el caso de sordera cóclear, puede presentarse un fenómeno de captación de sonidos, que no se dan en la sordera conductiva ni en la de origen nervioso central, que se origina en una zona situada más allá de la cóclea. La apreciación subjetiva del sonido no guarda proporción, en tales casos, con el incremento de intensidad física del estímulo.

2.5.4.- Desplazamiento Transitorio del Umbral

En un sentido estricto, la expresión desplazamiento transitorio del umbral se aplica a toda pérdida de audición que se pueda curar, cualquiera sea el tiempo necesario para ello. La causa puede estar en la exposición de uno de los dos oídos al ruido. Es necesario conocer bien este trastorno, al que se da así mismo el nombre de fatiga auditiva. La magnitud del desplazamiento transitorio del umbral depende del tipo de ruido que lo provoca.

2.5.5.- Sensibilidad al Ruido

La pérdida de capacidad auditiva causada por un mismo ruido varía de una persona a otra. En algunos individuos susceptibles, el trastorno se presenta relativamente pronto. Es cierto que prolongando la exposición desaparecen esas diferencias.

Son muy pocos los casos en que el ruido industrial provoca la pérdida total de la capacidad auditiva. Esas personas muchas veces se dan cuenta de que los ruidos les molestan más que a otros.

2.6.- EFECTOS DEL RUIDO EN EL COMPORTAMIENTO

Hasta hace relativamente poco tiempo este aspecto del problema se ha estudiado más atentamente que la propia pérdida del oído. Se ha afirmado que muchas veces el ruido reduce el rendimiento y la eficacia, y afecta al estado de ánimo. Es probable, sin embargo, que los efectos del ruido sobre el comportamiento no constituya un problema importante para la salud, aunque en determinadas circunstancias el ruido puede ser perjudicial para el bienestar del individuo.

Es posible acostumbrarse a ciertos ruidos, pero sólo en la medida en que el individuo llegue a perder conciencia de los efectos subjetivos de aquéllos. Sin embargo, puede también darse el fenómeno inverso desarrollándose entonces una creciente sensibilidad al ruido.

2.6.1.- Molestias

Se ha dicho que todo el sonido que se considere molesto puede calificarse de ruido. El grado de molestia no está necesariamente en relación directa con la intensidad del sonido; pueden influir en él, factores subjetivos, como la familiaridad con unos ruidos determinados o el estado de ánimo del sujeto, y factores físicos, como el microclima. La molestia es en gran medida una respuesta individual y varía según las personas y las situaciones. En general, según los estudios realizados en los laboratorios, lo probable es que cuanto más intenso sea el ruido y más alto el tono de sus componentes, mayor será la molestia que cause.

2.6.2.- Eficiencia, Rendimiento y Distracción

Es difícil demostrar que el ruido produzca efectos prolongados sobre el rendimiento o la eficacia en el trabajo; pero hay que suponer que ejerce cierta influencia, ya que puede ser causa de molestias, accidentes o dificultades en la

comunicación, y hasta favorecer al ausentismo laboral. En términos generales, se puede decir que la capacidad de adaptación del hombre tiende a suprimir todo efecto permanente sobre su producción y rendimiento.

2.6.3.- Fatiga

No es fácil demostrar que la fatiga de los trabajadores aumenta en un medio ruidoso. La fatiga puede ser debida a la necesidad de hablar en voz alta o al esfuerzo suplementario debido a las dificultades de comprensión. Estos son fenómenos difíciles de evaluar objetivamente. En general, parece que el estado de ánimo depende más del interés que el individuo encuentra en su trabajo que de los niveles de ruido o de otros factores perturbadores.

2.7.- ELECTROACÚSTICA

2.7.1.- Aparatos de Medida Acústica como Elementos Físicos de Medida

Los aparatos de medida acústica tienen una misión doble: primero deben captar objetivamente aquellas magnitudes físicas que causan una excitación en el oído y, segundo, deben suministrar datos de cómo opera y percibe el oído normal humano por la acción del sonido. Un altavoz es un dispositivo electroestático que convierte energía eléctrica en energía acústica. Un micrófono es también un dispositivo electroestático que convierte energía acústica en energía eléctrica. En general, los parlantes se usan para reproducir y amplificar sonido, mientras que los micrófonos se usan para recoger sonido y hacer medidas acústicas.

2.7.1.1.- Altavoces

El altavoz es la fuente principal de sonido en un sistema de reproducción del sonido. Este produce vibraciones mecánicas cuando está activado, y pone en vibración el aire que está en contacto con él.

Como fuente importante de sonido, los altavoces deben tener alta eficiencia, buena capacidad de potencia, respuesta de frecuencia uniforme y mínima distorsión. Frente a la aparente simplicidad de un altavoz, los fenómenos físicos en los que se basa son complejos y variados, además admiten múltiples configuraciones en función de la necesidad a cubrir.

Los más utilizados generalmente son los altavoces dinámicos, los cuales tienen la bocina de voz dentro de un campo magnético fijo generado por un imán permanente. Al pasar la corriente a través de la bocina interactúa con el campo magnético para producir movimiento, que a su vez actúa sobre el diafragma haciéndolo vibrar para producir sonido. Este tipo de altavoz tiene baja impedancia y ofrece pequeña resistencia al paso de corriente a través del mismo.

2.7.1.1.1.- Respuesta de un Cono de Altavoz a Frecuencias Distintas

La gama de frecuencias que se aplican a un altavoz no hacen moverse al cono de igual forma. Existen unas ondas, llamadas ondas longitudinales que se desplazan a lo largo del cono de papel del altavoz, al igual que sobre la superficie del agua. Si, valga el ejemplo, tenemos una recipiente llena de agua y, con la mano "aplastamos" el agua en el centro de la palangana, la onda llega con gran amplitud al borde de la palangana. Si "aplastamos" y "soltamos" alternativamente la mano, produciremos una gran amplitud de la onda de agua, ya sea en la palangana, como en una piscina. Pero si esta operación la hacemos, digamos con un palillo, antes de que las ondas lleguen al borde ya se habrán producido otras que cancelarán a las anteriores.

El altavoz electrodinámico opera como un altavoz dinámico muy sensible a la corriente. El campo magnético de un altavoz electrodinámico se activa eléctricamente mediante una fuente de potencia externa a diferencia del altavoz dinámico.

El condensador o altavoz electrostático es un aparato sensible al voltaje y que tiene alta impedancia. Este transforma señales eléctricas en movimiento del

diafragma mediante fuerzas de atracción o de repulsión en los electrodos activados por voltaje para producir variación en la capacitancia. Por consiguiente este tipo de altavoces no es apropiado para frecuencias bajas de operación debido a la pequeña separación entre los electrodos. El altavoz de cristal o piezoeléctrico tiene aplicación limitada debido a que está restringido a respuestas de baja presión y baja potencia de salida. Este funciona con base en la teoría de que un material se dilata o contrae cuando se le aplica una corriente alterna a sus superficies.

Para sistemas multiparlantes, los altavoces deben ser semejantes en eficiencia para producir respuestas suaves, y sus alcances pueden también representarse sin dificultad en una curva de respuesta.

2.7.1.1.2.- Revestimiento de los Altavoces

En general la forma, tamaño y construcción del revestimiento del parlante afecta su funcionamiento. El revestimiento del altavoz generalmente dirige las ondas sonoras, determina la frecuencia de respuesta del sistema y controla la intensidad del sonido. Los revestimientos cerrados también impiden la cancelación de las ondas sonoras y al mismo tiempo elevan la frecuencia de respuesta del sistema.

2.7.1.1.3.- Bocinas

Las bocinas como los revestimientos de los altavoces, se diseñan para conseguir varias configuraciones de distribución de sonido y para que sirvan como transformadores acústicos para acoplar impedancias altas en la garganta y disminuir la impedancia en la boca de la bocina. Aún más, las bocinas incrementan usualmente la eficiencia electroacústica de los altavoces dando una mejor reproducción del sonido.

El transductor electromecánico se llama "motor", por el movimiento que genera. Este movimiento se traspa al segundo transductor, el mecánico-acústico, que se llama "diafragma", aunque también puede ser una bocina.

Los cálculos de recubrimiento basados en los datos de ancho del haz, son sólo aproximados, ya que no se tienen en cuenta las pérdidas de nivel con la distancia, es decir, las pérdidas por divergencia esférica. Las isobaras son superficies tridimensionales que tienen en cuenta tanto la Directividad del altavoz como las pérdidas por divergencia esférica. La figura N° 2.13, muestra un ejemplo de un ancho de haz en una bocina.

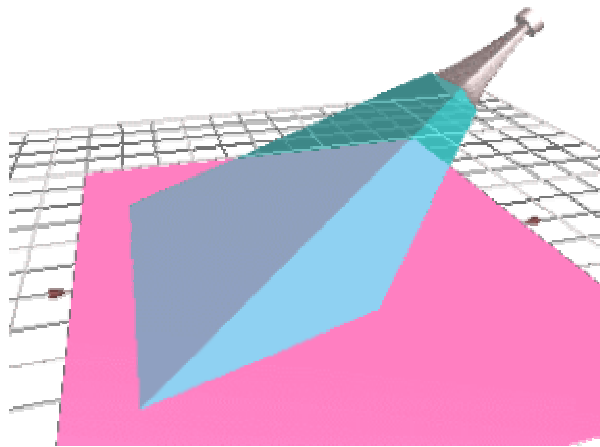


Figura N° 2.13. Ejemplo del ancho de haz de una bocina

Fuente: Internet (conceptos generales de audio y acústica)

2.7.1.1.4.- Clasificación en función del margen de frecuencia

- Banda ancha: son altavoces que cubre una banda extensa del espectro de audio.
- Bajas frecuencias: woofers y sub-woofers. Son altavoces que cubren el margen de frecuencia por debajo de los 400-700 Hz. para woofers y

por debajo de los 80 Hz. para los sub-woofers. También se habla de graves y sub-graves. Los woofers no llegan a cubrir con buena respuesta la zona de baja frecuencia, próxima a los 20 Hz. por eso se desarrollan los sub-woofers que trabajan exclusivamente esa zona reforzando la respuesta en baja frecuencia.

- Frecuencias medias: mid-range. Cubren el margen de frecuencia que va desde los 400-700 Hz. hasta los 3-8 KHz. Esta es la que se suele llamar banda de medios.
- Altas frecuencias: tweeters y ultra-high-tweeters. Cubren las frecuencias por encima de los 3-8 KHz. para los tweeters y por encima de los 12-14 KHz. para los ultra-high-tweeters. Ambos no llegan mucho más allá de los 20 KHz. Esta zona de frecuencias es llamada también banda de agudos. Los tweeters tienen dificultad en llegar a cubrir con buena respuesta la zona de frecuencia próxima a los 20 KHz. por eso se desarrollan los ultra-high-tweeters que trabajan exclusivamente esa zona reforzando la respuesta en altas frecuencias. A continuación en la figura N 2.14, se muestra una distribución aproximada de bandas de frecuencias.

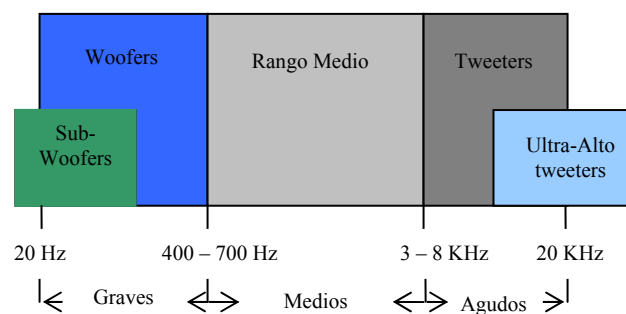


Figura N° 2.14. Distribución aproximada de las bandas de frecuencia habituales

2.7.1.1.5.- Características

La respuesta en frecuencia es uno de los parámetros principales de un altavoz, junto con la potencia. Por razones mecánicas y de diseño, un altavoz solo no puede cubrir todo el margen de audio, por lo que se construyen altavoces especializados en reproducir ciertas bandas de audio: sub-graves, graves, medios, agudos y súper-agudos.

El dato del rendimiento es el más ajustado a la realidad de los dos. Tanto el rendimiento como la eficiencia son valores que varían con la frecuencia, igual que la resistencia eléctrica de entrada. A pesar de la fidelidad de estos parámetros a la realidad, para saber si un altavoz radiará mucha energía acústica, es más cómodo fijarse en su sensibilidad. Un altavoz poco sensible necesitará consumir más energía eléctrica que otro muy sensible, para lograr el mismo nivel de presión sonora.

2.7.1.2.- Micrófonos

2.7.1.2.1.- Definición y Tipos de Transductores

Un micrófono es un dispositivo capaz de convertir la energía acústica en energía eléctrica. El valor de la tensión de la energía eléctrica es proporcional a la presión ejercida en el micrófono en forma de energía acústica. Es decir, se mantiene una proporcionalidad entre las magnitudes de las energías, la que actúa (acústica) y la que resulta (eléctrica).

Al dispositivo capaz de convertir una energía en otra, se le llama transductor. Existen diferentes tipos de transductor. La primera clasificación y más importante que se hace de los micrófonos es según el tipo de transductor en el que se basan.

Existen dos principios de transducción sobre los que se basan los micrófonos: la inducción magnética y la variación de capacidad.

1.- Micrófonos de inducción magnética: Son conocidos como micrófonos dinámicos o de bobina móvil. Se basan en una pieza magnética que crea un campo magnético permanente y un diafragma pequeño y ligero en el que va montado o acoplado una bobina de cable.

La energía acústica, manifestada como presión cambiante, mueve el diafragma, y en la bobina adosada que está inmersa en un campo magnético, se crea una diferencia de potencia eléctrica (voltaje) en sus extremos. El movimiento de la bobina, en el interior de un campo magnético hace que en los bornes de la misma, se produzca una variación de la tensión proporcional a la aceleración, si el diafragma se desplaza lentamente la tensión generada será pequeña, si el diafragma se desplaza rápidamente la tensión será mayor.

Otro tipo de micrófono basado en la inducción magnética son los micrófonos de cinta. En este caso no se trata de una bobina sino de una cinta o membrana metálica, sujeta en el interior de un campo magnético.

Los movimientos de la membrana producidos por la presión acústica, hacen que se genere tensión en los extremos del conductor.

2.- Micrófonos de capacidad variable: Conocidos comúnmente como micrófonos de condensador. Consisten en dos placas metálicas paralelas separadas por un pequeño espacio. La placa frontal suele ser de plástico metalizado y hace de diafragma, es ligera para poder ser movida por la presión acústica. La placa trasera está fija. Estas dos placas juntas forman un condensador. Un condensador es un componente capaz de almacenar energía eléctrica. Al ser movida la placa frontal por acción de la energía acústica, la capacidad del condensador varía, produciendo una variación de la tensión en función de la señal acústica. La señal de salida es muy pequeña y la salida del condensador es de muy alta impedancia por lo que necesitan de un pre-amplificador.

2.7.1.2.2.- Respuesta en Frecuencia

La respuesta en frecuencia es una característica muy importante en un micrófono. Cuando se habla de margen de frecuencia, se entiende aquella zona de la respuesta en frecuencia en el cual el micrófono reproduce con el mismo nivel, con una variación máxima de ± 3 dB. Es muy común hablar de respuesta en frecuencia en lugar de margen de frecuencia, incluso en textos técnicos.

En la figura N° 2.15 se muestra la respuesta en frecuencia de un micrófono para todo el espectro de audio. El margen de frecuencia aproximado sería el comprendido entre los 50Hz y los 15kHz, con una variación de ± 3 dB.

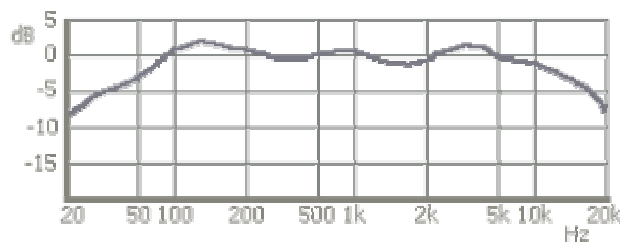


Figura N° 2.15. Respuesta en frecuencia de un micrófono

Fuente: Internet (conceptos generales de audio y acústica)

Debido al pequeño tamaño de los diafragmas de los micrófonos y su pequeña masa, la mayoría de los micrófonos tienen un amplio margen de frecuencia en el espectro de audio (20Hz - 20kHz). Lo contrario ocurre con los altavoces, donde es necesario emplear varios para cubrir todo el espectro de audio.

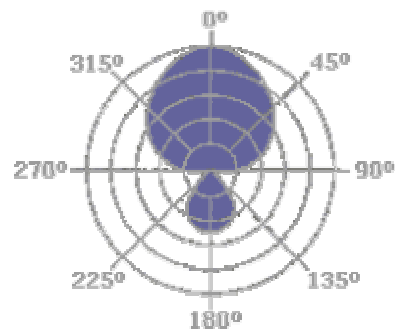
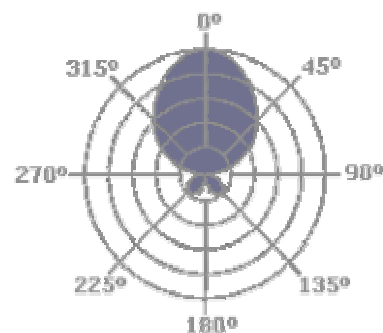
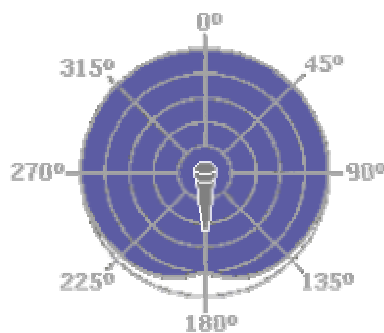
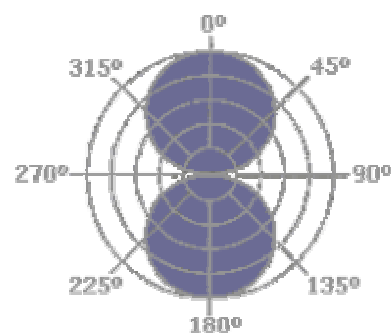
2.7.1.2.3.-Directividad y Diagramas Polares

Directividad es la capacidad que tiene un micrófono de recoger señal en función de la orientación relativa de la fuente sonora. La directividad indica cuanto más o menos señal captará un micrófono de una misma fuente sonora a una distancia

constante, en función de dirección a la que "apunte" el micrófono. La directividad es una variable que depende de los tres ejes espaciales.

La directividad se representa gráficamente mediante los diagramas polares o de directividad. Estos diagramas representan la forma en que el micrófono "oye" en función de la dirección. Los animales, para escuchar mejor un sonido giran la cabeza orientando el oído, igualmente según la orientación del micrófono respecto a la fuente, se captará mejor o peor la señal.

Dependiendo de la construcción del micrófono, éste puede tener una respuesta polar u otra. Las respuestas polares a las que se ajustan en mayor o menor medida todos los micrófonos se muestran en la figura N° 2.16.

Respuesta **hipercardiode**Respuesta **ultracardiode**Respuesta **omnidireccional**Respuesta **bidireccional**

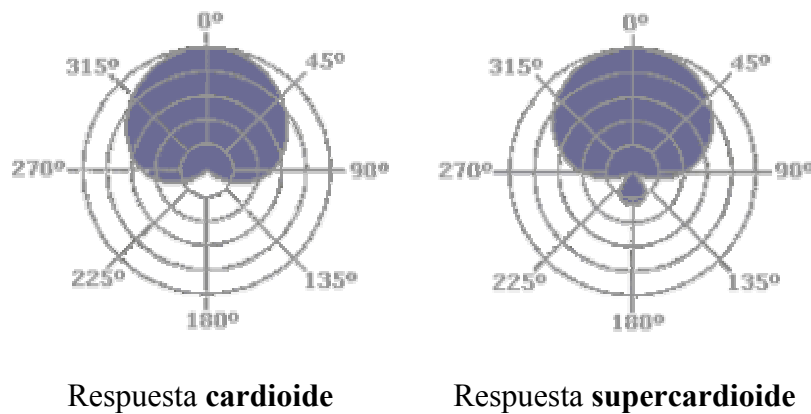


Figura N° 2.16. Tipos de respuesta polar en micrófonos

Fuente: Internet (conceptos generales de audio y acústica)

El diagrama polar se interpreta coincidiendo el eje 0° - 180° con el eje del micrófono, como se muestra en el diagrama de respuesta omnidireccional. Debido a que gran parte de los micrófonos tienen el diafragma circular, el patrón de direccionalidad tiene simetría de revolución. Es decir, sigue siendo el mismo aunque el micrófono gire sobre su propio eje.

Cada círculo concéntrico suele representar una caída de 5 dB respecto al anterior, marcando el círculo exterior como 0 dB de pérdida de señal. En las especificaciones de cada micrófono debe venir indicado cuantos dB de caída de nivel de señal separan cada circunferencia. En el caso del micrófono ultracardioide representado, si la fuente se sitúa a 90°, 180° o 270° la respuesta del micrófono se reducirá en unos 25 dB. Si la fuente se sitúa a 45° del eje, la disminución será de 10 dB menos que en el caso de que el micrófono apuntase directamente a la fuente. El diagrama polar de un micrófono cambia con la frecuencia. Un diagrama polar de un micrófono real se suele representar para distintas frecuencias.

2.7.1.2.4.- Máximo Nivel de Presión Sonora

A este nivel la distorsión armónica de la señal procedente del micrófono es del tres por ciento de la señal total (THD%=3%). El máximo nivel de presión sonora se mide en dB-SPL. Cuando un micrófono alcanza un máximo nivel de presión sonora la distorsión armónica de la señal comienza a ser audible. Un micrófono con un nivel máximo de presión sonora de 120 dB es bueno, 135 dB muy bueno y 150 dB es un valor excelente.

2.7.1.2.5.-Sensibilidad

Se define como el nivel de tensión eléctrica (dBV) a la salida del micrófono. Es un parámetro fundamental que da idea de la capacidad del micrófono para captar sonidos débiles. También puede venir expresada en dB de presión sonora; en este cálculo se toma como referencia 1 voltio por μbar de presión ($1\text{V}/\mu\text{bar}$). De esta forma, los valores de sensibilidad son negativos, por ejemplo -60dB. Cuanto menos negativo sea el valor de sensibilidad, más sensible es el micrófono. La sensibilidad puede variar en función de la frecuencia, por este motivo los fabricantes suelen dar la sensibilidad a unas frecuencias determinadas: 250Hz, 500Hz y 1000Hz.

Cuanto menor sea la sensibilidad del micrófono, mayor dificultad tendrá la mesa de mezcla (como receptora de la señal), para mantener una relación señal ruido aceptable. Es decir, la mesa de mezcla tiene un nivel de ruido de fondo, si la señal microfónica es muy débil (tiene poco voltaje), estarán más próximas en lo que a nivel se refiere. Esta relación señal de micrófono a ruido no se podrá mejorar más que dando a la señal del micrófono más nivel.

2.7.1.2.6.- Nivel de Ruido

Cualquier aparato electrónico tiene un nivel de ruido propio, llamado ruido eléctrico. Los micrófonos producen ruido en ausencia de perturbación externa que mueva el diafragma. El origen son las moléculas de aire que chocan contra la

membrana debido al movimiento térmico. En los micrófonos de bobina, por el movimiento de los electrones en la resistencia de la bobina móvil.

2.7.1.2.7.- Límite de Saturación

Todos los micrófonos distorsionan totalmente la señal si el nivel de presión de esta es demasiado elevado. Esta condición se conoce como saturación. Dependiendo de la construcción del micrófono, podrá soportar mayores o menores niveles de presión sin distorsionar la señal.

El límite de saturación no es un dato que se encuentre en todas las hojas de características de los micrófonos. Los micrófonos de bobinas móviles o dinámicas, o los micrófonos de condensador no son tan vulnerables ante la distorsión como los micrófonos de cinta. Los micrófonos dinámicos pueden soportar grandes niveles de presión sonora sin sufrir daños internos permanentes, sin embargo, los micrófonos de cinta corren riesgo de rotura si se usan en ambientes con elevado nivel.

2.7.1.2.8.- Efecto Proximidad

Este es un efecto más que una característica, común a todos los micrófonos. Consiste en un aumento considerable de la respuesta en baja frecuencia cuando el micrófono se sitúa muy cerca de la fuente de sonido. Este efecto se observa más en los micrófonos de gradiente de presión como los de cinta. A continuación se muestra en la figura N° 2.17, las diferentes respuestas a baja frecuencia en función de la distancia de un micrófono real.

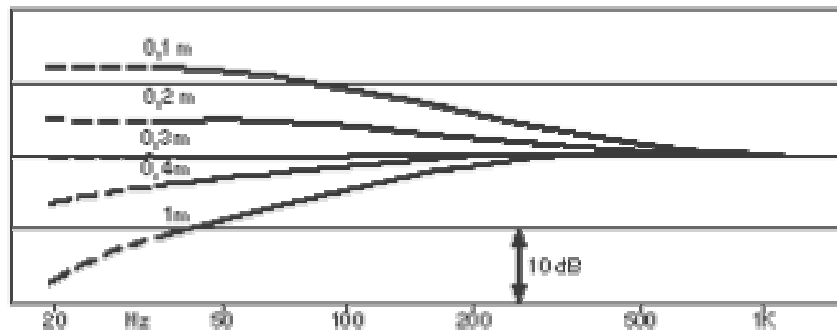


Figura N° 2.17. Efecto proximidad en los modelos 4011 y 4012 de la marca DPA en micrófonos

Fuente: Internet (conceptos generales de audio y acústica)

2.7.1.2.9.- Impedancia

Básicamente se hacen dos diferenciaciones, micrófonos de baja impedancia y micrófonos de alta impedancia. La ventaja de los primeros es que tienen un menor grado de ruido eléctrico y permiten ser usados con cables largos. La ventaja de los micrófonos de alta impedancia es su costo reducido.

2.7.1.2.10.- Calibración

Los micrófonos pueden calibrarse utilizando uno de los siguientes métodos: conociendo directamente la fuente de sonido, por comparación, radiómetro, micrófono de hilo caliente, movimiento de partículas suspendidas, y la técnica de reciprocidad.

La calibración puede efectuarse bien sea en un campo libre con ondas progresivas como en una cámara anecoica o en una cámara cerrada, tal como una cámara de reverberación donde la intensidad acústica y la energía sean constantes.

La selección de un micrófono esta determinada por las condiciones ambientales, tales como la temperatura, la humedad, el intervalo de nivel de presión y la frecuencia de respuesta. Los micrófonos deberán tener alta sensibilidad, direccionalidad adecuada, frecuencia de respuesta uniforme, mínima distorsión de fase, y muy pequeño ruido inherente o externo.

CAPITULO III:

ESTUDIO DE LOS CONTROLADORES USADOS EN UN SISTEMA DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO

3.1.- FUNDAMENTOS DEL REGULADOR

El corazón de cualquier sistema de control activo de ruido es un dispositivo electrónico, cuya función es calcular la señal que conduce la fuente de control (altavoz), que va dirigida hacia el campo de los sonidos que se quiere cancelar. Este dispositivo electrónico generalmente es conocido como el regulador. Podemos referirnos tanto al sistema de control electrónico (anexo 2), como al sistema de control físico que abarca los altavoces, los micrófonos, etc., esto se muestra en la figura N° 3.1. Como puede ser supuesto, existe una variedad amplia de disposiciones electrónicas posibles que se pueden utilizar en el control activo de ruido.

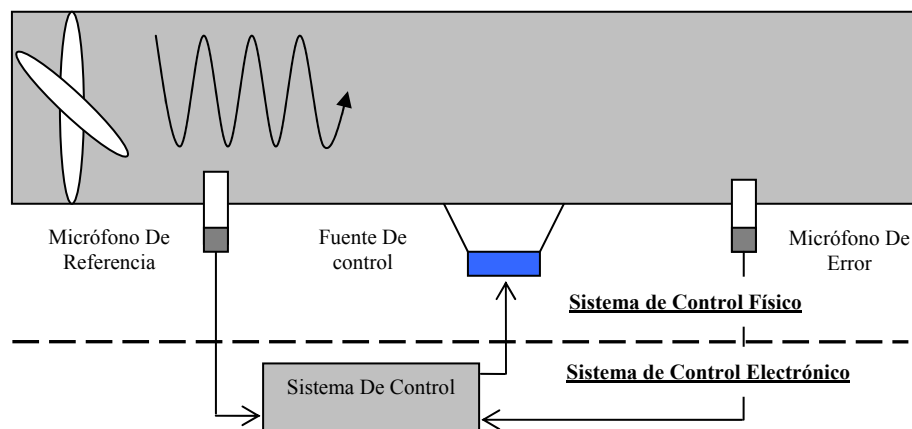


Figura N° 3.1. El “sistema de control físico” consiste en altavoces y micrófonos, que son los que actualmente producen y miden el campo de sonido. El “Sistema de control electrónico” hace los cálculos requeridos para generar una cancelación del campo de sonido

Los sistemas de control activo de ruido se basan en dos métodos, primero en control **feedforward** (alimentador delantero) en donde una señal de referencia del ruido de entrada es censada antes de ser propagada la señal antirruído a través de la bocina. El segundo método es el control **feedback** (alimentador trasero) es donde el controlador activo de ruido cancela el ruido sin tener el beneficio de contar con una señal de referencia de entrada. Dos de las ventajas de un sistema de control activo feedforward son: 1) su funcionamiento ante la atenuación (que es normalmente superior a la mayoría de los otros arreglos dispuestos para el regulador) y 2) su simplicidad de diseño (el sistema de control físico se puede diseñar esencialmente independiente del sistema de control electrónico). La desventaja principal de los sistemas de control activo feedforward es el requisito de una señal de referencia, una medida que prediga con buena exactitud el disturbio indeseado inminente que debe ser cancelado. Otros arreglos del regulador no tienen este requisito.

Sin embargo para el objetivo que persigue el controlador activo, tales como las fuentes de ruido tonal (por ejemplo, ventiladores y motores) y la propagación del ruido que bloquea a las ondas guías (tales como conductos de aire-dirección), se obtiene una señal de referencia relativamente directa, por consiguiente un sistema de control activo feedforward representa una buena opción para atacar este tipo de problemas.

3.2.- CONTORNOS Y DEFINICIONES GENERALES PARA UN SISTEMA DE CONTROL

Un sistema se define como un conjunto de componentes individuales que actúan juntos en su totalidad. Los sistemas de interés en un control activo trabaja en general (donde el ruido y/o la vibración se apuntan para la atenuación) clasificándose dentro de tres categorías; acústico, estructural y acústico/estructural.

La excitación de interés en el trabajo del control activo se puede clasificar como perturbación (que también se refieren como la excitación primaria o perturbación primaria en la literatura de control activo) y control. Las entradas de la perturbación son responsables de la excitación deseada en un sistema (por ejemplo, el ruido), y las entradas del control se introducen alrededor del sistema con la finalidad de obtener una cierta respuesta deseada (por ejemplo, atenuación del ruido). Un ejemplo de un sistema acústico es el ambiente en un conducto que maneja aire, en el cual la entrada de la perturbación es responsable de la propagación sonora indeseada.

Un ejemplo de un sistema estructural es una viga, donde la perturbación de entrada es responsabilidad de una vibración indeseada. Un ejemplo de un sistema acústico/estructural es el interior de un avión, en donde la perturbación de entrada es responsabilidad de un campo acústico indeseado en la cabina, que es generado por la vibración del fuselaje.

Un sistema de control es un dispositivo responsable de generar una entrada de control. La forma más básica de un sistema de control, es uno en el cual la salida del sistema no tiene ningún efecto sobre la entrada de control, es decir no tiene retroalimentación. Este se conoce como sistema de lazo abierto. Un bosquejo de un sistema de control típico de lazo abierto se muestra en la figura N° 3.2, donde la entrada/salida deseada alimenta al regulador para producir un control de entrada al objetivo del sistema.

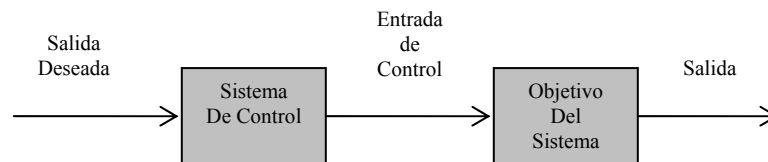


Figura No 3.2. Sistema de control de lazo abierto

El diagrama mostrado en la figura N° 3.2, es conocido en ingeniería como diagrama de bloques. Un diagrama de bloques exhibe la relación funcional entre los componentes de un sistema, estos usan las flechas para los flujos de datos y los bloques para los componentes o las secciones importantes del sistema, en vez de las ecuaciones matemáticas.

Un arreglo que tiene el potencial para mejorar un sistema de control de lazo abierto, es aquel en el cual la salida del sistema tiene influencia sobre la entrada de control, éste se designa como un sistema de control de lazo cerrado o de regeneración. Un diagrama de bloques de un sistema de control típico de lazo cerrado se muestra en la figura N° 3.3, aquí ciertas cantidades de la salida se miden y se comparan con un valor deseado, y el error que resulta se utiliza para corregir la salida del sistema.

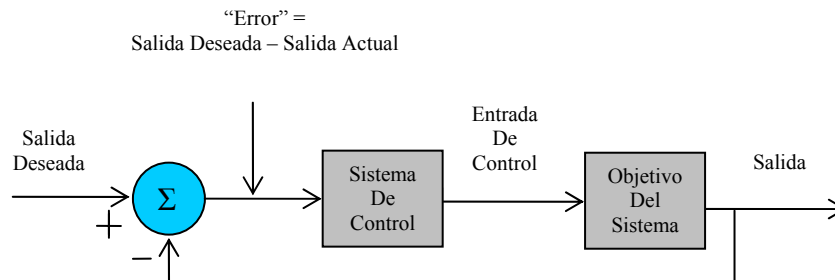


Figura No 3.3. Sistema de control de lazo cerrado

Fuente: Scott Snyder. Active Noise Control Primer. 2000

En el control activo de ruido se está principalmente interesado en la atenuación de la perturbación. Para este caso, la salida del sistema se mide, y es un disturbio acústico (un campo indeseado de los sonidos), si la salida del sistema deseada es normalmente cero.

Por lo tanto, la estructura típica del control de la regeneración usada en el control activo se muestra en la figura N° 3.3, donde la salida del sistema se utiliza para derivar la entrada de control. La salida del sistema puede, por ejemplo, ser la respuesta del sistema según lo medido por un micrófono. Esta salida se refiere a veces como “señal de error” tal que ella representa el “error” entre la respuesta deseada (una respuesta de magnitud cero) y la respuesta del sistema real.

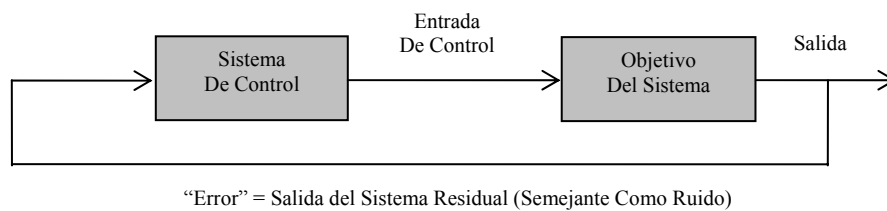


Figura No 3.3. Sistema de control de lazo cerrado. También ideado frecuentemente en la implementación en un sistema de control activo de ruido

Fuente: Scott Snyder. Active Noise Control Primer. 2000

En la puesta en práctica de los sistemas de control activo, en muchos casos será posible obtener alguna medida a priori de la entrada inminente de la perturbación (señal de referencia).

Un ejemplo de esto ocurre cuando la perturbación se propaga a lo largo de un conducto, donde es posible obtener una medida aguas arriba. Un segundo ejemplo es donde la fuente de la perturbación (la fuente primaria) es una maquina rotativa, el disturbio es periódico, y una señal del tacómetro que está relacionada con la perturbación, se encuentra disponible.

En estos casos es posible para el “feedforward” conocer una medida de la perturbación, para proporcionar una atenuación, utilizando un sistema de control feedforward según lo mostrado en la figura N° 3.5. Los sistemas de control feedforward cuando se aplican, ofrecen a menudo un potencial para una mayor atenuación de la perturbación, que los sistemas de control con regeneración.

Los sistemas de control feedforward se pueden ver como una prevención de la perturbación, produciendo una salida para contrarrestar (cancelar) la perturbación sobre su llegada. Los sistemas de control de regeneración deben esperar hasta que la perturbación ocurra, y sea medida en la salida del sistema antes de que puedan actuar para atenuar los efectos duraderos que el disturbio tiene sobre el sistema. El feedforward y los sistemas de control de regeneración se pueden poner en ejecución juntos para producir un sistema de control en donde ambos atenúen con eficacia la perturbación, referido al máximo grado posible, y también proporcionarían una cierta atenuación de los componentes relacionados con el disturbio.

El sistema de control de feedforward mostrado en la figura N° 3.5 es un sistema de control de lazo abierto. Esta fue la forma de sistemas de control considerada originalmente por Paúl Lueg en su patente de 1933, donde el sistema de control fue fijado para producir un control de entrada que es 180° desfasado respecto a la perturbación primaria, como un punto de aplicación. Sin embargo tal estrategia de control no puede hacer frente a los cambios de las características de los sistemas (tales como los debido a las variaciones de temperatura y flujo de aire), y la atenuación sería reducida grandemente después de cierto periodo de tiempo. La forma de los sistemas de control feedforward actualmente usados en sistemas de control activo, es una estrategia “adaptante”, por ejemplo, se muestra en la figura N° 3.6.

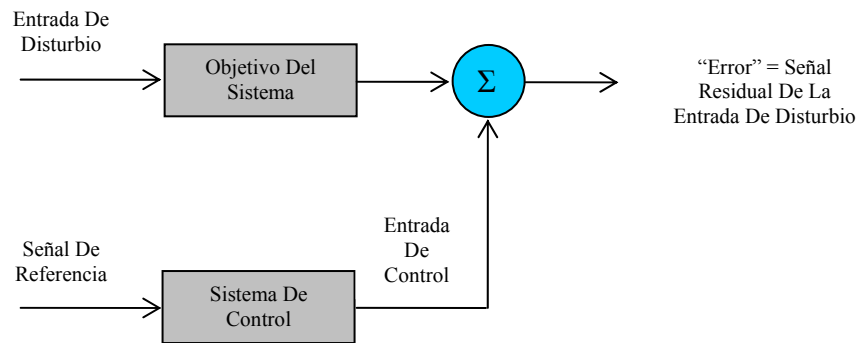


Figura No 3.5. Arreglo de un sistema de control feedforward

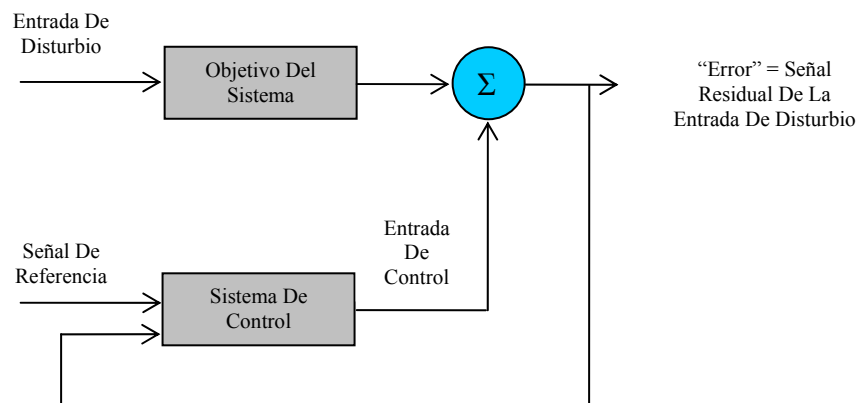


Figura No 3.6. Arreglo de un sistema de control feedforward adaptable

Fuentes: Scott Snyder. Active Noise Control Primer. 2000

El sistema de control activo ilustrado en la figura N° 3.7 es un arreglo adaptable del feedforward. Una señal de referencia mide la perturbación inminente (en el sentido de flujo del ducto) y es suministrada por un micrófono colocado en un lugar aguas arriba del sistema de control (un "micrófono de referencia"). Este arreglo

funciona porque el ruido en algún punto aguas arriba del ducto será en gran escala igual al ruido en algún punto aguas abajo en un periodo de tiempo finito, siendo este tiempo una función de la velocidad del sonido.

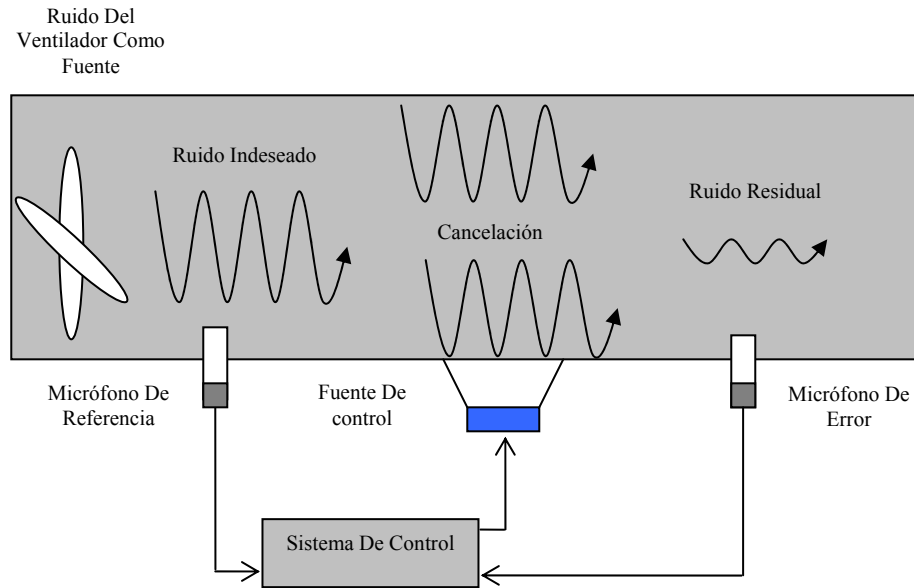


Figura No 3.7. Arreglo de un sistema de control activo de ruido feedforward adaptable

Fuentes: Scott Snyder. Active Noise Control Primer. 2000

Provisto con una señal de referencia, el trabajo del dispositivo electrónico del sistema de control activo es bastante directo; este origina una señal acústica que es igual en amplitud pero es opuesta a la fase de perturbación inminente, e introduce esta señal por vía de la fuente de control (altavoces) en el conducto cuando el ruido no deseado llega.

Como el sistema acústico es lineal, la señal de control cancelará el ruido no deseado. Como resultado, los niveles acústicos se reducirán en el sentido abajo del flujo en el sistema de control.

Mientras este arreglo puede ser directo en demostrar los objetivos del sistema de control, es difícil lograrlos en la práctica. El cambio en la perturbación durante la propagación desde el micrófono de referencia a la fuente de control debe ser considerado, tanto como los cambios en la señal de control cuando esta pasa a través de los filtros, amplificadores y altavoces.

Las características de estos cambios se alterarán significativamente con el tiempo, con sólo cambiar condiciones ambientales y uso del transductor. Basado en estos factores, se demuestra que el sistema de control debe ser adaptable. Es decir, debe ajustarse para que proporcione continuamente el resultado óptimo. Para facilitar esto, una medición del campo de sonido residual, una señal de error, se introduce al sistema de control por medio de un "micrófono de error." Un algoritmo adaptable es normalmente implementado como parte del sistema de control que continuamente altera las características del controlador para minimizar la perturbación a la altura de este sensor.

3.3.- LIMITACIONES FÍSICAS DEL SISTEMA

Mientras los cuatro componentes básicos descritos anteriormente son requeridos para que funcione un sistema de control activo de ruido de feedforward adaptable, el hecho de tener un sistema que atenúe la perturbación acústica en el sensor de error no garantiza que el campo de sonido en todas las posiciones sea reducido. Un diseño ajustable de la parte física del sistema de control activo, el número y ubicación de los sensores y altavoces, son requeridos para esto.

Muchas de las consideraciones básicas que entran en juego en el diseño e implementación de la parte física de un sistema de control activo de ruido (donde colocar los altavoces y micrófonos, la viabilidad de aplicar un control activo de ruido dada una respuesta del sistema en la banda de frecuencia seleccionada, etc.) ha sido discutido anteriormente, sin embargo, vale la pena recalcar varios puntos aquí.

Controlar la radiación de sonido en un espacio abierto es más difícil que controlar la radiación de sonido en un espacio confinado (como un conducto). La fuente de control debe ser capaz de producir un campo acústico con las mismas características espaciales del sonido no deseado, un criterio que generalmente se aplica, es que los altavoces deben ser colocados muy próximos a la fuente de ruido no deseado. Por ejemplo, si la fuente de la perturbación no deseada irradia el mismo campo acústico en todas las direcciones, y la fuente de control es también unidireccional, entonces, para lograr una reducción de 10dB en la potencia radiada, las dos fuentes acústicas no deben estar separadas más de $1/10$ de la longitud de onda acústica aparte. Nótese que la longitud de onda acústica, para una frecuencia dada, es aproximadamente igual a 343 m/s (velocidad del sonido) dividido entre la frecuencia (en Hz), entonces para controlar 100 Hz de sonido (la longitud de onda aproximada es de 3.4 mts.) las fuentes no pueden estar separadas por más de 34 cm. Para un sonido de 400 Hz, esta distancia de separación permitida está en el orden de los 8 cm. De nuevo, esto muestra que la fuente de control puede imitar el patrón de radiación de la fuente de ruido primaria, una acción no fácil de lograr cuando la radiación proviene de una complicada pieza de maquinaria. Estas limitaciones físicas son usualmente los factores determinantes al momento de evaluar que problemas de ruido se pueden resolver usando control activo.

La perturbación más sencilla al control activo es la periódica, donde el sonido se caracteriza por una relación de tonos discretamente armonizados.

La aplicación de un sistema de control feedforward hace predecible los campos de sonido periódicos, así como existe una relación constante entre el sonido del ambiente acústico y el sonido en algún otro punto. Como una alternativa al micrófono, el tacómetro podría usarse para obtener una señal de referencia de la perturbación periódica, ya que existe una relación constante entre la rotación del eje y el campo acústico.

Los problemas de perturbación periódicos proporcionan otros beneficios al implementar un sistema de control electrónico, uno de los cuales es que el sistema de control no tiene que ser causal, básicamente, esto significa que no es necesario hallar el "tiempo" entre la señal de referencia y la entrada correcta de control, para que el sistema funcione eficazmente. Las características del sonido periódico no cambian con el tiempo, y es así como una medición de la perturbación en un momento dado puede usarse para predecir la perturbación inminente en un tiempo igual a una milésima de segundo, o en un segundo, o incluso en un minuto sin ningún problema. En cualquier caso, si la perturbación es un ruido aleatorio el sistema debe ser el causal. Esto significa que el tiempo entre la señal de referencia y entrada de control deben ser exactos. La medición de la perturbación en un instante de tiempo sólo predecirá la perturbación inminente en otro instante de tiempo. Por ejemplo, una medición del ruido aleatorio en un punto aguas arriba de un conducto de manejo de aire puede usarse para predecir el ruido en algún punto aguas abajo del conducto en un tiempo igual a tres milésimas de segundo si los dos puntos están separados uno del otro por un metro aproximadamente. Sin embargo, la medición no puede usarse para predecir el ruido en un punto aguas abajo del conducto, en digamos, un tiempo igual o mayor a 10 milésimas de segundo. En resumidas cuentas, los objetivos más prácticos para el control activo de ruido son indiscutiblemente aquéllos donde la perturbación es periódica y de baja frecuencia.

3.4.- PRINCIPIOS BASICOS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DIGITAL

3.4.1.- Usando el Interfase en un Sistema Digital

La mayoría de los sistemas de control activo de ruido de feedforward adaptable son implementados usando electrónica digital. Los sistemas de control digital requieren de componentes adicionales que deben ser agregados al sistema de control en esbozos previos (diagramas de bloque).

3.4.1.1.- Antecedentes

Lo que distingue a los sistemas digitales de sus homólogos (sistemas analógicos) es que los sistemas digitales trabajan con cantidades discretas. Para que los sistemas digitales realicen una labor, se les debe suministrar un grupo de parámetros discretos, y como respuesta producirá uno o más resultados discretos. Esto es similar a la manera en la que los seres humanos realizan labores matemáticas. Si, por ejemplo, nos piden que hagamos alguna suma, nosotros esperamos recibir un grupo de números discretos (23, 37, 12, etc.) que nos serán dados; ésta es la entrada. En respuesta, nosotros produciremos un resultado discreto (la respuesta es "72").

La alternativa para una aproximación digital o discreto, es que se este trabajando con una señal analógica o continua. Volviendo al ejemplo de suma, considere el arreglo de las tuberías mostrado en la figura N° 3.8. Aquí dos tuberías pequeñas están alimentando a una tubería grande. Esto puede verse como un arreglo para realizar una suma: el flujo que viaja a través de la tubería grande es la suma de los flujos de las dos tuberías más pequeñas.

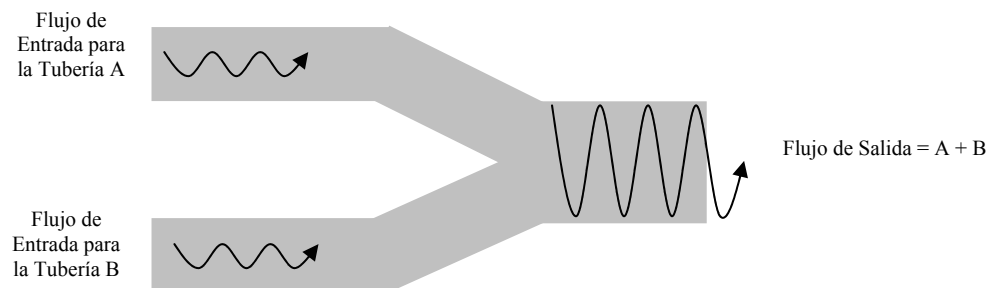


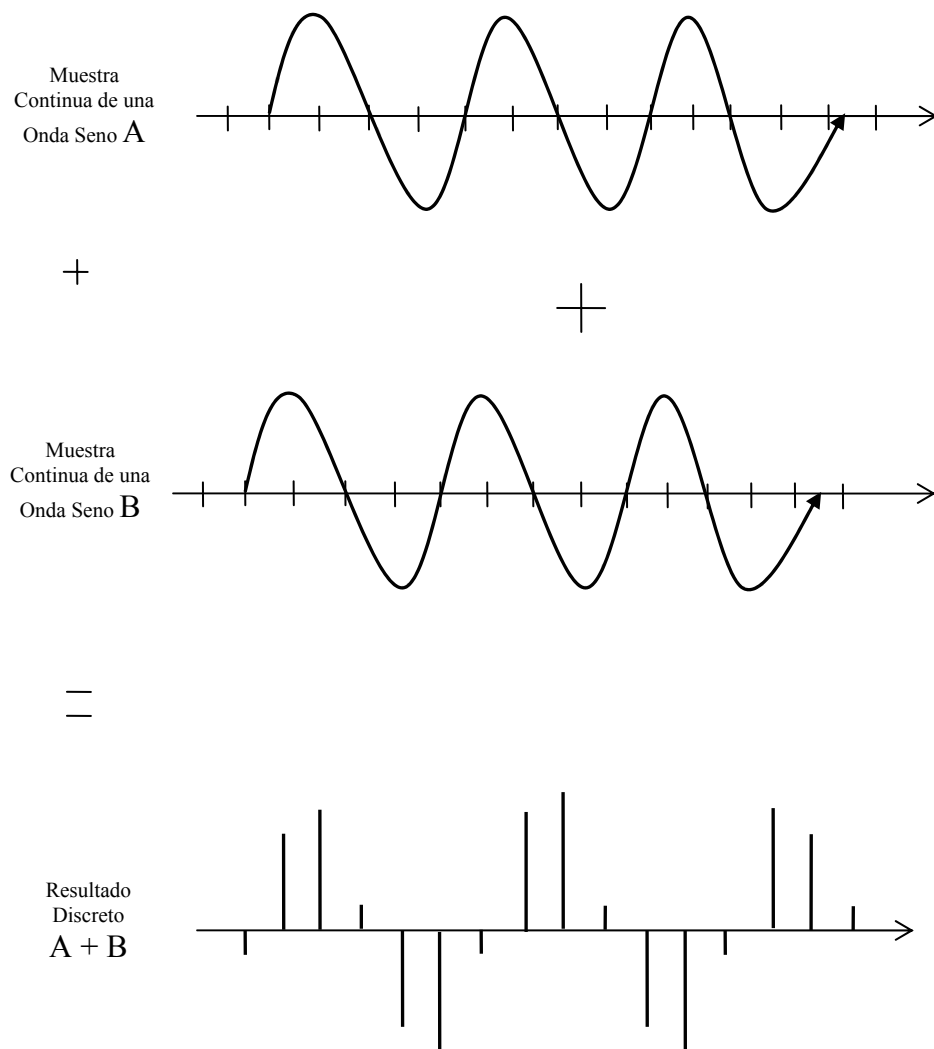
Figura No 3.8. Ejemplo de una suma continua (analógica): El flujo de dos pequeñas tuberías entra a una tubería más grande

Sin embargo, la tubería no trabaja con cantidades discretas: no toma una porción discreta de líquido de la tubería A, y otra porción discreta de líquido de la tubería B, y luego las suma y entrega un "resultado" discreto (una porción discreta de líquido) en la tubería principal C. Por tal razón, el proceso de suma ocurre continuamente. Un ingeniero podría decir que el proceso es continuo en el tiempo.

Al nivel físico, el control activo de ruido está en un proceso continuo: dos campos de sonido se están sumando continuamente en espacio para proporcionar la cancelación. Sin embargo, los sistemas digitales no pueden realizar trabajos continuos; ellos sólo pueden trabajar con números discretos ($2 \times 3 = 6$, $1 + 2 = 3$, etc.). ¿Cómo podemos integrar nosotros estos dos modos diferentes de trabajo? La respuesta es: probando. Consideremos el problema mostrado en la figura N° 3.9, donde nosotros queremos adicionar dos ondas al mismo tiempo usando una apreciación digital (discreta). Para realizar esta tarea de una manera aproximada, nosotros podríamos muestrear las ondas en ciertos instantes de tiempo, obteniendo valores discretos de la amplitud de la onda en precisos instantes de tiempo.

En cualquier punto nosotros podemos añadir esos valores muestreados, y producir un resultado que describe la suma de las ondas en ese instante. Tomados al mismo tiempo los resultados discretos constituyen una estructura de resultados continuos (deseados).

Si nosotros quisiéramos movernos desde la estructura de resultado mostrados en la figura N° 3.8 a uno que ordene de manera mas agrupada, la salida continua deseada, se necesitan dos pasos: (1) de algún modo los resultados discretos deben unirse en el tiempo, y (2) los resultados finales deben ser suavizados.

**Figura No 3.9. Suma discreta (digital) de dos ondas**

Fuente: Scott Snyder. Active Noise Control Primer. 2000

3.4.2.-Efectos cuando se Implementa un Sistema de Control Digital

Consideremos primero el paso 1: Quizás la manera más fácil de conectar la estructura de resultados del proceso digital sería "uniendo los puntos", para dibujar una línea recta entre los valores subsecuentes. Hay un problema al implementar esta idea.

Si queremos calcular el resultado en un instante de tiempo, no podríamos trazar una línea recta al próximo punto hasta ser calculado, lo que ocurrirá en un instante de tiempo futuro. Eso es, unir los puntos a medida que se van mostrando, tendríamos que predecir el futuro, ni siquiera un sistema digital puede hacerlo.

Una posición comprometedora es mantener los resultados actuales como una salida hasta que se calcule un nuevo resultado, el cual reemplazará al anterior en el tiempo como una nueva salida. El resultado es una salida paso a paso ordenando la salida continua de una manera más agrupada que la realizada en la estructura de resultados. Nosotros podemos ahora manejar las cosas implementando el paso 2: suavizar los bordes.

Para suavizar los bordes, debemos considerar al matemático francés Fourier. Sabemos de Fourier que cualquier forma de onda puede ser considerada como la suma de un determinado número de ondas seno (componentes de frecuencia). Para construir una señal bordeada perfecta se requieren un gran número de componentes de alta frecuencia. Lo que nosotros necesitamos hacer es eliminar los componentes de alta frecuencia de la señal de salida, y esto es posible filtrando la señal.

El filtrado se refiere al sorteo preferencial de un grupo de tiempos entre los deseados y los no deseados. Es posible y de hecho relativamente directo manejar filtros (analógicos) que sorteen una señal en componentes de diferentes frecuencias permitiendo el paso de algunos componentes de frecuencia a través del filtro mientras otros son retenidos. Con el fin de suavizar los bordes de nuestro resultado en forma de onda digitalmente generada, nosotros necesitamos colocar la señal a través de un filtro de paso bajo. Este es un filtro que permite el paso de componentes de baja frecuencia, mientras bloquee los componentes de alta frecuencia. La salida como se muestra en la figura N° 3.10 es un resultado suavizado.

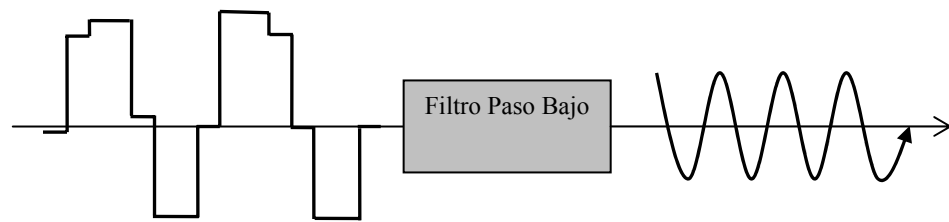


Figura No 3.10. Un filtro de paso bajo removerá los bordes de los pasos (valores discretos) de la onda seno

Fuente: Scott Snyder. Active Noise Control Primer. 2000

3.4.3.-Adiciones Requeridas para un Sistema Digital

El sistema de control de feedforward adaptable de la figura N° 3.6 se muestra modificado en la figura N° 3.11, para una implementación digital, la implementación digital involucra la adición de un filtro “antialiasing” (paso bajo), de un diseño eléctrico para muestreo y retención, y un C.A.D (convertidor de analógico a digital) en la entrada del controlador, y la adición de un diseño de muestreo y retención de un C.D.A. (convertidor de digital a analógico) para retener las constantes de salida entre muestreos subsecuentes, un filtro de recomposición en la salida del controlador, y la adición de un reloj para sincronizar los eventos tales como el muestreo.

Como mencionábamos el C.A.D. y el C.D.A. proveen una interfase entre el mundo real (continuo) y el mundo de los sistemas digitales. El C.A.D. toma algunas variables físicas, usualmente un voltaje eléctrico, y lo convierte en números que son enviados al sistema digital.

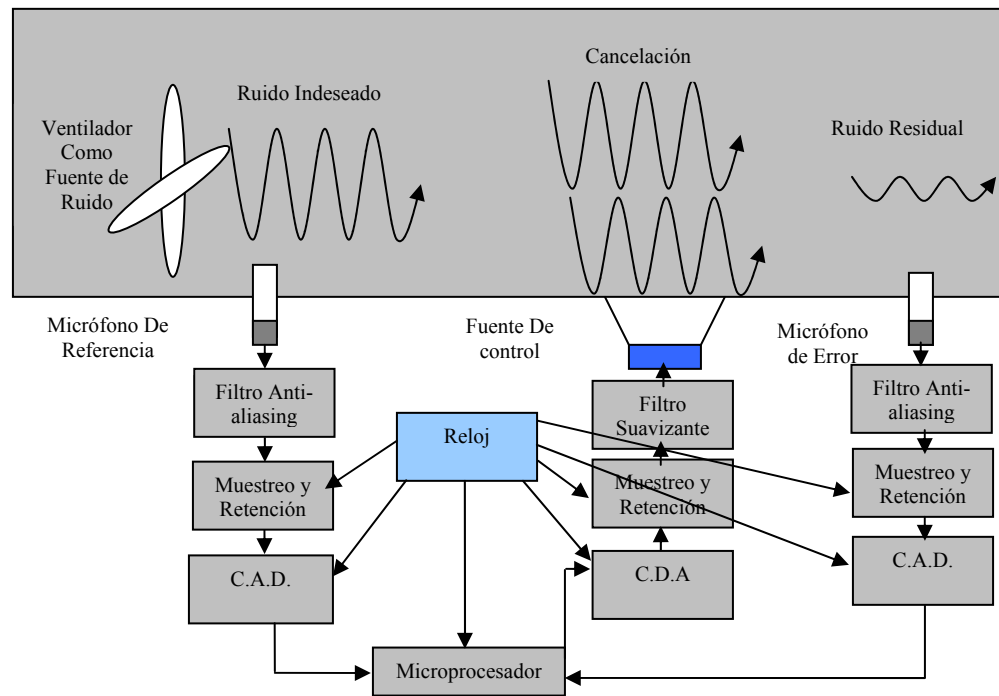


Figura No 3.11. Sistema de control activo de ruido feedforward adaptable con los requerimientos de componentes de sistemas digitales mostrado en forma de bloques

Fuentes: Scott Snyder. Active Noise Control Primer. 2000

Refiriéndonos a la figura N° 3.12, estos números usualmente son recibidos a intervalos de un periodo de tiempo ajustado, llamado el periodo de muestreo. Los números que se reciben del C.A.D. usualmente son representativos del valor de la señal al comienzo del periodo de muestreo, así como los datos de entrada al C.A.D. son normalmente muestreados y luego retenidos constantes durante el proceso de conversión para permitir una conversión acertada.

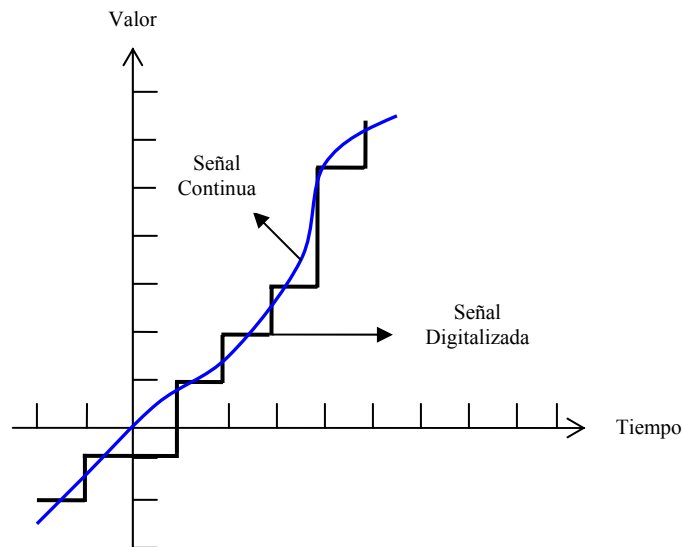
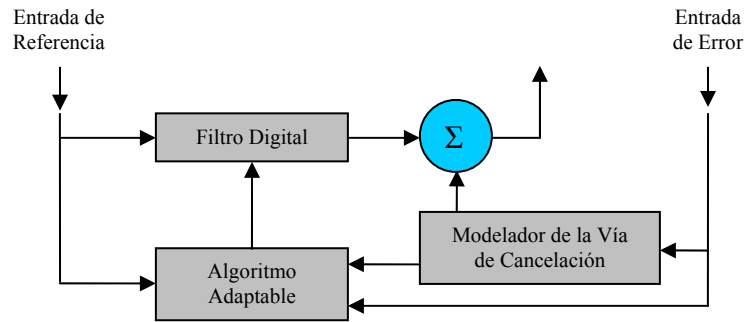


Figura No 3.12. Representación discreta de una señal continua, como proveniente del microprocesador por el C.A.D.

Fuente: Scott Snyder. Active Noise Control Primer. 2000

3.5.- APRECIACIÓN GENERAL DEL CONTROLADOR EN UN SISTEMA FEEDFORWARD ADAPTABLE

La porción electrónica del controlador en un sistema de control activo de ruido de feedforward adaptable es básicamente un sistema de control digital de propósitos especiales. Un bosquejo básico de un controlador activo de ruido de feedforward adaptable es mostrado en la figura N° 3.13, donde las líneas de la señal (referencia, error y control) se asumen que son digitales (el C.D.A. y C.A.D. no se muestran). El controlador tiene tres componentes básicos: un filtro digital, un algoritmo adaptable y un modelador de función de transferencia de vías de cancelación (o componente de identificación del sistema). Estos componentes están interrelacionados, y cada uno debe estar diseñando correctamente si se quiere que el sistema funcione de manera deseada.

**Figura No 3.13. Controlador feedforward adaptable**

Fuente: Scott Snyder. Active Noise Control Primer. 2000

El componente del filtro digital de un controlador feedforward (referido algunas veces como el filtro de control) es responsable de calcular la señal de control. Esto alimentará a su vez a una fuente de control (tal como un altavoz) la cual en realidad introducirá la perturbación de cancelación dentro del sistema acústico. La señal de control se deriva en respuesta a la señal de referencia a través de la operación de filtrado digital. Como describiremos más adelante, el filtro digital toma muestras discretas de entradas actuales y pasadas, multiplicadas por un grupo de coeficientes o cargas, y agregan los productos para generar una muestra de salida. Los valores de las cargas del filtro determinan la relación entre la señal de referencia y la señal de control. Para un sistema de control activo de ruido esto significa que, dadas algunas señales de referencia, la señal de control derivada es una función de las cargas del filtro digital.

El componente del algoritmo adaptable del controlador es responsable de afinar las cargas del filtro digital, así como la señal de control derivada provee el nivel más óptimo de atenuación de la perturbación. Para lograr esto, el algoritmo adaptable requiere de la medición de tres componentes. El primero de estos es una o más señales de error, que son mediciones del campo de sonido residual que existe después de introducida la cancelación en el campo de sonido.

Estas mediciones fueron tomadas en lugares donde el ruido no deseado era mínimo. En un sistema de control activo de ruido, estas mediciones generalmente vienen dadas por uno o más micrófonos.

La segunda cantidad que el algoritmo debe tener es una medida de las señales de control en la cual han sido basados los cálculos. Al menos esto restringe el copiado de muestras de la señal de referencia, en donde a veces copia las muestras actuales del control de salida.

La tercera cantidad requerida por un algoritmo adaptable no es en realidad una señal, sino un efecto. El algoritmo adaptable necesita conocer que le pasara a la señal de control mientras realiza los cálculos en la operación de filtrado digital y en el análisis de la señal de error. Tal conocimiento es clasificado técnicamente como una función de transferencia, la cual se define en números, como una función de frecuencia, que relaciona la señal de control y la señal de error. En un trabajo de control activo de ruido, la función de transferencia entre la señal de control y la señal de error es llamada a menudo como función de cancelación vía transferencia.

El tercer componente de un controlador de feedforward adaptable mostrado en la figura N° 3.13 es el modelador de la vía de cancelación de la función transferencia. Como se puede suponer, este componente es el responsable de obtener una medición de la función transferencia de cancelación para ser usado por el componente algorítmico del sistema adaptable. A continuación se muestra una discusión más detallada de estos tres componentes del sistema de control de feedforward adaptable.

3.5.1.- Filtro Digital

Consideremos el bosquejo mostrado en la figura N° 3.14 dando una señal de referencia que esta en cierto modo ligada a la perturbación inminente (ruido), el controlador activo de ruido debe calcular una señal apropiada para enviarla al altavoz

de forma que genere una cancelación en el campo de los sonidos. En esencia, la respuesta del controlador debe ser una imagen de reflejo a la respuesta del campo acústico de la señal de referencia; la amplitud de respuesta debe ser la misma, pero de fases opuestas. Entonces, por ejemplo, si la señal de referencia suministrada al sistema acústico produce una salida a la altura del altavoz de “23”, entonces la señal de referencia suministrada al controlador debe producir una salida a la altura del altavoz de “-23” para que ocurra la cancelación. En ingeniería, la relación entre la señal que entra al sistema y la que sale del sistema se conoce como función de transferencia (específicamente, una función de transferencia es el radio de (salida)/(entrada), la cual usualmente varía con el cambio de la señal de frecuencia). Entonces, nosotros podemos decir que el proceso de cálculo del controlador debe ser un reflejo de la función de transferencia del sistema acústico (a la señal de referencia).

Entonces, un sistema de función transferencia define la relación entre la señal que entra al sistema y la señal que sale del sistema. Esta relación es usualmente dependiente de la frecuencia. Consideremos, por ejemplo, que pasa cuando un voltaje de entrada es enviado a un pequeño altavoz, la salida en el campo de sonido será muy pequeña en amplitud.

Si una señal de alta frecuencia (digamos, 3000Hz) es suministrada a un altavoz, la amplitud de salida en el campo de sonido será más grande. Estas particulares para el rango entero de frecuencias se conocen como las frecuencias características de respuesta de un altavoz, que son cuantificadas por un grupo de números en una función de transferencia.

El cálculo del control que cancela la señal es acoplado a un sistema de control activo de ruido de feedforward adaptable filtrando digitalmente la señal de referencia de entrada. Un filtro digital es una estructura matemática, o series de operaciones

matemáticas (específicamente, sumas y multiplicaciones), que pueden imitar algunas funciones de transferencia deseadas.

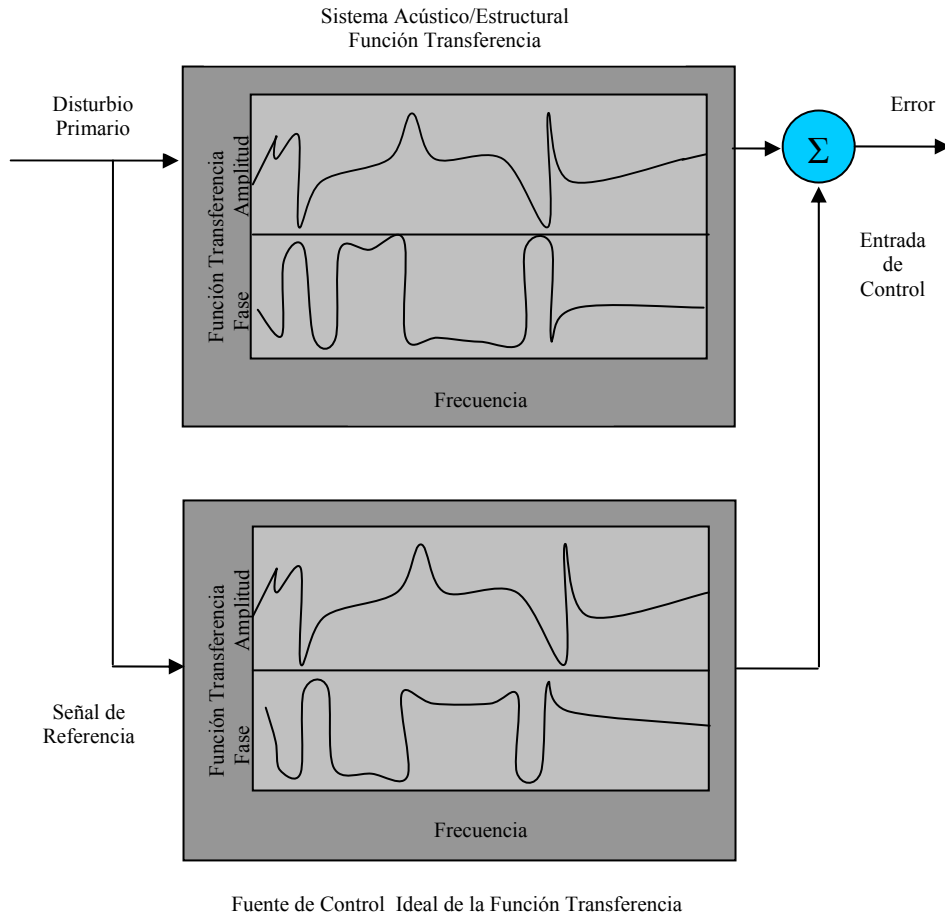


Figura No 3.14. El sistema de control de la función transferencia debería tener la misma amplitud, pero de fase invertida, como el objetivo del sistema acústico/estructural

Fuente: Scott Snyder. Active Noise Control Primer. 2000

En el control activo de ruido, la función de transferencia deseada será aquella que transforme la señal de referencia en una señal de control que proporcione el nivel máximo de atenuación de la perturbación, en donde la función de transferencia

deseada es la imagen reflectante de la función de transferencia acústica del sistema seleccionado por el control activo de ruido.

El modelo de función de transferencia dado por un filtro digital se refiere a una función de transferencia discreta, esta se calcula usando una serie de sumas y multiplicaciones con muestras discretas de la señal de referencia (implementada digitalmente). Esto es opuesto a la función de transferencia continua del sistema acústico imitado. La función de transferencia de un sistema refleja su propio trabajo. Por ejemplo, si nuestro sistema fuese un amplificador que aumentara el tamaño de la señal por un factor de 10, entonces la función de transferencia del amplificador en todas las frecuencias sería de “10”; este resultado refleja los propios trabajos del sistema.

Para sistemas físicos en general (responder a transferencias de calor, flujo de líquidos, vibraciones, etc.) y sistemas acústicos en particular, los trabajos propios son descritos por el cálculo, usando ecuaciones diferenciales. Estas son relativamente expresiones matemáticas complejas, expresiones que deben ser conocidas por todos los estudiantes de ingeniería.

Hay dos tipos diferentes de filtros comúnmente encontrados en controladores activos de ruido: filtros de respuesta a impulsos infinitos (IIR), y filtros de respuesta a impulsos finitos (FIR). La diferencia básica entre estos dos es que el filtro IIR tiene una sección de feedback, y el filtro FIR no (son únicamente dispositivos de feedforward). Los nombres de los filtros se originan de las características asociadas a la parte de feedback del filtro: si existe la sección de feedback del filtro, entonces una señal de entrada de la unidad de impulso (un valor de entrada de 1 para una muestra, seguida por entradas de 0 para todas las otras muestras) resultará en una señal de salida de longitud infinita, tal como la señal de salida continuará circulando en el ciclo del feedback.

Si la sección de feedback no existe, entonces la unidad de impulso simplemente se propagara a través de la línea de retardo del feedforward y desaparecerá. La señal de salida dura un finito periodo de tiempo.

3.5.1.1.- Especificando el Filtro Digital Apropriado

Una pregunta que surge frecuentemente en el trabajo de control activo de ruido es, ¿Cuál tipo de filtro debe ser usado y para cuál tipo de aplicación? Lamentablemente, la respuesta a esta pregunta está lejos de ser directa. Antes de dar algunas indicaciones generales, hay algunas características pertinentes a los dos tipos de filtros que deben ser descritas.

La primera característica que hay que notar es que los filtros FIR son inherentemente diseños estables, mientras que los filtros IIR no lo son. Queremos decir por estable, que las matemáticas no “estallarán”, o arrojarán una salida infinita de números en respuesta a una entrada finita de números, esta carencia de estabilidad inherente en el filtro IIR es un resultado de la presencia de la sección de feedback del filtro: si la amplificación en el ciclo de feedback se convierte demasiado grande para el sistema, el sistema se volverá inestable. Esto es a lo que pasa en el mundo físico si usted conecta un micrófono a un altavoz en un sistema de destinación pública: la salida del altavoz se convierte increíblemente larga, o “estalla”. Hay que recordar que los filtros digitales son modelos matemáticos de funciones de transferencia de mundo real, y por eso cualquier cosa que pueda pasar en el mundo real pasará, en teoría (dadas ciertas contracciones matemáticas), también pasara en los procesos de cálculo de los filtros digitales.

La segunda característica que hay que notar es de alguna manera obvia: así como los filtros FIR no tienen un ciclo de feedback, ellos no son particularmente buenos imitando sistemas que si tienen feedback, o largos tiempos de reverberación.

Por esta razón, no son particularmente buenos controlando dichos sistemas. Si, por ejemplo, la respuesta de atenuación de un sistema con varias resonancias en la banda de frecuencia seleccionada es considerada para control activo, entonces el sistema mismo debe tener una respuesta múltiple como resonancia. Como bien conocemos, la resonancia ocurre cuando ondas de sonido rebotan de un lado a otro entre espacios bien ajustados. En otras palabras, la onda retroalimenta su punto de origen, o circula a través del sistema, simplemente así pasa en los filtros digitales con un ciclo de feedback. La opción obvia del filtro digital en esta instancia es un filtro IIR, que imita de manera mas precisa las características del sistema físico seleccionado.

3.5.2.- Algoritmo Adaptable

3.5.2.1.- Antecedentes: Haciendo Uso de un Procesador de Señal adaptable

El segundo componente de un controlador activo de ruido de feedforward adaptable es el algoritmo adaptable. El propósito del algoritmo adaptable es entonar el filtro digital, para ajustar los valores de sus cargas de manera que el campo de sonido residual después de la cancelación, medidos por él o los micrófonos de error, sea minimizado. Más precisamente, el algoritmo tratará de remover o quitar cualquier correlación entre la señal de referencia y señal de error, y por lo tanto estará efectivamente blindado a los componentes de frecuencia no referenciados.

Los algoritmos adaptables usados en la mayoría de los sistemas de control activo de ruido son variaciones de algoritmos usados en los campos más anchos del procesador de señal adaptable (no tiene sentido inventar la rueda de nuevo) el procesador de señal digital adaptable es un campo que nace de los requerimientos de los sistemas de telecomunicación moderna. En estos sistemas, a menudo surge la necesidad de filtrar una señal, por lo tanto esto se puede extraer del ruido contaminado (restituimos eso filtrando, se quiere decir con esto, escoger entre los componentes de la señal, aquellos que nosotros queremos, a esos se les permite pasar

a través del filtro, y aquellos que no queremos son retenidos por el filtro). Los sistemas convencionales de procesamiento de señal son utilizados para hacer estas operaciones en un modo de ciclo abierto, usando un filtro con características ajustadas permanentemente. Las suposiciones subyacentes que acompañan el uso de filtros ajustados son aquellos conocidos de la descripción de la señal de entrada, y aquellas características del sistema de perturbación y respuesta que son invariables en el tiempo si este es el caso, un filtro ajustado satisfactorio puede ser diseñado.

A menudo se da el caso, de cualquier forma, que la característica de la señal de entrada y la respuesta del sistema son desconocidas, o pueden cambiar lentamente en el tiempo. En estas instancias el uso del filtro con características ajustables puede no dar una actuación satisfactoria.

Para sobrellevar este problema, un número largo de algoritmos adaptables ha sido desarrollado para modificar las características del filtro a través de un cambio de valores de carga para optimizar la actuación del sistema. De hecho, un procesador de señal digital adaptable se ha convertido firmemente en un campo establecido, abarcando un amplio rango de aplicaciones (una de las cuales es control activo de ruido).

Los algoritmos adaptables usados en un sistema de control activo de ruido son esencialmente generalizaciones de los algoritmos usados en sistemas tales como canceladores de eco telefónico, equipos para medir latidos del corazón de un feto (donde el latido del corazón de la madre debe ser removido de la señal), y antenas de cancelación de interferencia.

3.5.3.- Tasa de Muestreo

Uno de los parámetros, tal vez el más importante en el diseño e implementación de un controlador activo de ruido es la tasa de muestreo de un

sistema digital. Mientras está bien decir “el filtro digital hará esto”, y “el algoritmo adaptable hará esto otro”, pues bien todo trabajo actualmente está largamente determinado por la tasa de muestreo. Ahora conociendo algunos hechos básicos acerca de los trabajos deseados del controlador, nosotros estamos en la posición de evaluar la influencia de este extremadamente importante parámetro.

Seleccionando la tasa de muestreo correcta para una aplicación dada no es a menudo fácil, requiriendo algo de juicio para balancear un número de capacidades influyentes. En este capítulo, nosotros veremos el efecto de tasas de muestreos altos y bajos con el objeto de llegar a un compromiso razonable. Un límite absoluto en el valor más bajo (mínimo) de la tasa de muestreo viene dado por un fenómeno de “aliasing” se refiere al hecho de que en sistemas de muestreo, imágenes del verdadero valor del espectro muestreado se repite asimismo en infinitos números de múltiples frecuencias de la muestra f_s . Prácticamente, el fenómeno de aliasing significa que es imposible decir la diferencia entre dos o más sinusoides basados sobre la señal de muestreo. Este efecto es ilustrado en la figura N° 3.14, donde dos sinusoides tienen exactamente los mismos valores de muestra y no se pueden distinguir entre uno y otro basados en los datos muestra.

El aliasing puede tener un efecto deprimente sobre el desempeño de sistemas de control si hay niveles substanciales de datos de frecuencias mayores a $f > f_s / 2$, que son permitidos de otro modo dentro de los datos de frecuencias menores a $f < f_s / 2$. Para combatir este problema, existen filtros “antialiasing” que son colocados enfrente de convertidores análogos digital. Estos son filtros de paso de baja frecuencia que remueven componentes de frecuencia más grandes que la mitad de la frecuencia muestreada, $f > f_s / 2$, desde el espectro de entrada.

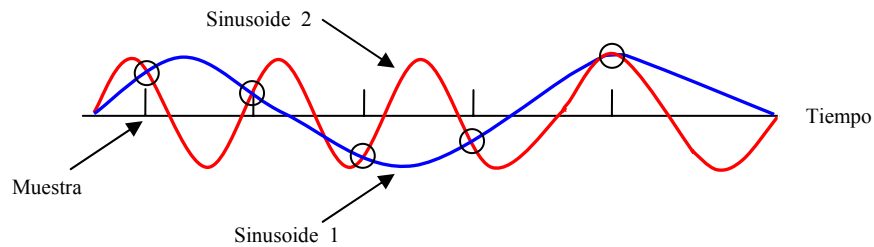


Figura No 3.14. Un ejemplo de dos señales con “Aliasing”

Fuente: Scott Snyder. Active Noise Control Primer. 2000

En teoría, entonces, el límite inferior en la tasa de muestreo para un problema dado es el doble de la frecuencia más alta de nuestro interés. Sin embargo, actualmente implementar un sistema con esta tasa de muestreo no es recomendable. Primero, mientras es teóricamente posible reconstruir una señal armónica muestreada al doble de su frecuencia, el filtro requerido para hacerlo de longitud infinita, no limita la entrada, ni la salida de manera estable. Por esto, nosotros entendemos que para una entrada finita no hay necesariamente una salida finita. Segundo, no hay margen para error en el límite superior de frecuencia. Cualquier ligero cambio en la frecuencia superior resulta en aliasing. Tercero, filtros prácticos antialiasing no tienen características cuadráticas perfectas de paso y retención, pero más bien tienen algunas transiciones finitas en la banda de paso (frecuencias por debajo de la mitad de la tasa de muestreo son aceptadas a través este filtro) y retención (componentes de frecuencia por encima de la mitad de la tasa de muestreo son eliminadas por el filtro).

Para dibujar una imagen cualitativa de qué pasaría si la tasa de muestreo es muy baja, consideremos el problema de muestreo “el paso de respuesta” de un sistema que tiene una resonancia de 1 Hz (nosotros estamos observando la respuesta del sistema que es dominado por una frecuencia de 1 Hz). Como se muestra en la figura N° 3.16, si el paso de respuesta es muestreado a 2 Hz, las características no son distinguibles al observador. Si muestreamos a 5 Hz, las características comienzan a

aparecer. A 10 Hz el paso es aparente. De hecho, si las muestras están conectadas por líneas directas, la reconstrucción del paso estaría en un error de por lo menos 4 %. Intuitivamente, entonces, nosotros podríamos postular que el ejercicio de filtrado, que es análogo a la reconstrucción de una señal, se hace más fácil a medida que la tasa de la muestra se incrementa. Hay, sin embargo, un límite a este proceso por el sistema de control adaptable. A altas tasa de muestreo, decenas o incluso centenas de veces la frecuencia de perturbación, tiene problemas con la precisión numérica en el ambiente digital. Quizás más seriamente, hay problemas en el comportamiento de convergencia del algoritmo adaptable.

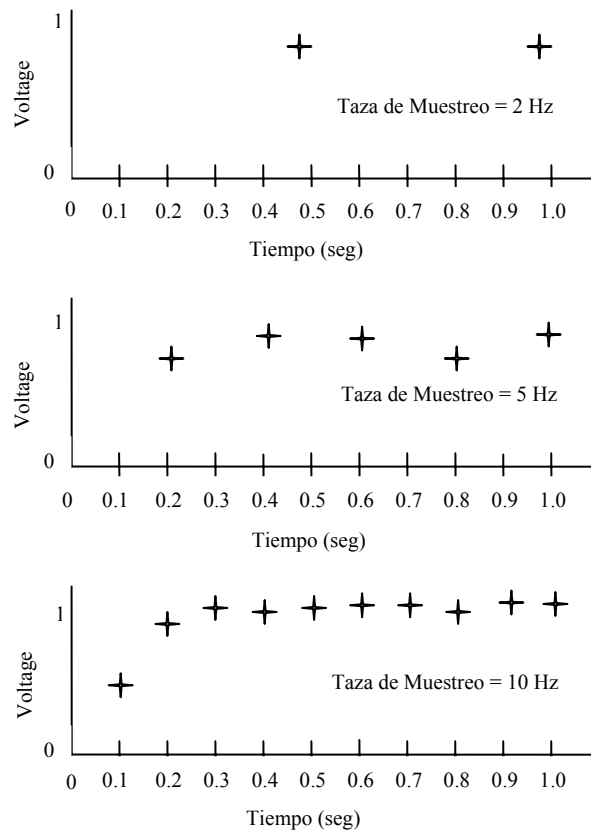


Figura N° 3.16. Muestreando la respuesta de un sistema con un componente dominante de 1 Hz de frecuencia, con tres diferentes ratas de muestreo: 2 Hz, 5 Hz, y 10 Hz. Nótese que las cruces indican el valor muestreado

3.5.3.1.- Tasa de Muestreo Óptima

Para la excitación tonal, si la frecuencia muestreada es sincronizada para que sea exactamente cuatro veces la excitación de la frecuencia, entonces para dos filtros sustitutos de respuesta de impulsos finitos la superficie de error es perfectamente uniforme, lo cual significa que los efectos competitivos de estabilidad, velocidad y de convergencia están en perfecto balance.

Esto, sin embargo, no es recomendado como óptimo por cierto número de razones. Primero, en general, nosotros no podemos esperar ser capaces de sincronizar la tasa de muestreo del controlador con la perturbación no deseada, aun si esta fuese armónica. Segundo, el uso de solo dos sustitutos en un filtro FIR no seria recomendado en la práctica. Tercero, como se puede deducir del ejemplo del paso de respuesta, teniendo sólo cuatro muestras por ciclo puede llevar a problemas de precisión.

La tasa optima de muestreo es un compromiso entre rápido y lento. Ambos extremos llevan a problemas con la convergencia del algoritmo adaptable y su estabilidad, y a dificultades con la precisión numérica. **“La tasa óptima de muestreo comprometida es a menudo citada como 10 veces la frecuencia de interés”**. En la práctica, esta tasa de muestreo provee al algoritmo adaptable mayor rapidez en la convergencia y niveles razonables de estabilidad.

CAPITULO IV:

ANALISIS DE VIBRACION Y RUIDO GENERADO POR MAQUINARIAS ROTATORIAS INDUSTRIALES

4.1.- ASPECTOS GENERALES DE LAS VIBRACIONES EN MAQUINARIAS

Todas las máquinas vibran, producto de las cargas que se generan en ellas. La mayoría de éstas tienen niveles de vibración que permanecen bajos y constantes, pero es conveniente verificar periódicamente el equipo, para asegurar que estos niveles se mantienen en el tiempo, ya que debido a diversos factores del proceso en que se encuentran (por ejemplo, variaciones de carga, desgaste de componentes, etc.) producen variaciones.

Como la maquinaria industrial, en general, es del tipo rotativo, las vibraciones originadas serán del tipo periódico y sus componentes de frecuencia serán los principales indicadores para la identificación de las causas y su posterior corrección. La clave del análisis de vibraciones es buscar las periodicidades de las fuerzas que se generan, ya que la vibración es causada por una fuerza que está variando sea en magnitud y/o dirección, y/o punto de aplicación.

El origen de las vibraciones en máquinas podemos clasificarlo en dos tipos:

1. Las originadas en la máquina misma.
2. Las de origen exterior.

Las causas de las primeras se pueden deber a:

- Fuerzas inherentes al funcionamiento de la máquina.
- Fuerzas que provienen de fallas mecánicas.

- Fuerzas que provienen de funcionamiento fuera de sus condiciones de diseño.

La medición de las vibraciones, normalmente se realiza en forma indirecta, es decir, se convierte una vibración mecánica a una señal eléctrica, la que puede ser procesada en el equipo de medición. Este proceso de medir la señal mecánica es el que estudiaremos en el presente trabajo, pero se hace necesario definir algunos conceptos referentes a Vibraciones en Máquinas.

4.1.2.- Vibración en Máquinas

Primero, se hace necesario conocer que es una vibración, sus características, causas que las originan, como medirlas, y como se pueden detectar fallas a través de ellas.

4.1.2.1.- Vibración Mecánica

Una vibración es el incremento físico de un cuerpo o partícula, alrededor de un punto de equilibrio o referencia en un intervalo de tiempo o periodo, ocasionado por una fuerza perturbadora.

Las vibraciones mecánicas se dividen en:

- Determinísticas
- Aleatorias

Las vibraciones Determinísticas pueden ser descritas por expresiones matemáticas que definen la manera en que el valor instantáneo cambia en el tiempo. Las vibraciones Aleatorias pueden ser descritas sólo por parámetros estadísticos, pues no existe una expresión matemática que permita describir como varia en el tiempo el valor instantáneo.

En general, en las máquinas existe una combinación de las vibraciones determinísticas y aleatorias, no obstante, nuestro estudio se centrará en las vibraciones determinísticas periódicas, cuya forma está representada por el movimiento armónico simple.

Como ejemplos de este movimiento tenemos:

- El movimiento angular del péndulo de un reloj.
- El movimiento que describe un punto en el borde de un volante girando a velocidad constante mirado en la dirección del plano de rotación.

4.2.- CARACTERÍSTICAS DE LAS VIBRACIONES

Las características más comunes y que definen una vibración en un análisis son:

- Amplitud del desplazamiento
- Velocidad
- Aceleración
- La Frecuencia
- La Fase

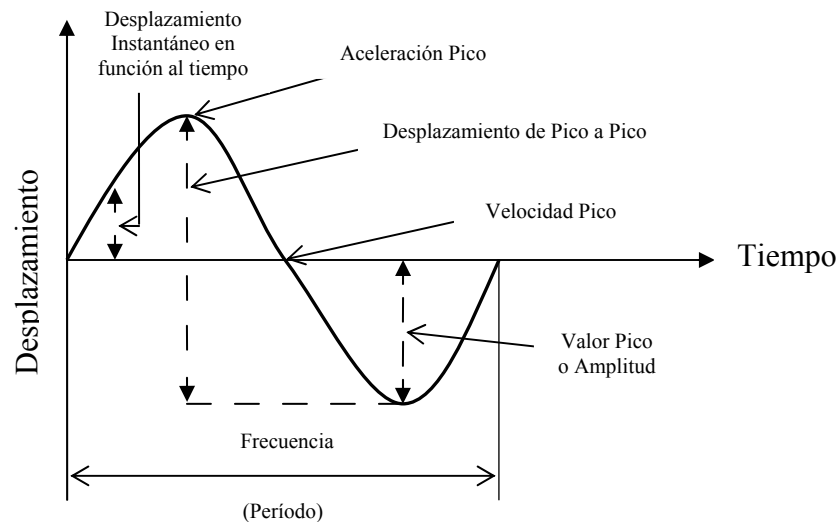


Figura N° 4.1. Características de la vibración

Fuente: Evelio Palomino. Medición y análisis de vibraciones en el diagnóstico de maquinarias rotatorias

4.2.1.- Frecuencia de Vibración

El tiempo que se requiere para completar un ciclo vibratorio constituye un período de vibración. Si se requiere el período de un segundo, para completar un ciclo vibratorio, entonces durante un minuto se repetirá sesenta veces, es decir sesenta ciclos por minuto. Esta forma de expresar el número de ciclos ocurridos en un intervalo dado (minutos, segundos, horas, etc.) es la frecuencia de vibración, cifra más útil que el período. Normalmente se expresa la frecuencia en ciclos por minuto [CPM] o ciclos por segundo [Hz].

4.2.2.- Desplazamiento de Vibración

La distancia total que recorre la parte que vibra, de un extremo a otro, se denomina Desplazamiento "Pico a Pico". Normalmente se expresa en milésimas de milímetros (0.001 [mm]) o micrómetros [μm].

4.2.3.- Velocidad de Vibración

Como la masa que vibra se mueve, tiene que desplazarse a alguna velocidad. Sin embargo, la velocidad cambia constantemente. En el límite superior del movimiento tendrá velocidad cero, puesto que se va a detener antes de poder tomar la dirección contraria, siendo mayor la velocidad cuando pase por el punto de equilibrio. Como la velocidad varía frecuentemente durante el ciclo, la velocidad más elevada o de "pico" es la que se escoge para ser medida. Normalmente se expresa en [mm/s] pico.

4.2.4.- Aceleración de Vibración

Al referirnos a la velocidad de vibración, señalamos que la velocidad de la parte en cuestión se aproxima a cero, en los límites del movimiento máximo. Desde luego, cada vez que la pieza cambia de velocidad (módulo, dirección o sentido) tendrá que acelerarse. Técnicamente dicho, la aceleración es el coeficiente de cambio de velocidad.

4.2.5.- Fase

Otra característica importante de la vibración es la fase, que se define como la posición de una pieza que vibra en un instante dado con relación a un punto fijo o a otra pieza que vibra. En la práctica, las medidas de fase tomadas constituyen un modo conveniente de comparar un movimiento vibratorio con otro o determinar como vibra una pieza con respecto a otra.

4.3.- CAUSAS QUE ORIGINAN LAS VIBRACIONES

Las vibraciones en máquinas pueden ser producidas por muchas y variadas causas. Algunas de las causas de aumento súbitos en las vibraciones son desbalanceo

rotatorio, desalineamiento de acoplamientos, descansos o ejes excéntricos, engranajes o rodamientos defectuosos, ejes flectados, soldaduras mecánicas, correas impulsoras defectuosas, fallas hidráulicas, fallas eléctricas, efectos aerodinámicos, rozamientos, resonancia mecánica, efecto de cuña de aceite y otras. El desbalanceo dinámico y el desalineamiento, son las causas más comunes.

Además de las causas anteriormente señaladas, debe tenerse en cuenta otras de largo plazo, como el desgaste, edad de la maquinaria, corrosión, comportamiento no elástico de los materiales, cambios ambientales (temperatura, presión, humedad), acumulación de materiales extraños, daño o deterioro, lubricación inadecuada entre otras.

Independiente de la forma en que se enumeran las causas que producen las vibraciones, hay un aspecto básico que debe quedar claro y es que, las causas de vibración provienen de los cambios constantes de una fuerza que modifica continuamente su dirección y/o intensidad.

Las fluctuaciones de esta fuerza son las que dan origen a las vibraciones y las características resultantes se determinan por el reconocimiento de la forma en la que es generada la fuerza.

4.3.1.- Medición global de vibraciones

La medición y análisis de la vibración requiere en general de una cadena como la indicada en la figura N° 4.2.

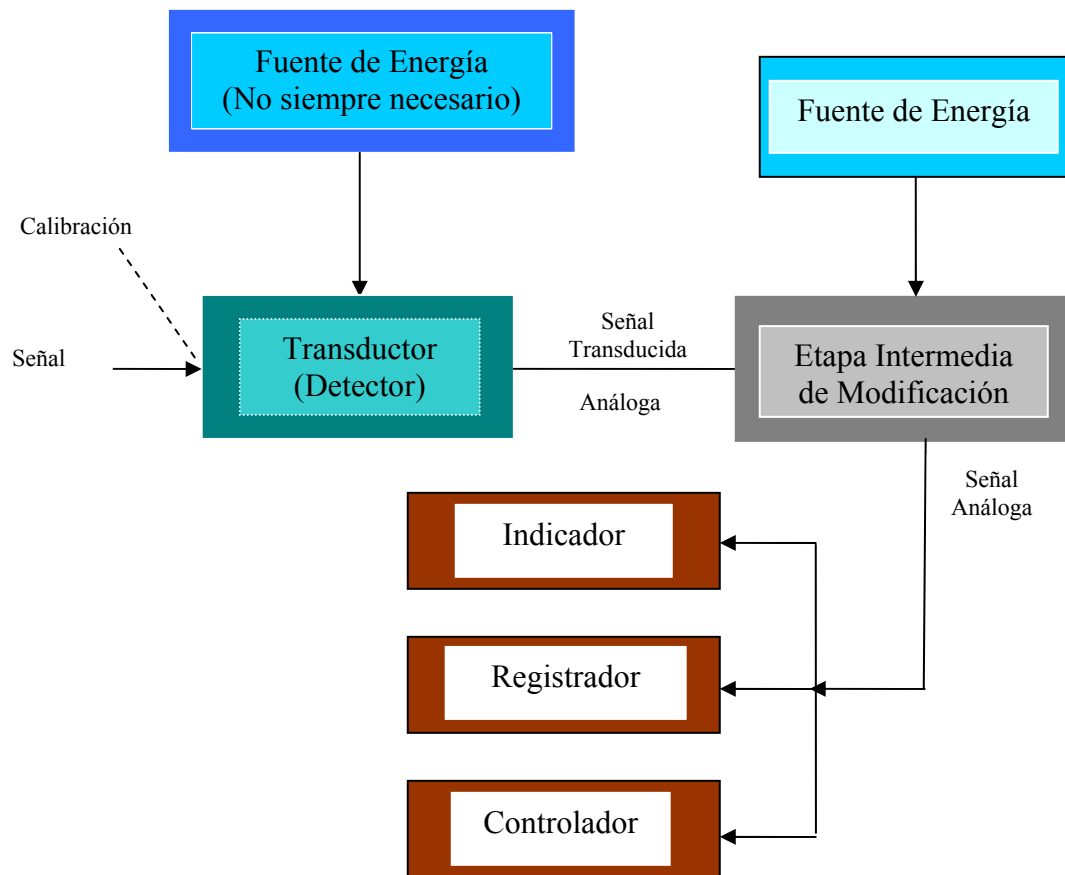


Figura N° 4.2. Esquema Generalizado del Sistema de Medición

Fuente: Claudio Olguín B. Laboratorio1 “Mediciones de Vibraciones en Máquinas rotatorias”

El método de los límites de variación global (V.G.), es uno de los más simples y uno de los más empleados. Consiste en medir periódicamente el valor de la vibración y compararlo con el valor límite prefijado como valor de intervención. La fiabilidad de este método va a depender directamente de la respuesta a las siguientes preguntas:

- _ ¿Qué puntos medir?
- _ ¿Qué señal vibratoria medir?
- _ ¿Qué indicador adoptar para el nivel de vibración?
- _ ¿Qué transductor utilizar?

_ ¿Qué límites de intervención usar?

4.3.2.- Puntos de Medición

Las vibraciones producidas por el funcionamiento de las máquinas son más notorias en los puntos donde se apoyan los elementos rotatorios, es por esto que se toman mediciones de la vibración en los descansos, lo más cerca posible del punto de apoyo del eje. A veces se hace necesario tomar la medición directamente del eje, aun cuando pueden introducirse distorsiones en la medición por excentricidad o irregularidades de la superficie del eje.

En cada punto donde se efectúan las mediciones, estas deben ser tomadas en tres direcciones: horizontal, vertical y axial con respecto al eje del rotor. Esto se logra colocando el sensor en el descanso o lugar elegido para efectuar la medición, de tal manera que la posición de éste, defina la dirección que se desea medir. Los valores medidos en la dirección horizontal generalmente son mayores que los medidos en la dirección vertical, esto se debe a que en la dirección horizontal existe una mayor libertad de movimiento debido al montaje del equipo. Los valores medidos en la dirección axial permiten detectar si existen desalineamientos en los descansos o en el acoplamiento, o cuando el eje sufre los efectos de pandeo.

El mal montaje de un transductor reduce severamente su rango útil de frecuencia. La causa principal es un apretado contacto mecánico entre la base del sensor y la superficie a la cual va a ser unido. El uso de un vástago manual es útil para chequeo rápido o puntos de difícil montaje, pero puede dar grandes errores debido a su poca rigidez.

Además, en la toma de mediciones se deben, considerar las condiciones de operación de la máquina en el tiempo en que se hace el análisis (velocidad, carga, flujo, temperatura, etc.), ya que el cambio de estas condiciones puede traducirse en

notables variaciones en la característica de la vibración. Es conveniente anotar la fecha en que se toma la medida, incluyendo la hora, ya que se pueden producir cambios en la vibración, por ejemplo, al cambiar la agradable temperatura del día por la baja temperatura de la noche. Por otra parte se debe considerar, si el equipo trabaja normalmente en frío o en caliente y cuáles son las condiciones de carga usual.

4.3.3.- Elección de la Señal a Medir

Para la elección de la señal a medir, se debe considerar que teóricamente no hay diferencias respecto a la magnitud física a medir (aceleración, velocidad o desplazamiento), pues ellas están relacionadas por la frecuencia.

En la práctica la naturaleza de los síntomas mecánicos es tal, que los componentes del desplazamiento a bajas frecuencias son generalmente mayores que las de alta frecuencia, y viceversa respecto a la aceleración como se aprecia en la Figura N° 4.3.

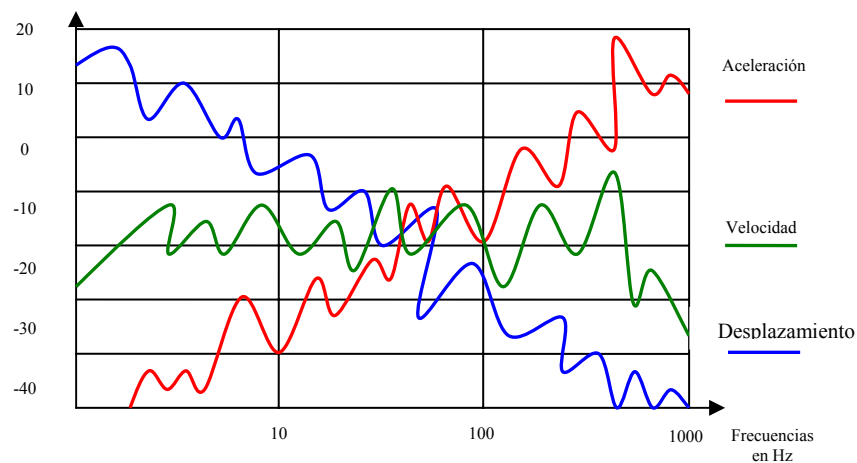


Figura N° 4.3. Relación entre los distintos espectros

Es conveniente elegir el parámetro vibratorio que suministre el espectro más plano, para asegurar que los cambios de cualquier componente espectral serán rápidamente detectados en la señal global. Si por ejemplo midiéramos desplazamiento, cualquier cambio que se produzca a bajas frecuencias será detectado, sin embargo un problema que se presente a elevadas frecuencias no sería detectado.

Así, la medición de desplazamiento es de interés si se quiere considerar los esfuerzos dinámicos. Los desplazamientos puede que sean grandes, principalmente para frecuencias bajas menores que 15 [Hz] y cuando el desbalanceo es muy importante. La medición de velocidad será de interés cuando los problemas principales sean percepción y fatiga humana, puesto que son proporcionales a la velocidad. El rango de frecuencia es de 15 [Hz] a 150 [Hz].

La detección de aceleración será adecuada si las fuerzas son el problema principal. Esto es habitual para frecuencias mayores a 150 [Hz]. Así los acelerómetros se emplean para supervisar rodamientos, engranajes, etc.

El parámetro en que generalmente se entregan los resultados es en velocidad, por ser ésta el espectro más estrecho y plano en toda la gama de frecuencias, aunque presenta el inconveniente de que sensores de velocidad deben ser calibrados correctamente, pues estos poseen bobinas se desajustan constantemente.

El estudio de las vibraciones está relacionado con el comportamiento oscilatorio de los cuerpos, teniendo en cuenta que la mayoría de las maquinarias y estructuras experimentan vibraciones en mayor o menor grado, por lo que deberán tomarse en cuenta al abordar los cálculos de diseño y/o comprobación de instalaciones, así como en los controles periódicos del estado técnico de las mismas (mantenimiento predictivo). El movimiento físico de una máquina rotatoria se interpreta como una vibración cuyas frecuencias y amplitudes tienen que ser

cuantificadas a través de un dispositivo que convierta estas en un producto que pueda ser medido y analizado posteriormente.

Así la “frecuencia” describirá que es lo que está mal en la máquina y la “amplitud” nos dice cuán severo es el problema. Las vibraciones pueden ser de naturaleza armónica, periódica o aleatoria.

4.4.- ORIGEN DE LAS FRECUENCIAS DE LAS VIBRACIONES EN MAQUINARIAS

Existen tres causas fundamentales que propician la presencia de vibraciones en las máquinas rotatorias a determinadas frecuencias:

1. Frecuencias generadas
2. Frecuencias excitadas
3. Frecuencias producidas por fenómenos electrónicos.

4.4.1.- Frecuencias Generadas

A veces se les identifica como frecuencias forzadas o frecuencias de diagnóstico y son aquellas que la máquina genera realmente durante su funcionamiento habitual. Representativas de estas frecuencias se tienen a los desbalances, el paso de las paletas de una turbina, la frecuencia de engranaje o el paso de los elementos rodantes por los defectos locales de las pistas de un cojinete de rodamiento, etc.

4.4.2.- Frecuencias Excitadas

Las frecuencias excitadas, no son más que las frecuencias de resonancias de los elementos que componen las máquinas, incluyendo las estructuras portantes y los elementos no rotatorios en general. Cuando se excitan las frecuencias de resonancias, las vibraciones son amplificadas en virtud del amortiguamiento presente. Los

especialistas en diagnóstico consideran que aproximadamente el 40% de los casos de niveles de vibración excesivos que se encuentran en la práctica, tienen como fuente principal el desbalance¹.

4.4.2.1.- Influencia de las Vibraciones Externas

En muchas ocasiones, es de gran importancia estudiar, cuantificar y controlar las vibraciones que llegan a la máquina debido a diferentes fuentes externas o sea, debido a fuerzas que no son generadas durante el funcionamiento de la propia máquina sino como consecuencia de la operación de máquinas vecinas.

En este caso, cuando las frecuencias de las vibraciones son transmitidas por máquinas vecinas hacia la base de la máquina afectada es mucho mayor que la frecuencia natural del sistema máquina – soporte, entonces los propios soportes filtraran los niveles de vibraciones, limitando la llegada de estos al cuerpo de la máquina.

4.4.3.- Frecuencias Producidas por Fenómenos Electrónicos

En algunos casos, cuando se obtienen los espectros de las vibraciones en una máquina, se observan frecuencias falsas o fuera de su ubicación correcta. Esto tiene lugar por ejemplo, en el caso de una vibración senoidal que por errores en el ajuste de los atenuadores de entrada del instrumento de medición, éste la registra seccionada, lo cual produce un espectro falso.

4.5.- MONITOREO DE VIBRACIONES EN LA MAQUINARIA INDUSTRIAL

Hasta el momento existen dos métodos fundamentales para la medición de vibraciones en maquinarias, dependiendo de la magnitud que se desee medir y de la forma en que se tome del medio objeto de medición.

¹Dr. Evelio Palomino Marín. Centro de Estudios Innovación y Mantenimiento. 1997

1. Medición acústica
2. Medición de superficie

Como consecuencia de las fuerzas que se producen entre los elementos de una maquinaria y de las vibraciones generadas por éstas, la superficie exterior de cada una de las piezas que conforman la máquina, estará variando de forma y de posición. Esto provoca cambios de presión en el aire que en general rodea a los equipos. Esta onda de presión se propaga en el aire afectando a objetos próximos a la fuente de vibración. Uno de estos objetos pudiera ser la membrana del tímpano del oído humano, la que a través del resto del sistema del oído, produce en el cerebro la sensación de sonido. De esta forma, la medición del sonido producido por una maquinaria da una medida de las vibraciones producidas por ésta.

La medición de vibraciones por medio del sonido tiene como ventaja que al mismo tiempo, se miden las vibraciones de todos los puntos de la maquinaria, pero a la vez tiene una gran desventaja y es que, en la producción industrial muchas veces el sonido circundante es comparable o superior al que proviene de la máquina objeto de análisis. Es posible cuantificar no ya la propagación de la onda vibroacústica a través del aire, sino la vibración de la superficie de la maquinaria.

Claro está, la medición tendrá que ser realizada en forma discreta o sea, en algunos puntos de la máquina o de la estructura objeto de análisis y en forma directa, porque se mide a través del contacto entre el dispositivo de medición y la máquina.

4.5.1.- Descripción de los Niveles de Vibraciones

Las vibraciones pueden ser observadas en el tiempo o en frecuencia. Al efectuar la medición del nivel de vibraciones es necesario definir que magnitud física se desea cuantificar para describir la vibración, de aquí que para ello puede ser empleado, el desplazamiento, la velocidad y/o la aceleración.

4.5.2.- Dominios del Tiempo y la Frecuencia

Las vibraciones pueden ser observadas en dos dominios básicos o sea, el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia. Ambos presuponen una vinculación directa.

Electrónicamente hablando, la vibración es registrada en virtud de una señal eléctrica que es proporcional al fenómeno mecánico que está cuantificado.

Desde el punto de vista matemático, el dominio del tiempo y la frecuencia se relacionan a través del aparato matemático ideado por Fourier en el siglo XIX.

Actualmente, la evolución de la electrónica digital ha permitido incorporar la conocida Transformada Rápida de Fourier (FFT) en instrumentos de medición y en programas de computación. En cualquiera de estos casos, el espectro obtenido muestra la distribución de los niveles de vibraciones por frecuencias.

4.5.2.1- Análisis en el Dominio de la Frecuencia

Cuando se procede a efectuar la medición de las vibraciones sobre la base de la descomposición de éstas en su contenido a diferentes frecuencias, es necesario decidir que magnitud se medirá. La velocidad es la medida de cuán rápido la superficie vibrante alcanza sus posiciones extremas. El rango de frecuencias efectivo para transductores de velocidad es de 10 Hz y 2000 Hz aproximadamente, prefiriéndose las mediciones de velocidad por no estar relacionada con la frecuencia.

Por otra parte, el desplazamiento es la medida de las posiciones extremas de la superficie que vibra. Está relacionado con la frecuencia por lo que cualquier medición de desplazamiento tendrá que ser realizada a una frecuencia específica. El rango de frecuencias efectivo aproximado para transductores de proximidad es de 0 y 600 Hz. En el caso de transductores para la medición de desplazamiento por contacto el rango de frecuencias efectivo es entre 0 y 200 Hz.

La aceleración expresa la razón de cambio de la velocidad desde la posición de equilibrio hasta los extremos, teniéndose aceleraciones altas a altas frecuencia. Los transductores para la medición de la aceleración de las vibraciones con alta sensibilidad poseen un rango de frecuencias efectivo de entre 0.2 Hz y 500 Hz aproximadamente.

4.5.3.- Filtros

La señal proveniente del integrador o directamente del acelerómetro según el caso, está compuesta en general por numerosas armónicas, siendo de sumo interés para el especialista la separación de estas armónicas con vistas a la identificación de problemas en la maquinaria industrial. Esta operación constituye generalmente una responsabilidad de los filtros, que atendiendo a los objetivos de su empleo podrán tener diferentes características dinámicas.

4.5.3.1.- Filtro Pasa – Bajo

Es un sistema que sólo deja pasar a través de él, armónicas de baja frecuencia, atenuando las de alta frecuencia.

4.5.3.2.- Filtro Pasa – Alto

Es un sistema que sólo deja pasar armónicas de alta frecuencia, atenuando las de baja frecuencia.

4.5.3.3.- Filtro Pasa – Banda

Con la combinación adecuada de un filtro pasa – alto y uno pasa – bajo, se puede obtener un filtro que sólo deje pasar las armónicas comprendidas en una banda de frecuencia determinada.

4.5.4.- Calibración de los Espectros

El análisis de diferentes tipos de señales no sólo requiere de la aplicación de una ponderación adecuada sino también de una correcta calibración de los resultados espectrales o sea, de una correcta aplicación de las funciones de análisis espectral. Las señales que en general se registran, procesan y analizan en el campo de las vibraciones pueden ser divididas en dos categorías, las de naturaleza continua y las de naturaleza transitoria.

4.5.5.- Analizadores de Señales

Con el vertiginoso desarrollo de los microprocesadores, de la electrónica y de la computación, han proliferado aceleradamente los llamados analizadores de señal que constituyen la integración en un solo instrumento. Claro está, el filtrado de la señal no se ejecuta de forma analógica, sino que se efectúan a través de algoritmos “construidos” en circuitos integrados, que le proporcionan una alta resolución en el análisis y una alta velocidad de cálculo que en ocasiones, puede llegar a satisfacer las exigencias del llamado tiempo real.

4.5.5.1.- Características Prácticas del Instrumento Virtual

El Instrumento Virtual desarrollado combina un *hardware* de operación no exclusiva con un poderoso *software*, teniendo como resultado un instrumento con posibilidades ilimitadas.

El lector deberá tener presente además, que la capacidad de análisis del instrumento no está limitada por una arquitectura cerrada sino que, todo dependerá del alcance del *software* desarrollado a estos efectos por cuanto, cuando sea necesario efectuar algún tipo de análisis no contemplado en el sistema, bastará con escribir la función de análisis y adicionarla al sistema. Esto constituye la ventaja fundamental de los llamados Instrumentos Virtuales sobre los instrumentos reales ya que estos últimos,

no son más que equipos electrónicos convencionales con ciertas especificidades para la medición de eventos mecánicos dinámicos.

4.5.5.2.- Plataforma para el Análisis de Señales

El Instrumento Virtual ha sido concebido sobre la base de satisfacer la medición-análisis de la excitación o de la respuesta de la maquinaria o estructura objeto de estudio. La Figura N° 4.4, ilustra la concepción del Instrumento Virtual que aporta una plataforma para el análisis de señales.

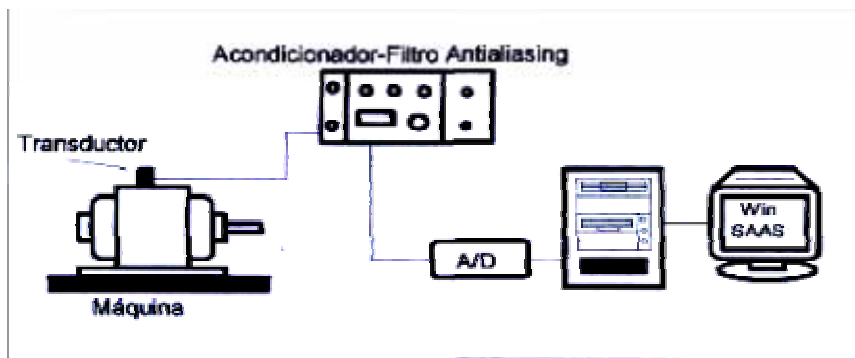


Figura N° 4.4. Plataforma para el análisis de señales vibroacústica

Fuente: Dr. Evelio Palomino Marín, A Sánchez Rodríguez y J. Cabrera Gómez. Centro de Estudios Innovación y Mantenimiento. 1997

El Instrumento Virtual además ofrece dos vías de entrada ya sea de forma directa a través del conversor analógico-digital o indirecta a través de señales archivadas en disco por el propio sistema o sus predecesores.

4.6.- RUIDO DE MAQUINARIA

Las máquinas son una de las principales fuentes de ruido. El espectro del ruido es de tres tipos:

1. Componentes lineales con frecuencias definidas relacionadas con las partes rotatorias y su velocidad. La frecuencia generada es proporcional a la frecuencia de la rotación. Generalmente tiene una frecuencia fundamental y varios armónicos, o múltiplos enteros de esta frecuencia. Los producen los generadores, motores, ventiladores, etc. Su frecuencia cambia con la velocidad rotacional.
2. Componentes lineales con frecuencias no relacionadas con el giro. Son producidas por vibraciones de las piezas de la maquinaria o del soporte de la misma, por lo que su frecuencia no cambia. A veces estos ruidos tienen tantas frecuencias libres de vibración que son imposibles de separar unas de otras.
3. Componentes aleatorios o ruido "RANDOM". Puede ser continuo como el producido por cojinetes o los cilindros de un motor o intermitente cuando se produce por maquinaria en funcionamiento discontinuo.

4.7.- ANÁLISIS DIGITAL DE SEÑALES VIBROACUSTICA

4.7.1.- Frecuencia de Nyquist y el Aliasing

Como es lógico pensar, el procesamiento digital de una señal sólo es posible aplicarlo se dispone de un numero finito de muestras discretas y digitalizadas de la señal en el tiempo. Suponiendo entonces que se dispone de una señal en el tiempo limitada por un intervalo entre 0 y T. La transformación de Fourier de este segmento se expresará como sigue:

$$Y(f) = \int_0^T y(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt$$

El segmento $y(t)$ está limitado entre 0 y T y también su transformada de Fourier está limitada entre $-F$ y F . En la práctica, el segmento muestreado es de longitud finita y el espectro se puede limitar empleando un filtro pasa-bajo. Con estas restricciones, sólo será necesario para describir a $y(t)$ un número finito de muestras de la propia señal en el tiempo o de su espectro $Y(f)$. Así pues, si el espectro $Y(f)$ se muestra a intervalos de frecuencias iguales al llamado co-intervalo de Nyquist $1/T$ dentro del intervalo $-F$ hasta F entonces, el número de muestras requeridas será:

$$N = \frac{2F}{1/T} = 2FT \quad \text{Ecuación N}^\circ 1$$

Si se muestra el segmento $y(t)$ al intervalo de Nyquist $1/(2F)$ entonces el número de muestras requerido será:

$$N = \frac{T}{1/(2F)} = 2FT \quad \text{Ecuación N}^\circ 2$$

Esto corrobora la aceptación de las condiciones establecidas anteriormente, ya que muestreando el espectro según el co-intervalo de Nyquist se requiere del mismo número de muestras que se necesita para muestrear la señal en el tiempo con el intervalo de Nyquist.

Cuando se pretende aplicar las técnicas de procesamiento digital de señales, habitualmente se muestra la señal en el tiempo a intervalos iguales, dependiendo de la selección de éstos la veracidad del análisis posterior. De la ecuación N° 2 se puede inferir que el máximo intervalo de tiempo de muestreo es $1/(2F)$ por lo que, si para muestrear se emplea un intervalo menor que $1/(2F)$ entonces se tomará mayor cantidad de muestras con el consiguiente desperdicio de tiempo y memoria de computadora. Pero si por el contrario, se muestrea a un intervalo mayor que $1/(2F)$, entonces se tomarán menos muestras que las necesarias, confundándose las frecuencias en el espectro, efecto éste que se identifica como **Aliasing** (del vocablo

original en inglés) y que constituye el primer y mayor error que se puede cometer al aplicar las técnicas de procesamiento digital señal.

Este efecto conocido como aliasing es inherente al proceso de muestreo y puede estar siempre presente cuando se procesen vibraciones en maquinarias y estructuras, por lo que se impone la necesidad de tomar precauciones para eliminarlo. La única vía efectiva es la eliminación de las frecuencias superiores a la frecuencia de Nyquist, interponiendo un filtro pasa – bajo entre la salida del instrumento analógico y la entrada de la etapa de muestreo.

CAPITULO V: EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL QUE UTILAZAN UN SISTEMA DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO

5.1.- PERDIDA DE LA AUDICION

Es necesario emplear protección auditiva cuando los ruidos en el área de trabajo son irritantes, o cuando usted precisa elevar el nivel de su voz para ser escuchado por alguien ubicado a menos de un metro de distancia. Esto ocurre si el nivel de sonido alcanza los 85 decibeles o más, por un período de 8 horas; o cuando hay ruidos cortos y muy intensos que pueden causar daño auditivo. Si entonces se siente dolor o aturdimiento, es la señal inconfundible de que debe emplear protección auditiva mientras se trabaja.

5.2.- PROTECCION AUDITIVA

Los elementos adecuados son de dos tipos: endoaural y exterior o de copa.

5.2.1.- Protectores Endoaurales

Los llamados tapones descartables, son fabricados con algodón encerado o espuma de poliuretano muy liviana y suave. Proveen muy buena atenuación, y deben ser descartados luego de cada uso. Se insertan en los canales auditivos.

Los tapones reutilizables son fabricados con materiales plásticos o con silicona muy suave. Entre usos sucesivos, deben ser lavados con agua caliente enjabonada. También se insertan en los canales auditivos.

Las manos deben estar limpias antes de insertar los tapones en los oídos; asimismo debe comprobarse el ajuste para optimizar la atenuación, ya que el canal auditivo y el oído externo se expanden durante el día.

5.2.2.- Protectores de Copa

Mal llamados también “auriculares” están diseñados para constituir un sello atenuador al ruido alrededor de las orejas, protegiendo el oído contra la pérdida de sensibilidad. Se mantienen en su lugar mediante un cabezal elástico. Para asegurar su efectividad, al colocar los auriculares el cabello no debe cubrir las orejas, y se deben quitar los pendientes o aretes. Los anteojos pueden también afectar el sello, por lo cual se recomienda ser cuidadoso y chequear el calce de las patillas. También mascar chicles permanentemente puede perjudicar su efectividad. Para incrementar la protección, se recomienda emplear simultáneamente tapones y protectores de copa (particularmente, en ambientes donde el ruido supera los 100 decibeles). Antes de seleccionar una protección auditiva, pruebe varios tipos de tapones endoaurales y/o protectores de copa, para verificar cual le resulta más cómodo; verificando asimismo que el elemento exhiba responsabilidad del fabricante o de un ente fiscalizador.



Figura N° 5.1. Equipos de protección auditiva, (de copa y endoaurales)

5.2.3.- Entrenamiento

Los usuarios de Elementos de Protección Auditiva requieren ser adecuadamente entrenados en su uso. Las Normas de Seguridad de la Empresa deben contemplar el uso obligatorio de todos los Elementos de Protección Personal necesarios de acuerdo con los riesgos de las tareas que se realizan.

A pesar de la eficiencia de los protectores auditivos, el uso de los mismos depende enormemente de lo cómodo que resulte, debido a que existen personas que por defectos físicos o psíquicos no pueden usar tapones, mientras que a otras les es imposible usar orejeras. Es importante notar, que dentro de las maneras de disminuir la cantidad de ruido, se deben disponer de ambas para permitirle al obrero elegir cual le sea más confortable y le sienta mejor, siempre y cuando estas cumplan con los debidos niveles de protección buscados con este dispositivo. En la figura N° 5.2 se muestran los diversos niveles sonoros con sus respectivas fuentes, donde se indican el grado de riesgo para la audición.

5.2.4.- Factores que afectan el funcionamiento de un sistema de control activo de ruido (CAR) en un equipo de protección personal

Hemos visto ya que cualquier sistema activo de la cancelación del ruido implica tres componentes básicos:

- Un micrófono de detección de ruido
- Una cierta electrónica de proceso
- Un altavoz antirruído

NIVEL SONORO (DBA)	FUENTE EMISORA DE RUIDO	RIESGO PARA LA AUDICION
NIVEL SEGURO		
0-20	Imperceptible para el oído humano	BAJO
40-50	Oficial Comercial-Tránsito Liviano	
50-60	Conversación Normal	
60-70	Ruido normal de una ciudad. Tránsito mediano	
70-80	Tránsito Pesado-Restaurante ruidoso	
Umbral de daño		
85-90	Dentro de un colectivo-Dentro de un subterráneo antiguo	MODERADO A ALTO
100-115	Aserradero-Helicóptero-Martillo Neumático-Bocina de Auto-Escapes libres	
Umbral de Sufrimiento		
120-140	Bombas hidráulicas, a 1 m –Escapes de vapor de aire a alta presión- Conjunto de rock (ampliación moderada)Walkman con volumen elevado	MUY ALTO
Mayor de 140	Avión al despegar	

Figura N° 5.2. Niveles de riesgos para la audición

Fuente: Enrique Rueda. Higiene y Seguridad Industrial

Conseguir un funcionamiento excepcional de un diseño de CAR requiere la atención a cada elemento del sistema que se ha descrito anteriormente (anexo 3).

5.2.4.1.- La “Exactitud” del Micrófono Receptor de Ruido

Para comenzar, necesitamos tomar la réplica más exacta de los sonidos dentro de la cúpula si esperamos proporcionar la cancelación eficaz. Cuando hablamos de exactitud, realmente estamos tratando dos aspectos por separados:

- Sensibilidad y fidelidad: se refiere a como el micrófono reproduce el sonido primario.
- Correlación: cómo el sonido que el micrófono toma corresponde de cerca al sonido que nuestro oído percibe.

El primer punto (sensibilidad y fidelidad) es importante, pero es un problema fácil a solucionar porque hay muchos micrófonos de calidad y disponibles en el mercado. Es el segundo punto (correlación) que es la parte más difícil de obtener, como lo es la buena información en el sistema de la cancelación.

Puesto que simplemente, un sistema ideal cancelaría la derecha del ruido en su canal de audición, no apenas en un micrófono colocado en alguna parte en la bóveda. Mientras que no es práctico pegar un micrófono en su canal de oído; un buen diseño del receptor de cabeza puede ir de alguna manera tal que se pueda asegurar de que el micrófono tome el ruido muy cerca de lo que su oído lo oye. Para conseguir esto, es importante saber algunas cosas sobre la abertura del oído y la cavidad acústica con la cual se esta trabajando adentro. Aunque los oídos vienen en muchos de formas y tamaños, resultan estadístico que la abertura del oído “no está centrada simétricamente” dentro de la bóveda, que es delantera y está debajo del centro. La colocación del micrófono debe acomodarse a la fisiología humana para que su funcionamiento sea óptimo. Por lo tanto, se logra el mejor funcionamiento cuando las tazas del oído se diseñan para quepan los oídos específicos de cada persona (a la izquierda y a la derecha).

Como se notará en la figura N° 5.3 las cúpulas están inclinadas y diseñadas para mejorar el ajuste en el oído. La atención a estos detalles ergonómicos y acústicos mejora substancialmente la comodidad y el funcionamiento.

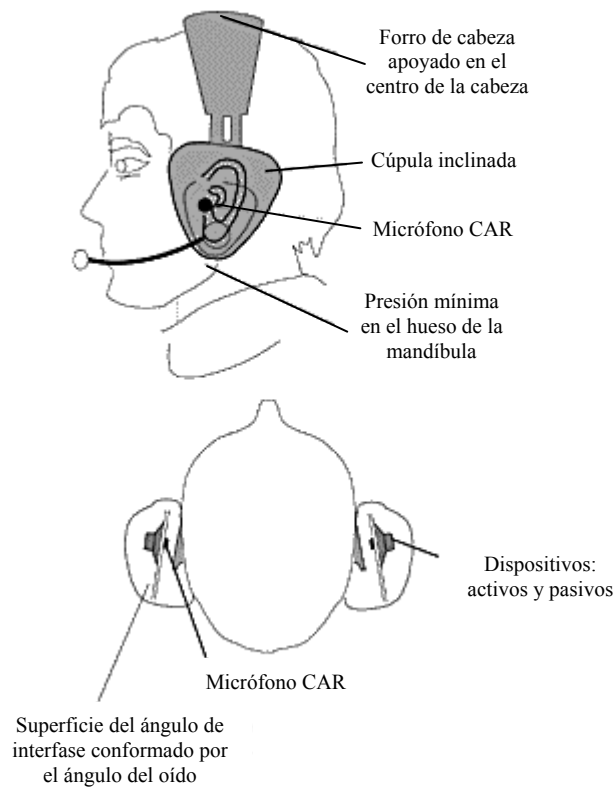


Figura N° 5.3. Vista superior y lateral de un protector de copa (tapa oídos) control activo de ruido

5.1.2.2.- La Sofisticación de los Procesos Electrónicos

La señal del micrófono se envía mediante la electrónica y se amplifica o “se procesa.” Habrá diferencias sustanciales en la cancelación entregada dependiendo del diseño de la cavidad acústica. El funcionamiento real se puede medir y trazar para la comparación.

Se miden en el micrófono y no en la abertura del oído. Obviamente, deseamos la cancelación más alta en el oído. Sin considerar demasiado el aspecto técnico, entonces la posición del micrófono es un factor determinante para darnos una idea de cuánta cancelación obtendremos en nuestros oídos.

La sofisticación de la electrónica, de los amplificadores, y de los filtros de audio tiene mucho que ver con el funcionamiento total del receptor de cabeza (anexos 3 y 4). Las diferencias se pueden considerar evaluando la eficacia en la cancelación. La manera que se procesa el audio afectará la audición real percibida.

5.1.2.3.- La Eficacia del Altavoz

Después de muestrear el perfil del sonido interno dentro de la cúpula esperando que el mismo se encuentre bien armonizado con la abertura del oído, y procesando esta señal para la fidelidad apropiada, el sistema necesitará producir una cancelación del sonido con la mayor eficacia.

El altavoz “eficaz”, sería medido según si el perfil de la onda producido iguala a la señal de la entrada al micrófono, desfasada en 180 grados. Las ondas de gran longitud y de baja frecuencia son las más críticas a cancelar.

Más eficacia se traduciría en una cancelación de la baja frecuencia, donde los niveles de decibelio son más altos que en la mayoría de los planos entre 80-120 hertzios. Se desea un receptor de cabeza que proporcione el funcionamiento máximo en esa parte del espectro del ruido

Un altavoz eficaz es medido por la energía requerida para mover el diafragma hacia adelante y pueda reproducir así el sonido deseado; mientras mayor sea la energía requerida para generar las ondas, más baja será su eficacia. Porque la mayoría de los receptores de cabeza de CAR en el mercado son modelos portátiles accionados por baterías, la eficacia del altavoz es una consideración importante. Una eficacia más alta significa un consumo de energía más bajo, una vida más larga de la batería y cajas más pequeñas de la batería.

La molestia de los módulos externos para la batería, hace que mucha gente considere el tamaño como un factor importante en los receptores de cabeza de CAR.

Algunos receptores de cabeza actuales vienen con baterías grandes que cuelgan de los cables de manera separada, mientras que otros tienen módulos pequeños que se unen en una línea al cable de las comunicaciones. Para alcanzar elevadas horas de operación, algunos sistemas requieren tanto como diez baterías AA, mientras que otros requieren apenas dos. Eso es una diferencia grande y digna de considerar antes de que usted finalmente compre un receptor de cabeza.

5.2.5- Perfil de Cancelación

Todos los receptores de cabeza activos tienen un perfil del sonido que pueden cancelar. El perfil se puede representar gráficamente para señalar la cantidad de cancelación y en que parte del espectro de frecuencia del ruido ocurre la cancelación.

El proceso de medida es relativamente simple pero requiere de equipos de laboratorios y técnicas bastante sofisticadas. La prueba se hace dentro de un compartimiento acústico cerrado, controlado. El receptor de cabeza se monta en un accesorio que tenga un micrófono situado dentro de un “oído artificial” cuyo propósito sea detectar o que “oiga” lo que oiríamos nosotros. El receptor de cabeza entonces se barre con un tono a partir de 10 hertzios a 10.000 hertzios, con la grabación del “oído” que fue captada. El barrido se hace dos veces, una vez con el trazado del circuito de CAR apagado y luego encendido. La diferencia entre los primeros y segundos barridos indican que fue cancelada gradualmente cuando el sistema activo estuvo encendido. Los resultados se grafican como se muestra en la figura N° 5.4, con frecuencias en Hertz (hertzio) en el eje horizontal y cancelación en los decibelios negativos (DB) en el eje vertical:

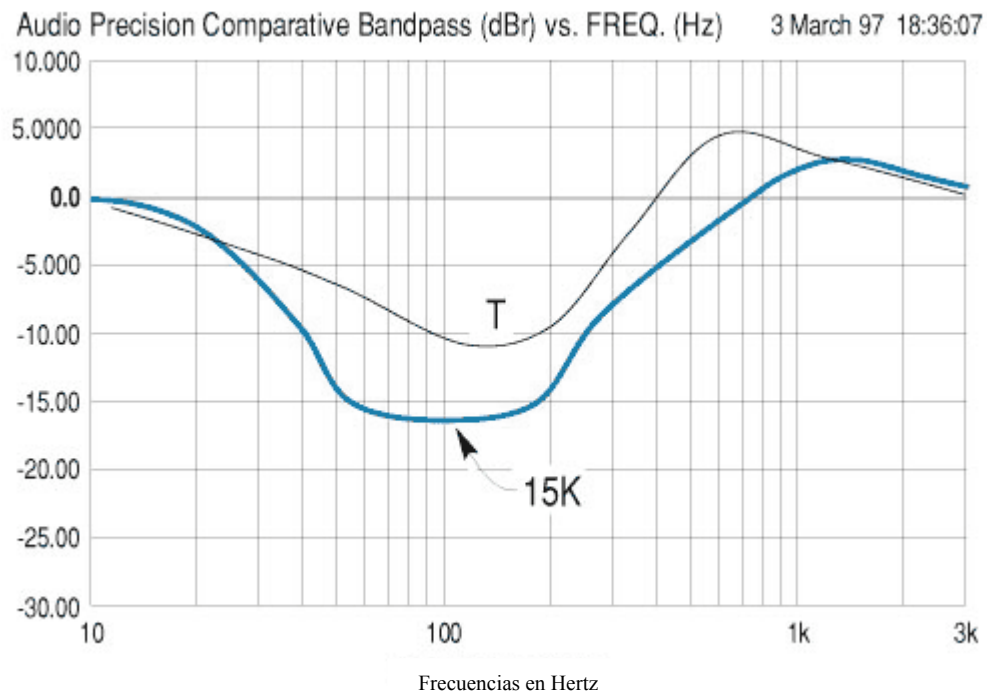


Figura N° 5.4. Prueba de audición de un oído artificial (un micrófono), para evaluar un receptor de cabeza (tapa oído)

Fuente: Headsets. Módulos activos de reducción de ruido para la aviación y la industria.

Las cualidades de esta curva de cancelación que estarán presentes en cada receptor de cabeza activo se muestran en la figura N° 5.5. Incluyen:

- **Profundidad:** cuán profunda es la cancelación en su señal más alta.
- **Anchura:** cómo es la banda de frecuencia del espectro a cancelar.
- **Posición:** en cuáles frecuencias se centra el perfil de la cancelación.

- **El alzar:** los lugares en el espectro a cancelar en donde el sistema CAR hace realmente más daño que bienestar (es decir, el ruido se amplifican en vez ser cancelados).

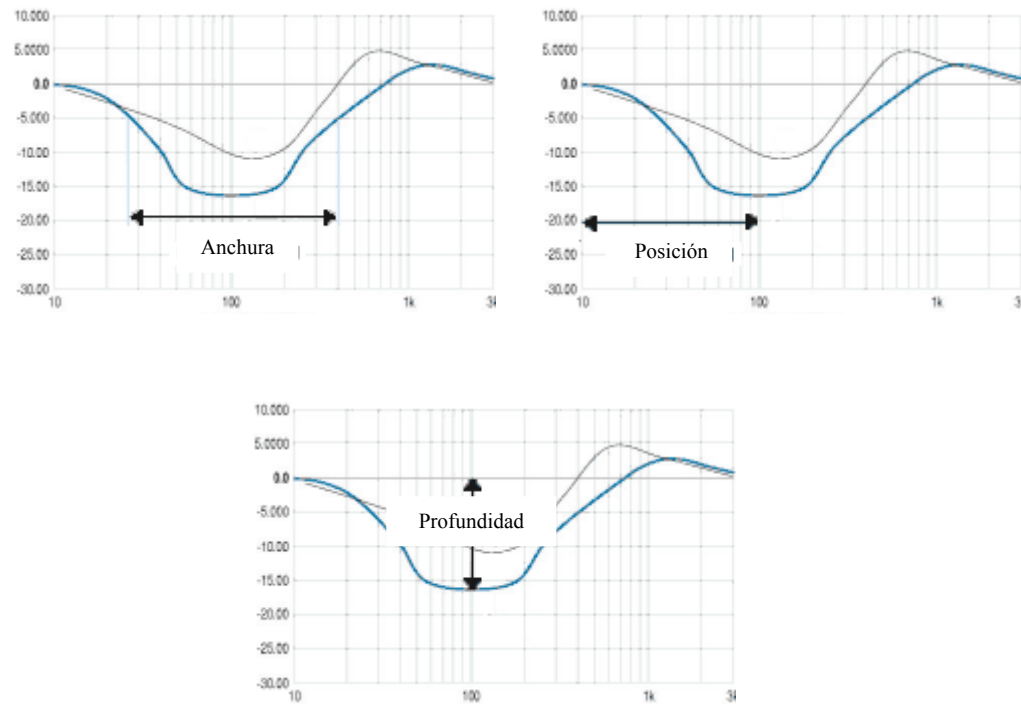


Figura N° 5.5. Cualidades de una curva de cancelación presente en receptor de cabeza activo

Fuente: Headsets. Módulos activos de reducción de ruido para la aviación y la industria.

5.2.5.1.- Profundidad

La profundidad de la curva nos indica la cantidad máxima de cancelación que se esperarí generalmente. Este es normalmente el número de cancelación activa que un fabricante pronosticará. Una gama comprendida entre dos y cuatro dB, se dan típicamente debido a variaciones en la sensibilidad del micrófono, calibración, e incluso la ergonomía tendría cierto efecto en la cancelación final. Algunos fabricantes publican las gráficas de la reducción del nivel de ruido que no fueron medidas en el

“oído”, pero en un sistema CAR de receptor de cabeza, el que detecta la perturbación es el micrófono en lugar del oído.

5.2.5.2.- Anchura

En este aspecto se puede observar la banda de frecuencia total que es cancelada por la electrónica. Dada la desviación de la medida y la sensibilidad de nuestros oídos a los cambios pequeños en dB, para valores mayores de 5 dB, la cancelación comenzaría a ser significativa. Cuando se combina la “anchura” con la “profundidad,” constituirán la cancelación “total” que la electrónica puede entregar.

5.2.5.3.- Posición

Usted notará en el gráfico que un receptor de cabeza cancela a una frecuencia más baja que para cualquier otro plano de frecuencia.

5.2.5.4.- El Alzar

Este es evidentemente el pasado característico de todos los perfiles de cancelación de CAR. El alzar se desarrollo realmente, debido al ruido desfasado creado por la electrónica de CAR. Esto simplemente representa el hecho de llegar más allá de la señal “antirruido” electrónica introducida en el campo acústico. Está presente en cierto grado, de forma virtual en todos los receptores de cabeza activos. La física, las ondas acústicas y la cavidad acústica hacen que la cancelación sea significativamente mucho más difícil si las frecuencias aumentan. Esto es debido a las longitudes de onda más cortas del sonido en frecuencias más altas, en lo referente a la física, sería la determinación de la distancia entre el micrófono y el altavoz antirruido. El gráfico N° 5.6, muestra este fenómeno en varios receptores de cabeza, que tienen cancelación que declina en las frecuencias superiores a 300 hertzios. Cuanto más profunda es la cancelación de 100 hertzios, más escarpado será el perfil, luego cae típicamente apagado entre 300 y 600 hertzios.

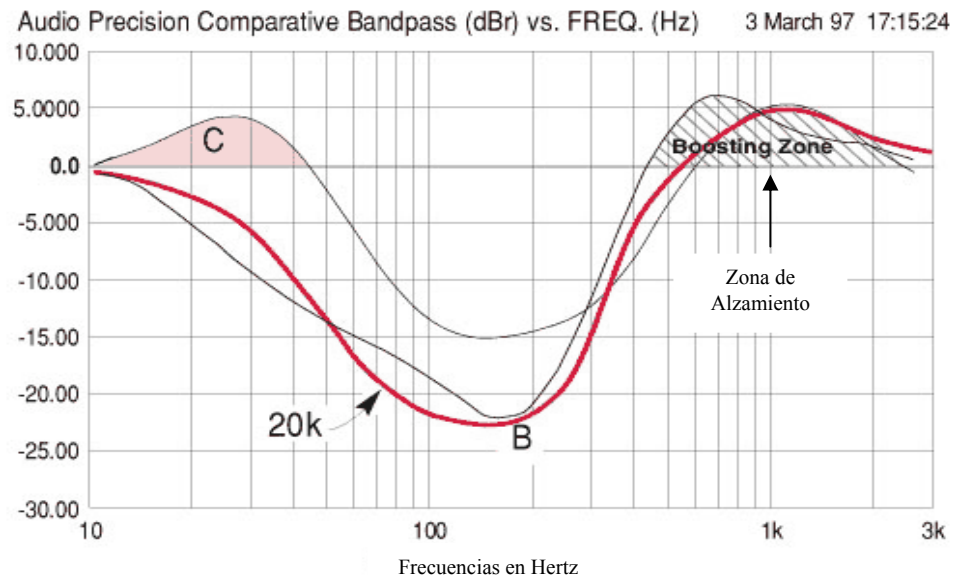


Figura N° 5.6. Fenómeno de alzar para varios recetores de cabeza

Fuente: Headsets. Módulos activos de reducción de ruido para la aviación y la industria.

Desafortunadamente, la mayor cancelación total significa generalmente niveles más altos de alzar. Esto explica porqué los mejores receptores de cabeza que cancelan tienen a menudo los efectos que alzan más alto. Todas las cosas consideradas, la cancelación adicional es generalmente digna de ella por lo menos en dos razones:

1. Los niveles alzados en dB son típicamente bajos (dB 3-6), mientras que la cancelación adicional en las frecuencias bajas es mucho más grande. La cantidad real del ruido alzado (área sombreada debajo de la curva) mostrado en la figura N° 5.6, es absolutamente pequeña comparada al ruido total cancelado.
2. El alzar ocurre generalmente en frecuencias más altas, alrededor 1 kilociclo donde los receptores de cabeza tienen típicamente atenuación pasiva

significativa. El efecto neto sigue siendo la reducción del nivel de ruido propio en esas frecuencias más altas.

5.2.6.- Perfiles de Ruido

Vamos a ejemplificar repasando unos ciertos datos detallados reales del ruido para dos aeroplanos de un solo motor, mostrado en la figura N° 5.7. Analizando los espectros de docenas de aviones, sabemos que estos perfiles son típicos de la mayoría de las marcas y de los modelos de los aeroplanos de un solo motor. Los ruidos generados por el propulsor y sus frecuencias (armónicas) resonantes hacen para arriba la parte más fiable del espectro del ruido.

Mientras que estos dos aeroplanos parecen diferentes en muchas formas, hay dos características generales que son evidentes:

1. Hay muchos de ruido en las frecuencias bajas, entre 70 y 300 hertzios.
2. Los niveles de ruidos declinan en las frecuencias más altas, particularmente más allá de 500 hertzios

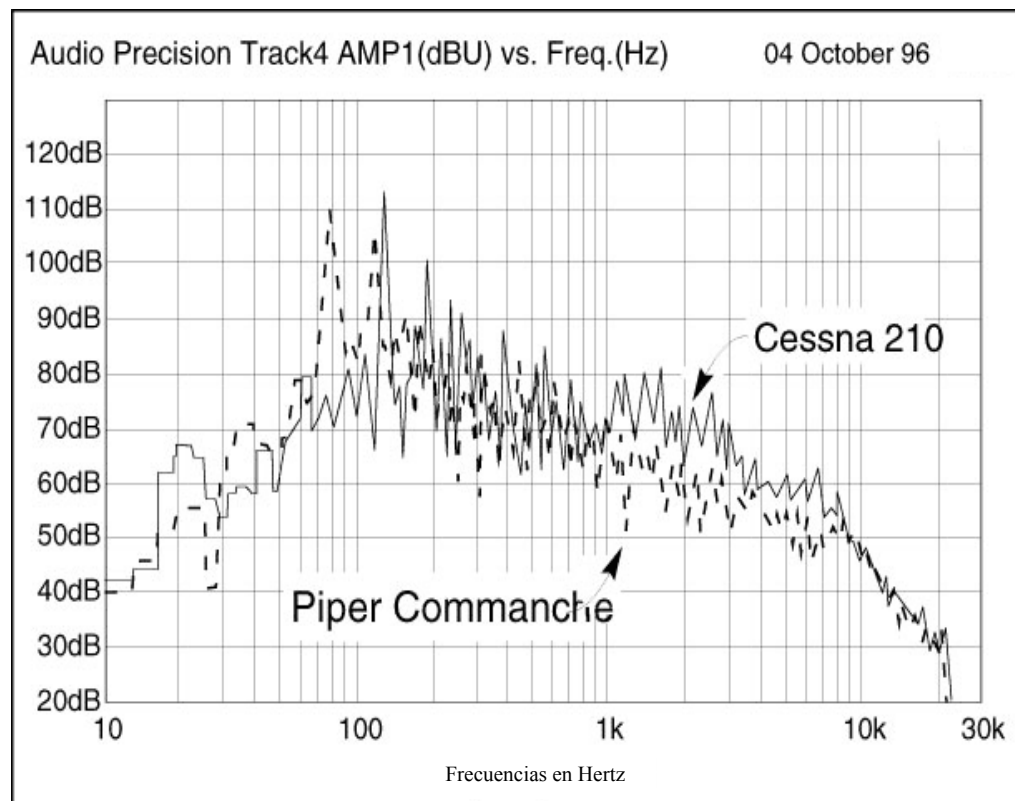


Figura N° 5.7. Datos específicos de ruido, para dos aeroplanos de un solo motor

Fuente: Headsets. Módulos activos de reducción de ruido para la aviación y la industria.

Ambas características crean un ambiente perfecto para usar la cancelación activa, y así la reducción sea la más óptima, Recordando que la cancelación activa trabaja bien solamente en las frecuencias más bajas, no proporciona una reducción sensible en dB en frecuencias que estén sobre los 500 hertzios.

Hay que considerar también que algunos los sistemas activos requieren de la atenuación pasiva para apoyar las diversas modificaciones de frecuencia, ya que no son absolutamente eficaces en zonas de ruido con frecuencias muy altas.

5.2.7.- La Pérdida de la Audición

Los datos referentes a la pérdida de la audición son realmente los más simples de entender y se han estudiado muy bien. En las figuras N° 5.8 y N° 5.9, se muestran los decibeles y las frecuencias donde ocurre el mayor porcentaje de pérdida de auditiva.

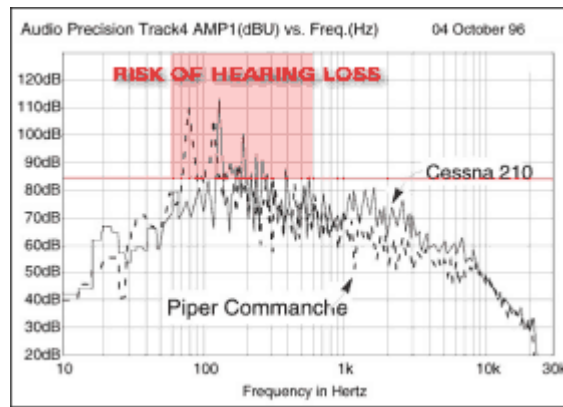


Figura N° 5.8. Zona de riesgo de pérdida auditiva

Fuente: Headsets. Módulos activos de reducción de ruido para la aviación y la industria.

Las figuras mostradas anteriormente eran de una exposición asumida y calculada al nivel dado del ruido por ocho horas al día y cinco días a la semana. Por consiguiente, mientras más ruido por épocas más largas significa el mayor riesgo de la pérdida auditiva. Pero la parte más interesante de estos datos, es que no hay pérdida proyectada de la exposición a 80 dB por ocho horas al día, y los 85 dB resulta uniforme la pérdida de oído. El daño verdadero comienza a convertirse con la exposición prolongada a los niveles por encima de los 90 dB.

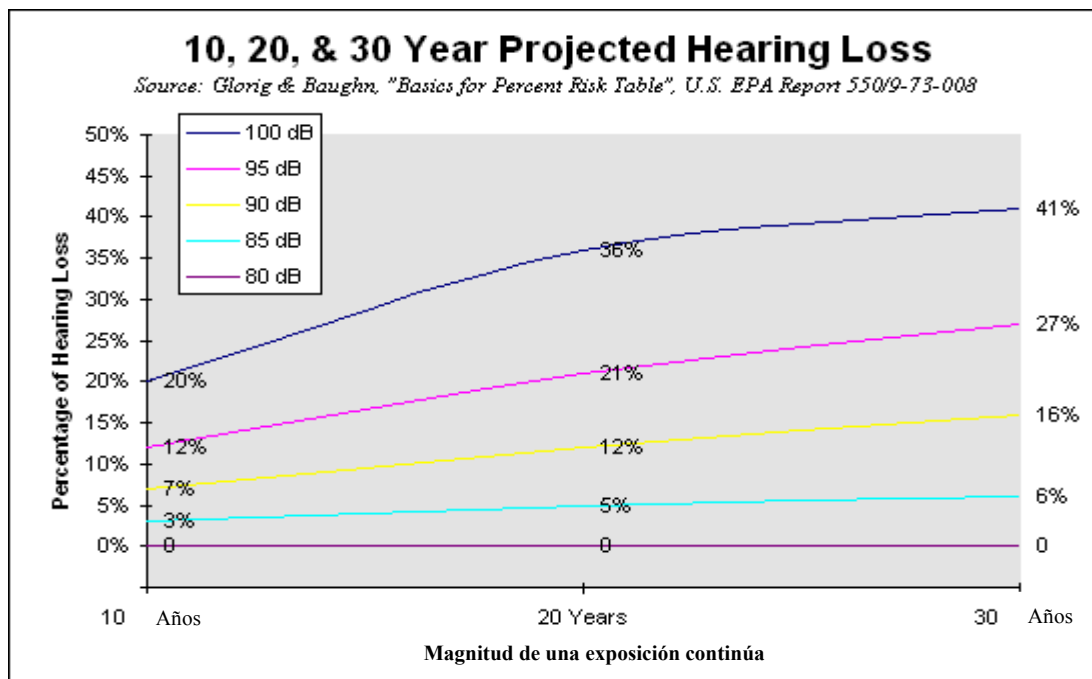


Figura N° 5.9. 10,20 y 30 años proyectados en función a la pérdida de audición

Fuente: Headsets. Módulos activos de reducción de ruido para la aviación y la industria.

5.2.8.- Optimización del Receptor de Cabeza Físico para el Uso Experimental desde el Punto de Vista Ergonómico

Las personas interesadas en estos equipos, han estado buscando diversas maneras de mejorar los aspectos físicos que se encuentran en el campo de trabajo, pero no es fácil diseñar un receptor de cabeza cómodo.

Mientras que la cancelación activa ayuda ciertamente a que estas personas se sientan lo más relajado posible durante sus horas en el campo laboral, de muchas maneras éstos reconfortan y aplican a todos los receptores de cabeza, no sólo a los receptores activos. Pero los factores humanos referentes a conveniencia del usuario son ciertamente más complicados para los receptores de cabeza de CAR. Además, la

electrónica para la cancelación requiere energía, y la mayoría son apoyadas por baterías. El tamaño y el peso de tales baterías pueden ser un factor importante en estos equipos, al igual que las otras características disponibles en las más nuevas ofertas.

La protección del oído y la comunicación sin manos eran las razones del principio de usar un receptor de cabeza. El diseño original y popular de los receptores de cabeza, fue desarrollado para una atenuación pasiva óptima. El mayor interés de estos receptores de cabeza se apoyaba en las necesidades militares, y así también para ambientes de mucho ruido, a veces más hostiles que los campos de batalla como por ejemplo en la aviación en general.

Para cubrir ciertas necesidades, algunos cambios fueron introducidos para reducir el peso y para mejorar su comodidad. Pero desafortunadamente, estos cambios evolutivos han hecho poco para agregar comodidad a este diseño “clásico” del receptor de cabeza.

Resulta allí, la variación substancial en los tamaños y las formas de las cabezas humanas. La carta abajo mostrada en la figura N° 5.10, son datos recopilados de los estándares ergonómicos militares para los tamaños de cabeza principales. Compara las diferencias dimensionales para los hombres y las mujeres; básicamente casi cubren entre el 5 y 95 del porcentaje de las personas.

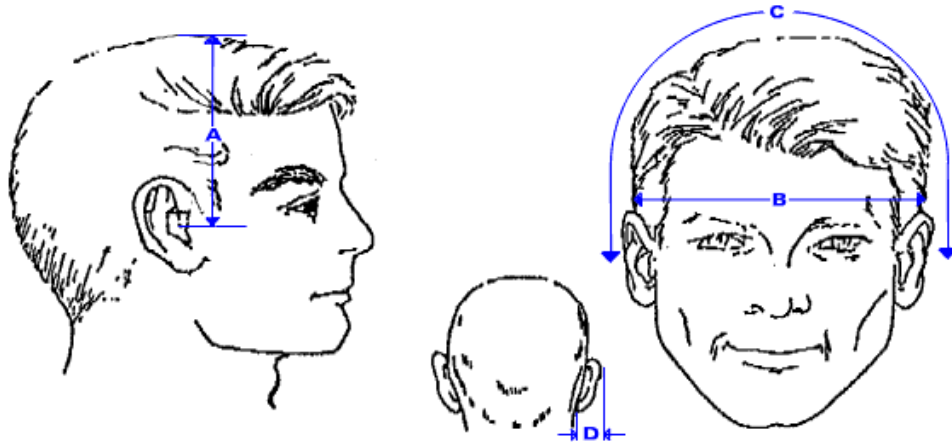


Figura N° 5.10a Dimensiones para la anchura, la altura, y la posición principales del oído

Medida		porcentaje ^{del th} 5 (mujer)	porcentaje ^{del th} 95 (hombre)	Gama
A	Altura Del Oído	11,6 centímetros	14,4 centímetros	> lado 1”(cualquiera)
B	Anchura Principal (Anchura)	13,5 centímetros	16,5 centímetros	>1.2”
C	Circunferencia De arriba	31,3 centímetros	37,8 centímetros	>2.5”
D	Saliente Del Oído	1,3 centímetros	2,8 centímetros	> ½”

Figura N° 5.10b Tabla de dimensiones para la anchura, la altura, y la posición principales del oído

Fuente: Criterios del diseño de la ingeniería humana para los sistemas militares, Milipulgada-Mil-Std 1472C

Como se puede ver, el desafío para conseguir ajustabilidad o un ajuste cómodo es difícil. El diseño clásico confió en compensar la presión lateral para las variaciones en la anchura de la cabeza. La banda de arriba de metal tenía algún ajuste para la circunferencia pero no proporcionó ninguna comodidad para la saliente del oído.

5.2.8.1.- Ajustabilidad

Observando la variabilidad en aspectos como la anchura principal (sobre 1 pulgada) o la posición de los oídos respecto a una cabeza “media”. La circunferencia de arriba significa que la banda necesita tener un ajuste en la “longitud” para ampliar las 2,5 pulgadas necesarias.

5.2.8.2.- Comodidad

Para la mayoría de nosotros, el “problema de la comodidad” no tiene que ver si nuestro receptor de cabeza nos ajusta bien o no, cuando a la hora de ponérselos este encendido, pero es algo que comienza a lastimar después de un corto rato.

Esto se debe a que hay muy poca “grasa subcutánea” (carne, acolchado, etc.) debajo de la piel que cubre nuestro cráneo. La cabeza es también extremadamente vascular (hay ciertas cantidades de sangre que fluyen alrededor y debajo de esta capa delgada). El área alrededor de los oídos es particularmente densa en vasos sanguíneos. Las superficies principales consiguen algunas veces ser fatigadas por la presión constante, desarrollan típicamente puntos de dolor por usar un receptor de cabeza. Estos “puntos calientes” son realmente lugares donde ha habido fuentes de flujo de sanguíneo comprimida (por la presión) y convertido en dolor. Todo esto hace que esta región sea extremadamente sensible para ejercer presión sobre ella.

5.2.8.3.- Sellos de los Oídos

El diseño del sello del oído es probablemente el aspecto más importante de la comodidad total del individuo. El tamaño, la forma, y la manera en la que sean escogidos los materiales, afectan la comodidad del receptor de cabeza, así como su atenuación del ruido de maneras pasivas y activas. Idealmente, el oído estaría flotando libremente en la cavidad, sin tocar ningún elemento del sistema del sello o

del altavoz. Eso tiene una influencia directa con el tamaño, la forma, y la construcción del sello óptimo del oído.

Quisiéramos obviamente que el sello del oído creara un espacio dentro de la cavidad que sea cómodo y reservado. Resulta allí la importancia de la atenuación pasiva para estos equipos. En la siguiente figura N° 5.11, se muestran diversos materiales usados en sellos del oído, para así conocer más sobre las fuerzas y debilidades de cada uno.

Características Del Material Del Sello Del Oído					
Sello Del Oído Material	Atenuación Características¹	Capacidad de conformarse²	La Presión Lateral Necesitó³	Peso del Sello del Oído⁴	Volumen Relativo⁵
Gel Del Silicón	Lo mejor posible	El peor	Alto	1,2 onzas	100%
Líquido	Muy Bueno	Lo mejor posible	Medio	6 onzas	25%
Espuma/Líquida (Gelflo)	Bueno	Bueno	Medio	6 onzas	70%
Espuma sensible a la temperatura	Bueno	Muy Bueno	Bajo	5 onzas	150-200%

Figura N° 5.11. Características de los materiales usados para la fabricación de sellos para los oídos

Fuente: Headsets. Módulos activos de reducción de ruido para la aviación y la industria.

5.2.8.4.- Características Direccionales

Se denominan así a las diferentes sensibilidades del oído para distintas direcciones de incidencia del sonido. Esto se muestra en la figura N° 5.12.

- Para frecuencias menores que 300 Hz no hay dependencia de la intensidad con la dirección.
- Cuando el sonido llega al oyente ligeramente ladeado, existe una pequeña diferencia temporal en la llegada del sonido a ambos oídos. Esta pequeña diferencia es analizada por el sistema nervioso para definir la dirección de incidencia de sonido. Son suficientes 0.03 mts para percibir cambio en la dirección. De esta forma se pueden discriminar 3 grados en la dirección de llegada del sonido.
- Para sonidos laterales, no llega a los dos oídos la misma presión sonora (cambios de intensidad y timbre). La utilización combinada de los cambios producidos por tiempo de llegada, intensidad sonora y timbre permite resolver la dirección de incidencia del sonido.

Dirección de Incidencia	Resolución Angular
0 – 45 grados	3 grados
45 – 90 grados	4.5 grados
90 – 180 grados	7 grados (aproximadamente)

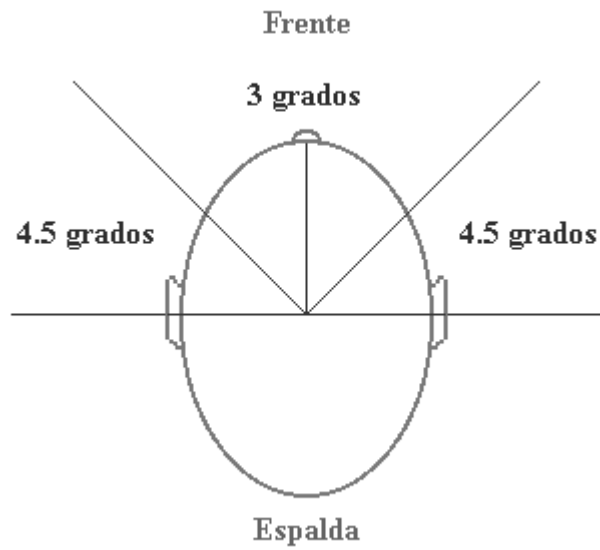


Figura N° 5.12. Características direccionales en el ser humano

CAPITULO VI:
SIMULACION BASICA REALIZADA EN MATLAB, DONDE SE
EJEMPLIFICA DE MANERA GENERAL COMO TRABAJA UN
SISTEMA DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO

El matlab es un programa de cálculo matemático muy flexible y potente, y con posibilidades gráficas para la representación de datos, por lo que se utiliza en muchos campos de la ciencia y la investigación como herramienta de cálculo matemático. También existe un complemento de matlab llamado “simulink” que nos permite un enfoque más grafico de los sistemas de control.

6.1.- SIMULINK

Simulink es una herramienta para la simulación de sistemas dinámicos, que resuelve ecuaciones diferenciales ordinarias usando métodos numéricos (Euler, Runge Kuta, etc.). Los sistemas dinámicos (modulados por ecuaciones diferenciales) se deben introducir a este programa por medio de su descripción en diagramas de bloques. La descripción por diagrama en bloques usa líneas para representar variables y bloques para representar funciones. Las líneas son usadas para interconectar los bloques entre sí.

6.2.- SIMULACION EN MATLAB DE UN SISTEMA DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO

Con esta simulación se pretende ejemplificar de manera sencilla, como actuaría un sistema de control activo de ruido en la resolución de un problema real de atenuación.

Para esta simulación, se requirió inicialmente elegir el equipo o la máquina que generaría el ruido (la perturbación primaria). Por supuesto que el ruido generado por la máquina debía tener características de periodicidad, para así poder facilitar el

objetivo de la simulación. Para lograr esto se trabajó con el ruido generado por un motor de un avión comercial, con el fin de simplificar la ejemplificación de un sistema de control activo de ruido. Este sonido se tomó de un archivo descargado de Internet, ya que para realizar una medición directa del ruido del motor no estaba planteado en los objetivos establecidos en este trabajo.

La simulación consistió en varias etapas:

1. Llevar el archivo de sonido bajado de Internet al programa de matlab, para que este pudiera ser reproducido durante la simulación.
2. Se trabajo con el programa de matlab para realizar la simulación, trabajando con el simulink (herramienta que trae el programa de matlab para simular sistemas dinámicos). Sobre la hoja de trabajo del simulink, se colocaron los bloques de programa que trae la librería del simulink, de manera tal de poder generar un efecto ficticio de cancelación y así poder observar los parámetros allí presentes, tales como decibeles, amplitud, tiempo y frecuencia. Para la realización de este esquema en la hoja de trabajo del simulink, se procedió de la manera siguiente:
 - Inicialmente se copió un bloque de archivo de ondas (From Wave File), a este se le asignó la misma variable del archivo de sonido bajado por Internet y el mismo automáticamente ponía a disposición el archivo colocando en el bloque la frecuencia de muestreo con la cual se había grabado ese sonido, el número de canales y los bits que representaba.
 - Seguidamente se colocó un “unbuffer” que simplemente transforma un arreglo vectorial o matricial a escalares. Esto se debió a que la data del archivo de audio era un arreglo

vectorial o matricial, y como el bloque siguiente trabajaba con escalares se tuvo que colocar el unbuffer.

- Luego la señal transformada en el unbuffer como se explicó anteriormente, entra a un bloque que representaba un filtro digital pasa-bajo, se hicieron las modificaciones pertinentes en el bloque para ajustar el filtro lo mejor posible para que dejara pasar las componentes de frecuencia más bajas limitadas por una frecuencia de corte de 1000 Hz, lo que limitaba al intervalo de 0 – 1000 Hz. Esto se debió a que los más altos niveles de ruidos (dB) están presentes en este intervalo de frecuencia, y como ya se explicó en capítulos anteriores el método es más efectivo para valores de frecuencia bajos.
- Inmediatamente del filtro se colocó un inversor, un bloque de ganancia, que desplaza la gráfica hacia arriba o hacia abajo dependiendo del valor de ganancia que se le coloque. Para nuestro caso lo que se hizo fue darle un valor de -1, que se traduciría como un desfase de 180° de la gráfica original, que es lo que se pretende con este método.
- Después con la señal que se había filtrado y luego invertido fue llevada a un bloque de suma, que constaba de dos entradas y una salida, en una de las entradas se colocó la señal anteriormente mencionada (antirruído) y en la otra entrada se colocó la señal inicial (perturbación primaria), para que esta manera se sumaran y así lograr atenuar en cierta medida la perturbación primaria generando a la salida un “ruido residual”.

- Por último, se usó un bloque llamado “scope” donde se reflejaba las señales superpuestas antes y después de invertir. Esto con el fin de ilustrar un poco las etapas intermedias de esta simulación, como lo era desfasaje de la onda filtrada. También se colocó un bloque “B-FFT” (Spectrum Scope) entre la salida y la entrada de nuestro circuito, de manera de superponer la señal de la perturbación primaria y la señal del ruido residual, con el fin de visualizar aproximadamente cuantos decibels se había logrado bajar con respecto a la perturbación primaria. Este bloque trabaja con la transformada rápida de Fourier (FFT), y la B se debe a que la entrada a este bloque es “buffered” esto se refiere al tipo de arreglo con el que trabaja, matricial, vectorial, etc. También en el esquema, justo después de sumarse las dos señales se colocó un bloque para guardar la data del ruido residual que resultó de la suma de las dos ondas.
3. En otras dos hojas de trabajo del simulink, se reprodujeron los sonidos guardados en bloques del simulink usados para almacenar sonido. Estos esquemas usados para la reproducción de los sonidos tanto el de la perturbación primaria como la del ruido residual se hicieron de la siguiente forma:
- Primero se copió un bloque de archivo de onda (From Wave File) y se les llamo con el nombre de la misma variable que contenía la data del ruido, a la perturbación primaria se le llamo “ruidoavion” y al archivo que guardo la data del ruido residual se le llamo “ruidoresidual”, como ya se explicó en el primer punto del esquema anterior. Luego se unió con un bloque que representaba un altavoz (To Wave Device), para poder reproducir el sonido guardado en el bloque “From Wave File”. La entrada al bloque

del altavoz (To Wave Device), puede contener una data de audio de una señal en estéreo o mono. Una señal mono está representada como una muestra basada en un escalar o un arreglo basado en un vector de longitud M , mientras una señal estéreo representa una muestra basada en un vector de dos dimensionas o un arreglo de forma matricial de una matriz $M \times 2$.

El esquema general de la simulación se observa en la figura N° 6.1, aquí se muestran todos los bloques antes mencionados para simular de manera sencilla cómo actuaría un sistema de control activo de ruido ante un problema determinado. Esto se realizó básicamente de manera de ilustrar un poco toda la teoría antes explicada en los capítulos anteriores. También podemos observar en la figura N° 6.2, dos esquemas usados para reproducir los sonidos antes y después de aplicar el método de control activo.

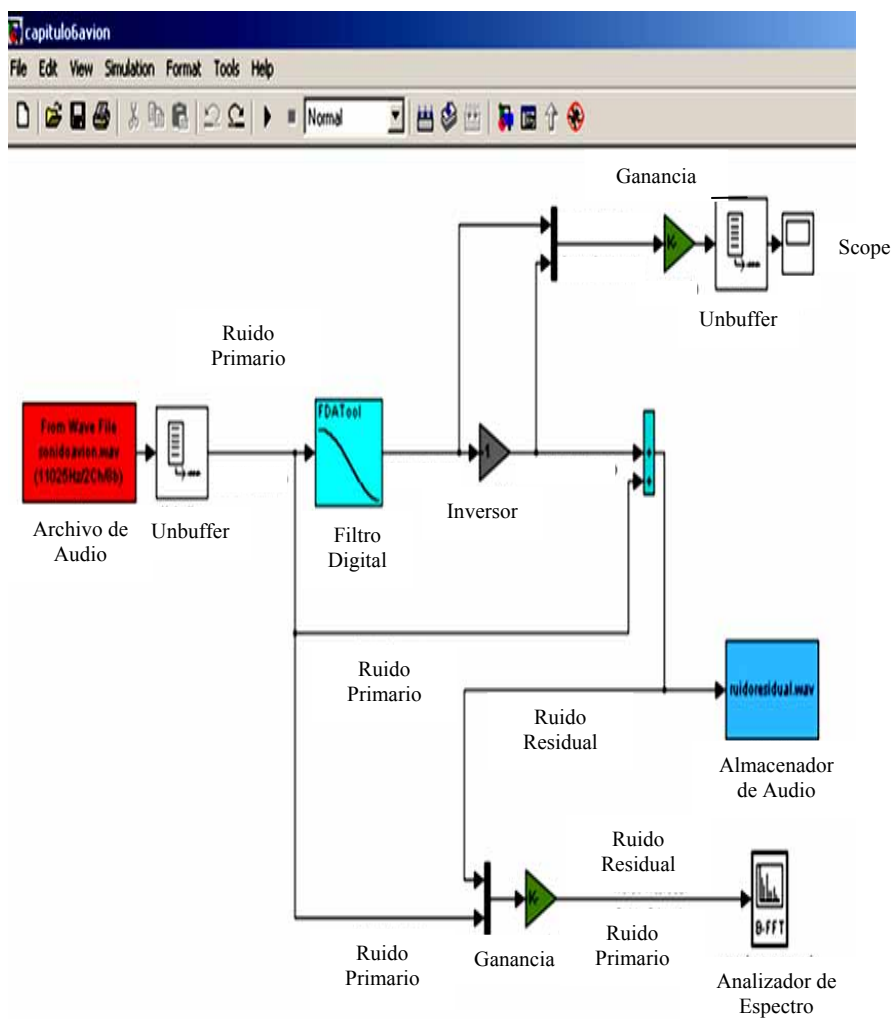


Figura N° 6.1. Esquema general de la simulación realizada en matlab de un sistema de control activo de ruido

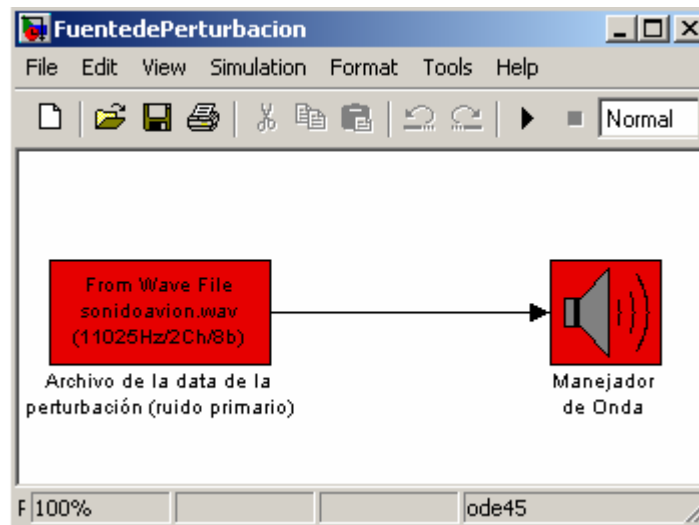


Figura N° 6.2a. Esquema de la reproducción del archivo de audio de la perturbación primaria, a través de un bloque manejador de ondas

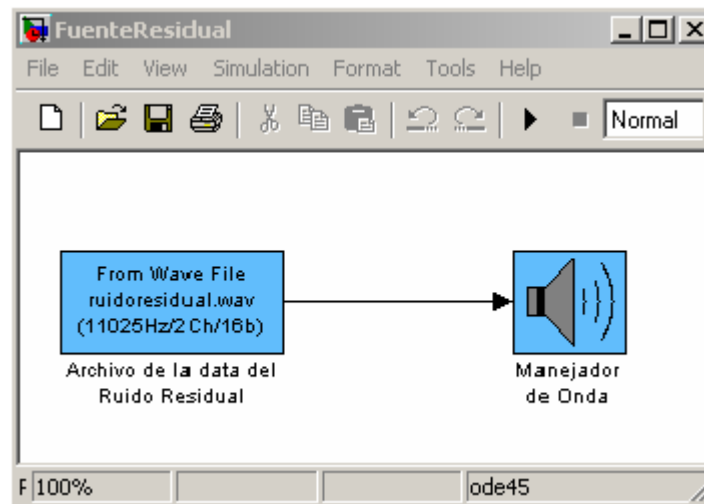


Figura N° 6.2b. Esquema de la reproducción del archivo de audio del ruido residual, a través de un bloque manejador de ondas

4. La simulación contó con dos bloques encargados de mostrar las diferentes respuestas gráficas como resultado de la aplicación de un control activo. Se trabajó con un bloque analizador de espectro FFT (Transformada Rápida de

Fourier), que es uno de los más usados para este tipo de aplicación. Aquí se puede ver por tramas o por instantes muy pequeños las variaciones del ruido en función de decibeles y frecuencia, como se muestra en la figura N° 6.3. También trabajamos con un bloque (Scope) que nos mostró la onda de la perturbación después de pasar por el filtro pasa-bajo antes y después del desfasaje, en función de la amplitud y el tiempo. Esta gráfica se muestra en la figura N° 6.4.

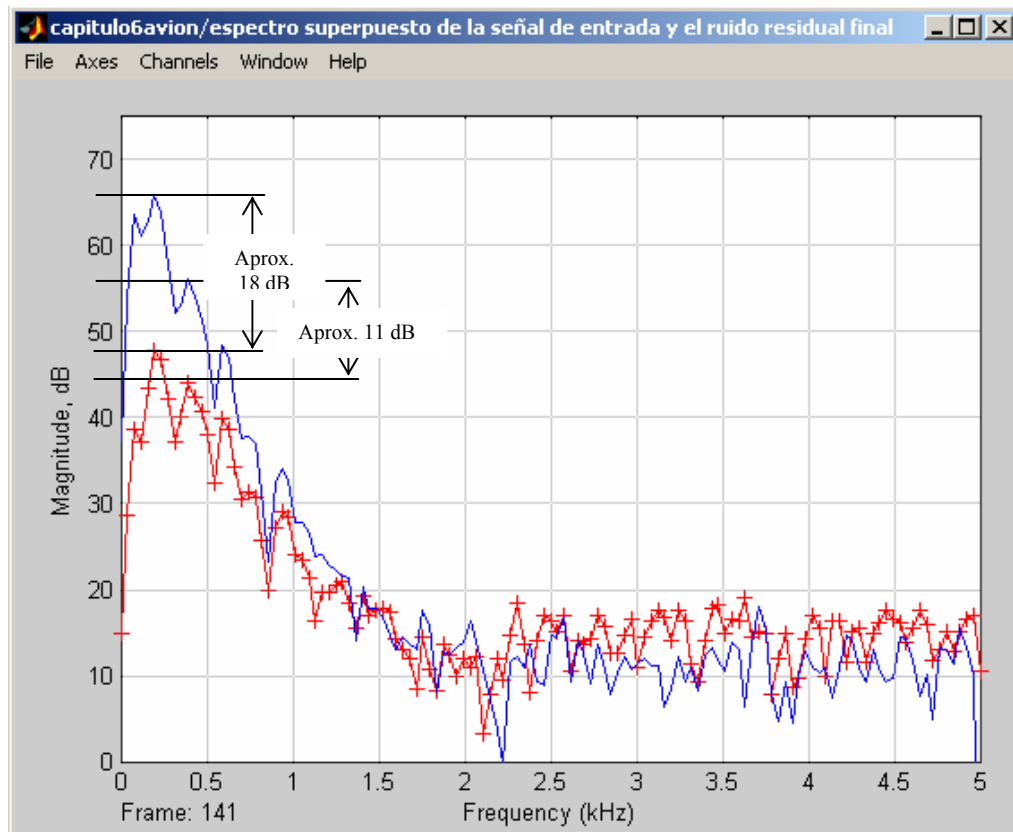


Figura N° 6.3. Gráfica de la superposición del espectro del ruido primario (en color azul) y el espectro del ruido residual (en color rojo)

Nota.- En la figura N° 6.3, se colocaron valores aproximados de decibeles que se lograron reducir por la aplicación del control activo de ruido. Hay que resaltar que estos valores no representan valores reales de atenuación si se le aplicara control activo de ruido real, siguiendo la metodología explicada posteriormente. Esta figura

es una manera de ejemplificar como funcionaría el método si se aplicase realmente a un motor u otra maquinaria presente en una industria.

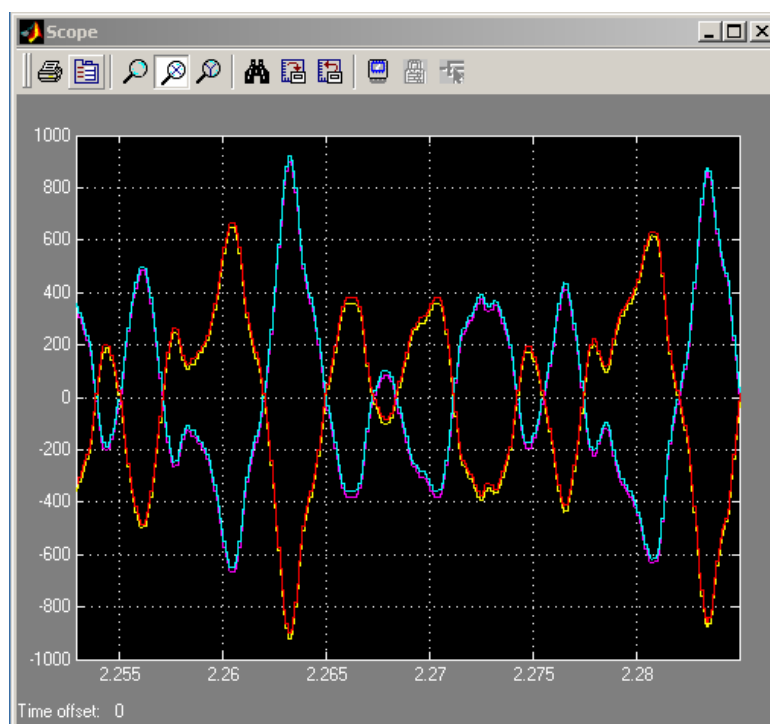


Figura N° 6.5. Gráfica generada por un bloque de “Scope” donde se representa la superposición de la señal filtrada (en azul) y la misma señal desfasada 180 grados (en rojo)

CAPITULO VII:

METODOLOGIA ESTRUCTURADA PARA IMPLEMENTAR UN SISTEMA DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO

7.1.- CONTROL DE RUIDO EN ESPACIO LIBRE

La primera categoría de control de ruido de interés, es la radiación acústica en el libre espacio. La radiación acústica es simplemente la generación de ondas de sonido por una fuente. La radiación acústica es un término de uso común entre los ingenieros de sonido. El término "espacio libre" o "campo libre" se refiere al medio, en el cual la fuente del sonido está funcionando. Libre espacio significa que no hay nada que refleje el sonido, es decir, éste se puede difundir ilimitadamente. Esto es todo lo contrario a la radiación acústica en un espacio cerrado, como una habitación. Al medio del espacio libre se le conoce también como "anecoico" (literalmente, sin eco). Si usted está trabajando en el área de control del sonido, entonces usted podría subdividir el libre espacio en espacios, donde la radiación acústica no reflejada es posible sólo en una dirección, como un "medio espacio" (por ejemplo, si la fuente de sonido está en el piso, éste se puede difundir sólo hacia arriba, y no hacia abajo). A esto se le puede denominar también como "semi-anecoico". Sin embargo, para los fines de este trabajo, no se tomará esto en cuenta, sino que simplemente se asumirá que el sonido puede difundirse sin interferencias. Al haber definido el libre espacio, varios problemas comunes de radiación acústica nos vienen a la mente: subestaciones del transformador eléctrico, las bombas de una piscina, etc. ¿Qué se puede hacer para solucionar estos problemas, para reducir los niveles de ruido experimentados por los observadores humanos? Métodos pasivos de control del sonido.

El control pasivo del sonido nos ofrece dos métodos para solucionar estos problemas: colocar una pared entre el receptor y la fuente de sonido, o encerrar la fuente. Consideramos la primera opción, la pared (los ingenieros tienden a llamarlas "barreras", que suena mucho más técnico que "pared").

El propósito de construir una barrera es redirigir el flujo de la energía acústica lejos de lo que esté detrás de la barrera. Para que esto sea efectivo, la barrera debe ser construida de material "pesado". Técnicamente, esto quiere decir material con alta densidad de superficie.

La difracción se refiere a la desviación de una onda, que ocurre cuando la misma se encuentra con un objeto. El parámetro más importante al determinar los niveles de sonido de la onda difractada es obviamente la altura de la pared relativa a la altura de la fuente de sonido y de la longitud de la onda de sonido. Técnicamente, esto es normalmente cuantificado por el número de Fresnel (científico que aportó bastante a la teoría ondulatoria de la luz): $N = (d^2)/(4.L.\lambda)$, donde d representa el diámetro del orificio (2a) en metros, L representa la longitud de la cavidad Láser en metros y λ la longitud de la onda láser también en metros. El cual relaciona la diferencia entre la longitud de la línea recta medida desde la fuente hasta el observador y la longitud de la línea por encima de la pared, relativa a la longitud de la onda de sonido. Otros factores importantes incluyen la habilidad de la tierra de absorber sonido (como el sonido es emitido de la fuente, se refleja en el piso, choca con la cima de la pared y se difracta alrededor), la capacidad de la pared de absorber sonido, la coherencia del sonido y la densidad de la barrera. Mientras el cálculo de los niveles exactos de atenuación del lado opuesto de la pared es complicado y variará de instalación a instalación, una pared de tamaño razonable a menudo ofrece atenuación alrededor del orden de 10 dB. Niveles de atenuación de 20 dB y más son casi imposibles con una barrera simple.

Consideremos ahora la técnica de construir un encerramiento de la fuente de sonido. Esta es una técnica cuyo propósito es ofrecer una atenuación global del sonido al reducir el flujo de energía en el campo acústico, si la fuente es cercada con una estructura de vacío y las ondas de sonido no pueden propagarse, el sonido se transmite mediante vibración, el campo de sonido sacude las paredes del encerramiento y las paredes vibrantes irradian el campo acústico. Es interesante

señalar que la cantidad de energía que sale de una fuente de sonido y entra en un campo acústico es increíblemente poca, a menudo menos que la energía consumida por un simple bombillo. Y aún así, este campo de sonido puede sacudir paredes densas y pesadas y generar ruido del lado reverso de éstas.

Dado que la vibración de las paredes del encerramiento es la responsable de la generación del sonido, ésta jugará un papel importante en determinar la efectividad del encerramiento para reducir el sonido. En general, un elemento mecánico puede ser una pared, estructura, u otro, es más fácil de sacudir a frecuencias bajas que a frecuencias altas. De manera que, los encerramientos hacen mejor trabajo al ofrecer atenuación a frecuencias altas que a frecuencias bajas. Cuanto más grande sea la pérdida de transmisión, menor será la fracción de energía transmitida. En términos de decibeles, pérdida de transmisión = sonido adentro - sonido afuera. Hay dos puntos de importancia que se deben mencionar: la frecuencia de resonancia y la inclinación de la curva de pérdida de transmisión en ese punto. En resonancia el componente mecánico vibra; es la frecuencia donde la energía contenida dentro de la estructura es intercambiada más fácilmente entre potencial y cinética. Un ejemplo común es la cuerda punteada de una guitarra que vibra predominantemente a su primera frecuencia de resonancia. En resonancia, la energía de impedancia de la estructura es muy pequeña.

Por lo tanto, hay mucho movimiento para la poca entrada de energía. Mucho movimiento significa mucho sonido generado del otro lado y, por lo tanto, hay una caída de la curva en este punto. El otro punto de consideración en la figura N° 7.1 de la curva de pérdida de transmisión es la frecuencia de coincidencia, ésta es la frecuencia donde la longitud de las ondas en la estructura es la misma que la longitud de las ondas acústicas. En este punto los tamaños son iguales y la impedancia se reduce ligeramente. La frecuencia de coincidencia como se muestra en la figura N° 7.2, puede variar mucho entre materiales. Para una pared de concreto podría ser unos decimos de Hertz, mientras que para una cortina de

plomo podría ser decimos de miles de Hertz. Dada esta variación entre materiales, la densidad es la que produce gran pérdida de transmisión. Cuanto mayor sea la densidad de superficie, mejor será el material.

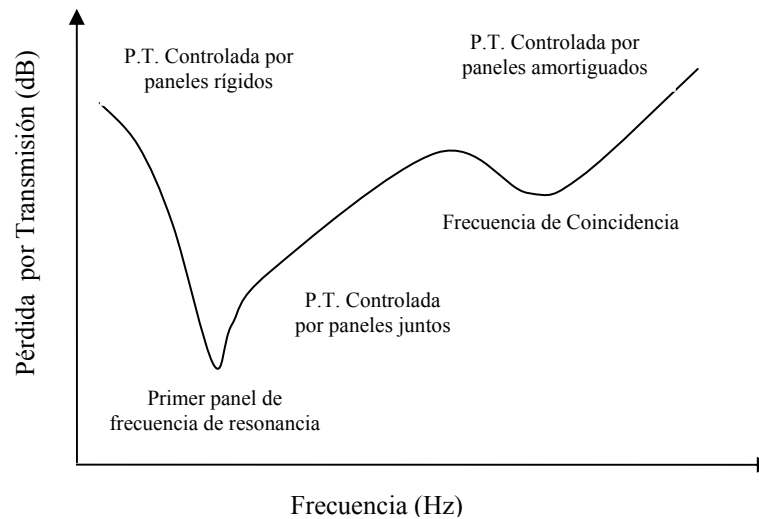


Figura N° 7.1. Gráfica típica de pérdida por transmisión (P.T.) en paneles en función de la frecuencia

Fuente: Scott Snyder. Active Noise Control Primer. 2000

El plomo es un excelente material para hacer encerramientos (hablando de acústica, ya que obviamente existen problemas de salud que podrían presentarse al construir una "pared de plomo"). Un material comercialmente común es el vinilo impregnado con minerales para aumentar la densidad de superficie. Los peores materiales para encerramiento son los ligeros y los duros.

Los puntos más importantes, son (1) los encerramientos trabajan mejor a frecuencias altas y mal a frecuencias bajas, y (2) un encerramiento de alta calidad de material de gran densidad de superficie, a menudo se llama "pesado".

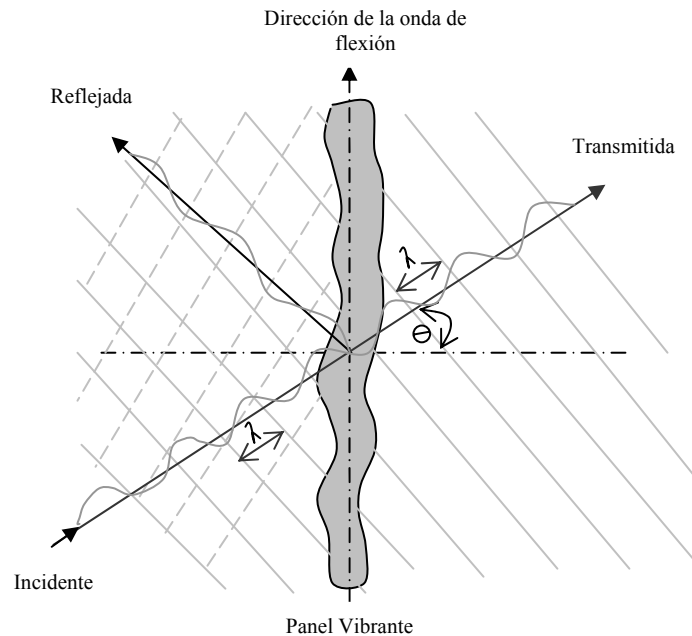


Figura N° 7.2. Efecto de coincidencia

Fuente: Manuel Recuero. Ingeniería Acústica. 1994

7.1.1.- Métodos de Control Activo

Las técnicas de control pasivo del sonido tienen como objetivo reducir los niveles acústicos alterando el medio "físico", en el cual funciona la fuente de sonido, agregando encerramientos o barreras en el caso de radiación en el libre espacio.

Las técnicas de control activo del sonido tienen como objetivo reducir los niveles acústicos alterando el medio "acústico", en el cual funciona la fuente de sonido agregando un campo acústico adicional que puede cancelar la capacidad de la fuente de sonido. Cuando estudiamos el control activo de la radiación acústica del campo libre, estamos interesados en variables que se relacionen con la capacidad de

cancelar y hacerlo de tal manera que se alcance una reducción global del sonido. Las variables típicas incluyen:

1. Ubicación de la fuente de control (altavoces);
2. Características del campo de sonido (sonido armónico contra sonido sin proyección);
3. Desfasaje de ondas;
4. Colocación incorrecta del micrófono (si el sistema de control activo es adaptativo o autosintonizante).

7.1.1.1.- Funcionamiento Físico del Control Activo

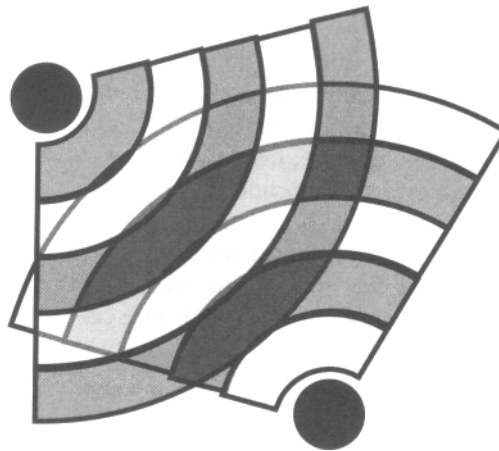
Hasta ahora, hemos estado satisfechos con la idea de que el control activo de ruido funciona mediante cancelación del campo acústico. Si tenemos un campo acústico indeseado, y podemos producir un segundo campo acústico con altavoces igual en amplitud, pero opuesto en fase, entonces la adición de ambos dará un campo acústico “silencioso”. Esta es una manera perfectamente legítima para pensar de la técnica, tanto matemática como intuitivamente. La redirección del ruido que ofrece la atenuación local a expensas del aumento de los niveles de sonido en otra parte, es comprensible y puede visualizarse. Consideremos dos fuentes de sonido funcionando en el espacio libre y produciendo una serie de ondas, como está ilustrado en Figura N° 7.3.

En algunos puntos del espacio las ondas se cancelan (las partes en sombra) y en otros puntos se complementan (las porciones muy oscuras/muy claras del dibujo). Las áreas de atenuación (donde las ondas se cancelan) son formadas a expensas de otras donde aumenta el nivel del sonido (donde las ondas se complementan). Sin embargo, a diferencia de las barreras de control pasivo, la adición del control activo del sonido en forma de segunda fuente de sonido significa que la fuerza acústica en el medio ha aumentado y duplicado si las fuentes de sonido son separadas por una distancia suficientemente grande. Tenemos dos fuentes de

sonido emitiendo potencia acústica, lo que implica que los niveles de sonido han aumentado. Para lograr la atenuación global del sonido al aplicar las técnicas de control activo, solo es posible reduciendo el flujo total de energía. Para que esto ocurra, la introducción de un segundo altavoz debe cumplir los siguientes objetivos:

1. Causar reducción en la potencia acústica de ambas fuentes de sonido de tal manera que la potencia total es menor que la potencia de la fuente original funcionando sola;
2. Una de las fuentes de sonido debe “absorber” la potencia (el flujo de energía dentro del altavoz, no fuera de éste) mientras que el flujo de energía de la otra fuente permanece igual o disminuye.

Fuente de Ruido 1



Fuente de Ruido 2

Figura N° 7.3. Similitud entre la interferencia de dos ondas de ruido coherentes

Fuente: Scott Snyder. Active Noise Control Primer. 2000

La explicación de que dos fuentes sonoras funcionando en el mismo medio, pueda emitir menor potencia acústica que una sola funcionando se debe a que la

fuerza es función de dos parámetros, los cuales son: la diferencia de potencial /la impedancia/y el flujo (debido a la relación entre estos parámetros, sólo dos se pueden ajustar independientemente con el tercero, que estaría definido por las amplitudes de los otros dos).

Consideremos el simple ejemplo de dos altavoces, uno que produce ruido indeseable y el otro introducido en el medio con el fin de reducir ese ruido. Los altavoces se pueden ver como fuentes de flujo de volumen constante.

Esto es, para una señal eléctrica dada, los conos de los altavoces desplazarían una cantidad constante de fluido, independientemente del medio acústico, que esté delante del cono. Este volumen desplazado no cambiará si, por ejemplo, es alterado el medio acústico por una persona que esté delante del altavoz. El cono continuará desplazando el fluido con la misma amplitud y el mismo caudal, es decir, con un caudal constante. El caudal es el parámetro del flujo; para calcular cómo este flujo es convertido en potencia acústica, que luego será emitida por el altavoz, donde posiblemente pueda molestar a las personas que se encuentren cerca del altavoz, requiere considerar un segundo parámetro, la impedancia o la presión. Si el altavoz está funcionando, entonces el cono se mueve hacia fuera (desplazamiento de volumen positivo de aire) y comprimirá el aire delante de él (aumento en la presión). De la misma manera, como el cono se mueve hacia atrás (desplazamiento de volumen negativo) el aire será expandido (disminución de la presión). Como la potencia acústica es el producto de la presión por el caudal, se puede decir que una cantidad positiva de energía acústica fluirá en el medio, garantizando que se está generando sonido.

Supongamos que la presión acústica delante del cono del altavoz se haga cero, entonces aunque el altavoz continúa desplazando un volumen de aire, no habrá flujo de energía en el medio acústico. Si colocamos la mano delante del altavoz, sentiremos una brisa, pero no percibiremos ningún sonido. Esto es posible cuando

usamos el control activo del ruido. Si se introduce un segundo altavoz muy cerca del primero y sintonizamos la amplitud y fase apropiada, se puede obtener un arreglo de manera que la presión acústica del segundo altavoz, parcial o completamente cancele la presión acústica directamente delante del primero. Si la presión acústica del segundo altavoz cancela la del primero, entonces ninguno de los dos altavoces emitirá energía al medio acústico y, por lo tanto, no se producirá sonido. Este es un fenómeno extraño, pero cierto.

El efecto de dos altavoces, se puede cancelar si se coloca un volumen de aire entre ellos, resultando en poco o ningún sonido. Aquí se pueden señalar algunos factores importantes a tener en cuenta cuando se aplica la técnica de control activo de ruido:

1. La distancia de separación entre las fuentes de sonido debe ser pequeña, lo que reducirá significativamente el flujo de energía.
2. Las dos fuentes de energía deben ser semejantes. Para que se reduzca la energía acústica, se debe cancelar la presión delante del altavoz.
3. Las fuentes de sonido deben ser aproximadamente del mismo tamaño.

Es posible usar una fuente de sonido para absorber el flujo de energía de otra (el agujero negro acústico). Sabemos que la potencia acústica está definida por el producto del caudal y la presión, si la presión total delante de una fuente de sonido se hace negativa con respecto al desplazamiento del aire, entonces la potencia acústica será negativa y la fuente estará absorbiendo, lo que requiere de una compresión (presión positiva), cuando el cono del altavoz se mueve hacia dentro (desplazamiento negativo de aire), y expansión (presión negativa) cuando se mueve hacia fuera (desplazamiento positivo de aire). Recordemos que la cantidad de energía asociada con una onda acústica es muy pequeña, una fracción de un watt. Por lo tanto, la cantidad de energía absorbida también es muy pequeña. En general, para

problemas de radiación acústica en el espacio libre, la técnica de la absorción no es funcional.

Al seguir el análisis, se comprueba que en el proceso de absorción de energía, la fuente a menudo introduce mayor flujo de energía que la fuente de sonido indeseable. El resultado final es a menudo un aumento en el flujo de energía y no una disminución.

7.1.1.2.- Factores que Limitan la Cantidad (dB) de Ruido Cancelado

Basado en la discusión acerca de los mecanismos responsables de la atenuación global de sonido mediante el control activo, se puede hacer una lista de variables que influyen en el funcionamiento de un sistema de control activo del sonido.

1. Ajuste de la fuente (altavoz): esto establece un límite superior sobre cuánta atenuación del sonido se puede alcanzar.
2. Colocación del sensor (micrófono) de error: esto determina cuán cerca al límite superior puede llegar el sistema dado.
3. Señal de referencia: la coherencia entre la señal de referencia y la señal de error, esto es, la coherencia entre el campo de sonido cancelado y el campo de sonido indeseable, establece un límite sobre el desenvolvimiento de la parte "electrónica" del sistema de control. La coherencia debe ser muy alta para altos niveles de cancelación de sonido.
4. Calidad del software: esta variable determina cuánta cancelación ocurre actualmente con los micrófonos de error, dadas las restricciones de la coherencia de la señal.

7.1.1.3.- Separación entre las Fuentes de Sonido

Se señaló anteriormente que la fuente de control debe estar muy cerca de la fuente de sonido indeseado para reducir el flujo de energía total en el medio acústico.

Deseamos reducir la potencia acústica total, ya que es la única manera de lograr la atenuación global del sonido. La fuente de control debería poder duplicar la forma del campo de sonido generado por la fuente primaria y definido por la amplitud de la presión del sonido en todos los puntos. De esta manera, la fase simplemente podría ser invertida y la cancelación sería posible en la mayoría de los puntos del espacio. Los campos de sonido de dos fuentes rápidamente llegan a ser "diferentes", cuando las fuentes están separadas.

Aquí cuantificamos el efecto de la distancia de separación relativa a la longitud de onda del sonido, que se define como la distancia entre las crestas sucesivas de las ondas. La longitud de onda es una cantidad que cambia con la frecuencia: longitud de la onda (en metros) = $343/\text{frecuencia (Hz)}$.

La Figura N° 7.4, muestra el máximo nivel de reducción de la potencia de sonido posible, cuando se usa una pequeña fuente de sonido para controlar la radiación acústica de otra pequeña fuente en el espacio libre. Nótese que a medida que aumenta la distancia entre las dos fuentes, rápidamente disminuye la reducción máxima posible. Lo que se puede observar de la curva es que la distancia de separación debe ser menor que una décima parte de la longitud de onda para alcanzar una atenuación de 10 dB. Consideremos la Figura N° 7.5, donde se usa un altavoz para cancelar el sonido emitido por el tubo de escape de un carro. El centro de escape y el centro del altavoz están a 343 milímetros; a 50 Hz esta distancia es igual a una longitud 0.05 veces la longitud de la onda; a 100 Hz es una longitud 0.1 veces la longitud de la onda, etc. Los resultados indican que el control activo de sonido es útil

a frecuencias bajas y no muy útil frecuencias altas, lo que explica por qué el control activo y pasivo son complementarios: el control pasivo funciona mejor a frecuencias altas y el control activo a frecuencias bajas.

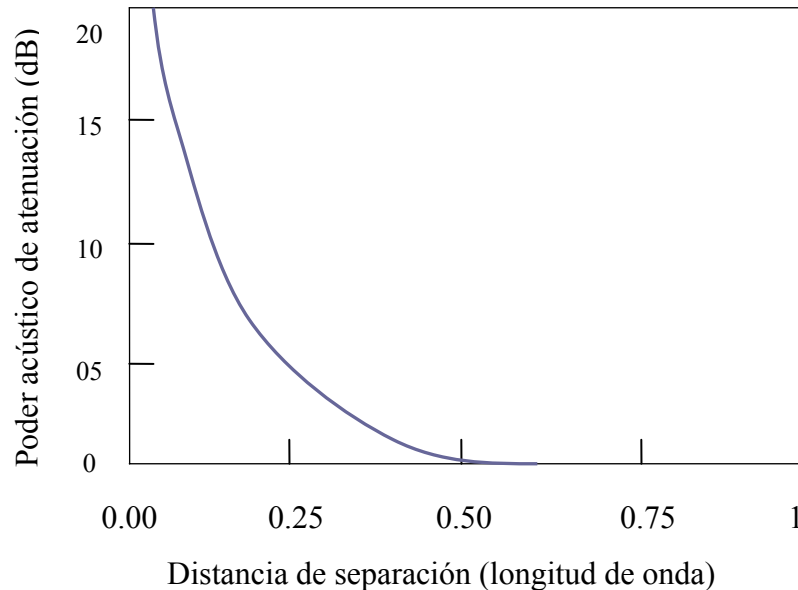


Figura N° 7.4. Máximo nivel de atenuación posible para dos pequeñas ondas de ruido, trazado en función a la distancia de separación entre ellas

Fuente: Scott Snyder. Active Noise Control Primer. 2000

7.1.1.4.- Relación entre la Fuente Primaria y la Fuente de Control

Se mencionó anteriormente que la fuente primaria y la fuente de control deben ser compatibles para que ocurra la cancelación del sonido. En nuestra discusión sobre cómo el control activo puede llevar a una reducción general en el flujo de energía en el campo acústico, se mencionó que la presión acústica en la fuente primaria podría ser cancelada por la producción de la fuente de control, y viceversa. Sin embargo, la cancelación total de la presión de sonido en ambas fuentes

simultáneamente no es posible en el espacio libre; esto se debe a la "difusión eléctrica" de las ondas al salir de la fuente.

Como el frente de onda se expande circularmente al salir de la fuente, la energía y, por lo tanto, la amplitud del desplazamiento en cualquier punto disminuye. Como la distancia de la fuente aumenta (el radio del círculo), la longitud del frente de onda (la circunferencia del círculo) aumentará proporcionalmente. Por lo tanto, se espera que la amplitud de la onda decrezca proporcionalmente con el radio. Por ejemplo, la amplitud de presión del sonido a 1 metro de la fuente es el doble que la amplitud a 2 metros de la fuente.

Consideremos ahora el caso, donde el fin es ajustar las fuentes para minimizar la fuerza acústica radiada. Si la presión acústica delante de la fuente 1 es X dB, entonces para que esta presión sea cancelada por la fuente 2, la presión acústica delante de la fuente 2 debe ser mayor que X dB. Esto es debido a que la onda se traslada de la fuente 2 a la fuente 1, su amplitud disminuirá en una cantidad proporcional a la distancia que separa las dos fuentes. Sin embargo, la fuente 2 está ajustada a este nivel, entonces la amplitud de presión de sonido en la fuente 2 debido a la onda acústica de la fuente 1 no será suficiente para cancelar completamente la presión de la fuente 2, a menos que las dos fuentes tengan energías acústicas diferentes, será posible cancelar completamente la presión de sonido en una fuente. La presión de la otra fuente será cancelada parcialmente. Hay un resultado general el cual establece que el mejor resultado global, viene dado por la máxima reducción en la potencia acústica total, que ocurrirá cuando la amplitud de la fuente de control es ajustada de manera que la presión delante de la fuente de control es completamente cancelada. De este modo, la potencia acústica de la fuente de control será cero y la de la fuente primaria (sonido indeseado) será reducida hasta cierto grado. En la Figura 7.6, nótese que la amplitud de la potencia que sale de la fuente de control disminuye, cuando la distancia de separación aumenta.

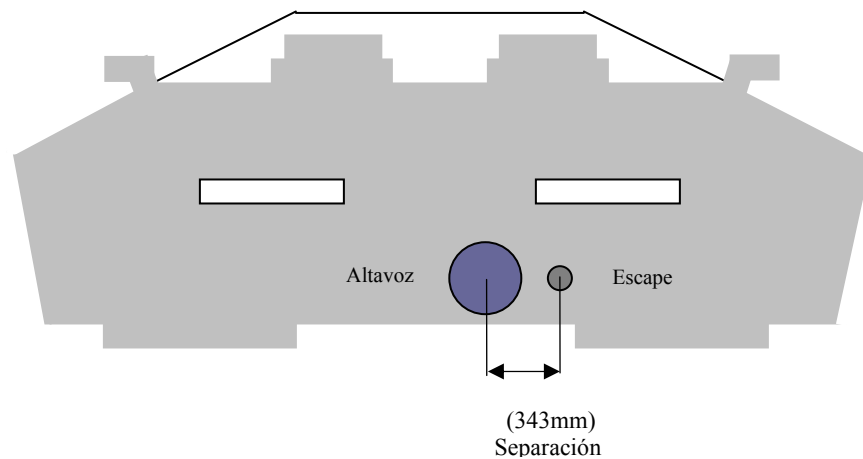


Figura N° 7.5. Posible arreglo para control activo de ruido en el escape de un vehículo

Fuente: Scott Snyder. Active Noise Control Primer. 2000

Esto es en respuesta a la caída en la amplitud de la presión sonora generada por la fuente primaria cuando la onda se aproxima a la ubicación de la fuente de control, lo cual se acompaña con un incremento en la distancia de separación.

En el caso cuando las amplitudes de la fuente control y la fuente primaria son iguales, el resultado es diferente; esto se debe a que la distancia de separación aumenta, y por lo tanto la potencia acústica disminuye. Sin embargo, en este lapso de tiempo, como la distancia de separación aumenta, la reducción no se limita a 0 dB. Ya que la distancia se acerca a un medio de la longitud de onda, la potencia acústica total aumenta por encima del valor original. Es como si se tuvieran dos fuentes operando independientemente en el espacio. Podemos decir que en la práctica el resultado es pobre.

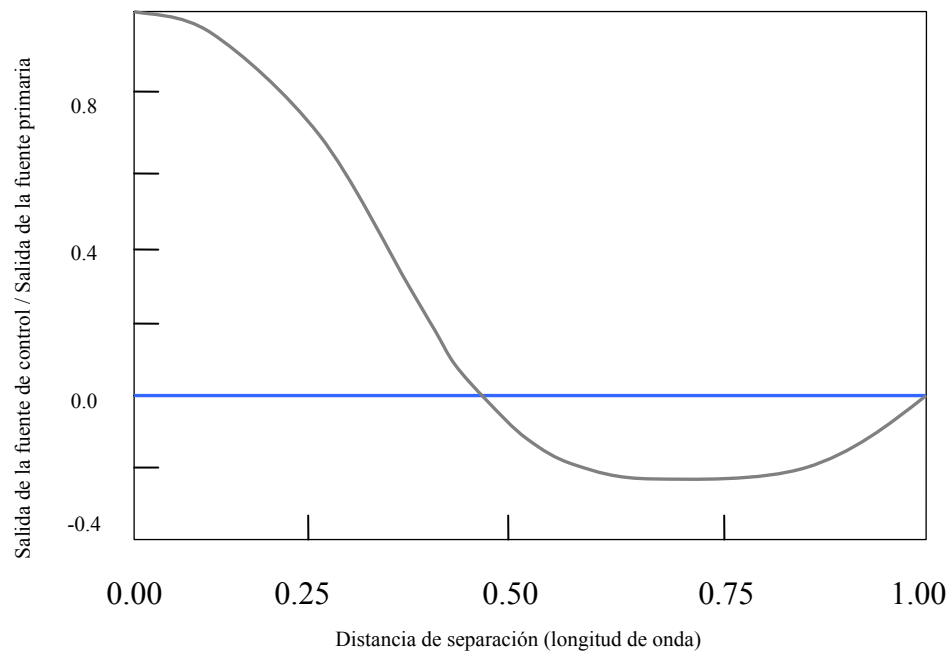


Figura N° 7.6. Relación óptima entre la salida de la fuente de control (Caudal) y la salida de la fuente primaria (caudal), para una reducción de la potencia acústica total

Fuente: Scott Snyder. Active Noise Control Primer. 2000

7.1.1.5.- Efecto de la Colocación del Micrófono que Mide el Error

Los resultados presentados anteriormente están basados en la noción de minimizar la potencia acústica total radiada en el espacio. El problema se presenta en la práctica, muchas veces no podemos medir la fuerza total radiada y darle esta cantidad al sistema de control con el fin de minimizarla. Los sistemas de control activo de ruido son a menudo empleados con micrófonos como sensores y ellos miden la presión, no la potencia acústica.

Colocaremos un micrófono en algún lugar en el espacio y este informa al sistema de control para ajustar la salida de energía del altavoz de control hasta que la presión de sonido sea minimizada. A continuación se señalan algunas normas para la

colocación de micrófonos, que influyen en el desempeño del sistema de control activo de ruido:

1. Nunca colocar el micrófono muy cerca de la fuente primaria, ya que esto llevará a una enorme salida de energía, y a menudo a la saturación del control en respuesta al intento de satisfacer los requerimientos de cancelación en el área del micrófono.
2. No colocar el micrófono muy cerca de la fuente de control si se desea atenuación global de sonido. Si esto pasa, la salida de energía de la fuente de control será muy baja, como para cumplir la cancelación lejos de la posición del micrófono.
3. Si se usan micrófonos de error múltiple, se debe evitar la simetría en su colocación; a menudo una colocación al azar resultará mejor.
4. La sensibilidad en la colocación del micrófono tiende a reducir a medida que se reduzca la distancia de separación entre la fuente primaria y la fuente de control.

7.1.1.6.- Efectividad de la Cancelación Local del Sonido

Nuestra discusión anterior nos indicó que a medida que la distancia de separación entre las fuentes de sonido aumente hasta un medio de la longitud de onda y más, la cantidad de atenuación global del sonido que es posible, se convierte en cero. Sin embargo, la cancelación local del sonido todavía es posible de obtenerse con el método de control activo.

Esto puede ser interesante si, por ejemplo, la fuente de sonido es una máquina grande y el fin es cancelar el sonido sólo en la posición del operador de la máquina. La pregunta que sigue se desea la cancelación local es, ¿sobre qué área prevalecerá el efecto? La respuesta depende del número de variables, incluso las características del patrón de radiación de la fuente primaria, que a menudo no se

conocen a priori. Sin embargo, se puede considerar el caso, donde el campo acústico es difuso, lo que significa que las ondas pueden venir desde cualquier ángulo. Mientras que esta característica no está a menudo asociada con un problema de radiación en el espacio libre, nos da un mal resultado para la radiación tonal. En este caso, la cancelación será limitada a una esfera pequeña alrededor del micrófono de error, con un radio que es una pequeña fracción de la longitud de onda. Varios experimentos de la NASA sobre el control activo del sonido describen una región de cancelación local o una "zona de silencio" ¹. La suposición de un campo de sonido difuso está asociada con una frecuencia "no baja" en un espacio cerrado, donde "no baja" es cuantificado en términos del tamaño de la longitud de onda y las dimensiones típicas del encerramiento. "No baja" es donde las dimensiones del encerramiento son cinco o más veces mayores que la longitud de onda. Las siguientes son posibles aplicaciones de control activo mediante cancelación local, que contradicen la física:

- *Aplicación 1: Cancelación de la sirena de los vehículos de emergencia.* Dentro de muchos vehículos de emergencia, como las ambulancias, no es posible oír la radio, cuando está funcionando la sirena, por lo tanto, sería conveniente poder cancelar el sonido de la sirena dentro del vehículo. La onda acústica de una sirena es una onda cuadrática, que es la combinación de armónicas fundamentales y todas las armónicas impares (primera, tercera, quinta). La armónica fundamental variará en frecuencia, mientras que la sirena salta entre cientos de Hertz y uno o dos mil Hertz. En términos de longitud de onda, ésta varía de medio metro a 150 milímetros.

Si un sistema de control activo es colocado en el vehículo, se puede esperar limitar el área de reducción del sonido de manera práctica, es decir, una región alrededor del micrófono que es 25% de la longitud de onda. Esto es aproximadamente unos diez milímetros, lo que no es un resultado útil.

¹Fuente: Scott Snyder. Active Noise Control Primer. 2000

- *Aplicación 2: Cancelación del sonido dentro del avión (anexo 1).*
Los niveles de sonido dentro de un avión pueden hacer a los pasajeros sentirse incómodos luego de un tiempo. Se han desarrollado e implementado sistemas de control activo para reducir este ruido. Una sugerencia es incluir el control activo en la parte del asiento que sirve para apoyar la cabeza. Si se decide que la zona de silencio debe tener un radio mínimo de 100 milímetros alrededor de la fuente de sonido, por lo tanto, el límite de frecuencia donde este sistema de control activo podría ser útil es alrededor de 500 Hz. En la práctica, esto se puede expandir más, pero el límite superior de frecuencia todavía será por debajo de 1000 Hz. Para un avión (a diferencia de una ambulancia), esto es un resultado útil. La diferencia entre los dos vehículos es que los pasajeros en el avión pueden sentarse quietos, y proporcionar una pequeña zona de silencio alrededor del oído es factible; lo mismo no se cumple para un trabajador de emergencias en una ambulancia.

7.1.1.7.- Influencias de la Causalidad

Los sistemas adaptables de control activo del sonido calculan una señal de cancelación con base en una señal de referencia suministrada al controlador como medida de la perturbación inminente. Si el sonido indeseado es periódico, como de una maquinaria con partes rotativas, entonces la señal de referencia se puede tomar de una medida de la rotación de la máquina. Como está indicado en la Figura N° 7.7, si la perturbación es periódica, entonces la señal de referencia se puede usar para predecir las características del campo acústico en 1 milisegundo, 10 milisegundos o hasta 1 minuto. Esto se debe a que el campo de sonido se repite continuamente. Esto simplifica los requerimientos del sistema de control, ya que no es necesario considerar el tiempo de la señal de referencia relativo a un campo de sonido no deseado; siempre será un buen predictor del campo de sonido. Este tipo de

control, donde la señal de referencia y el campo de sonido no tienen que coincidir perfectamente, se le denomina no causal. La señal de referencia no tiene que ser la causa precisa de la sección del campo de sonido que es cancelada, basado en la medición adquirida por el controlador.

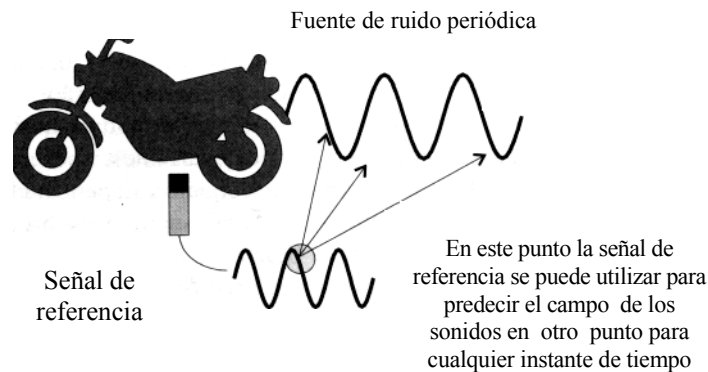


Figura N° 7.7. Señal de referencia como una medida de la rotación de las máquinas

Fuente: Scott Snyder. Active Noise Control Primer. 2000

Consideremos ahora el caso, donde el campo de sonido no es periódico. En esta situación, cada sección del campo puede relacionarse directamente con la sección de la señal de referencia. Además, esta coincidencia del campo acústico y la señal de referencia es única; ya que sólo una sección de la señal de referencia es la responsable o esta correlacionada con cualquier sección dada del campo acústico. Por lo tanto, para que el control activo cancele una sección dada del campo acústico, la sección correspondiente de la señal de referencia debe ser medida y la coincidencia de la señal de referencia y el sonido no deseado es crítica; este tipo de control se denomina causal. La señal de referencia debe ser la causa precisa de la sección del campo acústico que es cancelada.

El mayor problema al implementar un sistema de control activo causal para problemas de radiación en el espacio libre es el retardo del tiempo. Toma un periodo finito de tiempo para que una señal atraviese un sistema de control digital.

Hay retardos asociados con el muestreo, el cálculo de resultados, y también retardos en el manejo de los altavoces, ya que toma un periodo finito de tiempo para que el amplificador produzca sonido, una vez que haya señal eléctrica hacia éste. Dichos retardos depende del numero de variables físicas, tales como el tamaño del altavoz y la frecuencia de corte del filtro (diferentes componentes de frecuencia necesitan diferentes lapsos de tiempos para atravesar por el sistema de control). Sin embargo, los valores típicos de los retardos están por el orden de varios milisegundos o más. En la superficie este tipo de retardo en el tiempo puede ser trivial. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las ondas viajan a 343 metros por segundo aproximadamente. Durante un retardo de varios milisegundos, puede ser que la onda haya viajado un metro, 2 metros o más. El significado físico de lo expuesto anteriormente es el siguiente: para implementar un sistema de control causal activo, se debe tomar una medición de la señal de referencia de la fuente de sonido unos milisegundos antes de que ésta llegue, para acomodar los retardos en la electrónica y en los altavoces (nótese aquí que la señal de referencia mide el trastorno inminente del sonido, una medida que es usada para derivar la señal de cancelación correspondiente). Esto significa que el micrófono de referencia debe colocarse por encima del altavoz 1 metro, 2 metros o más para que el sonido no deseado esté llegando al altavoz justo cuando se esté generando la onda de cancelación. Mientras que en los problemas de radiación en el espacio libre era necesario que las dos fuentes no estuvieran muy cerca una de la otra, aquí para determinar que los retardos en el altavoz y la electrónica son del orden de 6 milisegundos, tiempo durante el cual la onda de sonido no deseado viajará ($0.006 \text{ segundos} * 343 \text{ metros/seg} = \text{aprox. } 2 \text{ metros}$), entonces para un sistema causal activo las fuentes de sonido deben estar separadas por lo menos dos metros una de otra.

7.2.- CONTROL DEL RUIDO EN ESPACIO CERRADO

El segundo aspecto a considerar en los problemas de control del ruido que se discutirá brevemente aquí, se refiere al control del ruido en espacios cerrados. Los ejemplos en este grupo incluyen ruido en cuartos, ruido en cabinas del vehículo, y ruido dentro de un avión.

Si el concepto del control se toma de la manera más general, puede también significar la modificación preferencial del ambiente acústico en lugares como los salones de conciertos y los cuartos de video y comunicación. Antes de discutir el control del ruido en espacios cerrados se discutirán algunos fenómenos físicos asociados a los campos cerrados de los sonidos.

7.2.1.- Origen del Ruido

El origen del ruido puede venir de fuentes internas o externas de un recinto. Para las fuentes de ruido fuera del recinto, hay dos maneras en las cuales el ruido indeseado puede incorporarse a un espacio cerrado. La primera es a través de ondas acústicas que viajan y se introducen mediante aberturas en el recinto, originando perturbación "aerotransportados". Es asombroso cómo puede una pequeña abertura en un recinto generar una cantidad significativa de ruido que puede entrar. Para observar esto, hay que intentar colocar una fuente de ruido fuera de un cuarto y abrir la puerta, incluso algunos milímetros.

La otra manera en la cual el sonido indeseado de una fuente externa puede incorporarse a un espacio cerrado, es mediante la vibración de parte o de todos los límites del recinto, originando una perturbación. En algunos casos la trayectoria entre la fuente de ruido y la vibración de la pared del recinto puede ser muy complicada.

Para un especialista en control de ruido que trabaja en un problema de ruido en un espacio cerrado, es muy importante determinar la importancia relativa de las perturbaciones transmitidas por vías sólidas y aerotransportadas. Esta contribución dirigirá la estrategia usada para corregir el problema del ruido. Un método comúnmente empleado por los especialistas es grabar el espectro de una fuente de ruido (por ejemplo, un motor), y entonces apagar la fuente para luego reproducir el sonido grabado a través de un altavoz en el mismo sitio y con el mismo volumen que la fuente sonora. Si se asume que el cono del altavoz no se está moviendo violentamente, el ruido puede ahora propagarse solamente de la fuente al espacio cerrado, siguiendo una trayectoria aerotransportada; la opción de la vibración ha sido eliminada dando un giro a la fuente de ruido original.

El ruido que ahora existe en el espacio cerrado es el componente aerotransportado, y la diferencia entre estos niveles acústicos y los que existen cuando la fuente verdadera está funcionando son debido a la trayectoria estructurada y transportada.

7.2.2.- Salida del Sonido en un Recinto Cerrado

Esto es un aspecto importante a considerar, porque desde el punto de vista de control de ruido se quiere "ayudar" al ruido a salir realzando el mecanismo físico que es responsable de su propagación.

Consideremos el caso donde alguien esté conduciendo un carro ruidoso. Al abrir la ventana, el ruido no se escapará. Más ruido entrara probablemente del exterior. El hecho es que una vez que el ruido se haya incorporado en un espacio cerrado realmente "no se escapa." Para que exista un mecanismo capaz de eliminar el ruido, la energía presente en el campo de los sonidos debe absorberse y transformarse en otra forma.

Esto ocurre generalmente en las superficies del recinto, cuando la onda acústica toca una superficie, produciendo que la superficie se mueva levemente. Típicamente, el resbalar de las partículas genera una pequeña cantidad de calor, debido a la energía que se ha tomado (absorbido) del campo acústico. También hay que recordar que las cantidades de energía en un campo de sonidos son generalmente fracciones pequeñas de un watio (1 Watt), de esta manera el campo sonoro es poco probable que consiga aumentar la temperatura en las superficies del recinto.

En una cabina de vehículo, la absorción sonora es realizada generalmente por el espacio interior, la espuma en los asientos, e incluso los cuerpos de los pasajeros. En los ambientes de la acústica profesional, los tratamientos especiales se aplican a menudo a las paredes para realzar la absorción.

Uno de los casos más notables ocurre con facilidad en una prueba acústica dentro de un recinto llamado cuarto “anecoico” (anexo 4). La idea en estos cuartos es absorber la onda acústica de la fuente por completo, para hacer esto, las cuñas grandes de espuma o de otro material absorbente se montan en las paredes. Entre otras cosas, la forma de la cuña proporciona un área superficial que facilita a la onda acústica la absorción contra una pared plana, que alternadamente va mejorando la absorción.

7.2.3.- Acondicionamiento del Campo de los Sonidos

Cuando una fuente sonora está irradiando en el espacio libre, las ondas acústicas pueden viajar sin obstáculo en todas las direcciones. El resultado de esto es un campo de los sonidos que es caracterizado por fenómenos que se propagan en forma de ondas esféricas, donde las ondas acústicas se alejan hacia fuera de una manera que se asemeja a la ondulación en el agua después de lanzar una piedra

adentro. Si una fuente sonora está irradiando en un espacio cerrado, las ondas acústicas se moverán inicialmente lejos de la fuente de la misma manera.

Sin embargo, cuando las ondas alcancen las paredes del espacio cerrado, serán reflejadas nuevamente dentro del cuarto. Generalmente hay una reducción leve en la amplitud y cambio de fase, que es dependiente de las características de la absorción y de la vibración de la pared.

Si la trayectoria de las ondas se superpone mientras que se alejan de la pared, se encontrará que hay algunas trayectorias del recorrido que tienden a repetirse sobre sí mismas. Estas son las trayectorias que parecen ocupar correctamente el espacio cerrado dado. En ciertas frecuencias probablemente se encontrará que las ondas viajan a lo largo de la trayectoria preferida, y se superponen realmente una sobre otra, empleando interferencia constructiva para aumentar de amplitud. Las frecuencias donde sucede son las frecuencias de resonancia del espacio, y el patrón predominante del recorrido de la onda en esas frecuencias será la forma asociada del modo (en resonancia).

Las frecuencias y los modos de resonancia son cantidades extremadamente importantes en control de la acústica y del ruido, y por lo tanto es meritorio obtener más información cualitativa para describir la noción de la "preferencia en la trayectoria" y un "buen ajuste" para una onda acústica. Consideremos el espacio cerrado mostrado en la Figura N° 7.8, donde se asume que las paredes están reflejando perfectamente. Supongamos que deseamos producir una onda acústica que viaje de extremo a extremo, construyéndose sobre sí misma. El patrón de la amplitud de la presión sonora que resulta a través del cuarto indicará algo como lo mostrado en la figura N° 7.8.

Este es el patrón de una onda derecha, un patrón de la onda que no se propaga lejos pero "está parada" en un lugar. Esta es también una de las formas del

modo del cuarto. Si examinamos el patrón derecho de la onda veremos las áreas a donde la presión se destaca, y otras áreas donde la presión es cero. Las áreas de presión máxima se denominan antinodos, mientras que las áreas de presión cero se llaman nodos. En una onda derecha, existirán estas áreas del pico y la presión cero en la misma posición en el cuarto para todo instante de tiempo.

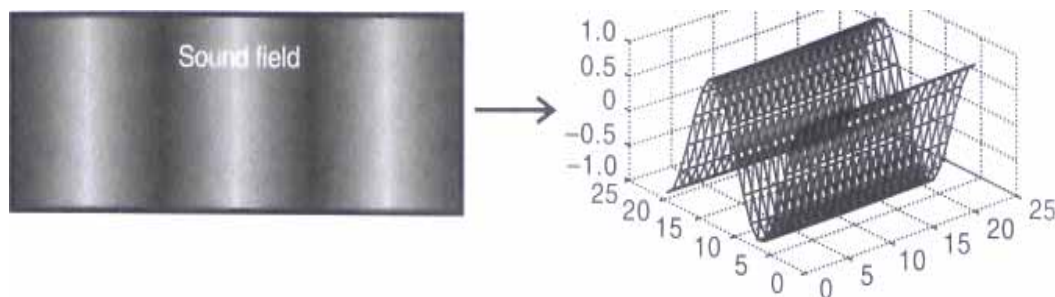


Figura N° 7.8. Campo de los sonidos en un espacio cerrado, mostrando un patrón derecho de la onda (las áreas oscuras son localizaciones de la amplitud de alta presión, las áreas ligeras son localizaciones de la amplitud de baja presión). Observar que hay una mitad de las tres longitudes de onda exhibidas en el modo antes mencionado

Fuente: Scott Snyder. Active Noise Control Primer. 2000

Esto significa que si caminamos alrededor del cuarto mientras que está resonando a una de sus frecuencias naturales, encontraremos áreas muy ruidosas (los antinodos), y áreas absolutamente sin ruido (los nodos). Para una cantidad dada de energía existe una relación entre la presión y la velocidad, si hay una velocidad grande entonces allí habrá una presión baja, lo contrario también se cumple (la energía potencial se asocia con la presión y la energía cinética se asocia con la velocidad).

Los mismos fenómenos de presión/velocidad sucederán en el espacio cerrado. Cuando la onda acústica actúa sobre una pared rígida, la pared no se mueve. Esto forzará la velocidad de las partículas, bajo influencia de la onda de anularse; en este punto entonces, la presión sonora asociada debe tener una amplitud máxima, ya que la energía contenida en el campo de los sonidos será asociada a la presión. Esta es la razón por la cual debe haber unos antinodos o picos de presión, en el límite de un recinto con paredes rígidas. Al continuar activas las fuentes sonoras y las paredes no ser perfectamente rígidas, la velocidad de la partícula no será cero, y así que el antinodo de la presión no estará presente en el límite de la pared. El resultado será un cambio en la ubicación de los nodos y antinodos en la onda derecha.

Hemos discutido hasta ahora solamente los modos que tienen una variación de presión en una dirección. Esto es llamado como modos axiales en el campo acústico del sitio. Sin embargo, esto descuida la naturaleza tridimensional del espacio cerrado. Visualizando una caja rectangular, hay tres tipos de modos que pueden existir: los modos axiales, y el que existe entre dos paredes paralelas (modos unidimensionales); "modos tangenciales", que implican reflexiones a partir de dos sistemas de paredes simultáneas (los modos de dos dimensiones, donde están las reflexiones de la onda de todos los límites en un plano dado); y los modos "oblicuos", que implican reflexiones de todas las paredes (modos, similares tridimensionales).

La palabra "geometría" en lo expuesto anteriormente es muy importante. Un recinto no tiene que ser rectangular para exhibir características modales de la respuesta. Cualquier geometría, regular o irregular, tendrá modos y frecuencias de resonancia, que podrían ser algo más difíciles de calcular matemáticamente.

La indicación con que responden los "cuartos modal," ahora nos deja considerar la relación de carga entre diversas frecuencias de resonancia para un tipo dado de modo. Modos axiales a considerar en un recinto cerrado rígido: una

resonancia ocurrirá en cada frecuencia que venga de una onda acústica cuya mitad de longitud de onda quepa de extremo a extremo en el espacio cerrado. Suponer medidas constantes dentro de un recinto cerrado de 1 metro medido de extremo a extremo, y asumiendo que la velocidad del sonido es 343 metros por segundo, para que una mitad de la longitud de onda quepa dentro del espacio de 1 metro (es decir, tener una longitud de onda de 2 metros), la frecuencia sería $(343/2) = 171.5$ hertzios. Esta es la primera frecuencia axial de resonancia del modo para nuestro recinto. La segunda frecuencia de la resonancia ocurre cuando dos mitades de longitudes de onda con cabida dentro de un espacio de 1 metro (es decir, la longitud de onda es 1 metro): esto es $(343/1) = 343$ hertzios. El patrón de antinodo/nodo de un modo de frecuencia tangencial, dividirá los dos lados en secciones separadas. Esto producirá un patrón modal que aparecerá como arreglo regular de picos y de canales en el espacio cerrado, según lo mostrado en la figura N° 7.8. Habrá una frecuencia separada de resonancia para cada combinación de las divisiones (1 x 1, 1 x 2, 2 x 37, etc.).

7.2.4.- Control del Ruido por Métodos Pasivos

Con el control del ruido por métodos pasivos hay básicamente dos maneras para solucionar problemas de ruido en un espacio cerrado: detener el ruido que se entra allí y/o absorber el ruido una vez que esté adentro. Ambos de estos métodos están dirigidos a la reducción más que al cambio de dirección de la energía acústica. Dado que las ondas se reflejan en las paredes de un espacio cerrado y llenan eventualmente de energía sonora el espacio, es difícil volver a dirigir realmente el flujo de energía lejos del recinto.

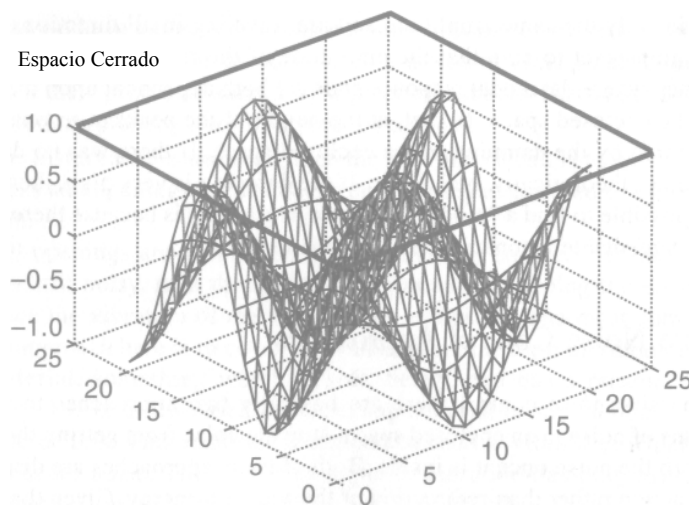


Figura N° 7.9. Distribución tangencial típica de la presión del modo de resonancia (en un espacio cerrado); el modo exhibido forma un patrón 3 x 2 nodal "áreas"

Fuente: Scott Snyder. Active Noise Control Primer. 2000

Vale la pena mencionar dónde se debe colgar el material fonoabsorbente para obtener el mejor resultado. Es intuitivo que quisiéramos que la máxima presión afectara el amortiguador para así obtener el mejor efecto. Basado en nuestra discusión anterior sobre nodos en espacios cerrados, podemos decir que generalmente en las paredes de un espacio cerrado es donde existen los antinodos.

7.2.5.- Control del Ruido por Método Activo

El uso del control activo para los problemas del ruido en espacios cerrados ha sido una de las fuerzas impulsoras de la extensión rápida de la investigación y del desarrollo en el área sobre los últimos 15 años. El problema particular que

ha sido el ímpetu más grande (es decir, donde ha estado disponible la cantidad más grande de financiamiento de la investigación) ha sido el control activo del ruido en aviones, particularmente aviones con propulsión.

Esto ha sido seguido de cerca por problemas de ruido en vehículos terrestres. También ha habido mucho interés en controlar el ruido en viviendas prefabricadas, particularmente en Japón² (aunque éste ha disminuido a un cierto grado por una carencia de resultados positivos, por las razones físicas que serán descritas posteriormente). Para estar en una posición que permita determinar el potencial de cada uno de estos usos, debemos desarrollar un sistema con indicadores cualitativos del funcionamiento para el control activo dentro de espacios cerrados.

Hemos discutido ya que el mecanismo físico que proporciona una reducción en el flujo de la energía, en una puesta en práctica del control activo de ruido es un cambio en por lo menos uno de los parámetros del sistema de estudio, los cuales están representados por: presión/volumen velocidad/impedancia. Cuando sucede esto, y se alcanza la atenuación sonora global, el resultado del sistema de control es que el campo de los sonidos producido por las fuentes de control cancelaba en la misma amplitud y fase opuesta al campo indeseado original de los sonidos. Para el caso previamente considerado del control activo del ruido en espacio libre, encontramos que éste requirió que las dos fuentes sonoras (primarias y control) estuvieran muy próximas.

En las frecuencias bajas, la respuesta del espacio cerrado es dominada por la respuesta en unos o más frecuencias de resonancia. Hemos visto que éstas son entidades muy discretas en el bajo-extremo del espectro de la respuesta de frecuencia del espacio cerrado.

²Fuente: Scott Snyder. Active Noise Control Primer. 2000

Cada uno de estas frecuencias de resonancia se asocia de algún modo con el espacio cerrado. El hecho importante sobre este tipo modal de respuesta es que es esencialmente independiente de la posición de la fuente de ruido en el espacio cerrado. Esto es extremadamente ventajoso para el control activo de ruido.

Significa que si la fuente de ruido indeseado está generando una respuesta modal del espacio cerrado, la fuente que cancela puede sacar la misma forma de respuesta de una variedad grande de localizaciones en el espacio cerrado. Es decir, cuando la respuesta es modal, la fuente que cancela no tiene que ser situada cerca de la fuente del ruido indeseado. Esto es absolutamente diferente del caso de la radiación del espacio libre.

Ahora hay que considerar qué sucede en los de alta frecuencia. Si la respuesta del espacio cerrado a una fuente de ruido es un campo difuso de sonidos, un punto dado en el espacio es igualmente probable de ser tocado por una onda acústica de cualquier dirección dada.

Es decir la respuesta es más o menos al azar por naturaleza. Para producir el cancelamiento de la fuente sonora, la única manera sería si la fuente de ruido indeseado es pequeña y la fuente sonora que la cancela se pone al lado de ella. Esto es más o menos el mismo criterio de radiación en el espacio libre, donde los medios "ceranos" conllevan a una fracción pequeña de longitud de onda.

CONCLUSIONES

- Este trabajo estuvo dirigido principalmente a dar a conocer de manera general y práctica, el funcionamiento de un controlador activo de ruido, con fines de seguridad e higiene industrial.
- El control activo de ruido es una técnica que esta dirigida a atenuar el ruido indeseado introduciendo uno adicional, generado electrónicamente, “cancelando” así el campo de los sonidos.
- Dos de las ventajas de un sistema de control activo de ruido feedforward adaptable serian: 1) su funcionamiento ante la atenuación (que resulta normalmente superior a la mayoría de otros arreglos dispuestos para el regulador) y 2) su simplicidad en el diseño (el sistema de control físico se puede esencialmente diseñar independientemente del sistema de control electrónico).
- La desventaja principal de estos sistemas es el requisito de una señal, una medida que prediga con buena fidelidad el disturbio indeseado inminente que debe ser cancelado. Otros arreglos del regulador no requieren de este requisito.
- El control del ruido activo en espacios cerrados tiene el potencial de proporcionar la atenuación sonora global en las frecuencias bajas, donde la respuesta es dominada por algunos modos de frecuencia.
- Controlar la radiación de sonido en un espacio abierto es más difícil que controlarla en un espacio confinado (como un conducto).

- También se puede concluir con respecto a los equipos de protección personal, que los sistemas de control de feedforward adaptable son frecuentemente los más usados por diversos tipos de sistemas de control activo de ruido implementados para estos equipos.
- En aplicaciones a equipos de protección activa del oído, los problemas de retrasos por el sistema de control electrónico digital, hace que la aplicación del feedforward adaptable sea esencialmente imposible.
- Un equipo de protección personal puede presentar mayores niveles de atenuación al ser instalado en una orejera de tipo pasivo, dado que esta posee mejores características en cuanto a materiales de construcción, hermeticidad, ajuste presión y fuerza, factores que van a influir enormemente en la obtención de un mejor rendimiento sonoro.
- El costo aproximado de los equipos de protección personal es bajo, aproximadamente 15 dólares, lo que permite la masificación de estos equipos tipo orejeras activas en las empresas nacionales, con el consiguiente beneficio a sus trabajadores.
- Para una futura aplicación de este método, hay que recordar que la perturbación más dócil al control activo es periódica, donde el sonido se caracteriza por una relación de tonos discretamente armonizados.
- La aplicación del feedforward de control hace predecible los campos de sonido periódicos, así como existe una relación constante entre el sonido en el ambiente acústico y el sonido en algún otro punto.
- El estudio del ruido en maquinarias representa una pieza fundamental en el mantenimiento predictivo, ya que con una variación de los niveles de ruido

estándar presentes en una máquina determinada, se podría predecir alguna falla en la misma.

- En cuanto a la simulación realizada en matlab, se puede concluir que esta resultó un poco difícil de realizar, debido principalmente a las limitaciones en cuanto a los pocos conocimientos en las áreas de ingeniería eléctrica y electrónica.
- También hubo que considerar cuán optimizado iba a ser la simulación, para que esta lograra la mejor atenuación de la fuente de ruido primaria, ya que la optimización de la simulación ponía en un compromiso bastante grande la capacidad del computador.
- Los costos aproximados de estos equipos son muy bajos, en comparación a los usados en el método pasivo. Por ejemplo, un sistema de control de ruido y vibración (el sistema electrónico con su manual y su software, para una aplicación industrial) tiene un costo de \$ 5000 USD.
- Para la aplicación de la metodología en la solución de un problema real en la industria, requiere de equipos, bibliografías y software, que actualmente no son de fácil acceso para nosotros. Por consiguiente el último objetivo específico de la tesis, se tuvo que enfocar netamente al estudio y análisis de las metodologías usadas para aplicar control activo de ruido en espacios abiertos y cerrados.

RECOMENDACIONES

- La aplicación correcta del control activo de ruido a problemas que favorezcan esta tecnología puede proporcionar resultados asombrosos, y esto es particularmente cierto para problemas de ruido en bajas frecuencias. Como se mencionó antes, el uso correcto del control activo de ruido puede producir resultados increíbles, pero el uso incorrecto puede ser increíblemente decepcionante. Desafortunadamente, si no se conoce a fondo como trabajan estos sistemas el último resultado es más probable que el primero.
- El uso de la tecnología del control activo de ruido, o aun la consideración de su uso, es generalmente una tarea muy compleja. El uso correcto del control activo de ruido requiere una integración de la física, la ingeniería y del procesamiento de las señales numéricas. Sin embargo nosotros no necesitamos ser expertos en todas estas áreas, para hacer que un sistema de control activo de ruido trabaje bien.
- La tendencia actual en la investigación del control activo de ruido, se ha venido enfocando en el desarrollo de mejoras de los diversos algoritmos usados en estos sistemas, ya que los algoritmos de control son parte fundamental en la optimización de los procesos realizados por el regulador para lograr el objetivo.

- Como una alternativa al micrófono, el tacómetro podría usarse para obtener una señal de referencia de la perturbación periódica, así como existe una relación constante entre la rotación del eje y el campo acústico.
- Cuando se trabaja en el procesamiento de señales digitales, se tiene que manejar muchos conocimientos de eléctrica y electrónica, para que los resultados esperados representen lo más fiel posible las diversas variaciones reales que envuelven estos sistemas.
- Este trabajo puede mejorarse desde el punto de vista electrónico, ya que el mismo fue enfocado en su mayor parte hacia la seguridad e higiene industrial, motivados a los grandes índices de sordera ocupacional registrado los últimos años. Por consiguiente recomiendo que para trabajos posteriores, que los mismos sean realizados con una combinación de estudiantes de eléctrica y mecánica.
- Al momento de poner en práctica esta tecnología en la industria, se tiene que considerar primeramente que las máquinas se encuentren en buen estado, me refiero con esto a fallas de desbalances u otras, que puedan generen un ruido adicional que modifique de una u otra forma el ruido natural de la máquina, ya que la misma puede perder por completo sus características de periodicidad en el ruido generado en condiciones normales de funcionamiento, trayendo como consecuencia una gran complicación a la hora de aplicar un control activo de ruido, ya que el mismo no trabaja en condiciones de aleatoriedad del ruido.

- En cuanto a los equipos de protección personal que trabajan con la tecnología del control activo de ruido, pienso que se deben implementar por completo en las áreas industriales, donde el ruido generado por las máquinas se presten para ser atenuadas con esta tecnología. De esta manera se pretende reducir enormemente los índices elevados de sordera presentes en la industria. Hay que señalar que estos equipos logran su mejor efectividad con la combinación del método pasivo y el método activo.
- Pienso que se debe crear conciencia de los diversos avances tecnológicos presentes actualmente, como lo es el control activo de ruido. Se deben dotar las bibliotecas de libros referidos a este método, ya que actualmente son pocos o ninguno los sitios en donde se puede acceder a esta información. En el mercado internacional existen muchos libros referidos al control activo de ruido, así como diversas investigaciones realizadas sobre este método.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AMBROZY, Gabriel. D'AMICO, Guillermo. DELRIEUX, Claudio. **Simulación y Evaluación de Cancelamiento Activo de Ruido Utilizando Señales de Dimensión Fractal Variable.** Universidad Nacional del Sur. Argentina, octubre 2001 www.lip.uns.edu.ar

BELL, Alan. **El Ruido. Riesgo para la Salud de los Trabajadores y Molestias para el público.** Organización Mundial de la Salud. 1969

BÜRK, Werner. **Manual de Medidas Acústicas para el Control de Ruido.** Editorial Blume. España, 1969

CANDELAS, Luis. **Señal y Ruido.** Febrero 1998
<http://webs.ono.com/usro47/luiscandelas/ruido.html>

CUEVAS, Antonio. **Teoría y Práctica del Sonido.** Octubre 99
http://membres.lycos.fr/juanan11/Teoría_y_Practica_del_Sonido.html

DAGER, Divo. GONZALES Heriberto. **Diseño y Construcción de un Sistema Atenuador de Ruido Aplicado en Ductos de Aire Acondicionado.** Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica, U.C.V. 1996

MOORE, F.R. **Elements of Computer Music**. 2ª Sección del libro. Prentice Hall Inc., New Jersey 1990

GARCIA, Guillermo. LEIDHOLD, Roberto. **Guía de Sistemas de Control (Matlab 5.3 o 6.0)**. Facultad de Ingeniería, U.N.R.C.

MAGRAB, Edward. **Enviromental noise control**. 1975

MARTINEZ, Adolfo. ZAMORA, Juan. RODRIGUEZ, Ramón. **Manual de Referencias de Matlab y Simulink**. Febrero 2002.

MIYARA, Federico (Ing. Electrónico). **Ondas Sonoras**. Noviembre 2002
www.ecosur.net/ondas_sonoras.html

MORGAN, Dennis. KUO, Sen. **Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations (Wiley Series in Telecommunications and Signal Processing)**, 1996.

OLGUIN, Claudio. **Medición de Vibraciones en Máquinas Rotativas**. Universidad Técnica Federico Santa Maria. Laboratorio 1.

OLIVARES, Antonio. **Ingeniería Avanzada para Sistemas de Control de Ruido Acústico Mediante Técnicas Adaptativas**. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Mayo 1998

PALOMINO, Evelio. **La Medición y Análisis de Vibraciones en el Diagnostico de Maquinarias Rotatorias**. 1997. Centro de estudios innovación y mantenimiento

RECUERO, Manuel. **Ingeniería Acústica**. Editorial Paraninfo. 1994

RUEDA, Enrique. **Higiene y Seguridad Industrial**. Buenos Aires-Argentina
www.pharmaportal.com.ar

SNYDER, Scott. **Active Noise Control Primer**. Universidad de Adelaide, Australia.2000

WINDPOWER. **Sonidos en Aerogeneradores**. Asociación danesa de la industria eólica. 1997. <http://www.windpower.org/es/tour/env/sound.htm>

APENDICE

TÉRMINOS ACÚSTICOS

Acústica

Ciencia que estudia el sonido.

Altavoz

Transductor electro-acústico que opera desde un sistema eléctrico a un sistema acústico, concebido para radicar al espacio potencia acústica (sonido).

Analizador

Es en electricidad, mecánica o acústica un aparato capaz de dividir un espectro en un número finito de regiones de frecuencia (bandas) y determinar la magnitud relativa de la energía en cada una de estas bandas. Algunos analizadores también determinan las fases relativas de las componentes de una línea espectral.

Armónico

Es una componente de una onda periódica teniendo una frecuencia que sea un múltiplo entero de la frecuencia fundamental.

Atenuación auditiva

De un oído, a una frecuencia determinada, es la diferencia medida en decibelios, entre el umbral de audibilidad para ese oído y el umbral normal de audibilidad a la misma frecuencia.

Baffle

Es una estructura acústica protectora o de división.

Bel (Belio)

Es una división fundamental de una escala logarítmica para expresar la relación entre dos cantidades de energía. El numero de Belios, expresado como relación es el logaritmo decimal de esta relación. Un submúltiplo es el decibelio.

Cámara sorda (anecoica)

Es un recinto en el cual la impresión subjetiva es de percibir una reverberación muy pequeña, o nula.

Campo libre

Es un campo sonoro isotrópico, homogéneo y sin superficies límites.

Cantidad periódica

Es una cantidad oscilante de valores que se repiten para incrementos iguales de la variable independiente.

Ciclo

Es un conjunto de variaciones empezando en una condición y volviendo nuevamente a la misma condición.

Coefficiente de absorción

De una superficie, es la relación entre la energía acústica absorbida por una superficie de un medio (o material), expuesto a un campo sonoro (o una radiación sonora) y la energía sonora incidente en dicha superficie. Los valores dados según esta relación se basan en que el área de la superficie sea infinita.

Decibelio

Es la décima parte del Belio. El número de decibelios está dado como 10 el logaritmo de la relación de dos cantidades de energía.

Densidad de energía acústica

Es la energía acústica por unidad de volumen, (también se le llama energía volumétrica).

Difracción

Es la distorsión de una onda frontal causada por la presencia de un obstáculo en un campo sonoro.

Enmascaramiento

Se define como el número de decibelios por el cual el umbral de audibilidad de un oyente, para un tono dado, se eleva por la presencia de algún otro sonido.

Espectro

Es la distribución de una presión sonora efectiva, o medida de intensidad, como una función de la frecuencia en bandas de frecuencias específicas. También es la distribución en los valores de las componentes de dicha onda.

Flujo de energía acústica

A través de un área determinada, es el valor medio, durante un ciclo, de la energía acústica que pasa por unidad de tiempo a través de dicha área una dirección perpendicular.

Fono

Es una unidad sin dimensiones que expresa la medida del nivel de un tono. El número de fonos es igual al número de decibelios para 1000 ciclos-tono.

Frecuencia

Es una relación de repetición de ciclos en un fenómeno periódico. Es la inversa del periodo. Su unidad es el ciclo/seg. Esta basada en la frecuencia de 440 cps; esta frecuencia también recibe el nombre de altura tonal.

Frecuencia armónica

Es una frecuencia de una componente de la cantidad periódica y es múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Una componente cuya frecuencia es doble que la fundamental se llama segundo armónico (de esta frecuencia).

Frecuencia de resonancia

Frecuencia para la cual existe resonancia. Cuando existe una gran confusión, es necesario especificar si se trata de una frecuencia de resonancia de amplitud o de velocidad o de resonancia eléctrica.

Fuente acústica simple

Es una superficie esférica que radia ondas acústicas, siendo sus dimensiones pequeñas con relación a la longitud de la onda emitida y el desplazamiento esta en fase en todos los puntos de su superficie.

Fuerza sonora

Es el espectro de sensación sonora, en términos de cada sonido que pueden ordenarse en una escala, variando entre suaves y fuerte. La fuerza sonora es principalmente una función de la intensidad de un sonido, pero depende solamente de frecuencia y de la composición. Su unidad es el sonio.

Impedancia

De un sistema acústico, esta determinada por cuatro caminos diferentes. La definición más común, es la relación compleja de una magnitud a otra.

Intensidad acústica

La intensidad acústica es un punto, en una dirección determinada, es la potencia acústica media transmitida por unidad de tiempo en la dirección considerada por unidad de superficie normal a dicha dirección en ese punto.

Longitud de onda

De una onda periódica en un medio isótropo es la distancia perpendicular entre dos frentes de ondas en el que los desplazamientos tienen una diferencia de fase de un ciclo completo.

Micrófono

Es un traductor electroacústico que recibe una señal acústica (a su entrada) y proporciona a la salida oscilaciones eléctricas equivalentes.

Micrófono de presión

Es un micrófono dependiente para su operación de la acción de la presión sonora en una sola cara del diafragma. No es direccional si sus dimensiones son pequeñas con relación a la longitud de onda.

Nivel de intensidad

El nivel de intensidad acústica de un sonido, en decibelios, es igual a 10 veces el logaritmo decimal de la razón entre la intensidad de dicho sonido y la intensidad de referencia.

Nivel de presión acústica

Es igual a 20 veces el logaritmo decimal de la razón entre la presión debida a una onda y la presión de referencia.

Nivel de presión sonora

Se aplica a la obtención de datos para una presión sonora con una respuesta plana.

Nodos

Son puntos, líneas o superficies (de presión, velocidad, o desplazamiento) de un sistema de ondas estacionarias, en los cuales una magnitud dada tiene una amplitud nula.

Octava

Es un intervalo entre dos tonos cuya relación de frecuencia es $2/1$.

Oído artificial

Es un aparato para la medida de auriculares que tiene una cavidad acústica, cuya impedancia, se intenta disimular por medio del oído humano. Esta cavidad esta equipada con un micrófono, para la medida de las presiones sonoras desarrolladas por el auricular.

Período

Es el intervalo de tiempo de una repetición individual de una cantidad variable que se autorepite con regularidad.

Presión estática

Es la presión para la cual no existe perturbación del medio.

Presión sonora efectiva

En un punto es la raíz cuadrada media de los valores de las presiones durante un ciclo completo en un punto.

Resistencia

De un medio sonoro, es la componente real de la impedancia, esto es la componente de la impedancia que es responsable de la disipación de energía.

Resistencia acústica

Persistencia de una onda acústica debido a reflexiones repetidas.

Ruido

Algún sonido indeseable.

Ruido blanco

Sonido complejo que representa un espectro continuo (por ejemplo el de una agitación térmica) y uniforme como función de frecuencia. El oído es más sensible a el que a un sonido puro.

Sensibilidad

De un micrófono, sobre unos ejes perpendiculares al diafragma, es el campo libre de sensibilidad existente cuando el sonido esta incidiendo normalmente sobre el diafragma.

Sono (son)

Es una unidad de fuerza sonora.

Sonido

Es una alteración en presión, carga, desplazamiento de partículas o velocidad de partículas, que se propaga en un medio elástico, o también superposición de estas alteraciones.

Transductor

Es cualquier dispositivo accionado por la energía de uno o varios sistemas de transmisión y que proporciona energía a otros sistemas, en la misma forma o en otra.

Transductor electroacústico

Es el que incluido entre un sistema eléctrico y otro acústico, permite la transmisión de energía de uno a otro o viceversa.

Ultrasonido

Sonido cuya frecuencia es superior al límite más alto de frecuencia de audición.

Umbral de audición

A una frecuencia específica, es el mínimo valor de la presión acústica de una onda sinusoidal de esta frecuencia, que da una sensación musical.

Umbral de dolor

A una frecuencia dada, es el mínimo valor de la presión sonora de una onda sinusoidal a dicha frecuencia, que da una sensación sonora de dolor.

Vibración forzada

Es una vibración mantenida directamente en un sistema por una fuerza periódica, de frecuencia o de frecuencias conocidas (de la fuerza).

Vibración libre

Es una vibración que existe en un sistema después de que todas las fuerzas actuantes se han retirado del sistema.

ANEXOS
ANEXO № 1
INSTALACION DE SISTEMAS DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO EN
ACIENTOS DE AVIONES



Atenuación cerca de la zona de los oídos



Arreglo de un sistema de control activo de ruido dispuesto dentro de un avión

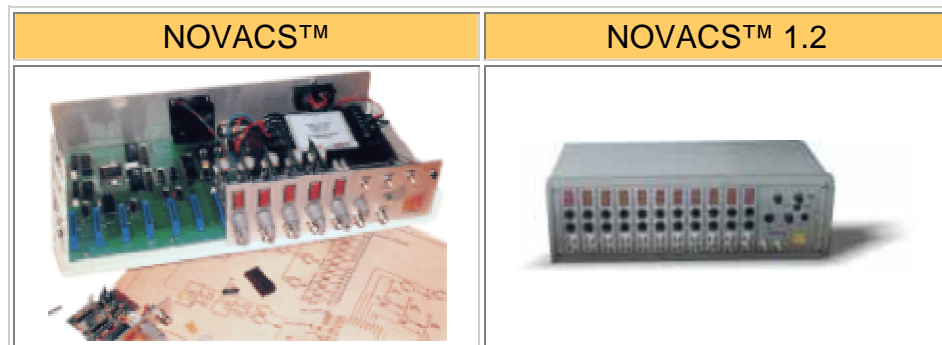
ANEXO № 2

CONTROLADOR ACTIVO UNIVERSAL

Universal active controller for research and feasibility benchmarks



- **Inputs : 11**
- **Outputs : 8**
- **Power supply : 220V,110V (option 12V)**
- **Connection : RS232**
- **Weight : 4 kg**
- **Dimensions : 480x250x110 mm**



ANEXO № 3

PROTECTORES DE OIDO

H E A D S E T S

with *Active Noise Reduction* system

Industry (automobile, test benches, mechanics, rotating machines, mining, metallurgy, ...)

Aeronautic (airport ground crews, pilots,...) - Agriculture (machine tools, vehicle drivers,...)

Military use (ground crews, tank crews, chase pilots,...) - Sports (shooting, rally,...)

NoiseMaster™ PRO



- Standard model.
- Passive and active attenuation by electronic system.
- Battery powered clipped to the belt.
- Weight : 442 g.
- Length of supply cable 1 m (3 ft).

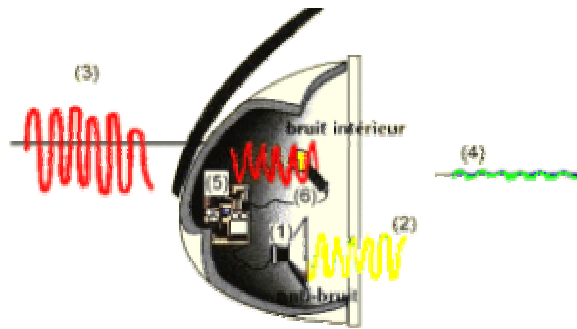
ref. : tf-1020

NoiseMaster™ PRO BUILDING SITE

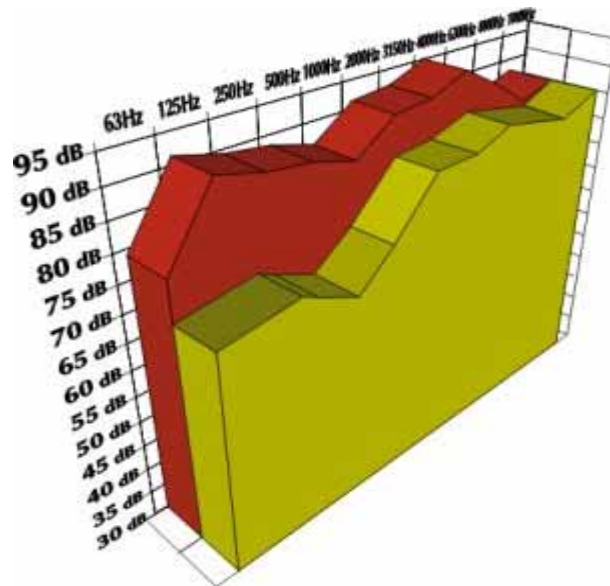


- Allows to wear an other helmet simultaneously.
- Passive and active attenuation by electronic system.
- Battery powered clipped to the belt.
- Weight : 442 g.
- Length of supply cable 1 m (3 ft).


ref. : tf-1020C



Efficiency of the LITE™ Headphone

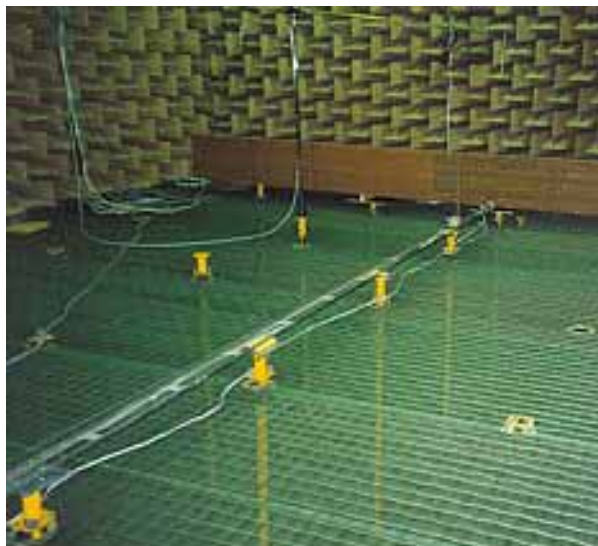


- Noise attenuation : 15 dB in 20-1000 Hz frequency range
- Frequency response : 20-28000 Hz
- Impedance : 2 x 1200 Ohms
- Acoustic power : 101 dB +/- 2 dB
- Headphone weight : 96 g (3.4 oz)
- Audio input : jack 3.5 mm
- Power Consumption : 8 mA (30 mA peak)
- Battery Life : 30 to 40 hours
- Length of Cable : 1 m
- Battery : 9 V.

 Attenuated noise by the active system

 Outside noise

ANEXO № 4
CUARTO ANECOICO



ANEXO Nº 5

**MINISTERIO DEL TRABAJO
INSTITUTO VENEZOLANO DE LOS SEGUROS SOCIALES
DIRECCIÓN DE MEDICINA DEL TRABAJO**

REGISTRO DE ENFERMEDADES PROFESIONALES

REGIÓN: NACIONAL

PERIODO: 2000

DIAGNOSTICO	TOTAL
DERMATOSIS	71
PATOLOGÍA DE LA VOZ	
- DISFONÍA	66
- OTROS:	
PATOLOGÍA POR RIESGO QUÍMICO:	
- CROMO	2
- GASES Y VAPORES	15
- MERCURIO	31
- PLOMO	42
- PLAGUICIDAS	35
- SOLVENTES	9
- ÁCIDOS	4
- OTROS. ESPECIFIQUE:	2
SORDERA OCUPACIONAL	123
TRASTORNOS DEL APARATO RESPIRATORIO:	249
- ASMA OCUPACIONAL	86
- ALVEOLITIS ALÉRGICA E.	54
- NEUMOCONIOSIS	17
- BRONQUITIS CRÓNICA O.	279
- RINOSINUSOPATIA OCUPACIONAL	47
- OTROS. ESPECIFIQUE:	8
TRASTORNOS POR FACTORES PSICO-SOCIALES	
- ESTRÉS OCUPACIONAL	10
- FATIGA LABORAL	12
- OTROS. ESPECIFIQUE:	28
TRASTORNOS MUSCULO ESQUELETICOS	993
TRASTORNOS POR RADIACIONES	5
OTROS. ESPECIFIQUE:	37
SUB-TOTAL DE ENFERMEDADES PROF.	2225
TOTAL DE PACIENTES VISTOS	8017

**MINISTERIO DEL TRABAJO
INSTITUTO VENEZOLANO DE LOS SEGUROS
SOCIALES
DIRECCIÓN DE MEDICINA DEL TRABAJO**

REGISTRO DE ENFERMEDADES PROFESIONALES

AÑO 2001

DIAGNÓSTICOS	EN.	FEB.	MAR	ABR	MA	UN.	JUL.	A	SEP.	OCT.	NOV	DIC.	TOTA
Dermatosis	5	2	6	6	4	4	3	3	3	4	2		42
Patología de la voz	2		1										3
- Disfonía	3	11	8	2	6	8	4	3	2	7	2	2	58
- Sinusitis crónica				1									1
Otros especifique													
Patología por Riesgo Químico													
- Cromo	6	2	1		1								10
- Gases y vapores	1	1			1	2			1				6
- Mercurio	1	6	6	3	6	5	7	4	6	6	10	3	63
- Momo	3	4	4	2	1		1	2	1	5	2		25
- Plaguicidas	3	6					3						12
- Solventes	5	1			4								10
- Ácidos		1											1
- Cobre			1				1						2
Otros especifique									9				
Sordera Ocupacional	7	11	14	9	15	15	15	11	9	10	9	8	133
Trastorno del aparato respiratorio	1	19		17	4	20		9					70
- Rinosinusopatía Ocupacional	1	3	12	4	16	9	14	21			5	6	91
- Asma Ocupacional	8	9	14	11	8	9	7	9		3	2	4	84
- Alveolitis alérgica extrínseca		2		1	3	1							8
- Neumoconiosis			1		3		2	4	2	1			13
- Bronquitis crónica	11	19	18	13	15	20	18	15	9	13		5	163
- Bisinosis	2	1	4	1			2						10
Otros especifique										15			15
Trastornos músculos esqueléticos	34	56	50	49	43	74	8	81	4	27	2	1	587
- Protusión discal	7			5	2	1	16					2	37
- Síndrome tunel carpiano										4	2		6
Otros especifique									2	2	2	3	9
Trastornos por radiaciones		1	1			1							3
trastornos por factores								1		3			4
- Estrés ocupacional	2	1											
- Fatiga laboral	1		2										
Otros especifique								2			1		3
Total de Enfermedades	103	156	143	124	133	169	173	167	93	100	76	51	1488
Total de Pacientes vistos	572	613	678	604	881	943	832	111	780	1099	838	572	9526

MINISTERIO DEL TRABAJO
INSTITUTO VENEZOLANO DE LOS SEGUROS SOCIALES
DIRECCIÓN DE MEDICINA DEL TRABAJO
REGISTRO DE ENFERMEDADES PROFESIONALES

AÑO: 2002

DIAGNÓSTICOS	ANDIN	ARAGU	CAP.	CENT	CEN/OC	GUAYA	NOR-	ZULIA	TOTAL
Dermatosis	1		12	3	5	2	1	7	31
Patología de la voz	12								12
- Disfonía	28		17		3	1	1	24	74
- Sinusitis crónica				1					1
Otros especifique									0
Patología por Riesgo Químico									0
- Cromo									0
- Gases y vapores	2		1		1	1	2	1	8
- Mercurio	1		21	1	1	1	3	13	41
- Plomo		1	11	2		1		3	18
- Plaguicidas			1	1	1				3
- Solventes	1				1			6	8
- Ácidos	1				2		1	1	5
- Cobre									0
Otros especifique			5	2	5	1			13
Sordera Ocupacional	2	5	29	4	90	117		36	283
Trastorno del aparato respiratorio			12	2		70		1	85
- Rinosinusopatía Ocupacional			15		1	5		3	24
- Asma Ocupacional	1	1	24	3	3	2		3	37
- Alveolitis alérgica extrínseca			5	1					6
- Neumoconiosis						10			10
- Bronquitis crónica			10			87		1	98
- Bisinosis		1							1
Otros especifique		1			2	3			6
Trastornos músculos esqueléticos	8		30	18	24	188	35	31	334
- Protusión discal		3	2						5
- Síndrome túnel carpiano		1			3				4
Otros especifique									0
Trastornos por radiaciones							2	18	20
Trastornos por factores				4					4
- Estrés ocupacional						4			4
- Fatiga laboral					2				2
Otros especifique			11	6	2				19
Total de Enfermedades	57	13	206	48	146	493	45	148	1156
Total de Pacientes vistos	1082	2017	862	1602	2079	1228	434	607	9911

ANEXO № 6
COSTOS DE EQUIPOS DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO



EZANC - II Noise & Vibration Control Systems

PC Version 1.06 - PC Version 1.05 - Version 1.03

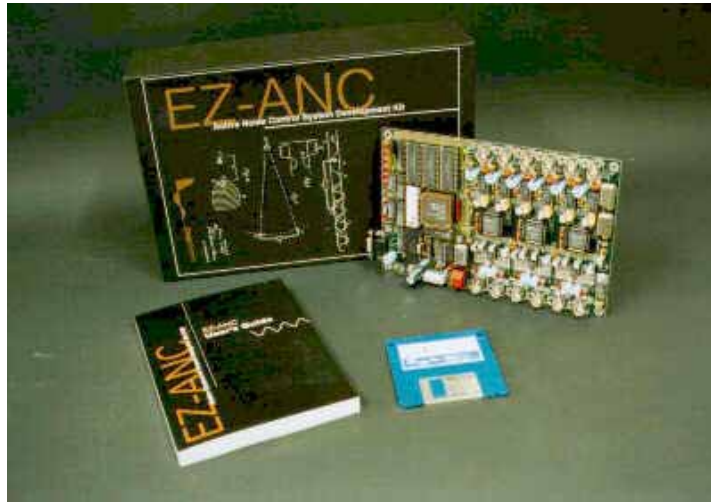
Version 1.02, BUILD 167

Version 1.01, BUILD 149

The Active Noise Control System

Prices are provided on an individual quotation basis. Please email your request to *Causal Systems Email Address*. The price of the EZ-ANC II Active Noise Controller is **\$14,000** USD.

Although the EZ-ANC I is no longer manufactured, there are still a few demo units for sale for **\$5,000** USD.



EZANC - I Noise & Vibration Control Systems

NOTICE: ALTHOUGH THE EZ-ANC I IS NO LONGER
MANUFACTURED, THERE ARE STILL A FEW DEMO UNITS FOR SALE
FOR **\$5,000** USD

ANEXO Nº 7

AVANCE TECNOLÓGICO EN EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL

8 LA PROVENCE DE L'ÉCONOMIE MARDI 17 OCTOBRE 2000

Technologies

Technofirst poursuit son chemin sans bruit

L'Institut national de la propriété industrielle (Inpi) vient de remettre ses trophées de l'innovation. Technofirst, à Aubagne, et un laboratoire du CNRS, à Marseille, figurent au palmarès

Christian Carme a créé Technofirst en 1990. Chercheur en physique appliquée et spécialisé dans le contrôle actif du bruit et des vibrations, il décide de quitter le CNRS et de se lancer dans l'industrie. Il débute dans la pépinière d'entreprises de Châteaue-Gombert à Marseille, avant de s'installer dans la zone industrielle Napollon à Aubagne.

En dix ans, sa société Technofirst, est passée du stade du projet à une PMI qui réalisera un chiffre d'affaires de 15 millions de francs cette année et qui emploie 22 personnes.

"Nous avons bâti dès le départ une stratégie sur le long terme", explique Christian Carme, en déposant des brevets, en

mettant des outils pour faire efficacement de la veille technologique, en s'implantant aux USA, en Angleterre et en Australie. Nous avons choisi la sagesse en n'investissant que l'argent que nous avions gagné pour ne pas être endettés.

Après avoir conquis des parts de marché dans les domaines militaire et industriel, Technofirst s'attaque à des applications pour le grand public.

La société est en pleine phase d'accélération avec la signature d'un contrat portant sur 100 000 casques hi-fi antibruit.

"Il s'agit d'appareils permettant d'écouter de la musique dans un environnement bruyant sans monter le son" précise Christian Carme. L'entreprise construira en partie les produits et



Christian Carme, le p-d.g. de la société aubagnaise Technofirst, vient de recevoir le trophée Inpi de l'innovation 2000. (Photo Sophie Spitéri)

sous-traitera une autre partie. Dès l'an prochain, Technofirst de-

vrait réaliser 40 MF de chiffre d'affaires et deux fois plus en 2002.

La technologie développée par Technofirst s'adapte pour l'instant aux casques anti-bruit, au double vitrage actif, aux systèmes de ventilation et enfin aux pots d'échappement des poids lourds et des bus. Avec l'apparition de nouvelles normes anti-bruit dans ce secteur, le marché de-

vrait s'ouvrir à l'entreprise aubagnaise. L'entreprise qui vient de recevoir le trophée Inpi de l'innovation 2000, devrait obtenir la certification Iso 9001 à la fin de l'année.

"Aujourd'hui, analyse Christian Carme, le marché de la lutte contre la pollution sonore est mûr, notre entreprise est structurée, donc nous devrions décoller".

Florent Provansal

ANEXO Nº 8

REDUCCIÓN DEL RUIDO APLICANDO MÉTODOS PASIVOS Y ACTIVOS

1. Bancos de pruebas de motores

Una conocida firma fabricante de motores diesel ha llevado a cabo una amplia modernización de la zona del banco de pruebas de motores, teniendo muy en cuenta la reducción efectiva del ruido desde la misma fase de diseño.

La nueva distribución consiste en un cerramiento dentro de uno de los edificios de la fábrica, que contiene 8 celdas de prueba separadas y colocadas 4 a cada lado de un pasillo central. El recubrimiento acústico de cada celda se compone de lana mineral cubierta de una membrana de polietileno y sujeta por una hoja de acero perforado, fijada a listones de madera. Las puertas acústicas, de gran peso, están diseñadas para reducir el ruido en 38 dB a 500Hz. Cada celda tiene una ventana con doble cristal de 6mm. Y un espacio de 150mm entre las dos hojas de cristal. Todo el proceso de supervisión del funcionamiento de los motores se efectúa desde el pasillo central.

Con un motor turbo de 6 cilindros y 210 caballos en funcionamiento, el nivel de ruido dentro de la celda de prueba iba de los 98 a los 104 dB(A). Estos niveles fueron medidos con el escape vertiendo directamente a la atmósfera, antes de ser extraído por el sistema del taller. Las mediciones se efectuaron junto al motor y no son representativas de las condiciones típicas. El nivel medido en el pasillo central junto a la ventana fue de 66 dB(A).

Reducción de ruido: 32-38 dB(A)

2. Control activo de ruido de escape en una turbina de gas

El principio de control activo del sonido se basa en superponer deliberadamente ondas de sonido de amplitudes opuestas e iguales, en forma tal que se anulen unas a otras, con lo que se consigue una considerable reducción. Este principio se propuso por vez primera hace muchos años, pero sólo durante la última década la reducción por sonido activo ha pasado del análisis teórico, con experimentos en laboratorios muy sofisticados, a un estadio en el que la aplicación práctica a escala industrial constituye, al fin, una realidad.

En un silenciador de escape de turbina de gas, se utilizaron micrófonos, controles electrónicos y altavoces para detectar y generar el campo de sonido inverso, el cual se combinaba después con el sonido original procedente de la máquina, consiguiendo una reducción neta del nivel.

El tubo de escape de 12 metros de alto y 3'3 metros de diámetro de la turbina de gas de 11 Mw, tiene alrededor de su salida unos altavoces de 183cm. Con amplificadores de 12'1Kw. El coste total de esta instalación es considerablemente menor que el coste estimado de las modificaciones "pasivas" tradicionales necesarias para conseguir un resultado similar.

Reducción de ruido supuesta: 10-12 dB en banda de octava 31,5Hz

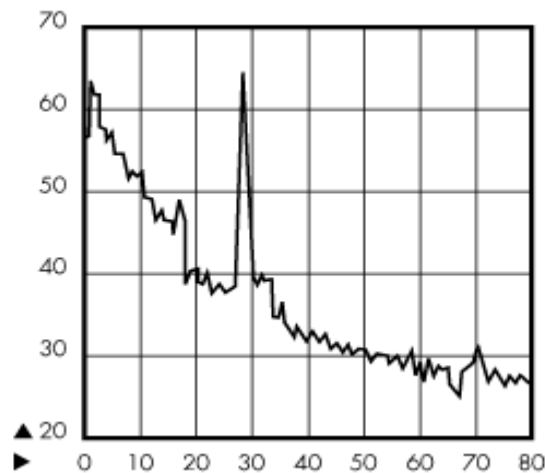
3. Ruido de baja frecuencia en las calderas

· Antecedentes:

El ruido de baja frecuencia producido por cuatro calentadores industriales situados en el cuarto de calderas de un hospital, motivó quejas en una propiedad residencial adyacente, situada a unos 50 metros. Los calentadores eran del tipo aspirador, con quemadores rotatorios, y ya tenían incorporados silenciadores de absorción de alto rendimiento en la toma de aire.

El problema de ruido estaba producido por un pitido de baja frecuencia tonal, que podía ser percibido en la propiedad contigua, en el momento en que uno de los calentadores estaba en el mínimo. La intensidad del pitido era muy variable pero la frecuencia variaba sólo entre 30 y 33 Hz y era audible a lo largo de toda la noche, que era cuando las calderas funcionaban al mínimo. En el interior del cuarto de calderas, el nivel de reverberación de este pitido era de 85 dB (Lin). En el exterior de la casa de la persona que se quejaba, el nivel bajaba a 79 dB (Lin) y dentro de la casa se midieron niveles de 67 y 62 dB (Lin) en el salón y en el dormitorio, respectivamente.

Típico espectro de ruido molesto en la casa



▲ y= dB

► x= Frecuencia (Hz)

· Control del ruido: Las investigaciones llevadas a cabo por una empresa especializada indicaron que el origen del ruido de las calderas, cuando funcionaban al mínimo, era la turbulencia de aire. La toma de aire de los aspiradores se controló con reductores de ruido con el ventilador funcionando a toda velocidad, pero aun creaba una gran turbulencia de aire en los mínimos emitiendo los pitidos de baja frecuencia. Tras varias pruebas se llegó a la conclusión de que haría falta un silenciador Hemholtz reactivo para conseguir una reducción en el ruido lo suficientemente significativa como para que cesaran las quejas. Tal silenciador, que admitía cambios en el volumen para graduarlo con exactitud una vez en posición, fue diseñado e instalado. Se consiguió una reducción de la frecuencia en cuestión del orden de 30 dB(A) tanto en el cuarto de calderas como en la vivienda contigua.

Reducción de ruido: **30 Db (a 30Hz aprox.)**