

**AMPLIFICACIÓN, PREAMPLIFICACIÓN Y PROCESAMIENTO DE LAS
SEÑALES DE AUDIO.**

DAVID GUILLERMO ACEVEDO CÁRDENAS

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2011**

**AMPLIFICACIÓN, PREAMPLIFICACIÓN Y PROCESAMIENTO DE LAS
SEÑALES DE AUDIO.**

DAVID GUILLERMO ACEVEDO CÁRDENAS

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Electrónico**

**Director:
MsC. Raúl Restrepo Agudelo**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2011**

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

En primera instancia dedico este proyecto a mis padres Matilde Cárdenas y Pablo Acevedo, quienes aún en los problemas más grandes que se encuentren, han depositado en mí su apoyo moral y económico incondicionalmente además de su afecto y paciencia, para que pueda formarme como una persona íntegra y correcta en la vida.

En segunda a mi hermanita Catica y mi hermano Carlos que aunque no se encuentre ya con nosotros; sé que desde el cielo, nos brinda toda su buena energía, apoyo y fuerzas para vencer todos los obstáculos que se nos presenten en el camino y seguir adelante siempre.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco al profesor Raúl Restrepo Agudelo, director del proyecto, quien compartió conmigo sus amplios conocimientos en el tema de electrónica y audio, además dispuso de su valioso tiempo para aclarar muchas de las dudas que se presentaron a lo largo del trabajo desarrollado.

A todo el excelente grupo de profesores que conforman la escuela de ingeniería electrónica en la Universidad Pontificia Bolivariana, quienes en el transcurso de la carrera aportaron su vasto conocimiento y experiencias acerca de las diversas ramas en las que se desenvuelve nuestra grandiosa carrera profesional.

Finalmente a todos mis amigos especialmente a Dianita Ortiz, que así el tiempo que llevamos conociéndonos sea poco, sé que es una excelente persona y ha estado ahí siempre que la necesito, ya sea para darme buenos consejos o para pasarla bien hablando horas sobre cualquier cosa.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO	27
GENERAL ABSTRACT OF WORK OF GRADE	29
CAPÍTULO 1 TRANSDUCTORES UTILIZADOS EN AUDIO.....	32
1.1 INTRODUCCIÓN	32
1.2 MICRÓFONOS	32
1.2.1 Características técnicas de los micrófonos	33
1.2.1.1 Sensibilidad.....	33
1.2.1.2 Respuesta en frecuencia	34
1.2.1.3 Directividad	35
1.2.1.4 Nivel de ruido	36
1.2.1.5 Relación señal a ruido.....	36
1.2.1.6 Impedancia de salida	37
1.2.1.7 Rango dinámico	37
1.2.1.8 Distorsión	37
1.2.1.9 Límite de saturación.....	38
1.2.2 Clasificación general de los micrófonos	38
1.2.2.1 Micrófonos de presión.....	38
1.2.2.2 Micrófonos de gradiente de presión.....	39
1.2.2.3 Micrófonos combinados de presión y gradiente (Fig.1.5).....	39
1.2.3 Micrófonos según su principio de transducción	40
1.2.3.1 Micrófonos de resistencia o de carbón	40
1.2.3.2 Micrófonos de cristal o piezoeléctricos	40
1.2.3.3 Micrófonos dinámicos o de bobina móvil	40
1.2.3.4 Micrófonos de cinta.....	41
1.2.3.5 Micrófonos de condensador (Fig. 1.7)	41
1.2.3.6 Micrófonos electret.....	42
1.3 ALTAVOCES	42

1.3.1 Características técnicas del altavoz.....	43
1.3.1.1 Sensibilidad.....	43
1.3.1.2 Respuesta en frecuencia	43
1.3.1.3 Directividad	44
1.3.1.4 Impedancia	45
1.3.1.5 Rendimiento o eficiencia	45
1.3.1.6 Potencia eléctrica.....	45
1.3.1.7 Distorsión	45
1.3.2 Principio de funcionamiento	46
1.3.3 Clasificación de los altavoces	46
1.3.3.1 Altavoz dinámico o de bobina móvil.....	46
1.3.3.2 Altavoz electrostático	47
1.3.3.3 Altavoz plano	47
1.3.3.4 Altavoz de cinta.....	48
1.3.3.5 Altavoces piezoeléctricos.....	48
1.3.4 Clasificación de altavoces según el rango de frecuencia.....	49
1.3.4.1 Woofer	49
1.3.4.2 Midrange	49
1.3.4.3 Tweeter.....	49
1.3.5 Cajas acústicas.....	50
1.3.5.1 Baffle infinito (Fig. 1.13)	50
1.3.5.2 Caja cerrada (Fig. 1.14)	51
1.3.5.3 Caja bass réflex (Fig. 1.15)	51
1.3.5.4 Caja con radiador pasivo	52
1.3.5.5 Caja pasa banda (Fig. 1.16).....	52
1.3.5.6 Caja de laberinto.....	52
1.3.5.7 Caja de línea de transmisión.....	53
1.4 AURICULARES	53
1.4.1 Clasificación.....	54
1.4.1.1 Auriculares abiertos	54

1.4.1.2 Auriculares cerrados	54
1.4.1.3 Auriculares intraurales	55
1.4.2 Beneficios y Peligros.....	55
1.5 PREAMPLIFICACIÓN.....	56
1.5.1 Polarización directa.....	57
1.5.2 Polarización por contrarreacción de tensión	58
1.5.3 Polarización por divisor de tensión	59
1.6 ACOPLAMIENTO ENTRE ETAPAS PREAMPLIFICADORAS	60
1.6.1 Acoplamiento complementario.....	60
1.7 PREAMPLIFICADORES INTEGRADOS	61
1.7.1 Amplificador inversor	61
1.7.2 Amplificador no inversor.....	62
1.7.3 Amplificador inversor con ganancia variable.....	63
1.8 RESUMEN DEL CAPÍTULO	63
1.9 PREGUNTAS Y EJERCICIOS.....	64
1.10 BIBLIOGRAFÍA.....	64
CAPÍTULO 2 FILTROS EN AUDIO.....	66
2.1 INTRODUCCIÓN.....	66
2.2 FILTROS ELÉCTRONICOS ANÁLOGOS.....	66
2.2.1 Filtros pasivos.....	67
2.2.2 Filtros activos	67
2.3 FILTRO IDEAL.....	67
2.3.1 Filtro pasa bajo (Fig. 2.1)	68
2.3.2 Filtro pasa alto	68
2.3.3 Filtro pasa banda (Fig. 2.3).....	69
2.3.4 Filtro rechaza banda o elimina banda (Fig. 2.4).....	70
2.3.5 Filtro pasa todo (Fig. 2.5).....	70
2.4 FILTRO REAL.....	70
2.4.1 Función de transferencia.....	71
2.4.2 Atenuación	71

2.4.2.1 Atenuación en la banda pasante y banda eliminada.....	71
2.4.3 Orden polos y respuesta en la región de transición	72
2.5 TIPOS DE RESPUESTA DEL FILTRO	73
2.5.1 Respuesta Butterworth	73
2.5.2 Respuesta Chebyshev (Fig. 2.8).....	74
2.5.3 Respuesta Bessel (Fig. 2.10).....	75
2.5.4 Respuesta Chebyshev inversa (Fig. 2.11)	76
2.5.5 Respuesta elíptica (Fig. 2.12)	77
2.6.1 Orden de Butterworth.....	78
2.6.2 Polos de Butterworth.....	78
2.6.3 Orden de Chebyshev	79
2.6.4 Polos Chebyshev	79
2.7 COMPONENTES DEL FILTRO	80
2.8 CONFIGURACIÓN CIRCUITAL DE FILTROS.....	81
2.8.1 Configuración Sallen-Key.....	81
2.9 FILTROS DIVISORES DE FRECUENCIA O DE CRUCE (CROSSOVER)	87
2.9.1 Clasificación.....	87
2.9.2 Crossover pasivo	87
2.9.2.1 Principio de funcionamiento	87
2.9.3 Crossover activo	90
2.10 RESUMEN DEL CAPÍTULO	91
2.11 PREGUNTAS Y EJERCICIOS.....	92
2.12 BIBLIOGRAFÍA	92
CAPÍTULO 3 EFECTOS DE AUDIO.....	93
3.1 INTRODUCCIÓN	93
3.2 EFECTOS NATURALES.....	93
3.2.1 Eco.....	94
3.2.2 Reverberación.....	94
3.3 DISPOSITIVOS DE ECO Y REVERBERACIÓN.....	95
3.3.1 Cámaras de eco y reverberación	95

3.3.2 Placa de eco	96
3.3.3 Reverberación producida por resortes	96
3.3.4 Reverberación y eco producidos por un registro magnético	97
3.4 REVERBERACIÓN DIGITAL (FIG. 3.2).....	97
3.4.1 Tipos de reverberación	98
3.4.1.1 Hall.....	98
3.4.1.2 Room	98
3.4.1.3 Cathedral	98
3.4.1.4 Bathroom	98
3.4.1.5 Plate.....	98
3.4.1.6 Spring.....	98
3.4.1.7 Teatre.....	99
3.4.1.8 Chamber	99
3.4.1.9 Gate	99
3.4.1.10 Inverse	99
3.4.1.11 Voice room.....	99
3.4.2 Parámetros	99
3.4.2.1 Reverb time o decay	99
3.4.2.2 Pre-delay o initial delay	99
3.4.2.3 Early reflections	99
3.4.2.4 Size o dimension.....	100
3.4.2.6 Density	100
3.4.2.7 Liveness.....	100
3.4.3 Cuando usar la reverb	100
3.5 REVERB DE CONVOLUCIÓN.....	101
3.6 EFECTOS DE RETRASO (DELAY).....	101
3.6.1 Dispositivos Bucket brigade (BBD)	102
3.6.1.1 Reverberación.....	103
3.6.1.2 Chorus o coro	103
3.6.1.3 Flanger.....	104

3.7 EFECTOS DE FASE.....	105
3.7.1 Vibrato.....	106
3.8 TRÉMOLO	106
3.8.1 Generador controlado por voltaje.....	107
3.8.2 VCA (amplificador controlado por voltaje).....	107
3.9 FUZZ.....	107
3.9.1 Conversión seno a cuadrada (SSC)	108
3.9.2 Recorte con diodos	108
3.10 RESUMEN DEL CAPÍTULO	109
3.11 PREGUNTAS Y EJERCICIOS.....	110
3.12 BIBLIOGRAFÍA	110
CAPÍTULO 4 COMPRESORES Y COMPUERTAS	112
4.1 INTRODUCCIÓN	112
4.2 RANGO DINÁMICO (FIG. 4.1).....	113
4.3 COMPRESOR	114
4.3.1 Nivel de threshold o umbral	114
4.3.2 Tiempo de ataque	115
4.3.3 Tiempo de relajación o liberación	115
4.3.4 Radio o relación de compresión.....	115
4.4 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL COMPRESOR.....	115
4.4.1 Efectos del tiempo de ataque y de relajación en la señal	116
4.5 USOS TÍPICOS DE LOS COMPRESORES	117
4.5.1 Ajustes del compresor en función de las aplicaciones.....	118
4.5.1.1 Guitarras	118
4.5.1.2 Percusión	118
4.5.1.3 Voces.....	119
4.6 COMPRESORES ESTEREOFÓNICOS	119
4.7 COMPRESIÓN MUTLIBANDA	119
4.8 LIMITADOR	119
4.9 COMPUERTAS.....	120

4.9.1 Ajustes de compuertas en función de las aplicaciones	121
4.9.1.1 Teclados	121
4.9.1.2 Guitarras	121
4.9.1.3 Percusión	122
4.9.1.4 Voces	122
4.9.2 Expansores	122
4.10 PRINCIPIO DE LOS DETECTORES DE NIVEL	122
4.10.1 Conversión AC a DC	123
4.10.2 Ataque variable	123
4.10.3 Decaimiento variable	124
4.10.4 Umbral y radio variable	124
4.10.5 Detector de nivel	125
4.11 RESUMEN DEL CAPÍTULO	126
4.12 PREGUNTAS Y EJERCICIOS	127
4.13 BIBLIOGRAFÍA	127
CAPÍTULO 5 AMPLIFICACIÓN DE AUDIO O DE POTENCIA	129
5.1 INTRODUCCIÓN	129
5.2 AMPLIFICADORES DE POTENCIA	130
5.2.1 Ganancia del amplificador	130
5.2.2 Potencia máxima de salida	130
5.2.3 Nivel de señal	131
5.2.4 Ancho de banda de potencia	131
5.2.5 Sensibilidad	131
5.2.6 Eficiencia del amplificador	132
5.2.7 Respuesta en frecuencia	132
5.2.8 Distorsión	132
5.2.8.1 Distorsión de fase	132
5.2.8.2 Distorsión de frecuencia	132
5.2.8.3 Distorsión de amplitud	132
5.2.8.4 Distorsión de cruce por cero	133

5.2.8.5 Distorsión por intermodulación (IMD).....	133
5.2.9 Rango dinámico	133
5.2.10 Velocidad de respuesta.....	133
5.2.11 Impedancia de entrada	134
5.2.12 Impedancia de salida	134
5.2.13 Factor de amortiguamiento (F.A)	134
5.2.14 Relación señal a ruido	134
5.2.15 Nivel de saturación de entrada	135
5.2.16 Respuesta de fase	135
5.2.17 Acoplamiento	135
5.3 CLASIFICACIÓN DE LOS AMPLIFICADORES DE POTENCIA.....	136
5.3.1 Amplificador clase A	136
5.3.1.1 Amplificador clase A con acoplo directo a la carga.....	136
5.3.1.2 Amplificador clase A acoplado con transformador (Fig. 5.7).....	139
5.3.1.3 Comparación entre acople directo y mediante transformador.....	144
5.3.2 Amplificador clase B (Fig. 5.10)	144
5.3.3 Amplificador clase AB	145
5.3.3.1 Diseño del amplificador.....	146
5.3.3.2 Polarización del circuito de clase AB	148
5.3.4 Amplificador clase C	149
5.3.4.1 Principio de funcionamiento	149
5.3.5 Amplificador clase D (Fig. 5.15).....	150
5.3.5.1 Principio de funcionamiento	150
5.3.5.2 Diseño del amplificador.....	151
5.4 DISTORSIÓN DEL AMPLIFICADOR	156
5.4.1 Componentes armónicos de una señal distorsionada	156
5.4.2 Distorsión armónica total (THD).....	157
5.5 RESUMEN DEL CAPÍTULO	158
5.6 PREGUNTAS Y EJERCICIOS.....	159
5.7 BIBLIOGRAFÍA	160

CAPÍTULO 6 ECUALIZADORES Y ECUALIZACIÓN DE AUDIO.....	161
6.1 INTRODUCCIÓN	161
6.2 ECUALIZADOR	162
6.2.1 Tipos de filtros utilizados en ecualizadores.....	162
6.2.1.1 Filtro pasa bajo	162
6.2.1.2 Filtro pasa alto	162
6.2.1.3 Filtro pasa banda	163
6.2.1.4 Filtro rechaza banda	163
6.2.2 Tipos de ecualizadores	164
6.2.2.1 Ecualizador Shelving (Fig. 6.5)	164
6.2.2.2 Ecualizador semi-paramétrico (Fig. 6.6)	164
6.2.2.3 Ecualizador paramétrico (Fig. 6.7)	165
6.2.2.4 Ecualizador dinámico (Fig. 6.8).....	166
6.2.2.5 Ecualizador gráfico	166
6.2.2.5.1 Distribución de bandas.....	167
6.2.2.5.2 Ajuste de ganancia	167
6.2.2.5.3 Aplicaciones.....	168
6.3 TERMINOLOGÍA DE LA ECUALIZACIÓN.....	168
6.3.1 Roll-off.....	168
6.3.2 Shelf.....	168
6.3.3 Frecuencia central	168
6.3.5 In/Out	169
6.3.6 Ganancia.....	169
6.3.7 Factor de calidad Q o selectividad	169
6.3.8 Pasa banda.....	169
6.3.9 Elimina banda	170
6.3.10 Banda.....	170
6.3.11 Altura o tono.....	170
6.3.12 Volumen.....	170
6.3.13 Timbre.....	170

6.4 BANDAS PRINCIPALES DE ECUALIZACIÓN	170
6.4.1 Alta frecuencia	170
6.4.2 Frecuencia alta media.....	171
6.4.3 Frecuencia media	171
6.4.4 Frecuencia media baja.....	171
6.4.5 Frecuencia baja	171
6.5 ECUALIZACIÓN	171
6.5.1 Rangos de frecuencia de los instrumentos	172
6.5.2 Analizador de espectros (6.12)	173
6.5.3 Ecualización de interiores	173
6.5.4 Ecualización en sistemas de megafonía	174
6.6 DISEÑO DE ECUALIZADOR.....	174
6.7 RESUMEN DEL CAPÍTULO	175
6.8 PREGUNTAS Y EJERCICIOS.....	176
6.9 BIBLIOGRAFÍA.....	176
CAPÍTULO 7 REDUCCIÓN DE RUIDO	178
7.1 INTRODUCCIÓN.....	178
7.2 RUIDO	178
7.2.1 Clasificación.....	179
7.2.1.1 Ruido blanco (Fig. 7.1).....	179
7.2.1.2 Ruido Rosa (Fig. 7.2)	180
7.2.1.3 Ruido rojo.....	180
7.2.1.4 Ruido impulsivo.....	181
7.2.1.5 Hiss	181
7.2.1.6 Hum	181
7.2.1.7 Glitches: clics y pops	181
7.3 ENMASCARAMIENTO	181
7.4 SISTEMAS DE REDUCCIÓN DE RUIDO.....	182
7.4.1 Filtrado (Fig. 7.3).....	182
7.4.2 Preénfasis variable (Fig. 7.4)	182

7.4.3 Dolby A	183
7.4.4 Dolby B	185
7.4.5 Dolby C	185
7.4.6 Dolby SR.....	186
7.4.7 Dolby S	186
7.4.8 DBX	187
7.4.9 DLN.....	187
7.4.10 Telcom C4.....	187
7.5 DISMINUCIÓN RUIDOS ELÉCTRICOS	188
7.5.1 Blindaje	188
7.5.1.1 Blindaje trenzado (Fig. 7.8 a)	188
7.5.1.2 Blindaje en espiral (Fig. 7.8 b)	189
7.5.1.3 Blindajes laminados (Fig. 7.8 c y d)	189
7.5.1.4 Blindajes combinados (Fig. 7.8 e).....	189
7.5.2 Puesta a tierra.....	189
7.5.2.1 Masa centralizada (Conexión en serie).....	189
7.5.2.2 Masa centralizada (Conexión en paralelo) (Fig. 7.10)	190
7.5.2.3 Masa distribuida (Fig. 7.11).....	191
7.5.2.3 Masas híbridas.....	191
7.6 RESUMEN DEL CAPÍTULO	191
7.7 PREGUNTAS Y EJERCICIOS.....	192
7.8 BIBLIOGRAFÍA.....	192
CAPÍTULO 8 ACOUPLE DE IMPEDANCIAS.....	194
8.1 INTRODUCCIÓN.....	194
8.2 TRANSFORMADOR (Fig. 8.1).....	194
8.3 ACOPLAMIENTO MAGNÉTICO.....	195
8.3.1 Inductancia mutua (M)	196
8.3.2 Convención de puntos	197
8.3.3 Tensión combinada de L y M.....	198
8.4 COEFICIENTE DE ACOPLAMIENTO K	198

8.5 TRANSFORMADOR IDEAL.....	199
8.6 ACOPLAMIENTO DE IMPEDANCIAS.....	201
8.7 RESUMEN DEL CAPÍTULO	203
8.8 PREGUNTAS Y EJERCICIOS.....	204
8.9 BIBLIOGRAFÍA	204
CONCLUSIONES	205
BIBLIOGRAFÍA.....	206

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Fig. 1.1 Respuesta en frecuencia de un micrófono	34
Fig. 1.2 Tipos de respuesta polar en micrófonos	35
Fig. 1.3 Micrófono de presión.....	38
Fig. 1.4 Micrófono de gradiente de presión.....	39
Fig. 1.5 Micrófono combinado presión y gradiente	39
Fig. 1.6 Micrófono de bobina móvil	41
Fig. 1.7 Micrófono de condensador.....	42
Fig. 1.8 Proceso transductor electroacústico	43
Fig. 1.9 Diagrama Polar del comportamiento de un altavoz	44
Fig. 1.10 partes altavoz dinámico	46
Fig. 1.11 Configuración interna altavoz de cinta	48
Fig. 1.12 Respuesta en frecuencia de altavoces	50
Fig. 1.13 Bafle infinito	50
Fig. 1.14 Bafle cerrado.....	51
Fig. 1.15 Bafle bass réflex	51
Fig. 1.16 Bafle pasa banda	52
Fig. 1.17 Laberinto acústico	52
Fig. 1.18 Configuración línea de transmisión	53
Fig. 1.19 Auriculares abiertos	54
Fig. 1.20 Auriculares cerrados	54
Fig. 1.21 Auriculares intraurales	55
Fig. 1.22 Polarización directa.....	56
Fig. 1.23 Polarización por contrarreacción de tensión.	58
Fig. 1.24 Polarización por divisor de tensión	59
Fig. 1.25 Polarización por divisor de tensión	60
Fig. 1.26 Amplificador inversor.....	61
Fig. 1.27 Amplificador no inversor.....	62
Fig. 1.28 Amplificador inversor con ganancia variable.....	63
Fig. 2.1 Respuesta en frecuencia filtro pasa bajo ideal.....	68
Fig. 2.2 Respuesta en frecuencia filtro pasa alto ideal.....	68
Fig. 2.3 Respuesta en frecuencia filtro pasa banda ideal	69
Fig. 2.4 Respuesta en frecuencia filtro Elimina banda ideal	70
Fig. 2.5 Respuesta en frecuencia filtro pasa todo	70

Fig. 2.6 Especificaciones de la curva característica del filtro pasa bajo.....	72
Fig. 2.7 Respuesta pasa bajo Butterworth	73
Fig. 2.8 Respuesta pasa bajo Chebyshev	74
Fig. 2.9 Rizado filtro Chebyshev	74
Fig. 2.10 Respuesta filtro pasa bajo Bessel	76
Fig. 2.11 Respuesta filtro pasa bajo Chebyshev inverso	76
Fig. 2.12 Respuesta filtro pasa bajo elíptico	77
Fig. 2.13 Configuración Sallen-Key filtro pasa bajo de segundo orden.....	81
Fig. 2.14 Configuración Sallen-Key filtro pasa alto de segundo orden.....	81
Fig. 2.15 Configuración filtro pasa banda (banda ancha)	83
Fig. 2.16 Configuración filtro rechaza banda.	83
Fig. 2.17 Crossover pasivo de tres líneas.....	88
Fig. 2.18 Crossover activo de dos vías	90
Fig. 3.1 Cámara de eco y reverberación	95
Fig. 3.2 Placa de eco	96
Fig. 3.3 Reverberación producida por resortes	97
Fig. 3.4 Circuito interno BBD.....	102
Fig. 3.5 Diagrama de bloques efecto de reverberación	103
Fig. 3.6 Diagrama de bloques efecto chorus	104
Fig. 3.7 Diagrama de bloques efecto flanger	104
Fig. 3.8 Filtro pasa todo de adelanto y de atraso	105
Fig. 3.9 Diagrama de bloques efecto trémolo	106
Fig. 3.10 Red SSC	108
Fig. 3.11 Red de recorte por diodos.....	109
Fig. 4.1 Rango dinámico	113
Fig. 4.2 Nivel umbral	114
Fig. 4.3 Diagrama de bloques compresor	116
Fig. 4.4 Efectos tiempo de ataque y tiempo de relajación.....	117
Fig. 4.5 Compuerta con histéresis	121
Fig. 4.6 Rectificador de onda completa.....	123
Fig. 4.7 Red de ataque puro	124
Fig. 4.8 Red de decaimiento puro	124
Fig. 4.9 Red de escalado y offset.....	125
Fig. 4.10 Diagrama de bloques sistema detector de nivel	126

Fig. 5.1 Velocidad de respuesta.....	133
Fig. 5.2 Alternativas extremas cuando el rango dinámico excede la relación S/R	135
Fig. 5.3 Amplificador clase A alimentado en serie	136
Fig. 5.4 Transistor sobredimensionado.....	137
Fig. 5.5 Transistor inadecuado.....	138
Fig. 5.6 Transistor trabajando en el límite de seguridad	138
Fig. 5.7 Amplificador clase A con transformador de acoplo	140
Fig. 5.8 Transformador de salida	141
Fig. 5.9 Amplificador tipo A con acople de transformador.....	142
Fig. 5.10 Representación de bloques amplificador clase B	144
Fig. 5.11 Distorsión de cruce por cero	145
Fig. 5.12 Amplificador clase AB	145
Fig. 5.13 Amplificador clase AB polarizado por diodos	148
Fig. 5.14 Amplificador clase C	149
Fig. 5.15 Diagrama de bloques amplificador clase D.....	150
Fig. 5.16 Circuito PWM	151
Fig. 5.17 Entrada y salida del circuito PWM	152
Fig. 5.18 Amplificador clase D	153
Fig. 5.19 Modelo ideal equivalente amplificador clase D	153
Fig. 5.20 Forma de onda de la salida V_a , en un amplificador clase D	154
Fig. 5.21 Modelo real equivalente amplificador clase D con mosfets.....	155
Fig. 5.22 Representación gráfica de una señal distorsionada mediante el uso de componentes armónicos.....	157
Fig. 6.1 Comportamiento en frecuencia filtro pasa bajo.....	162
Fig. 6.2 Comportamiento en frecuencia filtro pasa alto.....	163
Fig. 6.3 Comportamiento en frecuencia filtro pasa banda.....	163
Fig. 6.4 Comportamiento en frecuencia filtro rechaza banda.....	164
Fig. 6.5 Ecuador Shelving.....	164
Fig. 6.6 Ecuador semi-paramétrico de una banda.....	165
Fig. 6.7 Ecuador paramétrico de una banda	165
Fig. 6.9 Ecuador gráfico	166
Fig. 6.10 Posición de controles ecualizador gráfico	167
Fig. 6.11 Comportamiento en frecuencia.	167
Fig. 6.12 Pantalla RTA.....	173
Fig. 6.13 Ecuador de 5 bandas.....	175

Fig. 7.1 Ruido Blanco.....	180
Fig. 7.2 Ruido rosa.....	180
Fig. 7.3 Filtrado.....	182
Fig. 7.4 Acción de preénfasis y desénfasis.....	183
Fig. 7.5 Bandas de actuación de los filtros en el Dolby A.....	184
Fig. 7.6 Diagrama de bloques sistema Dolby A.....	184
Fig. 7.7 Comportamiento en frecuencia Dolby B y C.....	185
Fig. 7.8 Tipos de blindajes en cables.....	189
Fig. 7.9 Conexión de masas en serie.....	190
Fig. 7.10 Conexión de masas en paralelo.....	190
Fig. 7.11 Masa distribuida.....	191
Fig. 8.1 Transformador.....	195
Fig. 8.2 Inducción magnética.....	195
Fig. 8.3 Relación de inductancia mutua.....	196
Fig. 8.4 Red de inducción de voltaje.....	197
Fig. 8.5 Tensión combinada L y M.....	198
Fig. 8.6 Transformador TR 509.....	200
Fig. 8.7 Etapa de amplificación de audio con acoplamiento magnético.....	201
Fig. 8.8 Red de amplificación con múltiples altavoces.....	202

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1 Respuestas de los filtros	77
Tabla 2 Localización polos Butterworth	78
Tabla 3 Localización de los polos de Chebyshev	80
Tabla 4 Nivel de tensión en dispositivos de audio	131
Tabla 5 Comparación clases de amplificadores.....	132
Tabla 6 Frecuencias de ecualización de instrumentos y voz humana	172

GLOSARIO

ACÚSTICA: 1. rama de la física que se ocupa del estudio de las propiedades del sonido. 2. condición sonora de un recinto.

AGUDOS: sonidos que componen el espectro audible de alta frecuencia.

ANECOICA: que carece de eco.

ALTURA: este parámetro es el que produce la sensación grave agudo y en las notas musicales, está medido por la cantidad de vibraciones por segundo. Mejor conocido como frecuencia.

BOBINA MÓVIL: Arrollamiento de alambre sobre un soporte en el entrehierro de un altavoz.

BOMBO: parte fundamental de la batería que emite un sonido grave, es accionado por medio de un pedal.

CAJA ACÚSTICA: recinto rígido que dispone en su superficie de uno o varios altavoces.

CÁMARA ANECOICA: habitación cuyas superficies están cubiertas de materiales absorbentes para evitar reflexiones.

CARDIOIDE: patrón de directividad, con forma de corazón, en el que la sensibilidad es mayor en la parte frontal que en la posterior.

CARGA: resistencia que ha de vencer un dispositivo. En audio profesional las cargas son mecánicas, eléctricas o acústicas.

CHARLES: juego de platillos que se juntan o separan a través de un pedal.

CIRCUITO RESONANTE: es una red compuesta de una bobina y un condensador.

CLICS: clase de ruido en señales de audio.

COMPRESIÓN: 1. acción que realiza el compresor 2. En un altavoz indica la pérdida de nivel real con respecto al teórico por efecto de calentamiento.

COMPRESOR: dispositivo que atenúa las señales que exceden un nivel determinado.

CONDENSADOR: dispositivo que almacena energía eléctrica consistente en dos placas de material conductor separadas por un material no conductor.

CROSSOVER: arreglo de filtros enfocados a separar la frecuencia para poder luego ser reproducidas por altavoces determinados.

dB SPL: medida absoluta, en decibelios, de presión sonora referenciada a 20 micro pascales.

dB: decibelio, décima parte de un belio.

DIAFONÍA: acción por la cual la señal de un canal aparece en canales adyacentes, como por ejemplo del canal izquierdo al canal derecho.

DISTORSIÓN: alteración en la forma de onda de una señal, adición de nuevas frecuencias a la misma.

ECUALIZACIÓN: aumento o disminución de la energía en partes determinadas del espectro sonoro.

ECUALIZADOR: dispositivo que realiza la ecualización.

EFICIENCIA: relación entre la energía que entra en un dispositivo y la que sale. Normalmente se expresa en porcentaje.

ELECTRET: cuerpo dieléctrico en el que se ha producido un permanente estado de polarización.

ELECTROSTÁTICO: dispositivo que funciona por el principio de un condensador.

ENTREHIERRO: espacio del circuito magnético de un altavoz en el que se sitúa la bobina móvil.

ESPECTRO: contenido de frecuencias de una señal.

ESTEREOFÓNICO: es denominado generalmente al sonido grabado o reproducido por dos canales.

EXPANSOR: dispositivo de expansión de dinámica. Normalmente referido a un dispositivo que aplica una atenuación prefijada a las señales cuyo nivel no supera un nivel predeterminado.

FADER: termino en inglés para nombrar un potenciómetro deslizable.

FET: transistor de efecto de campo.

FILTRO: dispositivo electrónico que atenúa o elimina regiones del espectro.

GRAVES: sonidos que componen el espectro audible de bajas frecuencias

IMPEDANCIA: oposición a la corriente alterna. Es función de la frecuencia.

INDUCTOR: componente pasivo también conocido como bobina, el cual almacena energía en forma de campo magnético.

INTELIGIBILIDAD: se refiere a la claridad presente en la señal de audio.

LIMITADOR: dispositivo que limita el nivel de las señales a un nivel máximo establecido.

MASTERIZACIÓN: indica todo lo relacionado al procesamiento que tienen las señales de audio para generar una producción sonora.

MATIZ: es cada uno de los distintos grados o niveles de intensidad o de ritmo que se realizan en uno o varios sonidos.

MEDIOS: sonidos que componen el espectro de frecuencia audible media.

MEZCLA: combinación de varias señales de audio.

MONOFÓNICO: hace referencia cuando un solo canal lleva la información del sonido.

MOSFET: transistor de efecto de campo basado en la estructura MOS (metal oxido semiconductor)

MUESTREO: digitalización de una señal analógica a una determinada frecuencia y con una determinada cantidad de bits.

OCTAVA: banda de frecuencia que se sitúa entre una primera frecuencia y otra que es el doble de esta. Musicalmente en la escala occidental, supone el intervalo entre una nota musical y la octava superior o inferior de las escalas, abarcando 12 semitonos.

PIEZOELÉCTRICO: material que al ser sometido por una tensión mecánica produce una polarización eléctrica.

POTENCIÓMETRO: dispositivo eléctrico con resistencia variable que se utiliza para el control de parámetros en dispositivos eléctricos o electrónicos.

PUERTA DE RUIDO: dispositivo que enmudece las señales que no superan un nivel determinado.

REACTANCIA: oposición ofrecida al paso de la corriente alterna por inductores y condensadores.

REVERBERACIÓN: combinación de reflexiones acústicas percibidas por el oyente con un decaimiento continuo.

RECTIFICADOR: red electrónica encargada de realizar la conversión de una señal AC a DC.

REFLEXIÓN: fenómeno que ocurre cuando una onda sonora incide sobre un obstáculo que no puede traspasar ni rodear.

RUIDO: señal no deseada en sistemas de audio.

SLAP: técnica utilizada para tocar el bajo eléctrico, es muy usada en el funk.

SONIDO BRILLANTE: es un sonido limpio y claro, rico en armónicos.

SUSTAIN: hace referencia a cuánto dura sonando un sonido ejecutado por un instrumento, en él actúan factores como la construcción del mismo.

SÚPER CARDIOIDE: tipo de patrón de directividad en que la sensibilidad es mucho mayor en la parte frontal que en la posterior, es más direccional que el cardioide pero menos que el hipercardioide

TDH: distorsión armónica total. Medida de distorsión que intenta sumar los diferentes armónicos de distorsión de una señal.

TEMPO: es la velocidad con la que suele ejecutarse una pieza musical.

TIMBRE: conjunto de características que permiten distinguir un sonido de otro con la misma frecuencia y volumen.

TONO: representa la propiedad de los sonidos que los caracteriza como más graves o más agudos.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TÍTULO: Amplificación preamplificación y procesamiento de las señales de audio

AUTOR(ES): David Guillermo Acevedo Cárdenas

FACULTAD: Ingeniera electrónica

DIRECTOR(A): Raúl Restrepo Agudelo

RESUMEN

En esta obra se desea plantear o exponer de forma clara los conceptos y parámetros técnicos correspondientes al tema de la amplificación preamplificación y procesamiento de las señales de audio, entre ellas algunas de las técnicas más utilizadas para suprimir interferencias en la señal como el ruido, métodos para añadir efectos, dispositivos de ecualización entre otros. Abarcando desde los procesos de recolección de la señal por medio de micrófonos, hasta el nivel de reproducción por medio de altavoces.

El proyecto se encuentra dividido en ocho capítulos donde se representan las características de funcionamiento, parámetros representativos y diseño de algunas de las etapas por las cuales se desplaza una señal de audio para su pertinente reproducción amplificada.

La redacción de los capítulos presentes en el documento amplificación preamplificación y procesamiento de las señales de audio, se encuentra basada en la consulta y comprensión de diferentes tipos de libros, publicaciones, páginas de internet, etc. concernientes al tema de audio Hi Fi (alta fidelidad). Al final de cada capítulo se presentan las referencias utilizadas para la elaboración del mismo, con el fin dar el crédito necesario a cada uno de los autores, al igual que una serie de preguntas o ejercicios basados en el tema abordado.

El documento no es un texto en el cual se especifique como llegar a efectuar mantenimiento en los distintos tipos de sistemas de audio, este solo trata de mostrar de forma conceptual el procesado de audio.

En su totalidad el libro está dirigido a la comunidad estudiantil y docente de la Universidad Pontificia Bolivariana que tenga algún interés en incursionar en el interesante campo del procesado de señales de audio. Proporcionando por medio de este una completa guía de consulta teórica y elemento bibliográfico que sirva de base conceptual para futuras propuestas de proyectos en la institución.

PALABRAS CLAVE: Amplificación Amplificador Preamplificador Compresión
Ecuilización Efectos Altavoz Micrófono Transistores Audio.

GENERAL ABSTRACT OF WORK OF GRADE

TITLE: Amplification, preamplification and processing of audio signals
AUTHOR(S): David Guillermo Acevedo Cárdenas
FACULTY: Electronic Engineering
DIRECTOR: Raúl Restrepo Agudelo

ABSTRACT

In this book the author wants to explain concepts and technical parameters for the issue of amplification, preamplification, and processing of audio signals, including some of the techniques used to suppress noise and signal interference, methods to add effects, equalization devices and other. Including from the harvesting of the signal from the microphone to the level of reproduction through loudspeakers.

The project is divided into eight chapters that represent the characteristics of operation, representative parameters and design of some of the stages through which passes an audio signal for appropriate amplified reproduction.

The wording of the chapters present in the document amplification preamplification and processing of audio signals, is based on the consultation and understanding of different types of books, publications, websites, etc. concerning the issue of Hi Fi audio (high fidelity). At the end of each chapter presents the references used for the preparation thereof, to provide the credit necessary for each of the authors, as well as a series of questions or exercises based on the topics discussed.

The document is not a text in which you specify how to get to perform maintenance on various types of audio systems; this only shows the audio processing conceptually.

The entire book is addressed to the student community of the University who wants enter into the exciting field of audio signal processing. Thus generating a complete guide theoretical that serves as a conceptual basis for future projects in the institution.

KEYWORDS: Amplification Amplifier Preamplifier Compression Equalization Effects Speaker Microphone Transistors Audio.

INTRODUCCIÓN.

La introducción de la ingeniería electrónica en el área musical trajo grandes aportes a ella; antes lograr un concierto ante miles de espectadores era imposible. El desarrollo de transductores de entrada (micrófonos), transductores de salida (altavoces) y amplificadores logro que la música llegara a un número mayor de personas, en estos dispositivos la señal sonora sufre una serie de modificaciones para lograr en la etapa de salida un nivel de reproducción bastante alto.

En un principio, el micrófono se encarga de transformar las ondas sonoras en un movimiento mecánico, luego este es traducido en una señal eléctrica que depende de la presión ejercida en la parte frontal del dispositivo. El nivel de señal producida por el micrófono también depende de las características de construcción del mismo, si la señal generada es demasiado baja se agrega un sistema de preamplificación para llevarla a niveles adecuados.

En el parte de amplificación, la señal proveniente del micrófono es sometida a un proceso, donde un sistema electrónico conformado por transistores o tubos de vacío, se encarga de aportar un nivel de ganancia a la señal de audio. Existen varias configuraciones de amplificadores, donde cabe destacar que la clase A es una de las más importantes, además de ser la preferida por los músicos profesionales, con ella se logra una señal muy limpia pero con un consumo de corriente excesivo.

Finalmente la señal proveniente del amplificador con una ganancia determinada, es reproducida por un altavoz en donde se realiza el proceso inverso al de la etapa de transducción de entrada. En algunos casos la señal debe separarse en tres bandas (graves, medios, agudos) utilizando filtros crossover, cada una de ellas se reproduce por medio de altavoces especializados en trabajar en los diferentes rangos de frecuencia y con ello se logra cubrir todo el espectro de audio.

Pero la incursión de la electrónica en el ámbito musical no solo se enfoca en las tres etapas descritas anteriormente; existen sistemas encargados de aportar características determinadas a la señal de audio como lograr un equilibrio tonal en la pista, eliminar interferencias en la mezcla, etc. Algunos de los dispositivos utilizados para lograr esto, son sistemas de compresión, ecualización, reducción de ruido, procesadores de efectos entre otros.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un documento en el que se expliquen detalladamente las diferentes etapas del procesamiento de las señales de audio, generando una herramienta eficaz para el aprendizaje, que sirva de ayuda a consultas con información detallada, clara y de fácil acceso para todas aquellas personas que tengan interés sobre el tema de las señales de audio.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Exponer las etapas de preamplificación, ecualización, efectos, compresión, reducción de ruido, limitación, amplificación, acoplamiento de impedancias, filtrado, separación de frecuencias (crossover) activa y pasiva.
2. Exponer la metodología de diseño de algunas de las etapas anteriores.

CAPÍTULO 1 TRANSDUCTORES UTILIZADOS EN AUDIO

1.1 INTRODUCCIÓN

Los transductores son dispositivos capaces de transformar una señal de entrada en otro tipo de señal completamente diferente a la salida; son utilizados en un amplio campo, abarcando aplicaciones en audio, medicina, mecánica, química, etc.

En audio son de gran importancia para la captación y reproducción de las señales acústicas debido a que sin ellos el proceso de amplificación y procesamiento de la señal no tendría sentido; estos dispositivos se pueden dividir en dos tipos:

Transductores de entrada (micrófonos): son el primer elemento de la línea de procesamiento de señales de audio, se encargan de transformar el sonido en una respuesta eléctrica. Su funcionamiento depende de la presión ejercida por el sonido en ellos, siendo así proporcionales a la señal de audio incidente.

Transductores de salida (altavoces y auriculares): son los encargados de convertir la señal eléctrica a una señal acústica luego de ser procesada por las etapas de amplificación y preamplificación. El objetivo de los altavoces es generar, movimientos u oscilaciones en las partículas de aire por medio de vibraciones mecánicas. Esas oscilaciones se producen debido a la circulación de una corriente alterna (correspondiente a la señal de audio) a través de una bobina que se encuentra dentro del campo magnético producido por un imán permanente. Para mejorar su desempeño los altavoces deben ser instalados en cajas acústicas, optimizando las características de radiación sonora.

El funcionamiento de los auriculares es similar al de los altavoces electrodinámicos, con la única diferencia de que en ellos se requieren bajas potencias de radiación acústica, ya que son aplicados directamente sobre el oído.

El funcionamiento de micrófonos y altavoces es similar pero en sentido inverso; esto quiere decir que poseen las mismas características físicas. Los tipos más importantes de micrófonos son los electroestáticos, piezoeléctricos, dinámicos, magnéticos y de carbón.

En el presente capítulo se presenta el funcionamiento, las características físicas, y los tipos de transductores utilizados en la transformación de señales sonoras a eléctricas y viceversa.

1.2 MICRÓFONOS

Son el elemento que se encarga de la transformación de la señal sonora en energía eléctrica en la línea de audio. Este proceso se encuentra dividido en dos etapas; La primera es el cambio de energía acústica a mecánica; en ella la excitación de un diafragma por medio de las ondas sonoras genera un movimiento

que depende de la presión ejercida. La segunda etapa, se refiere a la transformación de la energía mecánica en energía eléctrica, Los movimientos generados por el diafragma son transformados en variaciones de voltaje en el tiempo, produciendo así una señal eléctrica. Algunas de las características técnicas más representativas de los micrófonos se presentan a continuación:

1.2.1 Características técnicas de los micrófonos

Los micrófonos poseen una cantidad de características técnicas, que suelen ser importantes a la hora de decidir qué dispositivo adquirir; estas características son:

1.2.1.1 Sensibilidad

Este parámetro se encuentra regido por la relación entre la presión sonora ejercida en la entrada del dispositivo y la energía eléctrica producida por él en la salida.

$$S = \frac{V}{P} \quad (1.1)$$

en donde:

S: sensibilidad del micrófono.

V: voltaje en la salida.

P: presión ejercida a la entrada.

Nota: La unidad de presión en el Sistema Internacional es el Pascal, que se presenta abreviadamente como Pa y equivale a 1 N/m^2).

Las unidades de esta transformación se especifican en mV/Pa.

Otra forma de representar la sensibilidad es en dB (decibeles), que se expresa de la siguiente manera:

$$S_{dB} = 20 \log_{10} \frac{S}{S_{ref}} \quad (1.2)$$

en donde:

S_{ref} : sensibilidad de referencia 1 V/Pa .

S_{ref} también suele expresarse en $\text{V}/\mu\text{bar}$. El microbar es equivalente a 0.1 Pa lo que indica que la sensibilidad dada en dB, tomando como presión de referencia $1 \mu\text{bar}$, es 20 veces menor que la especificada en Pa.

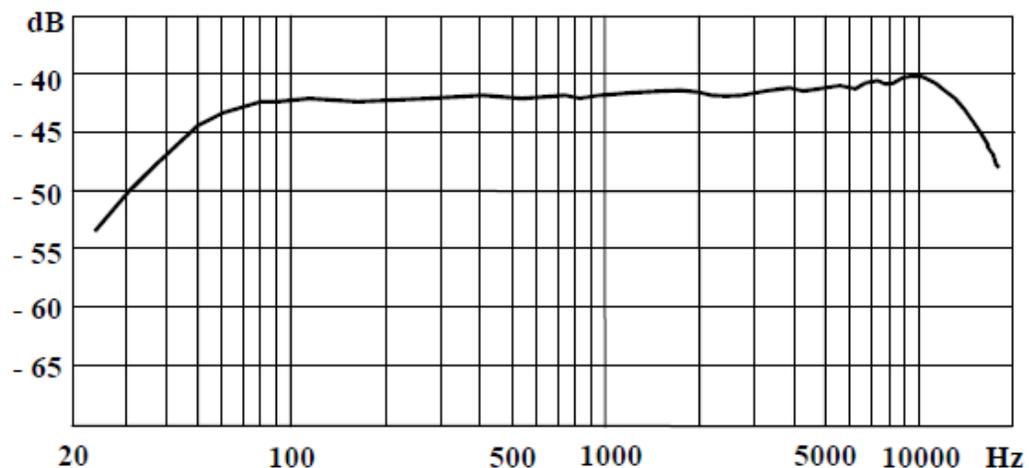
Cuanto mayor sea la sensibilidad presente en el micrófono, mejor será su funcionamiento con respecto a la salida de voltaje, de manera que en la etapa de preamplificación requerirá un nivel de ganancia más bajo para amplificar la señal.

1.2.1.2 Respuesta en frecuencia

Se puede ver como una representación de la respuesta de un sistema a entradas sinusoidales de frecuencia variable. Cuando dicho sistema es un micrófono, esta respuesta se determina a una presión específica. El rango de frecuencias en el que deben responder los micrófonos está comprendido entre 20 y 20kHz (rango audible del ser humano). El comportamiento ideal correspondería a una línea recta sin variaciones, lo que indicaría que no existirían alteraciones en la frecuencia al realizar la transducción, representando de esta manera un dispositivo de altísima fidelidad. Desafortunadamente el micrófono ideal no existe. Por esta razón al trabajar en distintas frecuencias se presentan diferentes amplitudes en la señal de salida, y, dependiendo del tipo de micrófono, se obtienen diferentes curvas de respuesta en frecuencia.

Un comportamiento no lineal no es un problema en los micrófonos. Por el contrario, en algunas aplicaciones como la grabación de instrumentos musicales, es necesario este tipo de comportamiento, debido a que en muchos casos se desea resaltar algunas partes del espectro sonoro del instrumento.

Fig. 1.1 Respuesta en frecuencia de un micrófono

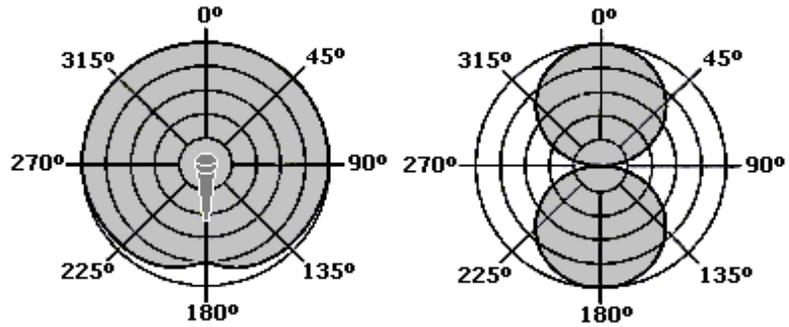


Fuente: [1]

La Fig. 1.1 representa la respuesta en frecuencia presente en un micrófono en función de su sensibilidad. En ella las variaciones presentes en el espectro comprendidas entre los 100 y 5kHz son muy bajas, lo cual indica un comportamiento casi plano para el dispositivo.

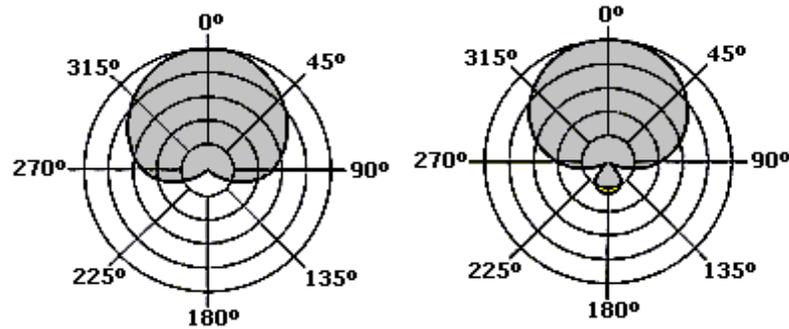
1.2.1.3 Directividad

Fig. 1.2 Tipos de respuesta polar en micrófonos



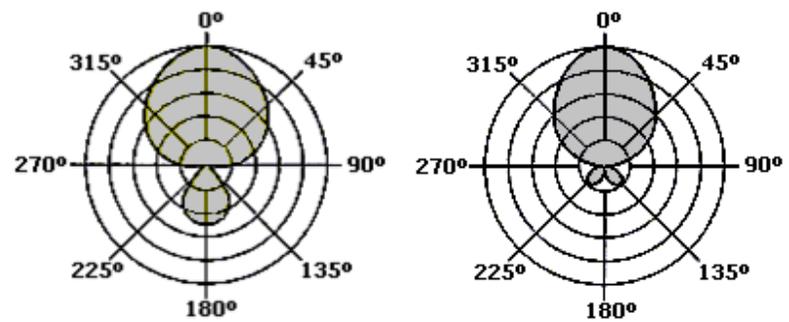
Respuesta omnidireccional

Respuesta bidireccional



Respuesta cardioide

Respuesta supercardioide



Respuesta hipercardioid

Respuesta ultracardioid

Fuente: [2]

La directividad representa la sensibilidad existente en un micrófono de acuerdo con su incidencia sonora. En otras palabras, muestra qué tan sensible es el micrófono de acuerdo con su orientación con respecto al ángulo de incidencia de la energía acústica. Un ejemplo claro en la naturaleza se da cuando una persona escucha un sonido; inmediatamente reacciona y gira la cabeza en el sentido en que se produjo, para tener una mejor captación. Esto se debe a que cada uno de los oídos percibe una diferente intensidad sonora dependiendo de la ubicación de la fuente.

Los micrófonos pueden clasificarse de acuerdo con su directividad como:

- Unidireccionales: captan señales en una sola dirección.
- Bidireccionales: captan señales en una o dos direcciones.
- Omnidireccionales: captan señales en todas direcciones.

La directividad se representa gráficamente por medio de diagramas polares en los que se muestra la respuesta del micrófono en función del ángulo de incidencia de la señal acústica. La Fig. 1.2 muestra el comportamiento de los anteriores tipos de micrófonos en términos de su directividad.

Los círculos concéntricos representan un mismo valor de sensibilidad en dB, en donde el mayor representa 0 dB y cada circunferencia interna representa una caída de -5 dB. En los micrófonos unidireccionales se pueden tener algunas variantes del diagrama polar, de forma que pueden ser cardioides, supercardioides, hipercardioides o ultracardioides.

1.2.1.4 Nivel de ruido

El nivel de ruido en un micrófono depende de la calidad de los componentes con que fue construido. El ruido se presenta por dos razones:

- Por el choque de las partículas del aire contra el diafragma.
- Debido al movimiento térmico de las partículas eléctricas.

El nivel de ruido se obtiene midiendo la tensión eléctrica producida por el micrófono al encontrarse sin ningún tipo de excitación sonora. Está especificado por los fabricantes en dB_{SPL} (decibeles en nivel de presión sonora).

1.2.1.5 Relación señal a ruido

Este parámetro se encuentra ligado a la diferencia entre la máxima presión sonora producida por el micrófono y el nivel de ruido propio. Entre mayor sea la señal y menor el ruido registrado, mejor será la relación. Además si la diferencia es mayor, el micrófono tendrá una mejor calidad.

1.2.1.6 Impedancia de salida

Se llama así a la oposición del flujo de corriente de la etapa de salida del micrófono; si el dispositivo es de baja impedancia, esta suele encontrarse entre 200 y 600 ohmios para frecuencias de 1kHz. Cuando la impedancia no es la adecuada para el sistema de audio, debe ajustarse por medio de preamplificadores o métodos de acople de impedancia, de otra manera suelen presentarse grandes pérdidas en la señal de audio.

La baja impedancia de salida permite que el ruido en el micrófono sea menor y este pueda ser conectado a cables más largos sin sufrir alteraciones en la calidad del sonido.

A la hora de realizar la conexión del micrófono a un sistema de sonido, se debe tener en cuenta que los equipos posean una impedancia de entrada similar o mayor para no generar problemas por pérdidas, ruidos, distorsiones entre otros. Es recomendable que antes de realizar cualquier conexión se observe bien el manual con las características técnicas especificadas por los fabricantes para evitar problemas.

1.2.1.7 Rango dinámico

El rango dinámico representa la diferencia entre el nivel de presión sonora más alto y más bajo que puede llegar a captar un micrófono sin alterar la señal. La construcción de un micrófono que ocupe todo el rango dinámico es complicada debido a que los dispositivos deben responder a señales acústicas altas sin producir distorsiones y además captar señales bajas sin generar pérdidas.

1.2.1.8 Distorsión

La distorsión es una deformación en la onda sonora producida, en este caso, por el micrófono; se hace presente mediante la aparición de armónicos en los diferentes niveles de frecuencia. En algunos casos dicha situación puede volver inservible la señal de audio.

Frecuentemente la distorsión suele ser confundida con el ruido, pero ambos pueden diferenciarse ya que el ruido es una señal añadida a la onda sonora y la distorsión una alteración de su forma de onda.

Existe un parámetro por medio del cual se puede calcular la distorsión total presente en una onda, es denominado TDH (Distorsión Armónica Total) y se expresa de la siguiente manera:

$$TDH = \frac{\sqrt{f_2^2 + f_3^2 + \dots + f_n^2}}{f_1} \quad (1.3)$$

En donde:

f_1 : es el valor eficaz de la componente fundamental de la onda.

$f_2, f_3 \dots f_n$: valores eficaces de los armónicos.

El TDH se expresa en función del porcentaje; por consiguiente, el resultado obtenido al reemplazar valores en la ecuación 1.3 debe ser multiplicado por 100. Básicamente la distorsión armónica total indica la cantidad de señal contenida en los armónicos.

1.2.1.9 Límite de saturación

El límite de saturación indica el máximo nivel de presión sonora al que pueden ser sometidos los micrófonos antes de que comiencen a generar distorsiones en la señal de salida. Esto depende puramente de las características de fabricación del dispositivo; por tal motivo, algunos de los transductores de entrada son integrados con un control de preamplificación para prevenir este tipo de eventos.

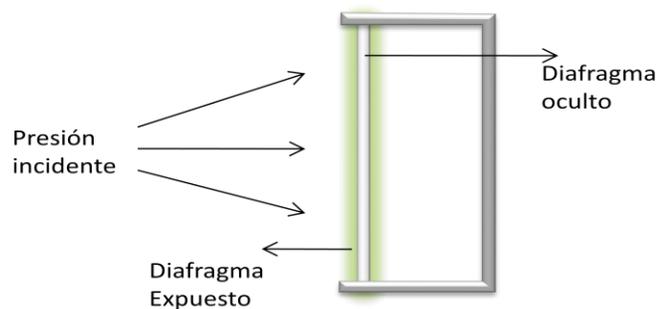
1.2.2 Clasificación general de los micrófonos

Generalmente los micrófonos se pueden dividir en tres clases. En esta parte del texto se presentan las características más representativas por las cuales se pueden llegar a diferenciar.

1.2.2.1 Micrófonos de presión

Los micrófonos de presión (Fig. 1.3) son transductores de entrada con características de captación de tipo omnidireccional. Su funcionamiento está ligado a la presión ejercida por las ondas acústicas en la parte descubierta del diafragma; la parte oculta se encuentra dentro de una cámara expuesta a una presión constante que sirve como presión de referencia.

Fig. 1.3 Micrófono de presión



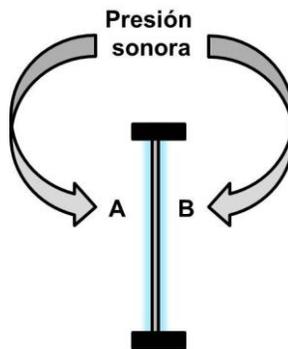
El nivel de captación del transductor, puede verse afectado al aumentar la frecuencia, produciendo atenuaciones en determinadas direcciones. El fenómeno se produce cuando la longitud de onda aumenta de tal forma que llega a

aproximarse al tamaño de la caja del micrófono, provocando que esta se comporte como un obstáculo para la onda incidente.

1.2.2.2 Micrófonos de gradiente de presión

Los micrófonos de gradiente de presión poseen características de captación bidireccional; en ellos la presión sonora es ejercida en ambas caras del diafragma. Su funcionamiento se encuentra basado en la diferencia de presión ejercida en los puntos A y B indicados en la Fig. 1.4, ya que las ondas sonoras no llegan al mismo tiempo en ambos lados del diafragma.

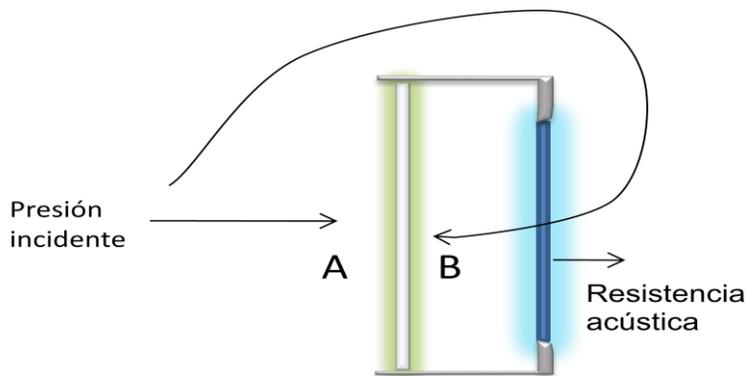
Fig. 1.4 Micrófono de gradiente de presión



Un problema frecuente en esta clase de dispositivos es una tendencia a alterar el timbre de la voz cuando existe una muy pequeña distancia entre el emisor (fuente sonora) y el receptor (micrófono).

1.2.2.3 Micrófonos combinados de presión y gradiente (Fig.1.5)

Fig. 1.5 Micrófono combinado presión y gradiente



Son de tipo unidireccional, están basados en las dos clases micrófonos expuestos anteriormente; así, entonces, responden a la presión y al gradiente de presión de las ondas sonoras. Durante su construcción se añade una resistencia acústica en

la apertura posterior de la cámara, es decir detrás del diafragma, para generar un retraso controlado en la señal incidente.

1.2.3 Micrófonos según su principio de transducción

De acuerdo con el proceso de conversión de energía acústica a eléctrica se pueden encontrar los siguientes tipos de dispositivos:

1.2.3.1 Micrófonos de resistencia o de carbón

Consisten en una cámara llena de carbón eléctricamente tratado, sellada por una membrana con terminales eléctricos en sus dos caras; los terminales están en constante conexión con una fuente de corriente continua y una resistencia.

El funcionamiento del dispositivo a la entrada depende de la variación resistiva en el carbón al enfrentarse a una variación de presión sonora determinada; estas variaciones generan cambios en el circuito de corriente continua, y son convertidas en niveles variables de voltaje.

Los micrófonos de carbón poseen un bajo costo al igual que una baja calidad. Fueron los primeros dispositivos de conversión sonora a eléctrica en elaborarse. Sus características en frecuencia son reducidas debido a que trabajan el rango comprendido entre 250Hz y 3kHz, su aplicabilidad se encuentra netamente centrada en la industria telefónica.

1.2.3.2 Micrófonos de cristal o piezoeléctricos

Su construcción utiliza materiales cristalinos como la sal de Rochelle o cuarzo, cortados en láminas. Estos poseen características piezoeléctricas, lo que indica que al ser excitados por un nivel de presión sonora en alguna de sus caras generan una determinada tensión.

La utilización de estos micrófonos en la industria del sonido es baja, debido a que sus características poco lineales y su construcción es demasiado costosa; además las variaciones de temperatura alteran las propiedades físicas de los materiales modificando aún más su respuesta.

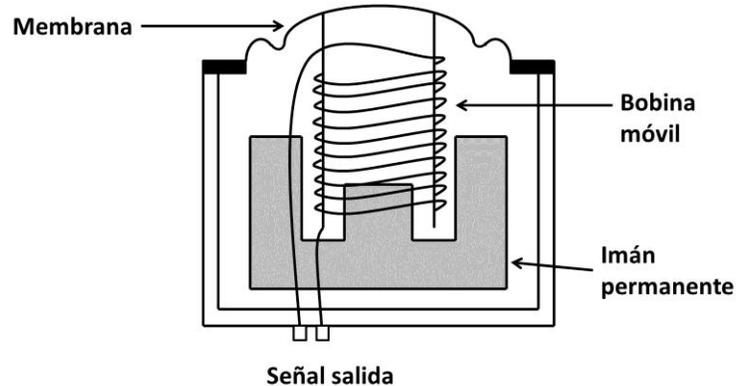
1.2.3.3 Micrófonos dinámicos o de bobina móvil

Se encuentran constituidos por una bobina situada en un entrehierro anular entre los polos magnéticos de un imán (Fig. 1.6), la cual es estimulada por medio de las ondas sonoras causando un movimiento dentro del campo magnético del imán. De este modo se produce una tensión eléctrica proporcional a la presión sonora ejercida.

Este dispositivo se construye de tal forma que la impedancia de salida es baja, tomando valores de entre 150 y 600 ohmios. Tienen la ventaja de que los

problemas ambientales como el calor o la humedad no son problema para ellos. Suelen ser un candidato excelente para el trabajo en estudios de grabación.

Fig. 1.6 Micrófono de bobina móvil



Fuente: [3]

1.2.3.4 Micrófonos de cinta

Su funcionamiento es similar al expuesto anteriormente; está compuesto por una cinta metálica de aproximadamente 5mm de ancho, 5 cm de largo y de 2 a 5 μ m de espesor, la cual se encuentra alojada en una cavidad rodeada de un imán que le proporciona un campo magnético constante. Las ondas sonoras generan oscilaciones en ella produciendo una tensión eléctrica en sus extremos.

El proceso de construcción de los micrófonos de cinta hace que tengan una gran sensibilidad y una excelente respuesta ante el sonido, aunque son muy sensibles al viento. Su manipulación debe ser efectuada en ambientes controlados como salas de grabación.

Los micrófonos de cinta son dispositivos robustos, muy confiables, pero su elaboración y diseño puede tener un costo elevado; además debe brindársele una excelente preamplificación, ya que la tensión eléctrica producida en su etapa de salida es baja.

1.2.3.5 Micrófonos de condensador (Fig. 1.7)

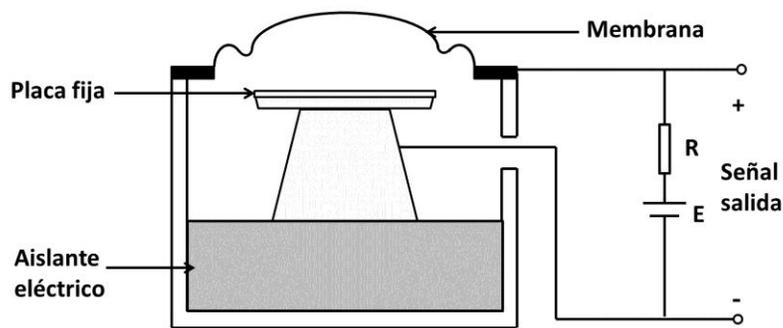
Su construcción requiere de un condensador en el que una de sus placas es móvil, el condensador debe ser polarizado por una fuente externa de forma que la vibración sonora produzca un movimiento en la placa móvil, generando así una variación en su capacitancia.

Los micrófonos de condensador, poseen una excelente respuesta en frecuencia, presentando un comportamiento casi plano; es por esta razón que se utilizan en sistemas de alta fidelidad.

Algunas de las deficiencias más notorias en estos micrófonos son la fragilidad y sensibilidad de sus componentes ante las variaciones de temperatura. Otra falencia es la alta impedancia de salida. Para solucionar este tipo de inconveniente, se debe implementar en la salida un preamplificador que reduzca el nivel de impedancia, para que pueda ser conectado a los sistemas de audio sin ningún problema.

Para garantizar un mejor comportamiento del dispositivo, el micrófono debe usarse en un ambiente idóneamente adecuado, es decir, en un estudio de grabación u otro recinto cerrado.

Fig. 1.7 Micrófono de condensador



Fuente: [3]

1.2.3.6 Micrófonos electret

Los micrófonos electret, poseen un funcionamiento similar a los micrófonos de condensador. Su placa móvil consiste en un elemento plástico con una de sus caras metalizada, llamada electret. Las características de fabricación de dicho material hacen que posea una polarización permanente. Por lo tanto no es necesaria una fuente externa para su excitación.

Existen dos versiones disponibles: omnidireccionales y cardioides. Cubren casi todo el espectro sonoro con una excelente fiabilidad, manejando frecuencias desde 50Hz hasta 15kHz pero con un rango dinámico más bajo que el de los micrófonos de condensador. Son una excelente elección en cuanto a costo y a fidelidad de trabajo.

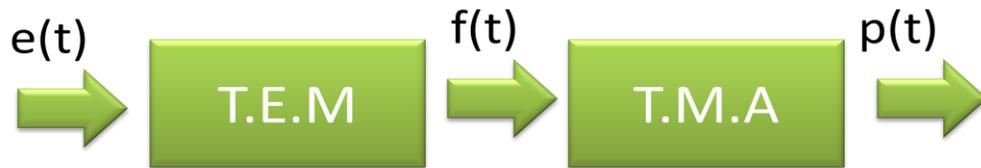
En general, la impedancia de salida en los micrófonos electret es alta, lo cual se soluciona con una excelente preamplificación para evitar problemas en la transmisión de señal.

1.3 ALTAVOCES

Los altavoces son el elemento final en el procesamiento de señales de audio. Su objetivo es realizar el cambio de una señal eléctrica a una acústica; también son

conocidos como transductores de salida de audio. El proceso de transducción es realizado en dos etapas. La primera se encarga de transformar la energía eléctrica en mecánica y en la segunda la mecánica en acústica (Fig. 1.8).

Fig. 1.8 Proceso transductor electroacústico



e(t): tensión eléctrica

f(t): fuerza

p(t): presión

T.E.M: Transductor electromecánico

T.M.A: Transductor mecánico-acústico

1.3.1 Características técnicas del altavoz

1.3.1.1 Sensibilidad

La sensibilidad se encuentra ligada al nivel de presión sonora ejercida por un altavoz cuando este es excitado por medio de una señal con una potencia de un vatio a una distancia de 1m. Con dicho proceso se puede determinar el nivel sonoro del transductor, trabajando a diversos valores de potencia.

La medición de la sensibilidad debe efectuarse en cámaras perfectamente adecuadas que eviten todo tipo de interferencia sonora. La ecuación que se presenta a continuación permite calcular la variación del nivel de presión sonora (NPS).

$$\Delta NPS_{dB} = 10 \log_{10} \frac{S}{S_{ref}} \quad (1.4)$$

S: Presión registrada.

S_{ref}: Presión de referencia 1W.

ΔNPS: Variación de nivel de presión sonora.

1.3.1.2 Respuesta en frecuencia

Los altavoces se caracterizan por no poder reproducir todo el espectro de frecuencia audible, sólo pueden exaltar determinado rango de bandas, por lo tanto existen varios tipos de ellos que resaltan el sonido en ciertas sub-bandas como: graves, sub-graves, medios, agudos y súper-agudos.

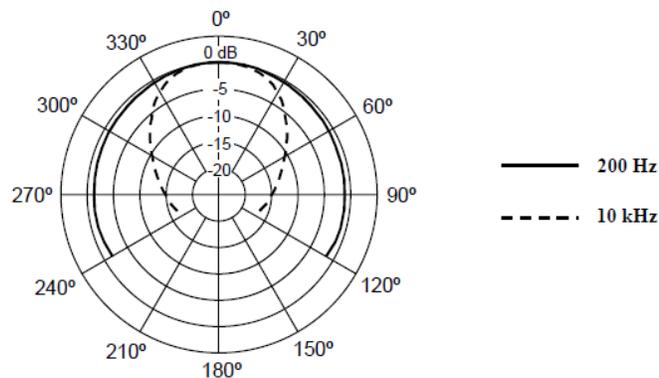
Las curvas de respuesta, brindan información de forma clara sobre el comportamiento del altavoz en determinada frecuencia. El registro de dichos datos debe realizarse en cámaras anecoicas, que evitan la reflexión de las ondas; ya que, el eco producido puede generar inconvenientes en el registro del parámetro.

Entre toda la línea de audio posiblemente el dispositivo más irregular en las respuestas de frecuencia es el altavoz. Las variaciones en el análisis pueden llegar a tener valores de $\pm 10\text{db}$. Por lo tanto, para reducir este fenómeno, los altavoces son instalados en cajas acústicas que minimizan en parte la fluctuación de la señal.

1.3.1.3 Directividad

Indica la variación existente en la sensibilidad o nivel de presión sonora que posee un baffle en determinada dirección. La directividad suele medirse aplicando al altavoz un tono puro de frecuencia constante y girándolo en un plano hasta lograr un giro total de 360° . Este proceso de medición se repite para nuevas frecuencias, barriendo normalmente todo el espectro audible y se hace tanto para el plano horizontal como para el plano vertical.

Fig. 1.9 Diagrama Polar del comportamiento de un altavoz



Fuente: [1]

La Fig. 1.9 muestra un ejemplo de patrón de radiación, y se ven los ángulos en que un altavoz posee una mejor radiación del sonido; las características presentes en el plano polar muestran una radiación de sonido de tipo unidireccional para altas frecuencias, mientras que para bajas puede tener un comportamiento casi omnidireccional. Como se observa, el patrón de radiación difiere según la frecuencia en la que se trabaje el altavoz.

1.3.1.4 Impedancia

La impedancia del altavoz brinda información sobre las características de acople del mismo con la etapa de salida de audio. La impedancia de entrada de los altavoces es de unos cuantos ohmios, pero su valor puede variar con la frecuencia.

Existe un valor de frecuencia, para el cual la impedancia obtiene su valor máximo y es denominado frecuencia de resonancia. Cuando la frecuencia se encuentra por encima de este valor la impedancia decrece llegando a un nivel mínimo (impedancia nominal del altavoz).

1.3.1.5 Rendimiento o eficiencia

La eficiencia en un altavoz, está determinada por la relación entre la potencia generada por el altavoz y la consumida por el mismo. Es expresada en porcentaje; el parámetro permite al diseñador conocer la potencia necesaria en la etapa de amplificación para obtener un nivel determinado de radiación sonora en el transductor de salida.

$$\text{Eficiencia} = \frac{P_{\text{acustica}}}{P_{\text{electrica}}} \times 100\% \quad (1.5)$$

La eficiencia de los altavoces en general es muy baja; particularmente los valores registrados son menores o iguales a un 10%. Pero la baja eficiencia no es problema debido a que no se requiere un nivel alto de potencia acústica para radiar un máximo nivel sonoro.

1.3.1.6 Potencia eléctrica

Este parámetro, brinda información sobre la potencia mínima y máxima que es capaz de soportar un altavoz. La mínima potencia indica el nivel necesario para que el dispositivo logre una radiación sonora confortable. La máxima potencia determina el valor límite con el que puede trabajar el altavoz sin producir alteraciones en la onda de audio como atenuaciones o distorsiones. Esta última se encuentra ligada a la sensibilidad del altavoz.

1.3.1.7 Distorsión

La distorsión en los altavoces es más notoria que en cualquier otro elemento existente en el procesado de señales de audio. La mayoría de ella se encuentra en el segundo y tercer armónico de las señales, lo que ocasiona una alteración de los tonos graves. Para las tonalidades altas o agudas la distorsión es cercana al 1%, por lo que no representa ningún tipo de problema apreciable para la difusión de la señal.

1.3.2 Principio de funcionamiento

Los altavoces basan su funcionamiento en la interacción entre los campos magnéticos generados por los imanes y la bobina del dispositivo. Al ser excitada la bobina con una corriente eléctrica proveniente de una fuente, comenzará a producir un campo magnético; de acuerdo con la polaridad relativa entre el imán y la bobina, se efectúa un movimiento debido a la atracción y repulsión magnética; de esta forma se genera un movimiento mecánico que excita las partículas de aire produciendo un sonido.

1.3.3 Clasificación de los altavoces

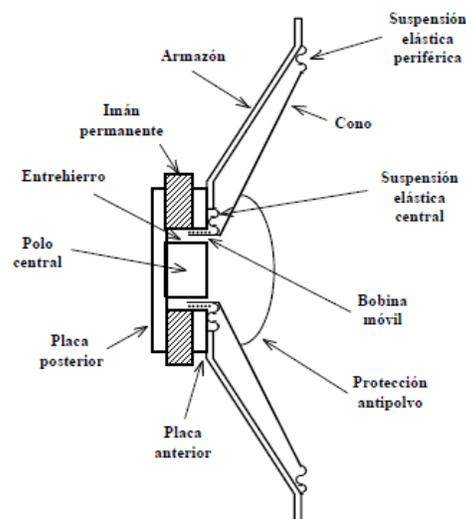
Según el principio de transducción, los altavoces pueden clasificarse en:

1.3.3.1 Altavoz dinámico o de bobina móvil

Fue el primer dispositivo en desarrollarse (Fig. 1.10) y aún en nuestros días es el más popular para aplicaciones de audio. A continuación se describen las partes más importantes que lo componen:

Diafragma: es una estructura de forma cónica ligada a la bobina, con ello se otorga mayor rigidez, además de una radiación sonora de tipo unidireccional. Está compuesta de un tipo de cartón fibroso cubierto por una resina que le proporciona una excelente dureza. En el centro del diafragma es instalada una tapa que protege el entrehierro (ver Fig. 1.10) de filtraciones de polvo que puedan ocasionar algún tipo de fricción y que alteren el funcionamiento del mismo.

Fig. 1.10 partes altavoz dinámico



Fuente: [1]

Bobina móvil: compuesta de un alambre metálico, preferiblemente de cobre o aluminio para reducir peso. Este es enrollado de manera circular en un cilindro de papel o aluminio para lograr una excelente disipación de calor. Las dimensiones del cilindro deben garantizar el libre movimiento de la bobina en el entrehierro.

Imán: es un elemento construido mediante una aleación de metales con altas propiedades magnéticas. Su forma es redondeada para producir un campo magnético total en el área de la bobina. Cuanto más potente sea el imán, mayor será la calidad del sonido del altavoz.

Chasis o carcasa o armazón: es una estructura fuerte, robusta, resistente a las vibraciones continuas y capaces de acoplar todos los elementos del altavoz de una forma estable. Se construyen con un material metálico prensado o fundido; el primero puede generar problemas de distorsión y por tal razón se utiliza el segundo para evitar dichos inconvenientes.

1.3.3.2 Altavoz electrostático

Su funcionamiento se encuentra basado en la vibración de una placa sometida a campo eléctrico; esta actúa como si fuera un condensador de grandes dimensiones al cual se le aplica una diferencia de potencial proporcional a la señal que se quiere emitir.

El desplazamiento de diafragma producido en este tipo de dispositivos es pequeño, así proporciona una excelente respuesta transitoria, pero su rendimiento se ve afectado y es muy bajo.

Una característica singular del altavoz electrostático es no poseer una caja acústica, por tanto se logra eliminar todo tipo de resonancias producidas por ellas. Al igual que posee propiedades favorables existe también un defecto en esta clase de transductores y es su alta impedancia capacitiva; por tal razón, un número muy reducido de amplificadores pueden trabajar con estos dispositivos.

1.3.3.3 Altavoz plano

Este tipo de altavoz como proceso de investigación del Departamento de Defensa del Reino Unido, cuando se disponían a crear un tipo de compuesto para realizar helicópteros más livianos. Luego del proceso de investigación del elemento, se descubrió que el material poseía características idóneas para generar emisiones dentro del rango audible.

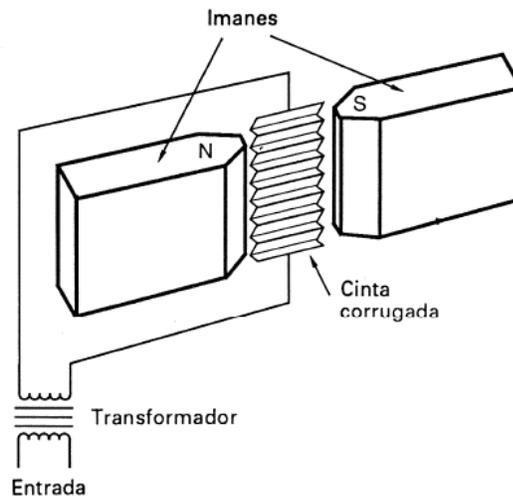
En los altavoces planos la radiación sonora se realiza de forma puntual omnidireccional. El sonido radiado se dispersa homogéneamente en todas las direcciones, trabajando en frecuencias bajas y medio-altas. Son utilizados como etapa de refuerzo sonoro.

1.3.3.4 Altavoz de cinta

Su elaboración requiere de una lámina corrugada móvil de un material con características eléctricas conductoras, esta se encuentra sometida al campo magnético generado por un imán. La cinta es excitada por medio de una corriente que induce un movimiento por la acción de atracción y repulsión entre la cinta y los imanes. Las oscilaciones generadas en las partículas de aire producen una muy baja señal acústica y por consiguiente se deben colocar bocinas para mejorar la radiación sonora.

Los altavoces de cinta trabajan entre 1kHz y 20kHz, mostrando así un excelente ancho de banda. En la Fig. 1.11 se puede observar la configuración interna de esta clase de transductor.

Fig. 1.11 Configuración interna altavoz de cinta



Fuente: [4]

1.3.3.5 Altavoces piezoeléctricos

Su funcionamiento se basa en las características de deformación que presentan algunos elementos cuando son sometidos a un campo eléctrico. Un ejemplo de ellos es la sal de Rochelle.

El uso de los altavoces piezoeléctricos se encuentra restringido sólo para frecuencias altas y debido a su alta impedancia. Su aplicabilidad está vinculada con la radiación de sonidos agudos ya que solo genera pequeños desplazamientos de aire.

1.3.4 Clasificación de altavoces según el rango de frecuencia

La necesidad de abarcar todo el espectro de frecuencias audibles genera tres tipos de altavoces los cuales se describen a continuación:

1.3.4.1 Woofer

Es utilizado para cubrir rangos de frecuencia menores a 500 Hz. Para conseguir que el altavoz emita a frecuencias bajas, la frecuencia de resonancia debe ser muy pequeña. El aumento del diafragma hace que esto suceda ya que el tamaño y la frecuencia son inversamente proporcionales y por consiguiente entre mayor sea el diafragma menor será la frecuencia de resonancia.

En algunos casos los altavoces de bajos son divididos en dos: subwoofers que cubren el espectro de 20 a 100 Hz y woofers que se encargan de cubrir el resto de banda (100 a 500 Hz).

Los diámetros característicos de un woofer se encuentran entre 15 y 45 cm.

1.3.4.2 Midrange

Es el altavoz encargado de cubrir el espectro medio de la señal audible comprendida entre 500Hz y 3kHz. La respuesta en frecuencia del altavoz de medios es excelente, debido a que el oído humano presenta muy buena sensibilidad a este tipo determinado de frecuencias.

Aunque su tamaño no es tan grande como el de los woofers, el diámetro del altavoz puede variar aproximadamente entre los 10 y 15cm. Además su construcción requiere de una cámara cilíndrica que los recubra para evitar las perturbaciones de radiación.

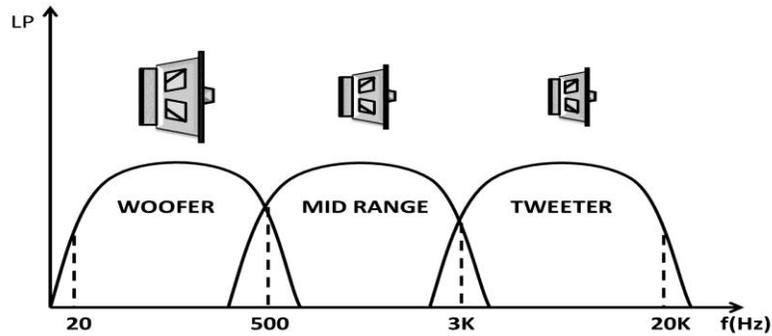
1.3.4.3 Tweeter

Son el tipo de altavoz utilizado para cubrir el rango de alta frecuencia en audio, es decir, su actuación se centra en las tonalidades agudas. Ocupan un margen de frecuencia encontrado entre los 3kHz y los 20 kHz, algunas veces más, otras menos, dependiendo de su calidad. Para mejorar su funcionamiento, en ocasiones se agrega una bocina llamada trompeta que eleva su respuesta a altas frecuencias; dicho elemento es encargado de enfatizar los sonidos agudos.

El tweeter suele ser el altavoz más pequeño de los nombrados anteriormente; su diámetro oscila entre 2.5 y 10cm.

La Fig. 1.12 muestra la distribución de las frecuencias de trabajo para los altavoces tweeter, woofer y midrange.

Fig. 1.12 Respuesta en frecuencia de altavoces



Fuente: [3]

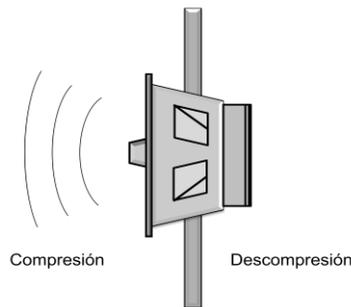
1.3.5 Cajas acústicas

Los altavoces son montados en cajas acústicas para mejorar su radiación sonora. Al emitirse un sonido por parte del altavoz, se genera una compresión en el aire por la parte frontal del dispositivo, mientras que en la parte trasera se crea una descompresión. Si el altavoz no se fija en un recinto acústico se produce una cancelación del sonido emitido, debido a la oposición de fases entre ambas partes del transductor. A continuación se presentan algunos de los sistemas utilizados para solucionar este problema:

1.3.5.1 Bafle infinito (Fig. 1.13)

Un ejemplo del bafle infinito suele ser una pared con un woofer instalado en ella, de este modo se logra separar cada una de sus caras evitando la oposición entre las fases o cortocircuito acústico.

Fig. 1.13 Bafle infinito



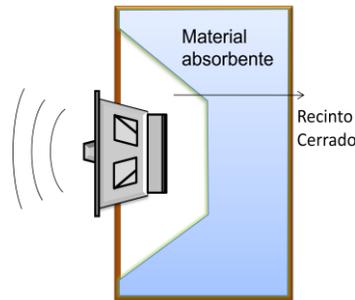
El bafle infinito es uno de los mejores sistemas para la eliminación del corto circuito acústico, ya que permite aprovechar la totalidad del sonido radiado por el altavoz sin generar ningún tipo de problema de resonancia. Sin embargo, debido a su gran tamaño es un recinto muy poco práctico.

1.3.5.2 Caja cerrada (Fig. 1.14)

Consiste en un recinto completamente cerrado construido en un material absorbente con el fin de eliminar la radiación posterior del altavoz. El recinto presenta varios inconvenientes; uno de ellos es la generación de calor por medio de la descompresión continua generada por la parte trasera del altavoz. Otro problema es la variación en la frecuencia de resonancia debido que la caja acústica modifica la elasticidad del altavoz.

Este tipo de bafles es muy utilizado en sistemas que requieran de poca potencia y tamaño reducido, por tanto su utilización con altavoces de tipo woofer no es adecuada.

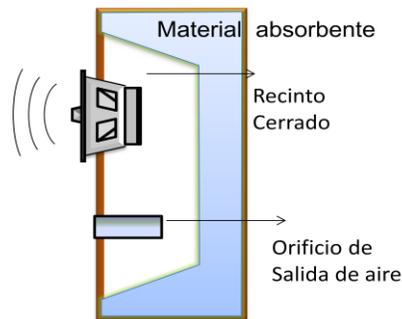
Fig. 1.14 Baffle cerrado



1.3.5.3 Caja bass réflex (Fig. 1.15)

Es un recinto similar al baffle cerrado, cuenta con un orificio donde es ubicado el altavoz pero además otro orificio más pequeño, donde se ubica un cilindro hueco por el cual la señal radiada en la parte posterior del altavoz es emitida al exterior. Lo anterior permite resaltar las frecuencias bajas en el dispositivo sin crear efectos de cortocircuito acústico. El diámetro y largo del cilindro debe ser diseñado con mucho cuidado, ya que el aire presente en la parte interior debe moverse en fase con la señal producida por el altavoz a la frecuencia en que ha sido sintonizado.

Fig. 1.15 Baffle bass réflex



1.3.5.4 Caja con radiador pasivo

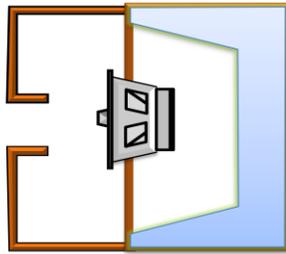
Es una modificación del réflex, en donde el cilindro encargado de enfatizar los bajos es sustituido por un radiador de tipo pasivo con la misma función pero con un funcionamiento diferente. El radiador es un altavoz sin imán, ni bobina que se instala con el objetivo de radiar el sonido de una manera controlada ya que en la anterior aplicación el aire se mueve de forma descontrolada.

1.3.5.5 Caja pasa banda (Fig. 1.16)

Consiste en un recinto similar al réflex al cual se le añade una caja resonadora que actúa como limitador de la banda pasante del sistema. El altavoz es montado de tal manera que la parte posterior del dispositivo se encuentra en una caja cerrada y la parte delantera en un recinto de caja abierta.

Este tipo de configuración se ha hecho bastante popular en los sistemas de sonido de teatros en casa.

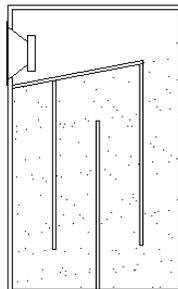
Fig. 1.16 Bafle pasa banda



1.3.5.6 Caja de laberinto

Su construcción consiste en un tubo largo en el interior rodeado de material absorbente; dicho tubo se distribuye como se muestra en la Fig. 1.17. Esta forma logra reforzar la onda producida por la parte posterior del diafragma, dependiendo de la longitud que recorra la señal acústica.

Fig. 1.17 Laberinto acústico



Fuente: [5]

Una de sus principales ventajas es su baja o nula resonancia excesivo refuerzo de los sonidos graves; la desventaja más notoria en este tipo de caja acústica es su gran tamaño y su compleja distribución y construcción interior.

1.3.5.7 Caja de línea de transmisión

El objetivo primordial de este tipo de recintos es generar que la onda producida por la parte delantera del altavoz entre en fase con la onda de la parte posterior, esto se logra por medio de la gran distancia que debe recorrer el aire para salir al exterior. Un ejemplo de cómo luce la caja de línea de transmisión es mostrado en la Fig. 1.18.

Fig. 1.18 Configuración línea de transmisión



Fuente: [5]

Como ventaja principal, la caja de línea de transmisión logra un refuerzo con respecto a la radiación de frecuencias bajas, además su respuesta temporal es muy buena y esto conlleva a que el sistema tenga poca distorsión.

1.4 AURICULARES

Los auriculares son dispositivos similares a los altavoces pero en una escala más pequeña; constan de una bobina de cobre y un diafragma. Entre más vueltas de alambre de cobre posean las bobinas mejor es el sonido del dispositivo. Cada vuelta tiene un peso de menos de 9 millonésimas de gramo. El diafragma está conformado por una lámina metálica delgada de titanio recubierta de una película plástica generalmente del mismo material que se fabrica el poliéster sólo que es 30 veces más delgada que una hoja de papel. La capa de titanio sobre la película plástica la fortalece y le agrega peso adicional. La bobina y el diafragma se unen para generar el sonido.

Los auriculares son dispositivos discretos y privados; su configuración permite reproducir muy bien tanto las bajas frecuencias como las altas frecuencias. Permitiendo escuchar sin ningún tipo de pérdidas o interferencias externas.

1.4.1 Clasificación

Existen tres categorías básicas de auriculares; estas son presentadas a continuación:

1.4.1.1 Auriculares abiertos

Un auricular abierto o de aire libre (Fig. 1.19) es un dispositivo de reproducción sonora ubicado fuera de la oreja, muy a menudo apoyado sobre un cojín de espuma reticulada que permite aislamiento acústico. Este tipo de dispositivos no logra aislar completamente los sonidos externos pero los mejores modelos pueden lograr una muy clara reproducción. La cara posterior de la membrana de los auriculares abiertos se encuentra completamente abierta al aire libre lo que ayuda a dar un sonido más fino, natural, abierto y bien ventilado, pero no logra excluir los ruidos del exterior.

Fig. 1.19 Auriculares abiertos



Fuente: [6]

1.4.1.2 Auriculares cerrados

Fig. 1.20 Auriculares cerrados



Fuente: [7]

A esta categoría pertenecen los auriculares circumaurales, que se encuentran cerrados completamente (Fig. 1.20), generando con ello un aislamiento casi

completo. De igual manera evitan que el sonido reproducido en ellos salga al exterior. La principal ventaja de esta clase de dispositivos es que al cerrarse alrededor de la oreja, es posible acoplar la presión generada por el diafragma con el tímpano, logrando buenas respuestas a muy bajas frecuencias, con características lineales hasta los 20 Hz. Lo anterior depende de la buena calidad del audífono.

Los auriculares cerrados poseen una reproducción sonora más oscura y con menos brillos en relación con los abiertos.

1.4.1.3 Auriculares intraurales

Los auriculares intraurales (Fig. 1.21), se sitúan en la parte interior del oído. Su tamaño es más pequeño que los dos nombrados recientemente, y debido a esto tienen un peso más liviano y una reproducción más personal. En algunos casos, por su reducido tamaño, la reproducción de bajos se ve afectada haciéndola menos perceptible al oído.

Fig. 1.21 Auriculares intraurales



Fuente: [8]

1.4.2 Beneficios y Peligros

El uso de auriculares en el diario vivir trae consigo beneficios tales como efectuar reproducciones sonoras de manera discreta y personal; esto quiere decir que el sonido no causa molestias a otras personas. Además el auricular puede lograr una excelente calidad de sonido comparable con la de equipos de altavoces de alta fidelidad, sin tener que recurrir a diferentes tipos de ellos para cubrir todo el espectro sonoro.

Últimamente el uso de auriculares en la industria de videojuegos ha sido muy útil, logrando por medio de ellos efectos de posicionamiento 3D de audio. Un ejemplo suele encontrarse en los juegos de consolas avanzadas donde el sonido puede

indicar si un enemigo se encuentra a la derecha o a la izquierda sin haberlo visto.

No todo es bueno en el área de los transductores de tipo auricular. Estudios efectuados en años anteriores han descubierto que el uso frecuente de este dispositivo a niveles altos puede ocasionar sordera temporal o permanente, así pues, el uso de auriculares debe hacerse de manera prudente y a un volumen moderado. En algunos países incluso se han creado reglamentaciones para evitar que los reproductores de mp3 como el iPod superen un nivel sonoro determinado.

1.5 PREAMPLIFICACIÓN

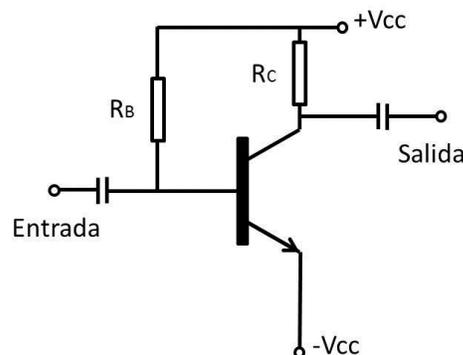
Muchas veces los micrófonos necesitan de una etapa en la cual se solucionen los problemas generados por los bajos niveles de tensión entregados por el dispositivo. La preamplificación es la etapa encargada de brindar un aumento a la señal de audio en este punto. Además es una parte crítica debido a que el ruido introducido en este sector puede aumentarse en las siguientes etapas. Por dichas razones la preamplificación debe ser tan limpia como sea posible.

Mediante la utilización de transistores la configuración más conocida para realizar una etapa de preamplificación es la amplificación en modo emisor común, en ella la señal de entrada se aplica entre el emisor y la base y la señal amplificada se obtiene entre el colector y el emisor

Existe una manera de lograr que la corriente de base tenga un control sobre la corriente de colector esta es denominada polarización y puede encontrarse en tres formas:

- Polarización directa (Fig. 1.22).
- Polarización por contrarreactión de tensión (Fig. 1.23).
- Polarización por divisor de tensión (Fig. 1.24).

Fig. 1.22 Polarización directa



Fuente: [9]

1.5.1 Polarización directa

En la Fig. 1.22 se puede observar la manera de polarizar un transistor en forma directa en modo emisor común; de donde se pueden obtener las siguientes ecuaciones:

$$I_E = I_C + I_B \quad (1.1)$$

en donde:

I_E : Corriente de emisor.

I_C : Corriente de colector.

I_B : Corriente de base.

Para calcular los voltajes existentes en el circuito se debe tener en cuenta la caída de tensión presente entre la base y emisor del transistor que generalmente se encuentra en un valor aproximado a 0.7V. Con lo anterior podemos deducir una ecuación mediante la cual determinar el voltaje en la base (ecuación 1.2).

$$V_B = \frac{V_{CC} - 0.7}{I_B} \quad (1.2)$$

en donde:

V_B : Voltaje en la base.

V_{CC} : Voltaje de la fuente de alimentación.

Si se elige una corriente de polarización en la base determinada se puede calcular el valor de la resistencia de base.

La corriente que circula por el colector se puede determinar por medio de (ecuación 1.3):

$$I_C = \beta * I_B \quad (1.3)$$

en donde:

β : ganancia del transistor.

Finalmente obteniendo los valores de la corriente de colector se puede determinar la resistencia del colector de la siguiente forma:

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{I_C} \quad (1.4)$$

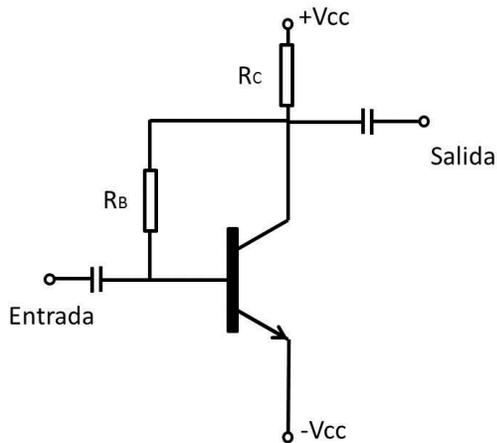
en donde:

V_{CE} : voltaje entre colector y emisor.

1.5.2 Polarización por contrarreacción de tensión

La configuración de polarización por contrarreacción de tensión se diferencia de la polarización directa ya que la base se encuentra conectada al colector por medio de una resistencia R_B .

Fig. 1.23 Polarización por contrarreacción de tensión.



Fuente: [9]

De la Fig. 1.23 se puede deducir la siguiente igualdad:

$$V_{CC} = V_C + V_B + 0.7 \quad (1.5)$$

Por la resistencia de colector circulan las corrientes de base y de colector por lo tanto la tensión vista por el colector será:

$$V_C = R_C(I_C + I_B) \quad (1.6)$$

Y el voltaje de la base tendrá un valor igual a:

$$V_B = I_B * R_B \quad (1.7)$$

Sustituyendo la ecuación 1.6 y 1.7 en la ecuación 1.5 obtenemos:

$$V_{CC} = R_C(I_C + I_B) + I_B * R_B + 0.7 \quad (1.8)$$

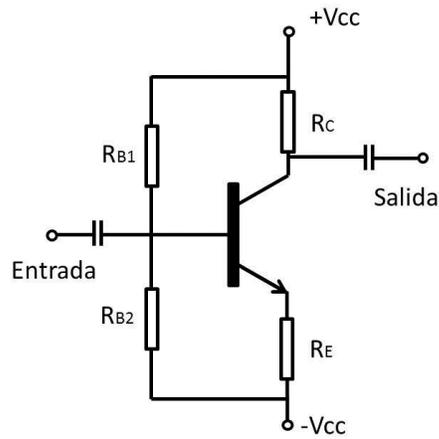
Sabiendo que la corriente de colector es igual a $\beta * I_B$ y reemplazando en (1.8) se obtiene una ecuación para determinar la corriente presente en la base:

$$I_B = \frac{V_{CC} - 0.7}{(\beta + 1)(R_C) + R_B} \quad (1.9)$$

1.5.3 Polarización por divisor de tensión

La polarización por medio de divisor de tensión se encarga de fijar un voltaje en la base del transistor por medio de dos resistencias R_{B1} y R_{B2} como se observa en la Fig. 1.24.

Fig. 1.24 Polarización por divisor de tensión



Fuente: [9]

El voltaje presente en la base del transistor se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$V_B = V_{CC} \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} \quad (1.10)$$

A continuación por medio del paralelo de R_{B1} y R_{B2} se calcula el valor de la resistencia de Thevenin (R_{TH}):

$$R_{TH} = \frac{R_{B1} * R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \quad (1.11)$$

Con las dos ecuaciones anteriores y conociendo los valores de R_E y ganancia del transistor se puede determinar la corriente de base:

$$I_B = \frac{V_{B1} - V_{BE}}{R_{TH} + R_E(\beta + 1)} \quad (1.12)$$

Por la resistencia R_E circula una corriente igual a la suma de las corrientes de colector y base, así:

$$I_E = I_B + I_C \quad (1.13)$$

Reemplazando de la ecuación 1.3 en 1.13 se obtiene:

$$I_E = I_B(\beta + 1) \quad (1.14)$$

El voltaje visto por la resistencia R_E será igual a:

$$V_E = I_B(\beta + 1)(R_E) \quad (1.13)$$

Y finalmente el voltaje presente entre el colector y emisor del transistor se calcular por medio de:

$$V_{CE} = V_{CC} - V_C - V_E \quad (1.14)$$

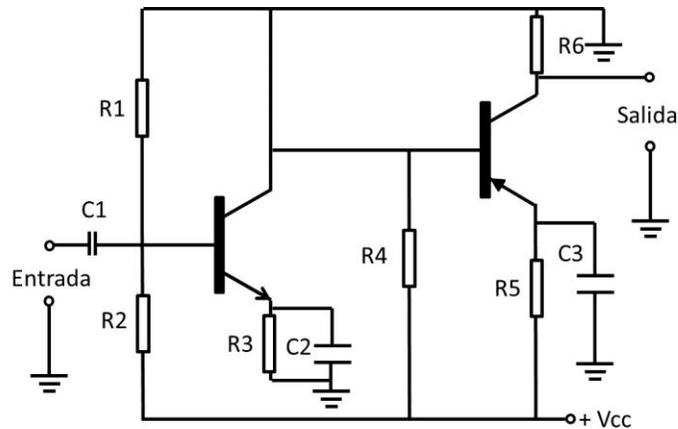
1.6 ACOPLAMIENTO ENTRE ETAPAS PREAMPLIFICADORAS

Producir la ganancia necesaria para atacar la etapa de potencia con una sola etapa de preamplificación es casi imposible, ya que no produce el voltaje necesario para este fin, por esta razón los preamplificadores se forman de dos o tres etapas amplificadoras acopladas entre sí.

1.6.1 Acoplamiento complementario

Es el sistema de acoplamiento más difundido, en él se utilizan un transistor PNP y otro NPN (Fig. 1.25).

Fig. 1.25 Polarización por divisor de tensión



Fuente: [9]

El circuito de la figura 1.25 muestra dos amplificadores acoplados por acoplamiento complementario, donde R_1 y R_2 fijan el voltaje en la base de la

primera etapa, R3 la resistencia de autopolarización en el NPN y R4 la carga del primer transistor, esta se ocupa del acoplamiento.

Cuando no existe ninguna señal en la base de la etapa NPN, la resistencia R4 polariza de manera apropiada la etapa PNP; al existir una señal positiva en la base del primer transistor, la base del segundo se hace negativa, aumentando la corriente del colector de la segunda etapa. Si existe una señal negativa en el NPN, la base del segundo se hace menos negativa, disminuyendo así la corriente del colector del PNP.

1.7 PREAMPLIFICADORES INTEGRADOS

El preamplificador integrado por excelencia es el amplificador operacional (AO). Con ellos se logra minimizar el tamaño de los equipos, una reducción de costo en los mismos, etc.

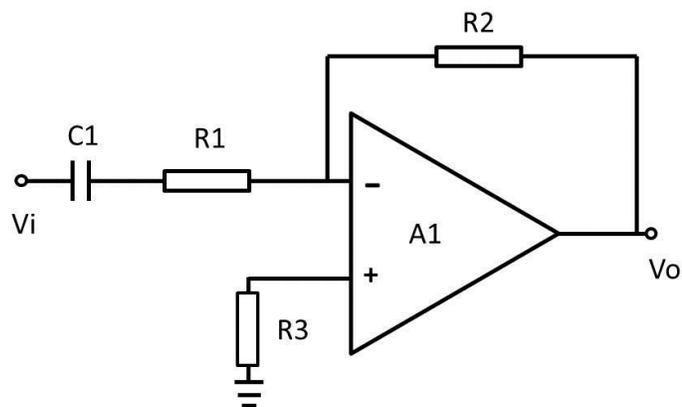
Las configuraciones más frecuentes a utilizar en los preamplificadores por medio de amplificadores operacionales son:

- Amplificador inversor.
- Amplificador no inversor.

1.7.1 Amplificador inversor

Es una configuración en lazo cerrado en el que la señal producida a la entrada será una reproducción inversa de la señal de entrada con un nivel de ganancia.

Fig. 1.26 Amplificador inversor



Fuente: [9]

De la Fig. 1.26 por el corto virtual se puede deducir que la ganancia del amplificador es:

$$A_v = \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \quad (1.15)$$

El nivel de ganancia determinada en la salida del circuito se determina mediante la relación existente entre R2 y R1.

La resistencia R3 no tiene mayor importancia en los cálculos del circuito, por tal razón se puede quitar del circuito, pero su utilización mejora las características del AO en cuanto a lo referente al ruido del amplificador. R3 se puede determinar como el paralelo de R1 y R2.

El condensador C1 se utiliza para evitar que componentes DC se introduzcan en la señal y solo permite el paso de componentes de señal alterna, y su valor se puede determinar por medio de:

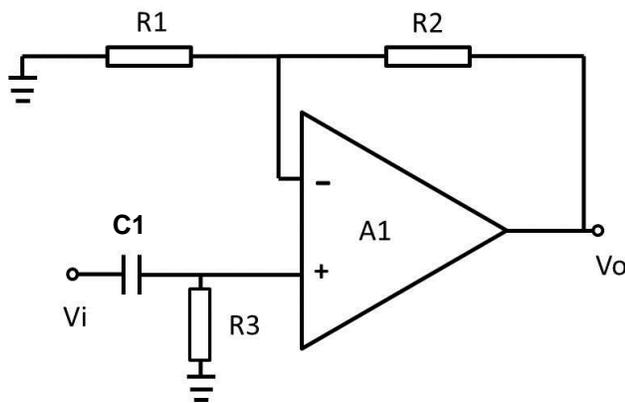
$$C1 = \frac{1}{2\pi * R1 * f_{\min}} \quad (1.16)$$

Donde R1 se expresa en MΩ y frecuencia mínima que se desea amplificar (f_{mín}) en Hz, para que la capacitancia tenga niveles de microfaradios.

1.7.2 Amplificador no inversor

En la configuración no inversora (Fig. 1.27) la señal de salida se encuentra en fase con la señal de entrada.

Fig. 1.27 Amplificador no inversor



Fuente: [9]

La ganancia del circuito de la Fig. 1.27 se obtiene basados en el concepto de corto circuito virtual y está determinada por:

$$A_v = \frac{R1 + R2}{R1} \quad (1.17)$$

El valor de R3 se determina de igual forma que en el amplificador inversor.

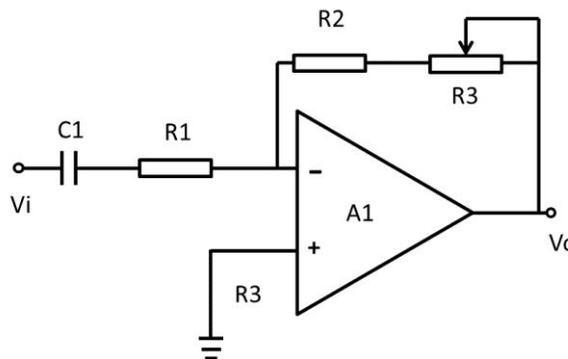
El condensador C1 se utiliza con la misma finalidad que en la configuración inversora y su cálculo se puede determinar mediante:

$$C1 = \frac{1}{2\pi * R3 * f_{\min}} \quad (1.18)$$

1.7.3 Amplificador inversor con ganancia variable

En las cadenas de audio HI-FI es necesario que los preamplificadores presenten una ganancia variable, para lograr esto se implementa un potenciómetro en serie con la resistencia de realimentación como se muestra en la Fig. 1.28.

Fig. 1.28 Amplificador inversor con ganancia variable



Fuente: [9]

1.8 RESUMEN DEL CAPÍTULO

- Los transductores son dispositivos encargados de transformar un determinado tipo de señal de entrada en otro completamente diferente a la salida.
- En el conjunto de los dispositivos de audio, los micrófonos son un tipo de transductor de entrada que se encarga de convertir la señal sonora en una señal eléctrica.
- Según la captación de las ondas sonoras, los micrófonos pueden clasificarse como: omnidireccionales, bidireccionales y unidireccionales.
- Uno de los parámetros más importantes de los transductores de entrada es la sensibilidad, que expresa la relación entre la presión sonora en el diafragma y el voltaje generado en la salida del dispositivo.
- Los micrófonos pueden clasificarse en diferentes clases según su constitución: piezoeléctricos, dinámicos o de bobina móvil, de condensador,

de carbón, electret, etc. Entre ellos el más utilizado en estudios de grabación es el de condensador, debido a su excelente respuesta en frecuencia y comportamiento casi plano; por otro lado los micrófonos dinámicos son los de construcción más fácil y económica, y se utilizan mucho en presentaciones en vivo.

- Algunos de los micrófonos necesitan de una etapa de preamplificación en la cual se lleva la señal a niveles adecuados para su procesamiento. La preamplificación es un punto crítico donde cualquier interferencia de ruido puede ser aumentada por la etapa.
- A la salida de la cadena de audio se pueden encontrar altavoces o auriculares, que se encargan de convertir la señal entregada por las etapas de amplificación en sonido.
- Los altavoces funcionan de manera inversa a los micrófonos, de forma que reciben una señal eléctrica y la convierten en acústica. Típicamente se necesitan tres tipos de ellos (Tweeter, midrange y woofer) para cubrir todo el espectro audible.
- Por otra parte los altavoces necesitan de recintos llamados cajas acústicas, para mejorar su eficiencia en la radiación sonora y evitar un fenómeno conocido como 'corto circuito acústico' que consiste en la atenuación de la señal audible originada por la oposición de fase entre las partes delantera y trasera del altavoz.
- Los auriculares son un tipo de transductor de salida de tamaño reducido, encargados de reproducir todo el espectro sonoro por medio de un pequeño y discreto altavoz.
- Los auriculares se pueden clasificar en: dispositivos de velocidad, dispositivos de presión y dispositivos intraurales. Los de velocidad son aquellos cuya parte trasera está abierta al aire libre; los de presión, son aquellos en los que existe un perfecto aislamiento de los sonidos externos; y los intraurales son los que se ubican dentro del oído, originando mayor discreción pero con características regulares en baja frecuencia.

1.9 PREGUNTAS Y EJERCICIOS

1. ¿Cómo se clasifican los micrófonos según sus características de incidencia sonora? Dé ejemplos.
2. ¿Cómo se determina la impedancia nominal de un altavoz?
3. Describa el proceso efectuado para registrar la directividad en un altavoz.
4. Nombre y describa los tipos de altavoces utilizados para cubrir todo el espectro de audio.
5. ¿Cómo se puede generar un preamplificador con mayor ganancia?

1.10 BIBLIOGRAFÍA

MIYARA, Federico. Acústica y sistemas de sonido. 3 ed. UNR editora. Rosario, 2006.

RUMSEY, Francis y MC CORMICK, Tim. Introducción al sonido y la grabación. 5 ed. Madrid. Ediciones Omega S.A, 2008.

BERANEK, Leo L. Acústica. Traducido por Adolfo Di Marco. 2 ed. Buenos Aires. Editorial hispano, 1969.

PUEO, Basilio y ROMÁ Miguel. Electroacústica. Altavoces y micrófonos. Madrid. Pearson Prentice Hall, 2003.

RUIZ VASSALLO, Francisco. Equipos de sonido. Casetes, CD audio, amplificadores Barcelona. Ceac, 2005.

JARAMILLO H, Jorge Hernán. Principios de audio. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero electrónico. Medellín. Universidad Pontificia Bolivariana, 2005.

ORDOÑEZ, Fredy A. Teoría electroacústica. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero electricista. Guatemala. Universidad De San Carlos De Guatemala. 2009.

SINCLAIR, Ian R. Audio and HI-FI handbook. 3 ed. Newness. Oxford. 1998.

PEREZ, Jaime y DELGADO, Manuel. Micrófonos. I.E.S los viveros. Sevilla, disponible en:

<http://www.ieslosviveros.es/electronica/material/asig10/2MicrofonosdefPDF.pdf>

Acústica básica: micrófonos, disponible en:

http://www.ingenieroambiental.com/2020/Acustica%20Basica_II.pdf

BIDONDO, Alejandro. Electroacústica básica: Altavoces, Parlantes y Cajas acústicas I, disponible en:

http://www.ingenieriadesonido.com/literatura_show.php?idcat=&idprod=43

BENVENUTI, Juan C. Tipos de micrófonos, 2006, disponible en:

<http://www.cetear.com/cap02microfonos.pdf>

CARDENAS, José L. Introducción a las cajas acústicas, disponible en:

<http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/pcpfiles.html>

LORENZATTI, Demián y SEBA, Alejandro. Micrófonos complemento, disponible en: <http://www.sonidoanda.com.ar/principal.htm>

Beyma professional loudspeakers. Apuntes del altavoz, disponible en:

profesional.beyma.com/download/Apuntes_del_Altavoz.pdf

Curso de técnico de sonido y de producción musical, disponible en:

<http://es.scribd.com/doc/4884482/CURSO-DE-TECNICO-DE-SONIDO-Y-PRODUCCION-MUSICAL>

CAPÍTULO 2 FILTROS EN AUDIO

2.1 INTRODUCCIÓN

Los filtros son un arreglo circuital, encargado de manipular o modificar espectros de frecuencia de las señales, permitiendo atenuar componentes frecuenciales indeseables, separar posibles mezclas entre señales, además de otras funciones.

Existen varios tipos de filtros y su clasificación va ligada a su respuesta en frecuencia:

Filtro pasa bajos: permiten el paso de frecuencias bajas, atenuando las que se encuentran por encima una determinada frecuencia de corte (f_c).

Filtro pasa altas: dejan pasar frecuencias mayores a la frecuencia de corte, atenuando las que se encuentren por debajo.

Filtro pasa banda: consiste en la unión de los dos filtros anteriores; de esta forma se tienen dos frecuencias de corte, una alta y una baja; sólo son atenuadas las señales que se encuentren por encima y por debajo de los rangos de corte, permitiendo el paso de una banda de frecuencias comprendidas entre la frecuencia de corte inferior y la superior.

Filtro elimina banda: es la versión invertida del anterior; con el filtro elimina banda se crea una atenuación en el espacio comprendido entre las frecuencias de corte superior e inferior.

En cuanto sus componentes, los filtros suelen ser clasificados en dos tipos: activos y pasivos.

Los filtros suelen encontrarse como componentes importantes de algunos de los equipos de procesamiento de la señal de audio; un claro ejemplo es su utilización en la construcción de ecualizadores, crossovers y otros.

2.2 FILTROS ELÉCTRONICOS ANÁLOGOS

La señal de salida presente en un dispositivo eléctrico o electrónico, algunas veces puede poseer características poco deseables que afectan la amplitud y la forma de las mismas. Esto se debe a que los elementos no lineales que conforman el dispositivo introducen nuevas componentes en el espectro de la señal.

Los filtros pueden ser considerados como elementos lineales, lo que indica que su utilización no presenta ningún tipo de adición de nuevas componentes a las señales presentes en su entrada. Su función principal es modificar la amplitud de la señal en un determinado rango de frecuencia.

Como ya se dijo, los filtros suelen clasificarse en activos y pasivos.

2.2.1 Filtros pasivos

Los filtros pasivos son una red conformada de un circuito resonante, básicamente utilizan elementos como bobinas, condensadores y resistencias para atenuar el paso de señales indeseables, no requieren de alimentación, ni generan potencia y por lo general son muy difíciles de sintonizar.

Debido a su robusta constitución, el empleo de filtros pasivos es bastante escaso, a menos que sean utilizados para muy altas frecuencias.

2.2.2 Filtros activos

Se componen de elementos activos como transistores o amplificadores operacionales, que requieren de una fuente externa para su alimentación. Junto a ellos también se encuentran elementos pasivos como resistencias y condensadores.

Los filtros activos poseen un coeficiente de sobretensión bastante elevado y por tal motivo, teóricamente, se pueden realizar filtros para satisfacer cualquier tipo de necesidad; esta característica sólo puede ser considerada idealmente, por lo que en la práctica, mientras más alto sea el coeficiente de sobretensión, mayor oscilación espontánea tendrá el filtro.

Una característica bastante notoria frente a los filtros pasivos es una reducción de tamaño; esto es posible porque no son necesarias las voluminosas bobinas para su funcionamiento, pues son reemplazadas por amplificadores operacionales y el uso de técnicas de realimentación. Los filtros activos son capaces de generar una ganancia en potencia y son fáciles de sintonizar; además, se pueden realizar conexiones en cascada para generar filtros de mayor orden, de una manera más sencilla.

El área de funcionamiento de un filtro activo va desde unos pocos Hertz hasta 1MHz, y por tal motivo son muy utilizados en aplicaciones de audio. El análisis del presente capítulo se enfoca más en este tipo de filtros.

2.3 FILTRO IDEAL

El comportamiento de un filtro real sería tal que permitiera el paso de todas las componentes útiles en un rango de frecuencia sin crear algún tipo de atenuación en las componentes no deseadas, sino eliminándolas completamente.

Para cada filtro ideal, existen tres parámetros importantes que ayudan a comprender su funcionamiento:

- Banda de paso o banda pasante: indica el rango de frecuencias que pueden pasar sin ningún tipo de atenuación notoria.

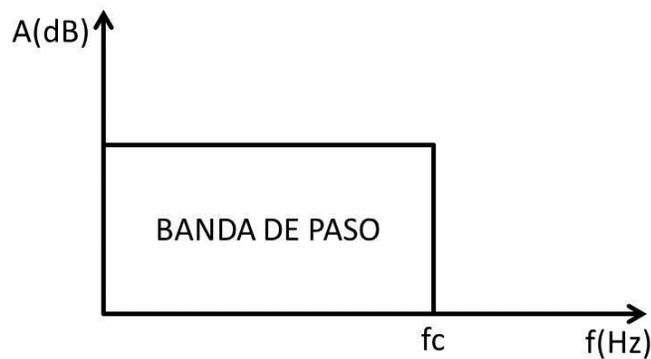
- Banda de rechazo: es el sector en donde el filtro atenúa las componentes de frecuencia.
- frecuencia de corte: correspondiente a la frecuencia en la que la señal se atenúa en 3dB, o sea a la mitad de la potencia.

Según la distribución de los parámetros nombrados anteriormente, se pueden obtener diferentes clases de filtros, como se muestra a continuación.

2.3.1 Filtro pasa bajo (Fig. 2.1)

Este tipo de filtro permite el paso de frecuencias que se encuentran comprendidas entre 0 y una frecuencia de corte (f_c) definida por el diseñador; el espacio entre los dos límites mencionados constituye la banda de paso; además no se presenta ningún tipo de atenuación en dicha banda, al contrario de la eliminada en donde la atenuación se hace infinita.

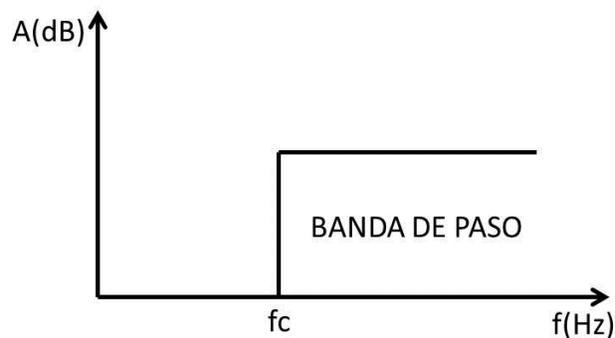
Fig. 2.1 Respuesta en frecuencia filtro pasa bajo ideal



En un filtro ideal se estima que la banda de paso no se produce ningún tipo de desfase. Esto es muy importante ya que, luego del filtrado la señal a la salida poseerá las mismas características de la señal de entrada excepto las componentes eliminadas durante el proceso.

2.3.2 Filtro pasa alto

Fig. 2.2 Respuesta en frecuencia filtro pasa alto ideal

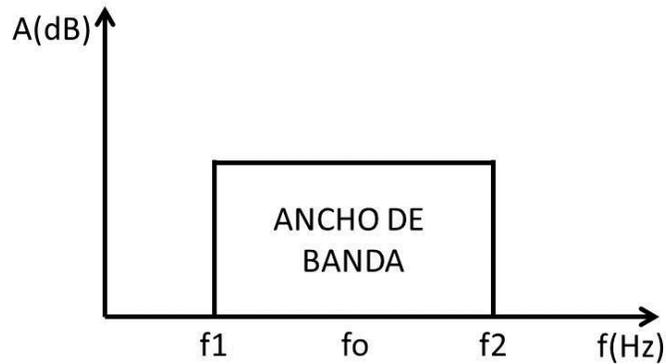


En los filtros pasa alto, la banda pasante se encuentra comprendida desde un valor de frecuencia de corte hasta infinito, mientras que las que se encuentren por debajo de este rango son bloqueadas. Posee las mismas características de atenuación y ganancia que el pasa bajo y su comportamiento en frecuencia es representado en la Fig. 2.2.

2.3.3 Filtro pasa banda (Fig. 2.3)

El filtro pasa banda ideal elimina todas las frecuencias entre cero y una frecuencia de corte inferior (f_1), al igual que las que se encuentran por encima de la frecuencia de corte superior (f_2); de este modo se crea una banda de paso comprendida entre f_1 y f_2 .

Fig. 2.3 Respuesta en frecuencia filtro pasa banda ideal



El ancho de banda, BW, del filtro pasa banda equivale a la diferencia entre la frecuencia de corte superior y la inferior:

$$BW = f_2 - f_1 \quad (2.1)$$

Y su frecuencia central se define como la media geométrica entre f_1 y f_2 , así:

$$f_o = \sqrt{f_1 * f_2} \quad (2.2)$$

El factor de calidad, Q, del filtro pasa banda se define como la división entre la frecuencia central y el ancho de banda.

$$Q = \frac{f_o}{BW} \quad (2.3)$$

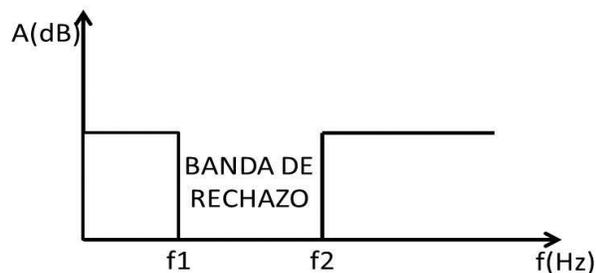
Si el valor de Q es mayor a 1, el filtro se denomina filtro de banda ancha y si es menor a 1, filtro de banda estrecha.

2.3.4 Filtro rechaza banda o elimina banda (Fig. 2.4)

Su comportamiento es similar al filtro pasa banda pero de forma inversa; dicho de otra forma, permite el paso de frecuencias por debajo de la frecuencia de corte inferior y las comprendidas por encima de la frecuencia de corte superior. La banda eliminada se encuentra delimitada por el rango existente entre f_1 y f_2 .

Las ecuaciones utilizadas para calcular parámetros como el ancho de banda y la frecuencia central son las mismas que se utilizaron en el filtro pasa banda, ecuaciones (2.2) y (2.3).

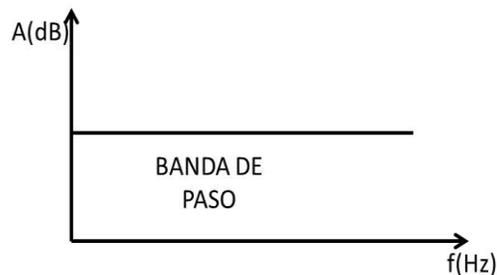
Fig. 2.4 Respuesta en frecuencia filtro Elimina banda ideal



2.3.5 Filtro pasa todo (Fig. 2.5)

Es una configuración muy interesante, que permite el paso de todas las frecuencias desde cero hasta infinito, es decir, sólo se presenta banda de paso. Algunas personas suelen decir que es incorrecto llamarlo filtro debido a que no ocasiona ninguna atenuación de amplitud en los niveles de frecuencia, pero se le da este nombre debido a su acción sobre la fase de la señal, lo que quiere decir que se pueden efectuar desfases controlados.

Fig. 2.5 Respuesta en frecuencia filtro pasa todo



2.4 FILTRO REAL

Las respuestas mostradas anteriormente, son imposibles de lograr e implementar en la práctica, por tal razón; se tiene que trabajar con cinco aproximaciones de ellas. Dependerá del diseñador cuál utilizar para satisfacer sus necesidades.

Los filtros reales, poseen algunos tipos de imperfecciones como:

- La atenuación en la banda de paso.
- El cambio entre la banda de paso y la eliminada no se realiza de manera instantánea sino de manera progresiva.
- La atenuación presente en la frecuencia de corte para cualquier tipo respuesta tiene un valor finito.

A continuación se presentan algunas de las características que hacen parte de los filtros reales:

2.4.1 Función de transferencia

La forma en que se comporta un filtro real se puede determinar mediante su función de transferencia, la cual indica básicamente la relación existente entre el voltaje presente en la salida del filtro (V_o) y el voltaje en la entrada (V_i). A su vez, define de qué manera varía la amplitud y la fase de la señal al pasar por el filtro.

Matemáticamente la función de transferencia, $T(S)$, se representa como la relación de los voltajes de la salida y entrada expresados en el dominio de la frecuencia:

$$T(S) = \frac{V_o(S)}{V_i(S)} \quad (2.4)$$

Una característica importante de la función de transferencia es que define la estabilidad del filtro, pues se puede afirmar que sólo habrá estabilidad si las raíces del denominador de la función de transferencia se encuentran en el semiplano izquierdo del plano complejo.

2.4.2 Atenuación

La atenuación, se considera como una reducción de amplitud en la señal al pasar por un dispositivo eléctrico o electrónico, en nuestro caso un filtro activo. Se define como la relación existente entre el voltaje de entrada a cualquier tipo de frecuencia y el voltaje de salida para frecuencias medias, así:

$$\text{Atenuación} = \frac{V_i}{V_{Omid}} \quad (2.5)$$

Suele estar siempre definida en decibelios de esta forma:

$$\text{Atenuación}_{dB} = -20 \log \frac{V_i}{V_{Omid}} \quad (2.6)$$

2.4.2.1 Atenuación en la banda pasante y banda eliminada

Normalmente, en los filtros se trabaja con una plantilla para el análisis de todos los parámetros de diseño; en este caso es el filtro pasa bajo; este puede ser

modificado para conseguir otros circuitos. Cualquier problema encontrado en un filtro se puede llevar a su equivalente en pasa bajo, se resuelve y luego se retorna al filtro original.

Las coordenadas que delimitan el comportamiento del filtro pasa bajo se encuentran distribuidas de la siguiente forma:

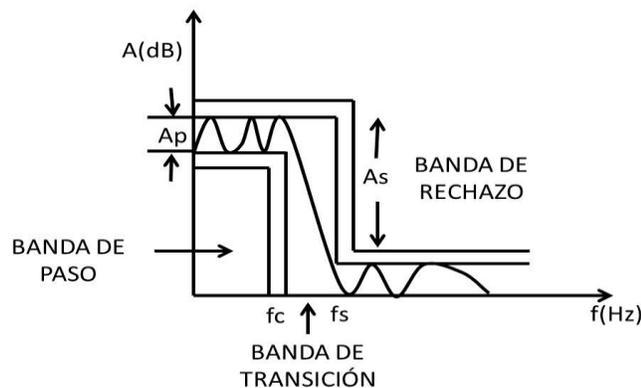
- Banda de paso: comprendida entre cero y la frecuencia de corte (f_c).
- Banda de transición: comprendida entre la frecuencia de corte y frecuencia de inicio de la banda de rechazo (f_s).
- Banda de rechazo: comprendida por las frecuencias que se encuentran por encima de f_s .

La máxima atenuación presente en la banda de paso se designa por A_p , cuyo valor puede variar entre 0.05 dB y 3 dB; esto quiere decir que se compromete la respuesta ideal del filtro, para permitir hasta 3dB de pérdidas de señal en cualquier lugar de la banda pasante; dicho valor es definido por las características que quiera brindar el diseñador.

La mínima atenuación existente en la banda de rechazo se denota como A_s , dependiendo de la aplicación para la que se desee utilizar el filtro, puede tomar valores entre 20 y 100dB. Esta y las anteriores características son mostradas en la Fig. 2.6.

Mientras las especificaciones nombradas, sean más estrechas, más cerca se estará de conseguir una respuesta parecida a la ideal.

Fig. 2.6 Especificaciones de la curva característica del filtro pasa bajo



Fuente: [10]

2.4.3 Orden polos y respuesta en la región de transición

En filtros activos, un polo muestra la pendiente de la atenuación en la banda de transición; dicho fenómeno es producido por la red R_C presente en la configuración

circuitual utilizada para la construcción del filtro. Cada polo brinda 6dB/octava a la variación ya mencionada.

El orden determina el nivel de aceptación y rechazo a frecuencias que se encuentren por encima o por debajo de la frecuencia de corte, dependiendo de las características de respuesta del filtro trabajado. Se puede identificar por el número de condensadores presentes en el circuito según su configuración. La característica más notoria de este parámetro es que indica el número de polos que contiene el filtro. Por ejemplo si un filtro pasa bajo es de orden cuatro, tendrá cuatro polos y una pendiente igual a 24 dB/octava

Los filtros que poseen orden bajo pueden ser conectados en cascada; de esta manera se logran otros de un orden mayor; por ejemplo, si se desea un filtro de orden 6, se puede conseguir fácilmente por medio de tres de orden 2. A mayor orden se presenta mejor respuesta en frecuencia y, de este modo, se pueden obtener características más parecidas a las ideales.

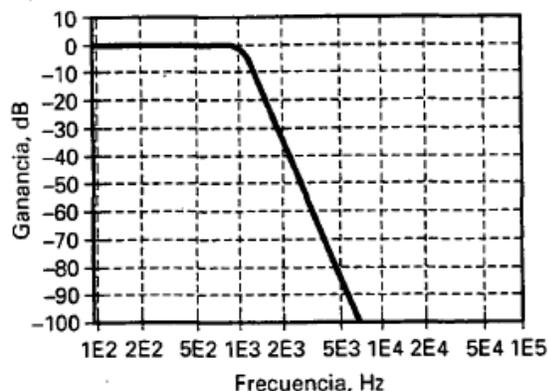
2.5 TIPOS DE RESPUESTA DEL FILTRO

Existen varios tipos de respuestas en filtros activos. En este capítulo sólo se mencionan algunas de las más conocidas y son presentadas a continuación.

2.5.1 Respuesta Butterworth

Es denominado también filtro de respuesta plana, debido a que la atenuación presente en la banda de paso casi siempre es cero, lo cual muestra que el comportamiento de la señal de salida hasta la frecuencia de corte no sufrirá mayores alteraciones al pasar por el filtro. En la banda de transición se presenta una variación de atenuación de 6dB/octava. Lo anterior es más bien una desventaja presente en el filtro ya que su respuesta en el área de transición decae de una manera muy lenta en comparación con otros tipos de respuestas.

Fig. 2.7 Respuesta pasa bajo Butterworth



Fuente: [11]

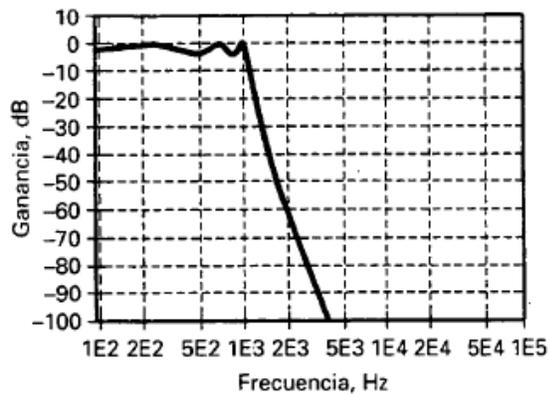
Finalmente, la banda de rechazo presenta características monotónicas, es decir que no existe ningún tipo de rizado en la señal.

La respuesta Butterworth se usa prácticamente cuando se desea que todas las frecuencias de la banda de paso obtengan igual nivel de ganancia. En la Fig. 2.7 se puede observar el comportamiento en frecuencia de un filtro Butterworth.

2.5.2 Respuesta Chebyshev (Fig. 2.8)

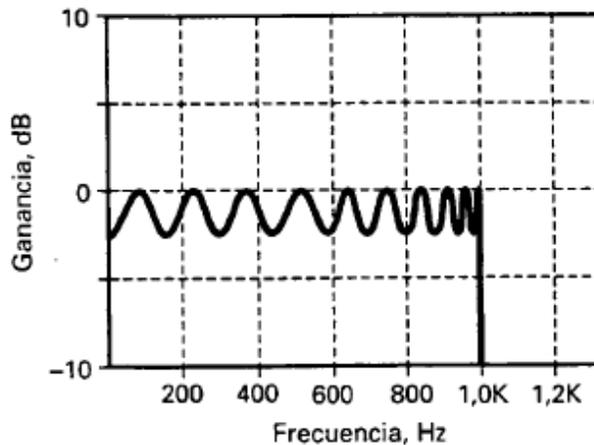
La respuesta Chebyshev, produce varias oscilaciones en la banda de paso, mejor conocidas como rizado o función oscilatoria; Mientras mayor sea el orden, mayor rizado tendrá el filtro. Para tener una mejor idea acerca de este término, refiérase a la Fig. 2.9.

Fig. 2.8 Respuesta pasa bajo Chebyshev



Fuente: [11]

Fig. 2.9 Rizado filtro Chebyshev



Fuente: [11]

La amplitud presente en la respuesta Chebyshev es determinada por el diseñador, puede tomar valores que van desde 0.1dB y 3dB. Mientras más oscilaciones se permitan, el comportamiento en la banda de transición mejorará la atenuación, demostrando una respuesta más rápida.

El número de oscilaciones presentes en la banda de paso del filtro se puede determinar por medio de:

$$\text{num rizados} = \frac{n}{2} \quad (2.7)$$

Lo anterior muestra que el número de oscilaciones en la respuesta Chebyshev será la mitad del orden del filtro.

La frecuencia de banda de paso en el filtro Chebyshev se encuentra ligada a la frecuencia de corte por medio de las siguientes ecuaciones:

$$f_p = f_c \sqrt{1 - \frac{\alpha^2}{2}} \quad \text{para un filtro pasa bajo} \quad (2.8)$$

$$f_p = \frac{f_c}{\sqrt{1 - \frac{\alpha^2}{2}}} \quad \text{para un filtro pasa alto} \quad (2.9)$$

Donde el Factor de amortiguación (α) indica el tipo de filtro y la forma de onda que tendrá la respuesta del mismo. Un filtro Chebyshev de segundo orden con rizado de 3dB tendrá un $\alpha=0.766$

2.5.3 Respuesta Bessel (Fig. 2.10)

En los filtros Bessel la respuesta en la banda de paso y de rechazo presenta un comportamiento plano, muy parecido a la respuesta del Butterworth aunque con menor atenuación en la zona de transición. Son ampliamente utilizados para filtrar ondas cuadradas porque su respuesta no produce mayor alteración en su forma de onda.

Los filtros Bessel sacrifican la velocidad de la banda de transición para obtener un desfase lineal.

La variación presente en la banda de transición es menor a 6dB/octava, y la frecuencia de corte de la respuesta Bessel es definida por la siguiente ecuación:

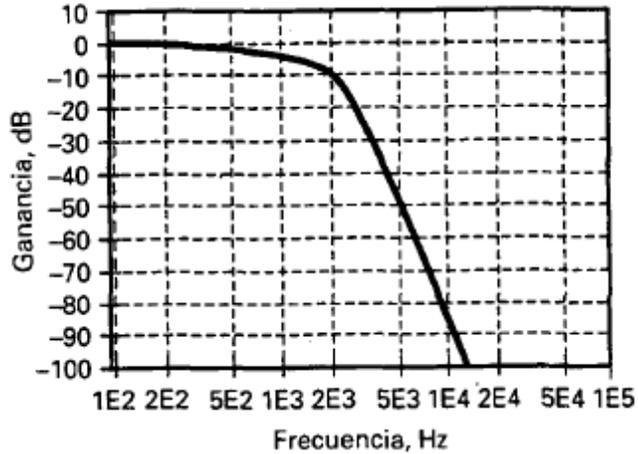
$$\theta(f_c) = \frac{\theta_{\text{máx}}}{2} = \frac{n\pi}{2} \text{ radianes} \quad (2.10)$$

En donde:

θ : retraso de fase.

n: orden del filtro.

Fig. 2.10 Respuesta filtro pasa bajo Bessel



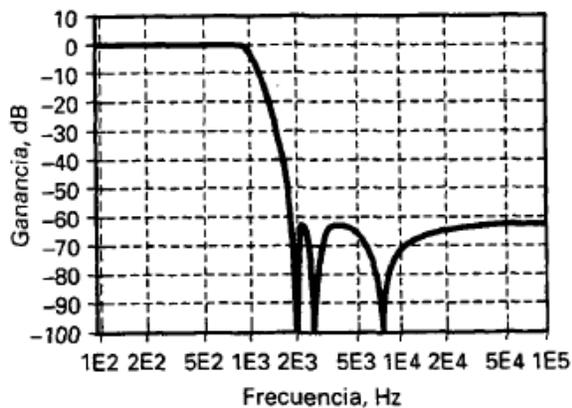
Fuente: [11]

2.5.4 Respuesta Chebyshev inversa (Fig. 2.11)

La respuesta Chebyshev inversa es utilizada por los diseñadores de filtros para aplicaciones en las que se quiera un comportamiento plano en la banda de paso y una atenuación rápida en la banda de transición. El rizado se presenta en la banda de rechazo, diferenciándola de las anteriores en donde se mostraba un comportamiento monotónico.

Si no se indica el valor de atenuación mínima en la banda de paso, el rizado presente en el filtro puede superar fácilmente dicho valor.

Fig. 2.11 Respuesta filtro pasa bajo Chebyshev inverso

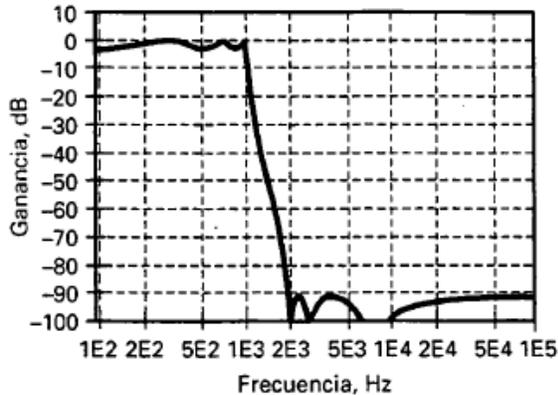


Fuente: [11]

2.5.5 Respuesta elíptica (Fig. 2.12)

Un filtro con esta respuesta también es llamado filtro Cauer; es el ideal para aplicaciones en las que se requiera una pendiente más aguda en la banda de transición sin importar la linealidad de las bandas de paso y eliminada; es decir, pueden existir rizados en dichas zonas.

Fig. 2.12 Respuesta filtro pasa bajo elíptico



Fuente: [11]

En la tabla 1 se resaltan las características más importantes de cada una de las respuestas expuestas anteriormente, con el fin de brindar una comparación específica entre los comportamientos de las diferentes bandas del filtro. La decisión de selección queda plenamente a merced del diseñador según las necesidades que busque satisfacer.

Tabla 1 Respuestas de los filtros

Respuesta	Banda de paso	Banda de rechazo	Pendiente	Respuesta al escalón
Butterworth	Plana	Monotónica	Buena	Buena
Chebyshev	Rizada	Monotónica	Muy Buena	Mala
Chebyshev inv	Plana	Rizada	Muy buena	Buena
Besel	plana	Monotónica	Mala	La mejor
Elíptica	Rizada	Rizada	La mejor	mala

Fuente: [11]

2.6 PARÁMETROS RESPUESTA BUTTERWORTH Y CHEBYSHEV

Existe un número de parámetros que determinan las características y estabilidad de las respuestas del filtro Butterworth y ellas son presentadas a continuación.

2.6.1 Orden de Butterworth

El orden de un filtro Butterworth indica qué tan cercana es su respuesta a la ideal; en este caso se puede determinar por medio de la siguiente ecuación:

$$n \geq \frac{\log \frac{10^{0.1A_s} - 1}{10^{0.1A_p} - 1}}{\log \left(\frac{f_s}{f_c} \right)^2} \quad (2.11)$$

Si el valor obtenido de n representa un número decimal, se aproxima al siguiente entero; por ejemplo: si el orden del filtro fue 5.1 se aproxima a 6, pues n siempre será un valor entero positivo.

2.6.2 Polos de Butterworth

El número de polos útiles en la respuesta Butterworth es igual al orden del filtro. Los polos encontrados en la parte positiva del plano real representan inestabilidad en el sistema. Sólo se toman los valores de la parte negativa. El ángulo θ presente en la forma polar se puede obtener por medio de:

$$\theta = \frac{\pi + 2k\pi}{n} \quad k = 1, 2, 3, \dots, 2n \quad (2.11)$$

en donde:

n: orden del filtro.

Teniendo el valor del ángulo se procede a determinar las magnitudes de la parte real y la parte imaginaria del polo, así:

$$\sigma = \cos\theta \text{ Parte real} \quad (2.12)$$

$$\beta = \sin\theta \text{ Parte imaginaria} \quad (2.13)$$

La tabla 2 presenta la localización de los polos de Butterworth de orden 2 a 9.

Tabla 2 Localización polos Butterworth

n=2	n=3	n=4	n=5	n=6	n=7	n=8	n=9
-0.7071068	-0.5000000	-0.382683	-0.890170	-0.2588190	-0.9009689	-0.1950903	-0.9396926
$\pm j0.7071068$	$\pm j0.8660254$	$\pm j0.923879$	$\pm j0.587785$	$\pm j0.9659258$	$\pm j0.43388377$	$\pm j0.980785353$	$\pm j0.3420201$
	-1.0000000	-0.9238795	-0.3090170	-0.7071068	-0.2225209	-0.5555702	-0.1736482
		$\pm j0.382683$	$\pm j0.951056$	$\pm j0.7071068$	$\pm j0.9649279$	$\pm j0.8314696$	$\pm j0.98488078$
			-1.0000000	-0.9659258	-0.6234898	-0.8314696	-0.5000000
				$\pm j0.258819$	$\pm j0.7818315$	$\pm j0.5555702$	$\pm j0.8660254$
					-1.0000000	-0.980785	-0.7660444
						$\pm j0.1950903$	$\pm j0.6427876$
							-1.0000000

Fuente: [12]

2.6.3 Orden de Chebyshev

El cálculo del orden de Chebyshev se puede hallar por medio de la siguiente ecuación que se obtiene del análisis de la función de transferencia del filtro y el polinomio de Chebyshev:

$$n \geq \frac{\cosh^{-1} \sqrt{\frac{10^{0.1As} - 1}{10^{0.1Ap} - 1}}}{\cosh^{-1} \frac{f_s}{f_c}} \quad (2.14)$$

2.6.4 Polos Chebyshev

La ubicación de los polos de la respuesta Chebyshev tiene características similares a la Butterworth; por tal razón la inestabilidad del sistema también se determina según los polos encontrados en el semiplano positivo.

Para encontrar la parte real e imaginaria del polo de Chebyshev es necesario determinar los valores de U_k (parte real del argumento de la función oscilatoria) y V_k (parte imaginaria del argumento de la función oscilatoria):

$$U_k = \frac{(2k - 1)\pi}{2n} \quad k = 1, 2, 3, \dots, 2n \quad (2.14)$$

$$V_k = \frac{1}{n} \sinh^{-1} \frac{1}{\varepsilon} \quad (2.15)$$

En donde el parámetro ε determina la máxima variación en transmisión de banda de paso, dado el valor de A_p , el valor de ε se puede determinar con la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \sqrt{10^{0.1Ap} - 1} \quad (2.16)$$

La parte real e imaginaria de los polos de Chebyshev se determinan reemplazando los valores obtenidos por las ecuaciones (2.14) y (2.15) en las ecuaciones (2.17) y (2.18):

$$\sigma = \cos U_k * \cos V_k \quad \text{Parte real} \quad (2.17)$$

$$\beta = \sen U_k * \sen V_k \quad \text{Parte imaginaria} \quad (2.18)$$

Al igual que en Butterworth solo se toman los polos que se encuentren en la parte negativa del plano real.

En la tabla 3 se expresan los diferentes valores de polos de Chebyshev desde orden 1 hasta orden 9 con determinado valor de atenuación máximo en la banda de paso del filtro.

Tabla 3 Localización de los polos de Chebyshev

n	Ap=0.5dB		Ap=1dB		Ap=2dB		Ap=3dB	
	α	β	α	β	α	β	α	β
1	2.8628	0	1.9625	0	1.3076	0	1.0024	0
2	0.7128	1.0040	0.5489	0.8951	0.4019	0.8133	0.3224	0.7772
3	0.3132	1.0219	0.2471	0.9660	0.1845	0.9231	0.1493	0.9038
	0.6265	0	0.4942	0	0.3689	0	0.2986	0
4	0.1754	1.0163	0.1395	0.9834	0.1049	0.9580	0.0852	0.9465
	0.4233	0.4209	0.3369	0.4073	0.2532	0.3968	0.2056	0.3920
5	0.1120	1.0116	0.0895	0.9901	0.0675	0.9735	0.0549	0.9659
	0.2931	0.6252	0.2342	0.6119	0.1766	0.6016	0.1436	0.5970
	0.3623	0	0.2895	0	0.2183	0	0.1775	0
6	0.0777	1.0085	0.0622	0.9934	0.0470	0.9817	0.0382	0.9764
	0.2121	0.7382	0.1699	0.7272	0.1283	0.7187	0.1044	0.7148
	0.2898	0.2702	0.2321	0.2662	0.1753	0.2630	0.1427	0.2616
7	0.0570	1.0064	0.0457	0.9953	0.0346	0.9866	0.0281	0.9827
	0.1597	0.8071	0.1281	0.7982	0.0969	0.7912	0.0789	0.7881
	0.2308	0.4479	0.1851	0.4429	0.1400	0.4391	0.1140	0.4373
	0.2562	0	0.2054	0	0.1553	0	0.1265	0
8	0.0436	1.0050	0.0350	0.9965	0.0625	0.9898	0.0216	0.9868
	0.1242	0.8520	0.0997	0.5448	0.0754	0.8391	0.0614	0.8365
	0.1859	0.5693	0.1492	0.5644	0.1129	0.5607	0.0920	0.5590
	0.2193	0.1999	0.1760	0.1982	0.1332	0.1969	0.1055	0.1962
9	0.0345	1.0040	0.0277	0.9972	0.0209	0.9919	0.0171	0.9896
	0.0992	0.8829	0.0797	0.8769	0.0603	0.8723	0.0491	0.8702
	0.1520	0.6553	0.1221	0.6509	0.0924	0.6474	0.0753	0.6459
	0.1864	0.3487	0.1497	0.3463	0.1134	0.3445	0.0923	0.3437
	0.1984	0	0.1593	0	0.1206	0	0.0983	0

Fuente: [12]

2.7 COMPONENTES DEL FILTRO

Para construir un filtro con una muy buena calidad, es necesario que los dispositivos que lo conforman (condensadores y resistencias) posean características favorables como una buena respuesta ante altas o bajas temperaturas y poco corrimiento con la edad.

Las resistencias más adecuadas para el desarrollo de filtros son las de película metálica; su coeficiente de temperatura es bastante bajo y brindan muy buena respuesta en frecuencia. Otro tipo de resistencias son las de alambre enrollado; este tipo se caracteriza por tener un muy buen rendimiento para frecuencias bajas, alta precisión y un nivel de ruido muy bajo. Las resistencias de carbón deben evitarse porque generan demasiado ruido y son algo inestables ante las variaciones de temperatura.

En el caso de los condensadores, los más adecuados para el uso en filtros activos son los de poliestireno, los NPO de cerámica y de mica. Los condensadores nombrados, poseen bajos factores de disipación al igual que su coeficiente de temperatura. En el caso de los capacitores de disco de cerámica se presentan variaciones de capacitancia ante factores como temperatura, frecuencia y tiempo y por tal razón deben evitarse.

2.8 CONFIGURACIÓN CIRCUITAL DE FILTROS

En esta sección, se presenta la red más sencilla y común presente en la construcción de filtros activos, al igual que la descripción de algunas de sus características más notorias.

2.8.1 Configuración Sallen-Key

Dicho modelo utiliza un amplificador operacional trabajando como fuente de voltaje controlada por voltaje (VCVS). La configuración sallen-Key se caracteriza por su facilidad de sintonizar y por su construcción de bajo costo. Cada circuito RC presente brinda una variación en la zona de transición de 6dB/octava.

La configuración de la Fig. 2.13 muestra un filtro pasa bajo de segundo orden funcionando como si fuera un integrador, en la Fig. 2.14 se puede observar un filtro pasa alto de segundo orden organizado como un derivador.

Si se trabaja con valores iguales de resistencia y de condensadores, el cálculo de los componentes se hace más sencillo.

Fig. 2.13 Configuración Sallen-Key filtro pasa bajo de segundo orden

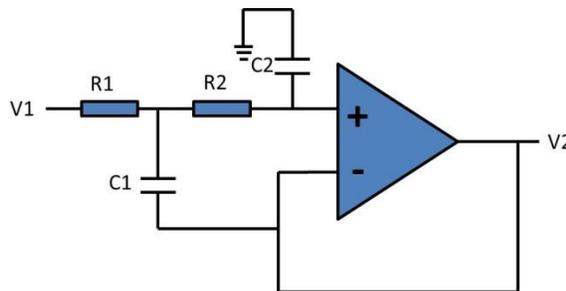
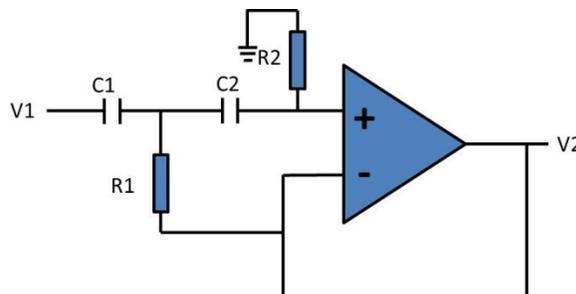


Fig. 2.14 Configuración Sallen-Key filtro pasa alto de segundo orden



Al trabajar con la red presentada en la Fig. 2.13 con condensadores iguales se obtiene:

$$R1 = \frac{1}{2\pi * fc * \sigma * C} \quad (2.16)$$

$$R2 = \frac{1}{((2\pi * fc * \sigma)^2 + (2\pi * fc * \beta)^2)(C^2 * R1)} \quad (2.17)$$

Los valores de la capacitancia supuesta deben ser comerciales; con esto se ahorra la tediosa búsqueda de un valor calculado. Las resistencias se pueden acomodar de manera más fácil y existe una mayor cantidad de valores comerciales y por tanto son las adecuadas para determinar su valor en el circuito.

Los valores obtenidos de resistencias y condensadores de la red Sallen-Key pasa alto son valores normalizados; en este caso se trabajan resistencias iguales las cuales poseen valores teóricos bajos, por ejemplo 1Ω .

$$Cn1 = \frac{1}{\sigma * Rn} \quad (2.18)$$

$$Cn2 = \frac{1}{(\sigma^2 + \beta^2)Cn1 * Rn} \quad (2.19)$$

Para realizar la transformación de pasa bajo a pasa alto es necesario hacer lo siguiente:

$$Ran1 = \frac{1}{Cn1} \quad (2.20)$$

$$Ran2 = \frac{1}{Cn2} \quad (2.21)$$

Luego se determina el valor de Kr (factor de desnormalización en magnitud) suponiendo el valor de un condensador real (valor comercial) según la siguiente ecuación:

$$Kr = \frac{1}{2\pi * fc * Creal} \quad (2.22)$$

Finalmente, los valores de resistencia obtenidos en las ecuaciones (2.20) y (2.21) se multiplican por Kr para obtener un valor de resistencia real en el circuito.

$$R1real = Ran1 * Kr \quad (2.23)$$

$$R2real = Ran2 * Kr \quad (2.24)$$

La construcción de filtros pasa banda y rechaza banda se puede lograr realizando las conexiones presentadas en la Fig. 2.15 y la Fig. 2.16.

Fig. 2.15 Configuración filtro pasa banda (banda ancha)

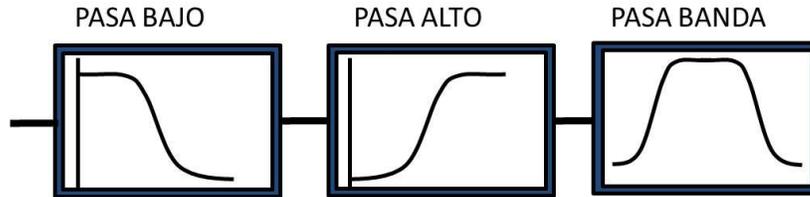
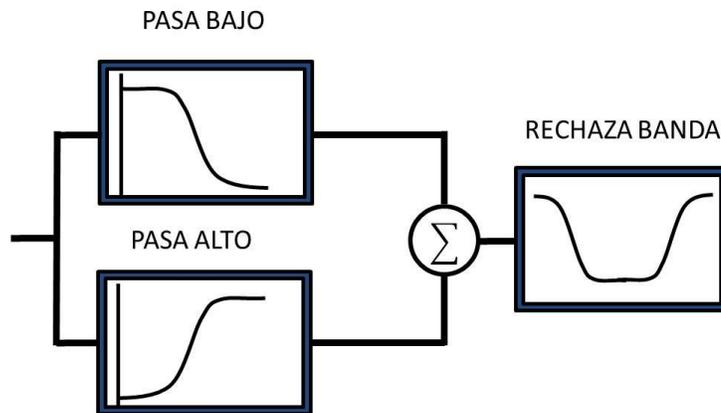


Fig. 2.16 Configuración filtro rechaza banda.



Ejemplo 1:

Calcular los valores de resistencias y condensadores de un filtro Butterworth, pasa bajas de orden 4 con frecuencia de corte 2kHz.

Solución:

Como se trata de un filtro de orden 4, el diseño consistirá en dos redes de orden 2 conectadas en cascada.

Según la tabla 2, los polos de Butterworth para orden cuatro son:

σ	β	
-0.382	± 0.923	1
-0.923	± 0.282	2

Cuando se está haciendo un diseño, frecuentemente el diseñador debe suponer o definir algunos datos, los cuales suelen corresponder a valores comerciales o a condiciones fáciles de cumplir. En este caso, para la primera de las dos redes, se define lo siguiente: Se trabajará con un condensador de $0.01\mu\text{F}$ y los polos de la combinación 1 de la tabla anterior ($\sigma = -0.382$ y $\beta = \pm 0.923$); con estos datos se

puede determinar el valor de R1 de la primera red Sallen-Key, según la ecuación 2.16, así:

$$R1 = \frac{1}{2\pi * fc * \sigma * C} = \frac{1}{2\pi * 2 \times 10^3 * 0.382 * 0.01 \times 10^{-6}}$$

$$R1 = 20831\Omega$$

Luego de obtener el valor de R1 se puede determinar R2 por medio de la ecuación 2.17, así:

$$R2 = \frac{1}{((2\pi * fc * \sigma)^2 + (2\pi * fc * \beta)^2)(C^2 * R1)}$$

$$R2 = \frac{1}{((2\pi * 2 \times 10^3 * 0.382)^2 + (2\pi * 2 \times 10^3 * 0.923)^2)((0.01 \times 10^{-6})^2 * 20831)}$$

$$R2 = 3125\Omega$$

La segunda red Sallen-Key se calcula de igual forma que la anterior pero utilizando los polos de la combinación 2 de la tabla y un condensador de 0.001μF; así:

$$R1 = \frac{1}{2\pi * 2 \times 10^3 * 0.923 * 0.001 \times 10^{-6}}$$

$$R1 = 86216\Omega$$

$$R2 = \frac{1}{((2\pi * 2 \times 10^3 * 0.382)^2 + (2\pi * 2 \times 10^3 * 0.923)^2)((0.001 \times 10^{-6})^2 * 86216)}$$

$$R2 = 73610\Omega$$

	R1(Ω)	R2(Ω)	C1(μF)	C2(μF)
RED 1	20831	3125	0.01	0.01
RED 2	86216	73610	0.001	0.001

Ejemplo 2:

Calcular los valores de resistencias y condensadores para una red Sallen-Key Butterworth, pasa altas de orden 4 y frecuencia de corte 200Hz.

Solución:

Según la tabla 2 los polos de Butterworth, para orden cuatro son:

σ	B	
-0382	±0.923	1

$$-0.923 \qquad \pm 0.282 \qquad 2$$

Se selecciona un valor de resistencia normalizado (1Ω) y los polos de 1, para trabajar sobre la ecuación 2.18 y determinar el valor de condensador normalizado para la red, así:

$$C_{n1} = \frac{1}{\sigma * R_n} = \frac{1}{0.382 * 1} = 2.617F$$

Con el valor de condensador normalizado obtenido (C_{n1}), reemplazamos en la ecuación 2.19 y se obtiene el segundo valor de condensador normalizado

$$C_{n2} = \frac{1}{(\sigma^2 + \beta^2)C_{n1} * R_n} = \frac{1}{(0.382^2 + 0.923^2)2.617 * 1} = 0.38F$$

Ya con los dos valores de condensadores normalizados se realiza la transformación de pasa bajas a pasa alto por medio de las ecuaciones 2.20 y 2.21 de la siguiente forma:

$$R_{n1} = \frac{1}{C_{n1}} = \frac{1}{2.617} = 0.38\Omega$$

$$R_{n2} = \frac{1}{C_{n2}} = \frac{1}{0.38} = 2.631\Omega$$

Para realizar la desnormalización de los valores obtenidos se debe suponer un valor de condensador real ($0.01\mu F$) y calcular la constante de desnormalización en magnitud K_r mediante la ecuación 2.22; así:

$$K_r = \frac{1}{2\pi * f_c * C_{real}} = \frac{1}{2\pi * 200 * 0.01 \times 10^{-6}} = 79617$$

Finalmente con las ecuaciones 2.23 y 2.24 se determinan los valores de las resistencias de la red uno pasa alta.

$$R_{1real} = R_{n1} * K_r = 0.38 * 79617 = 30254\Omega$$

$$R_{2real} = R_{n2} * K_r = 2.631 * 79617 = 209472\Omega$$

La red 2 se calcula de la misma manera que la uno pero con los polos de 2; así:

$$C_{n1} = \frac{1}{0.923 * 1} = 1.077F$$

$$C_{n2} = \frac{1}{(0.923^2 + 0.382^2)1.077 * 1} = 0.930F$$

$$R_{n1} = \frac{1}{1.077} = 0.928\Omega$$

$$R_{an2} = \frac{1}{0.930} = 1.074\Omega$$

$$K_r = \frac{1}{2\pi * f_c * C_{real}} = \frac{1}{2\pi * 200 * 0.01 \times 10^{-6}} = 79617$$

$$R_{1real} = 0.928 * 79617 = 73847\Omega$$

$$R_{2real} = 1.074 * 79617 = 85508\Omega$$

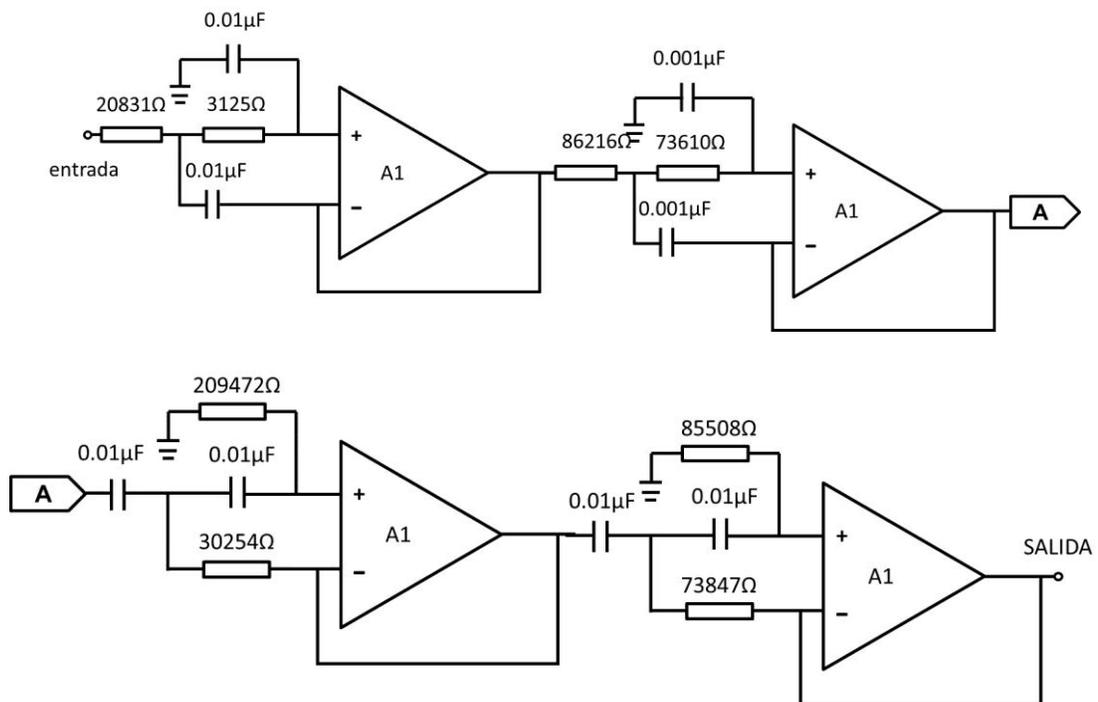
	R1(Ω)	R2(Ω)	C1(μF)	C2(μF)
RED 1	30254	209472	0.01	0.01
RED 2	73847	85508	0.01	0.01

Ejemplo:

Construir un filtro pasa banda de banda ancha con frecuencia de corte superior igual a 2kHz e inferior igual a 200Hz.

Solución:

Mediante los cálculos realizados en los ejemplos 1 y 2 se puede construir un filtro pasa banda de banda ancha, realizando la conexión en cascada de la red pasa bajas y pasa altas.



2.9 FILTROS DIVISORES DE FRECUENCIA O DE CRUCE (CROSSOVER)

La mayoría de sistemas de altavoz individual son incapaces de reproducir todo el espectro sonoro. Por esta razón los Crossover surgen como solución a este problema. El dispositivo es prácticamente un filtro eléctrico o un conjunto de ellos utilizados en aplicaciones de audio. Su función principal es separar en distintas bandas de frecuencia la señal para que esta sea reproducida de manera eficaz por altavoces especializados en trabajar en cada una de las bandas independientes; con lo anterior se puede cubrir todo el rango sonoro.

2.9.1 Clasificación

Este tipo de dispositivos se clasifican según la cantidad de vías, o bandas en que se descompone la señal de audio. Un sistema de dos vías maneja frecuencias altas y bajas; se consigue con la implementación de un filtro pasa bajo y un pasa alto. Al de tres vías le corresponden las tonalidades graves medias y agudas; su construcción se realiza por medio de una red pasa bajo, una pasa banda y un pasa alto.

Además de lo anterior, los filtros divisores de frecuencia se pueden clasificar según sus componentes así:

2.9.2 Crossover pasivo

Básicamente está compuesto por elementos pasivos como condensadores, bobinas y resistencias, como se había dicho a principio del capítulo. No posee ningún tipo de ganancia; se encuentra situado entre la etapa de amplificación de potencia y los transductores de salida (altavoces).

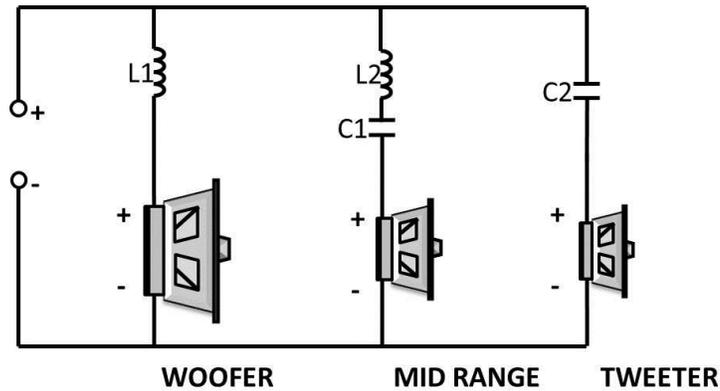
Algunos de los crossovers pasivos diseñados para alto rendimiento suelen ser más caros que los activos, dado que los elementos que componen el divisor de frecuencias deben presentar características de alto desempeño, además ser capaces de soportar niveles altos de corriente. Como consecuencia negativa tienden a ser de gran tamaño y generar pérdidas en potencia.

2.9.2.1 Principio de funcionamiento

Para entender el correcto funcionamiento de los filtros divisores de frecuencia pasivos es necesario conocer el comportamiento de algunos sus componentes y su función en determinada banda del espectro audible.

Las bobinas se comportan como un filtro pasa bajo porque su reactancia se hace pequeña a frecuencias bajas, permitiendo el paso de estas. Lo contrario sucede con los condensadores, que al trabajar en frecuencias altas reducen su reactancia; su comportamiento es similar al de un filtro pasa alto. Finalmente, la combinación de condensadores y bobinas en serie forman un filtro pasa banda, dejando pasar las tonalidades medias del espectro audible.

Fig. 2.17 Crossover pasivo de tres líneas



En la Fig. 2.17 se muestra un Woofer conectado en serie a una bobina que actúa como red pasa bajo, permitiendo la circulación de frecuencias comprendidas entre 200Hz y 1.2kHz; el rango medio es manejado por la configuración pasa banda, que se ocupa del paso de frecuencias entre 500Hz y 7kHz, para ser reproducidas por un altavoz de tipo MidRange. Finalmente, las frecuencias altas, entre 5kHz y 20kHz, son manejadas por la red pasa alta y reproducidas por el altavoz de tipo Tweeter.

El cálculo de valores de los elementos representados en la Fig. 2.17 no suele ser complicado; sólo con saber aplicar las fórmulas adecuadas se puede realizar.

El valor de L1 (Filtro pasa bajo pasivo orden 1) se calcula como sigue:

$$L1 = \frac{\sqrt{2} * Z}{2\pi * fc} \quad (2.25)$$

En donde:

Z: Impedancia en ohmios del altavoz de graves o woofer.

fc: frecuencia de corte pasa bajo.

C2 (filtro pasa alto pasivo orden 1) se puede calcular así:

$$C2 = \frac{1}{2\sqrt{2} * \pi * fc * Z} \quad (2.26)$$

En donde:

fc: frecuencia de corte pasa alto.

Z: Impedancia altavoz de agudos o tweeter.

C1 y L2 conforman la red pasa banda. Su cálculo puede efectuarse por medio de las siguientes ecuaciones:

$$C1 = \frac{f_{CH} - f_{CL}}{\pi * (f_0)^2 * Z} \quad (2.27)$$

$$L2 = \frac{Z}{4\pi * (f_{CH} - f_{CL})} \quad (2.28)$$

En donde:

f_{CH} : es la frecuencia de corte superior de la red pasa banda.

f_{CL} : es la frecuencia de corte inferior de la red pasa banda.

f_0 : es la frecuencia media y se puede determinar de la siguiente manera.

$$f_0 = \sqrt{f_{CH} * f_{CL}} \quad (2.29)$$

Z: es la impedancia del altavoz de medios o Mid range.

Ejemplo:

Se desea diseñar un crossover de tres vías con filtros pasivos de primer orden con frecuencia de corte superior igual a 3kHz e inferior de 400Hz.

Después de medir las impedancias de los altavoces a estas frecuencias se obtuvieron los siguientes valores para cada altavoz:

- Tweeter: 9Ω a 3kHz.
- Midrange: 8Ω a 400Hz y 12 a 3kHz.
- Woofer: 16Ω a 400Hz.

Solución:

En primera instancia se procede con el cálculo de la red pasa bajas por medio de la ecuación 2.25; así:

$$L1 = \frac{\sqrt{2} * Z}{2\pi * f_c} = \frac{\sqrt{2} * 16}{2\pi * 400} = 9\text{mH}$$

Para la red pasa banda se calcula la frecuencia media del sistema según la ecuación; así:

$$f_0 = \sqrt{f_{CH} * f_{CL}} = \sqrt{3000 * 400} = 1095.44\text{Hz}$$

Con base en la ecuación 2.27 y 2.28 se calcula el condensador y la bobina de la red pasa banda; así:

$$C1 = \frac{f_{CH} - f_{CL}}{\pi * (f_0)^2 * Z} = \frac{3000 - 400}{\pi * (1095.44)^2 * 8} = 0.862\mu F$$

$$L2 = \frac{Z}{4\pi * (f_{CH} - f_{CL})} = \frac{12}{4\pi * (3000 - 400)} = 1.46mH$$

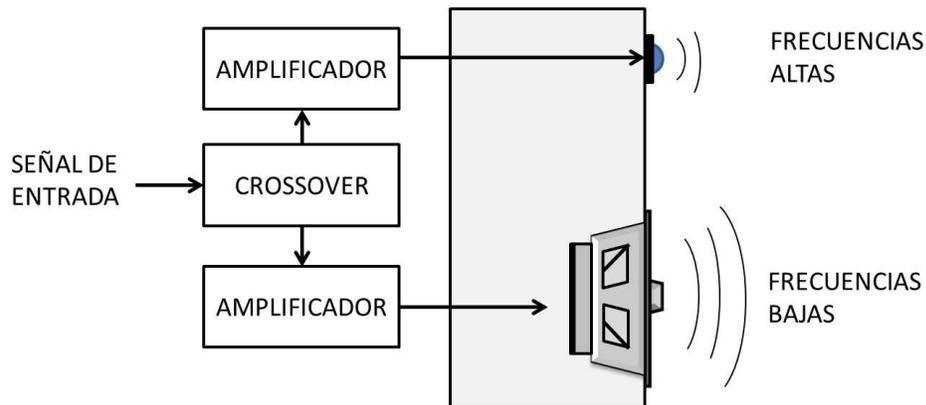
Finalmente se calcula el condensador de la red pasa altas por medio de la ecuación 2.26; así;

$$C2 = \frac{1}{2\sqrt{2} * \pi * f_c * Z} = \frac{1}{2\sqrt{2} * \pi * 3000 * 9} = 4.168\mu F$$

2.9.3 Crossover activo

El sistema activo funciona de manera similar al pasivo, con la diferencia de que sus componentes son elementos que brindan determinada ganancia a la señal. Siempre son utilizados en la etapa anterior a la amplificación de potencia y, por esta razón, cada señal extraída del espectro se amplificada por separado. Un ejemplo de crossover activo se presenta en la Fig. 2.18.

Fig. 2.18 Crossover activo de dos vías



Algunas de las ventajas que puede traer la implementación de filtros de cruce activos son:

- Crear un ajuste fino por medio de la variación independiente de los parámetros importantes como la frecuencia de corte y la ganancia en cada una de las bandas.
- Evitar pérdida de potencia que en filtros de cruce pasivos es bastante común

Los filtros de cruce activo son básicamente un estándar en la fabricación de cajas sub graves, ya que su implementación no requiere de bobinas. Realizar un filtro de cruce pasivo para dichas tonalidades es casi imposible porque su frecuencia de

corte es muy baja y esto requeriría la creación de una bobina de peso y precio bastante elevados, además de generar una alta disipación de potencia en el sistema.

El diseño de filtros activos ya ha sido explicado en el presente capítulo; por tanto la explicación de cómo elaborar un crossover activo es redundante, dado que manejan el mismo principio de funcionamiento.

2.10 RESUMEN DEL CAPÍTULO

- Los filtros eléctricos son una red circuital encargada de manipular o modificar los espectros de frecuencia de las señales, dejando pasar una banda determinada y rechazando las componentes indeseadas.
- La clasificación de los filtros se puede hacer según los elementos empleados en su composición. Por un lado se encuentran los filtros pasivos, en los cuales se utilizan elementos que no aporten ningún tipo de ganancia al sistema, como resistencias, condensadores y bobinas. Por otro se encuentran los filtros activos que están conformados por elementos como transistores y amplificadores operacionales.
- El comportamiento en frecuencia permite clasificar los filtros en: pasa bajas, pasa altas, pasa banda, rechaza banda y pasa todo. El filtro pasa bajas permite el paso de frecuencias que se encuentren por debajo de la frecuencia de corte y atenúa las que se encuentran por encima; el pasa altas funciona de manera inversa al pasa bajas; el pasa banda, deja pasar un determinado rango de frecuencias comprendidas entre la f_c superior y f_c inferior; el filtro rechaza banda, atenúa un determinado sector en el espectro y deja pasar otro. Por último el filtro pasa todo se encarga de realizar una variación en la fase de la señal.
- Para la construcción de filtros activos es necesario tener en cuenta su función de transferencia, ya que ella nos ofrece la información sobre su estabilidad.
- El diseño de filtros permite escoger entre diversas respuestas según su comportamiento, ya sea en la banda de rechazo, la de transición, o la de paso. Algunas de las respuestas más conocidas son Butterworth, Chebyshev y Bessel.
- El orden del filtro es otro de los parámetros importantes en cuanto al diseño; por medio de él se determina qué tan buen comportamiento en frecuencia tendrá; entre mayor sea el orden su desempeño se acercará más al ideal.
- La configuración Sallen-key, se caracteriza por el bajo costo de los elementos de construcción y su sencillez a la hora de sintonizar el filtro.
- Los filtros crossover o de cruce son los encargados de separar en distintas bandas de frecuencia la señal para que ésta sea reproducida de manera

eficaz por cada uno de los altavoces. Un crossover puede ser activo o pasivo.

2.11 PREGUNTAS Y EJERCICIOS

1. Explique las diferencias entre filtros activos y filtros pasivos.
2. ¿Cuáles son los componentes apropiados para la construcción de un filtro activo?
3. Determinar el orden del filtro Butterworth que posee las siguientes características:
 - Mínima atenuación en la banda de rechazo: 20dB.
 - Máxima atenuación en la banda de paso: 0.5 dB.
 - Frecuencia de corte: 1kHz.
 - Frecuencia de inicio de la banda de rechazo: 2kHz.
4. Calcule los valores de condensadores y resistencias para el filtro Butterworth en configuración Sallen-Key con el orden obtenido en la pregunta 3.
5. ¿Cuál es la función de los crossovers en la cadena de audio?

2.12 BIBLIOGRAFÍA

COUGHLIN, Robert F. y DRISCOLL, Frederick F. Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales. Traducido por Efrén Alatorre Miguel. 4 ed. México D.F. Prentice hall Hispanoamérica S.A, 1993.

PERTENCE, Antonio. Amplificadores operacionales y filtros activos. Traducido por María Isabel Gutiérrez Díaz y José Torrubias Fernández. 1 ed. Madrid. McGraw Hill, 1991.

SCHAUMANN, Rolf y VAN VALKENBURG, Mac. Design of analog filters. New York. Oxford University press, 2001.

SEDRA, Adel S. y SMITH, Kenneth C. Circuitos microelectrónicos. Traducido por Eduardo Ramírez Grycuk y Jorge Humberto Romo Muñoz. 4ed. México D.F. Oxford University press, 1999.

MALVINO, Albert P. Principios de electrónica. Traducido por José Luis Alba Castro y Carlos López Cortón. 6 ed. España. McGraw Hill, 1999.

FAULKENBERRY, Luces M. Introducción a los amplificadores operacionales con aplicación a CL lineales. México Limusa, 1992

RUIZ VASSALLO, Francisco. Diseño y fabricación de bafles. España. Creaciones cophyright, 2007.

CAPÍTULO 3 EFECTOS DE AUDIO

3.1 INTRODUCCIÓN

El sonido es una señal acústica que viaja a una velocidad de 340m/s. Al chocar contra un objeto en el medio, este absorbe una parte de su energía y otra parte es reflejada en un sentido; la parte reflejada es llamada eco.

Otro singular efecto producido por la reflexión de ondas sonoras es la reverberación. Su comportamiento físico es similar al eco, sólo que con tiempos más pequeño y en distancias menores.

Los anteriores son ejemplos de efectos sonoros producidos naturalmente, que también pueden producirse por medio de recintos adecuados como las cámaras de ecos, o por medios electrónicos.

La incursión de la ingeniería electrónica en la música trajo consigo avances en el campo del audio, tales como la simulación y reproducción de los efectos sonoros expuestos anteriormente y la creación de otros nuevos. Algunos de ellos son:

- Efectos de tonalidad.
- Efectos de nivel.
- Efectos de timbre.
- Efectos de modulación.
- Efectos de panorámica.

La introducción de los efectos creados por la modificación de las ondas de manera eléctrica, ya sea análoga o digital, permite la combinación y creación de nuevos efectos. Estos a su vez brindan a los músicos la posibilidad de adecuar y crear un sonido propio, característico y particular.

En la actualidad existen dispositivos capaces de reproducir y modificar las propiedades de algunos efectos con el accionamiento de pulsadores y potenciómetros, consiguiendo las características deseadas. Este tipo de dispositivos electrónicos son denominados procesadores de efectos.

Este capítulo se centra en mostrar las propiedades de los efectos electrónicos utilizados frecuentemente en la industria musical al igual que sus características físicas.

3.2 EFECTOS NATURALES

En el ambiente, cuando una onda sonora viaja, puede encontrar diversos tipos de obstáculos que interrumpan su transmisión; unos simplemente absorben el sonido y otros crean reflexiones de la señal. Este último acontecimiento, causa dos tipos de fenómenos bastante particulares; el eco y la reverberación.

3.2.1 Eco

La explicación de este efecto se realiza de forma más sencilla por medio de un ejemplo bastante sencillo. Cuando un individuo se encuentra situado en estadio de fútbol vacío y emite un grito, las ondas sonoras viajan hasta encontrar un obstáculo (en este caso se refiere a las paredes del estadio), la onda choca contra ellas y es reflejada hacia la persona; de esta manera, al transcurrir determinado tiempo, el individuo vuelve a escuchar lo que gritó. A este fenómeno particular se le denomina eco, y consiste en una reflexión que retorna al punto donde fue emitida.

Para que exista una producción de eco, la onda debe ser reflejada en forma perpendicular a la superficie sobre la que incide. Además el obstáculo tiene que estar separado de la fuente sonora estipulada a una distancia aproximada de 17 m para sonidos musicales y 11.34 m para sonidos secos.

Si existen varias superficies reflejantes en el ambiente se pueden generar varias reflexiones y por tal razón se producirán ecos múltiples.

3.2.2 Reverberación

La reverberación se produce cuando la fuente sonora se encuentra rodeada por diversas superficies (pisos, paredes, techos) y están a una distancia menor que las estipuladas para la generación de eco. El sonido choca con los diferentes obstáculos y crean diferentes reflexiones en el ambiente, las cuales son recibidas por el emisor en varios instantes de tiempo.

El efecto puede ser molesto en algunos escenarios públicos, como iglesias, teatros, escuelas, etc. Por lo tanto estas estructuras deben ser construidas con materiales absorbentes que provoquen un debilitamiento de la onda reflejada, para evitar el retumbo excesivo generado por la reverberación.

Un parámetro muy común encontrado en la reverberación se denomina tiempo de reverberación y se refiere al tiempo requerido para que las estructuras de material absorbente debiliten las ondas reflejadas. Técnicamente se encuentra definido como el tiempo que se demora el sonido en estar 60db por debajo de su nivel inicial. Entre más absorbente sea el material menor será el tiempo de reverberación en el recinto.

Para calcular el tiempo de reverberación se utiliza la siguiente ecuación:

$$T = 0.16 * \frac{V}{A * S} \quad (3.1)$$

En donde:

T: Tiempo de reverberación.

V: Volumen del recinto en metros cúbicos.

A: Coeficiente de absorción.

S: Superficie total en metros cuadrados (paredes, techo, piso).

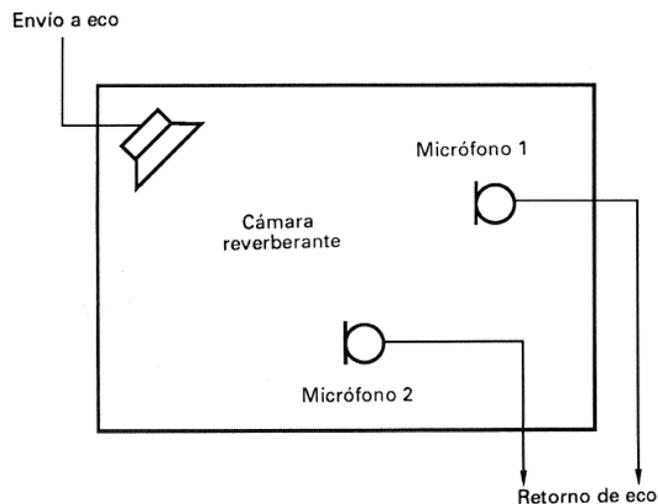
3.3 DISPOSITIVOS DE ECO Y REVERBERACIÓN

Los sistemas de audio en muchas ocasiones requieren de medios o dispositivos capaces de crear eco y reverberación. Dichos efectos se usan para brindar características especiales a la mezcla o a la señal producida por un instrumento o la voz humana. A continuación se exponen algunos de ellos.

3.3.1 Cámaras de eco y reverberación

Aunque ya no se usan, sirven para describir muy bien estos efectos. Consistían básicamente en un recinto con dimensiones de aproximadamente 100m^3 y superficies reflectantes. Entre mayor fuera el tamaño de la sala mejor serían los resultados obtenidos con este método. En ellas se encontraban dos micrófonos omnidireccionales posicionados a una distancia considerable el uno del otro y un altavoz que se encargaba de excitarlos. El procedimiento consistía en reproducir una señal de un alto nivel sonoro por medio del altavoz, los micrófonos recolectaban la señal nuevamente y con esto generaban eco o reverberación. En la Fig. 3.1 se observa la simple composición del sistema.

Fig. 3.1 Cámara de eco y reverberación



Fuente: [4]

Las cámaras de eco crean un efecto similar al producido naturalmente, dependen de una buena aislación con el ambiente externo y los dispositivos de captación y reproducción del sonido deben ser de excelente calidad.

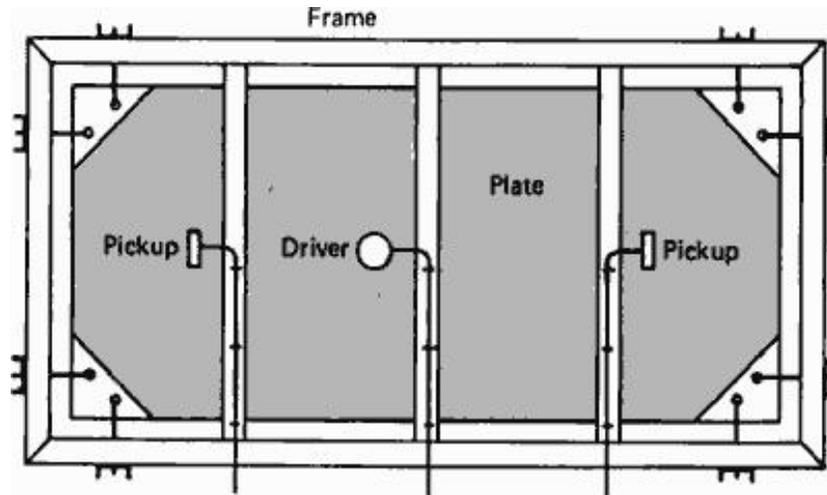
3.3.2 Placa de eco

Consiste en una gran placa metálica delgada con un área de varios metros cuadrados, encerrada en un recinto acústicamente aislado. En ella son ubicados tres transductores dos de entrada y uno de salida. El de salida reproduce la onda sonora de tal manera que la señal se refleje varias veces en la placa y luego sea recibida por los micrófonos. Al poseer dos transductores de entrada se pueden conseguir dos características de reverberación o eco diferentes.

El sistema de reverberación debe mantenerse correctamente aislado, ya que cualquier tipo de alteración producida por el aire puede afectar su funcionamiento y dañar su efecto.

Con las placas de eco (Fig. 3.2) se logran características de sonido muy suaves; por tal razón algunos procesadores digitales de efectos tratan de emular su comportamiento.

Fig. 3.2 Placa de eco



Fuente: [13]

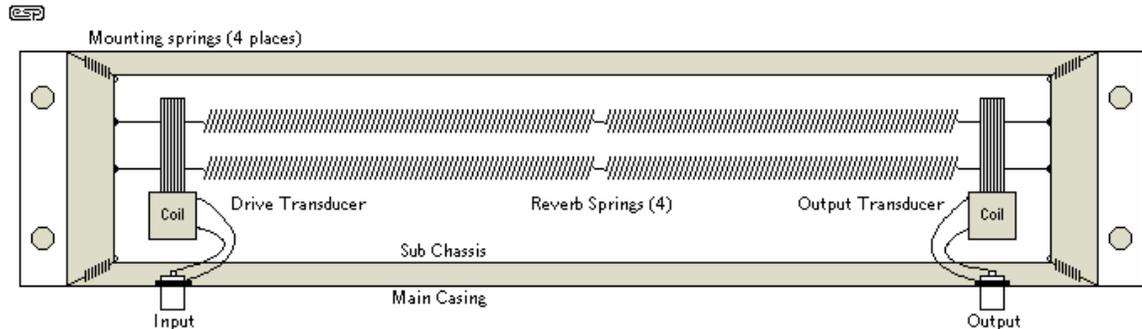
3.3.3 Reverberación producida por resortes

La reverberación producida por resortes (Fig. 3.3) consiste en un alambre con forma de espiral, sumamente delgado, excitado por medio de un transductor de salida en uno de sus extremos, cuyo propósito es generar vibraciones a lo largo del mismo. Finalmente, el efecto producido es registrado por otro transductor. (En este caso un micrófono) ubicado en el otro extremo.

Los efectos producidos sobre la señal de audio se deben a las espiras existentes en el alambre, pues hacen que la señal viaje de una manera más lenta a la que se desplaza originalmente en el aire. Así, para poder crear retrasos más largos, en el efecto, el sistema debe tener un número mayor de espiras.

La reverberación producida por resortes genera un sonido bastante metálico y algunas veces falso. Algunas empresas como la casa AKG se han dedicado a mejorar este sistema, logrado grandes resultados con su dispositivo BX20 E, el cual es muy usado en sistemas de audio profesional.

Fig. 3.3 Reverberación producida por resortes



Fuente: [14]

3.3.4 Reverberación y eco producidos por un registro magnético

Un magnetófono es un dispositivo de grabación magnético, el cual posee tres cabezales, uno de borrado, uno de grabación y por último uno de reproducción, dichos elementos se encuentran separados una determinada distancia la cual ocasiona un retardo en la señal que va a ser grabada y la reproducida. Al realizar una realimentación entre estos dos cabezales, se producirá una salida con repeticiones creando así un efecto de reverberación. El retardo se controla con la variación de la velocidad del equipo.

Este dispositivo especial es muy poco utilizado en la grabación profesional y los sistemas de audio, debido a que su proceso genera un nivel de ruido excesivo que provoca alteraciones en la señal.

3.4 REVERBERACIÓN DIGITAL (FIG. 3.2)

Generalmente, el uso de reverberación digital en el campo del audio y el sonido puede llegar a ofrecer grandes aportes, logrando enriquecer la calidad de la pista o la mezcla. Uno de ellos es emular el efecto producido por el sonido en grandes o pequeños salones, además de la simulación de los generados por los métodos vistos anteriormente, como la reverberación por resortes o por magnetófonos.

La ventaja más notoria de la reverberación digital es lograr la recreación de efectos naturales sin la necesidad de utilizar instrumentos supremamente grandes para emularlos. El efecto se produce convirtiendo la señal en digital; luego, un oscilador es el encargado de modularla, creando de esta manera un tren de pulsos

en donde la frecuencia y la longitud de cada uno de ellos indican el retardo presente en la señal.

Conseguir la recreación perfecta de un efecto de reverberación de manera digital es demasiado complicado, por no decir imposible, ya que imitar las características acústicas de un recinto en el cual se genera eco es muy difícil.

3.4.1 Tipos de reverberación

En los sistemas de reverberación digital existen varias clases de efectos prefijados. Algunos de los más conocidos encontrados en los dispositivos se presentan a continuación:

3.4.1.1 Hall

El hall es un efecto que logra recrear características similares a las producidas por la reverberación existente en grandes recintos, ya sean estadios, auditorios, etc. El efecto es largo y tardío.

3.4.1.2 Room

El room consigue emular la reflexión presente en salas pequeñas como habitaciones. Es un efecto corto.

3.4.1.3 Cathedral

Simula un efecto bien interesante como es el producido en las antiguas catedrales góticas. Los tiempos de reverberación presentes en este caso son bastante altos, al igual que su nivel de difusión sonora. El efecto cathedral, se encuentra lleno de matices y es poco recomendable para las mezclas.

3.4.1.4 Bathroom

Como su nombre en inglés lo indica, simula las características sonoras presentes en salas de dimensiones pequeñas como los baños. El resultado obtenido es algo brillante, igual al producido mediante la reflexión de ondas sonoras en los azulejos.

3.4.1.5 Plate

Brinda características similares a las generadas por la reverberación por placas metálicas, logrando generar un efecto de tipo brillante.

3.4.1.6 Spring

El spring es otro de los tantos efectos prefijados en los sistemas de reverberación digital. Su objetivo es brindar un sonido particular, como el originado mediante la reverberación por resortes.

3.4.1.7 Teathre

Como su nombre en inglés lo indica, el efecto tendrá un comportamiento similar al producido por la reflexión de ondas sonoras en un teatro.

3.4.1.8 Chamber

Particularmente el efecto de chamber se basa en el sonido reverberante presente en las cámaras de eco ya explicadas anteriormente.

3.4.1.9 Gate

Dicho efecto no emula ningún tipo peculiar de reverberación existente en algún recinto o habitación, sino que se basa en el sonido generado al colocar una puerta de ruido a la salida de una reverberación

3.4.1.10 Inverse

Produce una reverberación en forma inversa, esto quiere decir que el nivel del efecto no disminuye sino aumenta gradualmente.

3.4.1.11 Voice room

Su función es emular las propiedades sonoras encontradas en una sala adecuada únicamente para la grabación de voz.

3.4.2 Parámetros

En los sistemas de reverberación digital existen varios tipos de parámetros que permiten ajustar el efecto para que se adapte a las necesidades que desea recrear el usuario. Del fabricante depende la cantidad de modificaciones que se puedan efectuar en el dispositivo. Algunos de ellos se presentan a continuación.

3.4.2.1 Reverb time o decay

Se refiere al tiempo requerido para que la reverberación producida en un ambiente se torne inapreciable; permite ajustarse de tal manera que tiempos largos brinden el efecto de un entorno grande y tiempos cortos de cuartos pequeños.

3.4.2.2 Pre-delay o initial delay

Es el tiempo transcurrido entre el sonido producido originalmente y las primeras reverberaciones generadas; puede ser de algunos milisegundos. Entre mayor se ajuste el initial delay mayor será el área recreada.

3.4.2.3 Early reflections

Hace referencia a las primeras reflexiones provocadas por la señal de audio. En los sistemas de reverberación digital se puede ajustar el nivel de volumen y el

tiempo que tardan en llegar al oyente y en algunos dispositivos incluso se puede llegar a desactivar este parámetro.

3.4.2.4 Size o dimension

El size permite ajustar el área del recinto a emular. Casi siempre trabaja de manera conjunta con el tiempo de decay. En algunos casos especiales de sistemas de reverberación digital se pueden fijar parámetros como la altura, la profundidad y la anchura.

3.4.2.5 Difussion

Se enfoca en el nivel de objetos presentes en la sala, o sea si está llena o vacía; dicho de otra forma, indica la obstaculización presente en el recinto. Al ajustar el nivel de difussion en valores altos, genera un efecto de reverberación con mayor riqueza y complejidad.

3.4.2.6 Density

La densidad de reverberación en una sala se encarga de modificar la cantidad de reflexiones que pueden producirse en un ambiente. Entre mayor sea el número, se puede decir que la reverberación creada es más compleja, más llena. Al modificar el parámetro se puede llegar a producir efectos de habitaciones turbias.

3.4.2.7 Liveness

Representa los materiales reflexivos con los que puede llegar a estar constituida una sala. Valores altos reproducen las características como las brindadas por paredes construidas en piedra, mientras que un valor bajo puede representar paredes revestidas con materiales muy absorbentes como la moqueta.

3.4.3 Cuándo usar la reverb

Aparentemente no existe alguna norma que indique cuándo y cómo debe ser usada la reverberación, los efectos en audio están enfocados en generar una riqueza musical o dar una característica determinada a los sonidos o a la mezcla en sí, por lo tanto es decisión del usuario cuándo agregarlos a la señal.

El objetivo de agregar reverberación a la señal de audio, ya sea de un instrumento o de varios, es generar en él o ellos el efecto de haber grabado el sonido en un entorno singular. Existen algunos detalles que pueden ayudar en el momento de aplicar la reverb, los cuales serán descritos a continuación.

A la hora de agregar reverb a una canción es muy importante apreciar el tempo (velocidad con la que se ejecuta una pieza de música) que maneja la misma, debido a que si se agrega un efecto largo en un tempo rápido, podría causar que el sonido de la pista se vuelva un poco confuso. Por lo tanto, al manejar un tempo

lento el reverb debe ser largo, con esto se logra llenar el espaciado entre las notas musicales de una manera acorde.

En algunos tipos de instrumentos como la guitarra acústica, el sonido distintivo se pierde en la grabación. Dicho fenómeno se debe a que los micrófonos no captan completamente las características de reflexión que brinda la caja acústica de ella. Algunos músicos que interpretan guitarras flamencas o clásicas se ven obligados a utilizar la reverb en sus grabaciones porque, al no utilizarla, el instrumento grabado sonaría bastante seco, perdiendo sus cualidades sonoras naturales.

En los instrumentos que generan tonos graves, como es el caso del bajo eléctrico, no es recomendable utilizar efectos de reverb normales, porque tienden a volver confusa la mezcla, dado a que las frecuencias bajas se propagan a una velocidad menor que las altas.

En el caso de las baterías, son favorecidas por medio de la reverb. La adición de efectos de tipo room o plate ayudan a recobrar el sustain natural perdido durante la grabación del instrumento.

3.5 REVERB DE CONVOLUCIÓN

La reverberación producida digitalmente algunas veces no satisface las necesidades de los músicos porque el efecto generado tiende a ser metálico o demasiado artificial. Las características dependen de la calidad del equipo.

La problemática expuesta anteriormente generó la creación de la reverberación por convolución. Su funcionamiento se basa en la grabación de las cualidades sonoras de un entorno. La captación del ambiente se realiza cuando es excitada por un estímulo sonoro, en la mayoría de los casos una onda seno. Una ventaja notable presente en la reverb por convolución es poder dar un estilo similar al de un recinto sin estar grabando en él. Por ejemplo: el usuario escucha la grabación de una orquesta en un teatro y quiere otorgar el mismo sonido a su pista. Si posee una muestra de las características acústicas del recinto, lo puede realizar fácilmente sólo agregándola por medio de un procesador de reverb por convolución. Entre más muestras se tengan mayor número de entornos se podrán recrear.

La cualidad más notoria en el caso de la reverb por convolución es la perfecta emulación de entornos como iglesias, estadios, teatros, entre otros casos particulares. Si el usuario busca recrear entornos de forma real, la reverb por convolución es la solución.

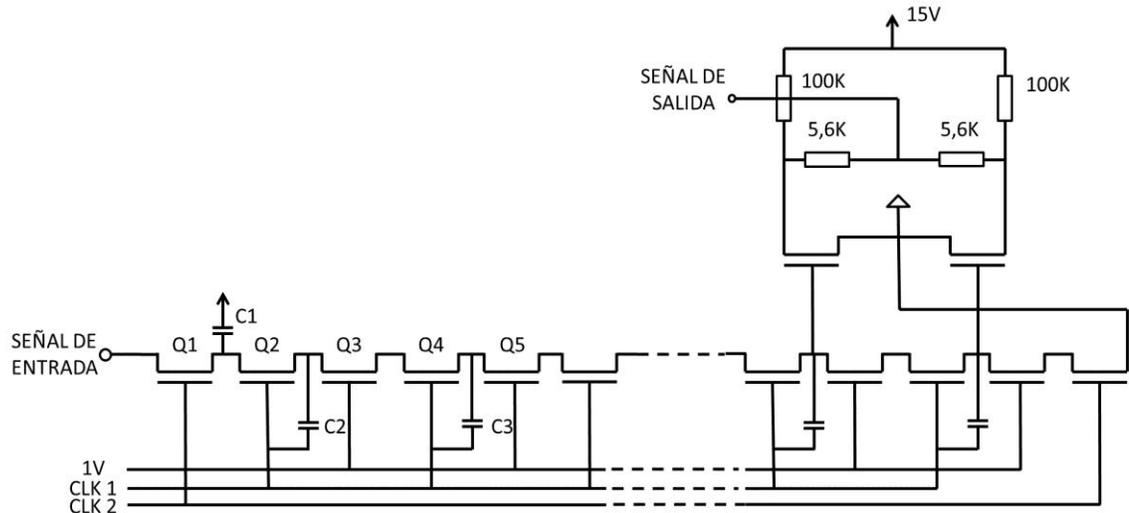
3.6 EFECTOS DE RETRASO (DELAY)

Por medio de la creación de retrasos de la señal de audio se pueden reproducir los efectos ya nombrados, como el eco, que es una repetición discreta, de manera individual perceptible, y la reverberación, basada en la reunión de ecos, de forma

temprana y tardía. Además, los retrasos en la señal permiten la creación de otros efectos como el chorus, o coro, que simula una pequeña asincronía de dos instrumentos tocados al mismo tiempo, y finalmente el flanger, que imita el efecto creado al reproducir dos cintas análogas al mismo tiempo.

3.6.1 Dispositivos Bucket brigade (BBD)

Fig. 3.4 Circuito interno BBD



Fuente: [15]

Un dispositivo BBD (MN3009) consiste en un número n de transistores y condensadores conectados entre sí, como lo muestra la Fig. 3.4. Presenta dos señales de reloj, $clk1$ y $clk2$, las cuales deben presentar lógica inversa, es decir que cuando uno de ellos se encuentre en un nivel alto el otro debe estar en bajo. Si $clk2$ posee un 1 lógico se enciende el transistor $Q1$ y la señal fluye hacia el condensador $C1$; luego de un tiempo $clk2$ pasa a 0 y el $clk1$ está encendido o sea un uno lógico. Por tal razón el transistor $Q2$ conduce y la señal almacenada en $C1$ pasa a $C2$. El proceso se repite para todas las etapas del dispositivo. Las puertas de los transistores de número impar son conectadas a una alimentación positiva de 1V. Todo el proceso anterior genera un retraso en la señal que finalmente es recuperada a la salida del circuito, mediante una red encargada de anular parcialmente los impulsos de reloj.

El retraso otorgado a la señal depende de la frecuencia a la que trabajen los relojes, esta puede oscilar entre 10 y 200kHz, entre menor sea la frecuencia mayor será el retraso. Los chips BBD encontrados en el mercado pueden ser de 64 a 4096 etapas, creando de esta manera retardos de hasta 200ms. La señal de salida del dispositivo puede presentar algunos residuos de la señal de reloj; por lo tanto es necesaria la implementación de un filtro pasa bajo para suprimir estas

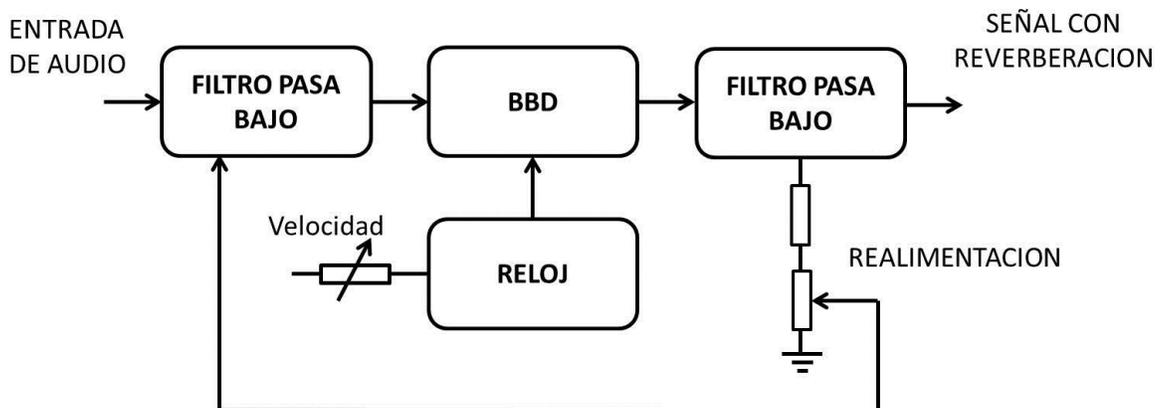
alteraciones. Además, la velocidad a la que trabaja el reloj puede generar problemas de aliasing y para esto se debe implementar otro filtro pasa bajo en la entrada.

3.6.1.1 Reverberación

La reverberación se puede reproducir por medio de un BBD, realimentando una cantidad variable de la señal retardada; de esta forma se crea un sistema de lazo cerrado. La naturaleza del efecto varía con la duración del delay y el porcentaje de señal realimentada. Para lograr ofrecer una reverberación de tipo más realista se utilizan BBDs que posean mayor rango en los tiempos de retardo; con ello se puede emular o brindar la característica de tiempos de regreso más tardíos y más recientes.

La Fig. 3.5 muestra el diagrama de bloques para la construcción de un efecto de reverb por medio BBD.

Fig. 3.5 Diagrama de bloques efecto de reverberación



Fuente: [15]

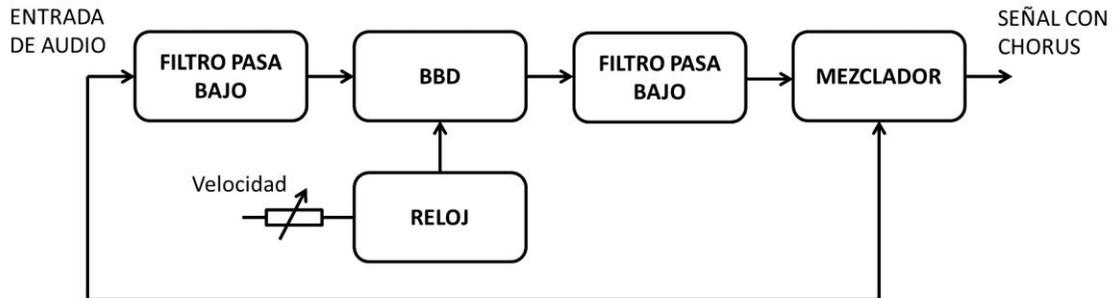
3.6.1.2 Chorus o coro

Consiste en la unión de dos señales, una directa y otra con un pequeño desfase respecto a la original, basado fuertemente en el retraso generado en la señal. El chorus se puede implementar por medio de un BBD. El efecto gana realismo con la aplicación de un pequeño cambio al azar en la alimentación de retraso.

La utilización del efecto chorus en un instrumento añade grosor a la señal de audio del mismo. Dicho en otras palabras, se obtiene un sonido con mayor riqueza musical. Es por lo tanto un efecto que proporciona mayor profundidad en la señal y por dichas razones es utilizado frecuentemente en guitarras o teclados.

La Fig 3.6 muestra el diagrama de bloques de la implementación de dicho efecto.

Fig. 3.6 Diagrama de bloques efecto chorus



Fuente: [15]

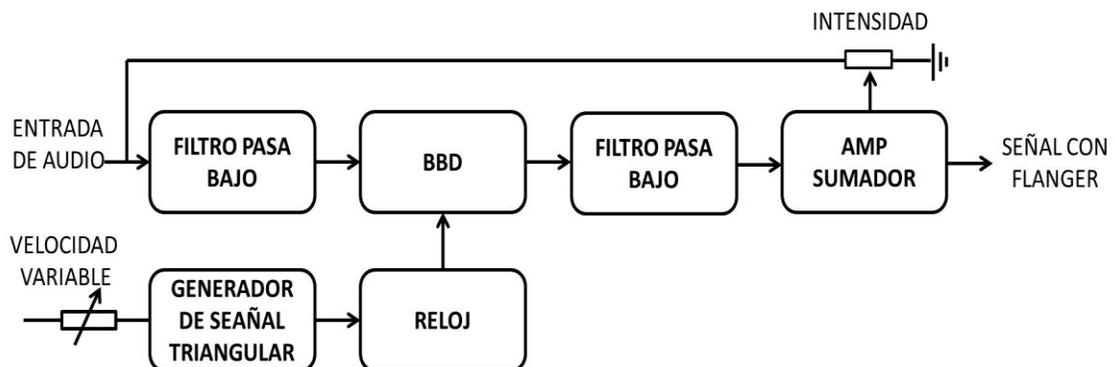
3.6.1.3 Flanger

El flanger se produce de mezclar dos señales similares en las que una de ellas presenta un pequeño desfase o retardo, que puede ser disminuido o aumentado de acuerdo con el tiempo. Los valores de retardo suelen encontrarse entre 1 y 20 ms. Se caracteriza por brindar al instrumento un sonido de tipo metálico; mucha gente se refiere a él con el nombre de whoosing, ya que es muy similar al sonido producido por un avión de reacción en vuelo. Presenta una oscilación bastante notoria a frecuencias altas, y medias y es muy utilizado en las guitarras eléctricas para brindar las características ya nombradas.

La reproducción de un flanger por medio de un BBD se realiza alterando la fase de la señal por medio del retraso generado. Esto permite que el BBD produzca las muescas características del rastreo de desfase y de esta manera garantizar una muy buena emulación del efecto.

La Fig. 3.7 muestra el diagrama de bloques de la construcción del sistema descrito anteriormente.

Fig. 3.7 Diagrama de bloques efecto flanger



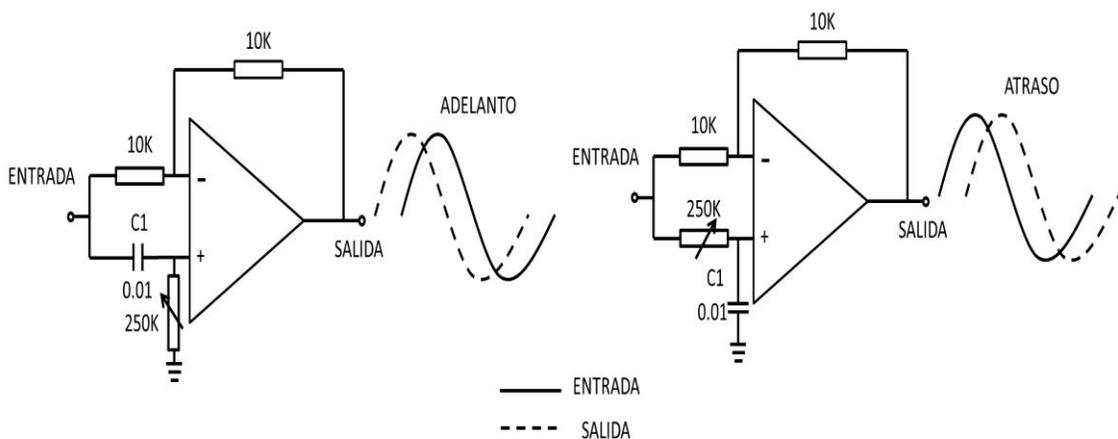
Fuente: [15]

El efecto de flanger fue descubierto en una de las grabaciones de un disco de John Lennon, donde se buscaba una alternativa a la duplicación de voces sin realizar doble trabajo.

3.7 EFECTOS DE FASE

Varios efectos se pueden crear según la modificación de su fase. El más común de ellos es el control de tonos, el cual se centra en modificar la fase y la amplitud de la señal. Un dispositivo electrónico conocido, encargado de modificar la fase sin alterar la amplitud es el filtro pasa todo (APF). Existen de adelanto, que llevan la fase de la señal de salida por delante de la de entrada, y los de retraso, que hacen lo contrario. El filtro pasa todo sólo puede desfazar la señal en 180° . En la Fig. 3.8 se pueden observar las dos configuraciones APF.

Fig. 3.8 Filtro pasa todo de adelanto y de atraso



Fuente: [15]

Los filtros presentes en la Fig. 3.8 poseen ganancia unitaria; la modificación de su fase se realiza por medio del potenciómetro de 250k; el valor del capacitor debe ser pequeño para trabajar a altas frecuencias y relativamente alto para bajas.

El cambio de fase estática no genera efectos en sistemas mono, pero posee la característica de haber establecido los dos mejores sistemas de codificación cuadrática en los años 70 y actualmente es usada en algunos tipos de sintetizadores estéreo. El cambio de fase estéreo es la clave en la forma de localizar sonidos. Un oyente se centra entre dos pequeños altavoces a 2.4m de ellos y escucha una sola señal cuando ésta es balanceada. A esto se le conoce como imagen centrada. Cuando la fase entre los canales cambia, la imagen se amplía y se torna difusa e imposible de precisar.

Rítmicamente el cambio de fase se manifiesta como un movimiento aparente del tono mientras la fase va cambiando. El efecto se compara con una simulación electrónica del efecto doppler. El sonido resultante es diferente del trémolo y es llamado vibrato de tono. El vibrato estéreo connota un sistema en el que la fase de cada canal se mueve en dirección contraria de la otra. Ambos, tono e imagen sonora, cambian con cada ciclo.

El cambio de fase suele usarse en cajas de distorsión para generar el cambio de los puntos de transición en la conversión de onda seno a cuadrada.

3.7.1 Vibrato

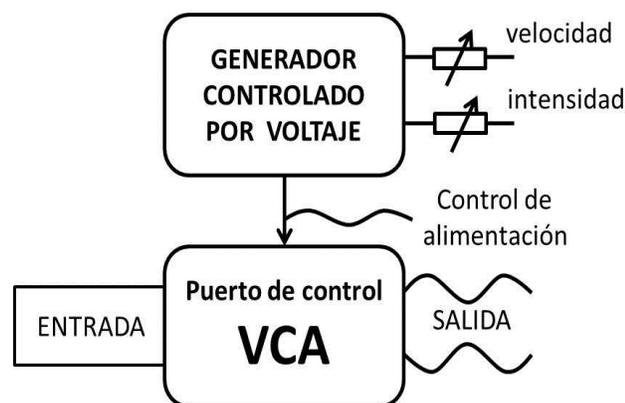
El vibrato es logrado mediante la variación periódica de la frecuencia de la señal; es un efecto de modulación, haciéndose presente en los cambios de altura tonal del instrumento. Muchos músicos lo utilizan para aportar una característica particular al final de las frases en sus creaciones. En instrumentos de cuerdas, como guitarras, bajos, y otros, el vibrato se puede lograr simplemente con pulsar la cuerda y realizar un movimiento ascendente y descendente con la mano que se encuentra en los trastes mientras se mantiene presionado.

Por medio de la electrónica, un vibrato típico se construye fácilmente con la conexión en cascada de los circuitos mostrados en la Fig. 3.8. Cada uno de ellos presenta valores de capacitancia de 0.01µf. Para poder definir la banda en que el cambio de fase se va a hacer más notorio, correspondiente a bajas frecuencias en la guitarra. Los valores pequeños de condensador enfatizan las frecuencias, pero tiene un límite, y este no debe ser menor a 0.0015 µf. Al seleccionar diferentes valores de capacitancia para cada circuito se logra un efecto de vibrato brillante, menos fuerte pero más musical que el producido con 0.01 µf.

3.8 TRÉMOLO

La Fig. 3.9 muestra el diagrama de bloques de la construcción de un efecto de trémolo.

Fig. 3.9 Diagrama de bloques efecto trémolo



Fuente: [15]

El trémolo o efecto matiz, como se le conoce en algunos casos, es muy parecido al chorus, pero sus características son más marcadas, tanto en la profundidad como en la variación del retardo. Se crea al generar un cambio en la intensidad de la señal o, en otras palabras una modulación simple de amplitud. La construcción del efecto trémolo, puede lograrse mediante un amplificador controlado por voltaje (VCA) y un generador controlado por voltaje.

Para generar un sistema de trémolo más musical debe operar en frecuencias comprendidas entre 1 y 5 kHz. Los valores fuera de este rango son útiles para los efectos especiales.

3.8.1 Generador controlado por voltaje

Es un sistema, capaz de generar en su salida una forma de onda estable, periódica y con una frecuencia determinada, donde el sonido del tremolo depende de su velocidad y de su forma. En la mayoría de los circuitos se utilizan ondas sinusoidales o triangulares para controlar la alimentación debido a que la diferencia sonora producida es muy pequeña. Un chip generador de funciones es el candidato ideal para hacer más fáciles y convenientes los ajustes; por otra parte también es posible utilizar un amplificador operacional basado en osciladores para este fin. Las fuentes que generan ondas cuadradas no son idóneas para este caso ya que contaminan accidentalmente la señal con algunos clics. Por lo tanto su utilización no es conveniente.

La modulación de la onda puede tomar cualquier forma, con la precaución de evitar que los picos de señal creen sonidos en el instrumento cuando este se encuentre en silencio.

3.8.2 VCA (amplificador controlado por voltaje)

El VCA es un tipo de amplificador particular, cuya ganancia puede ser controlada por medio de un voltaje adicional. Con cualquier VCA se podría construir un efecto de trémolo si la ganancia fuera lo único importante. Pero existe un parámetro denominado feedthrough, equivalente a una fracción del voltaje de control aplicado, que se hace presente junto a la señal de salida del VCA, manifestándose en forma de golpes o pulsaciones audibles cuando el instrumento se encuentra en silencio. Para la construcción del efecto de trémolo es conveniente usar un VCA NE570 porque el nivel de feedthrough en el chip es tan bajo como para obviarlo.

3.9 FUZZ

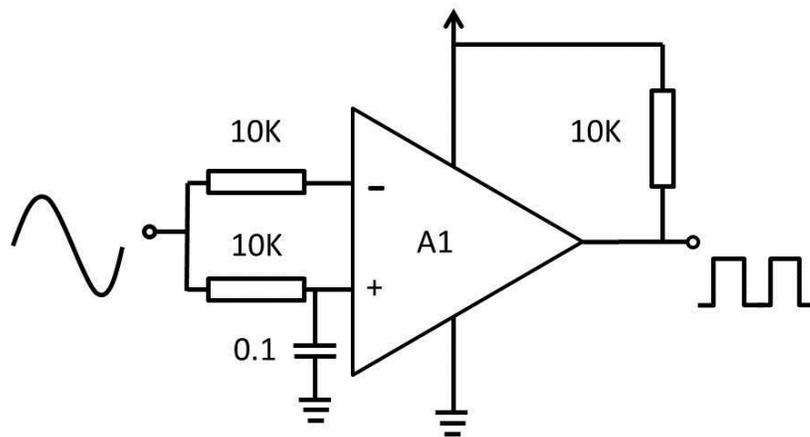
Es un efecto de tipo deliberado y estridente con una naturaleza vibratoria, conocido principalmente como distorsión. El oído humano distingue una onda sinusoidal como derecha y pura; por lo tanto aquellas conocidas como ondas con

distorsión son las señales seno corruptas. Aunque el número de alteraciones sufridas por la onda es grande, sólo con algunas se puede generar dicho efecto.

3.9.1 Conversión seno a cuadrada (SSC)

El sistema de conversión SSC como el mostrado en la Fig. 3.10 utiliza circuitos que poseen sólo dos estados en la salida: alto y bajo. Un ejemplo de ellos puede ser el detector de cruce por cero y los disparadores Schmitt. Una vez se obtiene la onda cuadrada, los flancos delantero y trasero pueden alterarse fácilmente mediante las redes de ataque y decaimiento como las utilizadas en el detector de nivel (capítulo 4 compresores).

Fig. 3.10 Red SSC



Fuente: [15]

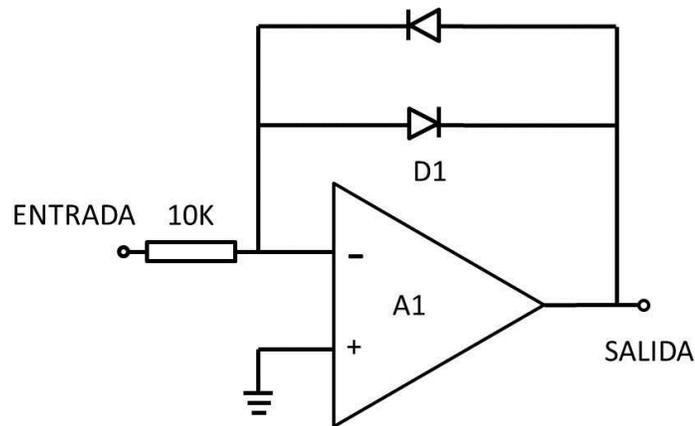
La conversión de onda seno a cuadrada se presta para alterar la velocidad del efecto. Los cambios musicalmente aptos pueden ser a la mitad, un cuarto, el doble, o el cuádruple de la frecuencia. La división por dos se logra mediante un flip flop. La división por 4 se hace, entonces, poniendo dos flip flops en serie. El doblado de frecuencia se puede conseguir fácilmente con una compuerta OR exclusiva.

3.9.2 Recorte con diodos

Consiste en dos diodos en paralelo conectados de forma invertida, como se muestra en la Fig. 3.11, en el lazo de realimentación de un amplificador operacional; estos se encargan de aplicar una curva particular a la ganancia. El amplificador intenta aplicar su ganancia de lazo abierto por debajo del umbral de conducción de los diodos. Esta es una razón por la cual el efecto de fuzz es ruidoso. Una vez la señal supera la caída de tensión de los diodos, el voltaje será proporcional al logaritmo de la corriente a través de los diodos. El recorte por diodos crea un sonido más suave el producido por SSC.

Este método permite la manipulación de diversas variables durante la creación. Al reducir la ganancia del amplificador operacional a un bajo nivel, el efecto Fuzz se mantiene pero disminuye la sensibilidad y el ruido. El aumento mejora el seguimiento dinámico sin perder por completo la distorsión. El punto de conducción de los diodos se puede alterar poniendo un potenciómetro a la salida; además, la implementación de un condensador en la realimentación sesga la respuesta en frecuencia. El sonido también cambia de acuerdo con las caídas de tensión de los diodos.

Fig. 3.11 Red de recorte por diodos



Fuente: [15]

3.10 RESUMEN DEL CAPÍTULO

- Cuando el sonido choca contra un obstáculo, una parte de la señal es absorbida y otra es reflejada. La componente reflejada es conocida como eco y depende del espacio entre el emisor y el objeto que interfiere en su propagación.
- La reverberación es otro fenómeno de la reflexión de ondas sonoras. La principal diferencia entre el eco y la reverberación es que esta última se produce en un tiempo más pequeño y en distancias más cortas.
- El descubrimiento de los efectos de reverberación y eco en la música trajo consigo grandes aportes en cuanto al robustecimiento de los sonidos en los instrumentos, brindándoles cualidades de profundidad.
- En un comienzo, para producir efectos de eco y reverberación, era necesario hacer uso de grandes salas construidas con materiales reflectantes, en donde se situaba un altavoz encargado de producir el sonido y dos micrófonos que captaban la señal sonora con las características generadas por la sala. Este tipo de recintos era conocido con el nombre de cámara de eco y reverberación.
- Una forma más práctica de generar eco y reverberación es por medio de resortes. El método consiste en un alambre con forma de espiral que es

excitado por un transductor de salida en uno de sus extremos creando oscilaciones en el resorte. Finalmente el efecto es captado por un micrófono situado en el otro extremo.

- Más tarde la revolución digital introdujo al mercado los famosos sistemas de reverberación digital. En ellos se consigue emular diferentes tipos de características como las producidas por los efectos naturales en estadios, cuartos pequeños, catedrales, etc.
- Los efectos de reverberación producidos digitalmente o de forma mecánica generan un sonido de tipo metálico que para algunas personas suele ser de poco agrado. Por esta razón surge la reverberación por convolución, que logra producir un efecto de tipo más natural.
- La utilización de efectos como la reverberación en una pista de audio debe hacerse de manera cuidadosa, ya que al aplicarla de manera excesiva puede tornar los sonidos difusos.
- Por medio de circuitos encargados de modificar las señales, la electrónica permitió recrear los efectos naturales, además de la creación de un nuevo grupo de ellos como el flanger, el vibrato, el trémolo, entre otros.

3.11 PREGUNTAS Y EJERCICIOS

1. ¿Cómo se producen los efectos de reverberación y eco de forma natural?
2. ¿Qué cualidades brinda añadir efectos a una mezcla de audio?
3. Nombre y describa algunos de los efectos prefijados en los procesadores de reverberación digital.
4. Realice un cuadro comparativo entre la reverberación producida por resortes y la generada por medio de cámaras de eco.
5. Dé ejemplos de otros tipos de efectos utilizados en audio, aparte de los nombrados en el capítulo.

3.12 BIBLIOGRAFÍA

MOMPÍN, José. Manual de alta fidelidad y sonido profesional. 2 ed. Barcelona. Marcombo, S.A, 1989.

RUMSEY, Francis y MC CORMICK, Tim. Introducción al sonido y la grabación. 5 ed. Madrid. Ediciones Omega S.A, 2008.

BOSCORELLI, Nicholas. The Stomp box cookbook. 2 ed. United States of America. Guitar project books, 1999.

MORÁN, Wilber. Diseño de un procesador de efectos de sonido en un fpga. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero electrónico, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2009.

PÉREZ, Ángel. Estudio de efectos de audio para guitarra, e implantación mediante dsp. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero industrial, Universidad Pontificia Comillas, 2006.

ELLIOTT, Rod. Spring Reverb Unit For Guitar or Keyboards. 2006. Disponible en: <http://sound.westhost.com/project34.htm>

BUONTEMPO, Bob. How To Build Your Own Plate Reverb: A Concise Step By Step Process. 2011. Disponible en: http://www.prosoundweb.com/article/print/how_to_build_your_own_plate_reverb

VARGAS, Miguel. Efectos de retardo, disponible en: <http://miguelvf.files.wordpress.com/2010/11/efectos-2.pdf>

VARGAS, Miguel. Efectos de modulación, disponible en: <http://miguelvf.files.wordpress.com/2010/11/efectosdemodulacion.pdf>

GOMEZ, Emilia. Efectos digitales básicos, 2009 disponible en: <http://www.dtic.upf.edu/~egomez/teaching/sintesi/SPS1/Tema10-EfectosDigitales.pdf>

DE OYARBIDE, Mario. Moduladores de sonido y sus aplicaciones, 2006, disponible en: <http://www.cetear.com/mod/modson.pdf>

DE LOREDO, Leandro. Procesadores: Delay, disponible en: <http://www.sonidoanda.com.ar/principal.htm>

DE LOREDO, Leandro. Procesadores: Reverb, disponible en: <http://www.sonidoanda.com.ar/principal.htm>

CAPÍTULO 4 COMPRESORES Y COMPUERTAS

4.1 INTRODUCCIÓN

En el procesamiento de audio es posible encontrar señales de dinámica mixta; esto quiere decir que contienen niveles que pueden sonar más altos que otros. Un claro ejemplo de este tipo de señales se presenta cuando una persona habla por un micrófono; en este momento puede existir la posibilidad que el usuario hable muy fuerte, llegando así a los niveles de distorsión en la señal, y en otro que hable tan suave que encuentre los niveles en que la señal no es entendible.

Existe un parámetro denominado rango dinámico el cual consiste en la diferencia entre los niveles sonoros máximos y mínimos presentes en una señal de audio. El rango dinámico puede ser modificado por medio de instrumentos llamados compresores y compuertas que logran mantener niveles estables en el audio si estos llegan a extenderse a niveles que puedan alcanzar los rangos de distorsión o de pérdida de la señal; de igual manera, pueden atenuar señales problemáticas como el ruido.

La incursión de los procesadores de dinámica (compresores y compuertas) en la música trajo como ventaja poder matizar los sonidos y con esto lograr una excelente calidad de audio.

El compresor funciona como un operario en una consola: si detecta un nivel alto, baja un poco el volumen, y si encuentra un nivel bajo lo sube, haciendo este proceso de forma automática.

Las compuertas funcionan atenuando los niveles que se encuentren por debajo de un nivel denominado umbral, y debido a que el ruido generalmente es una señal de baja amplitud, puede reducirse por medio de dichos dispositivos.

Los compresores y compuertas permiten fijar los siguientes parámetros:

- Umbral: fija el nivel en el cual actúan compresores y compuertas.
- Ratio: establece las características de compresión en la señal.
- Attack: fija la velocidad en que los dispositivos de dinámica deben actuar una vez se supere el nivel de umbral.
- Release: fija la velocidad en que el compresor y la compuerta deben actuar una vez la señal se encuentre por debajo del umbral.

En el presente capítulo se busca exponer el funcionamiento y utilidad de este tipo de dispositivos, al igual que brindar ejemplos sobre algunos de los más utilizados en el mercado, ya sean análogos o digitales, en el procesamiento de señales de audio.

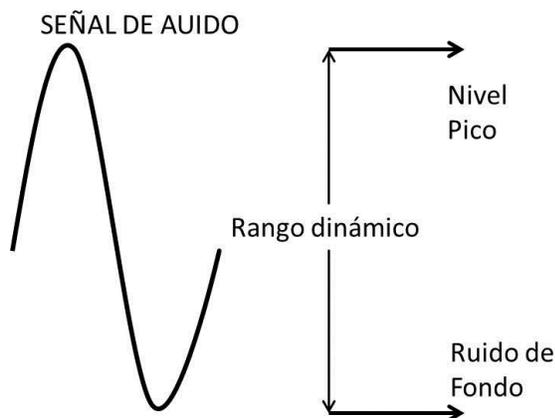
4.2 RANGO DINÁMICO (FIG. 4.1)

Se encuentra definido como la diferencia entre el nivel más alto (nivel pico) y el más bajo existentes en una señal de audio. Cuando es sobrepasado el nivel máximo, se presenta una saturación o distorsión, y al ser superado el nivel más bajo se presenta el llamado ruido de fondo. Muchos dispositivos determinan la calidad del instrumento de acuerdo a su rango dinámico, si el dispositivo tiene un amplio rango dinámico se puede decir que es un sistema de alta calidad y viceversa.

El rango dinámico se puede reducir cuando el valor pico o RMS de la señal es demasiado alto para un ambiente determinado; además para lograr armonía en una mezcla y que ésta suene más llena, interesante y coherente.

El truco con la dinámica se encuentra basado en saber cuándo realzar o disminuir la señal y cuándo esto puede llegar a ser un problema. El incremento del rango dinámico se denomina expansión y la reducción compresión, estos dos a su vez se dividen en ascendentes y descendentes.

Fig. 4.1 Rango dinámico



Fuente: [1]

La compresión descendente es la forma más popular en la que puede ser modificado el rango dinámico. En ella se toman los valores altos y se bajan a un nivel apropiado. La ascendente se encarga de llevar los pasajes de nivel bajo a alto.

Cuando se habla de la expansión ascendente se refiere a subir aún más los niveles altos de la dinámica, son útiles para restaurar niveles perdidos. Por otro lado, la expansión descendente se encarga de llevar los niveles bajos aún más bajo y su utilización se hace presente en reducción de ruido, siseo o filtraciones de sonido.

Algunas de las razones para realizar la compresión en sistemas de audio son:

- Comprimir la energía de la señal. Esto quiere decir que se mantienen constantes los niveles de señal. Por ejemplo si un cantante grita, susurra o simplemente canta normalmente, el nivel de la señal siempre será el mismo.
- Controlar el nivel pico de una señal. Se realiza para evitar que los niveles excesivos puedan generar daños en los componentes de los sistemas de audio, tales como altavoces amplificadores y otros.
- Reducir el margen dinámico de una señal. Consiste en atenuar los picos de la señal para que estos no sean limitaciones en algunos sistemas.
- Evitar la saturación en medios de grabación y transmisión, o simplemente para lograr un nivel de sonido deseado.

4.3 COMPRESOR

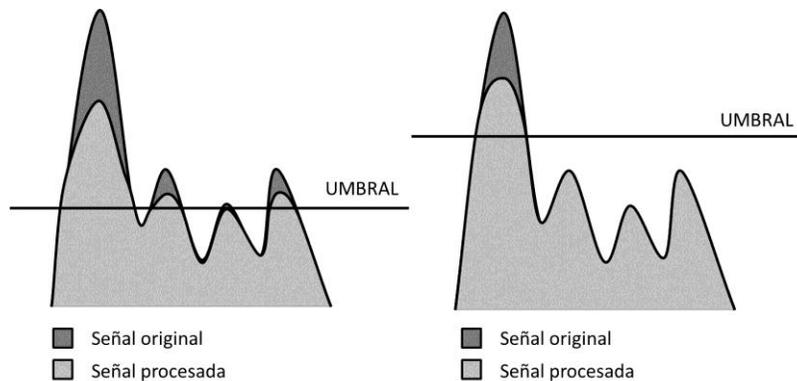
Básicamente, el compresor es un procesador encargado en mantener y controlar los niveles de la señal de audio. Los compresores son amplificadores construidos para disminuir el rango dinámico mediante la variación de la ganancia aportada a la señal. Al realizar dichas operaciones se puede alejar la señal de los puntos críticos con el fin de adecuarla a las necesidades del sistema de sonido. El uso excesivo de la compresión puede volver la señal inservible.

Así como existen compresores descendentes y ascendentes también existen compresores de modo doble que realizan un aumento o una disminución en la ganancia de la señal.

Debido a las diferentes características presentes en la señal, es necesario un número determinado de controles para la manipulación del compresor, estos son presentados a continuación.

4.3.1 Nivel de threshold o umbral

Fig. 4.2 Nivel umbral



Se encarga de delimitar el área en que trabajará el compresor; si la señal se encuentra por debajo del nivel umbral, el dispositivo permitirá el paso de la señal sin ninguna alteración; pero si su nivel se encuentra por encima, el procesador de dinámica efectuará la debida atenuación. Entre más baja sea la ubicación del nivel umbral mayor compresión tendrá la señal; esto se puede apreciar en la Fig. 4.2.

4.3.2 Tiempo de ataque

Básicamente es el tiempo que tarda la señal en comprimirse cuando esta sobrepasa el nivel umbral. El tiempo mínimo empleado oscila entre $50\mu\text{s}$ y $500\mu\text{s}$, dependiendo de la calidad y del tipo de compresor que se trabaje. Los tiempos máximos varían entre 20 y 100ms. Algunas veces la excesiva velocidad del ataque puede generar distorsiones.

Existe una clase de compresor que divide la señal en varias bandas de frecuencia y actúa sobre la dinámica de cada una de ellas mas no sobre la señal completa; en este tipo de dispositivos se pueden programar tiempos de ataque distintos para cada una de las bandas. La elección del tiempo de ataque depende de las características que posea la señal que se desea procesar.

4.3.3 Tiempo de relajación o liberación

Este parámetro indica el tiempo que demora un compresor en dejar de actuar cuando la señal ya no supera los niveles de umbral; los tiempos de relajación suelen ser más largos que los tiempos de ataque; sus valores típicos oscilan entre 40ms y 5sg. Si el tiempo de liberación es muy corto, la ganancia se restaurara a su estado normal rápidamente creando un desbalance de niveles. Además, si es muy largo, el compresor seguirá aplicando la compresión o reducción de ganancia cuando aparezca la siguiente señal y si es un sonido bajo de volumen será suprimido y se perderá la característica del compresor.

4.3.4 Radio o relación de compresión

Dicho parámetro fija la cantidad de atenuación que se va a aplicar a la señal de entrada. Se fija como una relación entre la entrada y la salida expresadas en decibeles. Por ejemplo: (3:1), esto significa que la señal que se encuentra por encima del nivel de threshold se atenuara en un tercio de la señal. Se puede decir que una relación (3:1) es una compresión moderada, una (5:1) media, (8:1) alta y finalmente (20:1) ya es considerada como una limitación.

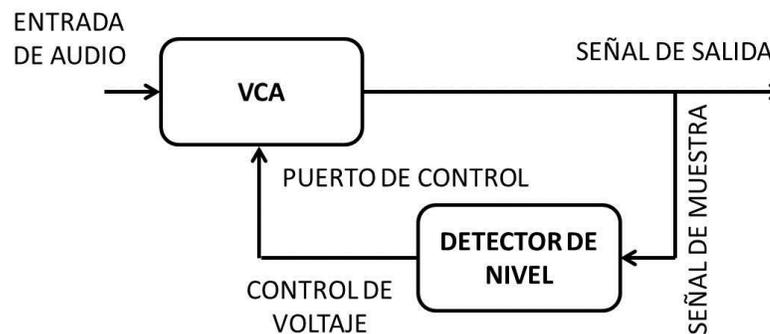
4.4 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL COMPRESOR

La compresión es realizada por un dispositivo de ganancia variable que es conocido como amplificador de voltaje controlado (VCA). Los VCA vienen en chips específicos o se pueden construir a partir de amplificadores operacionales. Poseen una salida, y al menos un puerto de control alimentado por el detector de nivel. La Señal de audio alimenta el VCA y al detector de nivel, cuando el nivel de

señal aumenta, también lo hace la salida del detector, reduciendo la ganancia del VCA. Cuando el nivel de señal cae, la salida detecta la caída y el la ganancia del VCA se mueve a un nivel de reposo o estable.

El detector de nivel prácticamente se encarga de comparar que la señal presente en la entrada o señal a procesar no supere el umbral. Lo anterior es realizado por medio del amplificador controlado. Si el umbral no es superado el VCA tendrá ganancia de 1, por lo tanto la señal no poseerá ninguna alteración. Pero, si se supera, se aplica una reducción fijada previamente por medio del radio. Un ejemplo básico del funcionamiento de un compresor es un operador de una consola que se encarga de subir el volumen si nota que la señal sonora es demasiado baja, y de bajarlo si es demasiado alta, con la diferencia de que el compresor realiza este procedimiento de manera automática. En la Fig. 4.3 se muestra el diagrama de bloques de lo expuesto anteriormente.

Fig. 4.3 Diagrama de bloques compresor



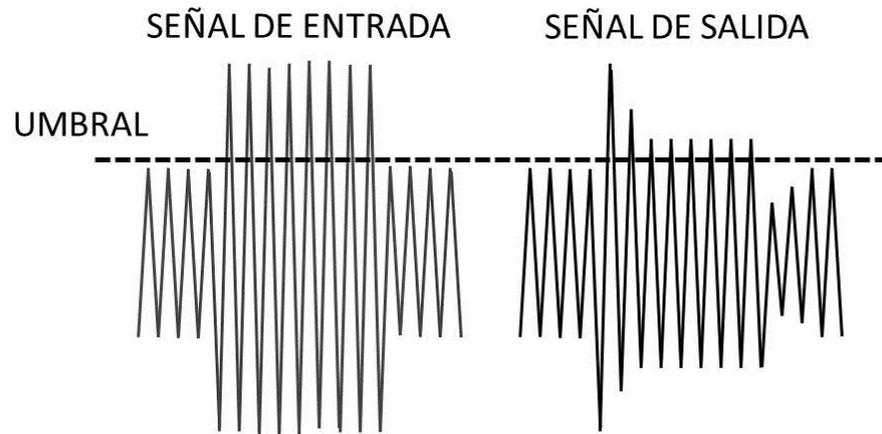
Fuente: [15]

Sesgar la señal antes de la etapa de detección de nivel afecta la respuesta del compresor a diferentes frecuencias. Por ejemplo, el énfasis en agudos exagera la compresión de altas frecuencias, pudiendo ocasionar sibilancia (sonidos de alta tonalidad, semejantes a un silbido).

4.4.1 Efectos del tiempo de ataque y de relajación en la señal

Cuando una onda supera el nivel umbral, el compresor debe aplicar una reducción en la señal. Este fenómeno no se efectúa de manera instantánea; por tal motivo la señal procesada se atenuará de manera progresiva hasta llegar al punto en que la ganancia aplicada es estable. A su vez, cuando la señal procesada deja de sobrepasar el nivel umbral, la atenuación continúa haciendo efecto en la señal. Esto genera una reducción momentánea de la misma. Lo ideal sería que las variaciones de ganancia se aplicaran instantáneamente, pero, como es común, el proceso de compresión real posee sus alteraciones. Los efectos descritos anteriormente se pueden observar en la Fig. 4.4.

Fig. 4.4 Efectos tiempo de ataque y tiempo de relajación



Podría decirse que existe un error en la compresión debido a que se presenta una distorsión y no se cumpliría el objetivo, que sería atenuar la señal de forma constante, pero una distorsión en un tiempo corto es menos nociva que el efecto creado con una atenuación brusca de la señal.

Tanto el tiempo de ataque como el de relajación deben ser aplicados de manera cuidadosa, dependiendo del tipo de señal que se trabaje; por ejemplo, un tiempo de ataque muy corto aplicado a una señal producida por un instrumento de notas graves como el bajo, puede afectar de manera total su señal volviéndolo prácticamente imperceptible. La solución para frecuencias bajas o tonalidades graves es efectuar un tiempo de ataque largo para evitar estos inconvenientes.

4.5 USOS TÍPICOS DE LOS COMPRESORES

Los compresores son altamente utilizados en los sistemas de audio, ya sea para grabación o sonido en vivo entre otras aplicaciones. Algunos de los usos más frecuentes son:

- En radiodifusión son utilizados para lograr que el locutor brinde una pronunciación clara para el oyente.
- De nuevo en radiodifusión, se usan para lograr bajar los niveles de música mientras el locutor habla en determinado espacio de la canción; una vez la persona deja de hablar, la música vuelve a tener el nivel sonoro original.
- Durante la masterización se usan para otorgar una mayor definición a la mezcla final.
- Para mantener los niveles parejos en los bajos eléctricos, cuando se utilizan técnicas como el Slap.
- En guitarras eléctricas, para evitar saturar la señal, cuando estas se tocan a un volumen alto.
- En sonido en vivo, para proteger los altavoces de los picos nocivos.

4.5.1 Ajustes del compresor en función de las aplicaciones

La primera pregunta que debe efectuar el usuario es si en realidad su señal de audio requiere de la compresión; la excesiva compresión puede generar efectos nocivos como aumentar la energía que llega a los amplificadores, altavoces y otros dispositivos presentes en la cadena de audio.

Se debe tener en cuenta que al alterar la señal atenuando las partes altas, el proceso de compresión suele producir un efecto de sostenido, lo cual en algunos casos puede ser nocivo, ya que origina realimentación. Por otro lado, si es reducido el rango dinámico y a este se le aplica una ganancia, la potencia RMS se verá afectada con un incremento. Lo anterior tiende a ser positivo y negativo a la vez. Positivo cuando la señal posee una potencia muy baja, y negativo porque al aumentar el valor RMS de la señal se puede generar un calentamiento excesivo en los altavoces y por lo tanto provocar su destrucción.

Una segunda característica negativa de la compresión es dar una sensación menor de agudos. El origen del presente fenómeno se debe a que en una pista la cantidad de frecuencias graves es mayor. Un ejemplo claro se presenta al efectuar la compresión del bombo de la batería; en este momento también se comprime el golpe del platillo debido a que ambos se ejecutan al mismo tiempo. Este efecto puede evitarse haciendo el tiempo de ataque más lento, como ya se había mencionado; algunas veces también se pueden recuperar aplicando técnicas de ecualización, generando ganancia en las tonalidades agudas.

Las indicaciones que se presentaron anteriormente son más que todo de carácter preventivo para evitar daños en equipos y en las señales de audio. La utilización de compresores queda a manos del ingeniero que realice su operación, según los niveles de compresión que desee implementar en la señal y las características que busque generar en su dinámica.

4.5.1.1 Guitarras

Las guitarras eléctricas prácticamente no necesitan compresión debido a que en ellas el sustain es importante, y este es brindado por la mayoría de plantas amplificadoras. En caso que se necesitara compresión, se escogerían tiempos de ataque entre 1 y 5 milisegundos y de relajación cercanos a medio segundo.

4.5.1.2 Percusión

Generalmente los equipos de percusión como la batería necesitan una compresión alta. Si se quiere dar presencia en el bombo, los tiempos de ataque deben encontrarse entre 1 y 10ms, la relajación entre 20 y 200ms y el ratio en una relación 4:1. Algunos dispositivos de percusión eléctricos o sets de efectos grabados necesitarán niveles menores a los expuestos.

4.5.1.3 Voces

Por lo general, cuando un individuo canta frente a un micrófono, suele hacerlo a veces muy cerca a veces bastante separado del transductor, y esto ocasiona que en la señal captada por el micrófono se encuentren muchas alteraciones debido a su sensibilidad. Los compresores son de gran ayuda en este caso, logrando una uniformidad en la señal. El ratio aplicado puede ser una relación de (3:1) o (6:1) según la característica que se quiera corregir. En géneros musicales como el rock, la atenuación brindada puede ser mayor a los niveles de radio expuestos.

4.6 COMPRESORES ESTEREOFÓNICOS

La compresión estereofónica se realiza simultáneamente para ambos canales; el canal derecho se encarga de manejar las tonalidades medias y bajas, y el izquierdo las medias y altas. La atenuación aplicada a la señal debe contener la misma intensidad en cada uno de los canales, dado que si la señal se procesa individualmente un solo canal sufrirá atenuación y el otro no y la imagen se tornará difusa. Por otra parte, también sirven para el procesamiento de señales independientes, la cual funciona igual que la monofónica.

4.7 COMPRESIÓN MULTIBANDA

Es una herramienta muy eficaz; básicamente divide la señal en dos o más bandas de frecuencia, según el tipo de dispositivo que se use. Al utilizar compresión multibanda, se evita afectar los sonidos de los instrumentos que tengan frecuencias diferentes pero amplitudes similares. La utilización de este tipo de compresión debe ser cuidadosa, debido a que fácilmente se puede interferir con la naturaleza de la onda creando sonidos poco reales a la hora de la reproducción.

Es altamente utilizada cuando existen problemas de sibilancia; también cuando ciertos instrumentos aparecen debilitados al lado de otros que están bastante altos, para lograr un sonido acorde y ameno entre ellos.

La utilización de un número menor de bandas, en este tipo de compresores, evita la generación de sonidos poco naturales.

4.8 LIMITADOR

El limitador se utiliza para impedir que los picos de señal dañen los altavoces o lleven a niveles de saturación a los amplificadores. Este dispositivo debe ser operado ocasionalmente, debido a que si se utiliza de manera prolongada la calidad sonora puede verse alterada significativamente y restarle interés a la música.

El limitador es básicamente un compresor con una relación de compresión (∞ :1). Su función principal es limitar el crecimiento de la señal de tal forma que no supere el nivel de umbral; esto lo hace reduciendo el nivel de ganancia para que la onda

no sea deformada; si el tiempo de ataque es muy rápido, la onda puede verse distorsionada casi como si fuera recortada por saturación.

En ocasiones pueden implementarse compresores y limitadores a la vez en un sistema. El compresor proporciona una suave atenuación a los niveles altos y el limitador brinda seguridad cortando los picos fuertes de señal.

4.9 COMPUERTAS

Son dispositivos que funcionan de forma contraria a los compresores, cuando una señal se encuentra por debajo del umbral fijado simplemente evita su paso. Frecuentemente las compuertas son utilizadas para combatir problemas de ruido de fondo, cerrándose cuando detectan la señal de bajo nivel; obviamente el ruido que tiene amplitud similar a la de la señal útil no será eliminado. El umbral del dispositivo debe ajustarse lo más cercano posible a la señal que se considera ruido, con el fin de evitar recortes en las señales que realmente importan y que igual manera son de bajo nivel. Los parámetros que utilizan las compuertas son los mismos que tiene cualquier procesador de dinámica.

En la práctica lograr, las características mencionadas anteriormente, es algo complicado; una de las razones de la problemática generada es la creación de clics audibles cuando la compuerta se abre y se cierra. Por otro lado para señales que se encuentren cercanas al ruido de fondo, se podría crear una inestabilidad en la compuerta, abriéndose y cerrándose de manera consecutiva.

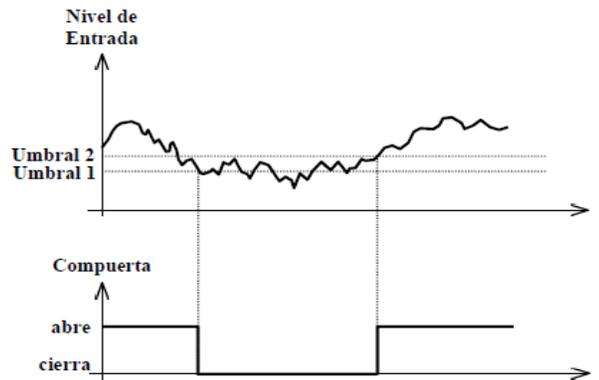
Para solucionar la problemática expuesta anteriormente, fueron agregados dos procesos a las compuertas:

El primero es la implementación de un rango de histéresis, el cual consta de dos niveles de umbral: uno de cierre y uno de apertura. El de cierre es fijado más abajo que el de apertura; con esto se crea un espacio donde las oscilaciones cercanas al umbral de cierre no estén accionando permanentemente la compuerta. En la Fig. 4.5 se puede observar lo explicado anteriormente.

El segundo es crear una envolvente, lo que permite una apertura y un cierre de tipo gradual. Dicho método funciona de manera similar a los compresores. Posee un tiempo de relajación mientras la compuerta se cierra, en donde se aplicará un nivel de ganancia que atenúa la señal y un tiempo de ataque en el cual la compuerta se abre, permitiendo el paso de la señal deseada.

Un ejemplo de la utilización de compuertas se observa en la grabación de una batería, donde se utilizan compuertas para evitar que el micrófono que graba la caja, cuando esta deja de sonar, no grabe el sonido de los platillos u otros elementos propios de la batería. En el numeral siguiente se presentan algunos ejemplos de cómo lograr correcciones de ruido en algunos instrumentos.

Fig. 4.5 Compuerta con histéresis



Fuente: [1]

4.9.1 Ajustes de compuertas en función de las aplicaciones

En caso de tener varios instrumentos en una mezcla y no poseer suficientes compuertas para cada uno de ellos, se toman las señales de los instrumentos similares y se agrupan. De esta forma se puede diferenciar el ruido de fondo de la señal de audio de los instrumentos.

Una recomendación que se puede hacer es evitar utilizar las compuertas en señales que contengan reverberación, debido a que, a medida que el efecto disminuye, puede ser cortado por el dispositivo y crear un efecto poco natural al oído, alterando la claridad de la mezcla.

4.9.1.1 Teclados

Debido a la capacidad en los teclados de reproducir el sonido de diferentes tipos de instrumentos y sonidos de la naturaleza, es imposible dar una idea general de cómo utilizar las compuertas en este instrumento; la utilización de ellas queda a disposición del efecto que se seleccione en el dispositivo.

4.9.1.2 Guitarras

En guitarras, generalmente las eléctricas son el perfecto candidato para el uso de compuertas, debido a que en algunos momentos los micrófonos pueden producir ruidos de fondo, ocasionados según la posición en que se encuentre el instrumento. Además, al ser combinadas con efectos como el overdrive, pueden aumentar el nivel de ruido.

De acuerdo con el tipo de guitarra eléctrica utilizada es necesario un tiempo de ataque diferente para la compuerta. Por ejemplo, si el instrumento posee un sustain, alto, se deben aplicar tiempos de relajación largos hasta de 1 segundo,

pero si, por el contrario el sonido de la guitarra es limpio, se logrará efectuar la corrección con tiempos cercanos a 50ms.

4.9.1.3 Percusión

Como se había dicho anteriormente, en la grabación de baterías es necesaria la utilización de compuertas para evitar la grabación de diferentes sonidos en cada uno de los micrófonos que se encuentran distribuidos para los elementos que componen el instrumento de percusión y así generar una señal individual para cada elemento.

4.9.1.4 Voces

El tiempo de ataque para las voces debe ser rápido, pero teniendo en cuenta que este no logre crear efectos colaterales en la señal como por ejemplo clics. Un tiempo lento puede ocasionar que las palabras se tornen confusas esto quiere decir que se nubla la inteligibilidad de ellas.

Un tiempo de ataque adecuado para usar con las compuertas debe ser por lo general de 1 milisegundo, y el tiempo de relajación de medio segundo.

4.9.2 Expansores

La expansión es el proceso inverso de la compresión. En ella las señales fuertes son intensificadas y las débiles son atenuadas. Al igual que la compresión, la expansión puede ser descendente, ascendente, y de ambos modos. Además maneja los mismos parámetros.

La expansión descendente es una técnica de reducción de ruido común en la que un VCA reduce la ganancia cuando la señal cae por debajo del umbral. La expansión ascendente se puede usar en circuitos que exageren la dinámica. Finalmente, la expansión dual se utiliza en los sistemas de audio para restaurar el rango dinámico, pero su uso más frecuente se debe a los sistemas de reducción de ruido tales como DBX. Algunos expansores integran compresores, limitadores y compuertas para brindar una mayor versatilidad en el procesamiento del rango dinámico.

4.10 PRINCIPIO DE LOS DETECTORES DE NIVEL

El alma de los compresores y todos los efectos de respuesta en frecuencia es el detector de nivel. Un VCA que valga la pena hace lo que el detector de nivel diga. Debido a que el detector de nivel es el corazón de los efectos dinámicos, el constructor debe estar equipado para ajustarlo según las necesidades del efecto. El circuito debe incorporar todas las siguientes funciones:

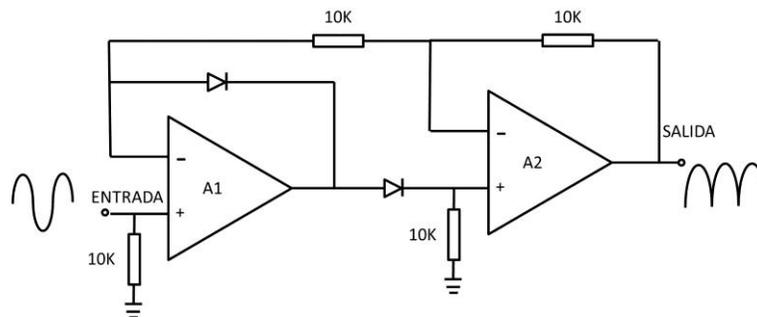
- Un convertor de AC a DC.
- Un integrador.

- Un modo de retrasar la aparición de los efectos (ataque variable).
- Un método para retrasar el decaimiento de los efectos (decay variable).
- Una forma de variar el punto en el que el efecto actúa (umbral).
- Un método para variar la fuerza con que el efecto actúa (radio).

4.10.1 Conversión AC a DC

La conversión AC a DC se realiza por medio de un circuito que se encarga de convertir una señal de corriente alterna a la entrada (V_i) en corriente continua a la salida (V_o) pulsante, transformando así una señal bipolar en una señal monopolar. El circuito funciona invirtiendo todos los semiciclos de una misma polaridad para igualarlos a la otra. Un posible circuito para realizar este fin se muestra en la Fig. 4.6.

Fig. 4.6 Rectificador de onda completa



Fuente: [15]

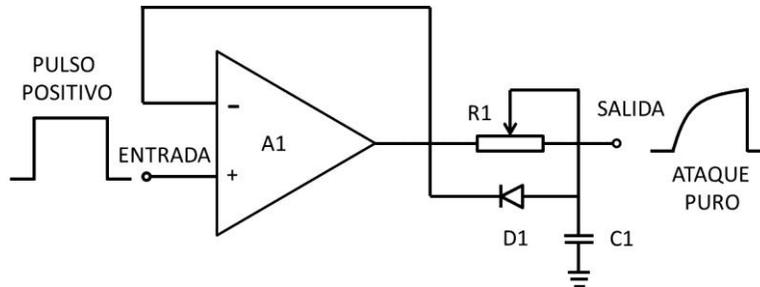
La razón de utilizar un circuito formado por medio de amplificadores operacionales es que por medio de este se puede variar la ganancia del sistema, mientras que con un rectificador conformado únicamente por diodos esto no se puede realizar.

4.10.2 Ataque variable

Una red de ataque puro retrasa el borde delantero de un pulso sin alterar su caída. Esto se logra usando un diodo, un condensador y un potenciómetro, alimentados por un amplificador operacional. C1 se carga a través de la etapa de salida de A1 en serie con R1. Debido a que la salida tiene una muy baja impedancia, la carga se realiza de forma progresiva a medida que R1 aumenta. La duración depende de las constantes de tiempo del condensador y la resistencia. La constante es especificada en segundos y se obtiene por medio de la multiplicación de la resistencia y la capacitancia en faradios. Por ejemplo, un resistencia de 10k y un condensador de 10 μ f tienen una constante de tiempo de 0.1 segundos. Aproximadamente 5 veces el valor obtenido es necesario para que condensador cargue completamente. Una vez el pulso desaparece, C1 se descarga a través de D1. La baja impedancia de este camino hace que la disminución sea instantánea siempre y cuando el valor de capacitancia de C1 sea relativamente bajo. El tiempo

de ataque adecuado para la compresión esta entre 0 y 20ms. El circuito descrito anteriormente se puede observar en la Fig. 4.7.

Fig. 4.7 Red de ataque puro

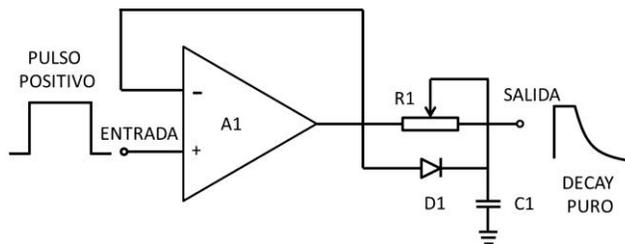


Fuente: [15]

4.10.3 Decaimiento variable

Una forma de lograr un decaimiento o decay variable es invertir el diodo del circuito mostrado para el ataque variable. C1 carga instantáneamente a través de D1, pero C1 sólo puede descargarse a través de R1 en la salida del amplificador operacional. El comportamiento del pulso a la salida posee un decaimiento en su parte final el cual depende de la descarga del condensador a través de R1. La figura 4.8 muestra la red descrita en este numeral.

Fig. 4.8 Red de decaimiento puro



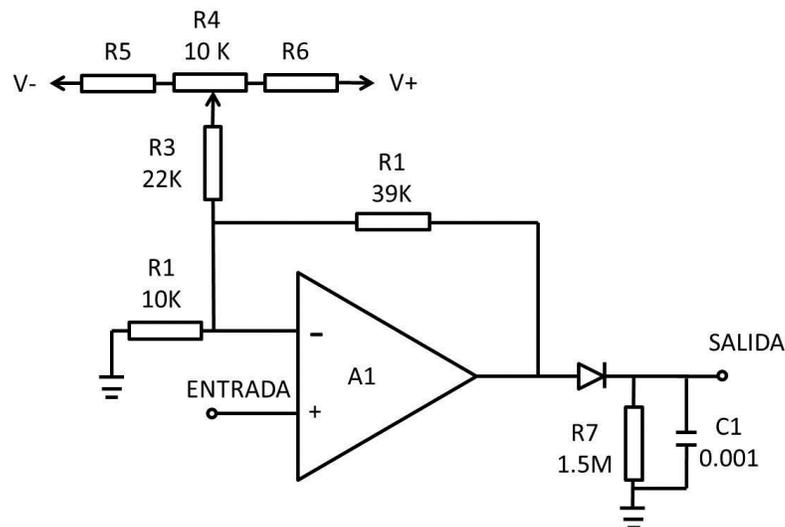
Fuente: [15]

4.10.4 Umbral y radio variable

El compresor ideal actúa como un buffer de ganancia unitaria cuando se encuentra por debajo del umbral. Lograr esto requiere de un medio para evitar que el control de voltaje llegue al VCA hasta que el voltaje sobrepase el nivel de umbral establecido. Un método imparte un offset DC a la trayectoria recorrida por el control de voltaje. Un diodo situado entre el circuito umbral y el puerto de control del VCA no conducirá mientras el voltaje diferencial exceda el voltaje de activación del diodo. Debido a que el potencial en el puerto de control del VCA es fijo, configurar el umbral implica controlar el offset DC en lado del diodo del detector de nivel. Lo descrito anteriormente se puede observar en la Fig. 4.9.

La red mostrada en la Fig. 4.9 posee en la entrada inversora del amplificador operacional una red conformada por R3 y R4 que aplica un voltaje de polarización DC variable. Lo anterior permite fijar un offset DC a la salida de A1. Para que el diodo conduzca, el voltaje visto por el cátodo debe superar los 0.6V; este es el voltaje de activación del elemento. R4 se encarga de variar el nivel de offset prefijado. Los valores de R3 y R4 deben escogerse para limitar el offset que R4 puede producir y evitar que el nivel de umbral altere la ganancia del VCA.

Fig. 4.9 Red de escalado y offset



Fuente: [15]

En caso que un VCA utilice un control de voltaje positivo, el diodo es orientado para permitir el paso del voltaje positivo. Por lo tanto el offset DC se aplica para elevar el voltaje con el fin de alcanzar el punto de conducción del diodo. El circuito de umbral no debe aplicar el voltaje que hace que el diodo conduzca en ausencia de una señal de entrada, o la ganancia estática del VCA cambiará.

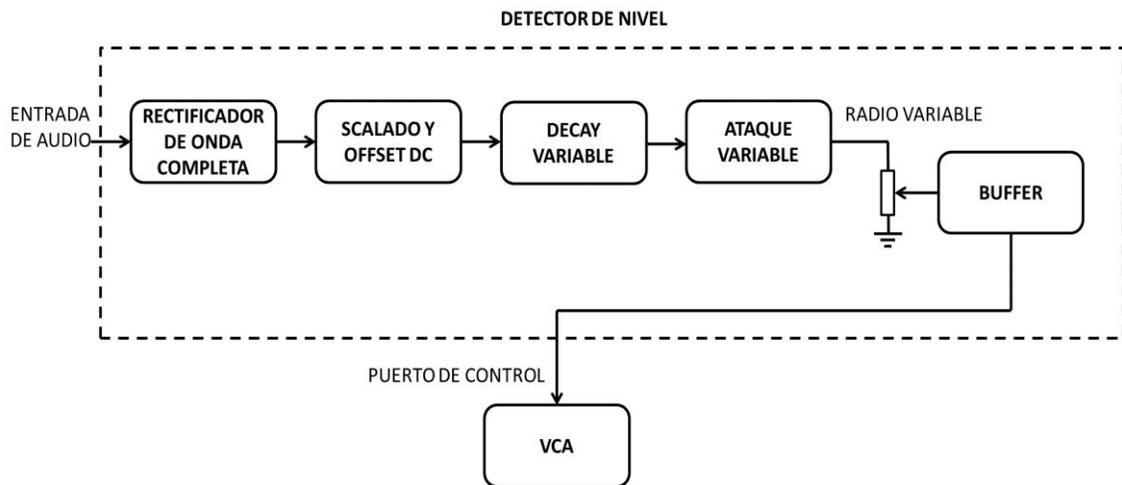
El radio es modificado mediante la alteración de una fracción del control de voltaje permitido en el puerto de control del VCA. Este circuito es tan simple como un divisor resistivo vinculado directamente con el puerto de control, pero el uso de un buffer reduce el efecto de carga y brinda un control más suave sobre un rango más amplio de radio.

4.10.5 Detector de nivel

El sistema detector de nivel se conforma de las etapas explicadas anteriormente y se puede visualizar por medio del diagrama de bloques mostrado en la Fig. 4.10. En primera instancia, la señal de audio es convertida en una señal de pulsos DC por medio del rectificador de onda completa. El audio rectificado alimenta un

amplificador de escalado, que brinda una ganancia, si es necesario, y aplica un offset DC variable, determinando de esta manera el umbral. En este caso el diodo de acoplamiento de la red de decay crea un umbral interno de 0.6V. La etapa de integración se produce como una función implícita en la misma. Luego, el control de voltaje alimenta la etapa de ataque. La variación del radio se realiza por medio de un potenciómetro, acoplado a la salida de esta etapa, y finalmente el buffer presentado en el diagrama de bloques es simplemente un seguidor de voltaje.

Fig. 4.10 Diagrama de bloques sistema detector de nivel



Fuente: [15]

4.11 RESUMEN DEL CAPÍTULO

- El rango dinámico en una señal de audio se encuentra comprendido entre el nivel máximo y mínimo de la amplitud; su modificación evita que los picos excesivos de la señal generen alteraciones o daños en los altavoces.
- La introducción de dispositivos como compresores, limitadores, compuertas y expansores trae como beneficio matizar los sonidos, modificando el rango dinámico, y lograr una excelente calidad de audio.
- La compresión descendente funciona llevando los niveles altos de la señal de audio a niveles bajos. La ascendente realiza lo contrario: toma los pasajes bajos y los sube un poco.
- El expansor trabaja de manera inversa al compresor: si existe un nivel alto lo enfatiza más y si se presenta un bajo lo atenúa; esta técnica es muy utilizada en la los sistemas de reducción de ruido.
- Dentro de los procesadores de dinámica se presentan algunos parámetros que pueden ser modificados para nuestro beneficio. Ellos son: nivel de umbral o threshold, tiempo de ataque, tiempo de relajación y relación de compresión.

- El principio de funcionamiento de un compresor se basa en un circuito VCA controlado por medio de un detector de nivel que prácticamente se encarga de comparar que la señal presente en la entrada no supere el nivel umbral; cuando esto ocurre, se efectúa una acción de control sobre el VCA y este aplica una ganancia prefijada a la señal de salida.
- El tiempo de ataque y de relajación excesivos pueden ocasionar problemas de distorsión en la onda, debido a que la atenuación o el énfasis siguen haciendo efecto sobre la señal un instante después, así el nivel se encuentre por debajo del umbral.
- En instrumentos musicales como el bajo, en donde es muy usual que el músico utilice la técnica de Slap, es necesaria la compresión para evitar que los picos abruptos generados mientras se toca el instrumento puedan ocasionar daños en los sistemas de audio.
- Los limitadores son dispositivos con un ratio de compresión supremamente elevado; su función principal es limitar la señal para que esta no alcance niveles superiores al umbral. Su utilización debe ser moderada para evitar daños en la calidad del audio.
- Las compuertas son dispositivos altamente utilizados en la reducción de ruidos; su funcionamiento consiste en dejar pasar la señal si esta se encuentra por encima del umbral; de lo contrario se cierra y obstruye su paso.

4.12 PREGUNTAS Y EJERCICIOS

1. ¿Qué problemas se pueden evitar reduciendo el rango dinámico de una señal de audio?
2. Nombre tres razones por las cuales utilizar la compresión en los sistemas de audio.
3. ¿Para qué se utilizan los sistemas limitadores de señal?
4. Indique dos ejemplos de la utilización de compuertas en el procesamiento de audio.
5. Nombre las etapas utilizadas en la construcción de un compresor.

4.13 BIBLIOGRAFÍA

KATZ, Robert A. La masterización de audio el arte y la ciencia. Traducido por escuela de cine y video.

MIYARA, Federico. Acústica y sistemas de sonido. 3 ed. UNR editora. Rosario, 2006.

BOSCORELLI, Nicholas. The Stomp box cookbook. 2 ed. United States of America. Guitar project books, 1999.

MOMPÍN, José. Manual de alta fidelidad y sonido profesional. 2 ed. Barcelona. Marcombo, S.A, 1989.

Manual de radiodifusión, 'los parámetros de los compresores de sonido', disponible en: <http://tecnicaaudiovisual.kinoki.org/radio/manualderadio.htm>

Mezcla y masterización II, facultad de bellas artes UNLP, 'Compresores', disponible en: www.astormastering.com.ar/Clase_5_Compresores.pdf

Mezcla y masterización II, facultad de bellas artes UNLP, 'Compuertas y expansores', disponible en: www.astormastering.com.ar/Clase_7_Compuertas_y_Expansores.pdf

BIDONDO, Alejandro. Compresión y limitación: hasta qué punto es justificable, 2005 disponible en: <http://www.ingenieriadesonido.com/upload/Compresion%20y%20Limitacion.pdf>

WHITE, Paul. Técnicas avanzadas de compresión parte 1, 2008, disponible en: www.cetear.com/compresion1.pdf

ACETO, Luis. Compresores, disponible en: <http://www.eltallermd.com.ar/apuntes/Compresores.pdf>

DATA, Gabriel. Consideraciones generales sobre la utilización de compresores y compuertas, disponible en: www.cetear.com/Compresores%20y%20compuertas.pdf

CUGNONI, Martin. Sonido uno: apunte cátedra 'Procesadores dinámicos' disponible en: <http://www.sonidoanda.com.ar/principal.htm>

CAPÍTULO 5 AMPLIFICACIÓN DE AUDIO O DE POTENCIA

5.1 INTRODUCCIÓN

Un amplificador es un arreglo de transistores, condensadores y resistencias el cual busca generar un aumento de amplitud ya sea en voltaje o corriente en una señal aplicada a la entrada del circuito. Este factor de crecimiento es denominado ganancia. Algunos tipos de amplificadores son los de pequeña señal y los de potencia, que son el centro de estudio en este capítulo. Los amplificadores de potencia son la última componente activa de una cadena de procesamiento de audio, encargados de generar la suficiente energía para activar una gran carga en la etapa de salida del circuito, la cual puede ser un altavoz o algún otro dispositivo que maneje potencia. Sus principales componentes armónicos oscilan entre los 20 y 20.000 hercios, debido a que este es el rango auditivo de los seres humanos.

Un amplificador de gran señal es sencillamente un amplificador con una etapa de salida de potencia alta (mayor a 1W). Los amplificadores se encuentran clasificados como sigue:

Clase A: es la más conocida en este tipo de circuitos; utiliza sólo un elemento de amplificación, que puede ser un transistor o un tubo de vacío; se caracterizan por tener un gran consumo de corriente pero su utilización es muy frecuente en amplificación de sonido profesional ya que brindan una excelente calidad de sonido con muy baja distorsión en la señal de salida.

Clase B: los amplificadores de clase B se caracterizan por poseer dos transistores que se activan únicamente con la señal de entrada, uno se ocupa del semiciclo positivo y el otro del negativo. La señal a la salida tendrá una distorsión debido a que en el momento que la señal cruza por cero ambos transistores se encuentran apagados (sin polarización);

Clase AB: su configuración integra dos transistores al igual que la clase B pero con una pequeña corriente de polarización independiente de la señal de entrada que evita la distorsión de cruce por cero ocasionada en B. La clase AB posee una excelente calidad y rendimiento.

Clase C: este tipo de amplificación no se utiliza en audio HI-FI, su uso es exclusivo para RF. En la amplificación clase C el elemento activo solo conduce en menos de 180° de la onda senoidal aplicada a la entrada del circuito produciendo una gran distorsión de la señal pero un gran rendimiento.

Clase D: la amplificación clase D dispone de dos transistores que trabajan en corte y saturación (disipación de potencia casi nula) operados por medio de PWM (modulación de ancho de pulso). Su rendimiento energético es muy elevado cerca de un 95% con ello se evita la utilización de grandes disipadores y se logra una reducción de tamaño.

5.2 AMPLIFICADORES DE POTENCIA

Un amplificador de potencia es un arreglo circuital con la capacidad de elevar el nivel de una señal pequeña sin alterar su forma de onda en el tiempo. Su acción principal es brindar una ganancia a la señal de audio, al igual que una alta potencia para poder alimentar un dispositivo como un altavoz.

5.2.1 Ganancia del amplificador

La ganancia es la característica más importante de los amplificadores. Este parámetro hace referencia al incremento de voltaje que brinda el elemento. Básicamente se define como el cociente entre el voltaje de salida y el de entrada:

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (5.1)$$

En donde:

G: Ganancia.

V_{out} : Voltaje presente salida.

V_{in} : Voltaje de entrada.

También puede ser expresada en decibeles, y su valor se obtiene de la siguiente manera:

$$G_{dB} = 20 \log(G) \quad (5.2)$$

Por ejemplo, si se tiene un voltaje de entrada igual a 100mV y un voltaje de salida de 10V entonces la ganancia será:

$$G = \frac{10V}{0.1V} \quad G = 100$$

Y la ganancia en decibeles será:

$$G_{dB} = 20 \log(100) = 400dB$$

5.2.2 Potencia máxima de salida

Este parámetro indica la máxima potencia que puede entregar el amplificador. Se especifica en términos del voltaje de salida y la impedancia de carga (altavoz), de la siguiente manera:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{(V_{out})^2}{Z} \quad (5.3)$$

En donde:

$P_{\text{máx}}$: potencia máxima de salida.

Z: impedancia de carga.

5.2.3 Nivel de señal

Los amplificadores, se pueden clasificar según el manejo de tres tipos de señales: bajo nivel, nivel de línea y de potencia. Con el término bajo nivel se hace referencia a señales dadas en mV, como las producidas por un micrófono. El término nivel de línea se refiere a las amplitudes de las señales que brindan algunas etapas de preamplificación, o las obtenidas por medio de caseteras, discmans y algunos otros instrumentos electrónicos de audio. Finalmente, el nivel de potencia es el requerido para excitar cargas como altavoces. En la tabla 4 se presentan los anteriores ejemplos y los niveles de voltaje que pueden manejar.

Tabla 4 Nivel de tensión en dispositivos de audio

Nivel	Ejemplos	Rango de tensión	Nivel en dBu
Bajo	Micrófonos Fonocaptos Cabezales de reproducción magnética	$V_s < 7,75 \text{ mV}$	$N < -40 \text{ dBu}$
Línea	Preamplificadores Cassetteras Reproductor de CD Reproductor de DAT Sintonizadores Sintetizadores Entrada o salida de consola	$245 \text{ mV} < V_s < 24,5 \text{ V}$	$-10 \text{ dBu} < N < 30 \text{ dBu}$
Potencia	Amplificadores de audio de potencia	$24,5 \text{ V} < V_s$	$30 \text{ dBu} < N$

Fuente: [1]

5.2.4 Ancho de banda de potencia

Corresponde a la diferencia entre la máxima y la mínima frecuencia entre las cuales la salida del amplificador no cae más de 3dB de su valor máximo. El ancho de banda brinda información sobre si un amplificador puede excitar un altavoz a determinado rango de frecuencia.

5.2.5 Sensibilidad

Hace referencia al voltaje presente en la entrada para poder producir la máxima potencia en el amplificador. Este término es importante debido a que la señal de entrada no debe superar un nivel determinado, de lo contrario existiría una sobre

carga en el amplificador y se produciría un recorte de amplitud en la señal de salida. Esta situación puede ocasionar daños en los altavoces.

5.2.6 Eficiencia del amplificador

Es la relación existente entre la potencia de salida sobre la de entrada. En la tabla 5 se puede apreciar dicho parámetro de acuerdo a los amplificadores de potencia más conocidos en el tema referente a audio al igual que sus ciclos de operación.

Tabla 5 Comparación clases de amplificadores

Clase	A	AB	B	C	D
Ciclo de operación	360°	180° a 360°	180°	Menor a 180°	Operación de pulso por lo general cerca de 90%
Eficiencia de potencia	25% a 50%	Entre 25%, 50% y 78.5%	78.5%		

Fuente: [16]

5.2.7 Respuesta en frecuencia

Es una medida de los límites dentro de los cuales el amplificador responde de igual forma a todas las frecuencias cuando entrega una potencia muy baja. Se mide generalmente cuando el amplificador entrega una potencia de 1W a una carga de 8Ω. El comportamiento del amplificador debe mantenerse virtualmente plano para el rango de frecuencia audible.

5.2.8 Distorsión

La distorsión es la deformación que sufre la señal al pasar por un sistema, en nuestro caso un amplificador. La distorsión se clasifica de acuerdo al parámetro modificado en la onda.

5.2.8.1 Distorsión de fase

Se produce cuando en la señal de salida ocurren adelantos o retardos en fase con respecto a la señal de entrada; el oído humano no es muy sensible a esta alteración.

5.2.8.2 Distorsión de frecuencia

Se presenta cuando la señal de la salida no posee las mismas características de frecuencia que la señal de entrada; algunas veces es producida por los elementos reactivos presentes en el amplificador.

5.2.8.3 Distorsión de amplitud

Se ocasiona cuando la onda no obtiene la misma relación de amplitud para las distintas frecuencias que la señal de entrada.

5.2.8.4 Distorsión de cruce por cero

Este tipo de distorsión afecta comúnmente a los amplificadores de tipo AB y B, aunque en AB en menor proporción. El fenómeno ocurre debido a que los dos transistores de clase B trabajan de manera complementaria, mientras uno se encuentra encendido el otro se encuentra apagado y viceversa, pero existe un momento en el cual ninguno de los transistores está encendido y es aquí donde la señal se distorsiona.

5.2.8.5 Distorsión por intermodulación (IMD)

Se origina cuando dos señales de diferente frecuencia pasan por el amplificador. Esto genera una nueva señal, la cual contiene la suma y la diferencia de los armónicos presentes en las dos anteriores; la amplitud de la generada depende de la ganancia que brinde el amplificador. En audio este tipo de distorsión genera una gran problemática, debido a que suele producir sonidos que no se relacionan con ninguna de las ondas originales produciendo efectos que no son agradables para el oyente.

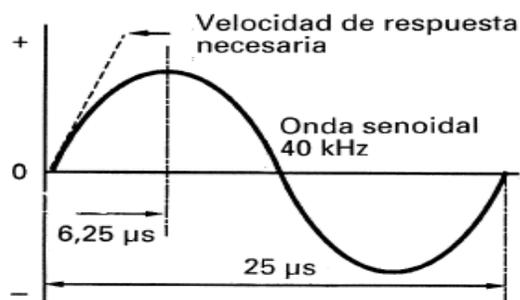
5.2.9 Rango dinámico

Está definido como la diferencia en dB entre el valor máximo y el valor mínimo presente en la salida. Las características de selección del amplificador determinan que la relación señal a ruido existente sea mayor que el rango dinámico de la señal que se desea amplificar.

5.2.10 Velocidad de respuesta

Dicho término indica la capacidad a la que puede responder de forma adecuada un amplificador a un transitorio de alto nivel. Este valor cambia según la potencia que entregue el amplificador a la salida; si es una potencia muy alta la velocidad será mucho menor que la presentada por uno con una potencia más baja. En la Fig. 5.1 se puede apreciar la velocidad que se necesita para llegar a un valor pico de voltaje en una frecuencia de 40kHz.

Fig. 5.1 Velocidad de respuesta



Fuente: [4]

La velocidad de respuesta del amplificador se mide en voltios sobre microsegundos (V/ μ s). Algunas veces se consiguen respuestas muy altas de algunos cientos de V/ μ s; estos valores se obtienen con amplios rangos de respuesta en frecuencia o con transistores de salida rápida que no son muy estables a la hora de excitar un altavoz.

5.2.11 Impedancia de entrada

La impedancia de entrada típica de los amplificadores de potencia varía entre 10k Ω y 50k Ω . Es conveniente que esta impedancia sea mayor que la presente en la fuente de señal para que exista un mínima reducción de voltaje aplicada al amplificador.

5.2.12 Impedancia de salida

La impedancia presente a la salida de una etapa de amplificación es por lo general muy reducida; se puede decir que de aproximadamente 0.1 Ω o menos. En bajas frecuencias esta impedancia puede aumentar de valor.

5.2.13 Factor de amortiguamiento (F.A)

Es un parámetro numérico, que indica la capacidad del amplificador para controlar un altavoz en su salida. Su cálculo se basa en la relación existente entre la impedancia de salida (Z_{out}) y la impedancia nominal ($Z_{nominal}$) del amplificador.

$$F.A = \frac{Z_{out \text{ amp}}}{Z_{nominal \text{ carga}}} \quad (5.4)$$

5.2.14 Relación señal a ruido

Es la relación entre el voltaje máximo a la salida y el voltaje de ruido residual existentes en el amplificador cuando su entrada se encuentra en corto circuito. La forma de calcularla se presenta a continuación:

$$S/R = \frac{V_{señal}}{V_{ruido}} \quad (5.5)$$

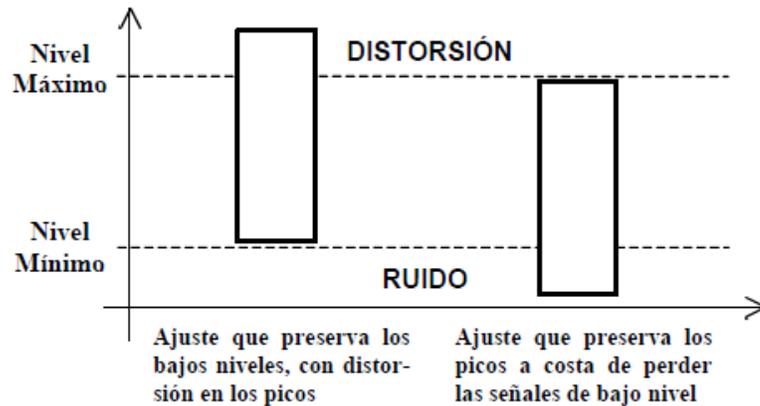
La relación S/R también puede expresarse en dB, de la siguiente manera:

$$S/R_{dB} = 20 \log(S/R) \quad (5.6)$$

La adecuada selección de un amplificador se logra comparando que la S/R sea mayor que el rango dinámico en la señal que se desea amplificar. Si esto no se cumple la señal puede exponerse a las dos situaciones mostradas en la Fig. 5.2. Una de ellas consiste en mantener sin modificación los niveles bajos de la señal a pesar de que se presente distorsión en los valores más altos de la misma; la otra

posibilidad consiste en conservar sin distorsión los picos de señal, a riesgo de que los niveles bajos se confundan con el ruido.

Fig. 5.2 Alternativas extremas cuando el rango dinámico excede la relación S/R



Fuente: [1]

5.2.15 Nivel de saturación de entrada

El nivel de saturación muestra el máximo valor de voltaje que puede estar presente en la entrada sin efectuar alteraciones (como saturación o recortes de la señal) en la salida. Prácticamente indica la calidad del amplificador con el que se trabaja.

5.2.16 Respuesta de fase

En muy altas y muy bajas frecuencias, es usual encontrar atrasos y retrasos en la señal; éstos no deben superar los 15° , de lo contrario podrían registrarse inestabilidades en el funcionamiento del amplificador produciendo distorsiones o incluso cancelaciones en la señal.

Técnicamente, la respuesta de fase indica la relación existente entre las fases de las frecuencias medias, altas y bajas. La fase absoluta del amplificador es un parámetro que muestra únicamente si la señal de entrada y la de salida están en fase.

5.2.17 Acoplamiento

Indica la forma en que se unen los amplificadores con la carga o altavoz. Algunas veces no necesitan ningún elemento que sirva de acople entre ellos; en otros casos pueden requerir de acoplamiento magnético, o sea que la unión se realiza por medio de un transformador de voltaje. También pueden existir acoplamientos capacitivos los cuales se efectúan con la inserción de condensadores entre las

etapas de amplificación, y su objetivo principal es lograr una separación de los voltajes DC permitiendo el paso de las señales.

5.3 CLASIFICACIÓN DE LOS AMPLIFICADORES DE POTENCIA

Los amplificadores de potencia suelen ser clasificados de acuerdo con el grado de variación presente en la señal de salida, durante un ciclo de operación de la señal de entrada dependiendo del tiempo de conducción del elemento activo que conforma el amplificador. A continuación se exponen los diversos tipos de ellos, junto con sus características representativas y consideraciones más importantes.

5.3.1 Amplificador clase A

Este tipo de amplificadores presentan un elemento activo (transistor o tubo de vacío) que se encuentra en funcionamiento continuo en todos los valores de la onda presente a la entrada. Despliegan un nivel de fidelidad muy alto, obteniendo de esta forma una calidad de audio superior. La característica que lo hace poco eficiente es debida, a que siempre va a existir una corriente de polarización, sobre el elemento activo. Por tal motivo el amplificador tiende a calentarse.

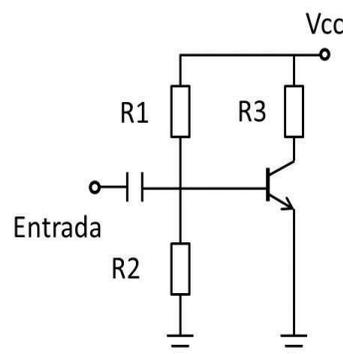
Trabajando con el amplificador clase A se puede obtener un rendimiento máximo del 50%, pero en la práctica generalmente este valor oscila entre el 20 y 35%.

Los amplificadores clase A tienden a ser los dispositivos preferidos por los músicos, debido a que su señal prácticamente se encuentra libre de ruido y producen sonidos muy limpios.

5.3.1.1 Amplificador clase A con acoplo directo a la carga

El circuito representado en la Fig. 5.3, puede utilizarse para mostrar y analizar las características de este tipo de amplificador alimentado en serie; posee un transistor con la cualidad de soportar algunas decenas de watts y por lo general tiende a poseer valores de ganancia de corriente (β) menores a 100.

Fig. 5.3 Amplificador clase A alimentado en serie



Fuente: [17]

La tendencia de los transistores a calentarse por la circulación constante de corriente entre el colector y el emisor, genera temperaturas bastante altas. Por tal razón deben adaptarse dispositivos que disipen el calor generado.

5.3.1.1.1 Diseño del amplificador.

En primera instancia, se deben calcular los valores de la carga R_L y el voltaje V_{CC} para los cuales se obtengan la mayor potencia a la salida. Conociendo las características presentes en el transistor, como la potencia colector emisor máxima ($P_{CEm\acute{a}x}$) y la corriente máxima que circula por el colector, se puede conseguir ($I_{Cm\acute{a}x}$).

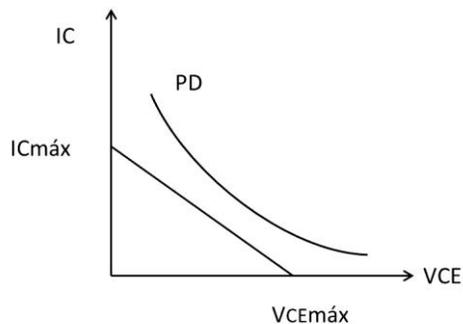
Al determinar la potencia en la salida P_L , y la R_L se procede con los cálculos de valores de alimentación del circuito y las características mínimas de operación del transistor.

La información que brinda el fabricante acerca de los valores máximos de corriente y tensión define una línea recta al unir los puntos, y la máxima disipación de potencia se representa como una hipérbola. Ambas graficas se expresan en el mismo eje coordinado; suelen presentarse tres casos particulares los cuales son mostrados a continuación.

- La recta no corta la hipérbola de máxima disipación (Fig. 5.4).

Este caso presenta un transistor sobredimensionado; tal motivo no genera ningún peligro para el funcionamiento del mismo, pero se puede cambiar por un elemento que posea unas características más ajustadas.

Fig. 5.4 Transistor sobredimensionado



Fuente: [17]

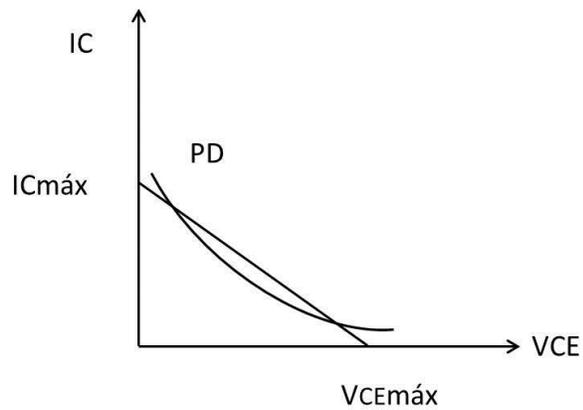
- La recta corta los dos puntos de máxima disipación (Fig. 5.5).

En este caso el transistor no debe ser utilizado debido a que existe un sobrecalentamiento en el mismo.

- La recta es tangente a la curva de disipación máxima (Fig. 5.6).

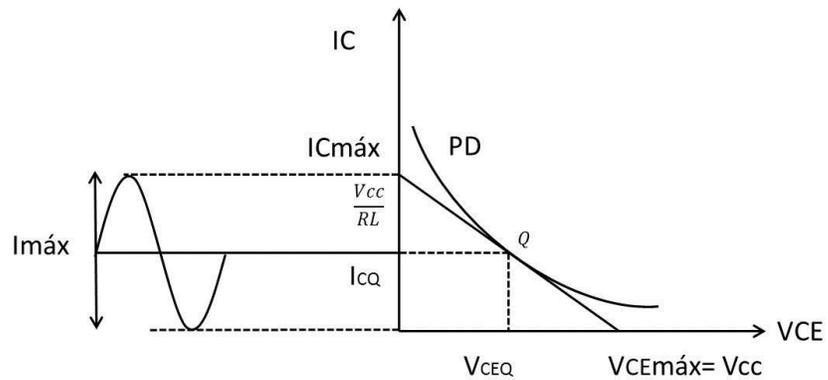
Este caso representa el límite de funcionamiento del transistor; en esta parte los valores de corriente a la salida son los máximos que el dispositivo puede tolerar.

Fig. 5.5 Transistor inadecuado



Fuente: [17]

Fig. 5.6 Transistor trabajando en el límite de seguridad



Fuente: [17]

De la Fig. 5.6 se obtiene:

$$V_{CEQ} = \frac{V_{CEmáx}}{2} \quad (5.7)$$

$$I_{CQ} = \frac{I_{Cmáx}}{2} \quad (5.8)$$

El valor de la carga (R_L) y de la corriente máxima ($I_{m\acute{a}x}$) sera:

$$R_L = \frac{V_{CEm\acute{a}x}}{I_{Cm\acute{a}x}} \quad (5.9)$$

$$I_{m\acute{a}x} = \frac{I_{Cm\acute{a}x}}{2} \quad (5.10)$$

La potencia de salida se obtiene de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} P_L &= I_{ef}^2 * R_L = \left(\frac{I_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}}\right)^2 * R_L = \left(\frac{I_{Cm\acute{a}x}}{2\sqrt{2}}\right)^2 * R_L = \frac{I_{Cm\acute{a}x}^2}{8} * R_L \\ &= \frac{V_{cc}^2}{R_L^2} * \frac{R_L}{8} = \frac{V_{cc}^2}{8R_L} \end{aligned} \quad (5.11)$$

La potencia máxima disipada es:

$$P_D = P_{CEm\acute{a}x} \quad (5.12)$$

$$P_D = V_{CEQ} * I_{CQ} = \frac{V_{cc}}{2} * \frac{I_{Cm\acute{a}x}}{2} = \frac{V_{cc}}{4} * \frac{V_{cc}}{R_L} = \frac{V_{cc}^2}{4R_L} \quad (5.13)$$

La potencia vista por la fuente de alimentación del transistor es:

$$P_{cc} = V_{cc} * I_{CQ} = V_{cc} * \frac{I_{Cm\acute{a}x}}{2} = \frac{V_{cc}}{2} * \frac{V_{cc}}{R_L} = \frac{V_{cc}^2}{2R_L} \quad (5.14)$$

El máximo rendimiento de la conversión de potencia continua a alterna es:

$$\mu = \frac{P_L}{P_{cc}} \quad (5.12)$$

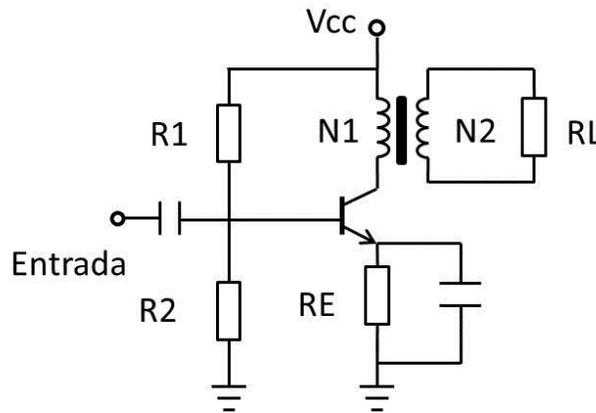
$$\mu = \frac{\frac{V_{cc}^2}{8R_L}}{\frac{V_{cc}^2}{2R_L}} = 0.25 = 25\% \quad (5.13)$$

5.3.1.2 Amplificador clase A acoplado con transformador (Fig. 5.7)

Este tipo de amplificador posee una eficiencia máxima de 50%; contiene un transformador para realizar el acoplamiento entre el circuito y la carga, presenta un control de corriente y voltaje, por lo que estos valores pueden ser aumentados

o disminuidos. Lo anterior depende de la relación del número de vueltas de los devanados del transformador.

Fig. 5.7 Amplificador clase A con transformador de acoplo



Fuente: [17]

5.3.1.2.1 Transformación de voltaje.

El voltaje presente en la carga puede ser aumentado o disminuido de acuerdo con la relación existente entre el número de espiras presentes en cada devanado del transformador, la ecuación se presenta a continuación.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (5.16)$$

N2: Numero de vueltas devanado secundario.

N1: Numero de vueltas devanado primario.

V1: Voltaje de entrada del transformador.

V2: Voltaje de salida del transformador.

Lo anterior muestra que si el número de espiras presentes en el secundario es mayor que el primario, se genera un aumento de voltaje en la salida y si sucede lo contrario provoca una disminución de voltaje.

5.3.1.2.2 Transformación de corriente.

La corriente que circula en el devanado secundario es inversamente proporcional al número de vueltas existente en los devanados. La ecuación se presenta a continuación.

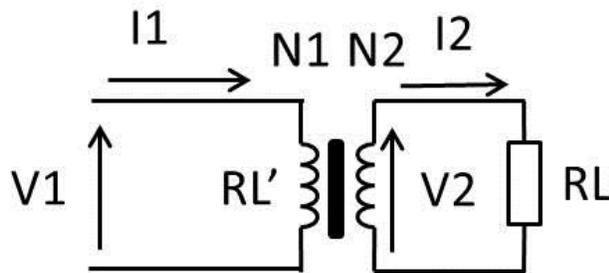
$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (5.17)$$

De esta relación se puede afirmar que, si el número de vueltas presentes en la bobina primaria es mayor a la secundaria, la corriente que transita por el devanado secundario va a ser mayor y si ocurre lo contrario será menor.

5.3.1.2.3 Necesidad del transformador de acople.

En este tipo de circuitos, para lograr una máxima transferencia de potencia se debe cumplir se debe garantizar la máxima transferencia de potencia entre la salida del transistor y la carga. Por tal motivo se recurre a hacer uso del transformador para efectuar un adecuado acople entre las dos etapas.

Fig. 5.8 Transformador de salida



Fuente: [17]

Lo anterior es posible, debido a que se pueden realizar variaciones en la corriente y voltaje presentes en el transformador; al jugar con estos dos parámetros se puede modificar también la impedancia vista desde cualquier lado ya sea primario o secundario. De la Fig. 5.8 se obtiene lo siguiente:

$$\frac{R_L}{R_{L'}} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{\frac{V_2}{I_2}}{\frac{V_1}{I_1}} = \frac{V_2 * I_1}{V_1 * I_2} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2$$

Si \$N_2/N_1\$ es representado con \$\alpha\$ se puede afirmar que:

$$\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = \alpha^2$$

Entonces la carga vista por el lado primario será:

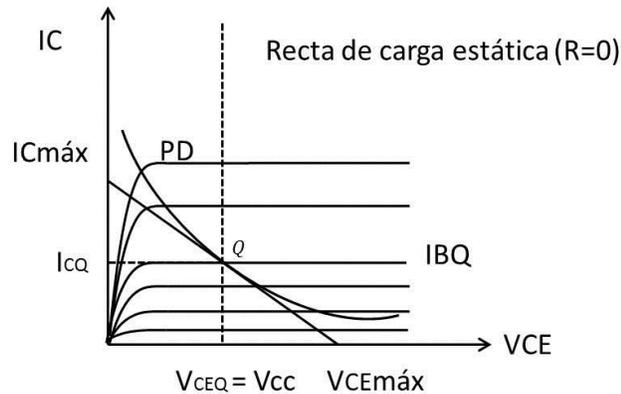
$$R_1 = \alpha^2 * R_2 \tag{5.19}$$

Si el número de vueltas en el secundario es menor que en el primario, se puede afirmar que la resistencia vista por el primario será mayor a la del secundario.

5.3.1.2.4 Diseño del amplificador

Debido a que se asume que el transformador tiene un comportamiento ideal, la resistencia de arrollamiento para corriente continua se considera como cero; estas razones generan una recta de carga estática. Al trabajar con determinado transistor, el punto Q queda determinado por la intersección entre la curva de máxima disipación y la recta de carga estática.

Fig. 5.9 Amplificador tipo A con acople de transformador



Fuente: [17]

La recta de carga dinámica se produce al unir los puntos de máximo voltaje entre el colector y emisor del transistor y la corriente máxima presente en el colector del mismo. Dicha recta debe ser tangente a la curva de máxima disipación; con la intersección generada entre estos se obtiene la máxima oscilación simétrica con base al punto Q.

En el colector se presenta una carga inductiva producida por el transformador. Por tal motivo, al existir cambios bruscos de corriente, se genera un voltaje. Este voltaje y el de alimentación tendrán que ser soportados por el transistor. Por tanto:

$$V_{CC} = V_{CE} + V_1 \quad (5.20)$$

Cuando deja de circular corriente por la bobina, la polaridad de esta cambia, debido a la oposición generada; por lo tanto:

$$V_{CC} = V_{CE} - V_1 \quad (5.21)$$

Por lo anterior, el voltaje de alimentación debe ser la mitad de la tensión máxima de colector indicada por el fabricante.

Una vez conocidos todos los valores de la Fig. 5.9 se procede a calcular la corriente que maneja la base del transistor; de la siguiente forma:

$$I_{CQ} = \frac{P_D}{I_{CQ}} = \frac{P_D}{V_{CC}} \quad (5.22)$$

Y por consiguiente:

$$I_{Cm\acute{a}x} = 2I_{CQ} = \frac{2P_D}{V_{CC}} \quad (5.23)$$

La impedancia de carga dinámica vista por el transistor, para la máxima potencia de salida será:

$$R'_L = \frac{V_{CEm\acute{a}x}}{I_{Cm\acute{a}x}} = \frac{2V_{CEQ}}{2I_{CQ}} = \frac{V_{CC}}{P_D/V_{CC}} = \frac{V_{CC}^2}{P_D} \quad (5.24)$$

Para garantizar la máxima transferencia es necesario que R_L sea igual a R'_L . Por lo tanto la potencia disipada, P_D , por el transistor es:

$$P_D = I_{CQ} * V_{CEQ} = \frac{V_{CC}^2}{R'_L} \quad (5.25)$$

La potencia de salida P_L , será:

$$P_L = I_{ef}^2 * R'_L = \left(\frac{I_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}}\right)^2 * R'_L = \left(\frac{I_{Cm\acute{a}x}}{2\sqrt{2}}\right)^2 * R'_L = \left(\frac{2I_{CQ}}{2\sqrt{2}}\right)^2 * R'_L$$

$$P_L = \frac{V_{CC}^2}{2R'_L} * R'_L = \frac{V_{CC}^2}{2R'_L} \quad (5.26)$$

De la ecuación (5.25) y (5.26) resulta:

$$P_L = 0.5P_D \quad (5.27)$$

La potencia brindada por la fuente de alimentación es:

$$P_{CC} = V_{CC} * I_{CQ} = V_{CC} * \frac{I_{Cm\acute{a}x}}{2} = \frac{2V_{CC}}{2} * \frac{V_{CC}}{R'_L} = \frac{V_{CC}^2}{R'_L} \quad (5.28)$$

De lo anterior se puede deducir que $P_D = P_{CC}$.

El rendimiento se obtiene de:

$$\mu = \frac{P_L}{P_{CC}} = \frac{\frac{V_{CC}^2}{2R'_L}}{\frac{V_{CC}^2}{R'_L}}$$

$$\mu = 0.5$$

$$\mu = 50\%$$

5.3.1.3 Comparación entre acople directo y mediante transformador

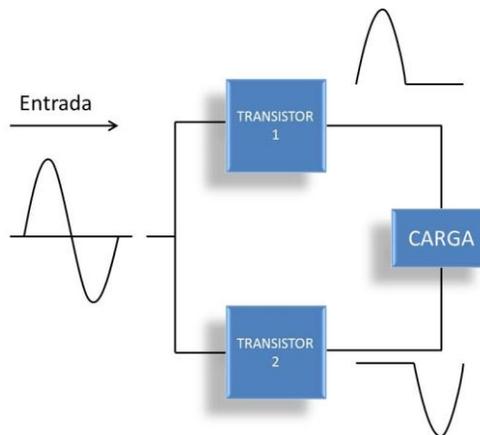
El amplificador tipo A sin acople presenta algunas características notorias como son: una mejor respuesta en frecuencia, además su composición es más ligera y económica.

El acoplamiento generado por el transformador permite al amplificador tipo A tener un rendimiento de hasta el 50%, en lugar del rendimiento del 25% que se obtenía sin acople. El acoplamiento por transformador busca modificar la impedancia vista por el amplificador para garantizar la máxima transferencia de potencia hacia el altavoz.

5.3.2 Amplificador clase B (Fig. 5.10)

En esta clase de amplificadores, el transistor sólo funciona durante medio ciclo de señal, o sea 180°. Para lograr abarcar toda la onda se deben utilizar dos transistores, uno que maneje el semiciclo positivo y otro para el negativo. Este tipo de operación se denomina conexión en contrafase.

Fig. 5.10 Representación de bloques amplificador clase B



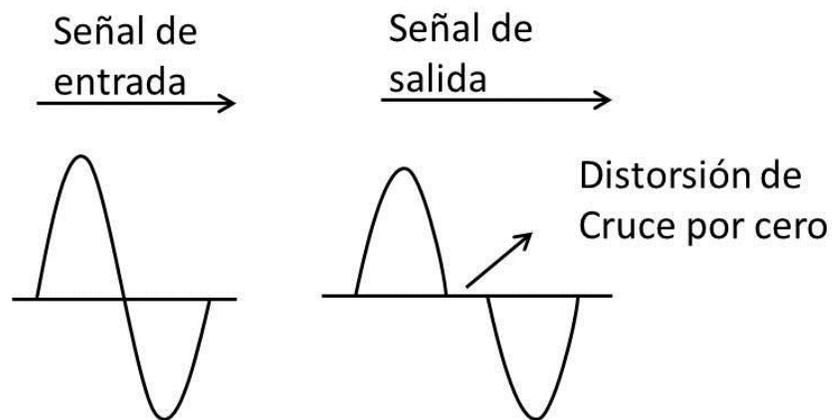
La eficiencia lograda en la amplificación clase B es alta, y esto se debe a que los transistores sólo se activan cuando existe una señal de audio a la entrada, que es la que se encarga de excitar a los transistores.

Una de las problemáticas existentes en este amplificador sucede cuando la onda cruza por cero; en este momento ninguno de los dos transistores se encuentra activo y por tal motivo la onda sufre una distorsión denominada 'distorsión de

cruce por cero' o distorsión por crossover. Lo anterior hace que el sonido producido tenga una calidad baja.

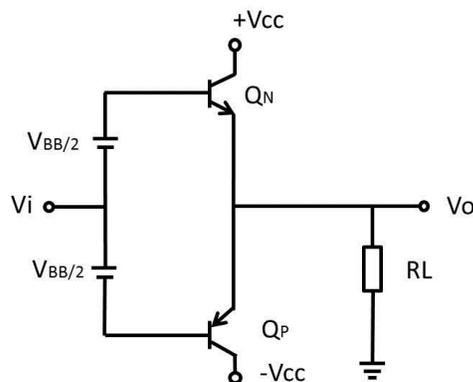
La distorsión de cruce por cero generada en la amplificación clase B es mostrada en la Fig. 5.11. Este inconveniente se puede eliminar por medio de la polarización de los dos transistores, haciendo pasar por las bases de los mismos una pequeña corriente diferente de cero. Esto da como resultado la etapa de amplificación que se va a ser motivo de estudio a continuación, denominada clase AB.

Fig. 5.11 Distorsión de cruce por cero



5.3.3 Amplificador clase AB

Fig. 5.12 Amplificador clase AB



Fuente [10]

Este tipo de amplificadores surge como solución a la distorsión de cruce por cero originada en los amplificadores de clase B. El diseño contiene una pequeña corriente de polarización que se encarga de excitar a la base de los transistores de

potencia. Para señales de excitación baja esto equivale a un amplificador clase A de pequeña potencia. A medida que la corriente de polarización aumenta, la potencia generada será mayor; la amplificación clase AB es la más comercializada para equipos de alto desempeño, ya que consumen menor potencia y son más económicos.

En el presente sistema de amplificación la corriente de salida circula por más de medio ciclo. Por tanto, este es un caso intermedio entre la clase A y B. Al poseer características de ambos tipos se logra una linealidad en señal pequeña cercana a la clase A y rendimiento un poco menor a la de clase B.

5.3.3.1 Diseño del amplificador

La potencia de salida (P_L) del circuito presente en la Fig. 5.12 se puede encontrar por medio de la siguiente formula:

$$P_L = \frac{V_o^2}{2R_L} \quad (5.29)$$

La potencia máxima vista en la salida del circuito se hace presente cuando el voltaje en la salida (V_o) se acerca al voltaje de alimentación (V_{cc}).

$$P_L = \frac{V_{CC}^2}{2R_L} \quad (5.30)$$

El valor pico de corriente de la fuente de alimentación está dado por (V_o/R_L) y el promedio de corriente de cada una de las dos fuentes será $V_o/(\pi \cdot R_L)$. Debido a que el promedio de las dos fuentes de alimentación es igual, se obtiene:

$$P_{CC}^+ = P_{CC}^- = \frac{1}{\pi} \frac{V_o}{R_L} V_{CC} \quad (5.31)$$

La potencia total presente en la fuente será:

$$P_{CC} = \frac{2}{\pi} \frac{V_o}{R_L} V_{CC} \quad (5.32)$$

El rendimiento generado por la etapa de amplificación es:

$$\mu = \frac{P_L}{P_{CC}}$$

$$\mu = \frac{\frac{V_0^2}{2R_L}}{\frac{2}{\pi} \frac{V_0}{R_L} V_{CC}}$$

$$\mu = \frac{\pi V_0}{4V_{CC}}$$

El máximo rendimiento generado, se deduce cuando el voltaje presente a la salida del circuito se aproxima al valor del voltaje de alimentación de los transistores; por tal razón:

$$\mu = \frac{4}{\pi}$$

$$\mu = 78.5\%$$

La potencia disipada en este caso es menor que la expuesta en el de clase A. Cuando el amplificador AB no se encuentra excitado por una señal a la entrada, la disipación es cero, pero cuando se aplica dicha señal el promedio de potencia está dado por la siguiente expresión:

$$P_D = P_{CC} - P_L \quad (5.32)$$

Reemplazando las ecuaciones (5.29) y (5.31) en (5.32) se obtiene:

$$P_D = \frac{2}{\pi} \frac{V_0}{R_L} V_{CC} - \frac{V_0^2}{2R_L} \quad (5.33)$$

Derivando (5.33), con respecto al voltaje de salida e igualando a cero se obtiene:

$$V_0 \Big|_{P_{Dm\acute{a}x}} = \frac{2}{\pi} V_{CC} \quad (5.34)$$

Al sustituir en la ecuación (5.33) obtenemos:

$$P_{Dm\acute{a}x} = \frac{2V_{CC}^2}{\pi^2 R_L} \quad (5.35)$$

Por tanto:

$$P_{DNm\acute{a}x} = P_{DPm\acute{a}x} = \frac{2V_{CC}^2}{\pi^2 R_L} \quad (5.36)$$

El análisis anterior se realizó sin tener en cuenta el momento en que los transistores siguen funcionando para solucionar el problema de distorsión de cruce por cero; en dicho momento la potencia disipada por los mismos es igual a

$(V_{CC} * I_C)$, este valor es sumado al deducido en la ecuación (5.36) y de este modo se puede obtener:

$$P_{DNm\acute{a}x} = P_{DPm\acute{a}x} = \frac{2V_{CC}^2}{\pi^2 R_L} + (V_{CC} * I_C) \quad (5.36)$$

5.3.3.2 Polarización del circuito de clase AB

A continuación se presenta la forma más eficiente de generar el voltaje V_{BB} que se encarga de polarizar los transistores de la etapa de salida del amplificador.

6.3.3.2.1 Polarización con diodos (Fig. 5.13)

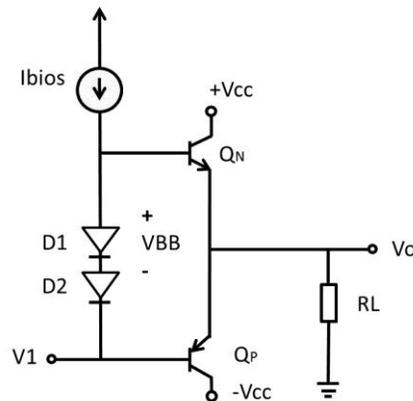
En este tipo de circuito, para generar el voltaje de polarización V_{BB} , se hace pasar una corriente constante I_{bios} por un par de diodos. La corriente de saturación de los transistores debe ser n veces la presente en los diodos así:

$$I_C = nI_{bios} \quad (5.37)$$

En donde:

n : relación entre el área de unión del emisor de los dispositivos de salida y el área de unión de los diodos.

Fig. 5.13 Amplificador clase AB polarizado por diodos



Fuente: [10]

Cuando circula una corriente en la carga, la corriente existente en la base de Q_N aumenta, pasando de I_C/β_n a I_L/β_n . Este incremento debe ser brindado por la fuente I_{bios} ; por tal motivo se establece que el valor de esta debe ser mayor a la máxima corriente presente en la base.

La distribución de polarización del diodo proporciona estabilidad térmica en el circuito manteniendo la I_C constante, para que suceda los diodos deben estar en estrecho contacto térmico con los transistores. Esto es una desventaja, debido a

que al aumentar la corriente del colector se disipa cada vez más potencia en el transistor y la temperatura acumulada será mayor, generando así posiblemente la destrucción del transistor.

5.3.4 Amplificador clase C

En esta clase de amplificador la corriente de colector circula durante menos de 180° para una señal sinusoidal completa a la entrada. Es el tipo de amplificador que posee mayor eficiencia, con un valor cercano al 100%, pero también es el que más distorsión genera. Por tal motivo, su utilización en sistemas de audio es inadecuada.

Este tipo de amplificador resulta conveniente para el trabajo en radiofrecuencias, donde este debe encargarse de excitar una antena que trabaja a determinado rango de frecuencia. La carga en clase C es generalmente un circuito resonante para una banda de frecuencias estrecha.

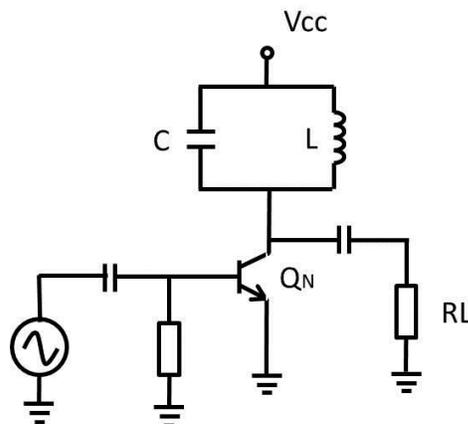
5.3.4.1 Principio de funcionamiento

Para que el transistor trabaje en clase C la unión entre la base y el emisor debe encontrarse polarizada de manera inversa y sin ninguna señal de excitación presente en la entrada. Solo se presentará corriente en la salida cuando la señal de entrada sobrepase en nivel de polarización inversa.

Al circular corriente en menos de 180° se produce en el colector una serie de pulsos que son los encargados de excitar el circuito resonante, el cual, al sintonizar la frecuencia fundamental de la corriente del colector, produce una onda seno casi perfecta.

En la Fig. 5.14 se muestra el circuito típico de configuración clase C.

Fig. 5.14 Amplificador clase C

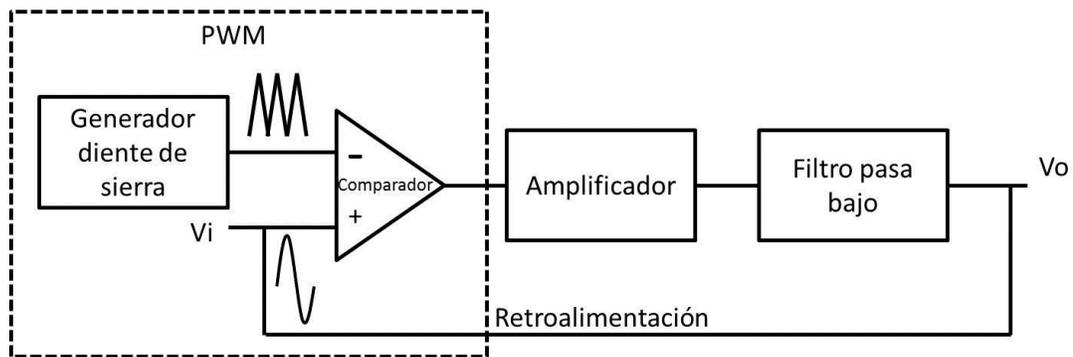


Fuente: [17]

5.3.5 Amplificador clase D (Fig. 5.15)

En este tipo de operación, el amplificador utiliza señales de pulso, las cuales se encargan de encender los transistores de potencia durante un tiempo y apagarlos durante otro. La ventaja existente en clase D se basa en que el transistor trabaja en corte y saturación, logrando que la potencia disipada en él sea prácticamente nula. La conmutación se hace a una frecuencia relativamente alta, lo que permite una buena fidelidad en la reproducción de la señal de audio.

Fig. 5.15 Diagrama de bloques amplificador clase D



Fuente: [18]

5.3.5.1 Principio de funcionamiento

El amplificador de clase D posee un funcionamiento muy similar al presentado por un amplificador ideal.

El proceso de funcionamiento comienza con una etapa de modulación de ancho de pulso, donde se muestrea la señal análoga presente en la entrada. La operación se efectúa comparando la señal de entrada con una señal diente de sierra que posee una frecuencia mayor.

Los impulsos de la nueva señal generada poseen un valor medio proporcional a la señal de entrada; ésta será acondicionada más adelante por una etapa lógica, de donde es enviada a los transistores de potencia. La señal producida luego de la etapa de amplificación contiene componentes de frecuencias demasiado altas; un filtro pasa bajos a la salida del circuito se encarga de eliminar dichas componentes, suavizando así la señal.

Para garantizar una mejor calidad se hace una realimentación del sistema. Si se desea un amplificador que trabaje en la frecuencia audible se debe garantizar lo siguiente:

- Que el tren de pulsos generados tenga una frecuencia bastante alta (160 a 200kHz); con esto se garantiza que incluso las componentes de máxima

frecuencia de la señal de entrada (20kHz) sean muestreadas alrededor de 8 o 10 veces por ciclo.

- Que los dispositivos de la etapa de potencia permitan una conmutación suficientemente rápida, de alrededor de unos 200ns.
- Que la señal en la salida sea aceptable al oído humano, lo cual se logra gracias a la realimentación del sistema, obteniéndose distorsiones tan bajas como del 1% o menores.
- Que la máxima atenuación en el filtro de salida sea mínimo de 40dB para el tren de pulsos y menor de 4 dB para la componente más alta de la frecuencia a amplificar.

El rendimiento del amplificador clase D puede alcanzar hasta un 85% y debido a su gran eficiencia se pueden eliminar los ventiladores de refrigeración forzada que están presentes en amplificadores lineales de alta potencia (200W).

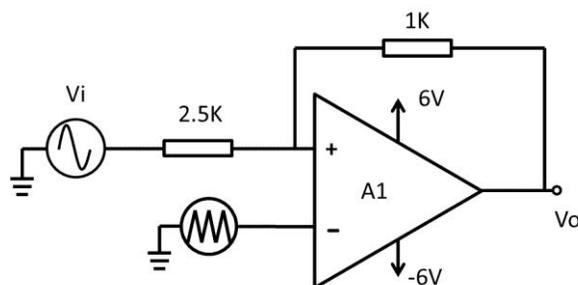
Si el amplificador se construye con Mosfets, se minimiza el consumo de corriente asociado con la señal de excitación, y por este motivo no existen pérdidas de corriente apreciables. Lo expuesto anteriormente genera ventajas ante los otros tipos de amplificación de potencia, ya nombrados en el presente capítulo.

5.3.5.2 Diseño del amplificador

5.3.5.2.1 PWM

La primera etapa del amplificador clase D es un modulador de ancho de pulso en donde se realiza la comparación de una onda triangular con la señal de entrada para generar a la salida del circuito una señal con dos estados (alto y bajo), donde el ancho de los pulsos de la señal que se genera es proporcional a la amplitud de la señal de entrada.

Fig. 5.16 Circuito PWM



Fuente: [18]

El circuito de la Fig. 5.16 funciona comparando los niveles de tensión en las señales puestas en las terminales de entrada inversora (onda triangular) y no

inversora (onda senoidal) del amplificador operacional, cuando la señal triangular posee un nivel de voltaje mayor al de la senoidal, la salida del circuito tendrá un voltaje de salida igual al voltaje de saturación negativo y cuando sucede lo contrario la salida tendrá un valor igual al voltaje de saturación positivo. En el instante que las dos señales son iguales se produce un cambio muy rápido de estado; de esta forma se genera una señal de pulsos.

Las resistencias de la red de la Fig. 5.16 se encargan de determinar los niveles de histéresis del comparador Schmitt (umbral de voltaje superior e inferior), los cuales se pueden determinar de la siguiente forma:

$$V_{UT} = \frac{R2}{R1 + R2} (+V_{SAT}) \quad (5.38)$$

en donde:

V_{UT} =Umbral superior de voltaje.

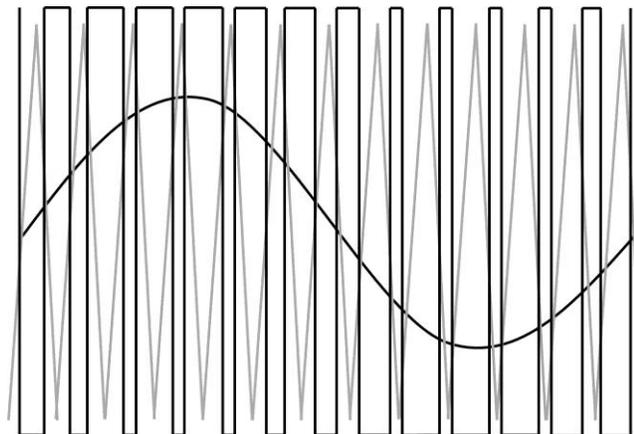
$$V_{LT} = \frac{R2}{R1 + R2} (-V_{SAT}) \quad (5.39)$$

en donde:

V_{LT} =Umbral inferior de voltaje.

En la Fig. 5.17 se puede observar la salida del comparador que es una señal PWM, la señal de entrada tipo sinusoidal y la señal modulante de tipo triangular que debe poseer una frecuencia de mayor al rango de frecuencias de señal de entrada.

Fig. 5.17 Entrada y salida del circuito PWM

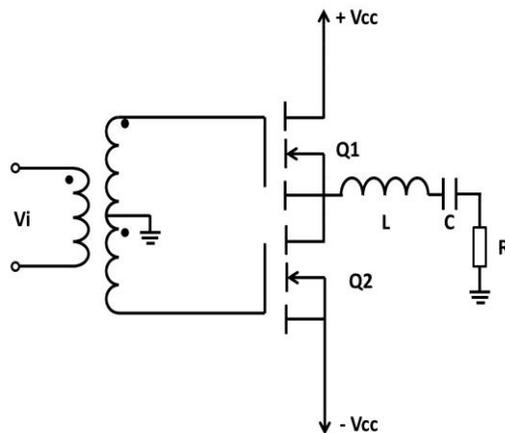


Fuente: [18]

5.3.5.2.2 Amplificador

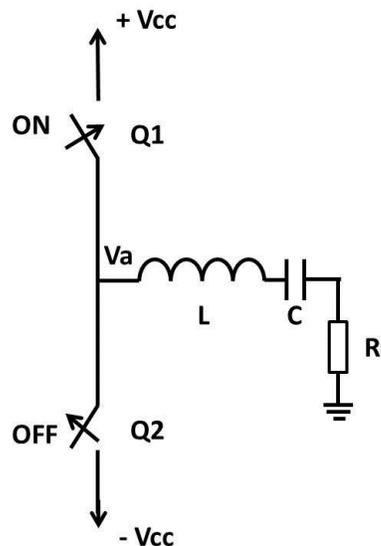
En la Fig. 5.18 se muestra la etapa que realiza la amplificación de potencia. Se supone que los transistores tendrán un comportamiento ideal, de esta manera las tensiones de saturación son nulas y no existirá caída de tensión en el transistor, en pocas palabras se comportara como un interruptor. Cuando uno de los transistores se encuentra encendido el otro debe estar apagado. Este tipo de modelamiento se presenta en la Fig. 5.19.

Fig. 5.18 Amplificador clase D



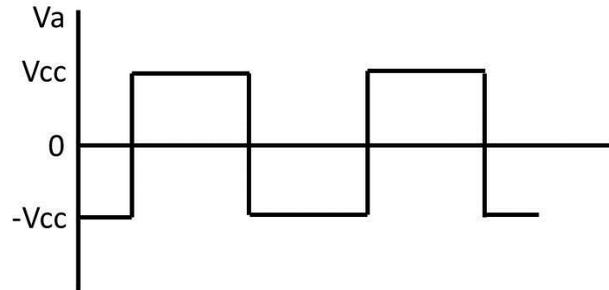
Fuente: [19]

Fig. 5.19 Modelo ideal equivalente amplificador clase D



Fuente: [19]

Fig. 5.20 Forma de onda de la salida V_a , en un amplificador clase D



Fuente: [19]

Si la entrada V_{in} es una onda cuadrada, la forma de onda en el punto V_a de la Fig. 5.19 será una señal cuadrada como la mostrada en la Fig. 5.20. Mediante la representación en series de Fourier de esta, se obtiene una componente fundamental con una amplitud igual a:

$$V_{in} = \frac{4V_{CC}}{\pi} \quad (5.40)$$

Si el filtro a la salida del circuito (Fig. 5.19) es relativamente elevado y su frecuencia central es igual a la frecuencia de la señal de salida; la corriente del drenador será una parte de la señal senoidal con la misma frecuencia, así:

$$I_D = \frac{1}{R_L * T} \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{4V_{CC}}{\pi} \text{sen}wt \, dt = \frac{4V_{CC}}{R_L * T * \pi} \int_0^{\frac{T}{2}} \text{sen}wt \, dt \quad (5.41)$$

Al desarrollar la integral se obtiene:

$$\int_0^{\frac{T}{2}} \text{sen}wt \, dt = \frac{-\cos w\left(\frac{T}{2}\right)}{w} + \frac{-\cos w(0)}{w} \quad (5.42)$$

En donde:

$$w = 2\pi * f \quad (5.43)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (5.44)$$

Reemplazando la ecuación (5.42) en (5.41) se obtiene:

$$f = \frac{2\pi}{T} \quad (5.45)$$

Reemplazando la ecuación (5.45) en (5.42) se obtiene:

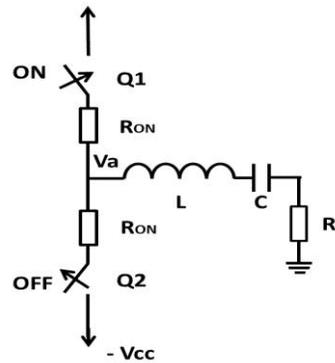
$$\int_0^{\frac{T}{2}} \text{sen} \omega t \, dt = \frac{-\cos \frac{2\pi}{T} \left(\frac{T}{2}\right)}{\frac{2\pi}{T}} + \frac{-\cos \frac{2\pi}{T} (0)}{\frac{2\pi}{T}} = \frac{T}{\pi} \quad (5.46)$$

Reemplazando el valor de la ecuación (5.46) en (5.41) se obtiene que la corriente de colector es igual a:

$$I_D = \frac{4V_{CC}}{R_L * T * \pi} * \frac{T}{\pi} = \frac{4V_{CC}}{R_L * \pi^2} \quad (5.47)$$

Para los transistores reales es imposible obtener un voltaje cero en saturación, pero en el caso de los mosfets es posible modelar como en la Fig. 5.21.

Fig. 5.21 Modelo real equivalente amplificador clase D con mosfets



Fuente: [19]

Trabajando con un amplificador real la ecuación (5.47) se ve modificada por las resistencias de encendido presentes en los Mosfets, por tal razón:

$$I_D = \frac{4V_{CC}}{\pi^2(R_L + R_{on})} \quad (5.48)$$

La potencia presente en la salida idealmente se representa como:

$$P_O = \left(\frac{4V_{CC}}{\pi}\right)^2 (2R_L) = \frac{8V_{CC}^2}{\pi^2 R_L} \quad (5.49)$$

En condiciones reales la potencia de salida también suele verse afectada por las resistencias del transistor, por tal razón:

$$P_O = \frac{8V_{CC}^2}{\pi^2 R_L} \frac{R_L}{(R_L + R_{on})^2} \quad (5.50)$$

El total de potencia suministrada por la fuente de voltaje V_{CC} será:

$$P_{CC} = \frac{8V_{CC}^2}{\pi^2(R_L + R_{on})} \quad (5.51)$$

Con la ecuación (5.50) y (5.51) y reemplazando en (5.15) se presenta un rendimiento igual a:

$$\mu = \frac{\frac{8V_{CC}^2}{\pi^2 R_L (R_L + R_{on})^2} R_L}{\frac{8V_{CC}^2}{\pi^2 (R_L + R_{on})}} = \frac{R_L}{R_L + R_{on}} \quad (5.52)$$

5.4 DISTORSIÓN DEL AMPLIFICADOR

Al realizar el proceso de amplificación se espera que la señal de entrada tenga la misma forma de la señal de salida con una ganancia determinada. Sin embargo en ella se pueden generar alteraciones o deformaciones y cuando esto sucede se dice que la señal ha sufrido una distorsión.

Un tipo común de distorsión es el producido por las características no lineales de los elementos semiconductores presentes en el circuito; a esta alteración se le conoce con el nombre de distorsión lineal o de amplitud, y con frecuencia se encuentra en las clases de amplificación estudiadas anteriormente.

También puede presentarse la llamada distorsión en frecuencia, que es la ocasionada cuando los dispositivos que conforman el amplificador no responden de igual manera a todas las componentes de frecuencia de la señal de entrada.

Un método muy utilizado para describir la distorsión es el análisis de Fourier, en el cual se describe a una señal en términos de la componente fundamental y sus armónicos (Los armónicos son señales senoidales cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental).

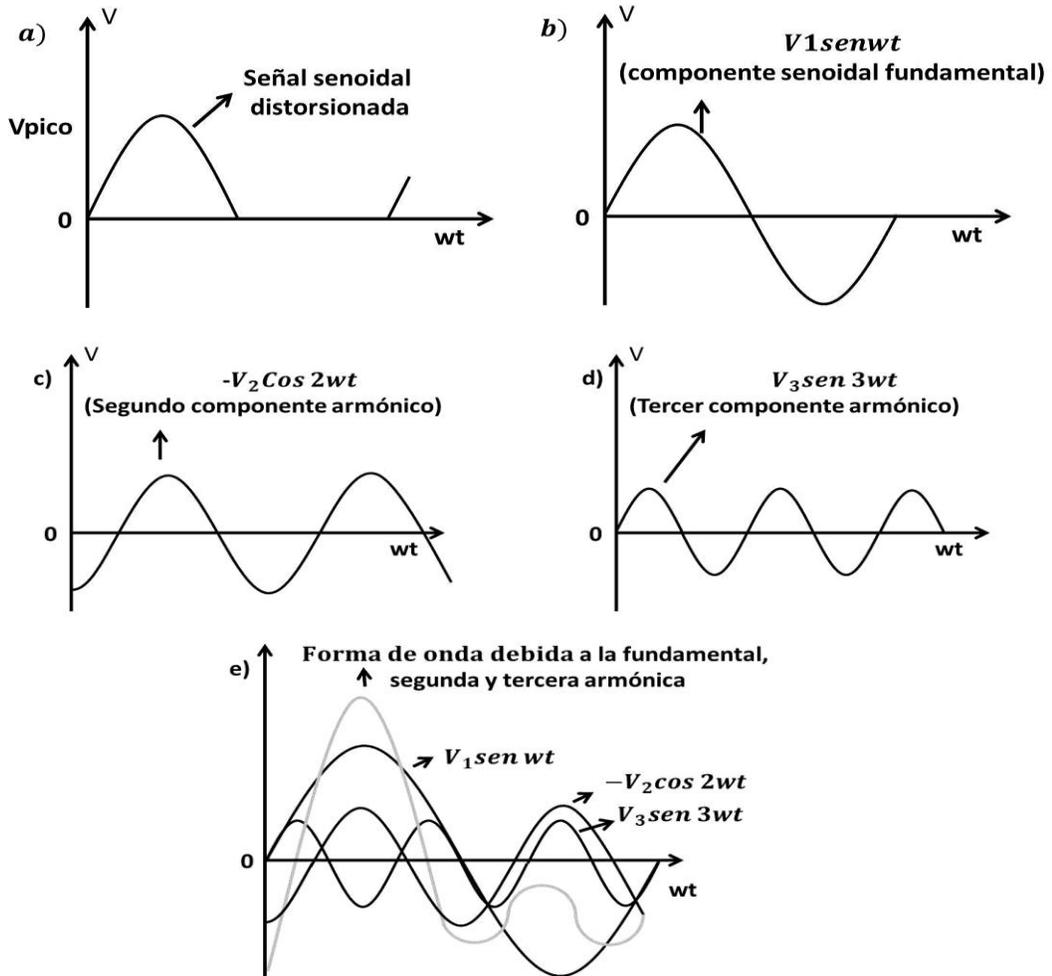
Independientemente de cómo funcione el amplificador, la distorsión se puede cuantificar por medio de varios métodos, de los cuales el más representativo es el TDH (Distorsión armónica total).

5.4.1 Componentes armónicos de una señal distorsionada

Una onda distorsionada como la que presenta la amplificación clase B puede representarse mediante el análisis de Fourier como una fundamental con componentes armónicos. La Fig. 5.21a muestra medio ciclo resultante de un amplificador B. Mediante el análisis de Fourier, se puede obtener la componente fundamental de la señal distorsionada como en la Fig. 5.21b, al igual que las componentes de segunda (Fig. 5.21c) y tercera (Fig. 5.21d) armónica. Con el

análisis de Fourier la onda distorsionada puede formarse por la adición de la componente fundamental y las componentes armónicas (Fig. 5.21e).

Fig. 5.22 Representación gráfica de una señal distorsionada mediante el uso de componentes armónicas



Fuente: [10]

5.4.2 Distorsión armónica total (THD)

Este tipo de distorsión se refiere a la deformación a la que se ve sometida una señal sinusoidal pura al pasar por un amplificador. A la salida del mismo aparecerán, en general, la señal fundamental y un grupo de armónicos. Para cada uno de los armónicos se puede medir el porcentaje de distorsión de la siguiente manera:

$$\%Dn = \frac{A_n}{A_1} * 100\% \quad (5.53)$$

D_n : Distorsión de la armónica enésima.

A_n : Amplitud armónico n.

A_1 : Amplitud fundamental.

Y finalmente, una vez obtenidos los datos de las distorsiones armónicas, se procede a hallar la distorsión armónica total (Total Harmonic Distorsion - THD) con la siguiente ecuación:

$$\%TDH = \sqrt{D2^2 + D3^2 + D4^2 \dots} * 100\% \quad (5.54)$$

Cuando se trata de audio de alta fidelidad (HiFi), se espera que la THD de los amplificadores no supere el 0.5%.

Para amplificadores de tipo AB y B la distorsión armónica total se debe principalmente a los armónicos pares, y entre ellos la mayor componente de distorsión se encuentra en la segunda armónica. La distorsión debida a ella se puede calcular de la siguiente forma:

En términos de las corrientes presentes en el colector:

$$D2 = \frac{\frac{1}{2}(I_{cmáx} + I_{cmín}) - (I_{cQ})}{I_{cmáx} - I_{cmín}} * 100\% \quad (5.53)$$

Y en términos de los voltajes de colector emisor:

$$D2 = \frac{\frac{1}{2}(V_{CEmáx} + V_{CEmín}) - (V_{CEQ})}{V_{CEmáx} - V_{CEmín}} * 100\% \quad (5.56)$$

5.5 RESUMEN DEL CAPÍTULO

- Los amplificadores, son una red compuesta de transistores y resistencias, con los cuales se busca generar un aumento de amplitud ya sea en voltaje o corriente en una señal frecuentemente baja a la entrada del circuito.
- Los amplificadores de potencia son llamados de esta forma cuando en su salida manejan cargas que requieren una potencia mayor a un vatio.
- La ganancia brinda información sobre la relación entre el voltaje de salida y el voltaje de entrada; con ello se puede determinar cuál es el aumento en la amplitud de la señal.
- Los amplificadores de clase A trabajan en los 360° de la onda seno; por lo tanto su consumo de corriente es excesivo y el transistor tiende a calentarse. Sin embargo tienen la ventaja de presentar mínima distorsión, gracias a lo cual se logra una calidad incomparable de audio.
- Los amplificadores clase B trabajan sólo en medio ciclo de la onda seno; por lo tanto, para manejar todo el ciclo de la señal se requieren dos

transistores, uno que se ocupe del semiciclo positivo y otro del negativo. La ventaja de esta clase de amplificación es que los transistores se encuentran en reposo en ausencia de señal de entrada, lo que elimina la disipación de potencia.

- En la amplificación clase B se produce una alteración en la señal, denominada distorsión por cruce, que se debe a que en el momento en que la señal pasa por cero ninguno de los transistores se enciende ya que no se alcanza a superar el voltaje de la juntura base-emisor.
- La clase AB, surge como solución al problema de distorsión por cruce. Se logra implementando un sistema que mantenga encendidos los transistores un tiempo más largo que el requerido para el procesado de medio ciclo. Con esta modificación se pueden lograr eficiencias cercanas al 78.5 %.
- La clase C es el tipo de amplificación que más eficiencia posee pero es el que más distorsión produce. Por este motivo no se utiliza en sistemas de audio, restringiéndose a aplicaciones como multiplicadores de frecuencia en equipos de comunicaciones.
- En los amplificadores tipo D los dispositivos trabajan en corte y saturación, produciendo una conmutación que es controlada por la señal de entrada mediante una modulación por ancho de pulso. Con la amplificación clase D se puede alcanzar una eficiencia de hasta el 85%.
- Un problema importante en todas las clases de amplificadores de audio es la distorsión. Dicha distorsión puede deberse a las características no lineales de los elementos del circuito (distorsión lineal) o a las diferencias en las respuestas en frecuencia de los dispositivos que conforman el amplificador (distorsión en frecuencia).
- Un indicador del nivel de distorsión en un sistema de audio es la distorsión armónica total (THD).

5.6 PREGUNTAS Y EJERCICIOS

1. Describa y compare cada una de las clases de amplificación mostradas en el presente capítulo.
2. ¿A qué se le denomina distorsión de cruce? ¿Cómo se soluciona?
3. En el datasheet de determinado transistor se han encontrado los siguientes datos:
 - Potencia de disipación máxima ($P_{Dm\acute{a}x}$)= 4W.
 - Voltaje colector emisor máximo ($V_{CEm\acute{a}x}$)= 15V.

Si el transistor es utilizado en un amplificador clase A con acople directo, (la recta de carga se apoya en el punto $V_{CEm\acute{a}x}$ = 15V.), determinar:

- Resistencia de carga.
- Tensión de alimentación.
- Coordenadas del punto Q.

- Potencia de salida.
- Potencia de la fuente de alimentación.
- Rendimiento.

4. Calcule la THD para una señal de la salida de un amplificador en la que las amplitudes de sus armónicas son las siguientes:

$$A_1 = 3V, A_2 = 0.4V, A_3 = 0.2V, A_4 = 0.07V.$$

5. Calcule la distorsión de segunda armónica, si la forma de onda de salida del osciloscopio arroja las siguientes mediciones:

a) $V_{CE\text{mín}} = 1.5V, V_{CE\text{máx}} = 20V, V_{CEQ} = 10V.$

b) $V_{CE\text{mín}} = 3V, V_{CE\text{máx}} = 21V, V_{CEQ} = 12V.$

5.7 BIBLIOGRAFÍA

RUIZ M, Sofía. Diseño y caracterización de amplificadores de audio. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniera industrial. Madrid. Universidad Pontificia De Comillas. 2009.

BARRIGA, Gilberto. Diseño y construcción de un amplificador de audio utilizando tubos al vacío. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero electrónico. Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana. 2010.

VILLA SALAZAR, Arley y VERA ROJO, Diover. Amplificadores de potencia clase D. Universidad de Antioquia. Medellín.

VALERO, Diego y AGUILAR, Juan D. Amplificadores de potencia teoría y problemas. Madrid. Editorial Paraninfo S.A. 1993.

BOYLESTAD, Robert L. y NASHELSKY, Louis. Electrónica: teoría de circuitos. Traducido por Juan Purón Mier y Terán y Sergio Luis María Ruiz Faudón. 6 ed. Mexico. Prentice hall Hispanoamérica S.A, 1997.

PEREIRA HERNÁNDEZ, Miguel. Amplificadores de audio. Bilbao. Escuela superior de ingenieros Bilbao. 2005. Disponible en:
<http://aholab.ehu.es/users/imanol/akustika/lkasleLanak/Amplificadores%20de%20audio.pdf>

CAPÍTULO 6 ECUALIZADORES Y ECUALIZACIÓN DE AUDIO

6.1 INTRODUCCIÓN

Los ecualizadores son uno de los dispositivos más importantes en el procesamiento de señales de audio; permiten aumentar la ganancia entre frecuencias, modificando la linealidad de respuesta en las etapas de sonido; un ejemplo simple de ecualizador es el control de tonos, el cual permite la alteración de graves, medios y agudos.

Los ecualizadores se pueden dividir en dos clases representativas: ecualizadores pasivos y ecualizadores activos; los pasivos tienen la característica de no necesitar alimentación eléctrica debido a que no consumen energía y sus componentes son elementos como resistencias, condensadores y bobinas; por otro lado los activos, requieren de una fuente eléctrica constante para alimentar los amplificadores operacionales con los que está construido el dispositivo.

Algunos ejemplos de los ecualizadores más usados en la industria del sonido son:

Ecualizador gráfico: este tipo de ecualizador se encuentra dividido en bandas de frecuencia expresadas en función de octavas; su manipulación se realiza por medio de varios seleccionadores deslizables graduados en decibeles denominados faders, que se encargan de alterar la ganancia en cada una de las bandas de manera más práctica.

Ecualizador paramétrico: los ecualizadores paramétricos poseen una gran versatilidad ya que permiten posicionar al usuario en cualquier lugar de la frecuencia, además son de gran ayuda cuando se quiere eliminar acoples (zumbidos o silbidos) existentes en la señal.

Una correcta ecualización depende del instrumento musical que se quiere resaltar y de un RTA (Real Time Analyzer). El RTA se encarga de mostrar en cada instante el espectro de la señal de audio y con base a esto se puede realizar un ajuste más objetivo, teniendo como referencia algunas de las tablas donde se especifican las características de ecualización de los instrumentos musicales. La adecuada ecualización permite hacer más notorio un instrumento sin tener que recurrir al volumen del mismo.

El objetivo de este capítulo es presentar de forma detallada los procesos de ecualización en los sistemas de audio, ofreciendo de esta manera un enfoque teórico sobre cómo funcionan y como están construidos los ecualizadores; Además también se presentan algunas de las tablas sobre cómo brindar determinadas características a los instrumentos para con ello satisfacer las necesidades que el usuario requiera.

6.2 ECUALIZADOR

Los ecualizadores son dispositivos compuestos de un conjunto de filtros que se encargan de alterar la ganancia en tres o más bandas de frecuencia de la señal de audio con el fin de corregir inconsistencias en la misma. Por medio de los ecualizadores se puede lograr un balance tonal en toda la mezcla ya que las frecuencias débiles se pueden aumentar y las fuertes disminuirse, manteniendo así un equilibrio sonoro.

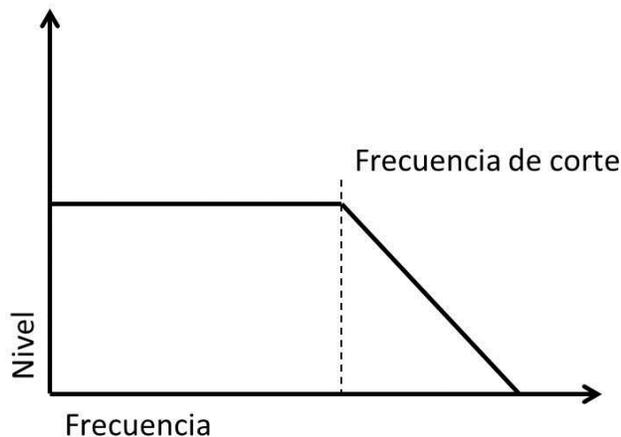
6.2.1 Tipos de filtros utilizados en ecualizadores

La construcción de ecualizadores requiere de un conjunto de filtros ya sean activos o pasivos que permitan modificar la curva de respuesta del sistema de audio a nuestro antojo. A continuación se presentan las diferentes clases de filtros utilizados en la construcción de ecualizadores de audio, al igual que una breve descripción de sus características más representativas.

6.2.1.1 Filtro pasa bajo

El filtro pasa bajo permite el paso de las componentes de señal que se encuentren por debajo de determinada frecuencia, denominada frecuencia de corte (f_c), mientras realiza una atenuación a las que estén por encima de este nivel. En la Fig. 6.1 se puede apreciar la respuesta en frecuencia del filtro descrito.

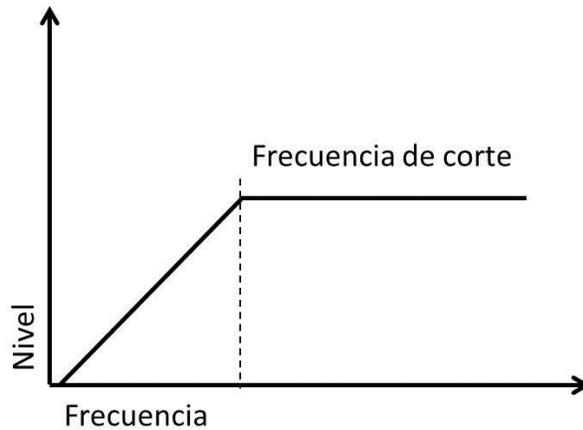
Fig. 6.1 Comportamiento en frecuencia filtro pasa bajo



6.2.1.2 Filtro pasa alto

El filtro pasa alto presenta un comportamiento similar al pasa bajo solo que funciona de forma inversa, lo anterior representa que deja pasar las componentes que se encuentran por encima a la frecuencia de corte, atenuando las que se encuentren por debajo. La respuesta en frecuencia del filtro pasa alto puede observarse en la Fig. 6.2.

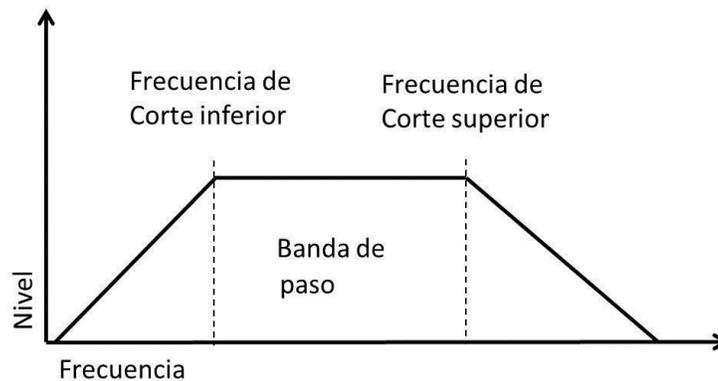
Fig. 6.2 Comportamiento en frecuencia filtro pasa alto



6.2.1.3 Filtro pasa banda

El filtro pasa banda se encarga de dejar pasar un determinado rango de frecuencias comprendidas entre la frecuencia de corte inferior y la frecuencia de corte superior, a este espacio específico se le conoce con el nombre banda de paso. La construcción del filtro pasa banda se puede realizar por medio de la unión de una red pasa bajo y una pasa alto siempre y cuando la frecuencia de corte del filtro pasa bajo sea mayor que la del filtro pasa alto. La respuesta del filtro pasa banda se puede apreciar en la Fig. 6.3.

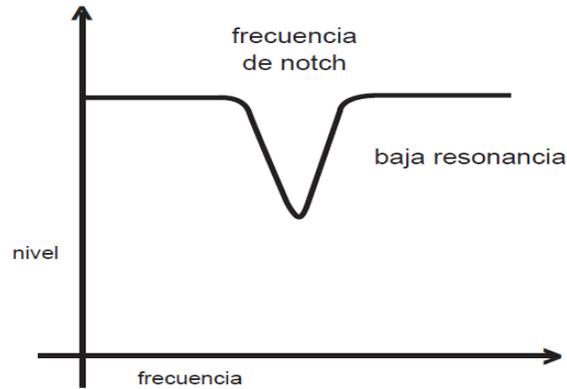
Fig. 6.3 Comportamiento en frecuencia filtro pasa banda



6.2.1.4 Filtro rechaza banda

El filtro rechaza banda posee un comportamiento inverso al filtro pasa banda y se utiliza para atenuar determinado rango de frecuencias, es decir, permite el paso de las frecuencias que se encuentran por encima y por debajo de la frecuencia de corte superior e inferior. El comportamiento en frecuencia del filtro rechaza banda se presenta a continuación (Fig. 6.4).

Fig. 6.4 Comportamiento en frecuencia filtro rechaza banda



Fuente: [20].

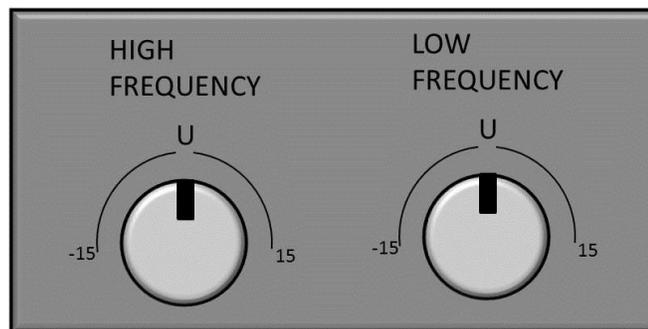
6.2.2 Tipos de ecualizadores

Existen diversas clases de ecualizadores; en este numeral se brinda la descripción de algunas de las más utilizadas en las cadenas de audio profesional, haciendo énfasis en el sistema más común denominado ecualizador gráfico.

6.2.2.1 Ecualizador Shelving (Fig. 6.5)

El ecualizador Shelvin se encarga de reforzar o atenuar las zonas altas y bajas del espectro de audio en los humanos, con esto se refiere a un control sobre las tonalidades graves y agudas, llegando a brindar un nivel de ganancia de $\pm 15\text{dB}$. Los ecualizadores Shelvin son prácticamente inutilizables en los sistemas de grabación profesional, pero suelen encontrarse en algunos equipos o mini cadenas de audio.

Fig. 6.5 Ecualizador Shelving



6.2.2.2 Ecualizador semi-paramétrico (Fig. 6.6)

La estructura interna de un ecualizador semi-paramétrico permite modificar la frecuencia de corte y la ganancia en la señal pero poseen un ancho de banda fijo,

donde su variación depende de los dos parámetros anteriores. El costo de este instrumento suele ser menor en comparación al de sus hermanos de tipo paramétrico.

Fig. 6.6 Ecuador semi-paramétrico de una banda



6.2.2.3 Ecuador paramétrico (Fig. 6.7)

Esta clase de ecualizador permite la fijación y modificación de tres determinados parámetros (frecuencia central, ganancia y ancho de banda), de manera individual en cada banda de trabajo. Son considerados uno de los ecualizadores más potentes del mercado debido a sus posibilidades de modificar los parámetros que actúan sobre los filtros que lo constituyen. La correcta utilización del ecualizador paramétrico requiere de una ardua dedicación al estudio y manejo de este instrumento.

Generalmente los ecualizadores paramétricos se encuentran contruidos por uno, dos, tres o cuatro filtros, que actúan de manera independiente en las diferentes zonas del espectro audible (bajos, medios bajos, medios, medios agudos y agudos).

La característica más importante del ecualizador paramétrico es que deja posicionar al usuario en cualquier lugar de la curva de la señal de audio para proceder con su modificación.

Fig. 6.7 Ecuador paramétrico de una banda



6.2.2.4 Ecuador dinámico (Fig. 6.8)

Es un conjunto organizado de filtros que funcionan únicamente cuando se excede un nivel de umbral, una vez se supera el umbral se aplica una ganancia a la señal de audio. Los ecualizadores dinámicos son básicamente una mezcla entre los compresores y ecualizadores y por dicha razón brindan un excelente apoyo para corregir los desequilibrios de la señal tratada.



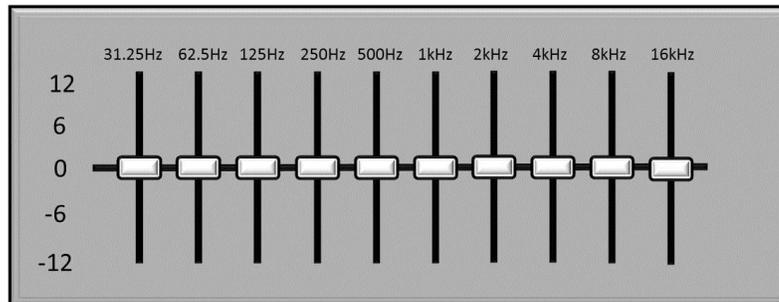
Fuente: [21]

6.2.2.5 Ecuador gráfico

Se denominan ecualizadores gráficos (Fig. 6.9) debido a que en su panel frontal disponen de un grupo de potenciómetros deslizables (faders), distribuidos por defecto en línea recta; donde cada fader representa una posición o banda específica en frecuencia sobre la cual se puede aplicar una determinada ganancia, ya sea para enfatizar o atenuar la señal de audio. Las modificaciones que se realicen en dicho panel serán las mismas que tendrá la señal de audio.

Cada banda del ecualizador gráfico se calcula de acuerdo con el número de faders que componen el dispositivo. El número de faders presentes en este tipo de dispositivos oscila entre 4 y 64, entre mayor sea el número de bandas, más preciso será el ecualizador sobre el que se trabaja. El usuario sencillamente hace uso de ellos para modificar la onda en la manera que desee.

Fig. 6.8 Ecuador gráfico



La construcción de los ecualizadores gráficos se realiza por medio de un conjunto de filtros pasa banda cuya conexión se realiza en paralelo. Cada uno de ellos debe actuar sobre una banda de frecuencia con el fin de cubrir todo el espectro de audio.

6.2.2.5.1 Distribución de bandas

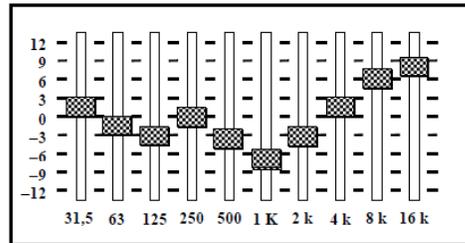
Los ecualizadores gráficos pueden dividirse en octavas y en tercios de octava; si el dispositivo se divide en octavas, cada banda tendrá el doble de valor que la anterior. Pero si se encuentra dividido en tercios de octava cada banda tendrá un valor mayor en un 25% a la anterior.

6.2.2.5.2 Ajuste de ganancia

El ajuste de ganancia en los ecualizadores gráficos se realiza por medio de los ya nombrados faders que brindan un nivel de ganancia comprendido entre -12 y 12dB; cuando todos los faders se encuentran en la posición 0, se dice que las características de la señal son planas y con esto no se realiza ninguna modificación de la onda, pero cuando se posiciona en un nivel positivo se otorga un nivel de ganancia a la señal en determinado rango de frecuencia y por el contrario si se posiciona en un nivel negativo, la señal se atenua en dicha frecuencia.

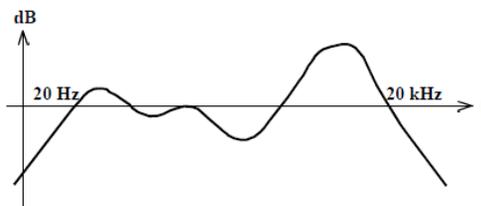
En la Fig. 6.10 y 6.11 se pueden apreciar el comportamiento de la señal de audio al realizar cambios en los faders del ecualizador gráfico.

Fig. 6.9 Posición de controles ecualizador gráfico



Fuente: [1].

Fig. 6.10 Comportamiento en frecuencia.



Fuente: [1].

6.2.2.5.3 Aplicaciones

Existen diversos usos para el ecualizador gráfico en cuanto a audio profesional, dentro de ellos se pueden destacar los siguientes:

- Corregir inconsistencias en la respuesta del altavoz.
- Ofrecer un retoque tonal a los diversos instrumentos musicales.
- Compensar las deficiencias en los sistemas de audio ya sean en salas de grabación o en sistemas de audio en vivo.
- Enfatizar o atenuar los niveles de frecuencia en las mezclas.
- Compensar una grabación deficiente.

6.3 TERMINOLOGÍA DE LA ECUALIZACIÓN

6.3.1 Roll-off

Es el método utilizado para suprimir las frecuencias que se encuentran por encima o por debajo de un determinado punto, se logra básicamente con la implementación de un filtro pasa bajo o pasa alto. Atenuando de esta forma las frecuencias que no se desean en la señal de audio.

6.3.2 Shelf

Extiende la atenuación de la frecuencia seleccionada a la frecuencia más alta o más baja disponible en el espectro de audio, consiste en un High-shelf y un low-shelf.

6.3.3 Frecuencia central

Se denomina bajo la sigla (f_0), determina el valor sobre el cual tendrá mayor acción el filtro utilizado en el proceso de ecualización. La frecuencia central se puede encontrar matemáticamente de la siguiente forma:

$$f_0 = \frac{(f_1 * f_2)}{2} \quad (6.1)$$

en donde:

f_0 : Frecuencia central.

f_1 : Frecuencia inferior.

f_2 : Frecuencia superior

6.3.4 Ancho de banda

Hace referencia al rango de frecuencias donde se desea trabajar, en algunos dispositivos de ecualización el ancho de banda se puede manipular por un potenciómetro donde un valor mínimo en el mismo representa un rango pequeño

de frecuencias al igual que un valor grande representa un rango mayor en la zona de trabajo. El ancho de banda se puede calcular de la siguiente forma:

$$BW = f2 - f1 \quad (6.2)$$

En donde:

BW: Ancho de banda.

f2: Frecuencia superior.

f1: Frecuencia inferior.

6.3.5 In/Out

Representa la conexión o desconexión del bloque de ecualización debido a que este en algunos casos puede generar ruidos o distorsiones; con este parámetro se inhibe el funcionamiento del dispositivo, para cuando un sistema de audio no requiera ser ecualizado.

6.3.6 Ganancia

La ganancia es el nivel de amplificación o atenuación que se puede brindar en cada banda de frecuencia a la señal de audio.

6.3.7 Factor de calidad Q o selectividad

Representa la pendiente que posee la curva de actuación de cada filtro, también es denominado factor de calidad, este se puede determinar por medio de:

$$Q = \frac{f_c}{BW} \quad (6.3)$$

en donde:

f_c: Frecuencia central.

BW: Ancho de banda.

Un Q bajo representa una pendiente más suave, brindando así sonidos cálidos y un sonido más natural, así como una pendiente pronunciada generada por un Q alto se utiliza para resaltar determinados tipos de bandas estrechas.

6.3.8 Pasa banda

Consiste en seleccionar un rango determinado de frecuencias donde se desea trabajar las demás son atenuadas.

6.3.9 Elimina banda

Como su nombre lo indica elimina los niveles de frecuencia comprendidas entre dos frecuencias elegidas en el ecualizador.

6.3.10 Banda

Se refiere a los niveles en los que se encuentra dividido el ecualizador con respecto al espectro de frecuencia.

6.3.11 Altura o tono

Dicho término hace referencia a la clasificación de un sonido como agudo, medio o grave, por lo tanto, una tonalidad aguda es asociada con un alto y una grave con un bajo. Generalmente la altura representa la frecuencia en la que se encuentra un sonido en la señal de audio.

6.3.12 Volumen

El volumen en ecualización y en términos de audio se refiere a la amplitud que posee la señal, entre mayor sea la amplitud, mayor será en nivel sonoro y viceversa.

6.3.13 Timbre

Si en una guitarra se produce una nota y en un piano se produjera la misma nota, se podría diferenciar cual fue producida por determinado instrumento, es decir, con esto se puede afirmar que existe una diferencia de timbre entre ambos instrumentos. Por tal razón el timbre se refiere a la capacidad de diferenciar un sonido de otro así posean igual sonoridad, altura y duración.

6.4 BANDAS PRINCIPALES DE ECUALIZACIÓN

El espectro de audio se encuentra dividido en 3 principales bandas; la primera es denominada alta frecuencia (HF), en ella están los niveles de tonalidad aguda. La segunda se denomina frecuencia media (MF), allí se encuentran las tonalidades medias, y finalmente las frecuencias bajas (LF), en donde se encuentran los tonos graves de la señal de audio. La ecualización brinda el control sobre las bandas anteriores, además de otras dos como son los tonos medios altos que se ubican entre 2kHz y 8kHz y los tonos medios bajos que están entre 125Hz y 400Hz.

6.4.1 Alta frecuencia

La banda de alta frecuencia está comprendida entre los 8kHz y 12kHz, en ella se encuentran los sonidos de gama alta del espectro audible o tonalidades agudas; las notas musicales no son existentes en este rango de frecuencia. Un ejemplo de sonidos posibles en esta banda pueden ser los producidos por los platillos de una batería.

6.4.2 Frecuencia alta media

Se encuentran comprendidas entre 2kHz y 8kHz, es el sector que posee mayor sonoridad; la claridad de las palabras se apoya en dicha banda.

6.4.3 Frecuencia media

Se localiza entre 400Hz y 2kHz, en ella se encuentran las tonalidades medias, la mayoría de los instrumentos musicales se desenvuelven en esta zona determinada de frecuencia, al igual que casi todas las voces humanas.

6.4.4 Frecuencia media baja

Comprendida entre 125 y 400Hz, corresponde a las cuerdas y las percusiones, es una banda complicada, en ella se puede brindar calidez a la mezcla, pero también existe la posibilidad de brindar opacidad si no se realiza una correcta ecualización, además pueden generarse algunos tipos de resonancias.

6.4.5 Frecuencia baja

Su banda está localizada entre los 25 y 125Hz, en este rango de frecuencia los sonidos graves son enfatizados; el sonido producido por instrumentos como bajos, contrabajos, elementos de percusión como el tom de piso y el bombo es frecuente encontrarlos en este espacio de frecuencia audible.

6.5 ECUALIZACIÓN

En audio la ecualización se emplea para conseguir un perfecto equilibrio tonal en la señal. Con esto se refiere a que los instrumentos o las diferentes señales de audio se encuentren en un rango aceptable, es decir que no sobresalgan de manera inapropiada al ser escuchadas. El proceso de ecualización difiere para todos los tipos de señales de audio; por ejemplo no es lo mismo realizar una ecualización para una pista de reggae en donde se resaltan las tonalidades bajas que para una de jazz, en la que se enfatizan los solos en un instrumento, generalmente una guitarra o un teclado.

Al realizar un tipo de ecualización como la paramétrica, se tiene un rango mayor de libertad para trabajar en la señal de audio y además una mayor precisión. La capacidad de manipular el ancho de banda en el dispositivo, ayuda a percibir de mejor el color final en la mezcla.

Las ecualizaciones dependen del gusto artístico de quien efectuó el proceso de ecualización, por esta razón no existe una forma estandarizada para producir el correcto efecto en una pista o un instrumento.

Para comenzar a ecualizar, es necesario tener conocimiento previo sobre en qué lugar del espectro de audio se encuentran los instrumentos musicales y la voz.

6.5.1 Rangos de frecuencia de los instrumentos

La tabla 6 muestra los rangos de frecuencia donde actúan los distintos instrumentos musicales, al igual que las características que se pueden brindar al realizar una determinada ecualización.

Tabla 6 Frecuencias de ecualización de instrumentos y voz humana

Instrumento	Atenuar	Amplificar	Rangos
Voz humana	2 kHz: Raspa 1 kHz: Nasal 80 Hz: Turbia	8kHz: Cálida 4-5kHz: presencia 200-400Hz: cuerpo	Plenitud: 140-440 Hz Inteligibilidad: 1-2.5kHz Presencia: 4-5 kHz Sibilancia: 6-10 kHz
piano	1-1.2 kHz: Metálico 300 Hz: Retumba	5 kHz: presencia 100 Hz: fondo	Bajos: 80-120 Hz Medios: 65-130 Hz Presencia: 2-5 kHz
Guitarra eléctrica	80Hz: Turbio	3-5 kHz: claridad, brillo 125 Hz: retumba	Rango completo: 210-240 Hz Rangos de borde: 2.5-3.5 kHz Armónicos superiores: 6.5 kHz
Guitarra acústica	2-3 kHz: Metálico 200 Hz: Retumba	2-3 kHz: claridad 5 kHz: brillante 125 Hz: cuerpo	Bajos: 80-140 Hz Completo: 220-260 Hz
Bajo eléctrico	1 kHz: Delgado 125 Hz: Retumba	600 Hz: gruñido 80 Hz: fondo	Bajos: 60-80 Hz Ataque: 700-1200 Hz
Bajo acústico	600 Hz: Hueco 200 Hz: Retumba	2-5 kHz: pegada 125 kHz: fondo	
Caja	1 kHz: Molesto	2 kHz: crujiente 150-200 Hz: cuerpo 80 Hz: profundidad	Bajos: 120-160 Hz Grosor: 220-240 Hz Crispación: 4-5 kHz
Bombo	300-600 Hz: Blando, acartonado 80 Hz Retumba	2-5 kHz: pegada, chasquido 60-125 Hz: fondo	Bajos: 60-80 Hz
Toms	300 Hz: Retumba	2-5 kHz: pesada, ataque 80-200 Hz: fondo	Rango completo: 80-240 Hz
Platillos	240 Hz: Tristeza, gong 1 kHz: Molesto	5 kHz: brillantez, viveza	
Metales y cuerdas	3 kHz: Raspa 1 kHz: Blando 120 Hz: Turbio	8-12 kHz: cálido 2 kHz: claridad	
Maderas		150-320 Hz: cuerpo	Graves: 400-440 Hz Flauta: 250- 2100 Hz Clarinete: 800-3000 Hz

Fuente: [22]

Para crear una perfecta ecualización de instrumentos en la mezcla, es necesario escuchar con perfecta atención cada uno de ellos, de lo contrario la interferencia entre los instrumentos generaría una ecualización con demasiadas impurezas y con un sonido caótico.

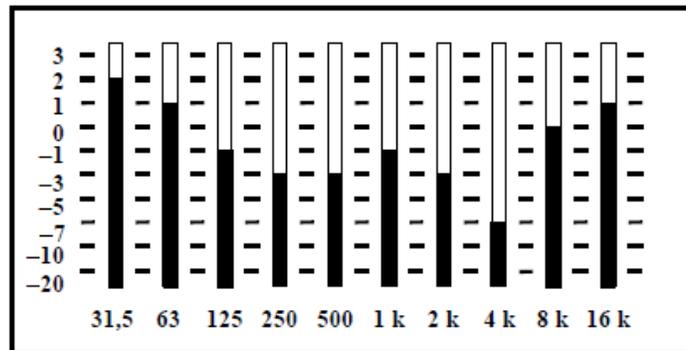
En el proceso de ecualización es preferible efectuar una atenuación en el sonido en vez de un realce, ya que al exceder en nivel de enfatización se puede llegar a distorsionar la señal.

Existe un dispositivo utilizado para realizar un ajuste objetivo de la señal de audio, este se presenta a continuación.

6.5.2 Analizador de espectros (6.12)

En los sistemas de audio el analizador de espectros en tiempo real (RTA), es un instrumento utilizado para captar los niveles de frecuencia presentes en la señal sonora en tiempo real. El RTA proporciona un gráfico de barras separado en octavas o tercios de ellas en donde se representa el espectro de un sonido en cada instante.

Fig. 6.11 Pantalla RTA



Fuente: [1]

6.5.3 Ecuación de interiores

Las posibilidades existentes en la variación de sonido en un recinto pueden ser excesivas, debido a que cualquier objeto presente en la habitación genera una variación u obstaculización en el recorrido de la onda. Desde muebles, cortinas, tapicería, etc. Todos ellos crean en el entorno un efecto negativo en la reproducción del sonido.

El efecto negativo generado por los objetos, se produce por la refracción de las ondas cuando estas alcanzan determinado obstáculo, por lo tanto la señal sonora puede llegar al oído con algunas alteraciones, como picos que enfatizan el espectro u otros fenómenos similares. En estos casos la ecualización se utiliza para modificar la señal de tal manera que está presente características planas al llegar al oído, sin necesidad de llegar a modificar la sala donde se trabaje.

El efecto que debe crear el ecualizador es un comportamiento inverso al que presenta la sala; esto quiere decir si se encuentran frecuencias enfatizadas proceder con su atenuación y si se encuentran atenuadas enfatizarlas. La ecualización varía dependiendo de donde se encuentre el usuario en la sala, por lo tanto el oyente debe mantener un sitio fijo en donde percibir el sonido, si no tendrían que realizarse diferentes tipos de ecualizaciones para determinado lugar en donde se encuentre el oyente.

6.5.4 Ecuación en sistemas de megafonía

Muchas veces al aumentar el volumen en un sistema de audio, se puede generar un pitido estridente; dicho fenómeno se produce cuando el micrófono vuelve a captar el sonido emitido por el sistema de amplificación. La alteración en la señal es denominada efecto Larsen y puede ocasionar que la claridad en la señal a la salida del sistema se torne confusa.

Ante la problemática producida por el efecto Larsen se pueden encontrar soluciones sencillas, como la utilización de micrófonos que posean características de recepción unidireccional, así, de esta forma la señal emitida no será captada por los altavoces con tanta facilidad. Otra solución es mover los sistemas de amplificación de tal manera que el micrófono no realimente el sonido.

Otra forma de evitar el efecto Larsen en un recinto cerrado es, probar el sonido en la habitación vacía, llevarlo al punto en que empieza a producirse el fenómeno y dejarlo ajustado en este nivel. Con ello, cuando el lugar se encuentre habitado no existirá ninguna alteración en la onda ya que las personas se encargan de absorber parte del volumen del sonido.

Finalmente para mejorar la calidad del sonido en el sistema se debe trabajar con un ecualizador que resalte las frecuencias que capta el oído de una forma plana.

6.6 DISEÑO DE ECUALIZADOR

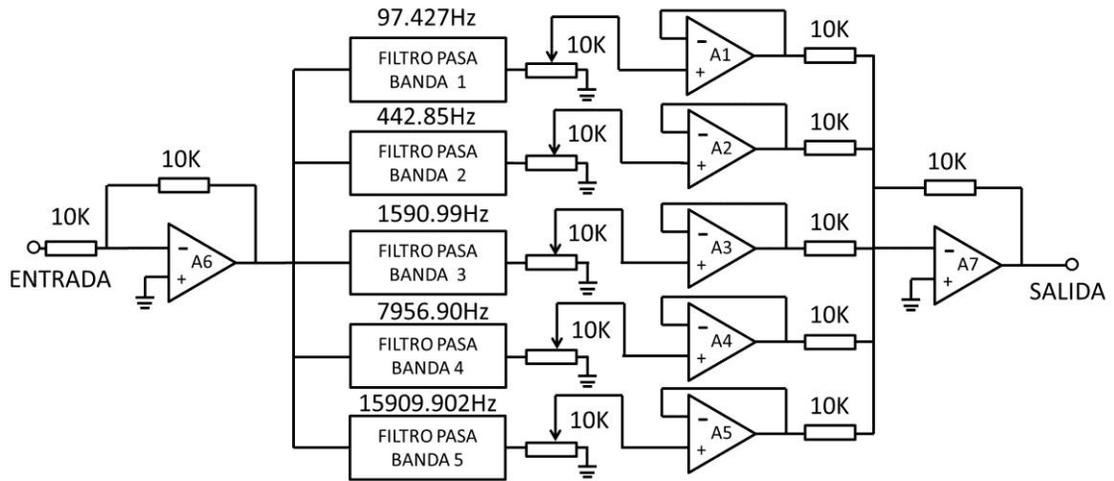
Un ecualizador de audio se puede construir fácilmente por medio de filtros pasa banda, con ellos se logra dividir el espectro de frecuencia en distintas zonas, donde cada una de ellas debe ser equilibrada para que los filtros tengan un campo similar de acción pero a distintas frecuencias. Los valores de resistencia y condensadores de cada una de las redes pasa banda mostradas en la Fig. 6.13, se pueden calcular de la forma indicada en el capítulo 2 del libro.

La salida de cada filtro pasa banda se encuentra vinculada a un amplificador seguidor de voltaje, la razón de su adición al circuito, es la de generar un aislamiento entre la señal de entrada y la de salida.

La red de la Fig. 6.13 contiene dos etapas en las cuales los amplificadores operacionales se encuentran configurados como circuitos sumadores o mezcladores de audio (A6 y A7). El AO A7 se encarga de agrupar la salida en forma de una señal compuesta.

Todo el circuito que compone el ecualizador tiene una ganancia unitaria, esto representa que la señal de entrada no va a tener ningún tipo de aumento excepto a él producido por la enfatización o atenuación de sus bandas durante su paso por el dispositivo de audio.

Fig. 6.12 Ecuador de 5 bandas



Fuente: [23]

6.7 RESUMEN DEL CAPÍTULO

- En los sistemas de audio los ecualizadores permiten aumentar o atenuar la ganancia entre frecuencias, modificando la linealidad de respuesta en las etapas de sonido.
- Por medio de la ecualización, se puede llegar a resaltar determinado instrumento en una pista, o brindarle un color de sonido diferente.
- La construcción de ecualizadores se encuentra basado en los filtros electrónicos, siendo el más utilizado de ellos el filtro pasa banda.
- El ecualizador Shelving es el más sencillo en cuanto a clases de ecualizadores. Con él se tiene control sobre frecuencias bajas (graves) y altas (agudos) pero ninguno sobre tonalidades medias.
- Los ecualizadores paramétricos, son uno de los más utilizados en los estudios de grabación. En ellos se pueden modificar tres parámetros diferentes: frecuencia central, ganancia y finalmente el ancho de banda. Lo anterior permite posicionar al usuario en cualquier punto de la señal de audio.
- Los ecualizadores gráficos, son equipos divididos en un determinado número de bandas de frecuencia, sobre las cuales se puede efectuar una atenuación o enfatización. La modificación de la señal se efectúa por medio de elementos denominados faders, situados en el panel frontal del dispositivo donde cada uno de ellos se encarga de un nivel de frecuencia determinado.
- El espectro de audio se divide en 5 bandas principales de frecuencia, donde se desenvuelven los ecualizadores, ellas son: agudos, medios, bajos, medios agudos y medios bajos.

- la ecualización se emplea para conseguir un perfecto equilibrio tonal en la señal. lo anterior se refiere a situar las señales de los instrumentos en niveles aceptables, para evitar que la pista se torne difusa.
- Para efectuar una correcta ecualización se debe tener un determinado conocimiento acerca del sonido de los instrumentos, además contar con un buen analizador de espectros en tiempo real, donde se pueda obtener una representación gráfica de la señal de audio.
- En la ecualización, no existe una regla general que indique como efectuar la modificación de la onda sonora. Todo depende de las características que el usuario desee brindar a la señal.

6.8 PREGUNTAS Y EJERCICIOS

1. ¿Qué es un ecualizador y como se conforma electrónicamente?
2. ¿Qué aportes trae la ecualización en el procesamiento de audio?
3. Nombre y describa brevemente 4 clases de ecualizadores.
4. Dé ejemplos de instrumentos musicales que actúen en las distintas bandas del espectro de audio.
5. ¿Qué es el efecto Larsen y cómo se reduce por medio de la ecualización, si es producido en una habitación?

6.9 BIBLIOGRAFÍA

MIYARA, Federico. Acústica y sistemas de sonido. 3 ed. UNR editora. Rosario, 2006.

DE OYARBIDE, Mario. ABC sobre ecualizadores y filtros, 2005, disponible en: <http://www.cetear.com/?p=estaticas|descargas>

DELBONO, Darío. Consideraciones generales sobre ecualización, reverberancia y paneo, disponible en: <http://www.cetear.com/?p=estaticas|descargas>

RIAMBAU, Lluís. Ecualizadores y ecualización, disponible en: www.armmeditores.com/mp%20audio/P151_SONAR.pdf

DE LOREDO, Leandro. Procesadores: ecualizador, disponible en: <http://www.sonidoanda.com.ar/principal.htm>

Manual de sonido, 11 la ecualización, disponible en: <http://www.estudiomarhea.net/manualc11.htm>

Ecualizador de audio, disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos29/ecualizador-audio/ecualizadoraudio.shtml>

Guía de efectos: la ecualización. Tablas para ecualizar, disponible en: <http://electrofante.com/musicadigital/ecualizacion.html>

Teoría del sonido: ecualización, disponible en:

<http://www.djlogic.es/archives/tag/ecualizadores-semiparametricos>

CAPÍTULO 7 REDUCCIÓN DE RUIDO

7.1 INTRODUCCIÓN

Para un grupo de personas que se encuentra escuchando una canción a altas horas de la noche esta puede ser agradable, pero para aquellas que se encuentran intentando descansar puede ser un sonido molesto, es por esta razón que el ruido se define como todo sonido molesto para el oído.

Existen dos tipos de ruidos que pueden llegar a afectar los sistemas de audio uno es el ruido acústico y el otro el ruido eléctrico.

El ruido acústico es el ocasionado por la alteración de partículas de aire, un claro ejemplo de este puede darse cuando un músico callejero toca su guitarra y canta en un lugar donde transitan muchos automóviles, el sonido de los vehículos nubla la claridad del instrumento y la voz haciendo difícil su difusión hacia los oyentes. En los sistemas de audio el ruido acústico externo se puede evitar por medio de salas acústicas perfectamente adecuadas para reducir todo tipo de interferencias externas y evitar alteraciones durante la grabación.

Por otra parte se encuentra el ruido eléctrico que puede ocasionarse por una mala puesta a tierra en los circuitos, desacoples en las líneas de transmisión de la señal, malas conexiones en el cableado, entre otros. El ruido eléctrico se puede reducir mas no eliminar completamente y para esto se han desarrollado diversos sistemas que logran llevar el ruido a niveles que no sean molestos o notorios a la hora de la reproducción.

La eliminación de ruidos ya sea por medio de sistemas de reducción de ruido o por aislamientos es muy importante, no solo para tener una señal clara sino para evitar que el ruido excesivo cause problemas en la salud del oyente, como pérdidas temporales o totales de la audición.

El presente capítulo pretende exponer las diversas formas de reducción de ruido como son el método de preénfasis variable, sistemas Dolby, DBX, entre otros existentes en el medio; mostrando de manera detallada el funcionamiento y las bandas de operación de algunos de los más representativos.

7.2 RUIDO

En casi todas las etapas de procesamiento de audio, se introducen interferencias en la señal. La mayoría de procesos de grabación, reproducción, transmisión y recepción son propensos a esta problemática debido a que en el transcurso de

estos puede existir un agente externo o una mala conexión en el sistema que llegue a alterar la señal.

El ruido puede presentarse en varias formas: continuas, discontinuas, aleatorias, irritantes, oclusivas entre otras. Cada uno de los ruidos nombrados anteriormente tiene su técnica de reducción pero antes de eliminarlo es mejor analizar de una manera adecuada si este distrae o no al oyente.

7.2.1 Clasificación

El ruido se puede clasificar según su naturaleza física de la siguiente forma:

- Ruido acústico: es el producido por vibraciones o fuentes que se encuentran en movimiento, por ejemplo el ruido producido por la turbina de un avión.
- Ruido electromagnético: esta clase de ruido es producida por cualquier dispositivo eléctrico.
- Ruido electroestático: es el generado por medio de un nivel de tensión, es muy común escucharlo cuando se enciende una luz fluorescente.
- Distorsión de canales: se presenta como una mezcla convolucional entre el ruido y la señal original de audio, puede ocasionar efectos de reverberación.

Según las características de frecuencia el ruido se puede clasificar en:

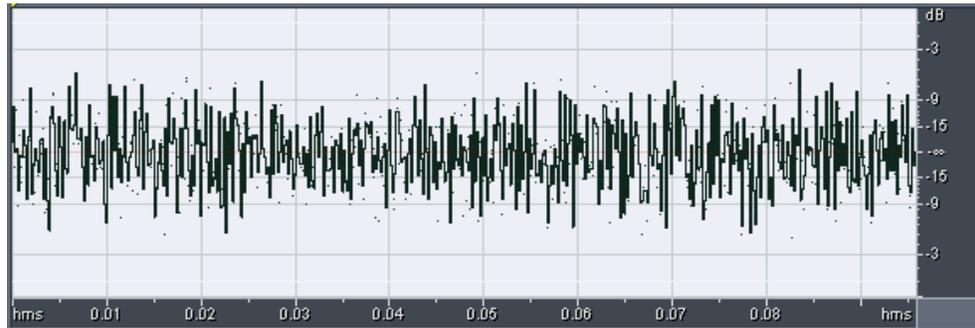
- Ruido de banda ancha: este tipo de ruido presenta todas sus componentes dentro de un amplio rango de frecuencias.
- Ruido de banda estrecha: es un tipo de ruido para el cual su frecuencia central es mayor a su ancho de banda; su espectro se encuentra concentrado en frecuencias bastante definidas y su aspecto temporal es repetitivo.

Dentro de los nombrados anteriormente se pueden encontrar:

7.2.1.1 Ruido blanco (Fig. 7.1)

El ruido blanco se identifica como una señal aleatoria que contiene igual densidad espectral de potencia a lo largo de toda la banda de frecuencias. Si este es visto mediante un analizador por filtros de octava presentara un aumento de tres decibeles por octava. Normalmente el ruido blanco suele usarse como una señal de prueba. Un ejemplo donde se presenta el ruido blanco se observa cuando se pone a reproducir un radio sin tener ninguna emisora sintonizada.

Fig. 7.1 Ruido Blanco

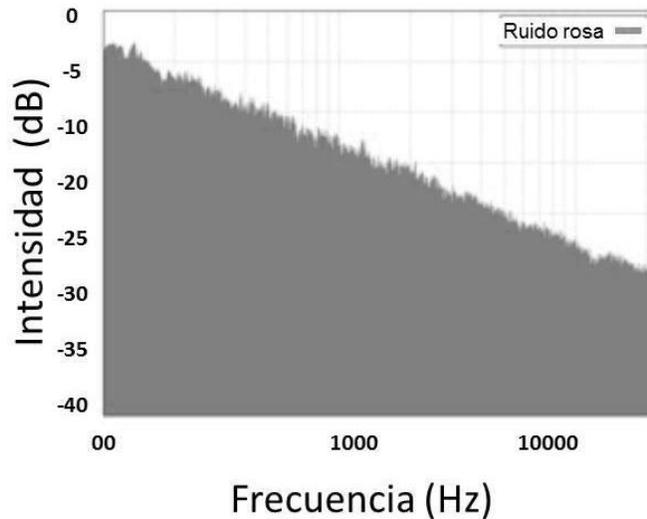


Fuente: [24]

7.2.1.2 Ruido Rosa (Fig. 7.2)

Este tipo de ruido, se caracteriza por tener un descenso sonoro de 3dB por octava pero cuando se observa en un analizador con filtros de octava presenta la misma intensidad en decibeles para todo el espectro de frecuencia. Su nombre se debe a que es una señal intermedia entre el ruido rojo y el ruido blanco, Es muy utilizado para probar el comportamiento o respuesta de los altavoces.

Fig. 7.2 Ruido rosa



Fuente: [25]

7.2.1.3 Ruido rojo

El ruido rojo es un ruido poco común compuesto principalmente por frecuencias graves y medias; dicho ruido se obtiene a partir del blanco y su contenido en

frecuencia posee una pendiente de -3dB visto en un analizador por filtros de tercios de octava.

7.2.1.4 Ruido impulsivo

Es un tipo de ruido síncrono o asíncrono de ocurrencia aleatoria en el que el valor de su amplitud o intensidad aumenta de forma repentina durante un instante de tiempo. La duración del aumento generado es menor comparado con el tiempo en que se vuela a producir otra alteración similar.

7.2.1.5 Hiss

Conocido normalmente como soplido, su comportamiento es de tipo aleatorio durante todo el rango de frecuencias. Por lo general se produce cuando la señal pasa por consolas de efectos, procesadores y otros dispositivos encargados del procesamiento de la señal de audio.

7.2.1.6 Hum

Su comportamiento presenta una frecuencia fundamental y un grupo de armónicos los cuales son múltiplos enteros de la misma, es prácticamente un tipo de ruido periódico y depende de la frecuencia a la cual trabaja el sistema eléctrico, ya sea 50 o 60 Hz. El hum se hace presente cuando existen defectos de conexión en los dispositivos de audio, es denominado generalmente como ruido de línea.

7.2.1.7 Glitches: clics y pops

Son ruidos de tipo impulsivo que se introducen a la señal por problemas de conversión analógica digital o en procesos de compresión entre otros casos presentes en el tratamiento de señales de audio. Los clics son de tipo discontinuo, capaces de generar cambios bruscos en la forma de la onda y suelen presentarse por problemas de sincronismo entre los dispositivos conectados o al realizar cortes en las pistas de audio. Los pops se producen frecuentemente debido a la proximidad existente entre el cantante y el micrófono aunque también pueden provenir de otras fuentes.

7.3 ENMASCARAMIENTO

La mayoría de sistemas de reducción de ruido se encuentran basados en este principio. Dentro del enmascaramiento de la señal encontramos dos formas: espectral y temporal. La primera denominada espectral, sucede cuando un sonido fuerte se origina al mismo tiempo que uno débil, lo que ocasiona que este último se torne inaudible. Este fenómeno no es el mismo para todas las frecuencias, se produce de forma más eficiente si una frecuencia baja enmascara una alta. La

segunda de tipo temporal, depende prácticamente de la duración del nivel del espectro de las señales, sucede cuando dos sonidos llegan al oído de forma cercana en el tiempo. Existen dos posibilidades:

- Postenmascaramiento: ocurre cuando la señal de mayor amplitud aparece primero en el tiempo, instantáneamente después lo hace la de menor amplitud, de esta forma solo se puede percibir el primer estímulo. El tiempo de retraso entre las señales debe encontrarse entre 30 y 60 ms aproximadamente.
- Preenmascaramiento: el estímulo suave es emitido primero y luego el fuerte, este último enmascarará al de menor amplitud siempre y cuando entre ellos exista una diferencia de tiempo de entre 5 y 10 ms. Dado que el sonido enmascarante se presenta luego que el enmascarado implica que el proceso sea más problemático.

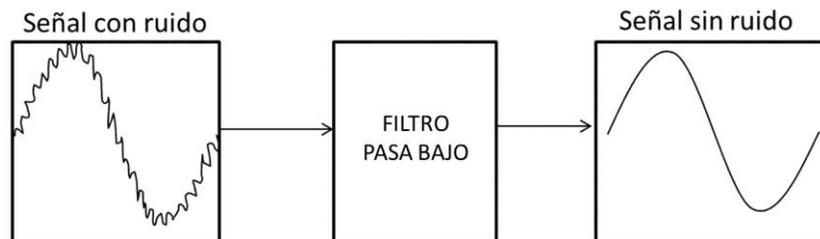
7.4 SISTEMAS DE REDUCCIÓN DE RUIDO

Los sistemas de reducción de ruido se basan en el enmascaramiento producido por las señales de audio y en el procesamiento de la dinámica de la señal. A continuación se presentan algunos de los sistemas más comunes para este fin.

7.4.1 Filtrado (Fig. 7.3)

El filtrado es uno de los eslabones fundamentales para los sistemas de reducción de ruido. El proceso comienza cuando la señal con ruido pasa por determinado filtro, en él se produce la atenuación de las componentes en frecuencia que conforman el ruido, dejando la señal útil intacta. La señal de audio al poseer una mayor amplitud tiende a enmascarar el ruido haciéndolo imperceptible para el oído y de esta forma se logra su eliminación.

Fig. 7.3 Filtrado

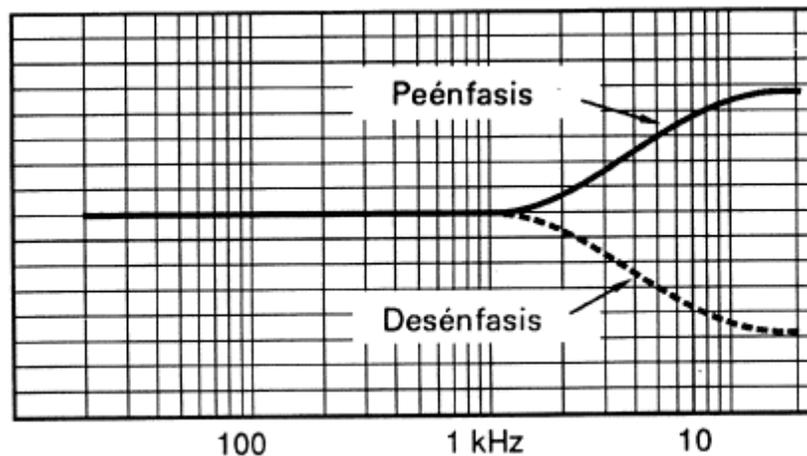


7.4.2 Preénfasis variable (Fig. 7.4)

El preénfasis consiste en una amplificación de la señal durante la grabación y el desénfasis a una reducción durante la reproducción. Es un método muy sencillo

para la reducción del ruido, su funcionamiento se basa en conseguir aplicar un nivel de ganancia que aumente el nivel de la señal útil, de esta forma si en el transcurso de la grabación se introduce un ruido como el hiss, no habrá ningún problema ya que en el momento de la reproducción se efectúa una reducción de la señal a su nivel original en conjunto del ruido logrando un enmascaramiento por parte de la señal de audio.

Fig. 7.4 Acción de preénfasis y desénfasis



Fuente: [4]

A este tipo de proceso también se le llama compasión, o sea que existe un momento en que el rango dinámico es reducido mediante procesos de compresión y luego es llevado a su nivel original por métodos de expansión.

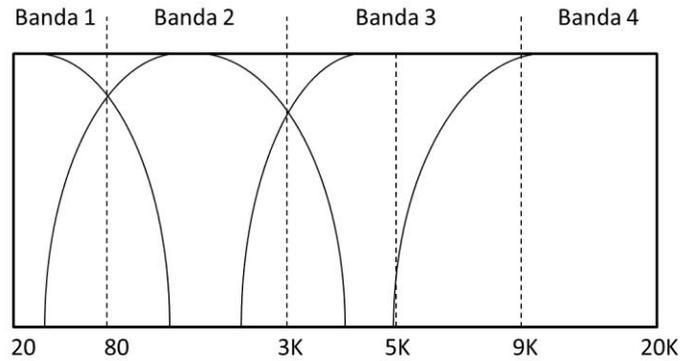
7.4.3 Dolby A

Dolby A fue la primera tecnología desarrollada por los laboratorios dolby, para la reducción de ruido profesional en el año 1965; el proceso se encuentra dividido en 4 bandas de frecuencia, donde en cada una de ellas se logra una reducción del ruido en aproximadamente 10dB, luego de los 9kHz se generan atenuaciones mayores cercanas a los 15dB. Lo anterior quiere decir que la reducción del ruido a frecuencias altas es mayor para este tipo de sistemas.

Las bandas que componen el sistema Dolby A se encuentran distribuidas de la siguiente forma: la primera banda trabaja de 30 a 80Hz y es conformada por una red pasa bajo, la segunda es una red pasa banda de 80 a 3kHz, la tercera y la cuarta son dos redes pasa alto de 3kHz a 9kHz y de 9 kHz a 15kHz respectivamente. Todas las bandas anteriores menos la tercera poseen una pendiente de 12dB/octava, mientras que la segunda tiene una respuesta

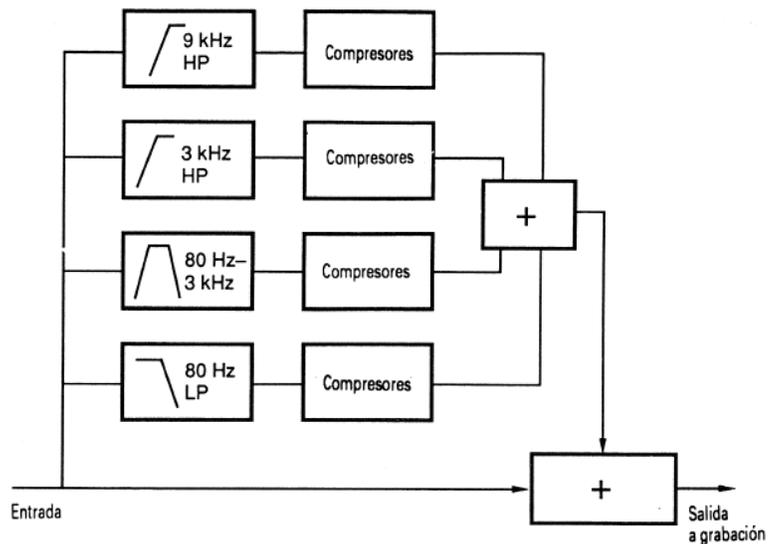
complementaria en frecuencia sobre la primera y la tercera. La distribución de los filtros en frecuencia Dolby A se pueden observar en la Fig. 7.5 al igual que su diagrama de bloques (Fig. 7.6)

Fig. 7.5 Bandas de actuación de los filtros en el Dolby A



Fuente: [26]

Fig. 7.6 Diagrama de bloques sistema Dolby A



Fuente: [4]

Las diversos tipos de ruido son eliminadas por el sistema Dolby A de la siguiente manera:

- El zumbido de baja frecuencia y ronquido que son ruidos propios de las partes mecánicas de los equipos son eliminados en la primera banda.

- La segunda banda cubre las frecuencias medias y se encarga de atenuar efectos como la diafonía, el eco producido por bobinas magnéticas, entre otros.
- La tercera y cuarta banda atenúan el ruido generado por la cinta de grabación en los sistemas de audio.

Una característica representativa de Dolby A es que el sistema actúa solamente para niveles de señal que se encuentren por debajo de un nivel pre ajustable, otra de ellas es lograr una reducción de ruidos sin llegar a alterar la dinámica de la señal original.

7.4.4 Dolby B

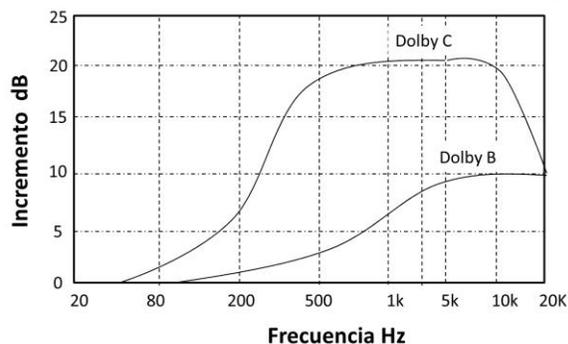
Es una simplificación del sistema A, solo opera en una banda de frecuencia. Su funcionamiento está basado en la técnica de preénfasis variable, logrando atenuaciones del ruido cercanas a 3dB a los 600Hz y aumentando gradualmente hasta un máximo de 10dB en frecuencias cercanas a 5kHz.

El sistema dolby B contiene una banda de tipo deslizable que consiste en un filtro paramétrico que puede variar su frecuencia de corte hacia arriba o hacia abajo, sobre ella tienen acción los procesos de compresión y expansión, las frecuencias que se encuentran por encima de este proceso varían con la naturaleza de la señal. El sistema ocupa un rango de reducción de ruido que va desde los 300Hz hasta los 20kHz.

7.4.5 Dolby C

Es una mejora del sistema Dolby B, actúa sobre una frecuencia menor o igual a 100Hz, brindando desde 15dB de reducción de ruido a 400Hz hasta 20dB de atenuación entre 2kHz y 10kHz.

Fig. 7.7 Comportamiento en frecuencia Dolby B y C



Fuente: [27]

Dolby C incorpora dos bandas deslizantes de compresión expansión, que trabajan en el mismo rango de frecuencias, pero cada una responde a distintos niveles de señal. Una se encarga de trabajar los niveles comprendidos entre -30dB y -10dB y la otra los valores comprendidos entre -50dB y -30dB. Las bandas deslizables trabajando individualmente generan atenuaciones de 10dB pero al trabajar en conjunto se obtiene la atenuación total de 20dB. En la Fig. 7.7 se puede observar la comparación de las respuestas presentes en los sistemas Dolby B y C.

7.4.6 Dolby SR

Dolby SR es un sistema bastante costoso utilizado solamente en los sistemas de grabación profesional, consiste en 3 etapas que manejan las altas frecuencias y 2 que se ocupan de las bajas, cada etapa dispone de una banda fija y otra banda variable empleando así un total de 10 filtros con pendiente suave, con ellos se logra trabajar en cualquier lugar de la señal donde se encuentre el ruido, sin llegar a generar alteraciones en las frecuencias contiguas por más cercanas que esta sean.

El sistema contiene las ventajas de poseer compresores/expansores de banda fija como se utiliza en Dolby A y de deslizamiento de banda como los utilizados en Dolby B y C, al tener ambos tipos de filtros en cada una de sus cinco etapas se generan reducciones de ruido cercanas a los 25dB.

7.4.7 Dolby S

El sistema Dolby S es una versión simplificada de Dolby SR, con el cual se obtienen reducciones de ruido de 10dB a baja frecuencia y de 24dB a alta frecuencia, mostrando una notable ventaja en comparación con los sistemas B o C, esto es logrado mediante una mejor implementación de los filtros que constituyen el dispositivo y su forma de interacción.

Dolby S utiliza dos bandas deslizables de compresión expansión en alta frecuencia y además un procesador de banda fija separado también para alta frecuencia lo que se denomina acción por sustitución, que es muy útil a la hora de eliminar ruidos de tipo 'pumping' que se produce cuando las señales de alto nivel alteran el procesamiento de las de bajo nivel.

Para baja frecuencia Dolby S utiliza una banda fija que produce atenuaciones de 10dB por debajo de los 200Hz lo que ayuda a crear un mejor balance tonal a la hora de reproducir la señal de audio.

7.4.8 DBX

Este sistema emplea un compresor encargado de variar la ganancia según el nivel de señal presente en la entrada, lo anterior se hace por medio de un amplificador controlado por tensión. Si el procesamiento de las señales de bajo nivel se hace demasiado rápido pueden ocasionarse algunas distorsiones.

El sistema DBX ofrece una relación de compresión de 2:1 a un rango dinámico de 30dB. Al ser comprimida la señal pasa por el proceso de grabación, donde se mezcla con el ruido. Sin embargo, el ruido de estar ahora 30dB por debajo de los pasajes más suaves de la música. Durante la reproducción, la señal se expande en una cantidad equivalente logrando así una reducción de ruido de 30dB.

El principal problema en los sistemas DBX se debe a que si la grabación fue realizada con DBX, la reproducción del material debe realizarse por medio de un equipo que incorpore un decodificador DBX de lo contrario el sonido será muy malo.

Existen 2 tipos de DBX, uno es utilizado para aplicaciones profesionales y el otro para equipos domésticos. Los sistemas operan en todo el espectro de señal audible es decir de 20 a 20kHz.

7.4.9 DLN

Se trata de un filtro conmutable de forma automática que se encarga de enmascarar el ruido de siseo. No posee ningún tipo de atenuaciones a baja frecuencia y por tal motivo estas frecuencias son mostradas en todo su esplendor a la salida del sistema; para alta frecuencia el filtro permite el paso de señal según el nivel que posea. Lo anterior quiere decir que permite solo el paso de frecuencias cuando el nivel sonoro sea lo suficientemente alto para enmascarar el ruido.

7.4.10 Telcom C4

Diseñado por la empresa Telefunken, surge más tarde que los sistemas dolby y DBX. Se encuentra basado en ellos mismos y su operación divide el espectro en cuatro bandas por medio de un filtro pasa alto, un pasa bajo y dos pasa banda distribuidos a la entrada del procesador. Cada banda posee su propio compresor/expansor con un radio de compresión bajo (1:1,5) y un umbral muy bajo, con estas características se pueden lograr 25dB de mejora en la relación señal a ruido y además un nivel de compresión constante para todo el rango dinámico de la señal de entrada.

El sistema aprovecha la división del espectro en bandas para ayudar a enmascarar el ruido. Las bandas utilizadas en Telcom C4 se distribuyen de la siguiente manera, de 30 a 215 Hz, 215 a 1450 Hz, 1,45 a 4,8 kHz y 4,8 a 20 kHz.

La compañía desarrolladora de Telcom también dispone de otro dispositivo denominado hi-com, el cual posee un precio menor y técnicamente se ocupa de los equipos domésticos y de estudio.

7.5 DISMINUCIÓN RUIDOS ELÉCTRICOS

La mayoría de los ruidos eléctricos se producen por medio de interferencias en las líneas de transmisión encargadas de unir los equipos de audio a otras etapas, estas se pueden llegar a eliminar por medio de blindajes, organización de puesta a tierra, entre otras que se presentan a continuación.

7.5.1 Blindaje

Desarrollado principalmente para evitar la interferencia entre los cables de transmisión, también es llamado apantallamiento, suele ser una maya de metal o una película plástica metalizada sumamente flexible, que debe estar perfectamente aterrizada y cubre todo el conductor, el sistema funciona como una jaula de Faraday que evita el acople de ruidos, además puede contener varias mayas para evitar problemas de diafonía.

La efectividad del sistema de blindaje decae cuando se aumenta la frecuencia. Para eliminar la mayoría de problemas producidos por el ruido eléctrico deben ser colocados a más de metro y medio de cables de alta tensión o de alta potencia y cuando sea necesario el cruce entre ellos este se debe realizar a 90° para evitar cualquier inducción.

Para la selección de este tipo de cables enfocados al aislamiento y reducción de interferencia en el conductor, es necesario comparar sus características en frecuencia, las cuales son facilitadas por cada uno de los fabricantes.

7.5.1.1 Blindaje trenzado (Fig. 7.8 a)

Consiste en un grupo de alambres de aluminio o de cobre estañado, trenzados o acomodados en dirección de las manecillas del reloj. Es muy utilizado para evitar las interferencias de baja frecuencia. Brindan una muy buena protección contra acoples producidos por conducción y en menor extensión contra los producidos por acoples capacitivos e inductivos.

7.5.1.2 Blindaje en espiral (Fig. 7.8 b)

Consiste en un alambre distribuido uniformemente generando una forma de espiral que recubre todo el sistema de aislamiento del conductor interno, posee mayor cobertura y flexibilidad que el blindaje trenzado. El blindaje en espiral evita el acople capacitivo y por conducción en el rango de las audiofrecuencias. Para frecuencias mayores a 20 kHz se producen efectos inductivos en el blindaje.

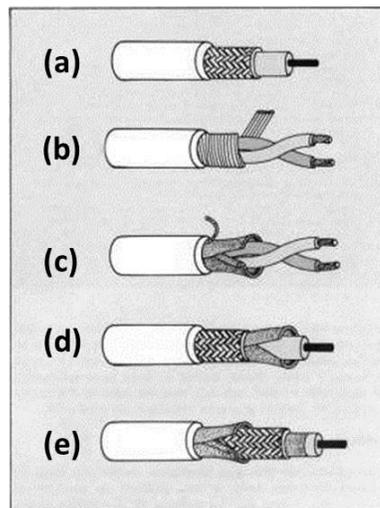
7.5.1.3 Blindajes laminados (Fig. 7.8 c y d)

Consisten en una capa de aluminio en conjunto con una de poliéster que envuelven a los conductores, brindan una protección electrostática excelente, su principal desventaja es su alta resistencia en corriente continua.

7.5.1.4 Blindajes combinados (Fig. 7.8 e)

Consiste en la combinación del blindaje trenzado y el laminado, así brindan una máxima efectividad en todo el espectro de frecuencia.

Fig. 7.8 Tipos de blindajes en cables



Fuente: [28]

7.5.2 Puesta a tierra

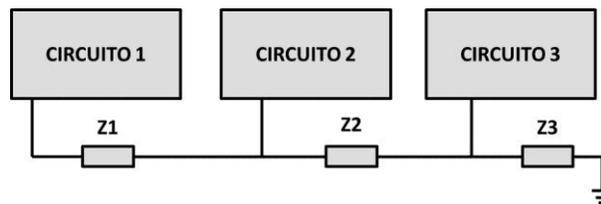
7.5.2.1 Masa centralizada (Conexión en serie)

Los dispositivos electrónicos pueden estar conformados de diversos tipos de sistemas y subsistemas, cada uno de ellos debe contar con un punto de masa propio, en el equipo completo todos los puntos de masa deben estar conectados

entre sí, para evitar que se introduzcan impedancias en los conductores de interconexión de las masas.

La conexión en serie es muy común en los sistemas eléctricos debido a su simplicidad, es la más sencilla de las distribuciones pero presenta algunos problemas de acoplamiento por la existencia de impedancias comunes en las líneas de masa. En la Fig. 7.9 se puede observar la configuración de este tipo de conexión.

Fig. 7.9 Conexión de masas en serie



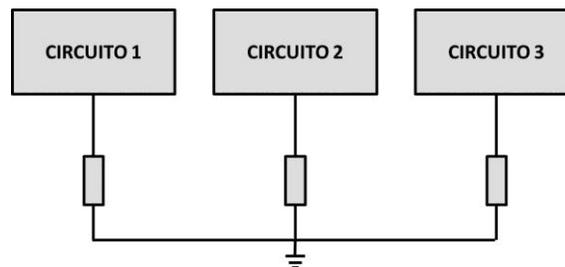
Fuente: [28]

La conexión centralizada en serie se realiza conectando cada masa a una línea de un subconjunto siguiente. Debe evitarse en lo posible, en especial cuando se tienen subsistemas que trabajen a muy altas velocidades, también en el caso de circuitos que trabajen niveles de energía diferente, debido a que el alto contenido energético puede acoplarse a los circuitos de mando.

7.5.2.2 Masa centralizada (Conexión en paralelo) (Fig. 7.10)

Consiste en la interconexión de todas las masas en un mismo punto, con ello se logra eliminar la generación de impedancias comunes en las líneas. Trabajando a baja frecuencia, es el mejor método de conexión debido a que las impedancias tienen un comportamiento netamente resistivo.

Fig. 7.10 Conexión de masas en paralelo



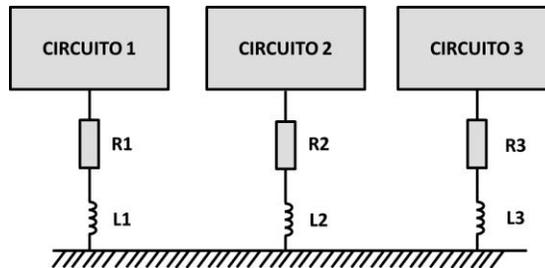
Fuente: [28]

En altas frecuencias, si la longitud del conector de masa supera $1/20$ la máxima longitud de onda de trabajo, pueden presentarse acoples capacitivos e inductivos.

7.5.2.3 Masa distribuida (Fig. 7.11)

La conexión de las masas distribuidas se realiza de forma multipunto; es básicamente la combinación de los dos anteriores. Por medio de este método se logra reducir la impedancia en las líneas individuales. En altas frecuencias las conexiones en los circuitos no deben sobrepasar los 2cm y además debe existir una alta proximidad entre los circuitos y el plano de masa para garantizar un apantallamiento electroestático.

Fig. 7.11 Masa distribuida



Fuente: [28]

7.5.2.3 Masas híbridas

Son aquellas que poseen un comportamiento diferente a determinadas frecuencias; en bajas frecuencias el sistema actúa en forma de punto único y en altas multipunto, son útiles para conectar a masa las pantallas de los cables blindados.

7.6 RESUMEN DEL CAPÍTULO

- El ruido es una especie de sonido que causa interferencia sobre otro, es decir nubla la claridad del mensaje presente en la señal de audio. Lo que es ruido para una persona puede no serlo para otra.
- Los altos niveles de ruido muchas veces ocasionan problemas en la audición del ser humano y en algunos casos crónicos, se puede perder el completo nivel de escucha.
- Muchos ruidos pueden ser interferencias que se filtran en el micrófono mediante la grabación del instrumento o la voz, otros se deben a desacoples entre las etapas de los sistemas de audio o malas organizaciones de puesta a tierra entre los equipos del sistema.
- Los ruidos pueden ser de tipo acústico o electromagnético. El ruido acústico se ocasiona por vibraciones en el aire captadas por el micrófono, ajenas a

la señal de audio y el electromagnético se origina por la variación de las propiedades de los elementos eléctricos.

- Entre los ruidos eléctricos es probable, encontrar gran variedad de ellos; como son: ruido blanco, ruido rosa, ruido coloreado, hum, clics, pop, entre otros.
- El enmascaramiento es un fenómeno que sucede cuando un sonido fuerte es originado al mismo tiempo que uno débil. De esta forma el débil se vuelve imperceptible para nuestro oído. La mayoría de sistemas de reducción de ruido se basan en este principio.
- Los sistemas de reducción de ruido se utilizan técnicamente como su nombre lo indica, para atenuar esas componentes que se han entrometido en la señal útil de audio, de forma que estas no sean percibidas por nuestro oído.
- El filtrado simple, se puede utilizar para efectuar atenuaciones de ruido siempre y cuando se sepa el tipo de esta.
- El preénfasis es el principio sobre el cual trabajan la mayoría de sistemas de reducción de ruido. En esta etapa se produce una amplificación de la señal. El desénfasis se encarga de reducirla a su tamaño original. La unión de ambos procesos es denominado compansión.
- Entre los dispositivos más importantes de reducción de ruido se encuentran los sistemas: Dolby A, Dolby B, Dolby C, Dolby S, Dolby SR, DBX, Telcom C4, entre otros.
- La disminución de ruidos eléctricos puede efectuarse por medio de la utilización de cables blindados, que evitan la adición de interferencia a la señal.
- Por otro lado las masas de los dispositivos en un sistema de audio deben distribuirse de una manera adecuada, con ello se logra evitar la aparición de impedancias parasitas comunes entre líneas que puedan afectar la señal.

7.7 PREGUNTAS Y EJERCICIOS

1. ¿Qué es el ruido y como se presenta?
2. ¿Cuándo se ocasiona el preenmascaramiento y postenmascaramiento?
3. En los sistemas de reducción de ruido Dolby cual es el más efectivo. Descríbalo.
4. ¿En qué consiste el apantallamiento de un cable de transmisión?
5. ¿Qué problemas se pueden evitar teniendo una buena distribución de masas en los sistemas?

7.8 BIBLIOGRAFÍA

BORRÁS, Oriol. Reductor de ruido mediante resta espectral en entorno Matlab. 2006. EUIT telecomunicación. 2006.

MOMPÍN, José. Manual de alta fidelidad y sonido profesional. 2 ed. Barcelona. Marcombo, S.A, 1989.

BALCELLS, Josep, DAURA, Francesc, ESPARZA, Rafael y PALLÁS, Ramón. Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos. Barcelona. Ediciones alfaomega, S.A, 1992.

SINCLAIR, Ian R. Audio and HI-FI handbook. 3 ed. Newness. Oxford. 1998.

RUMSEY, Francis y MC CORMICK, Tim. Introducción al sonido y la grabación. 5 ed. Madrid. Ediciones Omega S.A, 2008.

Ruido rosa, disponible en: <http://www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/1028401>

AZAMA, Jorge. Sistemas complementarios de reducción de ruido. 2005, disponible en: http://issuu.com/soulever/docs/reduccion_de_ruido

FLORES, Diego. Técnicas de reducción de ruido en circuitos electrónicos de baja y media frecuencia. 2006, disponible en: http://www.frbb.utn.edu.ar/electronica/trabajos-alumnos/Antivero-Flores-Galasso/informe_reduccion_ruido.pdf

CAPÍTULO 8 ACOPLA DE IMPEDANCIAS

8.1 INTRODUCCIÓN

En los sistemas de audio garantizar una excelente transmisión de potencia entre la etapa de amplificación y el transductor de salida, es signo de una buena y correcta reproducción sonora, un claro ejemplo se presenta conectando un altavoz a un sistema amplificador; si en las dos componentes de la línea de audio existen impedancias similares, se producirá una correcta reproducción, sin tener lugar a pérdidas en la señal, pero si hay diferencias apreciables en las impedancias, la señal podrá tener pérdidas o se verá afectada por medio de bajas en el volumen gracias al desacople entre las etapas de audio.

En la electrónica existe un proceso específico que ayuda a solucionar el tipo de problema expuesto anteriormente, este se denomina acople de impedancias mediante transformadores o acoplamiento magnético y se encarga de garantizar que la transferencia de la señal de audio en las etapas de procesamiento se realice sin generar pérdidas o alteraciones notorias.

El acoplamiento de impedancias por transformadores, se basa en los principios electromagnéticos, donde dos bobinas con diferente número de vueltas, generan una inducción de voltajes por medio del campo magnético producido por la circulación de corriente en el alambre de las bobinas.

Al conectar una carga en uno de los extremos del transformador, la impedancia reflejada en el otro extremo, tendrá un valor que dependerá netamente de la relación presente entre las vueltas de cada devanado.

El objetivo del presente capítulo, es el de mostrar la parte teórica y matemática en cuanto a los principios utilizados para generar el acople por medio de transformadores.

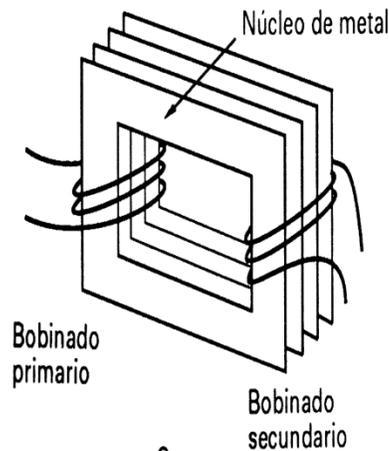
8.2 TRANSFORMADOR (Fig. 8.1)

Un transformador es un dispositivo eléctrico que consta de una o más bobinas de alambre enrollado en un núcleo de material magnético. La energía eléctrica puede ser transmitida entre una o varias de las bobinas según el fenómeno de inducción. Los transformadores diseñados para el uso de audiofrecuencias deben ser capaces de transmitir las corrientes en un amplio rango de frecuencias, además solo manejan voltajes pequeños y potencias insignificantes.

La bobina primaria, es la encargada de recibir el voltaje de la fuente de alimentación y la secundaria o secundarias son aquellas que entregan el voltaje transformado a la salida.

Un autotransformador es un transformador con una sola bobina. Se construyen para ser continuamente variable en todo su rango. Consta de un solo bobinado en un núcleo toroide. Usualmente son utilizados en audio para generar un excelente acoplamiento entre la etapa de amplificación y el altavoz.

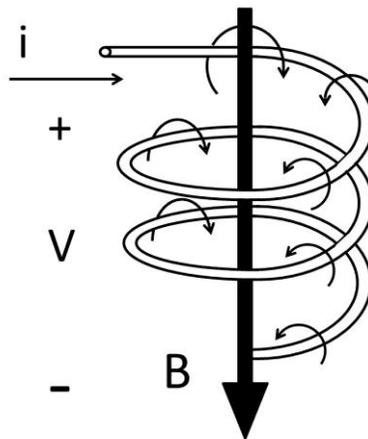
Fig. 8.1 Transformador



Fuente: [4]

8.3 ACOPLAMIENTO MAGNÉTICO

Fig. 8.2 Inducción magnética



Como es bien conocido, alrededor de un conductor por el cual viaja una corriente aparece un campo magnético cuya magnitud es proporcional a la corriente. Se puede afirmar que la corriente que pasa por un conductor produce un campo magnético alrededor de este, a su vez, induce una tensión en un conductor vecino (o en el mismo inductor) con una polaridad tal que dicha tensión se opone a la

corriente que origina todo el proceso. Lo anterior es representado mediante la Fig. 8.2.

La tensión inducida solo aparece mientras exista una variación relativa del campo magnético dentro del cual se encuentra el conductor. O sea que habrá inducción de voltaje en cualquiera de los siguientes casos.

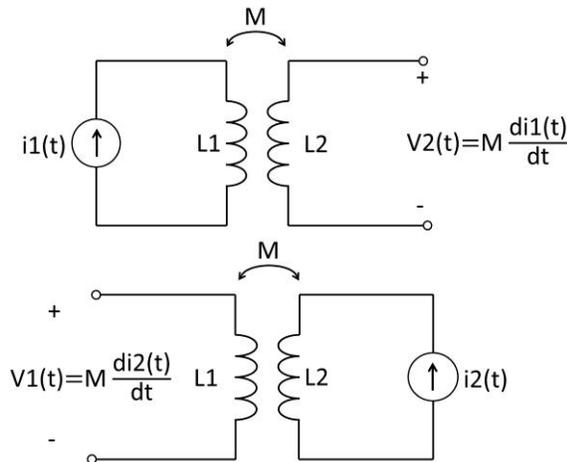
- Cuando el campo magnético es constante y el conductor está en movimiento.
- Cuando el conductor está quieto y el campo magnético se mueve.
- Cuando el conductor está quieto y la intensidad del campo magnético varía.

En cualquiera de los casos anteriores lo que ocurre es que el conductor resulta 'cortado' por las 'líneas de flujo magnético'. En el caso de la inductancia se producen cortes de las líneas de flujo magnético en una situación como la tercera indicada, ya que el conductor (que es el de la bobina) resulta cortado por el campo magnético cuando este crece o decrece, según lo haga la corriente. a partir de este razonamiento se obtiene la relación tensión-corriente para la bobina al ver que la tensión debería ser proporcional a la rapidez de la variación de corriente (di/dt), siendo la constante de proporcionalidad lo que se conoce como inductancia y es representada mediante la letra L. así las cosas, la relación tensión-corriente en la bobina se da como:

$$V_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (8.1)$$

8.3.1 Inductancia mutua (M)

Fig. 8.3 Relación de inductancia mutua



Así como el campo magnético variable induce una tensión al cortar el inductor por el que circula la misma corriente, también inducirá una tensión en cualquier conductor vecino que se encuentre dentro del espacio en que se percibe la

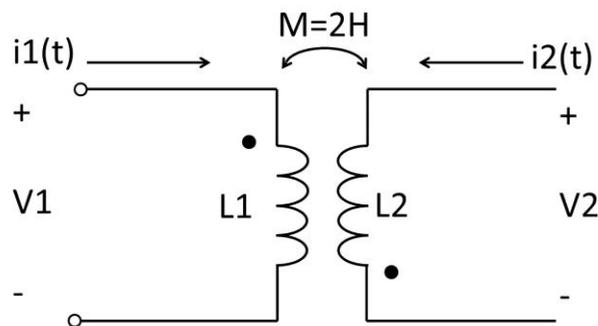
variación del campo. De igual manera una corriente que pase por el segundo conductor inducirá en el primero una tensión, por la misma razón ya explicada. A la constante que relaciona la corriente en un conductor con la tensión inducida entre otro se le conoce como inductancia mutua y se representa mediante la letra M. En la Fig. 8.3 puede verse la relación indicada recientemente.

8.3.2 Convención de puntos

Para determinar la polaridad del voltaje inducido en una bobina como consecuencia de la corriente que pasa por la otra, se utiliza la convención de puntos, la cual se expresa de la siguiente manera: 'una corriente que entra al terminal marcado con un punto de una bobina produce una tensión en circuito abierto con una polaridad positiva en el terminal con punto de la segunda bobina'. (Este enunciado es igual mente valido si las palabras 'con punto' se cambian por 'sin punto').

Si en el circuito de la Fig. 8.4 $i_1(t)$ tiene un valor igual a $5\text{sen}(45t)$ e $i_2(t)$ igual a 0, el valor del V_1 inducido se puede obtener de la siguiente forma:

Fig. 8.4 Red de inducción de voltaje



Por lo tanto de la red se obtiene:

$$V_1(t) = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} - M \frac{di_2(t)}{dt}$$

$$V_1(t) = -(2)(5)(45)\cos(45t)$$

$$V_1(t) = -450\cos(45t)$$

Por otro lado si $i_1(t)$ es igual a $-8e^{-t}$ e $i_2(t)$ igual a 0 se obtiene:

$$V_2(t) = L_2 \frac{di_2(t)}{dt} - M \frac{di_1(t)}{dt}$$

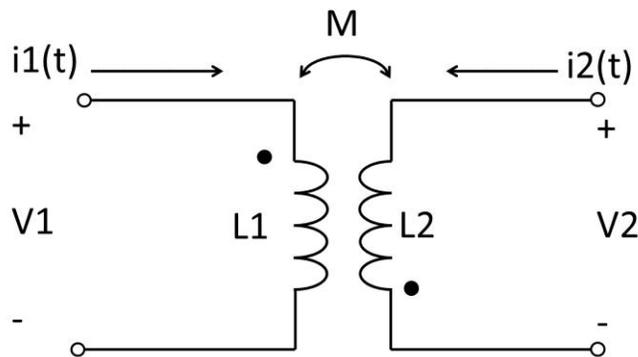
$$V_2(t) = -(2)(-8)(-1)e^{-t}$$

$$V_2(t) = -16e^{-t}$$

8.3.3 Tensión combinada de L y M

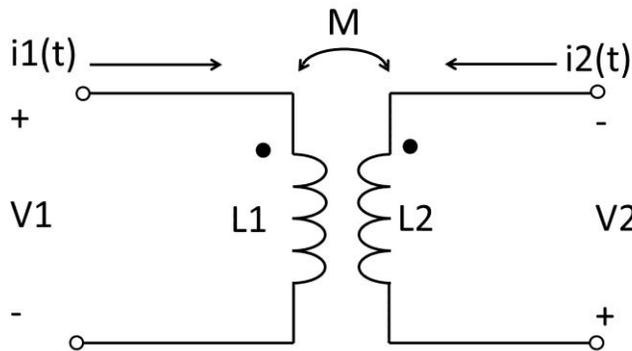
La presencia de la inductancia mutua en un circuito agrega un nuevo sumando en las mallas que contienen inductancias; este nuevo sumando tiene un signo que depende de la ubicación relativa de los puntos en las bobinas en las que se presenta inductancia mutua. Este concepto se ilustra a continuación en la Fig. 8.5.

Fig. 8.5 Tensión combinada L y M



$$V_1(t) = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} - M \frac{di_2(t)}{dt}$$

$$V_2(t) = L_2 \frac{di_2(t)}{dt} - M \frac{di_1(t)}{dt}$$



$$V_1(t) = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} + M \frac{di_2(t)}{dt}$$

$$V_2(t) = -L_2 \frac{di_2(t)}{dt} - M \frac{di_1(t)}{dt}$$

8.4 COEFICIENTE DE ACOPLAMIENTO K

El valor de la inductancia mutua depende de los valores de auto inductancias; puede demostrarse que el máximo valor de M está dado por la media geométrica de las auto inductancias, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$M \leq \sqrt{L_1 * L_2} \quad (8.2)$$

El coeficiente de acoplamiento se define como:

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 * L_2}} \quad (8.3)$$

De modo que $0 \leq K \leq 1$.

8.5 TRANSFORMADOR IDEAL

El coeficiente de acoplamiento depende en gran medida del medio a través del cual circule el flujo magnético, de modo que, por ejemplo, en el caso que dicho medio sea el aire, el coeficiente de acoplamiento es bajo, pero si se trata de materiales ferromagnéticos, dicho coeficiente es muy cercano a la unidad.

Es posible demostrar que la relación entre las inductancias L_1 y L_2 depende del cuadrado de la relación entre el número de espiras entre ellas, así:

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 = \alpha^2 \quad (8.4)$$

En donde N_1 y N_2 corresponden a los números de vueltas de alambre (espiras) enrolladas alrededor del núcleo de la bobina L_1 y L_2 respectivamente.

De la ecuación anterior se deduce que la relación de transformación, a , en un transformador ideal está dado por:

$$\frac{N_1}{N_2} = \alpha \quad (8.5)$$

Al arrollamiento que corresponde a la bobina L_1 se le llama bobinado primario y al que corresponde la bobina L_2 se le dice bobinado secundario. En general se supone que el primario de un transformador es el bobinado (también llamado devanado) por el cual entra la energía al transformador, mientras que el secundario es el devanado del cual se saca la energía del transformador.

En un transformador ideal se supone que toda la potencia del primario se transfiere al secundario, pues se considera que en el proceso no hay pérdidas. Aunque en la práctica si deben tenerse en cuenta las pérdidas, la realidad es que dichas pérdidas son relativamente bajas, por lo cual la consideración del transformador ideal es una buena aproximación.

De acuerdo con las consideraciones recién expuestas, se puede afirmar que:

$$P_1 = P_2 \quad (8.6)$$

Por lo tanto:

$$(V_1)(I_1) = (V_2)(I_2) \quad (8.7)$$

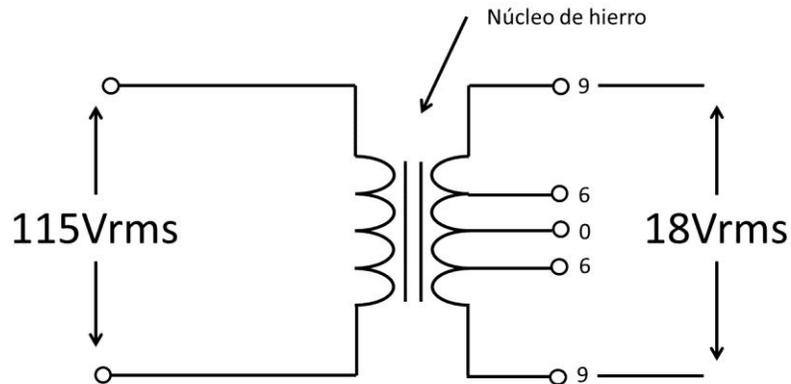
De la ecuación 8.7 se obtiene:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2} \quad (8.8)$$

También puede demostrarse que la relación entre las tensiones del primario y el secundario son iguales a la relación entre sus espiras, así:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_1}{I_2} = \alpha \quad (8.9)$$

Fig. 8. 6 Transformador TR 509



En la Fig. 8.6 se observa un transformador TR 509 del cual se obtiene lo siguiente si se conecta una carga al secundario que requiere 1.5Arms:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

$$I_1 = \frac{V_2}{V_1} * I_2$$

$$I_1 = \frac{18}{115} * 1.5$$

$$I_1 = 234.8 \text{ mA}_{\text{rms}}$$

La relación de transformación varía de acuerdo con las salidas que se tomen en el transformador, de este modo si:

Trabajando con las salidas de 9-9 obtenemos:

$$\alpha_9 = \frac{18}{115} = 0.1565$$

Luego con las salidas de 6-6 tenemos:

$$\alpha_6 = \frac{12}{115} = 0.1043$$

8.6 ACOPLAMIENTO DE IMPEDANCIAS

Cuando se conecta una impedancia entre los terminales de los bobinados de un transformador, desde el otro devanado se ve una impedancia diferente, como se demostrara a continuación.

Las impedancias vistas por el primario y por el secundario serán respectivamente las siguientes:

$$\frac{V1}{I1} = Z1 \quad (8.10)$$

$$\frac{V2}{I2} = Z2 \quad (8.11)$$

Reemplazando en la ecuación 8.11 el voltaje y la corriente incluyendo allí la relación de transformación, obtenemos lo siguiente:

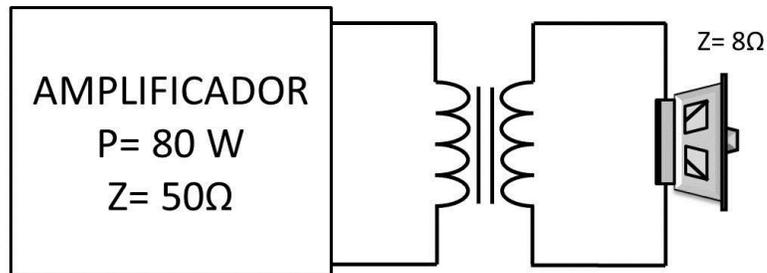
$$Z2 = \frac{V2}{I2} = \frac{\alpha V1}{I1/\alpha}$$

$$Z2 = \alpha^2 \frac{V1}{I1}$$

$$Z2 = \alpha^2 Z1 \quad (9.12)$$

$$Z1 = \frac{Z2}{\alpha^2} \quad (9.13)$$

Fig. 8.7 Etapa de amplificación de audio con acoplamiento magnético



Por medio de la Fig. 8.7 y los temas explicados anteriormente en este capítulo, fácilmente se pueden encontrar los valores que debe tener el transformador de acoplamiento, para garantizar una entrega completa de potencia al altavoz mediante la etapa de amplificación. Los cálculos se realizan a continuación:

Las impedancias vistas en el circuito son $Z1=50\Omega$ Y $Z2=8\Omega$. Por lo tanto:

$$Z2 = \alpha^2 Z1$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{Z2}{Z1}}$$

$$\alpha = 0.4$$

Como los datos nominales del transformador son $Z1=50 \Omega$ y $P1=80W$, el voltaje rms de salida del amplificador (o sea en el primario del transformador) será:

$$V1 = \sqrt{P1 * Z1} = \sqrt{80 * 50} = 63.25Vrms$$

De lo anterior se puede deducir que:

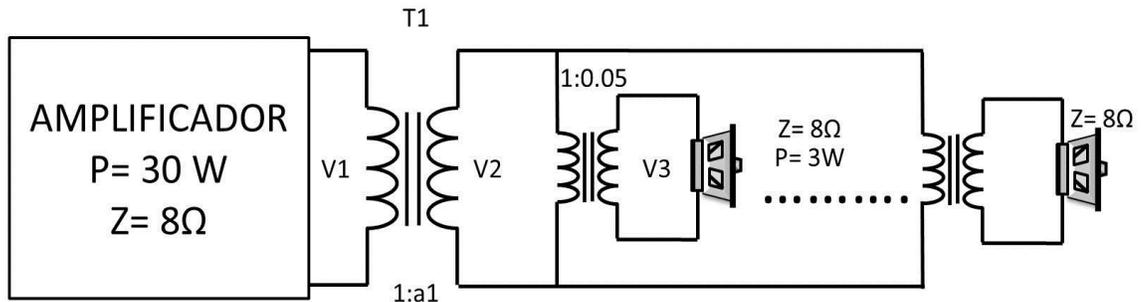
$$V2 = \alpha V1 = 25.3Vrms$$

Por lo tanto se requiere un transformador con las siguientes características (aproximando a valores enteros):

- $P=80W$
- $V1=65Vrms$.
- $V2=26Vrms$.

En la Fig. 8.8 se puede observar un sistema de amplificación, en el, son alimentados 10 altavoces. La red se distribuye de tal forma que el devanado primario de los transformadores que acoplan los altavoces, queden en paralelo, todos ellos serán conectados al devanado secundario de otro transformador al que llamaremos T1 para lograr el traspaso de toda la potencia generada por el amplificador con la red de altavoces.

Fig. 8.8 Red de amplificación con múltiples altavoces



El voltaje $V3$ se puede obtener por medio de:

$$V3 = \sqrt{P3 * Z1} = \sqrt{3 * 8} = 4.9Vrms$$

El voltaje V2 será:

$$V2 = \frac{V3}{\alpha2} = \frac{4.9}{0.05} = 98V_{rms}$$

La impedancia vista desde el primario de cada uno de los transformadores de la red la llamaremos Z2 y estará dada por:

$$Z2 = \frac{Z3}{\alpha2^2} = \frac{8}{0.05^2} = 3200\Omega$$

La impedancia combinada de todos los diez altavoces de la red es igual a Z2' que equivale a:

$$Z2' = \frac{Z2}{10} = \frac{3200}{10} = 320\Omega$$

Por lo tanto la relación de transformación de T1 es:

$$\alpha1 = \sqrt{\frac{Z2'}{Z1}} = \sqrt{\frac{320}{8}} = 6.325\Omega$$

De aquí se concluye que se requiere que T1 tenga una potencia de por lo menos 30W con los siguientes voltajes:

$$V1 = \sqrt{P1 * Z1} = \sqrt{30 * 8} = 15.49V_{rms}$$

$$V2 = \alpha1 * V1 = 6.325 * 15.49 = 97.98V_{rms}$$

Aproximando estos resultados a valores enteros, las cosas quedan así:

- V1= 16Vrms.
- V2= 101,2Vrms.

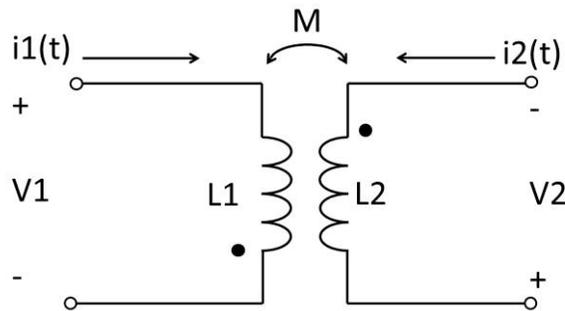
8.7 RESUMEN DEL CAPÍTULO

- Los transformadores son dispositivos eléctricos que basan su funcionamiento en los principios electromagnéticos. Su uso en sistemas de audio se ve reflejado en satisfacer los problemas de desacople entre las etapas de amplificación y transducción de salida.
- Los transformadores diseñados para el uso de audiofrecuencias deben ser capaces de transmitir las corrientes para todo el espectro audible.
- La corriente que circula por el devanado primario produce un campo magnético a su alrededor y además induce una tensión en el secundario del transformador.

- El coeficiente de acoplamiento en un transformador depende del medio a través del cual circule el flujo magnético.
- Las pérdidas existentes en un transformador real son demasiado bajas, por lo tanto su comportamiento es similar al de un transformador ideal en el que toda la potencia del primario es transferida al secundario.
- La impedancia vista por cualquier extremo del transformador depende netamente de la relación existente entre el número de vueltas en los devanados.

8.8 PREGUNTAS Y EJERCICIOS

1. ¿Cuándo se ocasiona la inducción de voltaje en un conductor?
2. ¿Cómo se determina la polaridad del voltaje inducido en una bobina?
3. Determinar las expresiones de voltaje de $V_1(t)$ y $V_2(t)$ del siguiente circuito:



4. Calcular la corriente en el primario de un transformador, cuya tensión de entrada es 120Vrms y la de salida es 18Vrms, sabiendo que la carga en el secundario consume 2Arms.
5. La etapa de salida en un amplificador de audio tiene una impedancia de salida de 80Ω , el amplificador proporciona 100W y se quiere entregar esa potencia a un woofer de 8Ω . Calcular el transformador de acople necesario.

8.9 BIBLIOGRAFÍA

SINCLAIR, Ian R. Audio and HI-FI handbook. 3 ed. Newness. Oxford. 1998.

RUMSEY, Francis y MC CORMICK, Tim. Introducción al sonido y la grabación. 5 ed. Madrid. Ediciones Omega S.A, 2008.

CONCLUSIONES

- Se realizó la documentación de los procesos eléctricos a los que es sometida la señal acústica, explicando la temática de forma clara y detallada; todo esto con el fin de lograr que el documento sea un texto de fácil acceso a las personas que puedan estar interesadas en conocer otra de las ramas de desempeño de la ingeniería electrónica como es el procesamiento de señales de audio.
- Con la finalidad de involucrar un poco más a los estudiantes de ingeniería con los sistemas de audio, el libro ofrece algunos ejemplos sobre cómo construir determinados tipos de filtro, efectos, procesadores de dinámica, etc. Estos ejemplos pueden servir como base para el desarrollo de nuevos proyectos en la institución.
- Es necesario un fundamento teórico sólido para abordar el vasto campo de información referente al tema de audio. Por esta razón los estudiantes que deseen incursionar en esta temática poseen por medio del documento un apoyo conceptual que les servirá como punto de partida.
- Los temas abordados en el documento se seleccionaron de tal forma que se diera una visión general de todo el alcance que tiene la ingeniería electrónica en el desarrollo y diseño de sistemas enfocados al procesamiento de señales de audio. Sin embargo cabe aclarar que cada uno de los temas puede ser explorado aún más en términos de complejidad matemática, física y técnica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] MIYARA, Federico. Acústica y sistemas de sonido. 3 ed. UNR editora. Rosario, 2006.
- [2] <http://www.estudiomarhea.net/manualc06.htm>
- [3] PUEO, Basilio y ROMÁ Miguel. Electroacústica. Altavoces y micrófonos. Madrid. Pearson Prentice Hall, 2003.
- [4] RUMSEY, Francis y MC CORMICK, Tim. Introducción al sonido y la grabación. 5 ed. Madrid. Ediciones Omega S.A, 2008.
- [5] CARDENAS, José L. Introducción a las cajas acústicas disponible en: <http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/pcpfiles.html>
- [6] <http://itshootout.com/r-207/sony-mdr-v700dj-headphones-review/>
- [7] <http://www.auctionair.co.uk/Low-Bid-Auction/Lots/Lot-2343.aspx>
- [8] <http://www.appshopcanarias.com/category/productos-bose/>
- [9] RUIZ VASSALLO, Francisco. Equipos de sonido. Casetes, CD audio, amplificadores Barcelona. Ceac, 2005.
- [10] SEDRA, Adel S. y SMITH, Kenneth C. Circuitos microelectrónicos. Traducido por Eduardo Ramírez Grycuk y Jorge Humberto Romo Muñoz. 4ed. México D.F. Oxford University press, 1999.
- [11] MALVINO, Albert P. Principios de electrónica. Traducido por José Luis Alba Castro y Carlos López Cortón. 6 ed. España. McGraw Hill, 1999.
- [12] SCHAUMANN, Rolf y VAN VALKENBURG, Mac. Design of analog filters. New York. Oxford University press, 2001.
- [13] BUONTEMPO, Bob. How To Build Your Own Plate Reverb: A Concise Step By Step Process. 2011. Disponible en: http://www.prosoundweb.com/article/print/how_to_build_your_own_plate_reverb
- [14] ELLIOTT, Rod. Spring Reverb Unit For Guitar or Keyboards. 2006. Disponible en: <http://sound.westhost.com/project34.htm>
- [15] BOSCORELLI, Nicholas. The Stomp box cookbook. 2 ed. United States of America. Guitar project books, 1999.

[16] BOYLESTAD, Robert L. y NASHELSKY, Louis. Electrónica: teoría de circuitos. Traducido por Juan Purón Mier y Terán y Sergio Luis María Ruiz Faudón. 6 ed. Mexico. Prentice hall Hispanoamérica S.A, 1997.

[17] VALERO, Diego y AGUILAR, Juan D. Amplificadores de potencia teoría y problemas. Madrid. Editorial Paraninfo S.A. 1993.

[18] VILLA SALAZAR, Arley y VERA ROJO, Diover. Amplificadores de potencia clase D. Universidad de Antioquia. Medellín.

[19] PEREIRA HERNÁNDEZ, Miguel. Amplificadores de audio. Bilbao. Escuela superior de ingenieros Bilbao. 2005. Disponible en:
<http://aholab.ehu.es/users/imanol/akustika/lkasleLanak/Amplificadores%20de%20audio.pdf>

[20] DE LOREDO, Leandro. Procesadores: ecualizador, disponible en:
<http://www.sonidoanda.com.ar/principal.htm>

[21] Teoría del sonido: ecualización, disponible en:
<http://www.djlogic.es/archives/tag/ecualizadores-semiparametricos>

[22] Guía de efectos: la ecualización. Tablas para ecualizar, disponible en:
<http://electrofante.com/musicadigital/ecualizacion.html>

[23] Ecualizador de audio, disponible en:
<http://www.monografias.com/trabajos29/ecualizador-audio/ecualizadoraudio.shtml>

[24] BORRÁS, Oriol. Reductor de ruido mediante resta espectral en entorno Matlab. 2006. EUIT telecomunicación. 2006.

[25] Ruido rosa, disponible en: <http://www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/1028401>

[26] MOMPÍN, José. Manual de alta fidelidad y sonido profesional. 2 ed. Barcelona. Marcombo, S.A, 1989.

[27] AZAMA, Jorge. Sistemas complementarios de reducción de ruido. 2005, disponible en: http://issuu.com/soulever/docs/reduccion_de_ruido

[28] BALCELLS, Josep, DAURA, Francesc, ESPARZA, Rafael y PALLÁS, Ramón. Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos. Barcelona. Ediciones alfaomega, S.A, 1992.

Otros documentos que sirvieron para la elaboración del texto fueron:

ACETO, Luis. Compresores, disponible en:
<http://www.eltallermd.com.ar/apuntes/Compresores.pdf>

Acústica básica: micrófonos, disponible en:
http://www.ingenieroambiental.com/2020/Acustica%20Basica_II.pdf

BARRIGA, Gilberto. Diseño y construcción de un amplificador de audio utilizando tubos al vacío. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero electrónico. Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana. 2010.

BENVENUTI, Juan C. Tipos de micrófonos, 2006, disponible en:
<http://www.cetear.com/cap02microfonos.pdf>

BERANEK, Leo L. Acústica. Traducido por Adolfo Di Marco. 2 ed. Buenos Aires. Editorial hispano, 1969.

Beyma professional loudspeakers. Apuntes del altavoz, disponible en:
profesional.beyma.com/download/Apuntes_del_Altavoz.pdf

BIDONDO, Alejandro. Compresión y limitación: hasta qué punto es justificable, 2005 disponible en:
<http://www.ingenieriadesonido.com/upload/Compresion%20y%20Limitacion.pdf>

BIDONDO, Alejandro. Electroacústica básica: Altavoces, Parlantes y Cajas acústicas I, disponible en:
http://www.ingenieriadesonido.com/literatura_show.php?idcat=&idprod=43

BORRÁS, Oriol. Reductor de ruido mediante resta espectral en entorno Matlab. 2006. EUIT telecomunicación. 2006.

BUONTEMPO, Bob. How To Build Your Own Plate Reverb: A Concise Step By Step Process. 2011. Disponible en:
http://www.prosoundweb.com/article/print/how_to_build_your_own_plate_reverb

COUGHLIN, Robert F. y DRISCOLL, Frederick F. Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales. Traducido por Efrén Alatorre Miguel. 4 ed. México D.F. Prentice hall Hispanoamérica S.A, 1993.

CUGNONI, Martin. Sonido uno: apunte cátedra 'Procesadores dinámicos' disponible en: <http://www.sonidoanda.com.ar/principal.htm>

Curso de técnico de sonido y de producción musical, disponible en:
<http://es.scribd.com/doc/4884482/CURSO-DE-TECNICO-DE-SONIDO-Y-PRODUCCION-MUSICAL>

DATA, Gabriel. Consideraciones generales sobre la utilización de compresores y compuertas, disponible en:

www.cetear.com/Compresores%20y%20compuertas.pdf

DE LOREDO, Leandro. Procesadores: Delay, disponible en:

<http://www.sonidoanda.com.ar/principal.htm>

DE LOREDO, Leandro. Procesadores: Reverb, disponible en:

<http://www.sonidoanda.com.ar/principal.htm>

DE OYARBIDE, Mario. ABC sobre ecualizadores y filtros, 2005, disponible en:

<http://www.cetear.com/?p=estaticas|descargas>

DELBONO, Darío. Consideraciones generales sobre ecualización, reverberancia y paneo, disponible en: <http://www.cetear.com/?p=estaticas|descargas>

FAULKENBERRY, Lucas M. Introducción a los amplificadores operacionales con aplicación a CL lineales. México Limusa, 1992

FLORES, Diego. Técnicas de reducción de ruido en circuitos electrónicos de baja y media frecuencia. 2006, disponible en:

http://www.frbb.utn.edu.ar/electronica/trabajos-alumnos/Antivero-Flores-Galasso/informe_reduccion_ruido.pdf

GOMEZ, Emilia. Efectos digitales básicos, 2009 disponible en:

<http://www.dtic.upf.edu/~egomez/teaching/sintesi/SPS1/Tema10-EfectosDigitales.pdf>

JARAMILLO H, Jorge Hernán. Principios de audio. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero electrónico. Medellín. Universidad Pontificia Bolivariana, 2005.

KATZ, Robert A. La masterización de audio el arte y la ciencia. Traducido por escuela de cine y video.

LORENZATTI, Demián y SEBA, Alejandro. Micrófonos complemento, disponible en: <http://www.sonidoanda.com.ar/principal.htm>

Manual de sonido, 11 la ecualización, disponible en:

<http://www.estudiomarhea.net/manualc11.htm>

MORÁN, Wilber. Diseño de un procesador de efectos de sonido en un fpga. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero electrónico, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2009.

ORDOÑEZ, Fredy A. Teoría electroacústica. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero electricista. Guatemala. Universidad De San Carlos De Guatemala. 2009.

PÉREZ, Ángel. Estudio de efectos de audio para guitarra, e implantación mediante dsp. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero industrial, Universidad Pontificia Comillas, 2006.

PÉREZ, Jaime y DELGADO, Manuel. Micrófonos. I.E.S los viveros. Sevilla, disponible en:

<http://www.ieslosviveros.es/electronica/material/asig10/2MicrofonosdefPDF.pdf>

PERTENCE, Antonio. Amplificadores operacionales y filtros activos. Traducido por María Isabel Gutiérrez Díaz y José Torrubias Fernández. 1 ed. Madrid. McGraw Hill, 1991.

RIAMBAU, Lluís. Ecuualizadores y ecualización, disponible en:

www.armmeditores.com/mp%20audio/P151_SONAR.pdf

RUIZ M, Sofía. Diseño y caracterización de amplificadores de audio. Trabajo de grado para optar por el título de ingeniera industrial. Madrid. Universidad Pontificia De Comillas. 2009.

RUIZ VASSALLO, Francisco. Diseño y fabricación de bafles. España. Creaciones cophyright, 2007.

SINCLAIR, Ian R. Audio and HI-FI handbook. 3 ed. Newness. Oxford. 1998.

Teoría del sonido: ecualización, disponible en:

<http://www.djlogic.es/archives/tag/ecualizadores-semiparametricos>

Teoría del sonido: ecualización, disponible en:

<http://www.djlogic.es/archives/tag/ecualizadores-semiparametricos>

VARGAS, Miguel. Efectos de modulación, disponible en:

<http://miguelvf.files.wordpress.com/2010/11/efectosdemodulacion.pdf>

VARGAS, Miguel. Efectos de retardo, disponible en:

<http://miguelvf.files.wordpress.com/2010/11/efectos-2.pdf>

WHITE, Paul. Técnicas avanzadas de compresión parte 1, 2008, disponible en:

www.cetear.com/compresion1.pdf