

Sistemas de Sonido: Diseño y Optimización

Dedicatoria

A la mujer que me conoció en los tiempos remotos en que empecé este viaje, y que todavía está ahí, el amor de mi vida,

Merridith

In Memoriam—Don Pearson

Durante el proceso de escribir este libro, nuestro campo perdió uno de sus más queridos y respetados pioneros, Don Pearson, más conocido como Dr Don. Mencionado varias veces por su nombre a lo largo de este libro, yo tuve la fortuna de conocer a Don y recibir su sabiduría. Él estaba ahí cuando todo esto empezó y le echaré de menos. Tuvimos suerte de obtener sus "perspectivas" antes de que muriera. Estas aparecen en este texto y continuarán guiándonos.

Sistemas de Sonido: Diseño y Optimización

**Técnicas y herramientas modernas para el diseño
y alineación de sistemas de sonido**

Bob McCarthy

**Editorial
Alvalena**

Título original: *SOUND SYSTEMS: Design and Optimization*

Autor: Bob McCarthy

Editor original: Elsevier Limited

Traducción: Ana Lorente Izquierdo

Revisiones: David Lorente Izquierdo

No se permite la reproducción, almacenamiento o transmisión total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, incluidos la reprografía y el tratamiento informático, así como la distribución de ejemplares mediante alquiler o préstamo públicos sin la Autorización previa por escrito del editor. Todos los derechos reservados.

Bob McCarthy © 2007

This edition of *SOUND SYSTEMS: Design and Optimization* by Bob McCarthy is published by arrangement with ELSEVIER LIMITED of The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1GB, UK

Editorial Alvalena © 2009

C/Juventud 9, Pol. In PISA – 41927 Mairena del Aljarafe. Sevilla. España.

www.editorialalvalena.com – “Editorial Especializada en Audiovisuales y Negocio”

ISBN: 978-84-936269-2-1

Depósito legal

Imprime:

Impreso en España / Printed in Spain

Índice

<i>Prólogo</i>	xi	Efectos Medioambientales: Humedad y Temperatura	70
<i>Agradecimientos</i>	xix	Transmisores Acústicos: Altavoces	70
		Transición de la Transmisión: Electrónica a Acústica	72
		Referencias	84
SECCIÓN 1 SISTEMAS DE SONIDO	21		
1. Transmisión	23	2. Suma	85
Objetivos de la transmisión	23	Visión general	85
Definición de Transmisión de Audio	24	Propiedades de la Suma de Audio	86
Tiempo y Frecuencia	24	Definición de la Suma de Audio	86
Longitud de Onda	25	Criterios de la Suma	86
La Forma de Onda	28	Cantidad de Suma	88
Cuantificar la Transmisión	30	Suma Eléctrica vs. Acústica	89
Decibelios	30	Dirección de la Fuente Acústica	89
Potencia	36	Suma Matemática	90
Respuesta de frecuencia	37	Amplitud de la Suma	91
Polaridad	40	Fase de la Suma	91
Latencia	40	Ondulación de la Respuesta (Ripple)	96
Transmisión de Audio Analógica	41	Zonas de Suma	96
Dispositivos de Nivel de Línea	41	Comb Filtering: Lineal vs. Logarítmico	103
Interconexión de Nivel de Línea	53	Geometría de la Suma	105
Dispositivos de Nivel de Altavoz—		Crossovers Acústicos	113
Amplificadores de Potencia	57	Definición de Crossover Acústico	113
Interconexión de Nivel de Altavoz—Cables		Clases de Crossover	115
de Altavoz	64	Divisores Espectrales y Crossovers Espectrales	129
Transmisión de Audio Digital	65	Arreglos de Altavoces	140
Equipos Digitales de Audio	65	Introducción	140
Interconexión de Audio Digital	66	Tipos de Arreglos de Altavoces	140
Transmisión Acústica	68	Arreglos Acoplados	143
Potencia, Presión y Superficie	68	Arreglos No Acoplados	155

Contenidos

Suma Altavoz/Sala	169	SECCIÓN 2:DISEÑO	213
Funciones Análogas	169	4. Evaluación	215
Tipos de Suma Altavoz/Sala	173	Introducción	215
Efectos de la Absorción	179	Sonido Natural vs. Sonido Amplificado	216
Efectos Medioambientales	179	Contrastando los Modelos de Emisión, Transmisión y Recepción	217
3. Recepción	181	Diferencias en el Camino de Transmisión	218
Introducción	181	Relacionando los Mundos de los Ingenieros Acústi- cos y de Audio	223
Sonoridad	182	Comparando Nuestros Objetivos	223
Sonoridad y dB SPL	182	El Término Medio	229
Los Contornos de Igual Sonoridad	183	Acústica Variable	231
Localización	184	Referencias	238
Introducción	184	5. Predicción	239
Imagen Sonora	185	Introducción	239
Localización Vertical	186	Dibujos	240
Localización Frontal/Trasera	188	Tipos de Dibujos 2-D	240
Localización Horizontal	188	Tipos de Dibujos 3-D	241
Percepción Tonal, Espacial y Eco	195	Dibujos 2-D en un Mundo 3-D	241
Introducción	195	Escala	245
Percepción Tonal	196	Programas de Modelado Acústico	246
Envolvente Tonal	197	Introducción	246
Percepción de Eco	198	Un Poco de Historia	246
Percepción Espacial	200	Archivos de Datos de Altavoces	247
Detección de la Zona de Percepción	200	Propiedades de la Transmisión Acústica	254
Percepción Estéreo	201	Propiedades de Absorción de los Materiales	259
Introducción	201	Caracterización de la Suma	260
Campo Panorámico	202	Aplicaciones	263
Escala Estéreo	206	Conclusiones	264
Efectos Secundarios del Estéreo	207	6. Variación	267
Detección de Sonido Amplificado	207	Introducción	267
Distorsión	208	Los Principios de Mínima Varianza	270
Compresión	208	Definición de Variación	270
Coloración en la Respuesta de Frecuencias	208	Causas y Progresiones Estándar de la Varianza	271
Perspectiva Falsa	208	Mínima Varianza vs. SPL Máximo	278
Recepción del Micrófono	210	La Unión Altavoz/Sala: Relación de Aspecto	278
Introducción	210	Transportadores y Pizza	278
Comparando Micrófonos con Nuestros Oídos	211	Máxima Varianza Aceptable	279
Micrófonos de Medida	211	Consideraciones de Cobertura Asimétrica	270
Referencias	212		

El Método del Arco de Cobertura	281	Downfill	369
La Relación de Aspecto Frontal	281	Frontfill	369
La Relación de Proximidad	282	Delays	370
Mínima Varianza de Nivel	283	El Diseño Escalable	370
Altavoces Individuales	283	Potencia por Escala	370
Formas Totalmente Simétricas	283	Potencia por Solapado	371
Formas Frontal/Trasera Asimétricas	284	Escala de la Forma	372
Mínima Varianza Espectral	301	Procedimientos del Diseño de Arreglos	372
Relacionando la Relación de Aspecto, el Ancho de Haz y el Orden del Altavoz	302	Diseño del Sistema Principal	372
Métodos de Arreglos de Altavoces	312	Fuente Puntual Acoplada Simétrica	373
Mínima Varianza de Ripple	342	Fuente Puntual Acoplada Asimétrica	377
Arreglos de Subgraves	342	Fuente Puntual Acoplada Compuesta-Asimétrica	380
End Fire	343	Fuente Lineal No Acoplada Simétrica	382
Técnica de Dos Elementos en Línea	344	Fuente Lineal No Acoplada Asimétrica	382
Estacado Invertido	344	Fuente Puntual No Acoplada Simétrica	383
Fuente Lineal Acoplada y No Acoplada	345	Fuente Puntual No Acoplada Asimétrica	383
Fuente Puntual Acoplada y No Acoplada	347	Punto de Destino No Acoplado Simétrico	384
Conclusión	348	Punto de Destino No Acoplado Asimétrico	385
Orden de Altavoz y Ancho de Haz	348	El Plano Diagonal	385
Máxima Potencia vs. Mínima Varianza	349	Batallas del Balcón	387
El Menú de Mínima Varianza	349	Sonido Multicanal	390
7. Especificación	353	SECCIÓN 3:OPTIMIZACIÓN	395
Introducción	353	8.Examinación	397
Los Principios de la Especificación	353	Definición de examinación	397
Definición de Especificación	353	Herramientas de Medición Físicas	398
Objetivos y Desafíos	354	Inclinómetro	398
Preguntas Específicas	355	Transportador	398
Respuestas Específicas	357	Indicador de Ángulo Origami	399
Compromiso	359	Puntero Láser	399
Tipos de Canales/Sistemas	361	Termómetro	400
Mono	362	Higrómetro	400
Estéreo	362	Herramientas de Medición de Audio Simple	401
Surround	363	Voltímetro (VOM)	401
Efectos de Fuente	364	Indicador de Polaridad	401
Subdivisión del Sistema	364	Caja de Escucha	402
Tipos de Subsistemas	367	Tester de Impedancia	402
Sistemas Principales	367	Osciloscopio	402
Sidefill	369	Medidor de Nivel de Sonido	402
Infill	369	Analizador en Tiempo Real (RTA)	403

Contenidos

Herramientas de Medición de Audio Complejo	404	Democracia	474
La Transformada de Fourier	405	TANSTAAFL y Triage	475
Básicos del Analizador	406	Acceso a la Información	475
Promedio de la Señal	414	Subdivisión de la Calibración	475
Aplicaciones de Espectro de Un Solo Canal	418	Acceso Físico	478
Otros Analizadores de Señal Compleja	443	Acceso Electrónico	478
Sistemas de Análisis	445	Acceso Acústico	480
Referencias	446	Estrategias de Posicionamiento de Micrófonos	496
9. Verificación	447	Procedimientos	502
Introducción	447	Evaluación Acústica	502
Estructura del Test	447	Ajuste de Nivel	503
Etapas de Test	448	Ajuste de la Posición del Altavoz	505
Puntos de Acceso	449	Ecuación	507
Procedimientos	452	Ajuste de Delay	513
Ruido Sobre Frecuencia	453	El Efecto de Precedencia	514
Distorsión Armónica Total + Ruido (THD + n)	454	Dilemas del Delay	515
Capacidad de Entrada/Salida Máxima Sobre		Orden de Operaciones	521
la Frecuencia	456	Aplicaciones Prácticas	522
Ganancia Pseudo-Unidad	456	Acabar el Proceso	522
Latencia	459	Escucha	522
Polaridad	462	Optimización en Curso	523
Respuesta de Frecuencia	462	Uso de Material de Programa como Fuente	523
Respuesta de Fase sobre la Frecuencia	464	Presencia de Audiencia	524
Compresión	465	Temperatura y Humedad	525
Verificación del Micrófono	466	Fuga del Escenario	526
Igualdad de Micrófonos	467	Suma de los Micrófonos del Escenario	526
Respuesta del Micrófono	467	Feedback (Retroalimentación)	527
Verificación Postcalibración	469	Material de Programa Multicanal	528
Consideraciones Adicionales	469	Posiciones de Micro en el Show	528
		Subgraves como Canal de Programa	529
		La Última Palabra	529
10. Calibración	471		
Definición de Calibración	471	<i>Epílogo</i>	531
Objetivos	472	<i>Glosario</i>	533
Desafíos	472	<i>Bibliografía</i>	545
Estrategias	472	<i>Índice</i>	547
Técnicas	473		
Acercamientos a la Calibración	473		
Anarquía	473		
Monarquía	474		
Capitalismo	474		

Prólogo

Este es un libro sobre un camino. Por una parte, el tema es el camino del sonido mientras viaja a través de un sistema, después por el aire e inevitablemente al oyente. Por otra parte, es un camino que concierne a nuestra búsqueda de entender la complicada naturaleza de esta transmisión de sonido. El cuerpo de este texto detallará la parte estrictamente técnica de las cosas. Sin embargo, primero te ofrezco un poco de la parte personal.

Se suponía que iba a construir edificios. Desconocido por mí en aquel tiempo, esta llamada se desbarató el 9 de Febrero de 1964 con la aparición de los Beatles en el show de Ed Sullivan. Como para muchos de mi generación, este evento trajo la música popular y la guitarra eléctrica a mi vida. Me convertí en un gran entusiasta de los conciertos en vivo, a los que iba regularmente durante mi juventud cuando se presentaba la oportunidad. Mi expectativa de entrar en el negocio de la construcción permaneció durante años. Esta visión terminó en unas carreras en Des Moines, Iowa el 16 de Junio de 1974. La experiencia de escuchar el sistema de sonido masivo en este concierto de Grateful Dead le dio una nueva dirección a mi vida. Un día tomé la decisión de trabajar en el sonido directo. Quería ayudar a crear este tipo de experiencias para otros. Sería un ingeniero de mezcla, y mi sueño era operar, algún día, la consola de mezclas para gran-

des conciertos. Puse la mira en la preparación de esa carrera mientras estaba en la Universidad de Indiana. No fue algo fácil, puesto que no existía una titulación en audio. Pronto descubrí el Independent Learning Program (Programa de Aprendizaje Independiente). Bajo los auspicios de ese depar-



Figura 0.1 Ticket del concierto de Grateful Dead el 16 de Junio de 1974 en Des Moines, Iowa

tamento, hice una mezcla de cursos relevantes de diferentes disciplinas y me gradué en mi programa autocreado de ingeniería de audio.

En 1980, ya tenía algunos años de experiencia en giras y me mudé a San Francisco. Allí forjé mis relaciones con John Meyer, Alexander Yuill-Thornton II (Thorny), y Don Pearson. Estas se convertirían en las relaciones clave en mi desarrollo profesional. Cada uno de nosotros estaba destinado a marcar nuestras reputaciones en la misma pieza de equipamiento: el analizador FFT de dos canales.

Me gustaría decir que estuve involucrado en la medición de conciertos en vivo con el analizador FFT de dos canales desde el principio, pero no es el caso. Fue un proceso pionero de John Meyer la noche de un sábado de Mayo en 1984. John llevó el analizador, una línea de delay analógica y algunas pinzas cocodrilo a un concierto de Rush en Fénix, Arizona. Allí realizó las primeras mediciones de un sistema de sonido de concierto, usando música como fuente y con la audiencia en su sitio. No



Figura 0.2 14 de Julio de 1984, Grateful Dead, Greek Theater, Berkeley, California. El autor con la versión primordial del SIM™ (foto: Clayton Call)

estaba destinado a estar involucrado en el proyecto hasta el siguiente lunes por la mañana.

Desde ese día en adelante, nunca he estado involucrado en un concierto o en una instalación de un sistema de sonido sin un analizador FFT de dos canales. También desde ese día no volví a mezclar otro show, reajustando mi visión a la tarea de ayudar a los ingenieros de mezcla a practicar su arte. Para Don, John, Thorny y muchos otros, la idea de montar un sistema sin la presencia de un analizador FFT era impensable. Desde el principio, vimos su importancia y sus implicaciones prácticas. Nuestro entusiasmo era palpable, y cada concierto resultaba en un crecimiento exponencial en aprendizaje. Todos vimos que era un gran avance en aquel tiempo, y lo presentamos a todo aquel que tuviera una mente abierta para escuchar. El primer producto que salió del proceso de análisis FFT fue un ecualizador paramétrico. Una coincidencia temporal fortuita hizo que yo grabara las placas del circuito para el ecualizador en mi porche durante un fin de



Figura 0.3 Noviembre de 1984 Foto de Luciano Pavarotti, Roger Gans y el autor (detrás), Drew Serb, Alexander Yuill-Thornton II y James Locke (delante) (foto: Drew Serb)

semana que John estaba en Fénix con Rush. Este proyecto paralelo (un preamplificador de bajo) para mi amigo Rob Wenig ya llevaba 6 meses de retraso, y estaba destinado a llevar más. El EQ se puso inmediatamente a funcionar y John casi se cae cuando vio que podría crear la respuesta complementaria (en amplitud y en fase) de lo que había medido en Fénix. El CP-10 nació entre más controversia de lo que uno podría imaginar. La ecualización siempre ha sido un tema polémico, pero la proposición de que el ecualizador era capaz de contrarrestar las propiedades de la suma en la interacción altavoz/sala era lo suficientemente radical para obtener el apoyo del Dr. Julius Smith de Standford para asegurarnos de que la teoría se sostendría.

El primero fuera de nuestra compañía que realmente llevó el concepto del análisis en conciertos al análisis en el campo fue Don Pearson, que estaba de ingeniero de sistemas en la gira de Grateful Dead. Don y la banda enseguida vieron el beneficio, y sin tener paciencia para esperar el desarrollo de lo que se convertiría el Sistema SIM de Meyer Sound, consiguieron su propio analizador FFT y nunca volvieron la vista atrás. Poco después le siguió Luciano Pavarotti bajo el consejo de Roger Gans, diseñador de sonido a cargo de los conciertos a gran escala que daba el artista. Imaginamos que era cuestión de meses antes de que se volviera el procedimiento de operación estándar en la industria. ¡No teníamos ni idea de que llevaría cerca de 20 años! El camino, como el de la transmisión de sonido, era mucho más complejo de lo que podíamos esperar. Había fuerzas muy poderosas en nuestra contra en varias formas: la resistencia general masiva de la comunidad del audio a los analizadores de sonido y las poderosas fuerzas políticas defendiendo plataformas de medición alternativas, por nombrar algunas.

En general, la comunidad del sonido en vivo estaba masivamente opuesta a lo que conceptualizaron como un analizador imponiendo una política a las fuerzas creativas involucradas en la parte musical de la experiencia. La mayoría de sistemas de conciertos de aquellos tiempos no tenían la complejidad de montones de altavoces con canales izquierdo y derecho. Esto significaba que el proceso

de alineamiento consistía en poco más que ecualización. Como toda la calibración del sistema se hacía desde una posición, la de mezcla, las posiciones científicas y artísticas hacían la misma pregunta en el mismo punto en el espacio. Siguieron debates opuestos interminables sobre la ecualización “correcta”, puesto que el balance tonal de un sistema de sonido es, y siempre ha sido, un esfuerzo artístico. Era algo absurdo. ¿Qué es mejor—de oído o con el analizador?

Esto nos abrió camino hacia una dirección más desafiante e interesante para nosotros: la búsqueda más allá de la posición de mezcla. El mover el micro en el espacio nos dejaba con un dilema terrible: las nuevas posiciones revelaban que la versión de ecualización única del sistema era una fantasía total. La precisión con la que el ajuste de los filtros paramétricos se llevaba a cabo en la posición de mezcla no tenía justificaciones en otras posiciones. La interacción de las diversas partes del sistema de altavoces creaba una respuesta muy variable a lo largo de la sala. Nuestro objetivo pasó de encontrar la ecualización perfecta a la búsqueda de uniformidad sobre el espacio.

Esto requeriría la subdivisión del sistema de sonido en subsistemas definidos y ajustables por separado, cada uno con capacidad de tener nivel, ecualización y delay individual. Los subsistemas eran combinados después en uno unificado. La comunidad del rock and roll se resistía a esta idea, principalmente porque involucraba ajustar algunos altavoces más bajos en nivel. La Sociedad de Preservación del SPL se oponía incondicionalmente cualquier cosa que no fuera la capacidad de potencia máxima. No valía la pena buscar la uniformidad con la subdivisión si era a costa de la potencia. Sin la subdivisión, el análisis estaba atrapado en la posición de mezcla. Si no vamos a cambiar nada ¿para qué molestarnos en buscar más allá?

Había otros géneros que estaban abiertos a la idea. El proceso requería el movimiento de un micrófono alrededor de la sala y un acercamiento sistemático a deconstruir y reconstruir el sistema de sonido. Empezamos a desarrollar esta metodología con las giras de Pavarotti. Pavarotti usaba aproximadamente diez subsistemas. Cuando entra-

mos en el mundo del teatro musical con Andrew Bruce, Abe Jacob, Tony Meola, Tom Clark y otros diseñadores de sonido, nuestro proceso se volvió incluso más complejo. Nuestro énfasis cambió de proporcionar una respuesta tonal derivada científicamente a proporcionar consistencia de sonido en todo el espacio de escucha, dejando el carácter tonal en las manos del ingeniero de mezcla. Nuestro puesto como “policías de EQ” se había terminado. El proceso se transformó así en optimización, enfatizando la uniformidad espacial abarcando ecualización, ajuste de nivel, de delay, posicionamiento de altavoces y un montón de verificaciones en el sistema. Se dibujaba una clara línea entre el sector artístico y el científico.

Al principio, la gente evaluaba el éxito del ajuste del sistema desactivando los filtros en el ecualizador. Ahora, con nuestro proceso mucho más sofisticado, no podríamos comparar los escenarios del antes y el después. Escuchar el sonido de “antes” requeriría reposicionar los altavoces, encontrar las polaridades inversas, ajustar nuevos ángulos de apertura, resetear niveles y tiempos de delay y finalmente una serie de ecualizaciones para los diferentes subsistemas. Finalmente, se volvió claro el papel del ingeniero de optimización: asegurar que la audiencia recibe el mismo sonido que en la posición de mezcla.

En 1987, presentamos el sistema SIM—el primer sistema de análisis FFT multicanal diseñado específicamente para la optimización de sistemas de sonido (hasta 64 canales). Consistía de un analizador, múltiples micrófonos e interruptores para acceder bancos de ecualizadores y delays. Todo esto bajo el control de un ordenador que también contenía una librería de datos que podían ser rellamados para la comparación de hasta 16 posiciones o escenarios diferentes. De ese modo, se hizo posible monitorizar el sistema de sonido desde múltiples posiciones y ver los efectos de cambios en una parte del sistema en otras áreas. También fue posible hacer múltiples mediciones de micrófonos durante una actuación y ver los efectos de la presencia de audiencia en todo el espacio.

Esto no quiere decir que estuviéramos en un camino fácil. Era mucha información que vigilar. La respuesta de frecuencia se medía en siete secciones separadas. Un

conjunto de datos para caracterizar una posición en un momento dado consistía de 63 trazos, de los cuales sólo se podían ver dos a la vez en la mini pantalla de cuatro pulgadas. La comparación de una posición de micro con otra se tenía que hacer de trazo en trazo (hasta 63 operaciones). Era como tratar de dibujar un paisaje mirando a través de un periscopio.

El sistema de medición multicanal abrió las puertas a la subdivisión de sistemas. Este enfoque rompió la barrera del sonido de la música japonesa con el exitoso Yuming Matsutoya bajo la orientación de Akio Kawada, Akira Masu y Hiro Tomioka. En los estadios de Japón probamos que las mismas técnicas de disminución de nivel, ecualización zonal y combinación de sistemas que habíamos empleado para el teatro musical y para Pavarotti eran aplicables para la música rock de alta potencia de las giras.

A la presentación del sistema de medición como producto le siguió el primer seminario de entrenamiento en 1987. Fue durante este primer seminario que ocurriría algo inesperado para mí. Mientras explicaba el proceso de posicionar micros y subdividir el sistema para la optimización, fui desafiado por el experimentado ingeniero Dave Robb, que dijo que mi posicionamiento de micros era “arbitrario.” En mi mente, la selección era de todo menos arbitraria. Sin embargo, en aquel momento no pude aportar datos objetivos para refutar esa afirmación. Desde aquel humillante momento, mi búsqueda ha sido encontrar una metodología defendible para cada decisión tomada en el proceso de la optimización de sistemas de sonido. No es suficiente saber que algo funciona, debemos saber por qué funciona. Aquellas metodologías de optimización son la base de este libro. No sabía nada del diseño de sistemas de sonido cuando empezó esta búsqueda en 1984. Casi todo lo que he aprendido sobre el diseño de sistemas de sonido viene del proceso de su optimización. El proceso de descomponer y reconstruir el diseño de otra gente me aportó una habilidad/perspectiva única para ver qué aspectos del diseño eran universalmente buenos, malos o peores. Soy muy afortunado de haber sido expuesto a todo tipo de diseños diferentes,

utilizando muchas marcas y modelos de altavoces diferentes, con todo tipo de materiales de programa y escalas. Mi enfoque ha sido la búsqueda de soluciones comunes para estas diferentes situaciones y su uso como estrategia repetible.

Desde aquella primera clase, y con muy pocas interrupciones, he estado optimizando sistemas de sonido y enseñando a todo aquél que quisiera atender mis seminarios todo lo que estaba aprendiendo. Mientras tanto, Thorny, había avanzado y había fundado una compañía cuyo enfoque principal era ofrecer servicios de optimización de sistemas de sonido usando sistemas FFT de dos canales. Había empezado a emerger la optimización como una especialidad distinta.

La presentación de SIA-SMAART en 1995 fue el resultado de la colaboración de Thorny y Sam Berkow con importantes contribuciones de Jamie Anderson y otros en los siguientes años. Esta alternativa de bajo coste trajo el analizador FFT de dos canales a la multitud y lo puso al alcance de todos los profesionales del audio en todos los niveles. Incluso así, pasaron años antes de que nuestra visión, en el año 1984, del analizador FFT como equipamiento de PA estándar se volviera una realidad. Incuestionablemente, ese tiempo ha llegado. El paradigma se ha invertido hasta el punto en que la práctica de ajustar un sistema sin instrumentación científica se vería con la misma sorpresa que lo contrario en los viejos tiempos.

Desde aquellos primeros días hemos ido avanzando con mejores herramientas—mejores sistemas de sonido, mejores herramientas de diseño de sonido y mejores analizadores. Sin embargo, el desafío nunca ha cambiado. Es muy improbable que cambie, puesto que el reto real está en las propiedades de la distribución espacial de la física acústica. Los altavoces que usamos para llenar la sala son mejores y la capacidad de procesamiento de señal está mucho más allá de lo que podríamos soñar en aquellos tiempos. El software de predicción está ahí para ilustrar la interacción entre altavoces, y tenemos analizadores asequibles y rápidos para proporcionarnos los datos.

Aun así, estamos luchando la misma batalla que siempre hemos luchado: la creación de una experiencia sonora

uniforme para los miembros de la audiencia sentados por todas partes en la sala. Es un desafío totalmente insuperable. No hay ningún ajuste o sistema de configuración perfecto. Lo mejor que podemos esperar es acercarnos a la uniformidad. Creo que es mucho mejor ser realista sobre nuestras posibilidades. Tendremos que tomar decisiones que sabemos degradarán unas áreas para beneficiar a otras. Y queremos que sean decisiones con información, no arbitrarias.

Este libro sigue todo el camino de transmisión desde la consola al oyente. Ese camino ha sufrido muchos cambios a lo largo de todo su viaje electrónico. Pero una vez que la forma de onda se transforma en su forma acústica entra en el mundo que Jean Baptiste Fourier encontró en el siglo dieciocho y Harry Olson en la década de los 40. Una vez que deja el altavoz, la forma de onda es puramente analógica y está a la merced de las leyes de la física acústica. Estos aspectos no cambiantes de la transmisión de sonido son el enfoque del 90 por cien de este libro.

Tomémonos un momento para ver un avance del adversario al que nos enfrentamos. El jugador principal es la interacción de altavoces con otros altavoces, y con la sala. Estas interacciones son extremadamente complejas por una parte, y aun así pueden descomponerse en dos relaciones dominantes: nivel relativo y fase relativa. La combinación de dos fuentes de sonido relacionadas creará una distribución espacial única de adiciones y sustracciones sobre el espacio. El reto es el hecho de que cada frecuencia se combina de manera diferente, creando un diseño único. El rango de frecuencias de nuestro sistema de sonido (30 a 18,000 Hz) abarca una proporción de 600:1 longitudes de onda. Una sola sala, desde la perspectiva de la distribución espacial sobre la frecuencia, es como un rascacielos de 600 pisos con diseños distintos en cada nivel. Nuestro trabajo es encontrar la combinación de altavoces y geometría de la sala que cree el mayor grado de uniformidad para esos 600 pisos. En la distribución espacial se tiene en cuenta contribución de cada elemento del altavoz y cada superficie. La parte que juega cada elemento será proporcional a la cantidad de energía que aporta en cada punto en el espacio. El resultado final

de la combinación se decidirá por la extensión a la cual hay acuerdo entre las respuestas de fase individuales en cada posición y en cada frecuencia. ¿Cómo vemos estos pisos? Con un programa de predicción acústica podemos ver el diseño de cada piso y compararlos para ver las diferencias. Este es el punto de vista del análisis de un solo rango de frecuencias sobre todo el espacio. Con un analizador acústico obtenemos una visión diferente. Vemos una posición en cada piso desde el tejado y a través de un tubo igual de grande que nuestro dedo. Este es el punto de vista de un solo punto en el espacio analizado sobre todo el rango de frecuencias.

Esta es una tarea agotadora. Pero es global. Este libro te proporcionará la información necesaria para obtener la visión de rayos-x que se necesita para ver a través de un edificio de 600 pisos desde arriba hasta abajo, y se puede hacer sin cálculo, integrales o ecuaciones diferenciales. Dejamos que el analizador y el programa de predicción hagan el trabajo pesado. Nuestro trabajo es cómo leer los rayos-x, no cómo construir una máquina de rayos-x.

La clave para entender el persistente tema de este libro, es la identificación de la fuente de sonido. Cada altavoz, no importa lo grande o pequeño que sea, juega un papel individual, y nunca pierde esa identidad individual. Las soluciones se activan localmente, elemento por elemento. Debemos aprender a reconocer las partes individuales de cada combinación, porque en ellas están las soluciones de su compleja interacción.

Esto no es una novela de misterio, por lo que no necesitamos esconder la conclusión hasta las últimas páginas. La clave de la uniformidad espacial es el aislamiento de las interacciones. Si dos elementos del altavoz se combinan en una forma consistente sobre la frecuencia, deben tener zonas de cobertura distintas. Si operan a niveles iguales, o cercanos, deben tener cierta cantidad de aislamiento angular, La separación puede ser mínima, pero sus patrones en el eje nunca se deben cruzar. Si no hay aislamiento angular, si los patrones se cruzan, entonces uno de los elementos debe ceder, por una reducción en nivel. La interacción de altavoces con la sala es similar a la interacción de altavoces con otros altavoces. Aquellas

superficies que retornan la energía de nuevo hacia nuestros altavoces serán de gran preocupación. La fuerza de las reflexiones interiores será inversamente proporcional a nuestra uniformidad espacial.

No hay un único diseño para un espacio. Hay acercamientos diferentes y cada uno involucra sacrificios en términos de uniformidad espacial y otros criterios clave. Sin embargo, hay ciertas direcciones en el diseño que mantienen abierta la posibilidad de uniformidad espacial y otras que hacen que esas esperanzas sean estadísticamente imposibles. Una de las ideas centrales de este texto estará dedicada a definir las configuraciones de altavoces que tienen potencial para la uniformidad espacial.

El sistema, una vez diseñado e instalado, debe ser optimizado. Si el diseño ha mantenido la puerta abierta para la uniformidad espacial, nuestra tarea será dirigir el sistema hacia esa puerta. No hay una solución única para la optimización en un espacio dado, pero uno vez más, sólo hay un número limitado de acercamientos que podemos esperar que nos traigan uniformidad espacial. La clave de la optimización es el conocimiento de las posiciones decisivas en la batalla por la uniformidad espacial. Las interacciones de los altavoces y las salas siguen un conjunto consistente de efectos sobre el espacio. La superposición de estos efectos uno sobre otro proporciona el mayor de los desafíos, pero en esta familia de interacciones no hay nada al azar. Es lógico y se puede aprender. Nuestras posiciones de medición serán los lugares donde podamos ver las progresiones a través de los cientos de capas del edificio y hacer los ajustes que afectarán a todas las posiciones en la sala. Como nuestro tiempo y recursos son limitados, debemos conocer nuestra posición exacta en el contexto de las progresiones de la interacción para discernir el significado de los datos medidos.

A menudo hemos visto el trabajo de los arqueólogos en los que se crea una interpretación completa de un dinosaurio a partir de unas pequeñas muestras de fragmentos de huesos. Sus conclusiones se basan completamente en pistas contextuales sacadas del conocimiento de las progresiones estándar de la anatomía animal. Si esas progresiones fueran aleatorias, no habría nada que no fuera el

100 por cien de los fósiles que pudiera proporcionar respuestas. Desde el punto de vista estadístico, incluso con cientos de posiciones de micro, nunca podremos ver más de unos pequeños fragmentos de la anatomía de nuestros altavoces en la sala. Debemos hacer que cada posición de medición cuente en la colección de datos que necesitamos para tener la visión general. Esto requiere un avanzado conocimiento de los hitos de progresión para que podamos ver una respuesta en el contexto de lo que se espera en una posición dada. Como veremos, no hay casi nada que se pueda concluir de nuestra aplicación en una sola posición. Las acciones que beneficiarán a más de un punto en la sala requieren información contextual sobre dónde encaja ese espacio dado en la distribución espacial general.

Altavoces definidos, en una configuración de diseño definida, con estrategias de optimización definidas. De eso trata este libro. Este libro no intenta ser una duplicación de los textos del audio en general. Esos libros están ampliamente disponibles, y aquí no se pretende abarcar las generalidades del audio por completo. Mi esperanza es proporcionar una perspectiva única que no se ha proporcionado antes, de manera que esté accesible a los profesionales del audio interesados en un entendimiento más profundo del comportamiento de los sistemas de sonido en el mundo práctico.

Hay algunos puntos que me gustaría destacar antes de empezar. El más notable es el hecho de que las realidades físicas de la construcción, fabricación e instalación de altavoces están prácticamente ausentes. En vez de eso, están descritas en los términos de las propiedades de rendimiento acústico en un espacio. Se describen muchas variedades de altavoces que sirven como ejemplos representativos del rendimiento del altavoz. Estos atributos sirven como marco de trabajo de la discusión. Los medios con los que los fabricantes cumplen con esos criterios generales no están en el objetivo de este libro. Y lo mismo es válido para los dispositivos electrónicos. El objetivo son las características de transmisión de sonido comunes de estos dispositivos, y no las características exclusivas de uno u otro modelo.

El segundo asunto concierne al acercamiento a tipos particulares de material de programa, como la música popular, teatro musical o servicios religiosos y sus respectivos recintos como estadios, salas de conciertos, salas de demo o iglesias. El enfoque aquí es la forma de la cobertura de sonido, la escala a la que puede ajustarse para adaptarse al tamaño de la sala y el nivel de sonido apropiado para el material de programa dado. Es la sala y el material de programa juntos los que crean una aplicación. Las leyes físicas no son diferentes para ninguna de estas aplicaciones, y el material de programa y las salas son tan intercambiables que los intentos de caracterizarlas de esta manera requerirían iteraciones interminables. Después de todo, las iglesias modernas de hoy en día pueden presentar música popular como en un estadio, o se puede tener un discurso y cantos en una catedral de piedra muy reverberante.

El tercer aspecto más notable es que hay un número sustancial de terminologías únicas, y en algunos casos, son una modificación de terminología estándar de uso general. En la mayoría de los casos, el marco de trabajo conceptual es único y no existen expresiones estándar reales. El joven campo de la optimización de sistemas de sonido todavía tiene que desarrollar métodos consistentes o un léxico de expresiones para los procesos aquí mostrados. En el caso de algunos de estos términos, en particular del término “crossover,” hay razones convincentes para modificar su uso existente, las cuales se revelarán en el cuerpo de este texto.

El libro está dividido en tres secciones. La primera sección, “Sistemas de Sonido,” explora el comportamiento de los sistemas de transmisión de sonido, la recepción del oído humano y la interacción de altavoces. El objetivo de esta sección es conseguir un entendimiento global del camino de la señal, los peligros que se encontrará durante el camino y cómo se percibirá el producto final cuando llegue a su destino. La segunda sección, “Diseño,” aplica las propiedades de la primera sección a la creación del diseño de un sistema de sonido. Los objetivos son conseguir un entendimiento global de las herramientas y técnicas requeridas para generar un diseño que creará

un modelo de transmisión/recepción exitoso. La sección final es la “Optimización.” Conciérne a la medición del sistema diseñado e instalado, su verificación y su calibración en el espacio.

Este nunca ha sido un viaje solitario. Hay muchos que han contribuido a este campo y que comparten los objetivos comunes e intereses que son el tema de este libro. Desde el principio de este proyecto he solicitado a varios miembros de la comunidad que compartieran sus perspectivas en sus propias palabras. Sus voces pueden ser oídas a lo largo de este texto. En el futuro, espero que añadas tu voz a este campo de estudio.

Agradecimientos

El desarrollo real de este libro abarca más de veinte años en el campo de la optimización de sistemas de sonido. Si no fuera por los descubrimientos y el apoyo de John y Helen Meyer, nunca me habría involucrado en este campo. Ellos han dedicado sustanciales cantidades de dinero y recursos de personal que han ayudado directamente en la continua investigación y desarrollo que han llevado a este escrito. Además, me gustaría agradecer la contribución de cada cliente que me dio la oportunidad de realizar mis experimentos en sus sistemas de sonido. Cada una de estas experiencias dio paso a una educación que no se podría igualar en ningún otro sitio. En particular, me gustaría dar las gracias a David Andrews Andrew Bruce, John Cardenale, Tom Clark, Mike Cooper, Jonathan Deans, François Desjardin, T. C. Furlong, Roger Gans, Scott Gledhill, Andrew Hope, Abe Jacob, Akio Kawada, Tony Meola, Frank Pimiskern, Bill Platt, Pete Savel, Mike Shannon, Rod Sintow, Bob Snelgrove y Tom Young, quienes me han dado múltiples oportunidades a través de los años para refinar los métodos descritos aquí.

También me gustaría dar las gracias a todos los que han asistido a mis seminarios, puesto que la respuesta en tiempo real en este contexto constituye un constante reto intelectual y un estímulo para mí. Mis compañeros instructores en este campo, del pasado y presente, que han contribuido con gran esfuerzo y colaboración a través de compartir y discutir ideas. Entre ellos destacan Jamie Anderson, Sam Berkow, Jim Cousins, Mauricio Ramírez y Hiro Tomioka.

También estoy agradecido a mis compatriotas en el campo que han compartido sus experiencias conmigo. Algunos de ellos contribuyeron con sus perspectivas personales, las cuales están repartidas a lo largo de este volumen.

En el curso de la escritura de este libro, hubo un número de gente que proporcionó un apoyo y una dirección inmensurablemente importante. Fue un gran test de resistencia para todos nosotros, pero en cada paso del camino tenía a alguien que me daba respuestas y comprobaciones reales. Con su insistencia, empujé más allá

de mi experiencia previa y se abrieron nuevas avenidas de conocimiento que ayudan a unir nuestro joven campo con las disciplinas previamente establecidas. Muchos de los gráficos en este libro contienen datos de fuentes que me gustaría destacar aquí. Las siguientes figuras contienen datos que fueron adquiridos mientras trabajaba en Meyer Sound y su permiso para la publicación es reconocido con gratitud: Figuras 1.15, 1.25, 2.35–37, 9.6, 9.12–16, 10.8, 10.21 y 10.27. Los datos presentados en las Figuras 1.2, 1.7, 1.8 y 8.18 fueron creados usando los cálculos encontrados en los archivos creados por el “Maestro del Excel”, Mauricio Ramirez. Los gráficos 3-D (Figura 8.14) fueron adaptados de las animaciones creadas por Greg Linhares.

Gracias a toda la gente que ayudó en el proceso de hacer de este libro una realidad física, como mi editora Catharine Steers, Margaret Denley, Lisa Jones y Stephanie Barrett en Elsevier. Gracias adicionales a Margo Crouppen por su apoyo a lo largo de todo el proceso de publicación.

Las siguientes personas ayudaron en el esfuerzo de comprobar, presentar fotos u otros aspectos relacionados, los cuales fueron de mucha ayuda y por los cuales estoy profundamente agradecido: Jamie Anderson, Justin Baird, Sam Berkow, David Clark, François Desjardin, Larry Elliott, Josh Evans, John Huntington, Luke Jenks, Dave Lawler, Greg Linhares, Mauricio Ramírez, Tom Young, y Alexander (Thorny) Yuill-Thornton.

Finalmente, mi mujer Merridith asumió la enorme carga de mi extremadamente miope enfoque en estos problemas durante un año completo. Ella fue mi agente, mi mánager, mi editora, mi correctora y mi animadora.

Imágenes de página, de izquierda a derecha: Sección 1— François Desjardin, Josh Evans, Josh Evans, Autor, Mauricio Ramirez; Sección 2—Autor, Autor, Autor, Mauricio Ramirez, Autor; Sección 3—Bob Maske, Bob Hodas, Autor, Kazayuki Kado, Miguel Lourtie.

Fotos de la portada, de izquierda a derecha: TC Furlong, Autor, Josh Evans, Miguel Lourtie.

Sección 1: Sistemas de Sonido



Transmisión



transmisión *n.*
transmitiendo o siendo
transmitido; programa de
emisión

transmitir *v.t.* **1.** pasar,
dar, transferir, comunicar. **2.**
permitir el paso a través, ser
un medio para, servir para
comunicar (calor, luz, sonido,
electricidad, emoción, señal,
noticias)

Diccionario Concise Oxford

Objetivos de la Transmisión

La Transmisión es el transporte de una forma de onda de un lugar a otro. La calidad de la transmisión se juzga por la precisión en la semejanza con la forma de onda original. Capturamos la forma de onda acústica o electrónica original con la intención de reconstruirla eventualmente en una forma de onda acústica para que llegue a nuestros oídos, pero la probabilidad está en nuestra contra. De hecho, tenemos cero posibilidades de éxito. Lo mejor que podemos esperar es **minimizar** la distorsión de la forma de onda, es decir, controlar los daños. Ese es el objetivo principal de todos los esfuerzos descritos en este libro. Puede sonar decepcionante, pero es mejor empezar con una valoración realista de las posibilidades. Nuestro objetivo principal es uno al que nos podemos aproximar, pero que nunca alcan-

zaremos. Habrá un gran número de toma de decisiones más adelante que dependerán, ante todo, de aquello que proporcione el menor daño a la forma de onda.

Nuestro estudio principal sobre la transmisión observará tres modos: electrónico de nivel de línea, electrónico de nivel de altavoz y acústico. Si cualquier enlace en la cadena de transmisión falla, nuestra misión falla. El enlace más vulnerable en la cadena es, sin duda, el viaje acústico final desde el altavoz al oyente. Este camino está plagado de poderosos adversarios que toman la forma de nuestra señal (reflexiones y llegadas de otros altavoces en nuestro sistema), y distorsionan la forma de onda, a menos que sean copias exactas y lleguen exactamente en el mismo momento. Empezaremos con las propiedades de transmisión comunes a todas las partes del camino de la señal.

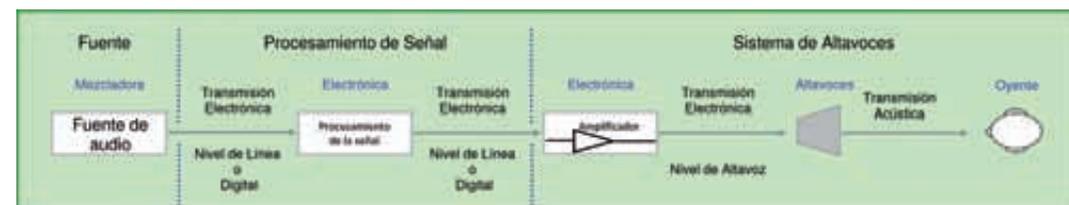


Figura 1.1 Flujo de transmisión desde la fuente de señal al oyente.

Definición de Transmisión de Audio

Una señal de audio es un cambio constante: el movimiento de las moléculas y los electrones transfiriendo energía desde una fuente vibratoria. Cuando la señal de audio deja de cambiar, deja de existir como audio. A medida que las señales de audio se propagan hacia el exterior, las moléculas y los electrones se desplazan hacia delante y hacia detrás, pero en realidad no van a ningún sitio, siempre vuelven a su origen. La extensión del cambio es la **amplitud**, también referida como **magnitud**. Un viaje de ida y vuelta al origen es un **ciclo**. El viaje lleva un tiempo, y ese espacio de tiempo es el **periodo**, que se da en segundos, o por cuestiones prácticas, en milisegundos (ms). El recíproco del periodo es la **frecuencia**, que es el número de ciclos completados en un segundo y se expresa en hercios (Hz). El viaje es continuo y sin principio ni fin definido. El ciclo puede empezar en cualquier punto del viaje y se completa con el regreso a la misma posición. La naturaleza radial del viaje hace necesario que encontremos una forma de fijar nuestra posición en el círculo: este parámetro es lo que se llama la **fase** de la señal. Los valores se expresan en grados, desde 0 (punto de origen) hasta 360° (un viaje de ida y vuelta completo), y el punto de medio ciclo en el camino de la fase, 180 grados, será de un especial interés a medida que avancemos.

Todas las transmisiones requieren de un **medio**, es decir, la entidad a través de la cual se pasa de un punto a otro, hecho de moléculas o electrones. En nuestro caso el medio primario son los cables (electrónico) y el aire (acústico), pero entretanto, también hay medios magnéticos y mecánicos. El proceso de transferir la energía de audio entre medios se conoce como **transducción**. La distancia física necesaria para completar un ciclo en un medio particular es la **longitud de onda**, y normalmente se expresa en metros o en pies. El tamaño de la forma de onda para una frecuencia dada es proporcional a la velocidad de transmisión de nuestro medio.

La naturaleza física del componente de amplitud de la forma de onda es dependiente del medio. En el caso acústico, el medio es el aire y las vibraciones se expresan

como cambios en la presión. La mitad del ciclo que es mayor que la presión ambiental se llama **presurización**, mientras que la parte de baja presión se llama **rarefacción**. El movimiento de un altavoz hacia adelante en el aire crea una presurización y el movimiento hacia detrás crea rarefacción.

La transmisión pasa a través del medio, una distinción importante. A través del medio pueden pasar múltiples transmisiones a la vez.

Para las señales electrónicas, el cambio de presión eléctrico se expresa en **voltaje**. Las presiones positivas y negativas se expresan simplemente como voltaje positivo y negativo. Este movimiento también se llama **corriente alterna** (AC) puesto que alterna por encima y por debajo del voltaje ambiental, también llamado **corriente continua** (DC).

Para nuestros esfuerzos es crítico tener un amplio conocimiento sobre la relación de la frecuencia, el periodo y la longitud de onda. La relación de estos tres parámetros juega un gran papel en nuestras estrategias de diseño y optimización.

Tiempo y Frecuencia

Empecemos con un tono simple, llamado onda senoidal, y la relación de frecuencia (F) y periodo (T):

$$T = 1/F \text{ y } F = 1/T$$

donde T es el periodo de tiempo de un ciclo en segundos y F es el número de ciclos por segundo (Hz).

Para ilustrar este punto usaremos una frecuencia y un delay convenientes por su claridad: 1000 Hz (o 1 kHz) y 1/1000 segundos (o 1 ms).

Si conocemos la frecuencia podemos resolver el tiempo, y si sabemos el tiempo podemos resolver la frecuencia. Por tanto

$$\begin{aligned} F=1/T \quad 1000\text{Hz} &\iff 1/1000\text{s} \\ 1000\text{Hz} &\iff 0.001\text{s} \\ 1000\text{Hz} &\iff 1\text{ms} \end{aligned}$$

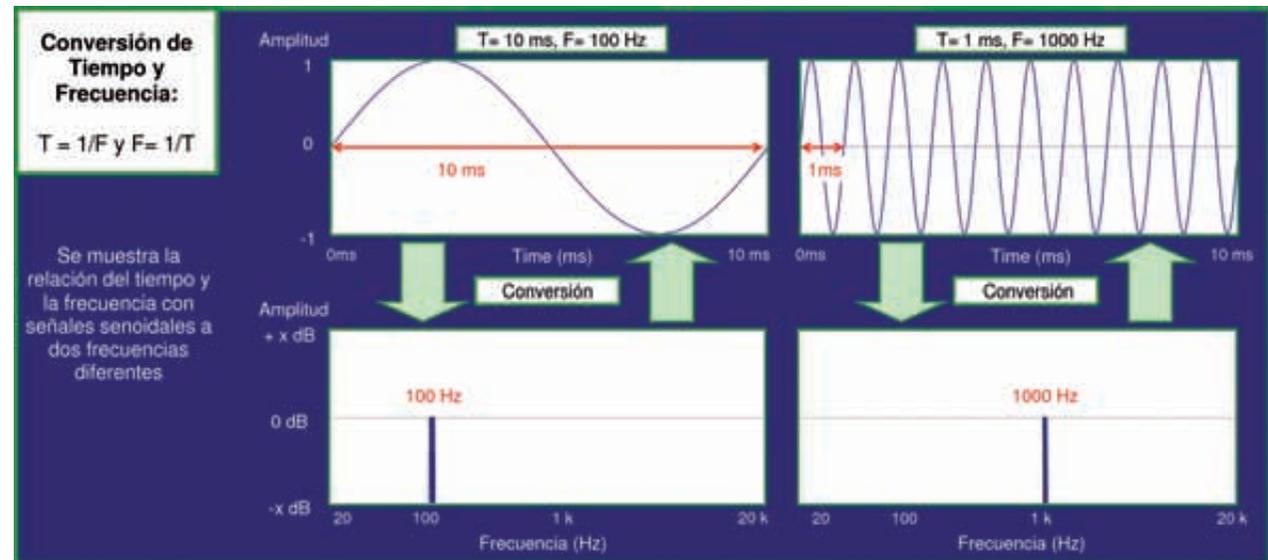


Figura1.2 Amplitud vs. tiempo convertido a amplitud vs. frecuencia

$$T=1/F \quad 0.001 \text{ s} \longleftrightarrow 1/1000 \text{ Hz}$$

$$1 \text{ ms} \longleftrightarrow 1/1000 \text{ Hz}$$

A lo largo de este texto abreviaremos el periodo de tiempo por el término “tiempo” para connotar el periodo de tiempo de una frecuencia en particular.

La frecuencia es el parámetro más conocido, ya que está muy relacionado con el término musical “tono.” La mayoría de los ingenieros de audio se entienden primero en términos musicales, ya que pocos llegamos a este mundo tras una larga fascinación por la física acústica. Sin embargo, debemos ir más allá de la frecuencia/tono, puesto que nuestro trabajo es “ajustar” el sistema de sonido, no afinar los instrumentos musicales. En este mundo tenemos que tener siempre presente la conexión entre frecuencia, periodo y longitud de onda. La frecuencia de 1 kHz solamente existe con su recíproco de 1 ms. Esto no depende del medio, ni de la temperatura, ni es parte de un estándar establecido: es una de las pocas verdades absolutas del audio. Si el audio viaja por un cable, estos dos parámetros serán lo suficientemente amplios

para nuestras discusiones. Si es por el aire, necesitaremos añadir una tercera dimensión: la longitud de onda. Una señal de 1 kHz solo existe en el aire como una longitud de onda tan larga como la distancia desde el codo al puño. El comportamiento a 1 kHz se regirá por la realidad física de su periodo de tiempo y su longitud de onda. ¡La primera regla de la optimización es no considerar nunca una señal acústica sin considerar los tres parámetros!

Longitud de Onda

¿Por qué deberíamos tener en cuenta la longitud de onda? Después de todo, no hay analizadores acústicos que muestren estos datos. No hay procesadores de señal que dependan de ella para el ajuste. Hay algunas aplicaciones en las que podemos ignorar felizmente la longitud de onda, por ejemplo: cuando usamos un solo altavoz en un entorno libre de reflexiones. Para todo el resto de aplicaciones, la longitud de onda no solo es relevante: es

decisiva. La longitud de onda es el parámetro crítico en la suma acústica. La combinación de señales en una frecuencia dada está gobernada por el número de longitudes de onda que las separa. Aquí hay mucho en juego, como lo evidencia el hecho de que el Capítulo 2 esté dedicado exclusivamente a este tema: suma. Las combinaciones de longitudes de onda pueden oscilar desde una adición máxima hasta una cancelación máxima, y puesto que planeamos hacer muchas combinaciones, más vale que seamos conscientes de la longitud de onda.

El tamaño de la longitud de onda es proporcional a la velocidad única de transmisión del medio. Una frecuencia dada tendrá una longitud de onda diferente en su forma electrónica (sobre 500,000 veces más larga) que su versión acústica. Si se cambia el medio, su velocidad de transmisión y todas las longitudes de onda cambiarán con él.

La fórmula de la longitud de onda es

$$L = c/F$$

donde L es la longitud de onda en metros, c es la velocidad de transmisión del medio, y F es la frecuencia (Hz).

Tabla 1.1

Lenguaje común	Sistema Imperial/Americano	Sistema Métrico
Vel. sonido en el aire a 0°	1052 pies/seg.	331.4 m/s
+ Ajuste para temperatura ambiente	+1 (1.1 x T) Temperatura T en °F	+1 (0.607 x T) Temperatura T en °C
= Vel. sonido a temperatura ambiente	= c pies/segundo	= c metros/segundo

La velocidad de transmisión en el aire es de las más lentas. El agua es un medio muy superior en términos de velocidad y respuesta en altas frecuencias; sin embargo, los peligros de electrocutamiento y ahogo hacen de este un medio de re-fuerzo sonoro poco popular (natación sincronizada aparte). Nos quedaremos con el aire.

Las fórmulas para la velocidad del sonido en el aire se muestran en la Tabla 1.1.

Frecuencia (Hz)	Periodo (ms)	Longitud Onda (Temp sala)		Tamaño comparable
		(m)	(ft)	
20	50.00	17.24	56.56	
25	40.00	13.79	45.07	Contenedor intermodal
32	31.75	10.94	35.77	
40	25.00	8.62	28.17	Longitud camión carga de equipo
50	20.00	6.90	22.54	1/2 tamaño contenedor intermodal
63	15.87	5.47	17.89	Longitud de un todoterreno
80	12.50	4.31	14.09	Longitud coche
100	10.00	3.45	11.27	Longitud coche compacto
125	8.00	2.76	9.01	Demasiado ancho para el camión
160	6.25	2.15	7.04	Shaquille O'Neal
200	5.00	1.72	5.63	Altura media
250	4.00	1.38	4.51	Altura del hombro
315	3.17	1.09	3.58	
400	2.50	0.86	2.82	
500	2.00	0.69	2.25	Longitud del brazo
630	1.59	0.55	1.79	
800	1.25	0.43	1.41	
1.000	1.00	0.34	1.13	Codo a puño
1.250	0.80	0.28	0.90	Pie de hombre
1.600	0.63	0.22	0.70	Pie de mujer
2.000	0.50	0.17	0.56	Ocho dedos
2.500	0.40	0.14	0.45	
3.150	0.32	0.11	0.36	CD/DVD
4.000	0.25	0.086	0.28	Cuatro dedos
5.000	0.20	0.069	0.23	
6.300	0.16	0.055	0.18	
8.000	0.13	0.043	0.14	Dos dedos
10.000	0.10	0.034	0.11	
12.500	0.08	0.028	0.09	
16.000	0.06	0.022	0.07	Un dedo
20.000	0.05	0.017	0.06	

Figura 1.3 Tabla de frecuencia, periodo y longitud de onda (a temperatura ambiente) para frecuencias por 1/3 de octava

Por ejemplo a 22°C:

$$c = (331.4 + 0.607 \times 22) \text{ metros/segundo}$$

$$c = 344.75 \text{ metros/segundo}$$

Ahora que podemos calcular la velocidad de transmisión, podemos determinar la longitud de onda para una frecuencia dada/periodo de tiempo: $L = c/F$

Donde L es la longitud de onda en metros, c es la velocidad de transmisión del sonido, y F es la frecuencia (Hz).

El rango de frecuencia audible que se muestra en la mayoría de los libros es de 20 Hz a 20 kHz. Pocos altavoces son capaces de reproducir los extremos de 20 Hz o 20

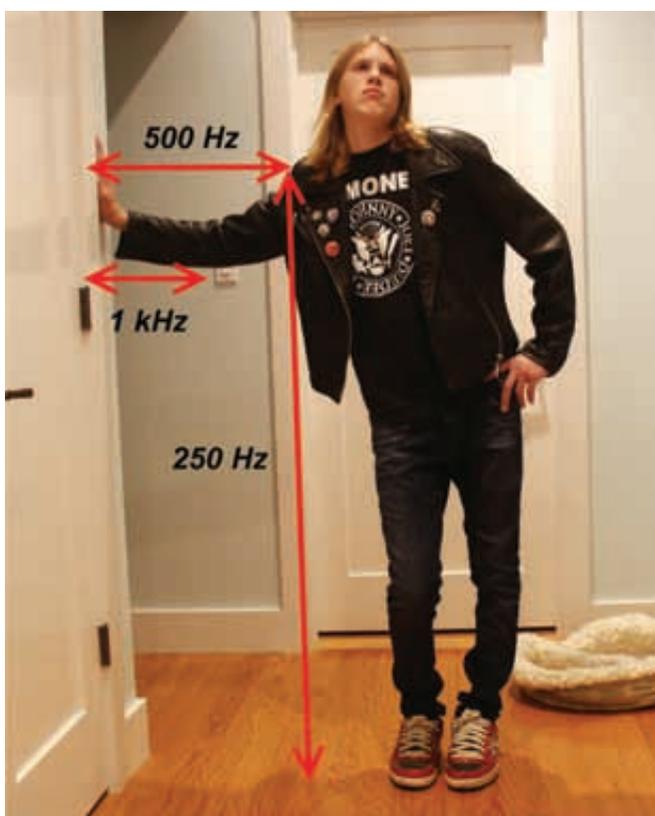


Figura 1.4 Una referencia útil para longitudes de onda cortas.

kHz a un nivel de potencia suficiente como para jugar un papel significativo. Es más útil limitar la discusión a aquellas frecuencias que es más probable encantarse normalmente: 31 Hz (la nota B en un bajo de cinco cuerdas) hasta 18 kHz. Las longitudes de onda en esta banda van desde el tamaño del ancho de un dedo hasta un contenedor de mercancías estándar. Las longitudes de onda más largas son como unas 600 veces mayores que las más pequeñas

Efectos de la Temperatura

Como vimos anteriormente, la velocidad del sonido en el aire depende ligeramente de la temperatura. A medida que la temperatura ambiente aumenta, la velocidad del sonido se incrementa, y por lo tanto, la longitud

Efectos de la Temperatura en la Velocidad del Sonido						
	C				C	
Temp	Velocidad	Cambio	Cambio	Temp	Velocidad	Cambio
Grados (C)	m/seg	Grados (C)	velocidad (%)	Grados (F)	(pies/seg)	Temp (Grados (F))
0.0	331.8	-22.2	3.8%	32	1087	-40
1.1	332.1	-21.1	3.7%	34	1089	-38
2.2	332.7	-20.0	3.5%	36	1090	-36
3.3	333.6	-18.9	3.3%	38	1094	-34
4.4	334.1	-17.8	3.1%	40	1096	-32
5.6	334.8	-16.7	2.9%	42	1098	-30
6.7	335.4	-15.6	2.7%	44	1100	-28
7.8	336.1	-14.4	2.5%	46	1103	-26
8.9	336.9	-13.3	2.3%	48	1105	-24
10.0	337.5	-12.2	2.2%	50	1107	-22
11.1	338.1	-11.1	2.0%	52	1109	-20
12.2	338.8	-10.0	1.8%	54	1111	-18
13.3	339.5	-8.9	1.6%	56	1114	-16
14.4	340.2	-7.8	1.4%	58	1116	-14
15.6	340.8	-6.7	1.2%	60	1118	-12
16.7	341.5	-5.6	1.0%	62	1120	-10
17.8	342.2	-4.4	0.8%	64	1122	-8
18.9	342.9	-3.3	0.6%	66	1125	-6
20.0	343.5	-2.2	0.4%	68	1127	-4
21.1	344.2	-1.1	0.2%	70	1129	-2
22.2	344.9	0.0	0.0%	72	1131	0
23.3	345.6	1.1	-0.2%	74	1133	2
24.4	346.2	2.2	-0.4%	76	1136	4
25.6	346.9	3.3	-0.6%	78	1138	6
26.7	347.6	4.4	-0.8%	80	1140	8
27.8	348.3	5.6	-1.0%	82	1142	10
28.9	348.9	6.7	-1.2%	84	1144	12
30.0	349.6	7.8	-1.4%	86	1147	14
31.1	350.3	8.9	-1.6%	88	1149	16
32.2	351.0	10.0	-1.8%	90	1151	18
33.3	351.6	11.1	-2.0%	92	1153	20
34.4	352.3	12.2	-2.2%	94	1155	22
35.6	353.0	13.3	-2.3%	96	1158	24
36.7	353.7	14.4	-2.5%	98	1160	26
37.8	354.3	15.6	-2.7%	100	1162	28

Figura 1.5 Tabla de velocidad del sonido, periodo y longitud de onda a distintas temperaturas

de onda se expande. Este comportamiento puede afectar ligeramente la respuesta de nuestros sistemas durante la duración de un evento, ya que la temperatura está sujeta a cambios incluso en los ambientes más controlados. Sin embargo, y aunque normalmente se le da una atención considerable, este no es un gran factor en la amplia composición de las cosas. No es probable que un sistema pobremente diseñado mejore con los cambios del tiempo. Y tampoco es práctico realizar análisis ambientales continuos sobre las extensas áreas de una audiencia para compensar la sala. Para nuestros propósitos, consideraremos la velocidad del sonido fija y aproximadamente a temperatura ambiente. Cuando la variación de temperatura sea relevante para nuestros propósitos, se especificará.

La relación entre la temperatura y la velocidad del sonido puede aproximarse de la siguiente manera: Un cambio del 1 por cien en la velocidad del sonido ocurre con un cambio de temperatura de 5°C o 10°F.

La Forma de Onda

No hay límite en la complejidad de la señal de audio. Las ondas a múltiples frecuencias pueden combinarse

simultáneamente para crear una señal nueva y única que sea la suma de las señales contribuyentes. Esta señal compuesta es la forma de onda, que contiene una mezcla ilimitada de frecuencias de audio con amplitudes y relaciones de fase variables. La forma de la onda compleja depende de los componentes que la crean y varía constantemente a medida que lo hacen. Un parámetro clave es cómo la frecuencia de cada una de las señales contribuyentes afecta a la forma de onda combinada. Si se añaden dos señales de frecuencias distintas, la onda llevará la forma de ambas ondas independientemente. La frecuencia más alta se añadirá a la forma de la onda de frecuencia más baja. La fase de las frecuencias individuales afectará a la forma general, pero las distintas frecuencias mantendrán sus identidades separadas. Estas frecuencias pueden separarse después con un filtro (como en tu oído) y escucharse como sonidos separados. Cuando se combinan dos señales de la misma frecuencia, se crea una señal nueva y única que no puede separarse con filtros. En este caso, la relación de fase tendrá un efecto decisivo en la naturaleza de la forma de onda combinada.

Las ondas existen en muchas formas, y los componentes listados anteriormente están presentes sin importar la forma de la onda. Todas las formas captan la onda de

Figura 1.6 Tabla de referencia de algunos términos más comunes usados para describir y cuantificar una onda de audio

Referencia de Terminología de la Forma de Onda			
Nombre	Símbolo	Unidades	Descripción
Ciclo			Un viaje de ida y vuelta en el camino de una señal de audio
Período	T	(Segundos)	Tiempo requerido para completar un ciclo
Frecuencia	F	(Hz)	Número de ciclos completados en un segundo
Longitud de onda			La distancia viajada para completar un ciclo
Fase		(Grados)	La expresión radial del porcentaje de ciclo completado
Amplitud	V	Voltios	El nivel de la señal de audio como valor eléctrico absoluto
	V _{rms}	Voltios	El voltaje root/mean/squared. Este representa el voltaje DC equivalente para las señales AC por encima y por debajo del punto de cruce cero.
	V _{peak}	Voltios	El voltaje más alto por encima (o debajo) del punto de cruce cero.
	V _{p-p}	Voltios	La apertura de voltaje entre los puntos más altos positivo y negativo
	dB	Decibelios	La relación de nivel entre dos señales
	dBV	Decibelios	La relación de nivel relativa a 1.0 voltios RMS
	dBu	Decibelios	La relación de nivel relativa a 0.775 voltios RMS
	dB SPL	Decibelios	La relación de nivel acústico relativo al umbral de escucha
Factor Cresta		Decibelios	La relación entre los valores pico y rms de la señal
Forma de onda			La señal de audio expresada como amplitud sobre el tiempo

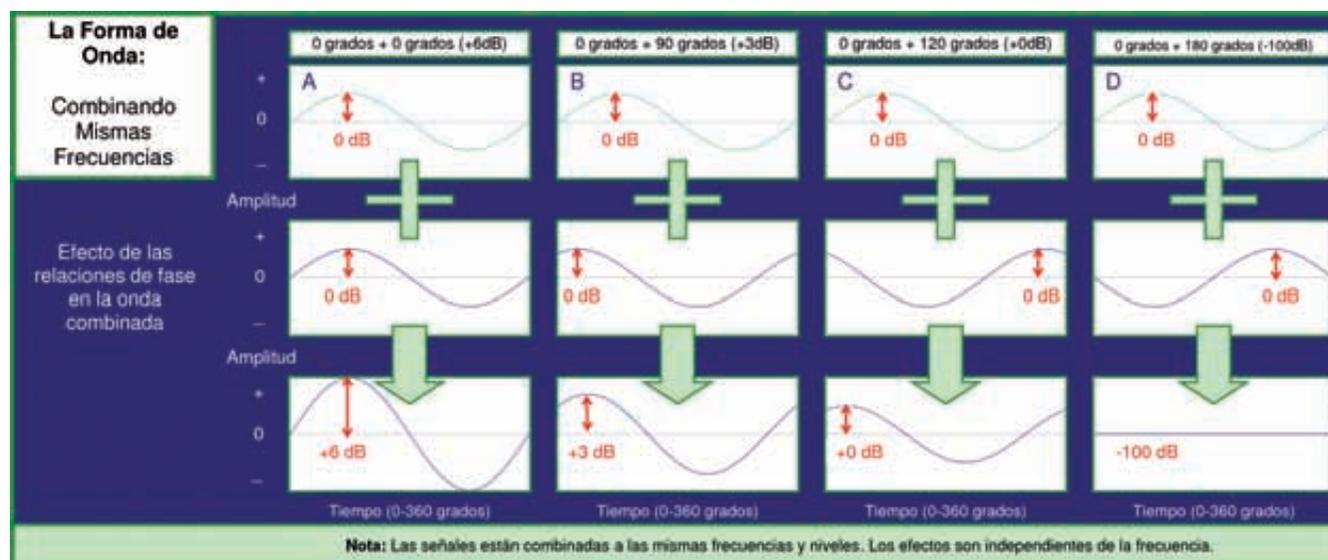


Figura 1.7 Combinación de ondas de la misma frecuencia al mismo nivel con diferentes relaciones de fase: (A) 0 grados de fase relativa combina a 16dB de amplitud, (B) 90 grados de fase relativa combina a 13dB de amplitud, (C) 120 grados de fase relativa combina a 10dB, (D) 180 grados de fase relativa cancela.

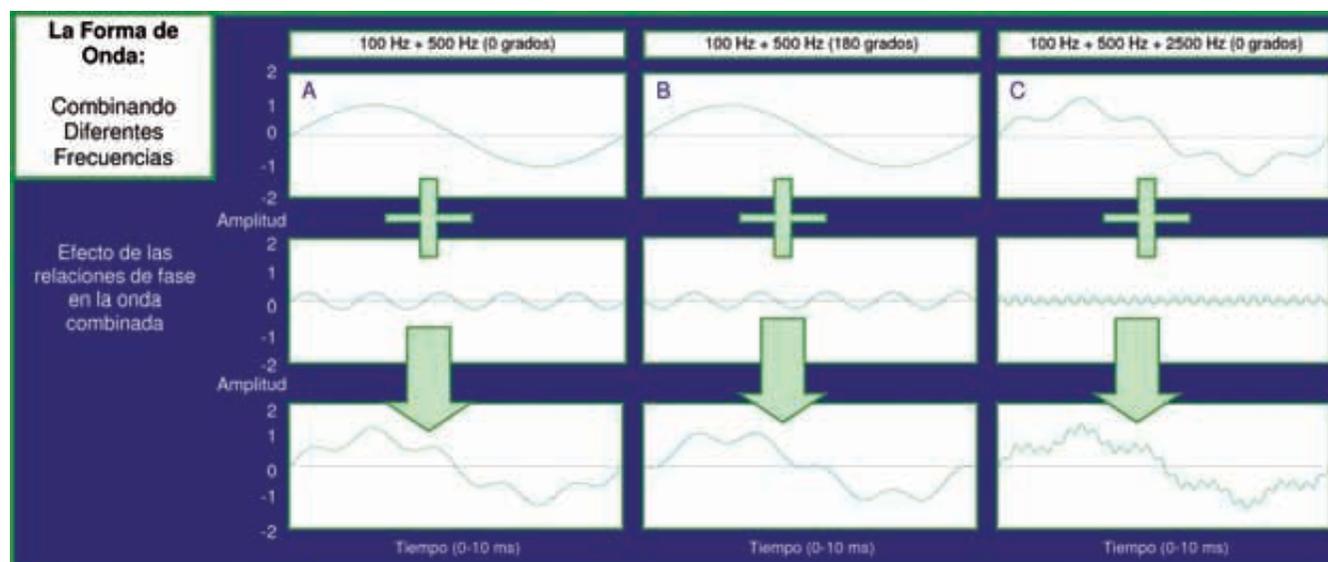


Figura 1.8 Combinación de ondas de distintas frecuencias con niveles y relaciones de fase distintas. (A) La segunda frecuencia es 5 veces mayor y 12dB menor en nivel que la primera. La relación de fase es 0 grados. Nota que ambas frecuencias pueden verse en la forma combinada. (B) Igual que (A) pero con relación de fase relativa a 180°. Nota que no hay cancelación en la onda combinada. La orientación del trazo de las frecuencias altas se ha movido, pero la de las frecuencias bajas no ha cambiado. (C) Combinación de (A) con una tercera. La tercera frecuencia es 25 veces la frecuencia más baja y 18dB menor en nivel. La relación de fase coincide para todas. Se pueden distinguir las tres frecuencias en la onda.

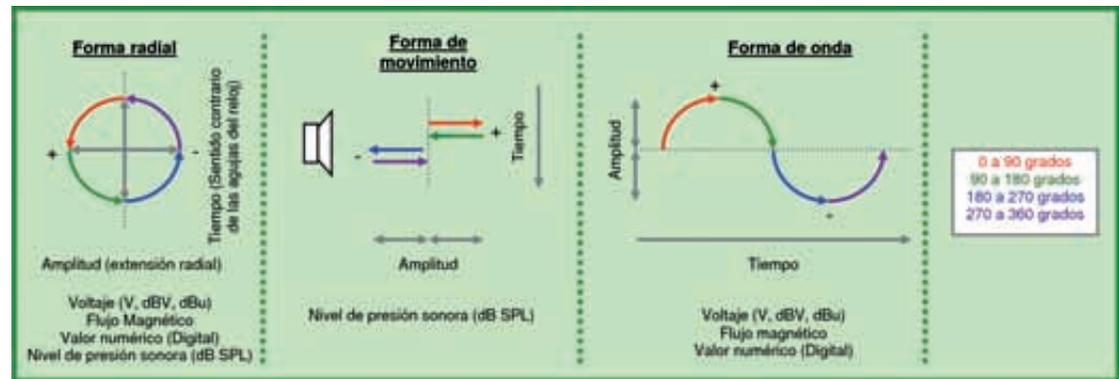


Figura 1.9 Tres representaciones de la onda de audio

audio original de la misma manera básica. Los tipos de onda analógicas incluyen la electrónica, la magnética, la mecánica, la óptica y la acústica. Las señales de audio digitales son normalmente electrónicas, magnéticas u ópticas, pero el mecanismo de la transferencia de datos no es crítico aquí: podrían ser tarjetas de fichar siempre y cuando podamos moverlas lo suficientemente rápido para leer los datos. Cada medio graba la onda en diferentes formas de energía, adecuada a los particulares del medio de transmisión, junto con sus propias vulnerabilidades y limitaciones. El audio digital es entendido mucho más fácilmente cuando se ve una traducción matemática de la onda. Para estos propósitos, no es diferente del analógico, el cual puede ser cuantificado matemáticamente en cualquiera de sus formas de energía residentes.

La señal de audio puede visualizarse de tres formas diferentes como se muestra en la Fig. 1.9. Un ciclo se divide en 4 cuadrantes de 90 grados cada uno. Este cuadro ilustra el movimiento de la señal desde un punto de reposo hasta la amplitud máxima en ambas direcciones y el regreso al punto origen. Es la representación del movimiento de la partícula en el aire vigorizada por una fuente de sonido, como un altavoz. Ayuda también a ilustrar el movimiento de la onda hacia adelante y hacia atrás, en vez de alejarse del altavoz. No debería confundirse un altavoz con un ventilador. El desplazamiento máximo se encuentra en los puntos de 90° y 270° en el

ciclo. A medida que la amplitud incrementa, el desplazamiento desde el punto de equilibrio aumenta. A medida que la frecuencia aumenta, el tiempo transcurrido para completar el ciclo disminuye.

La forma radial representa la señal en un círculo. El punto de origen de la onda corresponde al punto de comienzo del valor de fase, que podría ser cualquier punto en el círculo. El ciclo se completa cuando se regresa al valor de fase del punto de origen. Esta representación muestra el papel que jugará la fase. La diferencia entre las posiciones relativas de dos fuentes de sonido cualquiera en este gráfico radial determinará cómo reaccionará el sistema cuando se combinen.

La representación de la onda senoidal es la más familiar para los ingenieros de sonido, y puede verse en un osciloscopio. Se rastrea el valor de amplitud con respecto al tiempo y se calca la forma de onda en el orden en que pasa la señal. Los conversores de analógico a digital capturan esta forma de onda y crean una valoración matemática de la onda en amplitud vs. tiempo.

Cuantificar la Transmisión

Decibelios

Las amplitudes de la transmisión, también conocidas como **niveles**, se expresan comúnmente en **decibelios**



Perspectivas: He intentado aportar lógica, razonamiento y física a mis problemas en aplicaciones de audio. He descubierto que, cuando la causa de un evento es atribuido a la "magia," significa que no tenemos los datos suficientes para entender el problema, o no entendemos las fuerzas involucradas en producir el fenómeno observado.

Dave Revel

Referencia Relación Decibelio							
20 x log (Nivel ₁ /Nivel ₂)				10 x log (Potencia ₁ /Potencia ₂)			
Presión (SPL)				Potencia (P)			
Voltaje (V)				Potencia (P)			
Corriente (I)				Potencia (P)			
Valor	Relación	Valor	Relación	Valor	Relación	Valor	Relación
(dB)	(N ₁ /N ₂)	(dB)	(N ₁ /N ₂)	(dB)	(N ₁ /N ₂)	(dB)	(N ₁ /N ₂)
0,0	1,00	0,0	1,00	0,0	1,00	0,0	1,00
1,0	1,12	-1,0	0,89	0,5	1,12	-0,5	0,89
2,0	1,26	-2,0	0,79	1,0	1,26	-1,0	0,79
3,0	1,41	-3,0	0,71	1,5	1,41	-1,5	0,71
4,0	1,59	-4,0	0,63	2,0	1,59	-2,0	0,63
5,0	1,78	-5,0	0,56	2,5	1,78	-2,5	0,56
6,0	2,00	-6,0	0,50	3,0	2,00	-3,0	0,50
7,0	2,24	-7,0	0,45	3,5	2,24	-3,5	0,45
8,0	2,51	-8,0	0,40	4,0	2,51	-4,0	0,40
9,0	2,82	-9,0	0,35	4,5	2,82	-4,5	0,35
10	3,16	-10	0,32	5,0	3,16	-5,0	0,32
12	4,00	-12	0,25	6,0	4,00	-6,0	0,25
14	5,00	-14	0,20	7,0	5,00	-7,0	0,20
15	5,63	-15	0,18	7,5	5,66	-7,5	0,18
18	8,00	-18	0,13	9,0	8,00	-9,0	0,13
20	10	-20	0,10	10	10	-10	0,10
26	20	-26	0,05	13	20	-13	0,05
32	40	-32	0,025	16	40	-16	0,025
38	80	-38	0,013	19	80	-19	0,013
40	100	-40	0,010	20	100	-20	0,010
60	1.000	-60	0,001	30	1.000	-30	0,001
80	10.000	-80	0,0001	40	10.000	-40	0,0001
100	100.000	-100	0,00001	50	100.000	-50	0,00001

Figura 1.10 La relación de la salida con la entrada puede convertirse a dB con esta tabla de referencia. Para comparar un nivel dado con uno estándar, Level₁ es el nivel dado y Level₂ es el estándar. Para derivar la ganancia de un equipo, Level₁ es el nivel de salida y Level₂ es el nivel de entrada. Asimismo, se puede averiguar la potencia de ganancia sustituyendo los parámetros de potencia

(dB), una unidad que describe una relación entre dos medidas. El decibelio es un sistema de escala logarítmica usado para describir relaciones con un rango de valores muy amplio. El uso del decibelio tiene el beneficio añadido de acercarse a nuestra percepción de los niveles sonoros, la cual es generalmente logarítmica. Hay varias escalas de dB que son aplicables a la transmisión. Puesto que los decibelios están basados en relaciones, siempre son una escala relativa. La cuestión es: ¿relativa a qué? En algunos casos queremos comparar un nivel relativo con un estándar fijo. Debido a que el audio está cambiando constantemente, también es útil tener una escala puramente relativa que compare dos

señales desconocidas. Un ejemplo de esto último es la comparación del nivel de salida de un equipo relativo a la entrada. Esta relación se conoce como la **ganancia** del equipo. La relación entre la entrada y la salida puede ser cuantificada incluso aunque una señal esté en constante cambio, como la música. Si aparece el mismo voltaje en la entrada y la salida, la relación de la entrada con la salida es 1, también conocido como **ganancia unidad**, o 0 dB. Si el voltaje en la salida es mayor que en la entrada, el valor de la ganancia es mayor que 1, y expresado en dB es positivo. Si la salida es menor que la entrada, la ganancia es menor de 1 y en dB es un número negativo; en otras palabras, es una pérdida. El valor real en la entrada o la salida no es importante. Es el cambio de nivel entre ellos lo que se refleja en el valor de ganancia en dB.

Hay dos tipos de fórmulas logarítmicas aplicables en audio:

$$\text{Relative level (dB)} = 20 \times \log_{10} \frac{\text{Level}_1}{\text{Level}_2}$$

$$\text{Relative power (dB)} = 10 \times \log_{10} \frac{\text{Power}_1}{\text{Power}_2}$$

Las ecuaciones relacionadas con la Potencia usan la versión 10 log, mientras que las relacionadas con la presión sonora (SPL) y voltaje usan la versión 20 log. Es importante usar la fórmula apropiada, puesto que el doble de voltaje es un cambio de 6 dB, mientras que el doble de potencia es un cambio de 3 dB. La mayoría del tiempo usaremos la versión 20 log, ya que la presión acústica (dB SPL) y el voltaje son los valores principales en nuestra toma de decisiones. La Figura 1.10 proporciona una tabla de referencia para relacionar los valores con sus decibelios equivalentes.

Este es un buen truco para los usuarios de Microsoft Excel. La Figura 1.11 muestra el formato de la fórmula para que Excel realice los cálculos logarítmicos por nosotros.

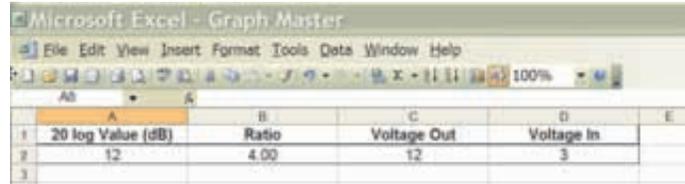
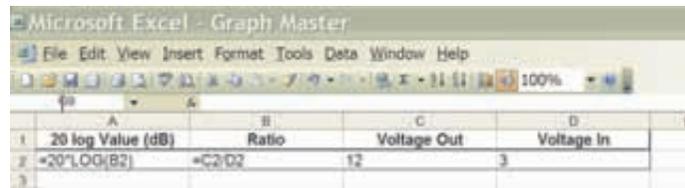


Figura 1.11 Referencia de fórmula logarítmica en Microsoft Excel

El Decibelio Electrónico: dBV y dBu

La transmisión electrónica utiliza la escala del decibelio para caracterizar los niveles de voltaje. Los operadores prefieren la escala del decibelio sobre la escala lineal debido a su relativa facilidad de expresión. Con la linealidad expresada nos encontraríamos refiriéndonos a la señal en microvoltios, milivoltios y voltios con varias series de valores y rangos numéricos. Una escala así hace muy difícil rastrear una señal variable como la música. Si quisiéramos doblar el nivel de una señal tendríamos que saber primero el voltaje de la señal original y luego computar su doble. Con señales dinámicamente cambiantes como la música, el nivel está en flujo en cualquier momento, lo que hace tales cálculos poco prácticos. La escala del decibelio proporciona un cambio relativo del valor independiente del valor absoluto. Por lo tanto, el deseo de duplicar el nivel puede conseguirse con un cambio de 6 dB, sin importar el valor original. También podemos relacionar el decibelio con un estándar fijo, el cual designamos como "0 dB." Los niveles se indican por su valor relativo por encima (+dB) o por debajo (-dB) de este estándar. Por supuesto esto sería mucho más sencillo si solo hubiera un estándar, pero la tradición en nuestra industria es tener varios. **dBV** y **dBu** son los más comunes actualmente. Estos son referenciados a valores de 1.0

voltio y 0.775 voltios (1 mW a través de una carga de 600 V) respectivamente. La diferencia entre estos es una cantidad fija de 2.21 dB. Nota: Para facilidad de uso utilizaremos el dBV como estándar en este texto. Aquellos que prefieran el estándar del dBu deben añadir +2.21 dB a los valores dBV dados.

Referencia de Nivel de Voltaje de los Sistemas de Audio									
Nivel Señal de Audio		Nivel dB		Nivel Lineal		Nivel dB			
Voltage (Volts)	dBV	dBu	250 (Watts)	1k (Watts)	16 (Watts)	8 (Watts)	4 (Watts)	2 (Watts)	1 (Watts)
80	39	41.2							
60	20	22.2							
40	20	22.2							
20	27	29.2							
10	20	22.2							
5.0	14	16.2							
2.0	6	8.2							
1.0	0	2.2							
0.707	-3	-0.9							
0.500	-6	-3.9							
0.350	-9	-6.9							
0.250	-12	-9.9							
0.178	-15	-12.9							
0.125	-18	-15.9							
0.089	-21	-18.9							
0.063	-24	-21.9							
0.045	-27	-24.9							
0.032	-30	-27.9							
0.022	-33	-30.9							
0.016	-36	-33.9							
0.011	-39	-36.9							
0.008	-42	-39.9							
0.006	-45	-42.9							
0.004	-48	-45.9							
0.003	-51	-48.9							
0.002	-54	-51.9							
0.001	-57	-54.9							
0.000	-60	-57.9							
0.000	-63	-60.9							
0.000	-66	-63.9							
0.000	-69	-66.9							
0.000	-72	-69.9							
0.000	-75	-72.9							
0.000	-78	-75.9							
0.000	-81	-78.9							
0.000	-84	-81.9							
0.000	-87	-84.9							
0.000	-90	-87.9							
0.000	-93	-90.9							
0.000	-96	-93.9							
0.000	-99	-96.9							
0.000	-102	-99.9							
0.000	-105	-102.9							
0.000	-108	-105.9							
0.000	-111	-108.9							
0.000	-114	-111.9							
0.000	-117	-114.9							
0.000	-120	-117.9							

Figura 1.12 Tabla de referencias para para voltajes operacionales típicos y niveles de vatios en distintas etapas de transmisión del audio. Todos los voltajes son RMS

$$\text{Level (dBV)} = 20 \times \log_{10} \frac{\text{Level}_1}{1\text{V}}$$

$$\text{Level (dBu)} = 20 \times \log_{10} \frac{\text{Level}_1}{0.775\text{V}}$$

Las escalas de dB relacionadas con el voltaje sirven el importante propósito de guiarnos hacia el rango de operación óptimo de los equipos electrónicos. Los límites superior e inferior de un equipo electrónico son valores absolutos, no relativos. El ruido de fondo tiene un nivel medio estable, y el punto de recorte es un valor fijo. Estos se expresan en dBV. El nivel absoluto de nuestra señal deberá pasar entre estos dos límites para prevenir el ruido excesivo o la distorsión. El área entre estos límites es el **área de operación lineal** del equipo electrónico. Nuestros diseños tendrán que asegurar que los niveles de operación de los equipos electrónicos están escalados debidamente para los niveles de señal que pasen a través de ellos.

Una vez hayamos capturado la onda de audio en su forma electrónica, pasará a través del sistema como un

nivel de voltaje con una corriente insignificante, y por lo tanto, disipación de potencia mínima. Las secciones de salida de baja impedancia, junto con las entradas de alta impedancia, nos permiten el lujo de no considerar los niveles de potencia hasta alcanzar los terminales de salida del amplificador. De esta manera, los amplificadores pueden verse como equipos de entrada de voltaje con etapas de potencia para alimentar los altavoces. El amplificador también aporta un aumento enorme de corriente y capacidad de voltaje adicional. La Figura 1.12 proporciona una tabla de referencia mostrando los niveles de voltaje operacionales estándar para todas las etapas de flujo de la señal en el sistema. El objetivo es transmitir la señal a través del sistema en el rango de voltaje de operación lineal de todos los equipos, sin caer en el ruido de fondo.

Todavía hay otro conjunto de letras apéndice que pueden añadirse a los dB de la fórmula de voltaje. Estas designan si el voltaje medido es un pico o el valor medio. Las señales AC son más complejas de caracterizar que las señales DC. Las señales DC son un número dado de vol-

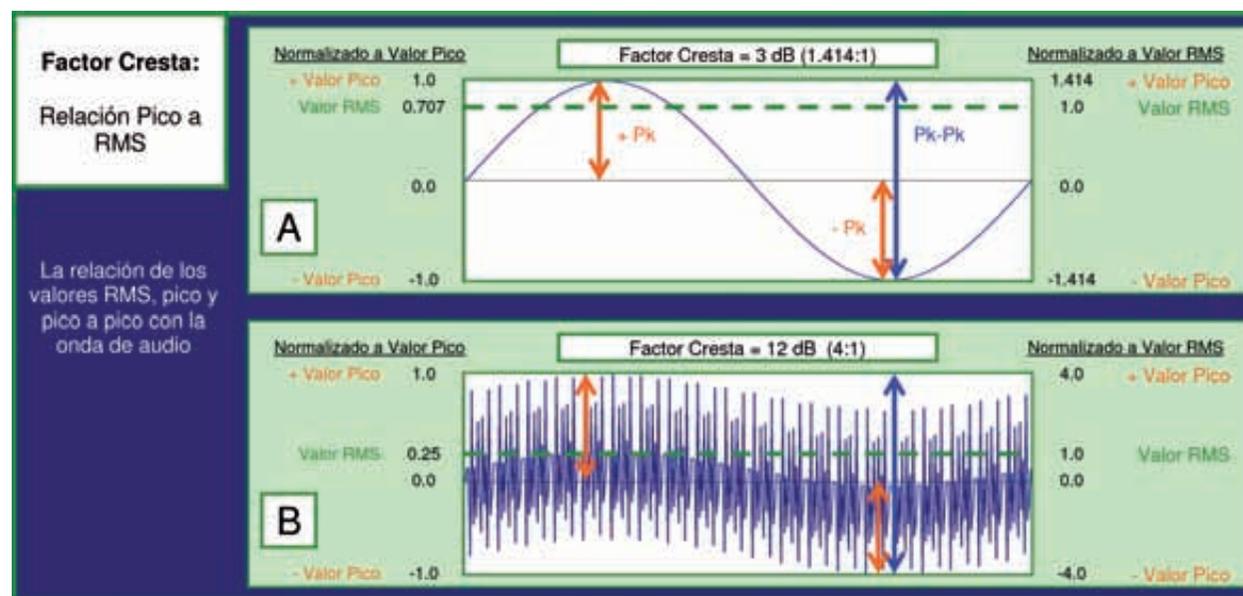


Figura 1.13 Valores de factor de cresta, RMS, pico y pico-a-pico. (A) Una onda senoidal tiene el factor de cresta menor, de 3 dB. (B) Un ejemplo de onda compleja con transientes con un factor de cresta de 12 dB



Perspectivas: La optimización del sistema empieza con un buen diseño del sistema. Desde ahí es un proceso que debería guiarse por un pensamiento estructurado y una escucha crítica.

Sam Berkow, founder, SIA Acoustics llc & SIA Software Company, Inc.

tios por encima o por debajo de la referencia común. Las señales AC, por naturaleza, van hacia arriba y hacia abajo. Si tomáramos una media en el tiempo concluiríamos que los viajes positivo y negativo de la señal AC tienden a 0 voltios. Si ponemos nuestros dedos en los conductos de corriente AC nos daremos cuenta del hecho de que tender a 0 voltios en el tiempo no significa que haya 0 energía. Niños, no intentéis esto en casa.

La onda de corriente AC se eleva a un máximo, retorna a cero, cae a un mínimo y retorna otra vez. El voltaje entre el pico y el punto cero, bien negativo o positivo, es el **voltaje de pico** (Vpk). El voltaje entre los picos positivo y negativo es el **voltaje pico-a-pico** (Vp-p). El voltaje AC equivalente al encontrado en un circuito DC se expresa como voltaje **root-mean-square** (RMS), o raíz cuadrática media (VRMS). El valor pico-a-pico es por naturaleza el doble del valor pico. El valor RMS es un 70.7 por cien del valor pico.

Todos estos factores se trasladan a las fórmulas del dB relacionadas con el voltaje y se encuentran como dBVpk, dBVp-p y dBVRMS respectivamente. La diferencia del 70.7 por cien entre pico y RMS es equivalente a 3 dB.

Factor Cresta

La diferencia de 3 dB entre los valores pico y RMS sólo se mantiene mientras la señal de entrada sea una sola frecuencia continua, es decir, una onda senoidal simple. Si la señal tiene múltiples frecuencias, la relación pico a RMS no es constante, sino que es altamente volátil o dinámica. La presencia de múltiples frecuencias crea confluencias de señales momentáneas que pueden sumarse en un instante dado, creando un pico mayor que cualquiera de las partes individuales. Esto se conoce como pico **transiente**. La mayoría de señales de audio son transientes por naturaleza. Un transiente fuerte, como un pulso, es el que tiene un valor de pico muy alto y un valor RMS mínimo. Los picos transientes son el extremo opuesto a la relación pico-a-RMS de la onda senoidal. El término que describe la relación variable pico-a-RMS encontrada en diferentes materiales y programas es el **factor cresta**. El menor

factor cresta posible es de 3 dB (onda senoidal). No hay límite máximo. El factor cresta típico para señales musicales es de 12 dB. Puesto que nuestro sistema transmitirá señales continuas, debemos asegurar que el sistema tiene suficiente rango dinámico para permitir que los picos transientes estén dentro del rango de operación lineal. La presencia de rango dinámico adicional se conoce como **headroom**, siendo 12 dB el objetivo común.

El Decibelio Acústico: dB SPL

La expresión para la transmisión acústica son los dB SPL (sound pressure level). Esta es la cantidad de medida para los cambios de presión por encima y por debajo de la presión ambiente. El estándar es el umbral de audición de una persona (0 dB SPL). La unidad de expresión lineal es una unidad de presión, dynes/centímetro cuadrado, siendo 0 dB SPL un valor de 0.0002 dynes/cm² (1 microbar). Este límite se acerca al nivel de ruido del aire, es decir, el nivel donde el movimiento molecular crea su propio ruido. Es reconfortante saber que no nos estamos perdiendo nada. En el otro extremo de la escala está el umbral del dolor en nuestro sistema de escucha. Sus valores son inconsistentes, pero van desde 120 a 130 dB SPL. En cualquier caso, este número representa el umbral del dolor, y con ello los peligros obvios de potenciales daños auditivos.

$$\text{Level (dB SPL)} = 20 \times \log_{10} \frac{P}{0.0002}$$

donde P es la presión RMS en microbares (dynes/centímetro cuadrado).

Disculpa: ¿microbares y dynes por centímetro cuadrado?

Estos términos de medidas de presión de aire no son familiares para la mayoría de ingenieros de audio, junto con el alternativo e igualmente desconocido término de 20 micropascales. Para la mayoría de ingenieros de audio la comprensión del dB SPL es relativa a su propia pers-

pectiva: una correlación experimental de lo que oímos con lo que hemos leído durante años en los medidores SPL.

Los 130 dB de diferencia entre el umbral de audición y el comienzo del dolor pueden verse como el rango dinámico de nuestro sistema aural. Raramente utilizaremos nuestro rango completo, ya que no hay espacios de escucha con un ruido de fondo tan bajo. Además, el sistema auditivo genera una distorsión armónica sustancial antes del umbral del dolor que degrada la experiencia de escucha (para algunos) antes de que se note el dolor. En términos prácticos, necesitaremos encontrar un rango operativo lineal, como hicimos con la transmisión electrónica. Este rango va desde el ruido de fondo ambiente hasta el punto en el que la escucha se vuelve tan distorsionada que la experiencia es desagradable. Nuestro sistema de sonido necesitará tener un ruido de fondo por debajo del de la sala y una potencia continua y headroom suficiente para alcanzar el nivel máximo requerido

Subunidades de dB SPL

El dB SPL tiene niveles medios y de pico, de manera similar a las unidades de voltaje. Los valores SPL difieren, sin embargo, en que puede haber una constante de tiempo involucrada en el cálculo.

- **dB SPL pico (peak):** El nivel más alto alcanzado durante un tiempo determinado es el pico ($dB SPL_{pk}$).
- **dB SPL continuo (rápido):** Este es el SPL medio durante una integración temporal de 250 ms. La integración temporal se usa para imitar la percepción SPL de nuestro sistema auditivo, el cual no percibe el SPL a un nivel instantáneo, sino que lo hace a lo largo de un periodo de tiempo de aproximadamente 100 ms. La integración rápida es lo suficientemente larga para dar una lectura SPL que corresponde a esa percepción.
- **dB SPL continuo (lento):** Este es el SPL medio durante una integración temporal de 1 segundo. La constante de tiempo más lenta imita la percepción de exposiciones al sonido de duración extendida.

Perspectivas: No importa cuál sea el esfuerzo, la excelencia requiere una fundación sólida sobre la que construirse. Un sistema de sonido correctamente optimizado permite a los ingenieros concentrarse en la mezcla, y no en los fallos.

Paul Tucci

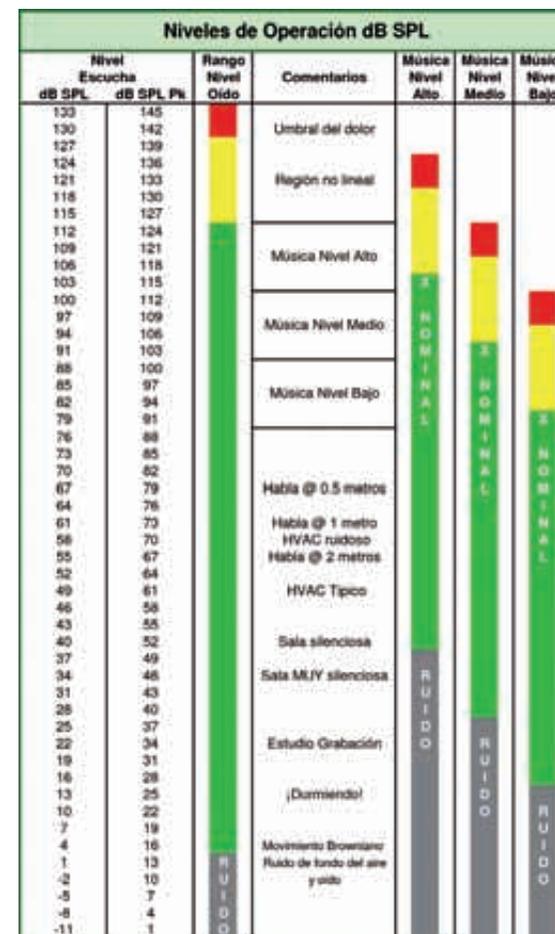


Figura 1.14 Nivel operacional típico del rango dinámico del oído

Los dB SPL pueden limitarse a una banda de frecuencias específica. Si no se especifica el ancho de banda, se asume el rango completo de 20–20 kHz. Es importante entender que una lectura de 120 dB SPL en un medidor

de nivel no significa que el altavoz esté generando 120 dB SPL a todas las frecuencias. El valor de 120 dB es la integración de todas las frecuencias (a menos que se especifique lo contrario) y no pueden sacarse conclusiones sobre el comportamiento en el rango de respuesta del altavoz. El único caso en el que los dB SPL pueden computarse sin importar una frecuencia en particular es cuando sólo se manda esa frecuencia al sistema. Los dB SPL se pueden determinar para un rango de frecuencias específico, una práctica conocida como mediciones SPL por banda. El rango de frecuencias de la señal de excitación es limitado; normalmente en bandas de una octava o 1/3 de octava. El valor SPL máximo para un equipo se averigua de esta manera. Vale la pena realzar que no se pueden lograr los mismos datos simplemente limitando una banda, ya que si se aplica una señal de rango completo a un equipo, su energía se esparcirá sobre toda la banda. Las mediciones de bandas limitadas mostrarán niveles máximos más bajos para una banda dada si el equipo reproduce simultáneamente frecuencias fuera de la banda medida.

El Decibelio sin Unidades

La escala de decibelios sin unidades sirve para la comparación de valores similares. Todo aquello expresado en la escala sin unidades es puramente relativo. Esto es válido tanto para la transmisión electrónica como para la acústica. Un equipo con un nivel de entrada de -20 dBV y un nivel de salida de -10 dBV tiene una ganancia de +10 dB. Notarás que en este caso no hay ninguna letra añadida al término dB, lo que significa una relación de cantidades. Dos asientos en un auditorio reciben lecturas de 94 y 91 dB SPL respectivamente. Tienen una diferencia de nivel de 3 dB. Esto no se expresa como 3 dB SPL, que es un nivel de sonido justo por encima de nuestro umbral de audición. Si los niveles aumentaran en ambos asientos a 98 y 95 respectivamente, la diferencia de nivel seguiría siendo 3 dB.

La escala de dB sin unidades será, sin duda, la expresión de decibelio más común en este libro. La principal

preocupación de este texto es el nivel relativo, en vez de los niveles absolutos. De manera simple: los niveles absolutos son, ante todo, una cuestión operacional, dentro del alcance de la ingeniería de mezcla, mientras que los niveles relativos son una cuestión de diseño y optimización, dentro de nuestro control. La calidad de nuestro trabajo se basará en cuánto se parece la señal final recibida a la original. Puesto que la señal transmitida estará cambiando constantemente, solo podemos ver nuestro progreso en términos relativos.

Potencia

La energía eléctrica es una combinación de dos cantidades medibles: voltaje y corriente. La potencia eléctrica en un circuito DC se expresa como:

$$P = EI$$

donde P es la potencia en vatios, E es el voltaje en voltios, e I es la corriente en amperios.

El **voltaje** corresponde a la presión eléctrica, mientras que la **corriente** corresponde a la tasa de flujo de electrones. Una analogía simplificada sería una manguera en un jardín. Cuando se abre el paso de agua, la presión es baja y el flujo es un cilindro amplio de agua. Si se pone el dedo en la apertura de la manguera se incrementa la presión, y se reduce la amplitud del flujo en una cantidad proporcional. El primer caso es voltaje bajo y corriente alta, mientras que el último es lo contrario.

La potencia es el producto de estos dos factores. 100 vatios de potencia eléctrica podría ser el resultado de 100 voltios a 1 amperio, 10 voltios a 10 amperios, 1 voltio a 100 amperios, etc. La potencia podría usarse para hacer funcionar un radiador a 100 vatios, o 100 a 1 vatio cada uno. La cantidad de calor generado, y la factura de electricidad, serán iguales en ambos casos. La potencia es la medición de la energía, la cual puede distribuirse de diferentes maneras pero no cambia en su cantidad general. Tanto el voltaje como la corriente han de estar presentes para que la potencia se transmita. El voltaje sin corriente

hace posible la potencia, pero ninguno se transmite hasta que no fluya la corriente.

Hay un tercer factor que juega un rol decisivo en cómo se proporcionan el voltaje y la corriente: la resistencia. La **resistencia** eléctrica limita la cantidad de corriente que fluye a través de un circuito, y por lo tanto, afecta a la potencia transmitida. Siempre que el voltaje permanezca constante, la disipación de potencia se reduce, puesto que la resistencia detiene el flujo de corriente. Esta reducción de potencia puede compensarse incrementando el voltaje de manera proporcional. Volviendo a la analogía de la manguera, es el dedo el que actúa como una resistencia variable en el circuito, con una sensación física evidente cuando se intenta mantener el dedo en posición. Esta resistencia redistribuye la potencia de la manguera a un menor flujo de corriente y una mayor presión, lo cual tiene efectos muy importantes a la hora de poner en uso la energía. Si pensamos en beber agua directamente de la manguera sería muy aconsejable considerar la posición de nuestro dedo.

La potencia eléctrica en un circuito DC se expresa como:

$$P = IE$$

$$P = I^2R$$

$$P = E^2/R$$

donde P es la potencia en vatios, E es el voltaje en voltios, I es la corriente en amperios, y R es la resistencia en ohmios.

Esta fórmula para la corriente DC es aplicable a los componentes puramente resistivos de las fuerzas limitantes de corriente en el circuito eléctrico. En el caso de nuestra onda de audio, que por definición es una señal AC, la medición de la fuerza resistiva difiere sobre la frecuencia. Este complejo término de resistencia con componente frecuencial es la **impedancia**. La impedancia de un circuito a una frecuencia dada es la combinación de la resistencia DC y de la **reactancia**. La reactancia es el valor para una resistencia variable sobre la frecuencia, y viene en dos

formas: capacitiva e inductiva. La impedancia para un circuito dado es una combinación de tres valores resistivos: resistencia DC, **reactancia capacitiva** y **reactancia inductiva**. Estos factores alteran la respuesta de frecuencia en todos los circuitos AC; es simplemente una cuestión de grado de efecto. Para nuestro objetivo no iremos a los componentes internos de circuito, sino que nos limitaremos a la interconexión de equipos de audio. Todos los equipos de audio activos presentan una impedancia de entrada y de salida que deben configurarse correctamente para una transmisión óptima. La interconexión de cables también presenta una impedancia variable sobre la frecuencia que también será discutida.

Respuesta de frecuencia

Si un equipo transmite de manera distinta a diferentes frecuencias, tiene una respuesta de frecuencia. Un equipo sin diferencias sobre la frecuencia, también conocido como **respuesta de frecuencia "plana"**, es realmente la ausencia de una respuesta de frecuencia. En nuestro mundo práctico esto es imposible, puesto que todos los dispositivos de audio, incluso un cable de altavoz hipoalérgico libre de oxígeno, cambian su respuesta sobre la frecuencia. La cuestión es la extensión de cambios detectables dentro del rango dinámico y de frecuencias de nuestro sistema auditivo. La respuesta de frecuencia es un montón de valores medibles, pero en esta sección nos centraremos en dos representaciones: amplitud vs. frecuencia y fase vs. frecuencia. Ningún equipo de audio reproduce una frecuencia grave infinita (tendríamos que volver al Big Bang para medir la frecuencia más baja) ni tampoco una frecuencia alta infinita. Afortunadamente, no lo necesitamos. El rango óptimo va un poco más allá del sistema auditivo humano. (La extensión exacta está sujeta a un debate interminable). Generalmente se acepta que la extensión en altas frecuencias más allá del sistema auditivo humano, es mejor que la de los sistemas que limitan su respuesta exactamente de 20 Hz a 20 kHz. Esto se atribuye generalmente al reducido cambio de fase del

material, el cual deja la serie de armónicos superiores intactos. Cualquiera que esté familiarizado con la primera generación de equipos de audio digital, recordará la mala calidad de la limitada respuesta de banda de esos sistemas. El debate sobre la frecuencia de muestreo de 96 kHz, 192 kHz y superiores para audio digital la dejaremos para aquellos con oídos perfectos.

Amplitud vs. Frecuencia

Amplitud vs. frecuencia (para abreviar lo llamaremos **respuesta de amplitud**) es una medición de la desviación del nivel sobre la frecuencia. Un equipo se especifica con un rango de frecuencias operacional, y un grado de variación dentro de este rango. El rango de frecuencia se da, generalmente, como los puntos de -3 dB en equipos electrónicos, mientras que los de -6 y -10 dB son más usados para altavoces. La calidad de la respuesta de amplitud se determina por su grado de variación sobre el rango de

transmisión, con la mínima variación correspondiente a la máxima calidad. Los altavoces mostrados en la Fig. 1.15 tienen una respuesta de amplitud de ± 4 dB sobre sus rangos operativos. Los rangos operativos (entre los puntos de -6 dB) difieren en las frecuencias bajas (40 y 70 Hz) y altas (18 kHz y 20 kHz).

Fase vs. Frecuencia

Fase vs. frecuencia (para abreviar lo llamaremos **respuesta de fase**) es una medición de la desviación del tiempo sobre la frecuencia. Un equipo se especifica con un grado de variación del rango operacional gobernado por la respuesta amplitud. La calidad de la respuesta de fase viene determinada por su grado de variación sobre el rango de transmisión, con la mínima variación correspondiente de nuevo a la máxima calidad. Se muestra como ejemplo la respuesta de fase de los dos altavoces comparados en la Fig. 1.15.

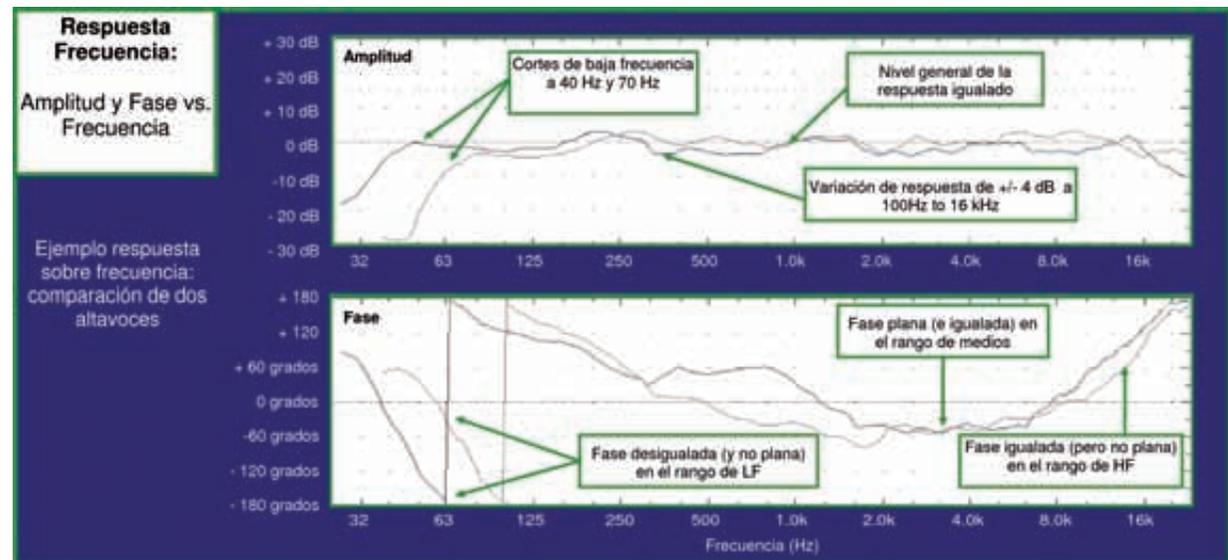


Figura 1.15 Respuestas de Amplitud y fase relativas de dos altavoces. Los dos sistemas están igualados en nivel y fase en la mayoría del rango de frecuencias, pero ambos parámetros se desigualan en el rango de frecuencias bajas

Si desea adquirir cualquiera de nuestras publicaciones visite nuestra página web

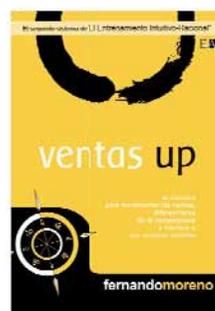
www.editorialalvalena.com

“LA MENTE DEL EMPRENDEDOR”



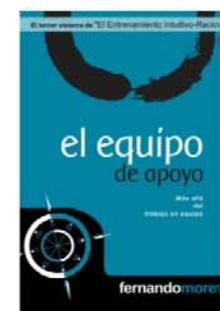
Tres clave para optimizar una Pyme del siglo XXI.

“VENTA UP”



El sistema para incrementar las ventas, diferenciarse de la competencia y fidelizar a sus mejores clientes

“EL EQUIPO DE APOYO”



Más allá del trabajo en equipo.

“SISTEMAS DE SONIDO: DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN” BOB Mc CARTHY



Herramientas y técnicas modernas para el diseño y alineamiento de sistemas de sonido.

PRÓXIMAMENTE A LA VENTA . . .

