



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño y Construcción de un Sistema de Efectos Perceptibles y Realidad Virtual de Bajas Frecuencias en Sistemas de Audio

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

P R E S E N T A N:

ALEJANDRO I. MALACARA GARCIA
ENRIQUE ESTEBAN CANSECO ARELLANO
LEOPOLDO RAMIREZ ORTIZ
MIGUEL MORENO JASQUI

DIRECTORA DE TESIS
M.I. NORMA ELVA CHÁVEZ RODRÍGUEZ

MEXICO D.F.

MAYO 2007





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

CONTENIDO

1. Introducción
 2. Conceptos generales de Realidad Virtual
 - 2.1. Introducción
 - 2.2. Definición de Realidad Virtual
 - 2.3. Sistemas de Realidad Virtual
 - 2.3.1. Sistemas Inmersivos
 - 2.3.2. Sistemas Proyectivos
 - 2.3.3. Sistemas de Sobremesa
 - 2.4. Características de los Sistemas de Realidad Virtual
 - 2.4.1. Capacidad Sintética (Generación de imágenes)
 - 2.4.2. Interactividad
 - 2.4.3. Tridimensionalidad
 - 2.4.4. Ilusión de realidad
 - 2.5. Elementos de un sistema de Realidad Virtual
 - 2.5.1. Dispositivos de entrada
 - 2.5.1.1. Dispositivos de localización
 - 2.5.1.2. Dispositivos de control
 - 2.5.2. Dispositivos de Salida
 - 2.5.2.1. Dispositivos de Presentación
 - 2.5.2.2. Dispositivos de Sonido
 - 2.6. Aplicaciones de Realidad Virtual
 - 2.6.1. Entretenimiento
 - 2.6.2. Defensa
 - 2.6.3. Medicina
 - 2.6.4. Arquitectura
 - 2.6.5. Diseño Industrial
 - 2.6.6. Diseño molecular
 - 2.6.7. Simulación
 - 2.6.8. Tele-presencia
-

- 2.6.9. Seguridad
 - 2.6.10. Enseñanza
 - 3. Conceptos básicos de la física del sonido
 - 3.1. Introducción
 - 3.2. Origen del Sonido
 - 3.3. El Sonido en el Aire
 - 3.4. Velocidad del sonido
 - 3.5. Características del Sonido: Amplitud (Intensidad), Frecuencia (Tono) y Calidad del Tono (Timbre)
 - 3.6. Espectro Audible
 - 3.7. Presión Sonora
 - 3.8. Potencia Sonora
 - 3.9. Intensidad Sonora
 - 3.10. Sensibilidad Humana
 - 4. Electroacústica
 - 4.1. Introducción
 - 4.2. Cadena de un sistema de audio típico
 - 4.3. Transductores
 - 4.4. Procesadores de Audio
 - 4.4.1. Procesadores Dinámicos
 - 4.4.2. Procesadores de Frecuencia
 - 4.4.3. Procesadores de Tiempo
 - 4.5. Medios de Almacenamiento
 - 4.5.1. Inicios
 - 4.5.2. Grabación en Medios Magnéticos
 - 4.5.3. Grabación Digital
 - 4.5.4. Disco Compacto
 - 4.5.5. DVD
 - 4.5.5.1. Dolby 5.1
 - 4.5.5.2. Canal LFE
 - 4.5.6. Estado Sólido
-

- 4.6. Características Principales de los Componentes
 - 4.6.1. Respuesta en Frecuencia
 - 4.6.2. Rango Dinámico
 - 4.6.3. Distorsión Armónica
 - 4.7. Bocina
 - 4.7.1. Tipos de Bocinas
 - 4.7.2. Partes de una bocina de bobina móvil
 - 4.7.3. Funcionamiento de bocina de bobina móvil
 - 5. Amplificadores
 - 5.1. Introducción
 - 5.2. Características técnicas
 - 5.2.1. Impedancia
 - 5.2.2. Factor de amortiguación
 - 5.2.3. Potencia de salida
 - 5.2.4. Potencia máxima
 - 5.2.5. Potencia pico, admisible o musical
 - 5.2.6. Relación señal/ruido
 - 5.2.7. Acoplamiento
 - 5.2.8. Respuesta en frecuencia
 - 5.2.9. Respuesta de fase
 - 5.2.10. Ganancia
 - 5.2.11. Sensibilidad
 - 5.2.12. Distorsión
 - 5.2.13. Diafonía
 - 5.3. Tipos de amplificadores
 - 5.3.1. Amplificadores Clase A
 - 5.3.2. Amplificadores Clase B
 - 5.3.3. Amplificadores Clase C
 - 5.3.4. Amplificadores Clase AB
 - 5.3.5. Amplificador Clase D
 - 5.3.6. Otros amplificadores
-

6. Vibraciones
 - 6.1. Introducción
 - 6.2. Historia de las vibraciones
 - 6.3. Elementos que constituyen un modelo de sistema vibratorio
 - 6.3.1. Elementos de Inercia
 - 6.3.2. Elementos de rigidez
 - 6.3.3. Elementos de disipación
 - 6.4. Movimiento Vibratorio
 - 6.5. Movimiento Armónico Simple
 - 6.5.1. Movimiento periódico
 - 6.5.2. Movimiento oscilatorio
 - 6.5.3. Movimiento vibratorio
 - 6.5.4. Movimiento vibratorio armónico simple
 - 6.6. Sistema con un solo grado de libertad
 - 6.7. Vibración Libre
 - 6.8. Vibración Libre con un grado de libertad
 - 6.9. Vibración Forzada con un grado de libertad
 - 6.10. Vibración Amortiguada
 - 6.11. Máquinas de Acción Vibratoria
 - 6.12. Vibradores Electromagnéticos
 7. Electromagnetismo
 - 7.1. Electromagnetismo
 - 7.1.1. Campos Magnéticos
 - 7.1.2. El Solenoide
 8. Especificaciones de diseño del transductor de bajas frecuencias.
 - 8.1. Etapas del sistema
 - 8.2. Señal de alimentación
 - 8.3. Amplificador
 - 8.4. Diseño de Transductor
 - 8.5. Acoplamiento de Transductor
 9. Conclusiones.
-

10. Referencias bibliográficas.

INTRODUCCIÓN

La idea de transportar al ser humano a mundos y tiempos diferentes no es nada nuevo, sin embargo después de la literatura es el cine quien ha jugado un papel preponderante en el estímulo sensorial puesto que cuenta con un mayor número de elementos para hacer sentir al espectador dentro del entorno que plantea, gracias a que logra captar su atención y estimular su imaginación mediante sentidos como la vista, el oído, y en algunos casos hasta el tacto y el olfato.

Gracias a lo anterior, se ha ido evolucionando enormemente desde los sistemas de grabación monoaurales (donde generalmente la grabación es captada solo por un micrófono y presenta el inconveniente de dar la impresión de escuchar solo con un oído) hasta las grabaciones estéreo de dos canales que en su momento parecía ser la manera más fácil de sumergir al espectador en la dimensión de las proyecciones (por ser este la manera natural en la que percibe el oído humano), sin embargo al paso del tiempo la reproducción de audio pasa a un papel mucho mas complejo con la aparición del sonido surround o envolvente el cual se refiere al uso de múltiples canales de audio para provocar efectos envolventes en la audiencia como los sistemas 5.1 en donde se cuenta con 5 bocinas que tratan de forma independiente un rango determinado de frecuencias. Cuando se trata de 5 vías se distribuyen del siguiente modo: central (emite sonidos medios o de voz), delantero izquierdo y derecho (emite sonidos de todo tipo, a excepción de los bajos), trasero izquierdo y derecho (emiten sonidos de ambientación). Por último ".1" hace referencia al canal de subwoofer el cual emite todos los sonidos con frecuencias aproximadamente hasta los 100 Hz con la finalidad de brindar percepción de vibraciones al oído del espectador.

De forma general, un sistema x.1, quiere decir que tiene x canales de audio más uno subwoofer.

El propósito del presente trabajo es el superar la percepción lograda por un sistema 5.1 mediante la adición de un sistema capaz de incrementar la percepción de las bajas frecuencias mediante vibraciones corporales.

El método consiste en diseñar e implementar un transductor capaz de reproducir frecuencias tan bajas que estas sean imperceptibles para la audición pero no así para la sensación corporal, este tipo de sistemas existen desde hace algún tiempo en los sofás que brindan masajes corporales aunque en este caso en lugar de solo vibrar en forma monótona o en secuencias preestablecidas, será posible entrelazarlo a los efectos sonoros de un sistema de realidad virtual, videojuegos o sistemas de cine en casa.

CONCEPTOS GENERALES DE REALIDAD VIRTUAL

2.1 Introducción

En las últimas décadas, la tecnología ha progresado más rápido que la habilidad humana para imaginar incluso que es posible hacer con ella. Hoy, un proceso digno de la mejor literatura de ciencia ficción, ha trastocado la percepción y está revolucionando el mundo, no solo de la informática sino también de diversidad de áreas como la medicina, la arquitectura, la educación y la ingeniería entre otros.

La Realidad Virtual entra en un exclusivo rango del campo de la tecnología en donde el usuario puede incursionar creativamente, hasta donde el límite de su imaginación se lo permita. Allí radica, muy posiblemente el mayor atractivo, por cuanto la imaginación y la creatividad tienen la oportunidad de ejecutarse en un "mundo" artificial e ilimitado.

El concepto de Realidad Virtual agrupa dos ideas aparentemente opuestas: "realidad" y "virtualidad". La primera, según lo define de manera un tanto redundante el Diccionario de la Real Academia de la Lengua se aplica para aquello que "tiene existencia verdadera y efectiva" mientras que el término "virtual" viene definido como aquello "que tiene virtud para producir un efecto, aunque no lo produce de presente". De ahí que el término Realidad Virtual adquiere una concepción paradójica al quedar su significado como "realidad no real".

La Realidad Virtual es una experiencia en la que se crea la sensación de estar sumergido en un mundo artificial, sintético, generado por computadoras en donde el usuario puede tocar y utilizar los objetos que ve, que "virtualmente" solo existen en su imaginación pero que existen "realmente" en la memoria de la computadora como se puede ilustrar en la figura 2.1. Un sistema de Realidad Virtual es capaz de hacer sentir al usuario la ilusión de que experimenta una realidad alternativa.



Figura 2.1.1 Realidad Virtual

2.2 Definición de Realidad Virtual

Definir Realidad Virtual resulta un tanto complicado y no resulta extraño que esta sea relativa para diferentes personas y en diferentes situaciones sin embargo, una de las definiciones mas aceptadas para la Realidad Virtual dice que esta es un medio que proporciona una visualización participativa en tres dimensiones y la simulación mediante computadoras de mundos virtuales, siendo dichos mundos el elemento fundamental de un sistema de Realidad Virtual. La Realidad Virtual es una simulación tridimensional interactiva generada por computadora en la que los participantes pueden interactuar con dicho entorno, desplazándose por su interior o modificándolo a placer y que lo percibe como real basado en estímulos a los órganos sensoriales.

2.3 Sistemas de Realidad Virtual

Existen básicamente tres tipos de sistemas de Realidad Virtual dependiendo de la forma en la cual sea presentada la información al usuario: inmersivos, proyectivos y de sobremesa.

2.3.1 Sistemas Inmersivos

Estos tienen por objeto conseguir que el usuario tenga la sensación de estar realmente “dentro” del mundo virtual representado. Los sistemas inmersivos son los que proporcionan la mayor sensación de realidad al aislar totalmente al usuario del mundo exterior, y los que más se acercan a la definición de Realidad Virtual al utilizar una interfaz más natural. Para ello, se utilizan dispositivos que impiden la visión del mundo circundante, al mismo tiempo que presentan las imágenes correspondientes al mundo virtual, para ello requieren de algún dispositivo que permita detectar los movimientos del usuario, con el fin de que la imagen corresponda siempre al punto de vista real. Como inconveniente de este tipo de sistemas se encuentra la dificultad para realizar algunas tareas, especialmente aquellas que requieren la utilización de algún dispositivo complejo ya que el usuario no puede verlos al estar aislado del campo visual del mundo real como se ilustra en la figura 2.3.1.1



Figura 2.3.1.1 Sistemas Inmersivos

2.3.2 Sistemas Projectivos

En este tipo de sistemas se intenta proporcionar la misma sensación de inmersión al usuario, pero en lugar de emplear dispositivos que aíslan al usuario del mundo real, este es introducido en algún tipo de habitación, en cuyas paredes se proyectan una o más imágenes del mundo virtual en varias pantallas para proporcionar un ángulo de visión más amplio y también pueden emplear mecanismos hidráulicos para producir la sensación de movimiento. Este sistema está especialmente diseñado para aplicaciones multiusuario, donde un grupo de personas comparte simultáneamente la experiencia. El concepto es parecido al de las cápsulas de simulación, en las que un grupo de personas pueden ver proyecciones en el interior de la cápsula, mientras que esta se inclina de un lado a otro como si estuviera realmente desplazándose.

Lo único que diferencia a dichas cápsulas de un sistema de Realidad Virtual proyectivo es la interactividad debido a que en este tipo de cápsulas lo que los usuarios pueden contemplar es una película pregrabada así como los movimientos de la cápsula están del mismo modo, preestablecidos, un sistema de este tipo puede apreciarse en la figura 2.3.2.1.

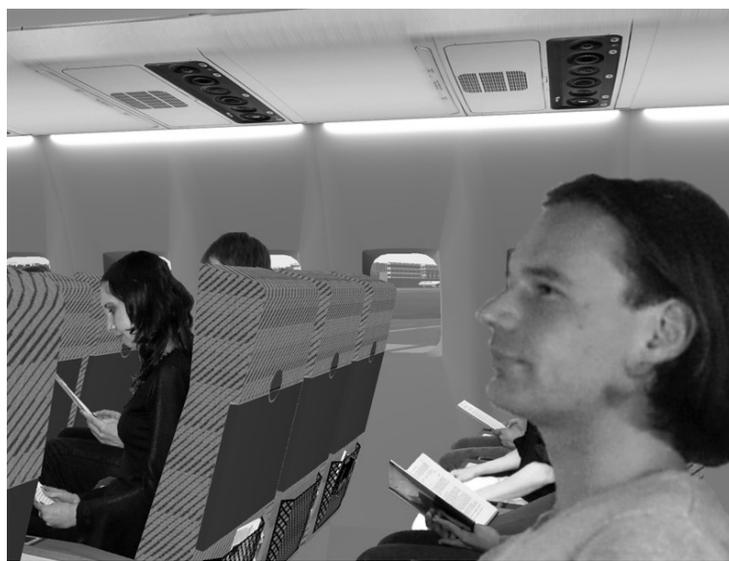


Figura 2.3.2.1 Sistemas Projectivos

2.3.3 Sistemas de Sobremesa

En los sistemas de sobremesa no se pretende proporcionar al usuario una sensación visual de inmersión en el mundo virtual. Las imágenes son presentadas en una pantalla de computadora y no se aísla al usuario del mundo real tal y como sucede en algunos videojuegos sofisticados como en la figura 2.3.3.1, debido a las características de este tipo de sistemas, el usuario no pierde la visión del mundo circundante.

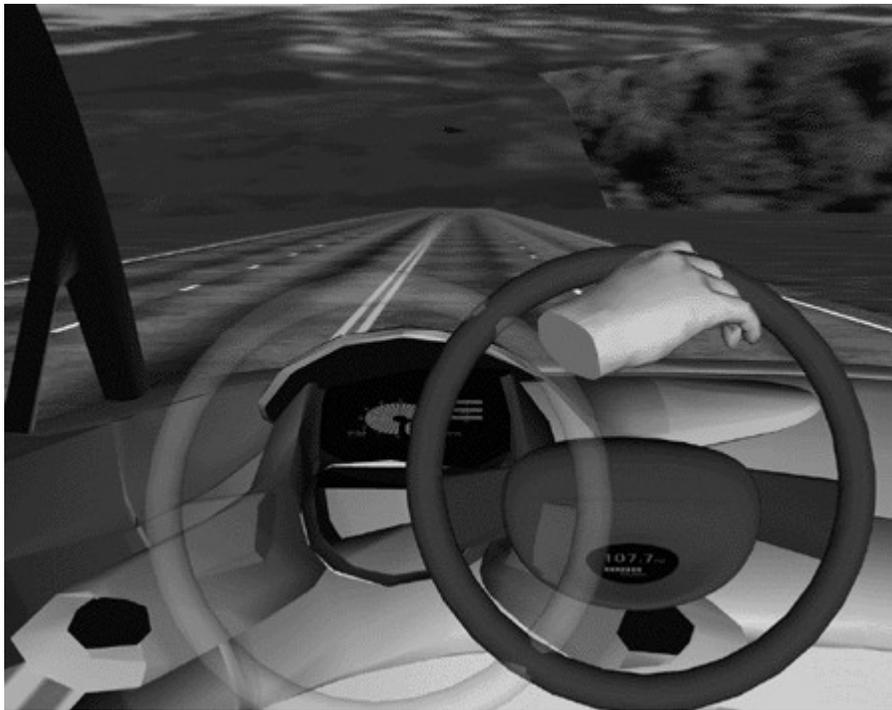


Figura 2.3.3.1 Sistemas de Sobremesa

2.4 Características de los Sistemas de Realidad Virtual

Para poder catalogar un sistema de Realidad Virtual como tal es necesario que cumpla una serie de características fundamentales:

- Capacidad Sintética (Generación de imágenes).
- Interactividad
- Tridimensionalidad
- Ilusión de Realidad
- Inmersión

2.4.1 Capacidad Sintética (Generación de imágenes)

En un sistema de Realidad Virtual las imágenes mostradas al usuario no se encuentran almacenadas en ningún sitio, sino que son generadas dependiendo de la perspectiva que el usuario pretenda observar. Esto es así debido a la total libertad de movimientos de la que disfruta el usuario y que hace imposible tener guardadas previamente todas las imágenes correspondientes a todos los puntos de vista posibles. Los sistemas de Realidad Virtual poseen una base de datos con todos los elementos que componen el mundo virtual, a partir de la cual, éstos generan la información que se mostrará al usuario.

Puesto que el usuario tiene una libertad casi ilimitada de movimiento, pudiendo situarse en cualquier punto desde el mundo virtual, resultaría imposible calcular y almacenar de antemano las imágenes correspondientes a todas y cada una de las posibles posiciones.

En lugar de ello, la computadora mantiene una base de datos donde consta la forma de cada uno de los objetos y la posición que ocupa. Es decir, a la hora de generar la imagen, la computadora recorre la lista de objetos, calcula cómo se vería cada uno desde la posición que el usuario ocupa, teniendo en cuenta la distancia, y lo dibuja en la correspondiente posición en la pantalla.

Existen en la actualidad numerosos sistemas que permiten ver imágenes de video en tres dimensiones, utilizando pantallas o gafas especiales. Sin embargo, estos

no son sistemas de Realidad Virtual, porque las imágenes de video han sido previamente grabadas y no se sintetizan en tiempo real.

Los sistemas de Realidad Virtual contienen una representación abstracta del mundo virtual: cuales son los objetos que lo componen, dónde están situados, cuales son sus representaciones gráficas sonoras, etc... a partir de la cual generarán la información que luego presentarán al usuario.

Dentro de esta característica es importante mencionar cuan importante es la velocidad del sistema, es decir, el número de imágenes que el sistema es capaz de sintetizar y mostrar por segundo.

Resulta muy poco práctico el mostrar imágenes de gran calidad si el sistema solo puede generar una de esas imágenes cada segundo, o por el contrario, si el sistema muestra unos cuantos objetos simples desplazándose a velocidades elevadas lo que repercutiría en un mundo virtual con muy poca "realidad".

La velocidad mínima recomendada para la generación de imágenes es de 10 por segundo. Por debajo de esta cifra el movimiento es muy brusco y lo ideal es poder llegar a las 30.

2.4.2 Interactividad

La característica anterior de sintetizar las imágenes en tiempo real, de acuerdo a las posiciones que ocupan los objetos y el usuario solo tiene sentido precisamente para permitir al usuario interactuar con el sistema. Si el usuario no tuviera la posibilidad de influir sobre el estado del mundo virtual de ninguna forma, o cambiar su punto de vista en la escena, no sería necesario sintetizar las imágenes, porque bastaría con grabar con antelación la película de lo que el usuario va a ver.

Existen dos tipos distintos de interacción entre el sistema y el usuario, la interacción dinámica y la navegación. Normalmente, los objetos que componen el

mundo virtual tienen cierto comportamiento asociado, y las acciones que esos objetos realizan se verán influidas por las del usuario. Así es posible que en una aplicación de Realidad Virtual el usuario pueda desplazar un obstáculo, poner en marcha un mecanismo, efectuar un disparo, o cualquier acción que haga que los objetos desaparezcan, cambien su representación gráfica o varíen su posición. Esto es lo que se denomina **interacción dinámica**.

Aun cuando el sistema no proporcione al usuario ninguna posibilidad de influir sobre el estado del mundo virtual, al menos debe permitirle otro tipo más básico de interacción, el cual consiste en que el usuario pueda cambiar su punto de vista dentro de la escena. A esto es a lo que se le llama **navegación** del mundo virtual.

En este tipo de aplicación, el usuario será un mero espectador de la escena, pero no del todo pasivo: podrá desplazarse por la misma para contemplarla desde otro ángulo, o desde otra posición.

Un parámetro fundamental en los sistemas interactivos es el de la velocidad de respuesta, el cual dentro de los sistemas de Realidad Virtual es conocido como **latencia**. La latencia es el tiempo transcurrido entre el instante en que el usuario efectúa una determinada acción, y el momento en que el sistema actualiza la información de salida que entrega al usuario.

Si la latencia de un sistema es elevada el usuario no puede tener un control preciso sobre sus movimientos y se producen oscilaciones debido a la sobrecompensación. Por ejemplo, si el usuario mueve su dispositivo de entrada para girar a la derecha y el sistema tarda demasiado en responder, el usuario entonces volverá a mover el dispositivo de entrada con más intensidad. Cuando finalmente se produce el giro, este es excesivo. El usuario intentará corregirlo girando a la izquierda, por lo que se producen oscilaciones y el movimiento dista mucho de ser fluido.

2.4.3 Tridimensionalidad

Para que un sistema pueda ser llamado de Realidad Virtual, es necesario que proporcione la dimensión de profundidad, esto es, los objetos de nuestro mundo virtual deben tener asociada una tercera dimensión que marque su profundidad en la pantalla. Esto permite que algunos objetos queden “por delante” o “por detrás” de otros, y que el tamaño aparente de los objetos varíe dependiendo de su distancia con respecto al observador, de no ser así, es decir, si el sistema genera imágenes puramente bidimensionales, no se trata de un sistema de Realidad Virtual.

Un ejemplo claro es la TV, las imágenes de TV son planas, de dos dimensiones; pero, a pesar de todo, al contemplar un a película por ejemplo, es posible determinar cuales objetos están situados delante de otros. Ello es debido a que una sucesión de imágenes planas contiene determinada información denominada clave de profundidad, que el cerebro humano emplea para deducir las profundidades relativas de los objetos.

2.4.4 Ilusión de realidad

Para que un sistema sea considerado de Realidad Virtual, debe cumplir también con la condición de que el mundo virtual tenga apariencia de realidad. No es en absoluto necesario que el mundo virtual se parezca al real. Basta con que *parezca real*.

Al contrario de los que sucede con las otras tres, esta condición no permite trazar un límite estricto entre lo que es y lo que no es un sistema de Realidad Virtual. Existen diversos factores que influyen en la creación de una ilusión de realidad, y los sistemas de Realidad Virtual emplean diversos mecanismos para lograrlo.

El que el usuario pueda sentir como real el mundo simulado va a depender tanto de factores físicos como psicológicos.

Los factores físicos están relacionados con el “aspecto” del mundo virtual, es decir, con las percepciones sensoriales del usuario acerca de dicho mundo. El aspecto será mucho más real cuantos más sentidos del usuario sea capaz de estimular el sistema, y cuanto más parecidos a las sensaciones reales sean esas representaciones artificiales.

Los factores psicológicos están relacionados con la “naturaleza” del mundo virtual, tal como el usuario la percibe. La ilusión de realidad será tanto más intensa cuantas más posibilidades de interacción se ofrezcan al usuario, y cuantas más posibilidades tenga este de influir en el estado del mundo virtual.

No es posible establecer reglas exactas sobre lo que es o no un sistema de Realidad Virtual, sin embargo si es posible excluir algunos tipos de sistemas: la mayoría de los videojuegos no pueden considerarse sistemas de Realidad Virtual, porque simulan mundos virtuales que no tienen tres dimensiones; los programas de animación que se utilizan para construir escenas que si son tridimensionales, tampoco pueden considerarse aplicaciones de Realidad Virtual, porque carecen de simulación en tiempo real del comportamiento y de capacidad inmersiva.

2.5 Elementos de un sistema de Realidad Virtual

Un sistema de Realidad Virtual estará, básicamente, constituido por:

- Dispositivos de entrada, mediante los cuales el usuario comunica sus órdenes al sistema, o que el sistema emplea para obtener información del entorno, por ejemplo la posición del usuario.

- Dispositivos de salida, que el sistema emplea para proporcionar al usuario información acerca del mundo virtual y provocar en él determinadas sensaciones.
- Estación de procesamiento, encargada de realizar las tareas de simulación así como el control de la entrada y salida de los datos.

2.5.1 Dispositivos de entrada

Como se mencionó, con los dispositivos de entrada el usuario puede transmitir sus órdenes al sistema de Realidad Virtual, indicándole que desea desplazarse, cambiar el punto de vista o interactuar con algún objeto del mundo virtual, este tipo de dispositivos se clasifican en:

- Dispositivos de localización.
- Dispositivos de control.

En un sistema inmersivo, por ejemplo, hay que disponer de sensores de posición para averiguar la dirección en la que el usuario está mirando así como su posición en el mundo virtual. Simultáneamente, el sistema puede estar recibiendo información de un guante de datos y procesándola para mostrar la “mano” del usuario dentro del mundo virtual.

En los sistemas inmersivos es necesario que el control de la orientación y de la posición se realice automáticamente para que el usuario tenga la sensación de encontrarse dentro del mundo virtual: si dirige la vista hacia un lado, la orientación debe cambiar inmediatamente. Por ello el sistema debe contar con dispositivos de localización que le permitan conocer cambios y desplazamientos realizados por el usuario a fin de actualizar su posición dentro del mundo virtual.

Los sistemas no inmersivos no emplean dispositivos de localización para conocer los cambios de dirección del usuario ya que este permanece estático frente a la pantalla.

2.5.1.1 Dispositivos de localización

Los dispositivos de localización son empleados para medir la posición y orientación de cualquier objeto o parte del mismo en el espacio de tres dimensiones. El ejemplo más común de este tipo de dispositivos dentro de los sistemas inmersivos son los visiocascos (como el mostrado en la figura 2.5.1.1.1) que mediante sensores permiten conocer al sistema los movimientos del usuario, cabe mencionar que este tipo de dispositivos cumplen una doble función ya que como se mencionó cuentan con sensores a fin de dar a conocer al sistema la posición del usuario además de brindar al usuario la “visión” del mundo virtual mediante pantallas generalmente de lcd, las cuales brindan de manera independiente para cada ojo del usuario la posición de los objetos y el mundo virtual procesado por la computadora.



Figura 2.5.1.1.1 Visiocasco

2.5.1.2 Dispositivos de control

Estos son los que permiten al usuario realizar el control explícito de las aplicaciones e interactuar con el mundo virtual. El ejemplo más común de este tipo de dispositivos son los guantes de datos (tal y como se aprecia en la figura 2.5.1.2.1) que brindan la posición y dirección de la mano y dedos del usuario. Incorporan una serie de sensores para determinar el ángulo de los dedos y la separación entre ellos.



Figura 2.5.1.2.1 Dispositivos de control.

2.5.2 Dispositivos de Salida

El sistema proporciona información al usuario mediante diversos dispositivos de salida, con los que puede representar el estado del mundo virtual. Dependiendo del sentido que se busque estimular, los dispositivos de salida se clasifican en:

- Dispositivos de presentación
- Dispositivos de sonido.

2.5.2.1 Dispositivos de Presentación

Estos tienen por objetivo proporcionar al usuario la imagen del mundo virtual, es decir, información de carácter gráfico acerca de los objetos que componen el mundo virtual, sus posiciones y características.

Los sistemas de Realidad Virtual utilizan técnicas de tratamiento de gráficos 3D para generar la imagen a partir de una definición tridimensional del mundo virtual y de los objetos que lo forman. Dicha imagen será luego mostrada al usuario empleando un dispositivo de presentación adecuado.

Además de los dispositivos de carácter convencional (como monitores y pantallas de proyección) empleados en los sistemas proyectivos y de sobremesa, los sistemas de Realidad Virtual emplean por lo general visiocascos (como el mostrado anteriormente en la figura 2.5.1.1.1), sistemas binoculares y gafas estereoscópicas.

Tanto los visiocascos como los sistemas binoculares se emplean en aplicaciones inmersivas, donde el usuario ve únicamente imágenes procedentes del mundo virtual, y no lo que hay a su alrededor. Ambos tipos de sistemas proporcionan siempre una visión estereoscópica al usuario, puesto que incorporan dos pantallas distintas, una por cada ojo.

Los lentes estereoscópicos, por su parte, se emplean tanto en sistemas inmersivos como proyectivos, precisamente para permitir al usuario la visión en relieve que un dispositivo de presentación convencional no le proporciona.

2.5.2.2 Dispositivos de Sonido

El sonido tiene cuatro funciones primordiales en una aplicación de Realidad Virtual.

En primer lugar se encuentra lo que podría denominarse función informativa, las señales acústicas permiten informar al usuario de la ocurrencia de determinados eventos. Sirven, por ejemplo, para confirmarle que ha pulsado un botón, o para notificarle una condición de alarma o un cierto estado del sistema.

En segundo lugar está la función metafórica. El sonido, al igual que la imagen, puede emplearse para “traducir” una serie de datos a un formato fácilmente entendible por el usuario. El sonido presenta la ventaja sobre la imagen para este tipo de aplicación, de que no requiere la atención constante del usuario.

La tercera función es la función artística, donde el sonido se emplea en forma de música de fondo. Las secuencias musicales contribuyen a incrementar el atractivo de una aplicación, e incluso permiten influenciar, en cierta medida, el estado de ánimo del usuario.

La última función puede denominarse como descriptiva y es la realizada por todos los efectos de sonido que describen sucesos que tienen lugar dentro del mundo virtual. Los efectos del sonido como el de un vidrio roto al caerse un vaso, el sonido del impacto cuando dos objetos chocan, etc...contribuyen al realismo de una escena casi tanto como la propia imagen. El poder escuchar lo que acontece dentro del mundo virtual no solo contribuye a aumentar la sensación psicológica de inmersión y realidad, sino que permite al usuario comprender más fácilmente una escena.

Un factor importante y poco considerado dentro de la función del sonido en los sistemas de Realidad Virtual es el de lograr la estimulación corporal a través de la conjunción de imágenes y sonidos a fin de brindar al usuario la mayor sensación de realismo en el mundo virtual. Para ello, las bajas frecuencias audibles juegan un papel fundamental ya que a partir de estas es posible acentuar mediante dispositivos adicionales efectos tales como explosiones, tormentas, etc. que permitirán mediante vibraciones, transmitir el tipo de efecto a través del cuerpo del

usuario así, en conjunto con la imagen y el sonido este tipo de dispositivos contribuirá a una mucho mayor sensación de realismo.

2.6 Aplicaciones de Realidad Virtual

Los usos de la Realidad Virtual son muy amplios. Los primeros ejemplos han consistido en recorridos arquitectónicos, entrenamiento para el manejo de aeronaves o bien dentro del campo de la ciencia ficción. Sin embargo, esta tecnología ha encontrado también desarrollo en medicina, defensa, entretenimiento y desarrollo empresarial. Los principales campos de acción de la Realidad Virtual son los siguientes:

- Entretenimiento
- Defensa
- Medicina
- Arquitectura
- Diseño Industrial
- Diseño Molecular
- Simulación
- Tele-presencia
- Seguridad
- Enseñanza

2.6.1 Entretenimiento

El principal interés por la Realidad Virtual ha sido el entretenimiento tecnológico gracias al desarrollo en los juegos electrónicos. Una derivación de este desarrollo han sido las distintas máquinas, habituales en las salas de juegos electrónicos, que combinan algunos elementos firmemente adheridos a la instalación con rutinas establecidas (disparar, andar en esquí, conducir por la carretera, etc.) La culminación de esta posibilidad son algunas de las amplias implementaciones de

los grandes parques internacionales (Disney, Universal, etc.), que generalmente se dirigen a públicos.

2.6.2 Defensa

Aun cuando el principal atractivo en esta tecnología ha sido la industria del entretenimiento, la fuerza motriz para el desarrollo y creación de la Realidad Virtual ha sido gracias a cuestiones de defensa.

El entrenamiento aeronáutico ha sido la aplicación que ha focalizado la evolución inicial de la computación gráfica y la Realidad Virtual, constituyendo actualmente el grupo de usuarios mas avanzado.

La preparación de pilotos civiles y militares con instalaciones virtuales requiere prolongados entrenamientos en sofisticadas cabinas de mando, sin embargo esto significa un considerable ahorro en costos de utilización y mantenimiento en las aeronaves.

2.6.3 Medicina

La sofisticada preparación de los médicos en órganos difícilmente visibles, el desarrollo de tratamientos a distancia y operaciones con mínimas alteraciones anatómicas, han sido posibilidades concretas para implementar tecnologías de Realidad Virtual.

Un área que ya esta siendo implementada técnicamente es la utilización de dispositivos virtuales en cirugía no intrusiva. La ventaja de minimizar los trastornos corporales de la intervención, disminuir riesgos operatorios y los tiempos de hospitalización asociados han impulsado la formulación de instrumental diverso, tanto de inspección visual como de intervención quirúrgica. Aunque no se han

conectado aun estos dispositivos a la distancia, se puede llegar incluso a operaciones virtuales remotas.

También se presentan interesantes potencialidades en el tratamiento de algunas fobias psicológicas, como claustrofobia o aracnofobia

2.6.4 Arquitectura

La Realidad Virtual brinda la posibilidad de crear grandes complejos industriales o comerciales con la finalidad de hacer evaluaciones previas a su construcción como se muestra en la figura 2.6.4.1, además es idónea para mostrar a potenciales compradores las casas que aun no han sido construidas. Los compradores podrán emplear un casco de visualización y caminar por las calles para ver el aspecto de su vivienda por fuera o bien entrar en ella para contemplar una imagen realista de las habitaciones.

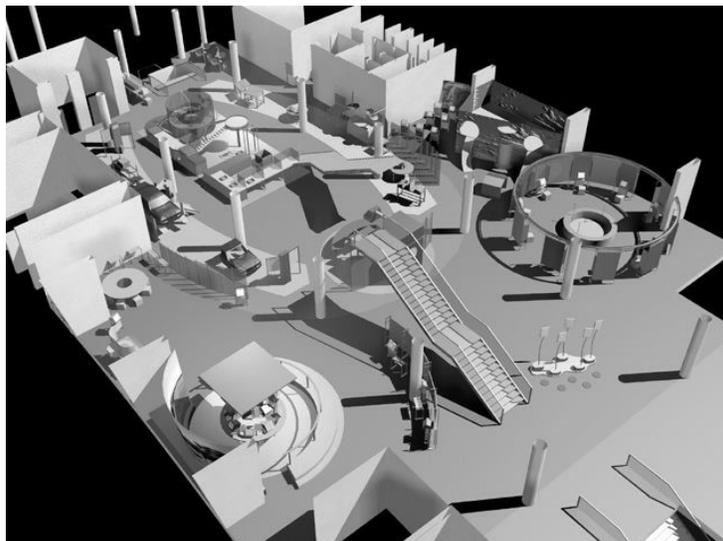


Figura 2.6.4.1 Realidad Virtual y arquitectura

2.6.5 Diseño Industrial

Las compañías enfrentan el reto de crear y diseñar nuevos proyectos. La interacción entre la Realidad Virtual y el diseño permite evaluar la validez, funcionalidad, facilidad de montaje y el mantenimiento de los diseños. Por ejemplo, en el caso de componentes móviles o articulados como automóviles o vagones de tren, el ahorro en tiempo y dinero que ofrece la Realidad Virtual sobre los métodos convencionales, permite realizar mucha más pruebas, aumentando así la calidad y eficiencia en los diseños.

Como un ejemplo de lo anterior es posible mencionar a la empresa de fabricación de vehículos de construcción Caterpillar. Caterpillar emplea una aplicación de Realidad Virtual para comprobar las condiciones de visibilidad en el interior de los nuevos modelos de vehículos.

Se trata de un sistema inmersivo, con visiocasco, en el que el operador se sienta en un prototipo de cabina equipada con controles reales. Los controles reales son reproducidos en el mundo virtual, de forma que el operador puede verlos. El operador puede mover el vehículo virtual y accionar los controles de distintos elementos, como la pala de una excavadora, etc... El caso le permite dirigir su vista en todas las direcciones del mundo virtual.

El objetivo es comprobar si, en condiciones reales de operación, el usuario del vehículo tiene la adecuada visibilidad en todas direcciones. Antes, este tipo de comprobaciones no podían realizarse sin construir un costoso prototipo del vehículo completo, si se descubría un problema, el prototipo sería rechazado.

2.6.6 Diseño molecular

La Universidad de York, en colaboración con la compañía División, está desarrollando herramientas de Realidad Virtual capaces de modelar moléculas

para el diseño de medicamentos. Los sistemas gráficos moleculares permiten a los científicos interactuar y manipular representaciones de las moléculas para comprender las relaciones entre la estructura tridimensional de una molécula y su función. La Realidad Virtual permite alcanzar un nuevo nivel en la interacción de los científicos con los modelos tridimensionales, y permite a los químicos ver y manipular partes de la estructura de las moléculas.

2.6.7 Simulación

En estas aplicaciones se entrena a los usuarios en el manejo de determinados equipos o en la realización de determinadas actividades (como puede verse en la figura 2.6.7.1), lo que las hace perfectas para la utilización de técnicas de Realidad Virtual. Ejemplificando con los simuladores de vuelo, en estos se tiene un control absoluto sobre todas las condiciones del entrenamiento y en caso de accidente, supone un importante ahorro de dinero.



Figura 2.6.7.1 Realidad Virtual en entrenamiento y simulación

2.6.8 Tele-presencia

Este tipo de sistemas proporcionan comunicación audiovisual desde puntos remotos, se incluyen aplicaciones de tele-trabajo que ofrecen a las compañías el consejo de expertos en cualquier parte del mundo, en tareas tales como el mantenimiento remoto y tareas de inspección o instalación.

En los sistemas de tele-robótica, en los que un operador puede controlar a distancia la acción de un dispositivo mecánico, también se emplea con éxito la Realidad Virtual. Este tipo de sistemas se emplean en situaciones en las que existe cierta carencia de luz -exploración de los fondos marinos-, o existe un gran retardo en la transmisión –exploración interplanetaria-, y por ello, se suele utilizar una mezcla de imágenes reales y virtuales que complementan la falta de datos reales. A este tipo de realidad se le denomina “Realidad Aumentada”.

2.6.9 Seguridad.

La División de Seguridad de la Compañía Eléctrica de Francia usa la Realidad Virtual para diseñar y probar los procedimientos operativos de una central nuclear. Un ejemplo es examinar el mantenimiento de un reactor nuclear, ya que el principal peligro de los ingenieros de mantenimiento es el tiempo que deben pasar cerca de la radiación. Mediante la Realidad Virtual, el ingeniero puede desplazarse por el interior del edificio virtual realizando las operaciones de mantenimiento. Mientras tanto, el sistema calcula continuamente la radiación teórica que habría recibido el ingeniero al efectuar verdaderamente la operación.

2.6.10 Enseñanza

La compañía Aarhus Productions fabrica pantallas de Realidad Virtual multisensoriales a fin de mejorar cualquier programa educativo. Mediante la proyección de imágenes virtuales en una pantalla de gran tamaño, el profesor

puede guiar a toda una clase a través de la estructura de un átomo de hidrógeno, o de la nebulosa de Orión.

La NASA ha desarrollado un laboratorio virtual de física, en el que los alumnos pueden cambiar parámetros como la masa, la gravedad, o la fricción de los objetos, y observar el efecto producido por los experimentos.

CONCEPTOS BÁSICOS DE LA FÍSICA DEL SONIDO

3.1 Introducción

De acuerdo con el diccionario de la Lengua de la Real Academia Española, sonido es la sensación producida en el órgano del oído por el movimiento vibratorio de los cuerpos, transmitido por un medio elástico, como el aire. Dicho movimiento vibratorio se transmite de molécula en molécula, provocando un movimiento en cadena.

El sonido, también se pueden describir como el efecto de la propagación de las ondas producidas por una perturbación de la presión en los medios materiales y, que dependerá de la densidad de los mismos.

Por tanto, el sonido es todo lo que oímos, se trasmite en forma de ondas y es el resultado de los cambios de presión en los medios materiales y desplazamiento de las moléculas.

3.2 Origen del Sonido

El origen del sonido es cualquier perturbación por compresión, que viaja a través de un material, de tal manera como para poner en movimiento el tímpano humano, dando lugar a la sensación de audición. El sonido es una vibración material y solamente puede tener lugar donde hay presente un medio de transmisión.

Para la generación y propagación del sonido son necesarias dos cosas, debe haber algún objeto que vibre de tal forma que emita una onda de compresión y, en segundo lugar, debe haber presente un material para transmitir las ondas, en este caso, el sonido.

3.3 El Sonido en el Aire

Suponiendo un medio aéreo, el sonido está originado por cualquier perturbación en la presión atmosférica. Esta oscilación se propaga por el aire mediante una onda acústica.

La mayoría de las personas poseen la idea intuitiva de lo que es una onda. Han visto las olas del mar rompiendo en la orilla o han observado las ondulaciones que se radian desde el punto donde una piedra golpea la superficie de un charco de agua.

Las ondas acústicas son un tipo particular de la clase más general de ondas conocidas como ondas elásticas. Las ondas elásticas pueden producirse en un medio que posea las propiedades de masa y elasticidad. Si una partícula de este medio es desplazada de su posición de equilibrio, las fuerzas elásticas presentes tenderán a arrastrarla a la posición original de la cual fue sacada por la perturbación.

La partícula desplazada de su posición de equilibrio posee inercia y, al desplazarse golpea las partículas próximas, las que a su vez golpean a las siguientes próximas y así sucesivamente, propagándose de este modo la perturbación a través del medio, en este caso el aire (medio aéreo). Dicha propagación es por medio de oscilaciones sucesivas de partículas elásticas próximas. Ninguna de las partículas se propaga con la onda, solamente la “energía” de la perturbación es la que se transmite, las partículas únicamente oscilan una distancia infinitesimal alrededor de sus posiciones de equilibrio a lo largo de la dirección de propagación de la onda, como se observa en la Figura 3.3.1, mostrada a continuación.

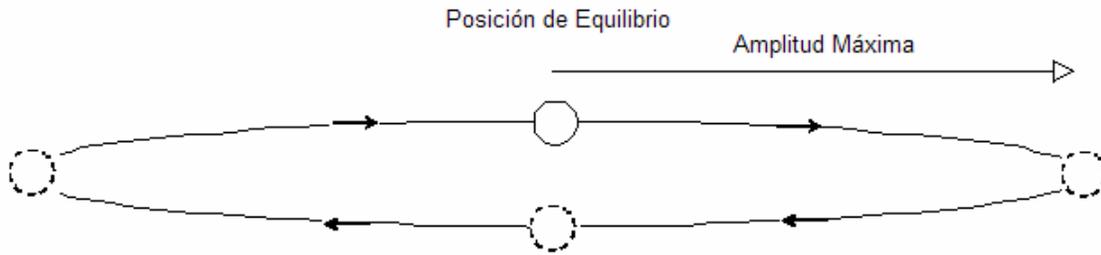


Figura 3.3.1 Movimiento de las partículas durante un ciclo

Por lo explicado anteriormente, el aire oscila de un lado a otro a lo largo de la dirección de propagación de la onda y, por tanto, el sonido es una onda longitudinal.

Entonces, entre la propagación de las ondas sonoras y la propagación de las ondulaciones en la superficie del charco, existen varias analogías, y son: ambas perturbaciones se alejan de sus orígenes respectivos a velocidad constante, por intercambio de energía y sin transferencia neta de materia desde la fuente generadora de la perturbación, sin embargo, una diferencia importante es que, mientras las ondulaciones se propagan por “ondas transversales” –es decir, la velocidad de la partícula forma un ángulo recto con la dirección de propagación–, el sonido en el aire se propaga por “ondas longitudinales”, es decir, la dirección de la velocidad coincide con la de propagación.

En contra de lo que ocurre con la luz, cuya velocidad de propagación es una constante universal, la velocidad de propagación de las ondas acústicas depende en gran medida de las características del medio en que se transmiten.

3.4 Velocidad del sonido

La velocidad del sonido (c) se define como la velocidad con que viajan las ondas en un medio determinado. Generalmente, se transmiten más rápido en los sólidos, después en los líquidos y, por último, en los gases. Por tanto, la velocidad

depende del medio en el que se propaguen las ondas. La velocidad del sonido se expresa en metros por segundo [m/s].

La velocidad c con que se propaga una onda sonora en un medio viene determinada por la fuerza entre las moléculas. A nivel macroscópico, estas fuerzas vienen caracterizadas por el *módulo de compresibilidad* (K). Esta magnitud relaciona el cambio de presión (ΔP) con el cambio relativo de densidad ($\Delta\rho/\rho$), expresado en la función que se muestra a continuación:

$$\Delta P = K \frac{\Delta\rho}{\rho}$$

Se comprueba que la velocidad c sólo depende del módulo de compresibilidad y de la densidad del medio. Con lo cual la velocidad c es esencialmente independiente de la presión, como se observa en la siguiente ecuación:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

donde, K es el módulo de compresibilidad adiabático, no el módulo isotérmico, porque, así como hay cambios de temperatura que acompañan a las compresiones y rarefacciones, éstos son tan rápidos que casi no puede producirse flujo de calor, y por tanto el movimiento es adiabático.

Así, la temperatura de un gas influye sobre la velocidad del sonido en él. Para temperaturas no muy alejadas de 0°C , la velocidad del sonido en el aire se eleva en, aproximadamente, 0.60 m/s por cada grado centígrado de elevación de temperatura. La velocidad del sonido en el aire a 0°C es aproximadamente 331 m/s, expresado como sigue:

$$c = 331 + (0.6 * T)$$

donde, T es la temperatura expresada en $^{\circ}\text{C}$ y c es la velocidad del sonido en el aire.

En la Tabla 3.4.1, se dan valores representativos de ρ y de c , para diferentes materiales:

Densidades y velocidades del sonido representativos en diferentes materiales (la temperatura es de 20°C a menos que se indique)		
Material	Densidad [kg/m^3]	Velocidad del sonido [m/s]
Aire	1.05	344
Dióxido de Carbono (0°C)	1.98	258
Hidrógeno (0°C)	8.99×10^{-2}	1270
Alcohol etílico	791	1210
Bencina	810	1166
Agua (pura)	1000	1480
Aluminio	2700	5100
Cobre	8900	3560
Vidrio	2500	5600
Hierro	7900	5130
Roble	800	3850
Sangre (37°C)	1056	1570
Tejido corporal (37°C)	1047	1570

Tabla 3.4.1 Valores representativos del Densidades y velocidades del sonido

3.5 Características del Sonido: Amplitud (Intensidad), Frecuencia (Tono) y Calidad del Tono (Timbre)

Para caracterizar al sonido en Amplitud, Frecuencia y Forma de Onda, debemos de establecer algunas definiciones básicas, las cuales se mencionan a continuación:

- Velocidad del sonido, -explicada anteriormente- es el tiempo necesario para que el movimiento se propague de unas partículas a las próximas sucesivas. Su unidad de medida son los metros entre segundo (m/s) y, se representa con la letra c .
- Período, es el tiempo que tarda en finalizar una onda u oscilación. Se mide en unidades de tiempo, normalmente segundos y se representa con la letra T .
- Longitud de onda, es la distancia entre dos máximos de presión (compresión) sucesivos o entre dos mínimos de presión (rarefacción) en una onda. La longitud de onda esta medida en metros y, se representa con la letra griega lambda (λ).
- Frecuencia, se define como el número de ondas que hay en un segundo. La unidad de medida de frecuencia es el Hertzio (Hz) y, se representa con la letra f . La frecuencia es la inversa del período: $f = 1/T$.

La relación entre λ , c , T y f es:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}$$

- Amplitud, la amplitud de una onda es indicativa del nivel de potencia a la que se han producido las oscilaciones. Cuanto mayor sea la amplitud, el sonido será más fuerte.
- Potencia sonora, es la energía transferida en un determinado intervalo de tiempo dividida por la duración de dicho intervalo. El símbolo usado internacionalmente para designarles es P ó P_a , pero a fin de no confundirla con la presión atmosférica se designa en algunos casos como W y, la unidad en que se mide es el Vatio (W).

- Intensidad sonora, se define como la energía por segundo transportada a través de una unidad de área por dicha onda. El área es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Puesto que la energía por segundo es la potencia y su unidad de medida es el Vatio, la unidad de intensidad sonora será la de potencia por unidad de superficie, es decir Vatio por metro cuadrado (W/m^2) y, se representa con la letra I .

Como ocurre con todos los fenómenos ondulatorios, en el sonido son importantes dos parámetros: la frecuencia y la amplitud. La frecuencia es percibida como tono, las frecuencias elevadas se perciben como tonos agudos, las más bajas como tonos graves. Por su parte, la amplitud se percibe como intensidad, volumen o sonoridad. Las vibraciones de gran amplitud se perciben como sonidos fuertes, las de pequeña amplitud son sonidos débiles.

La frecuencia f de un sonido y su longitud de onda λ están directamente relacionadas con la velocidad de propagación c de la siguiente forma:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

El conocimiento de la longitud de onda del sonido es fundamental cuando se trabaja en espacios acústicos. Cuando se trata del sonido, además de la frecuencia (tono) y amplitud (sonoridad) también es importante el timbre o calidad del tono. Análogamente, como en la radiación electromagnética, de la que no existen luces de color puro, en la vida real tampoco existen sonidos puros (de una sola frecuencia). Los sonidos reales son compuestos de vibraciones de muchas frecuencias, precisamente la proporción de las frecuencias componentes es lo que caracteriza el timbre de los sonidos, desde la voz humana hasta los instrumentos musicales.

Un sonido más o menos puro como una nota de piano, tiene una componente fundamental, que corresponde a la frecuencia de la propia nota, pero está acompañada de toda una gama de frecuencias (múltiplos y divisores) por arriba y por debajo de esta frecuencia fundamental y, son los denominados componentes armónicos, que en conjunto caracterizan la nota.

Otro aspecto importante para la identificación de sonidos es su evolución en el tiempo. La amplitud del sonido tiene una evolución desde el momento inicial hasta que desaparece, y esta evolución concierne tanto a la componente fundamental como a sus armónicos.

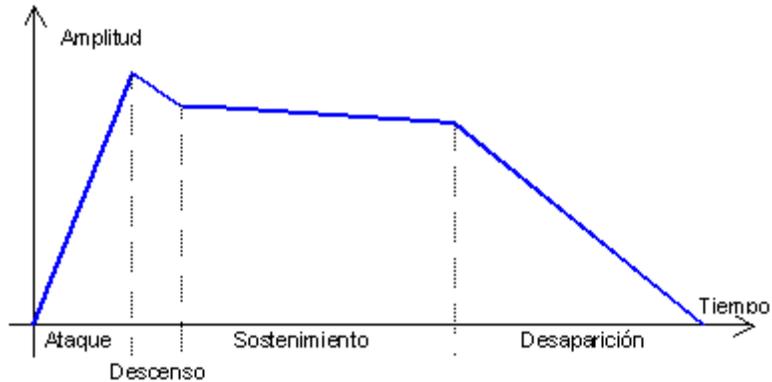


Figura 3.5.1 Envolvente del sonido en el tiempo

Su representación, Figura 3.5.1, es la envolvente del sonido y tiene cuatro partes características: El ataque ("Attack") es la fase en que el sonido va creciendo en intensidad hasta alcanzar un máximo. El sostenido ("Sustain") es una fase en que la intensidad es más o menos constante; en ocasiones después de un pequeño descenso ("Decay") después de la amplitud máxima. Finalmente, la desaparición ("Release") es la fase en que la intensidad va disminuyendo hasta desaparecer. Por ejemplo, una palmada tiene un tiempo de ataque de unos 2.5 ms en los que la amplitud crece muy rápidamente; un sostenimiento de unos 3 ms y desaparece en otros 2.5 ms. En cambio, el tiempo de ataque de un gong es mucho más lento, del orden de 1 s; su sostenimiento es de 1.5 s y su desaparición del orden de 30

segundos o más. Tenga en cuenta que la intensidad de los armónicos (su envolvente) no evoluciona igual que la de la frecuencia principal y es a su vez distinta para los distintos instrumentos.

La figura anterior, muestra una imagen simplificada (utilizando trazos rectos) de la envolvente de un sonido. Es una representación conocida como modelo ADSR ("Attack-Decay-Sustain-Release"), que es utilizada en ciertas técnicas de síntesis

3.6 Espectro Audible

Para el oído humano, se considera como estándar la gama de frecuencias entre 20 y 20000 Hz. Los sonidos cuya frecuencia sea inferior a 20 Hz se llaman infrasonidos o subsónicos, mientras que los que superan la frecuencia de los 20000 Hz se les llama ultrasonidos. El espectro audible es diferente para cada persona.

Las frecuencias pueden clasificarse, según su valor, en tonalidades. A medida que la frecuencia es mayor se habla de una tonalidad o tono mayor. Así, distinguimos tonos graves o bajos, medios y, agudos o altos.

Los sonidos graves van de 20 a 300 Hz, los medios de 300 a 2000 Hz y, los agudos de 2000 hasta 20000 Hz.

El espectro audible se subdivide en octavas. El valor máximo de cada una de ellas es el doble de la anterior. La primera octava y la última son prácticamente inaudibles para el oído humano.

En la Tabla 3.6.1, se muestra la relación de Octavas y su rango de frecuencia del espectro audible.

1 ^a	Octava:	16	-	32	(Hz)
2 ^a	Octava:	32	-	64	(Hz)
3 ^a	Octava:	64	-	125	(Hz)
4 ^a	Octava:	125	-	250	(Hz)
5 ^a	Octava:	250	-	500	(Hz)
6 ^a	Octava:	500	-	1000	(Hz)
7 ^a	Octava:	1000	-	2000	(Hz)
8 ^a	Octava:	2000	-	4000	(Hz)
9 ^a	Octava:	4000	-	8000	(Hz)
10 ^a	Octava:	8000	-	16000	(Hz)
11 ^a	Octava:	16000	-	32000	(Hz)

Tabla 3.6.1 Espectro audible en Octavas

A pesar de tener el mismo tono y la misma potencia, dos sonidos no tienen por qué ser idénticos. Su diferencia está en el timbre. Es su forma propia y característica de sonar. Se debe a que los sonidos se componen de ondas superpuestas a una frecuencia básica o fundamental. Son los llamados armónicos, cuya frecuencia es múltiplo de la frecuencia fundamental.

3.7 Presión Sonora

Las variaciones de presión producidas por una onda sonora en su propagación a través del aire (“presión sonora”) son muy pequeñas comparadas con la presión atmosférica ambiental y están superpuestas a éstas, como puede verse en la Figura 3.7.1.

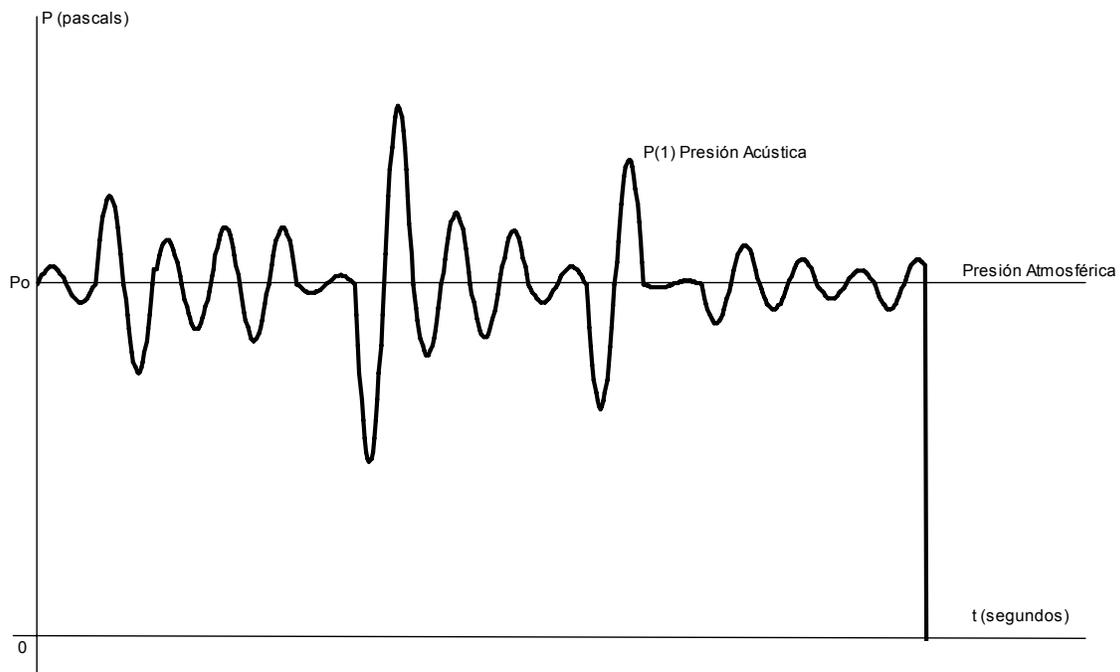


Figura 3.7.1 Presión en un punto con presencia de sonido

El sonido más tenue que un adulto joven puede detectar corresponde a una presión sonora de 0.00002 Pa ($1 \text{ Pascal} = 1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$; $\text{N} = \text{Newton}$), mientras que la presión atmosférica es de 10^5 Pa .

3.8 Potencia Sonora

El frente de onda que se propaga alrededor de un punto transporta cierta energía. La energía es la capacidad de producir un trabajo. A su vez el trabajo puede transformarse en movimiento mecánico o calor; Esta energía es captada por el tímpano, y es precisamente responsable de que podamos oírlo. Es bastante intuitivo que cuanto más extenso sea este frente (más alejado del punto inicial) la energía estará menos concentrada (el sonido se percibe como más débil). Por esta razón la energía en sí misma no es muy representativa de lo "Fuerte" que puede resultar un sonido.

Cualquier fuente de sonido está caracterizada por su potencia sonora. La potencia sonora es una propiedad física que va a depender únicamente de la fuente. Es un parámetro absoluto que se usa normalmente para valorar y comparar fuentes sonoras; para estos fines no se usa la presión sonora.

Como veremos a continuación, es más representativa la energía por unidad de superficie. Sin embargo, indicaremos aquí que el oído es un órgano extraordinariamente sensible en este aspecto, pudiendo percibir energías infinitesimales. Se estima que al hablar en tono normal desarrollamos una potencia de 0.00001 W (10^{-5} W), y tres veces este valor para un grito. La potencia es la energía dividida por el tiempo (energía en unidad de tiempo), generalmente expresada en Vatios ("Watts"). $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 0.10197 \text{ kg}\cdot\text{m/s}^2$.

3.9 Intensidad Sonora

La intensidad de la onda sonora se define como la energía por segundo transportada a través de una unidad de área por dicha onda. Puesto que la energía por segundo es la potencia y su unidad es el vatio, la unidad de intensidad del sonido será la de potencia por unidad de superficie, o sea, vatios/m^2 .

Cualitativamente nosotros juzgamos un sonido que tiene una intensidad de $10^{-5} \text{ vatios/m}^2$ como de sensación sonora inferior al doble de la de un sonido de intensidad de $10^{-6} \text{ vatios/m}^2$. Si el oído fuese un mecanismo de respuesta lineal, nosotros percibiríamos que el primer sonido es diez veces más intenso que el segundo.

Por esta razón, se utiliza el medir niveles de intensidad sonora mediante una unidad que se adapta mejor a nuestro concepto de sensación sonora, denominada decibelio (abreviadamente, dB). Se le dio este nombre en honor de Alexander Graham Bell. El decibelio se define de acuerdo con una escala logarítmica

$$Intensidad = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

en donde I_0 es la intensidad del “sonido más débilmente audible”, tomada como 10^{-12} vatios/m².

En la Tabla 3.91, se agrupan intensidades de diversos sonidos bien conocidos.

Tipo de Sonido	Intensidad [vatios/m ²]	Nivel de Intensidad [dB]
Doloroso	1	120
Taladradora	10^{-2}	100
Tráfico urbano	10^{-5}	70
Conversación ordinaria	10^{-6}	60
Cuchicheo medio	10^{-10}	20
Murmullo de hojas	10^{-11}	10
Sonido apenas perceptible	10^{-12}	0

Tabla 3.9.1 Intensidad de sonidos conocidos

3.10 Sensibilidad Humana

Como hemos señalado, el oído humano es un instrumento extremadamente sensible; es capaz de percibir vibraciones del aire del orden de 10^{-11} m, aunque evidentemente esta sensibilidad no es la misma para todos los individuos ni para todas las frecuencias. Fletcher y Munson (F&M) fueron los primeros investigadores que en los años 30 establecieron la sensibilidad humana a sonidos de diversa amplitud y frecuencia, demostrando que la sensibilidad del oído es extremadamente dependiente de la frecuencia, registrando una sensibilidad máxima entre 3 y 4 kHz. Por encima y debajo de estas frecuencias los sonidos se perciben más débilmente.

Según estos resultados resulta evidente que conocer el SPL (Sound Pressure Level) de un sonido no proporciona suficiente información sobre su sonoridad ("cuanto" de fuerte lo percibimos); habría que indicar su frecuencia y conocer el grado de sensibilidad a esta última.

Con objeto de dar una medida lo más fiel posible de la "sonoridad" de un sonido, Fletcher y Munson establecieron una medida para la sonoridad y una serie de curvas de igual sonoridad para varios niveles de presión acústica, desde el umbral de audición (0 dB), a niveles dañinos para la salud (120 dB), en intervalos de 10 dB.

Se utiliza el término sonoridad para describir el nivel de sensación que produce un sonido. La unidad de sonoridad fon, es la que corresponde a un sonido de 1000 Hz expresado en dB.

Para determinar la sonoridad de una nota de cualquier frecuencia f , se determina el SPL en dB de un sonido de 1000 Hz que proporcione la misma sensación de volumen sonoro.

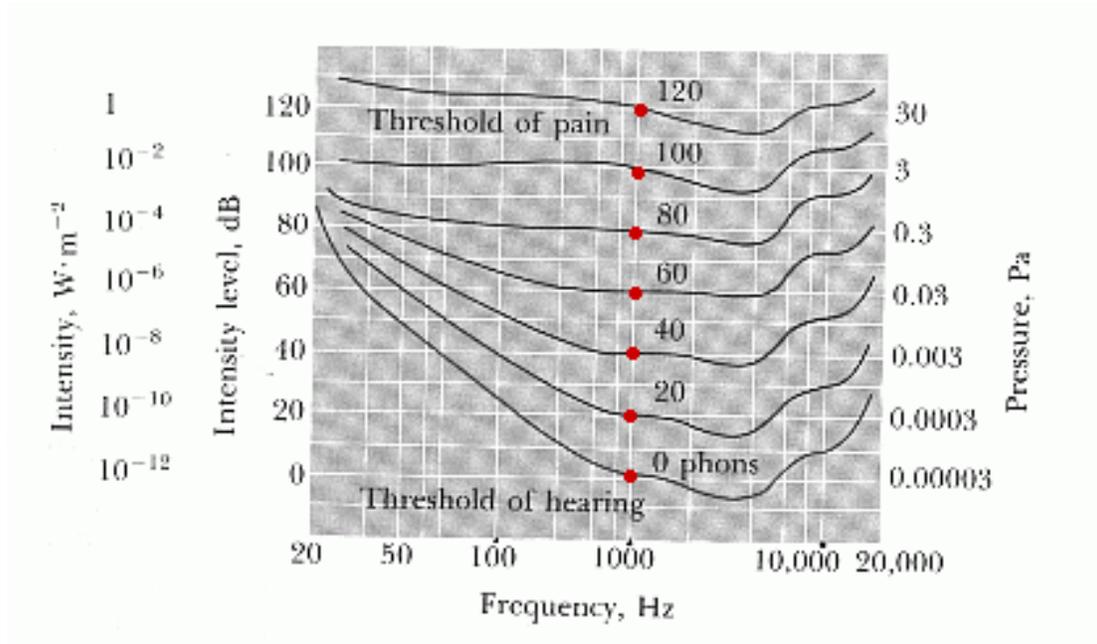


Figura 3.10.1 Curvas de Fletcher y Munson

En la Figura 3.10.1 se muestran una serie de estas curvas de F&M. En abscisas se muestran (en escala logarítmica) las frecuencias f de 20 a 20,000 Hz (audibles); en ordenadas se muestran las intensidades I del sonido en W/m^2 ; en decibelios, y la presión máxima Pa correspondiente en pascuales (Newton/m²).

Las curvas muestran puntos de igual sonoridad, la inferior corresponde al umbral de percepción, la superior al umbral de dolor. Por ejemplo, un sonido de 100 Hz a 52 dB y otro de 10 kHz a 52 dB tienen la misma sonoridad que una nota de 1 kHz a 40 dB, lo que significa que los tres tienen una sonoridad de 40 fones.

ELECTROACÚSTICA.

4.1 Introducción

La electroacústica es la parte de la acústica que se ocupa del estudio, análisis y diseño de dispositivos que convierten energía eléctrica en acústica y viceversa, así como de sus componentes asociados. Entre éstos, se encuentran los micrófonos, bocinas, procesadores de audio y sistemas de grabación.

4.2 Cadena de un sistema de audio típico

Una de las aplicaciones más comunes de la electroacústica, es capturar un evento sonoro y reproducirlo posteriormente, por ejemplo, escuchar un disco compacto de música.

El poder escuchar un evento sonoro que ocurrió en un tiempo y lugar diferente, es producto de una cadena de dispositivos, todos ellos estudiados por la electroacústica.

Una cadena típica estaría conformada como se muestra en la figura 4.2.1 por: Micrófonos, preamplificador, mezcladora, procesadores de audio, sistema de almacenamiento y reproducción, amplificador y bocina o audiófonos

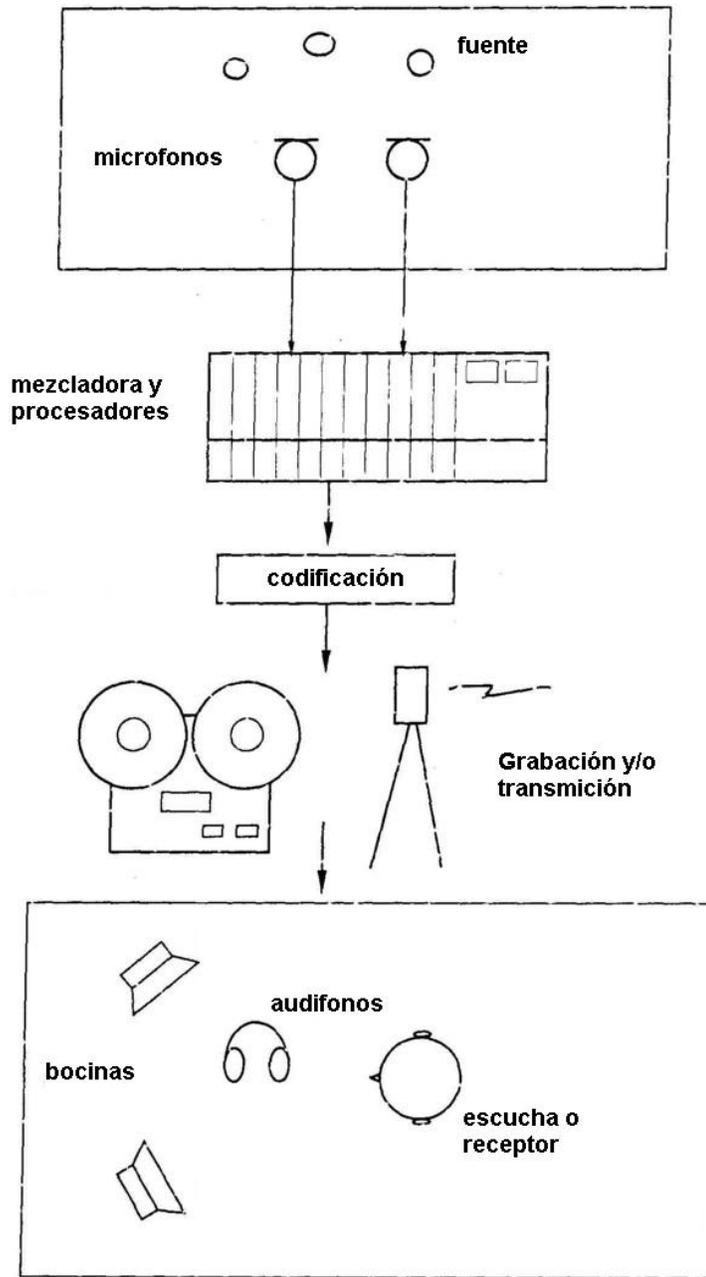


Figura 4.2.1 Cadena típica de un sistema de audio

4.3 Transductores

Los transductores son los dispositivos que se encontraran al inicio y al final de una cadena típica de audio.

Un transductor es un dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra diferente de salida.

Un micrófono transforma energía mecánica en energía eléctrica, y una vez transformadas las vibraciones mecánicas en una señal eléctrica, se puede hacer uso de todos los recursos de la electrónica para manipular la señal y posteriormente usar otro transductor que transforma la energía eléctrica en energía mecánica llamado bocina.

Regresando al ejemplo de escuchar un disco compacto de música, la cadena, entre la fuente (músicos) y el receptor (escucha) puede estar compuesta de los siguientes elementos:

Micrófonos: Como ya se mencionó, convierten la energía mecánica en energía eléctrica.

Preamplificadores: Aumentan el nivel de la señal de salida del micrófono a niveles más manejables. Es necesario elevar la señal de salida del micrófono, ya que, si se trabajara con niveles de señal muy bajos, la relación señal útil y ruido o interferencia no es favorable. El ruido compite en nivel, constantemente con la señal útil de nuestro sistema.

Mezcladora: Es un dispositivo que posee varios de éstos preamplificadores, sirve para recibir la señal de varios micrófonos, y es en éste mismo dispositivo que, se mezclan o suman las señales de los micrófonos controlando la cantidad de las mismas hasta tener una relación entre ellas que sea artísticamente agradable.

El adjetivo “artísticamente” convierte de alguna manera el uso de la mezcladora en un elemento importante de una obra musical.

Si bien, hay parámetros físicos de la electrónica que se detallan más adelante, como rango dinámico, respuesta en frecuencia, no hay reglas establecidas para la forma “correcta” de mezclar. Un parámetro puede ser, tratar de reproducir como se escucharía el grupo musical si se estuviera parado frente a ellos. Este concepto puede resultar un poco complicado con grupos musicales modernos que hacen uso extensivo de la electrónica como elemento de su interpretación, pero si por ejemplo, se trata de una orquesta o algo mucho más simple, como un cuarteto de cuerdas, y si cada instrumento tiene un micrófono, se esperaría que, el resultado de la mezcla de la señal de estos micrófonos fuera una representación “fiel” de lo que se escucharía al estar parados frente a los músicos.

No hay que olvidar que, éste, es solo un parámetro, más no una regla, no habría por que impedir que alguien resalte o modifique el sonido de alguno de los instrumentos, si esta modificación contribuye con la estética de la obra.

Por ejemplo, suponiendo que una grabación se hiciera en la sala de una casa, pero se quisiera que suene como si estuviera en el interior de una iglesia, o controlar la intensidad de un instrumento que a ratos enmascara el sonido de los demás, o resaltar el sonido grave de un instrumento, para eso se utilizan los procesadores de audio.

4.4 Procesadores de Audio

En esencia, un procesador de audio es un dispositivo que modifica una o varias características del sonido. Ahora bien, un sonido, es una vibración mecánica, pero con los transductores lo que realmente hace un procesador de audio es modificar las características correspondientes de la señal eléctrica que es la representación del sonido.

4.4.1 Procesadores Dinámicos

Los procesadores dinámicos tienen que ver con la amplitud.

Limitador: El limitador es el procesador más sencillo, su función es limitar la amplitud de la señal de audio, recortando la señal cuando sobrepasa un nivel determinado.

Compresor: Un compresor es como un limitador pero en lugar de recortar la señal, solo la atenúa, haciendo que el sonido no se altere drásticamente. Se le llama compresor, porque comprime la amplitud de la señal cuando pasa cierto nivel.

Compuerta de ruido: Una compuerta de ruido, lo que hace es permitir pasar una señal solo si supera cierto nivel, se llama compuerta de ruido, por que normalmente se ajusta el nivel de paso ligeramente arriba del nivel de la señal de ruido que se desea bloquear. Este dispositivo se usa incluso en líneas telefónicas, y se utiliza de la siguiente manera; cuando una persona esta hablando, se abre el canal y se transmite la información, pero cuando deja de hablar, lo único que se escucha es el ruido de fondo del lugar donde se encuentra y se considera información innecesaria, por lo que, al ser la señal de audio de una amplitud menor a la del umbral establecido, el canal se cierra y se ahorra ancho de banda.

Expansor: Así como el compresor es el procesamiento suave del limitador, el expansor es el procesamiento suave de la compuerta, en lugar de cerrarse completamente cuando la señal cae debajo de un determinado nivel, el expansor solo atenúa más las señales débiles, en lugar de cortarlas completamente como lo hace la compuerta.

4.4.2 Procesadores de Frecuencia

Ecualizador: Un ecualizador es básicamente, el uso de filtros para alterar el contenido de frecuencias de una señal, ya sea para incrementar su amplitud, disminuirla o incluso cortar ciertas frecuencias. En concreto, permite modificar el contenido en frecuencias de la señal que procesa, para ello, cambia las amplitudes de sus coeficientes de Fourier lo que se traduce en diferentes volúmenes para cada frecuencia, con lo que se pueden variar de forma independiente la intensidad de los tonos básicos.

De un modo práctico generalmente se usa para reforzar ciertas bandas de frecuencias, ya sea para compensar la respuesta del equipo de audio (amplificador + bocinas) o para ajustar el resultado a gustos personales.

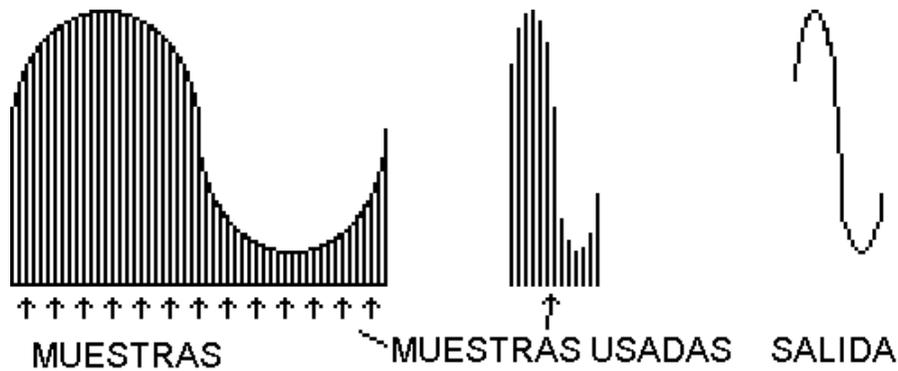
Los hay analógicos y digitales, activos o pasivos, paramétricos y gráficos.

Los ecualizadores gráficos profesionales suelen tener 32 bandas.

Estas bandas de frecuencias básicas son controladas por un control individual que puede atenuar o amplificar hasta en 12 dB.

Una consideración importante de los procesadores dinámicos y de frecuencia es que también alteran la forma de onda, en el caso de los procesadores dinámicos por que pueden alterar la amplitud de solo los picos y valles de la onda, en el caso del ecualizador alteran el contenido armónico de la onda, lo que altera su forma de onda que podemos percibir como un cambio en el timbre.

Otro tipo de procesador de frecuencia es el “Pitch shift” o cambiador de tono, este procesador (generalmente digital) cambia la frecuencia de la señal ya sea por múltiplos o submúltiplos. Los múltiplos, aumentando la frecuencia o tono, haciendo que el sonido sea más agudo y los submúltiplos disminuyendo la frecuencia o tono haciéndolo más grave, este tipo de procesadores digitales lo que hacen es repetir muestras para hacer el sonido mas grave o quitar muestras para hacerlo mas agudo, tal como se muestra en las figuras 4.4.2.1 y 4.4.2.2



4.4.2.1 Cambio de tono aumentando la frecuencia



4.4.2.2 Cambio de tono disminuyendo la frecuencia

4.4.3 Procesadores de Tiempo.

El retrasador o delay, es el más simple, éste procesador, lo que hace es retrasar la señal. Por si solo, el sonido retrasado no es muy interesante, pero cuando se combina con el sonido original se pueden obtener efectos interesantes.

El eco es un delay que tiene tiempos de retraso considerablemente altos (mas de 50 milisegundos) que podemos interpretar como sonidos separados, adicional a esto se tiene una retroalimentación de la salida del delay a la entrada del mismo, esta retroalimentación tiene cierta atenuación, así cuando se alimenta una señal a

la entrada, a la salida se tiene otra señal retrasada que cuando se combina con la original, pareciera como una repetición, y al estar retroalimentado el sistema esta repetición continua aunque decayendo en amplitud. Este mismo efecto se puede experimentar en campo abierto gritando frente a unas montañas o barranca, el sonido inicial rebota en las superficies produciendo las repeticiones.

El reverb es parecido al echo, pero los sonidos están retrasados por tiempos mas cortos (menos de 50 milisegundos) y ya no se alcanzan a percibir como sonidos separados, sino como una continuación de un sonido original, por ejemplo al producir un sonido considerablemente en una iglesia escuchamos como el sonido continua un tiempo después de que el sonido original ha cesado.

Los procesadores son entonces dispositivos que ayudan a modificar una señal de audio para beneficio propio de una interpretación, y controlar parámetros como amplitud, respuesta en frecuencia y contenido armónico, para posteriormente almacenar esta señal en algún medio para que pueda ser reproducido en un momento y lugar diferente.

4.5 Medios de Almacenamiento.

Los elementos descritos anteriormente se pueden usar en una presentación de un evento sonoro por ejemplo para aumentar el volumen y que un mayor número de personas puedan escuchar la interpretación, adicionalmente a esto, podemos registrar las señales de audio en algún medio para ser reproducidos posteriormente, aquí es donde entran los medios de almacenamiento.

4.5.1 Inicios

Históricamente fue John Kruesi, mecánico de Thomas Alva Edison que en 1877 construyó un aparato que era capaz de registrar y reproducir sonidos en forma mecánica, consistente en un cilindro de cera que por medio de una aguja

grabadora recorría la superficie del cilindro formando un surco con mayor o menor profundidad dependiendo de la amplitud de la señal alimentada al sistema, en la Figura 4.5.1.1 se muestra uno de estos dispositivos llamado fonógrafo.



Figura 4.5.1.1 Fonógrafo de cilindros de cera

Después de darse cuenta Edison que resultaba difícil copiar o duplicar los cilindros para ser distribuidos, desarrolló el disco horizontal, en donde la aguja se mueve lateralmente para modificar el surco, en sustitución de los surcos de profundidad.

4.5.2 Grabación en Medios Magnéticos

Otro gran salto fue, el registrar las señales de forma magnética, en lugar de ser mecánica, inicialmente se utilizó un cable delgado de acero, que se hace pasar junto a una bobina a la que se le alimenta la señal eléctrica, que representa el

sonido, y las moléculas del cable se van magnetizando con una magnitud y polaridad correspondiente con la señal de entrada.

Para reproducir la grabación se hace pasar nuevamente el cable junto a una bobina y al existir un cambio en el campo magnético inducido en la bobina, esta presenta un diferencial de potencial o voltaje en las terminales de la bobina, mismo que puede ser amplificado para obtener nuevamente la señal de audio que fue grabada.

En este proceso vemos como se transforma la energía acústica en otro tipo de energía con la ayuda de los transductores, primero el micrófono transforma la energía mecánica en energía eléctrica, después la cabeza de grabación transforma la energía eléctrica en energía magnética, que puede ser almacenada en un medio físico. En la reproducción sucede una cadena similar, primero la cabeza de lectura transforma la energía magnética en energía eléctrica, y finalmente la bocina transforma la energía eléctrica nuevamente en energía acústica. Este esquema no trata fundamentalmente la conservación de la energía, de hecho se requiere inyectar energía al sistema para que funcione, el objetivo principal del sistema es almacenar la información contenida en las variaciones de energía o señales.

Una gran ventaja del cable de acero es que es mucho mas resistente y durable por el manejo del mismo comparado con los cilindros de cera o discos de vinilo, es tan confiable que incluso se usa en los sistemas de grabación de las cajas negras utilizadas en aeronaves, para recuperar información después de un accidente.

Posteriormente al cable de acero surgió la cinta magnética, que es básicamente una cinta plástica con partículas adheridas de algún metal ferromagnético, esto resulto en un gran avance en cualidad de las grabaciones, pero aun había mucho por venir.

4.5.3 Grabación Digital.

Otro gran salto se dio con la introducción de los sistemas digitales de grabación. El audio también se vió beneficiado del gran desarrollo que tuvo lugar con los equipos de cómputo.

Aquí el dispositivo clave es el convertidor analógico-digital.

Recordando nuevamente que una señal eléctrica de audio es la representación del sonido, es correcto decir que la señal de audio es análoga al sonido, y el registro en una cinta magnética es análoga a la señal eléctrica.

Una señal análoga tiene las características de ser continua tanto en el tiempo como en su amplitud, ahora bien un convertidor análogo-digital lo que hace es representar una señal análoga por una secuencia de ceros y unos, que es el lenguaje básico de las computadoras, con ello poder manipular una señal de audio como si se tratase de datos que puede procesar una computadora.

La digitalización o conversión analógica-digital (conversión A/D) consiste básicamente en realizar de forma periódica medidas de la amplitud de la señal y traducirlas a un lenguaje numérico. La conversión A/D también es conocida por el acrónimo inglés ADC (analog to digital converter).

En esta definición están patentes los cuatro procesos que intervienen en la conversión analógica-digital:

1. Muestreo: El muestreo (sampling) consiste en tomar muestras periódicas de la amplitud de onda. La velocidad con que se toman estas muestras, es decir, el número de muestras por segundo, es lo que se conoce como frecuencia de muestreo.
2. Retención (Hold): Las muestras tomadas han de ser retenidas (retención) por un circuito de retención (Hold), el tiempo suficiente para permitir evaluar su nivel (cuantificación).

3. Cuantificación: En el proceso de cuantificación se mide el nivel de voltaje de cada una de las muestras. Consiste en asignar un margen de valor de una señal analizada a un único nivel de salida.
4. Codificación: La codificación consiste en traducir los valores obtenidos durante la cuantificación al código binario. Hay que tener presente que el código binario es el más utilizado, pero también existen otros tipos de códigos que también son utilizados.

Durante el muestreo y la retención, la señal aun es analógica puesto que aún puede tomar cualquier valor. No obstante, a partir de la cuantificación, cuando la señal ya toma valores finitos, la señal ya es digital.

Los cuatro procesos tienen lugar en un convertidor analógico-digital.

La gran ventaja que se tiene al digitalizar una señal es que la señal resultante (la digital) es más inmune al ruido y otras interferencias a las que son más sensibles las señales analógicas.

Así mismo al ser información que puede procesar una computadora podemos usar los mismos recursos que usa una computadora para procesar y almacenar la información.

Si bien se puede realizar la grabación de la señal digital en una cinta magnética, se obtienen mayores beneficios al usar sistemas de almacenamiento propios de una computadora como es el disco duro y la memoria de estado sólido.

Pero el audio también ha tenido sus grandes contribuciones en los equipos de cómputo, por ejemplo el disco compacto.

4.5.4 Disco Compacto

El Disco compacto, (compact disc) o CD, se desarrolló para sustituir al tradicional disco analógico de acetato con los objetivos principales de lograr mayor capacidad de sonido grabado con un tamaño reducido, mejor reproducción de la información almacenada, al ser mas inmune al ruido, e incluso permitir la corrección de errores en la lectura producto de un manejo inadecuado del disco, como lo pueden ser las ralladuras,

Las características anteriores así como acceso casi instantáneo a cualquier parte del disco, robustez, bajo costo e inalterabilidad significativas de sus parámetros con el tiempo lo hacen un medio de almacenamiento muy adecuado para datos de computadora, derivando otros sistemas para aplicaciones que no son específicamente de audio, como lo es el CD-ROM.

Básicamente el sistema esta compuesto por el disco en el que esta grabada la señal digital en forma de pequeños huecos, sobre estos huecos o la ausencia de ellos se enfoca un rayo láser y su reflexión permite determinar si el rayo está sobre un hueco o no y por lo tanto decodifica esta información en forma de unos y ceros, esta señal una vez conformada se lleva a los convertidores analógico/digitales, de donde se obtiene la señal de audio analógica. Dado el sistema de lectura, en el cual no hay contacto físico de elementos mecánicos con el disco, el desgaste es teóricamente nulo.

4.5.5 DVD

Al usar un haz de láser mas delgado, podemos hacer los huecos mas pequeños, consiguiendo con esto almacenar mas información en un mismo espacio de la superficie del disco y esto resulta muy conveniente cuando además de almacenar audio también queremos almacenar video, o en esencia cualquier tipo de información digital.

Existen estándares que especifican como debe ser codificada la información para que pueda ser reproducida posteriormente por equipos de diferentes fabricantes.

Al tener mayor capacidad de almacenamiento y con ayuda de algoritmos de compresión se puede tener en el DVD varios canales de audio simultáneos junto con una imagen de video.

4.5.5.1 Dolby 5.1

Los laboratorios Dolby, pioneros en la codificación de varios canales de audio, establecieron el estándar 5.1 que fue desarrollado primeramente para las salas de cine, en donde se pretende crear un sonido envolvente al reproducir señales de audio diferentes en 5 bocinas distribuidas geométricamente como se muestra en la figura 4.5.5.1.1

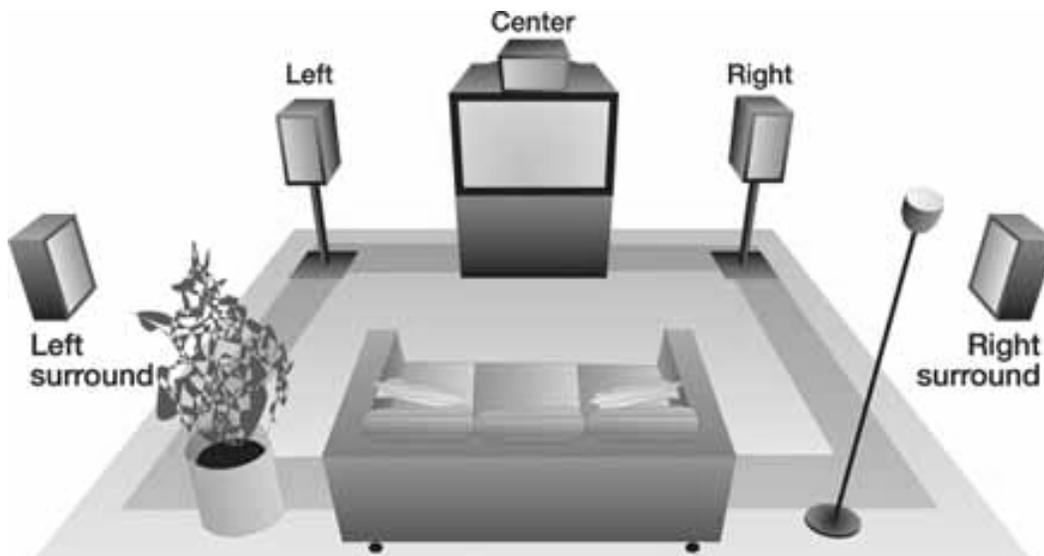


Figura 4.5.5.1.1 Esquema de colocación de bocinas en un sistema 5.1

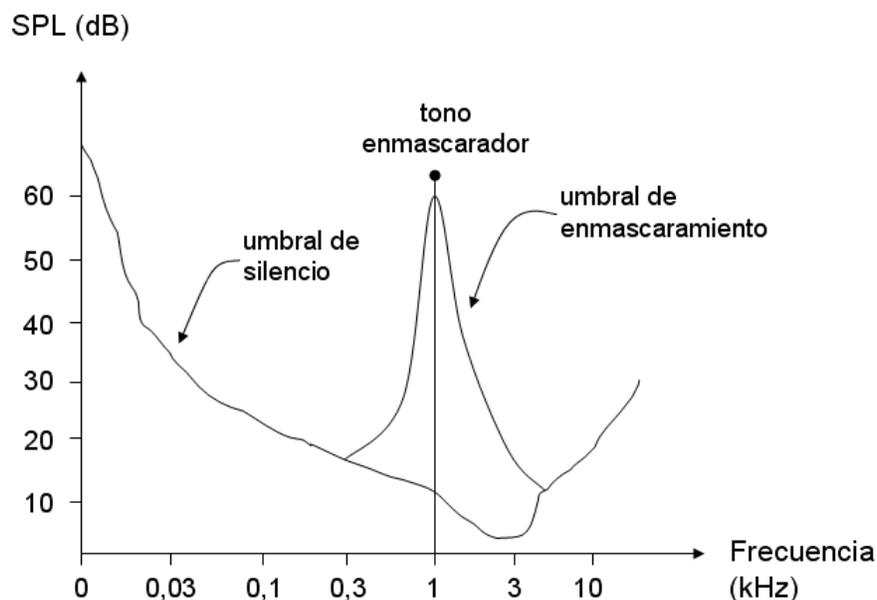
En la figura 4.5.5.1.1 se observa que se tienen 3 bocinas al frente del escucha y dos en la parte posterior, adicionalmente se tiene una bocina que solo reproduce frecuencias bajas que no se muestra en la figura.

Los 5 primeros canales poseen una respuesta en frecuencia similar a la del un CD de audio, con la diferencia de que en un DVD se hace uso de un efecto de psicoacustica llamado enmascaramiento.

El enmascaramiento ocurre cuando el oído está expuesto a dos o más sonidos simultáneos, existe la posibilidad de que uno de ellos enmascare a los demás. Para ser más precisos, cabe definirlo como un efecto producido en la percepción sonora cuando se escuchan dos sonidos de diferente intensidad al mismo tiempo. Al suceder esto, el sonido más débil resultará inaudible, ya que el cerebro sólo procesará el sonido enmascarador.

El sonido de nivel alto posee un efecto de enmascaramiento mayor si el suave tiene una frecuencia cercana.

En la figura 4.5.5.1.2 se muestra el caso de tener un tono a 1kHz y el rango de enmascaramiento de otros tonos dependiendo de su frecuencia y amplitud, así mismo se muestra el umbral del silencio que esta en base a la respuesta en frecuencia del oído humano.



4.5.5.1.2 Ejemplo de enmascaramiento de una senoidal de 1Khz

Este fenómeno psicoacustico se utiliza para reducir la cantidad de información que es almacenada de los diferentes canales de audio.

4.5.5.2 Canal LFE

El sexto canal llamado canal **LFE (Low Frequency Effects)** es un canal limitado en frecuencia, por eso se le da la denominación como el canal .1, los 5 canales principales tienen un ancho de banda de 20 a 20,000 Hz y el canal LFE de 3 a 120 Hz, otra característica del canal LFE es que la ubicación de la bocina que lo reproduce no es importante para la imagen sónica, ya que el oído humano no percibe la dirección del origen del sonido en frecuencias bajas.

Ahora bien, esta bocina llamada subwoofer no se usa solo para reproducir la señal del canal LFE, también puede quitarle carga a las bocinas principales, lo que permite que sean de un tamaño mas reducido, y nuevamente, como el oído humano no percibe direccionalidad en frecuencias bajas, la imagen sonora no se altera.

4.5.6 Estado Sólido

Una vez que se tiene de manera digital ya sea sonido o imagen se puede hacer uso de todas las herramientas con que se cuentan en área de las computadoras, ya que la información auditiva o visual ha pasado a un dominio digital de ceros y unos que es el lenguaje nativo de las computadoras, por lo que los avances tecnológicos en los sistemas de computo se extiende a otros sistemas digitales, tal es el caso en la baja de costos de fabricación de chips de memoria, que se puede considerar como el medio de acceso mas rápido y con alto grado confiabilidad para almacenar información, y debe estas dos características principalmente a que carece de partes móviles.

La reducción de los costos de producción han permitido que podamos disponer de sistemas de almacenamiento que pueden incluso superar por mucho a los sistemas convencionales de almacenamiento portátil anteriores, pongamos por ejemplo, un disco flexible de 3.5 pulgadas en el que la capacidad de almacenamiento era de 1.4 MB, tenían la ventaja de ser muy económicos y portátiles comparado con sistemas anteriores, actualmente se puede tener un dispositivo del tamaño de un llavero y almacenar 1Gb.

Pero al mismo tiempo que se desarrollan sistemas de almacenamiento masivo de información, así mismo van creciendo nuestras necesidades de almacenamiento, esto debido a que cada vez capturamos el audio o video con mayor resolución, esto se ejemplifica fácilmente con las cámaras digitales. Cuando se tenían cámaras digitales de un mega píxel de resolución, bastaba una memoria de 32Mb para almacenar 24 fotos, ahora con cámaras de 10 mega píxeles se necesita 256Mb para almacenar 24 fotos, y si consideramos la posibilidad de poder grabar video con la misma cámara fotográfica, una memoria de 4Gb permite grabar 15 minutos de video.

Otra gran ventaja que presentan los sistemas de almacenamiento de estado sólido es que son mucho más pequeños, por ejemplo retomando el comparativo de un disco flexible de 3.5 pulgadas y un chip de memoria de 1Gb; de hecho el chip puede llegar a ser tan pequeño que la carcasa que lo contiene puede ser unas 5 veces mas grande, para que sea fácil de manipular.

En cuanto al sistema de grabación y lectura también se destaca que es mucho mas compacto, ligero, de bajo costo de fabricación y mantenimiento, ya que no hay partes móviles como motores o engranes, así mismo no se requieren cabezas de lectura que realmente son transductores y toda la electrónica asociada que requieren para su funcionamiento.

Anteriormente se mencionó que se usa cable de acero para el registro de datos en la caja negra de aeronaves en caso de accidente, en la actualidad los sistemas ahora son de estado sólido por lo compacto, ligero y confiable que se pueden volver estos dispositivos.

Todavía sigue en desarrollo este tipo de tecnologías, y en algunas aplicaciones como almacenamiento a gran escala, no se considera como primera opción, principalmente por cuestiones económicas, los discos duros y cintas magnéticas siguen siendo la opción para aplicaciones donde se requiere almacenar cantidades de información que van de los cientos de gigabyte a decenas de terabytes.

4.6. Características Principales de los Componentes

Como se mencionó al inicio de este capítulo, existen varios elementos que conforman la cadena de grabación y reproducción de un evento sonoro, cada uno de estos elementos contribuye a la calidad del resultado final.

Un concepto importante es el de la fidelidad, que básicamente se refiere a que tan bien reproduce una señal de audio comparado con la fuente real.

La fidelidad de un sistema de audio puede ser un parámetro subjetivo, es decir que se ve influenciado por el criterio de la persona que evalúa el sistema, pero existen parámetros científicos claramente medibles, que sirven para determinar si un sistema es mejor o peor que otro, para esta evaluación de los sistemas de audio se referirá principalmente a las características físicas del sonido y de electrónica.

4.6.1. Respuesta en Frecuencia.

Como se menciona en el capítulo dos, el oído humano puede percibir frecuencias entre 20 y 20,000 Hz, y por ende uno de los parámetros a evaluar un sistema de audio o un elemento de la cadena es, la respuesta en frecuencia.

La respuesta en frecuencia se representa gráficamente colocando en el eje horizontal la frecuencia partiendo preferentemente desde cero hertz hasta 20,000 hertz o incluso mas, y en el eje vertical colocamos la amplitud en decibeles.

Idealmente un equipo de audio debería tener una magnitud igual para todas las frecuencias, pero en la realidad, encontramos que existen variaciones, y que incluso no cubren todo el espectro audible, esto es mas notorio en los transductores.

Para establecer el ancho de banda de operación de un equipo se establecen márgenes superior e inferior en los que la respuesta de frecuencia estará oscilando, y cuando la respuesta en frecuencia se salga de dicho rango se considerara como el límite ya sea superior o inferior de la respuesta en frecuencia y a eso se denomina ancho de banda.

En la siguiente grafica se observa la respuesta en frecuencia de un subwoofer o bocina para graves.



Figura 4.6.1.1 respuesta en frecuencia de un subwoofer

En la figura 4.6.1.1 podemos ver que si bien la respuesta en frecuencia no es lineal, se puede decir que el ancho de banda es de 50 a 3,620 Hz ± 3 dB.

En el dominio digital, el ancho de banda está limitado en la parte superior por la frecuencia de muestreo. El teorema de Nyquist establece que la frecuencia de muestreo debe ser al menos dos veces la frecuencia máxima de la señal que deseamos muestrear, por ello la frecuencia de muestreo de los discos compactos es de 44.1Khz, pudiendo reproducir en teoría frecuencias de hasta 22Khz, pero surgen cuestiones como el filtrar la señal antes de muestrearla que disminuye esta frecuencia máxima teórica. Actualmente existen sistemas como el súper audio CD que utiliza frecuencias de muestreo de hasta 2,822.4 Khz., permitiendo tener más

fidelidad en frecuencias altas, no por que se pretenda reproducir frecuencias de más de 20 KHz. La frecuencia de muestreo del DVD es de 48KHz o 96KHz.

El límite inferior está establecido por los sistemas de compresión de datos que toman en cuenta cuestiones de psicoacústica como el enmascaramiento y los límites de escucha del oído humano, esto principalmente con el objetivo de solo almacenar el mínimo de información requerida.

4.6.2 Rango Dinámico

Otro parámetro muy importante del sonido es su intensidad o amplitud, que como se mencionó en el capítulo dos está delimitado por el sonido más débil que puede escuchar el oído humano y lo que se considera el umbral del dolor.

En la electrónica estos límites están dados por el ruido de piso o noise floor, que es el nivel del ruido o de las señales indeseadas en un sistema que están presentes aun cuando no se tiene una señal a la entrada, y el límite superior estará dado por la amplitud máxima de la señal que puede manejar el sistema antes de presentar distorsión. El rango dinámico se mide en decibelios que como vimos en el capítulo dos es la relación entre dos niveles, en este caso es la relación entre la máxima amplitud que puede manejar un sistema y el ruido de piso.

Idealmente un equipo de audio debería tener al menos 120 dB de rango dinámico, para abarcar el mismo rango dinámico del oído humano.

En los sistemas analógicos esto no era tan fácil de lograr, ya que por ejemplo los sistemas de grabación/reproducción de cinta, poseían niveles de ruido muy altos, y la cinta solo podía manejar niveles limitados antes de saturarse, es decir se llegaba a un punto que por más que se incrementaba la señal de entrada, no se aumentaba el nivel de magnetización en la cinta, pudiendo incluso distorsionar la señal a niveles muy altos.

En los sistemas digitales, el rango dinámico debe medirse en la presencia de una señal de entrada, a diferencia de un sistema analógico, en el cual no se alimenta ninguna señal y se mide la salida.

En un sistema digital si no se alimenta ninguna señal, es posible no obtener ninguna señal igualmente a la salida, pero se debe tomar en cuenta la distorsión que sufre la señal por la cuantización, entre más niveles de cuantización se tengan la distorsión será menor, y para tener mas niveles de cuantización, se requieren mas bits para codificarlos, por ello entre mayor número de bits tengamos mayor será el rango dinámico, se establece como regla general que se incrementa el rango dinámico 6db por cada bit, así para un sistema de 16 bits como el un CD de audio se tienen 96db, un DVD puede tener 16, 20 o 24 Bits.

En los equipos de producción de audio como son convertidores análogo/digital, mezcladoras, procesadores de audio e incluso sistemas de grabación de audio es común encontrar frecuencias de muestreo y resolución en bits muy superior a los sistemas de consumo doméstico, la razón por la cual sucede esto, es que durante la producción de material original se mezclaran varios canales de audio para formar el producto final y si cada uno de estos canales contribuye con un poco de ruido o distorsión, a la hora de combinarlos se obtendrá un resultado con mucho ruido, por ello se presta especial atención en la calidad de los equipos de producción y por ende pueden resultar de precios considerablemente más elevados de equipos de consumo general.

Con los sistemas de grabación/reproducción se ha mejorado mucho la calidad de los sistemas de audio, cayendo incluso en el olvido de especificaciones de los equipos como wow & Flutter, que se refería a la variación de la velocidad de la cinta al pasar por la cabeza de grabación o lectura, afectando la reproducción. En algunas publicaciones todavía ponen esta especificación para los reproductores de disco compacto, colocando la palabra unmesuable (no medible) como nostalgia de características que eran muy importantes antes, implicando por ejemplo, desarrollar, construir y fabricar tecnología para que la velocidad y tensión de la cinta que pasaba por una cabeza de lectura fuera siempre estable.

4.6.3 Distorsión Armónica

Otra característica importante de los sistemas de audio es la distorsión armónica, que es la forma en que se modifica una señal de manera indeseada al entrar y salir de un dispositivo.

Hablando en concreto en una bocina, al alimentar una señal de una sola frecuencia, la bocina debería de reproducir solo esa frecuencia, pero no es extraño que reproduzca adicionalmente armónicos a dicha frecuencia.

La distorsión armónica se produce cuando la señal de salida de un sistema no equivale a la señal que entró en él. Esta falta de linealidad afecta a la forma de la onda, porque el equipo ha introducido armónicos que no estaban en la señal de entrada y se expresa en porcentaje, la distorsión armónica, y en un CD de audio o en un DVD siempre son por debajo del 1%.

4.7 Bocina

La bocina es el último eslabón en la cadena de audio. Transforma la energía eléctrica que le entrega la etapa de potencia en energía mecánica, y por ello se le llama transductor. Su función es inversa a la del micrófono, que transforma las ondas sonoras que capta su membrana (energía mecánica) en energía eléctrica que entrega a la etapa preamplificadora.

4.7.1 Tipos de Bocinas

La bocinas se pueden clasificar por su principio de funcionamiento en:

- Bocina dinámica o Bocina de bobina móvil: La señal eléctrica de entrada actúa sobre la bobina móvil que crea un campo magnético que varía de sentido de acuerdo con dicha señal. Este flujo magnético interactúa con un segundo flujo magnético continuo generado normalmente por un imán

permanente que forma parte del cuerpo de la bocina, produciéndose una atracción o repulsión magnética que desplaza la bobina móvil, y con ello el diafragma adosado a ella. Al vibrar el diafragma mueve el aire que tiene situado frente a él, generando así variaciones de presión en el mismo, o lo que es lo mismo, ondas sonoras.

- Bocina electrostática o Bocina de condensador: Estas bocinas tienen una estructura de condensador, con una placa fija y otra móvil (el diafragma), entre las que se almacena la energía eléctrica suministrada por una fuente de tensión continua. Cuando se incrementa la energía almacenada entre las placas, se produce una fuerza de atracción o repulsión eléctrica entre ellas, dando lugar a que la placa móvil se mueva creando una presión útil.
- Bocina piezoeléctrica: En estas bocinas el motor es un material piezoeléctrico (poliéster o cerámica), que al recibir una diferencia de tensión entre sus superficies metalizadas experimenta alargamientos y compresiones. Si se une a una de sus caras un cono, éste sufrirá desplazamientos capaces de producir una presión radiada en alta frecuencia.
- Bocina de cinta: La bocina de cinta tiene un funcionamiento similar a la bocina dinámica, pero con diferencias notables. La más obvia, en lugar de bobina, el núcleo es una cinta corrugada.

La bocina más ampliamente usada en sistemas de audio es la de bobina móvil, debido principalmente a su facilidad de fabricación y a que se puede construir de diferentes tamaños para abarcar todo el espectro audible.

Para cubrir todo el espectro audible, una sola bocina no es suficiente. Debido a las características propias de las bocinas y la tecnología conocida hoy día, se necesitan al menos dos bocinas para reproducir todo el rango de frecuencias

audibles con una fidelidad aceptable, de modo que uno se encargue de las frecuencias más bajas y el otro de las más altas. Podemos dividir en mayor número de tramos este rango por ejemplo en tres, o incluso cuatro tramos, y destinar a cada uno de ellos un tipo de bocina diferente. A cada uno de estos tramos se denomina vía, y así existen bocinas (cajas) de 2, 3 ó 4 vías dependiendo del número de tramos en que se ha dividido el espectro. No tiene por qué coincidir con el número de bocinas que tenga la caja. Podemos poner 2 bocinas para los graves y una bocina para los agudos, y será un sistema de 2 vías con tres bocinas. Atendiendo a la gama de frecuencias que la bocina es capaz de reproducir, las bocinas pueden dividirse en:

- woofer (graves)
- midrange (medios)
- tweeter (agudos)

Pero existen bocinas de otros tipos, tales como subwoofers, midbass, etc., que cubren otros tramos de frecuencias y que se utilizan en sistemas multivía.

Para poder distribuir correctamente la energía que se entrega a la caja, hay que dividir la señal que llega a la misma al tipo de señal que cada bocina requiere. De otra forma estaríamos desperdiciando la energía, o incluso dañaríamos alguna bocina. Para lograr esto, se recurre al crossover, que es un filtro que deja pasar cierto rango de frecuencias para así alimentar el mismo rango de frecuencias que puede reproducir una bocina.

4.7.2 Partes de una bocina de bobina móvil

En la figura 4.7.2.1 se observan las principales partes que componen una bocina de bobina móvil.

- 1.- Cono o diafragma
- 2.- Campana
- 3.- Yugo
- 4.- Imán permanente
- 5.- Bobina móvil
- 6.- Araña
- 7.- Tapa de retención de polvo
- 8.- Hilos de conexión de la bobina
- 9.- Bornes de conexión

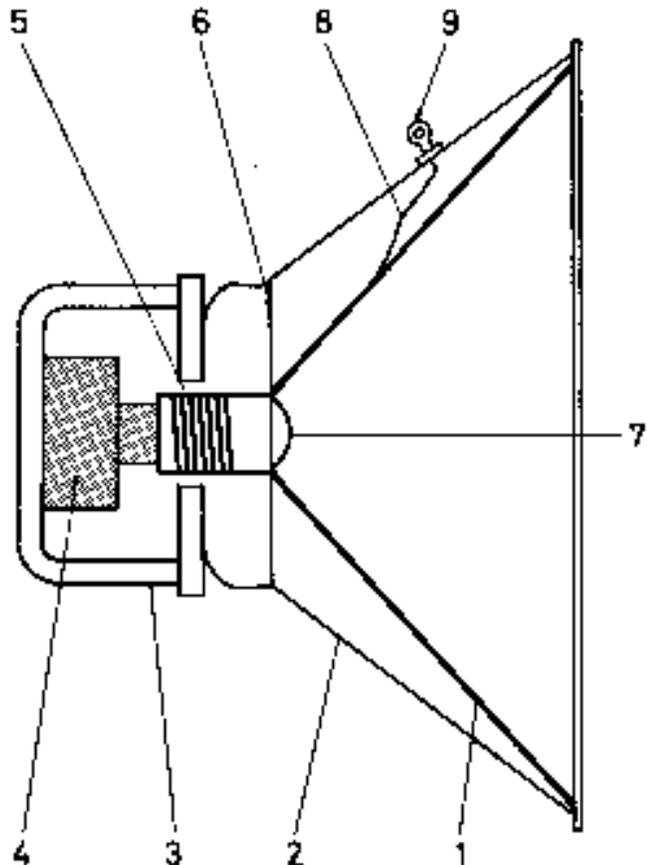


Figura 4.7.2.1 partes de una bocina de bobina móvil

El cono de la bocina se puede fabricar prácticamente en cualquier material, pero el material más utilizado es la pasta de papel, elegido por su gran eficiencia y poco peso. También son habituales los de láminas metálicas y láminas plásticas.

La campana y el yugo es el soporte de los demás elementos para mantenerlos en la misma posición relativa y para manipular la bocina, así mismo sirve como el soporte para que la bocina pueda ser instalada en la caja acústica.

El imán esta en el núcleo de la bocina es un potente imán permanente de cerámica o de neodimio. Cuanto más grande sea el campo magnético producido por el imán, menor cantidad de energía eléctrica necesitara para producir igual volumen.

La bobina móvil está constituida por espiras esmaltadas de aluminio o cobre, montadas sobre un armazón unido con el cono simplemente soportadas por el propio esmalte. Suele utilizarse cable plano con el fin de obtener mayor conducción con menor peso y volumen.

La bobina se alimenta por los bornes de conexión que están fijos en el yugo y se conecta por medio de cables flexibles que llegan hasta la bobina.

La araña forma parte de la suspensión que ayuda a tener a la bobina en un punto de equilibrio, para que en la presencias de la señal alimentada, la bobina de puede mover en una dirección que depende de la señal, si tiene en un instante polaridad positiva o negativa, así mismo mantiene a la bobina en una posición concéntrica al imán permanente para que la bobina no roce con este.

4.7.3 Funcionamiento de bocina de bobina móvil

Cuando se aplica a la bobina la señal eléctrica procedente del amplificador, crea un campo magnético que varía en sentido y magnitud de acuerdo a la señal de entrada, este campo magnético generado interactúa con el campo magnético del imán permanente de la bocina, de tal manera que repele o atrae a la bobina como si fuera otro imán, separándose cuando la polaridad es la misma y atrayéndose cuando las polaridades son diferentes.

Al moverse la bobina, también se mueve el cono que está unido a ella, lo que mueve el aire en un sentido y otro produciendo compresiones y desimpresiones en el aire que podemos percibir como sonido.

El tamaño y el peso del cono y bobina determinaran características como presión sonora máxima que puede alcanzar el sistema, así como el rango de frecuencias que puede reproducir.

La capacidad máxima de corriente eléctrica que puede manejar una bobina sin dañarse también determinara la capacidad máxima de presión sonora producida, pero si usamos un cable de calibre para la bobina indiscriminadamente grueso, esto afectara la frecuencia máxima que podremos producir ya que ahora se requerirá mover una masa mayor, lo mismo sucede si el cono es demasiado grande o pesado, es por ello que se utilizan diferentes tamaños de bocina para reproducir diferentes rangos de frecuencia.

AMPLIFICADORES

5.1 Introducción

Un amplificador electrónico es un dispositivo que nos permite incrementar la corriente, el voltaje o la potencia de una señal. El amplificador realiza esta función tomando potencia de una fuente de alimentación y controlando la salida para hacer coincidir la forma de onda de la señal de entrada con la de salida, pero con una amplitud mayor.

En sentido figurado, un amplificador ideal sería un pequeño pedazo de hilo conductor con ganancia, de modo que la salida es una réplica exacta de la entrada pero más grande. La figura 5.1.1 muestra un circuito en el cual la señal de entrada es amplificada, en la grafica se observa con más claridad la señal de salida con respecto a la entrada.

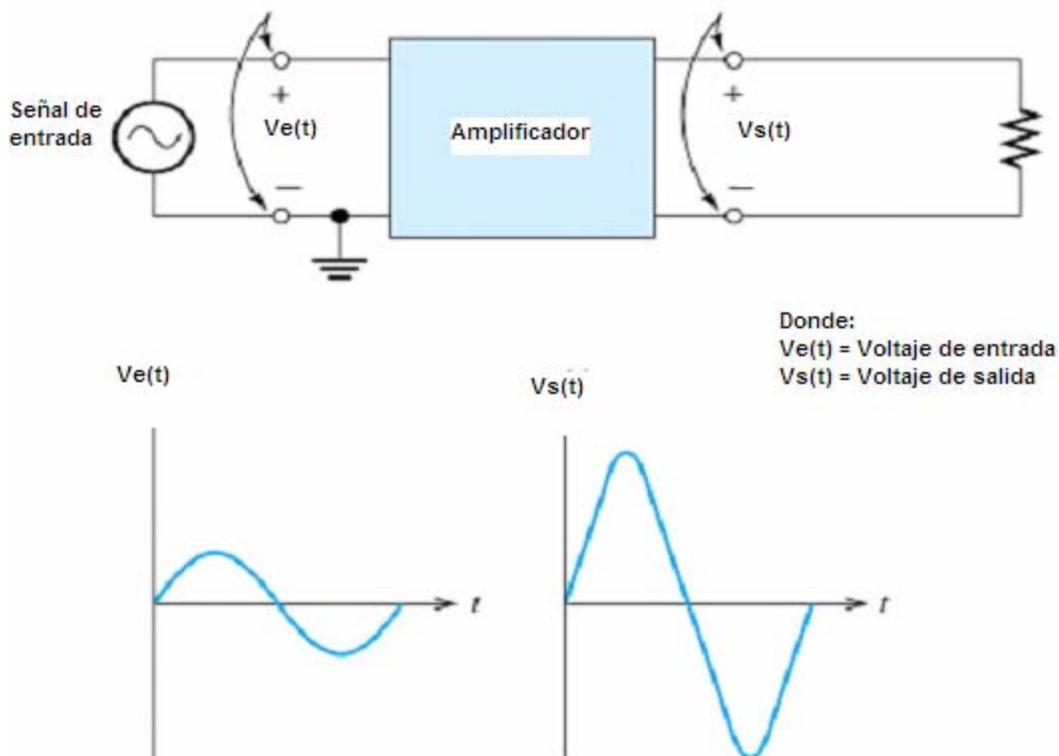


Figura 5.1.1 Función básica de un amplificador

Se clasifica a los amplificadores de acuerdo con el rango de frecuencias a las cuales presenta una mayor ganancia, misma que depende de las características inductivas, capacitivas y resistivas del circuito. No olvidando que la reactancia es distinta para cada frecuencia. Un amplificador de audio es el que está diseñado para amplificar de forma relativamente plana o sea lineal, todas las señales de audio frecuencia. Estas señales están comprendidas entre 10 y 20,000 ciclos por segundo. Cuando utilizamos un amplificador para la voz y no para música, no se requiere un ancho de banda amplio, en vista que la voz humana solo tiene sonidos que comprenden de 200 y 2,700 ciclos.

5.2 Características técnicas

Las características técnicas de cada modelo son las que determinan la *calidad* del amplificador, a continuación se enlistan las principales:

- Impedancia.
- Factor de amortiguamiento.
- Potencia de salida.
- Relación señal ruido.
- Acoplamiento.
- Respuesta en frecuencia.
- Respuesta de fase.
- Ganancia.
- Sensibilidad.
- Distorsión.
- Diafonía.

5.2.1 Impedancia

La impedancia es la resistencia (oposición) que presenta cualquier dispositivo al paso de una corriente alterna. La impedancia eléctrica mide la oposición de un circuito o de un componente eléctrico al paso de una corriente eléctrica alterna sinusoidal. El concepto de impedancia generaliza la ley de Ohm en el estudio de circuitos en corriente alterna (AC). El término impedancia fue inventado por Oliver Heaviside en julio 1886.

En general, la solución para las corrientes y las tensiones de un circuito formado por resistencias, condensadores e inductancias y sin ningún componente de comportamiento no lineal, son soluciones de ecuaciones diferenciales. Pero, cuando todos los generadores de tensión y de corriente tienen la misma frecuencia constante y que sus amplitudes son constantes, las soluciones en estado estacionario (cuando todos los fenómenos transitorios han desaparecido) son sinusoidales y todas las tensiones y corrientes tienen la misma frecuencia (la de los generadores) y tienen la amplitud y la fase constante.

El formalismo de las impedancias consiste en unas pocas reglas que permiten calcular circuitos que contienen elementos resistivos, inductivos o capacitivos de manera similar al cálculo de circuitos resistivos en corriente continua. Esas reglas solo son válidas en los casos siguientes:

- Régimen permanente con corriente alterna sinusoidal. Es decir, que todos los generadores de voltaje y de corriente son sinusoidales y de misma frecuencia, y que todos los fenómenos transitorios que pueden ocurrir al comienzo de la conexión se han atenuado y desaparecido completamente.
- Cuando los componentes son lineales. Es decir, componentes o circuitos en los cuales la amplitud (o la valor eficaz) de la corriente es estrictamente proporcional a la tensión aplicada. Se excluyen los componentes no lineales como los diodos.

- Cuando el circuito contiene inductancias con núcleo ferromagnético (que no son lineales), los resultados de los cálculos solo podrán ser aproximados y eso, a condición de respetar la zona de trabajo de las inductancias.
- Cuando todos los generadores no tienen la misma frecuencia o si las señales no son sinusoidales, se puede descomponer el cálculo en varias etapas en cada una de las cuales se puede utilizar el valor de las impedancias.

La impedancia de entrada de un amplificador debe ser de al menos, 10 kohms. Estos 10 kohms se dan para que en el caso de posicionar 10 amplificadores en paralelo la carga total sea de un kohm. ($10 \text{ kohms} / 10 = 1 \text{ kohm}$)

5.2.2 Factor de amortiguación

El factor de amortiguación expresa la capacidad de un componente para "detenerse" una vez concluida la señal. Un elemento que permita prolongar demasiado tiempo la resonancia de una señal tendrá una amortiguación escasa. Y al contrario, el exceso de amortiguación no permitirá que la energía inicial alcance su valor máximo, recortando drásticamente la resonancia. El amplificador debe ser capaz de controlar una señal, de forma que no se produzcan oscilaciones una vez que la señal de entrada ya no esta presente. Si el amortiguamiento es bajo el elemento conectado al amplificador como puede ser una bocina, tiende a moverse debido a los factores mecánicos mas que al impulso eléctrico, como consecuencia de la inercia el cono de dicha bocina tiene tendencia a desplazarse después de haber cesado la señal y también es lento para responder a la señal cuando esta sin movimiento, por lo tanto, cuando mas alto sea el factor de amortiguamiento, mas precisa será la reproducción de la señal de entrada.

Se define el factor de amortiguamiento (F_a) como la relación entre la impedancia de carga (Z_c) y la impedancia de salida (Z_s) de una amplificador ($F_a = Z_c / Z_s$).

5.2.3 Potencia de salida

Como potencia eléctrica se pueden encontrar diferentes aplicaciones dependiendo de los elementos en cuestión, un ejemplo de aplicaciones es la que podemos encontrar como potencia eléctrica y potencia acústica. En una bocina es la cantidad de energía que se puede introducir en la etapa de potencia antes de que distorsione en exceso o de que pueda sufrir daños a la misma.

Se especifica la potencia máxima del amplificador en función de una determinada impedancia, generalmente, 8 ohms. Por ejemplo: 175 Watts sobre 8 ohms).

Si el amplificador es estéreo, hay que tener en cuenta si esa potencia se refiere a cada uno de los canales o a ambos. Por ello, en las especificaciones técnicas, se añade una de estas dos indicaciones:

- *con los dos canales alimentados.*
- *por canal.*

En el ejemplo anterior con una potencia de salida de 175 Watts sobre 8 ohms, si se añade *con los dos canales alimentados* significa que *por canal* la potencia será la mitad (87.5 Watts sobre 8 ohms).

Por el contrario, con una potencia de salida de 175 Watts sobre 8 ohms *por canal*, tendremos 350 Watts sobre 8 ohms *con los dos canales alimentados*.

En los equipos que permiten modificar la impedancia de entrada, también hay que tener en cuenta las modificaciones que al variar este parámetro introducen en la potencia. En este caso, se hacen aproximaciones cercanas, nunca son absolutas, porque, en el estado actual de los amplificadores, esto no es posible. Así, si se tiene un amplificador en el que en las especificaciones técnicas son de 175 Watts sobre 8 ohms, si reducimos la impedancia a 4 ohms, la potencia será cercana al

doble, esto es 350 Watts (en un amplificador ideal, debería ser justamente estos 350 Watts). Dentro de la potencia se diferencia entre potencia nominal y potencia de pico.

5.2.4 Potencia máxima

La potencia máxima en un periodo continuo, es la señal que puede soportar un amplificador antes de deteriorarse o distorsionar la señal. Si se hace trabajar al amplificador por encima de esa potencia nominal se podrá dañar irremediablemente tanto el amplificador como la bocina o el equipo al que está conectado.

5.2.5 Potencia de pico, admisible o musical

Como potencia pico se define a la potencia máxima impulsiva (un *pico de señal*), que puede soportar cada cierto tiempo un amplificador antes de que la señal se empiece a distorsionar. Algunos fabricantes de equipos en lugar de especificar la potencia nominal, especifican la potencia de pico, para definir de otra manera el alcance de un amplificador, pues la potencia pico siempre es superior a la potencia nominal. Se debe tener en cuenta este detalle y considerar que la potencia pico de un amplificador es 1,4142 (raíz cuadrada de 2) veces su valor nominal.

5.2.6 Relación señal/ruido

La relación señal/ruido hace referencia al voltaje de ruido residual a la salida y se expresa en dB (decibeles). Para que la relación señal/ruido esté por debajo del umbral de audición, debe ser de al menos 100 dB, y mayor a 110 dB en el caso de los amplificadores de alta potencia (por encima de los 200 watts).

5.2.7 Acoplamiento

El acoplamiento indica la forma en que el amplificador está conectado por ejemplo a una bocina. Se habla de “acoplamiento directo”, cuando ambos están acoplados directamente, sin pasos intermedios. Internamente, el amplificador funciona con un voltaje continuo, pero a la salida convierte la señal en corriente alterna. Cuando conectamos directamente un amplificador con una bocina, este acoplamiento directo debe hacerse de forma que la corriente continua residual (DC offsets) sea lo más baja posible, no superando los 40 milivolts. (Los más comunes están en 15 milivolts).

5.2.8 Respuesta en frecuencia

Como respuesta en frecuencia se define el límite dentro del cual el amplificador responde de igual forma (respuesta plana) a las audiodfrecuencias (20 a 20.000 Hz) con una potencia muy baja.

La respuesta en frecuencia en los amplificadores se mide en dB tomando como referencia potencia de 1 volt con una impedancia de 8 ohms. Para obtener una óptima respuesta en frecuencia, ésta debe estar alrededor de 5 dB por encima (+ 5 dB) o por abajo (- 5 dB). Muchos fabricantes, en lugar de usar sólo las frecuencias auditivas, para proteger a los amplificadores de perturbaciones suprasónicas o subsónicas, lo que hacen es medir la respuesta en frecuencia para una banda de frecuencias superior (generalmente de 12 a 40.000 Hz). En este caso una respuesta en frecuencia óptima debe estar en torno a 3 dB por encima (+ 3 dB) o por abajo (- 3 dB). La figura 5.2.8.1 hace referencia a este tipo de respuesta.

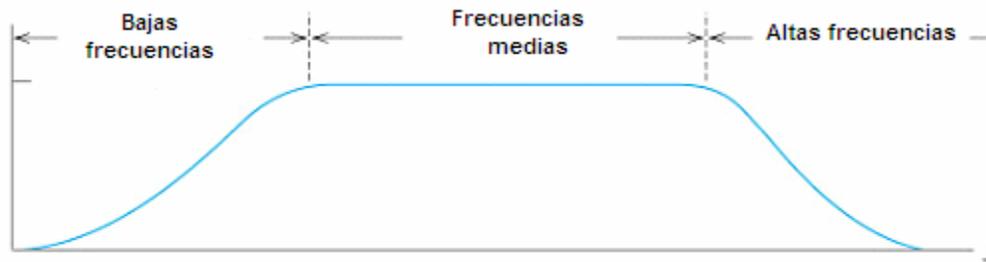


Figura 5.2.8.1 Respuesta en frecuencia de un amplificador

5.2.9 Respuesta de fase

Este tipo de respuesta indica la relación en la fase entre las frecuencias medias con respecto a las altas o las bajas. Este desfase (adelantamiento o retraso) en el espectro de audiofrecuencias (20 – 20.000 Hz) no debería ser superior a los 15°, para que no se produzca distorsión o cancelamientos de la señal. Existen ciertos modelos de amplificador que invierte la fase en toda su banda de paso, lo que puede ocasionar dificultades en su funcionamiento (sino se tiene presente esto, se podría estar cancelando toda la señal).

5.2.10 Ganancia

Es la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada de la señal. Se expresa como una relación logarítmica, y la unidad suele ser el dB, esto es, diez veces el logaritmo decimal del cociente entre potencias (si se relacionan tensiones, sería veinte veces en lugar de diez debido a que la potencia es proporcional al cuadrado de la tensión). Si la potencia de salida es 40 W y la de entrada 20 W, la ganancia es 3dB. Si la tensión de salida es de 4 V y la de entrada 2 V, la ganancia es 6 dB. Cuando la ganancia en sí es menor que 1, se habla de atenuación. En lo referente a amplificadores, se puede definir dos conceptos cuando se refiere una a decibeles que son los dBw y dBu.

- dBw: La W indica que el decibel hace referencia a wats. Es decir, se toma como referencia 1 W. Así, a un watt le corresponden 0 dBw.

- dBm: Cuando el valor expresado en watts es muy elevado, se utiliza el miliwatt (mW). Así, a un mW le corresponden 0 dBm.
- dBu: El dBu expresa el nivel de señal en decibeles y referido a $0,775 V_{RMS}$. Los $0,775 V_{RMS}$ son la tensión que aplicada a una impedancia de 600Ω , desarrolla una potencia de 1mW. Se elige la impedancia de 600Ω , porque es donde el nivel de la señal en dBm y en dBu coincide.

En un circuito en el que intervienen varios amplificadores, las ganancias individuales expresadas en decibeles (en cualquiera de sus fórmulas tanto dB, dBw, dBm o dBu) se suman (restan si son negativas y es atenuación).

5.2.11 Sensibilidad

La sensibilidad Indica la cantidad de flujo eléctrico necesario de entrada para producir la máxima potencia de salida. La sensibilidad viene indicada por dBu a una determinada impedancia. El dBu expresa el nivel de señal en decibeles y referido a $0,775 V_{RMS}$. (Al hacer referencia a voltios, en muchos manuales, principalmente norteamericanos, en lugar de dBu usan dBv). Así, 775 mV equivaldrán a 0 dBu. Si se supera el valor especificado por la sensibilidad la señal de salida sufrirá un recorte (tanto por arriba como por abajo), como ocurre en los limitadores, y quedara distorsionada de tal modo que puede causar daño en ciertos equipos como por ejemplo en los tweeter, que son un tipo de bocinas muy sensibles a la distorsión. Para evitar este gran problema, la mayoría de equipos profesionales cuentan con un control de nivel de la entrada, que nos permiten atenuar la señal si esta resulta excesiva.

5.2.12 Distorsión

La distorsión (distorsión armónica) es la que describe la variación de la forma de onda a la salida de un equipo, con respecto a la señal que entró y se debe a que los equipos de audio, no sólo los amplificadores, introducen armónicos en la señal.

Las causas de esta distorsión pueden ser múltiples. En el caso de los amplificadores, la más usual es la sobrecarga a la entrada, es decir, sobrepasar la potencia recomendada por el fabricante, lo que produce a la salida un recorte de la señal. La distorsión armónica total, debe ser, como máximo de 0,1 % THD(distorsión total armónica) en todo el espectro de frecuencias (las frecuencias altas – agudos, distorsionan más que la bajas – graves). La figura 5.2.12.1 muestra como a mayor frecuencia la distorsión aumenta significativamente con respecto a las frecuencias mas bajas.

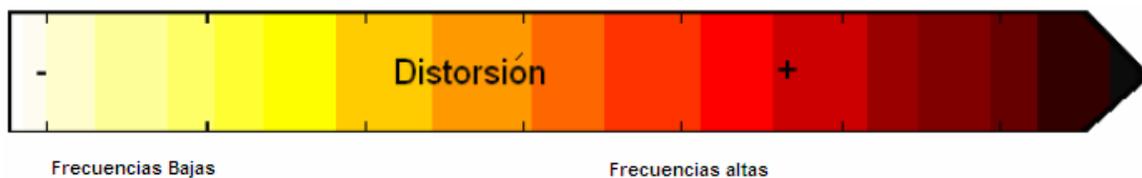


Figura 5.2.12.1 Comparativo frecuencias bajas-altas

La distorsión también puede expresarse en dB en relación a una frecuencia. Es lo que se conoce como distorsión por intermodulación de transistores. Para medir esta distorsión lo que se hace calcular la distorsión del amplificador para dos ondas senoidales diferentes (generalmente, 19 y 20 kHz) y ver cuál es la diferencia entre estas señales expresada en dB. Los amplificadores de calidad deben estar en los 70 dB de diferencia en ese tono diferencial de 1 Khz.

5.2.13 Diafonía

La diafonía indica que en un sistema estéreo, un canal de audio afecta al otro. La diafonía depende de la frecuencia y esta es soportable cuando este en torno a 50 dB para graves y agudos y 70 dB para los tonos medios. Para eliminar los problemas de diafonía, los amplificadores cuentan con rectificadores, condensadores de filtro. Además, muchos fabricantes introducen fuentes de alimentación independientes para cada canal, lo que resulta muy efectivo.

5.3 Tipos de amplificadores

Los amplificadores se clasifican en amplificadores clase A, clase B, clase AB, clase C y clase D, los de clase C se utilizan exclusivamente en transmisores. Cuando se piensa en diseñar o utilizar un amplificador, su clasificación se determina por las frecuencias con las que trabajará. Cuando los amplificadores están comprendidos dentro de la banda audible se les denomina amplificadores de audiofrecuencia (A.F) o amplificadores de baja frecuencia (B.F). Los amplificadores de voltaje son aquellos que están diseñados para entregar una tensión mayor en su salida, no así en su entrada. Los amplificadores de potencia son los que pueden entregar mayor corriente como mayor voltaje.

5.3.1 Amplificadores Clase A

Son aquellos amplificadores cuyas etapas de potencia consumen corrientes altas y continuas de su fuente de alimentación, independientemente de si existe señal de audio o no. Esta amplificación presenta el inconveniente de generar una fuerte y constante emisión de calor. No obstante, los transistores de salida están siempre a una temperatura fija y sin alteraciones. En general, se puede afirmar que esta clase de amplificación es muy común en circuitos de audio y en los equipos caseros de alta fidelidad, ya que proporcionan una calidad de sonido potente y de muy buena calidad. Los amplificadores de clase A tienen mayor calidad de sonido, cuestan más y son menos prácticos, ya que utilizan mucha corriente para operar, aunque sus señales de salida son muy claras.

La clase A se refiere a una etapa de salida con una corriente de polarización mayor que la máxima corriente de salida que dan, de tal forma que los transistores de salida siempre están consumiendo corriente. La gran ventaja de la clase A es que es casi lineal, y en consecuencia la distorsión es menor. La gran desventaja de la clase A es que es poco eficiente, es decir que requiere un amplificador de clase A muy grande para dar 50 W, y ese amplificador usa mucha corriente y por

lo tanto su temperatura de operación es muy alta. Algunos amplificadores de "high-end" son clase A, pero la verdadera clase A solo está en quizás en un 10% del pequeño mercado de "high-end" y en ninguno del mercado de clase media. Los amplificadores de clase A a menudo consisten en un transistor de salida conectado al positivo de la fuente de alimentación y un transistor de corriente constante conectado de la salida al negativo de la fuente de alimentación. La señal del transistor de salida modula tanto el voltaje como la corriente de salida. Cuando no hay señal de entrada, la corriente de polarización constante fluye directamente del positivo de la fuente de alimentación al negativo, resultando que no hay corriente de salida, se gasta mucha corriente. Algunos amplificadores de clase A más sofisticados tienen dos transistores de salida en configuración push-pull.

5.3.2 Amplificadores Clase B

Son aquellos amplificadores que tienen la característica de no disponer de corriente a través de los transistores si no existe una señal de audio presente. La propia señal de excitación polarizará a los transistores para que entren en conducción y así tengan salida hacia una bocina por ejemplo. Esta característica hace especialmente indicados a estos tipos de amplificadores en equipos alimentados por baterías, ya que el consumo está íntimamente ligado al nivel de señal de entrada. Hablando de forma genérica, podríamos afirmar que la calidad en la amplificación de estos equipos es menor y su utilización se adecuaría a aplicaciones que no requieran un sonido muy elaborado, como pueden ser sistemas telefónicos, transmisores de seguridad portátiles, sistemas de aviso, entre otras aplicaciones. Este tipo de amplificadores no se usa en audio.

Los amplificadores de clase B tienen etapas de salida con corriente de polarización cero. Generalmente, un amplificador de esta clase tiene corriente de polarización cero en una pequeña parte del circuito de potencia, para evitar no linealidades. Tienen una importante ventaja sobre los de clase A en eficiencia debido a que casi no usan electricidad con señales pequeñas. Los amplificadores

de clase B tienen una gran desventaja, una distorsión audible con señales pequeñas. Probablemente sea una distorsión con una deficiente sonoridad, que lleva a notarse con señales más grandes. Esta distorsión se llama distorsión de filtro, porque sucede en un punto que la etapa de salida se cruza entre la fuente y la corriente de amortiguación. No hay casi amplificadores de clase B hoy en día a la venta.

Los amplificadores clase B consisten en un transistor de salida, conectado, de la salida, al positivo de la fuente de alimentación y de otro transistor de salida, conectado de la salida, al terminal negativo de la fuente de alimentación. La señal fuerza a un transistor a conducir mientras que al otro lo corta.

5.3.3 Amplificadores Clase C

Este tipo de amplificador tampoco se usa en audio. Los amplificadores de clase C son similares a los de clase B en que la etapa de salida tiene corriente de polarización cero. Sin embargo, los amplificadores de clase C tienen una región de corriente libre cero que es más del 50% del suministro total de voltaje. Las desventajas de los amplificadores de clase B son más evidentes en los amplificadores de clase C, por tanto los de clase C tampoco son prácticos para audio.

5.3.4 Amplificadores Clase AB

Son aquellos amplificadores que reciben una pequeña alimentación constante, independiente de las entradas, en suma a la que será producida en función de la señal. Es decir, se podrá contar con una alimentación constante mínima y además, el amplificador aumentará también la potencia que entrega a los altavoces en función de las señales de entrada que reciba. Esta es la clase de amplificador más común en el audio o Hi-Fi, sin embargo podemos conseguir también de clase A, aunque con un alto consumo de corriente de estos aparatos.

La clase AB domina el mercado y rivaliza con los mejores de clase A en calidad de sonido. Usa menos corriente que los de clase A y pueden ser más baratos, pequeños y ligeros.

Los amplificadores de clase AB son casi iguales a los de clase B en que tienen dos transistores de salida. Sin embargo, los amplificadores de clase AB difieren de los de clase B en que tienen pequeña corriente libre fluyendo del terminal positivo al negativo incluso si no hay señal de entrada. Esta corriente se incrementa ligeramente, pero no se incrementa tanto como para parecerse a los de clase A. Esta corriente libre incluso corrige casi todas las no linealidades asociadas con la distorsión del filtro. Estos amplificadores se llaman de clase AB en vez de A porque con señales grandes, se comportan como amplificador clase B, pero con señales pequeñas, se comportan como amplificador de clase A. La mayoría de los amplificadores disponibles en el mercado son de clase AB.

5.3.5 Amplificadores Clase D

La ventaja fundamental de este tipo de amplificadores es su excelente rendimiento de energía, superior en algunos casos al 90-95%, lo que reduce drásticamente el tamaño de los disipadores, y por tanto el tamaño y peso.

Tradicionalmente se han visto relegados a aplicaciones limitadas como amplificadores para dispositivos portátiles o "subwoofers", en los que la distorsión o el ancho de banda no son factores determinantes. Sin embargo, con la tecnología actual existen amplificadores clase-D para toda la banda y niveles de distorsión comparables a los de clase AB o incluso clase A.

Los amplificadores de clase D se basan en la conmutación entre dos estados (aunque existen variaciones multinivel), con lo que los dispositivos de salida siempre se encuentran en corte o en saturación (en ambos casos la potencia disipada en los mismos es prácticamente nula), salvo en los estados de transición,

cuya duración debe ser minimizada a fin de no disminuir el rendimiento. Esta señal conmutada, que puede ser generada de diversas formas, aunque la más común es la modulación por ancho de pulsos o PWM, y la cual debe ser filtrada posteriormente para recuperar la información de audio. Para ello, la frecuencia de conmutación debe ser superior al ancho de banda requerido (al menos 10 veces mayor) para poder ser rechazada eficazmente. El filtro suele ser de tipo LC, por que este tipo de filtros no supone pérdidas importantes. Los amplificadores Clase-D requieren de un cuidadoso diseño para minimizar la radiación electromagnética y evitar que pueda interferir en equipos cercanos a ellos, típicamente en la banda de FM. No obstante, la tecnología actual ha demostrado que esta clase de amplificadores es la alternativa más confiable para las tecnologías lineales tradicionales no sólo por su rendimiento, sino también por su calidad de sonido, tamaño y precio.

5.3.6 Otros amplificadores

Dentro de los amplificadores se habla también de las clases E, G y H, aunque estos nombres no están tan estandarizados como las clases A y B. Se trata de variaciones de las topologías clásicas aunque confían en la variación de las tensiones de alimentación para minimizar la disipación en los transistores de potencia en cada momento, dependiendo de la señal de entrada. Según ésta variación se realice en varios pasos discretos y de manera continua se estará ante un amplificador de clase G ó H. Estas clases se suelen limitar a amplificadores para sonorización profesional donde se requiera mucha potencia, aunque presentan problemas importantes, sobre todo en el caso de la conmutación discreta de los niveles de alimentación. Desde la aparición y evolución de los amplificadores de clase D, estas tecnologías ya no son tan comunes.

VIBRACIONES

6.1 Introducción

Las vibraciones se presentan en muchos aspectos de nuestra vida. En el cuerpo humano, por ejemplo, hay oscilaciones de baja frecuencia en los pulmones y el corazón, oscilaciones de alta frecuencia en el oído, oscilaciones en la laringe cuando una persona habla y oscilaciones que son inducidas por el ritmo de los movimientos corporales al caminar, saltar o bailar. Muchos sistemas creados por el hombre también experimentan o producen vibraciones. Por ejemplo, cualquier desequilibrio en las máquinas que poseen partes giratorias, como ventiladores, lavadoras, tornos, bombas centrífugas, turbinas, etc., ocasionan vibraciones. Para estas máquinas, las vibraciones son indeseables, como lo son también para los edificios y puentes peatonales ocasionadas por los fenómenos naturales, la operación de las maquinarias, los aviones, trenes y el paso de los vehículos.

Las vibraciones también son indeseables cuando se efectúan mediciones con instrumentos de precisión, por ejemplo, un microscopio electrónico. Las vibraciones pueden ser causantes de sonidos desagradables, llamados ruidos, pero también son las que generan la música que escuchamos.

Asimismo, las vibraciones son beneficiosas, como en los relojes atómicos que se basan en las vibraciones atómicas, alimentadores de partes vibratorias, mezcladoras, instrumentos ultrasónicos que se utilizan en intervenciones quirúrgicas del ojo y otras partes del cuerpo, en sirenas y alarmas, en la determinación de las propiedades fundamentales de películas delgadas a partir del conocimiento de las vibraciones atómicas y en la estimulación del crecimiento de los huesos.

6.2 Historia de las vibraciones

En los inicios, el interés de las vibraciones se debió al surgimiento de los instrumentos musicales, por ejemplo, silbatos y tambores. Por el año 400 en la India y China interesados por la música la describieron como un efecto pulsátil debido al cambio rápido de tono. El filósofo y matemático Griego Pitágoras demostró que si dos cuerdas idénticas están sometidas a tensiones iguales, y que si una es la mitad de la longitud de la otra, los tonos que producen están separados por una octava.

Galileo Galilei estudió también la vibración de una cuerda, y fue el primero en demostrar que el tono se relaciona con la frecuencia de vibración. Puso los cimientos para los sistemas de vibración mediante observaciones que efectuó en 1583 sobre los movimientos de una lámpara que colgaba de una catedral ubicada en Pisa, Italia. Observó que el periodo del movimiento era dependiente de la amplitud de oscilación de la lámpara. Esta propiedad también se cumple en todos los sistemas vibratorios que se pueden describir mediante los modelos lineales.

En 1877 apareció un libro de Lor Rayleigh, Theory of sound, el cual fue una de las publicaciones completa sobre las vibraciones; desde esta época la aplicación de estos principios para entender y diseñar sistemas que se ha afianzado y ha aumentado de manera notable en la diversidad de sistemas que se diseñan teniendo las vibraciones en mente: dispositivos y sistemas mecánicos, electromecánicos y microelectromecánicos, sistemas biomecánicos y biomédicos, barcos y submarinos, y estructuras civiles.

6.3 Elementos que constituyen un modelo de sistema vibratorio

Son tres los elementos que constituyen un sistema vibratorio

- Elementos de inercia
Almacena y libera energía cinética

- Elementos de rigidez
Almacena y libera energía potencial
- Elementos de disipación o de amortiguamiento

6.3.1 Elementos de Inercia

El movimiento de traslación de una masa se describe como el movimiento a lo largo de la trayectoria que sigue desde su centro. La propiedad de inercia asociada depende sólo de la masa total y es independiente de su distribución.

En el caso de movimiento de traslación, la propiedad de inercia de la masa es la relación de la fuerza y la aceleración.

6.3.2 Elementos de rigidez

Los elementos de rigidez almacenan y liberan energía potencial de un sistema.

De la figura 6.3.2.1 se puede examinar como se define la energía potencial, en la cual un resorte se mantiene fijo en el extremo O, y en el otro extremo una fuerza de magnitud F . Bajo la acción de esta fuerza, el elemento se estira desde una longitud inicial o sin estiramiento X_0 hasta una longitud $X_0 + Y$.

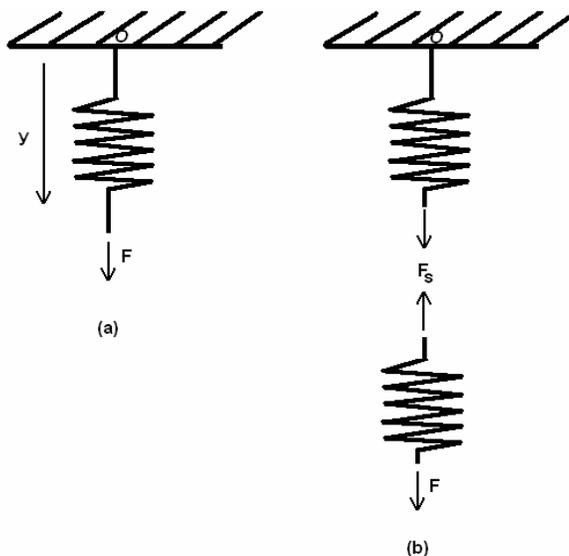


Figura 6.3.2.1 Elemento de rigidez con una fuerza que actúa en él.

La fuerza F_s trata de reestablecer el elemento de rigidez a su estado no deformado, se le llama fuerza restauradora. A medida que el elemento de rigidez se deforma, la energía se almacena en él, y conforme el elemento de rigidez regresa a su configuración inicial se libera la energía. La energía Potencial se define como el trabajo efectuado para llevar al elemento de rigidez desde la posición deformada hasta la posición sin deformación; es decir, el trabajo necesario para llevar al elemento hasta su forma original.

6.3.3 Elementos de disipación

Un elemento de disipación usual puede ser el amortiguamiento viscoso representado en la figura 6.3.3.1. en donde se muestra la magnitud de la fuerza del amortiguador F que siempre actúa en la dirección opuesta a la de la velocidad, y si se toma en cuenta que la magnitud de la fuerza del amortiguador $F(x)$ es lineal, se puede expresar la fórmula 6.3.3.1

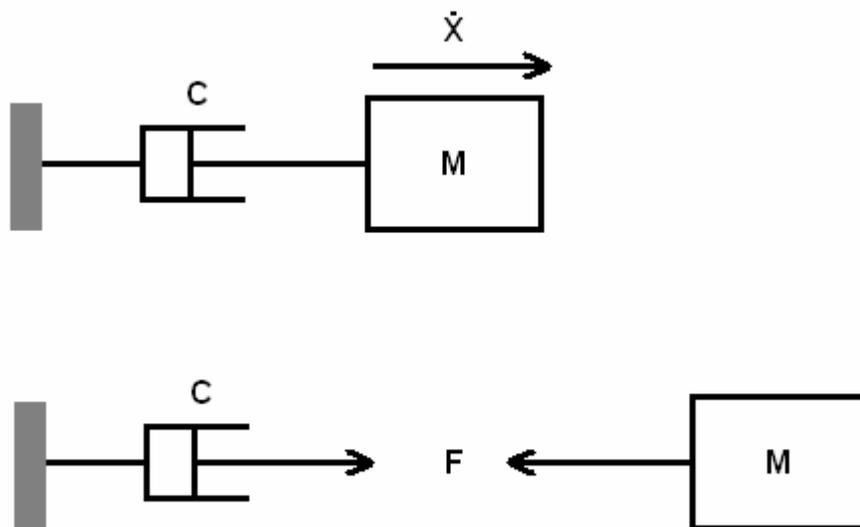


Figura 6.3.3.1 Representación de un amortiguamiento

$$F(x) = cx$$

Fórmula 6.3.3.1 Fórmula de amortiguamiento

Donde la constante c se le denomina coeficiente de amortiguamiento. Las unidades de este coeficiente son $N/(m/s)$. Este se utiliza para expresar la pérdida de energía en un sistema.

Cada uno de estos elementos tiene características diferentes de excitación_respuesta; la excitación está en la forma de una fuerza o de un momento, y la respuesta correspondiente del elemento está en forma de un desplazamiento, velocidad o aceleración. Los elementos de inercia se caracterizan por una relación entre una fuerza aplicada y la correspondiente respuesta de aceleración.

6.4 Movimiento Vibratorio

El estudio de las vibraciones se refiere a los movimientos de los cuerpos y, las fuerzas asociadas con ellos. Todos los cuerpos que poseen masa y elasticidad son capaces de vibrar.

Los sistemas vibratorios pueden clasificarse como lineales o no lineales. Para los sistemas lineales se pueden usar las técnicas matemáticas bien desarrolladas. Por el contrario, las técnicas para el análisis de los sistemas no lineales son difíciles de aplicar.

Uno de los sistemas vibrantes más simples es un resorte con una masa acoplada a un extremo. El movimiento de este mecanismo es típico de todos los movimientos vibratorios simples. Una forma de expresarlo es mediante un ejemplo, por lo que en la figura 6.4.1 se muestra el Movimiento Vibratorio del Resorte en donde:

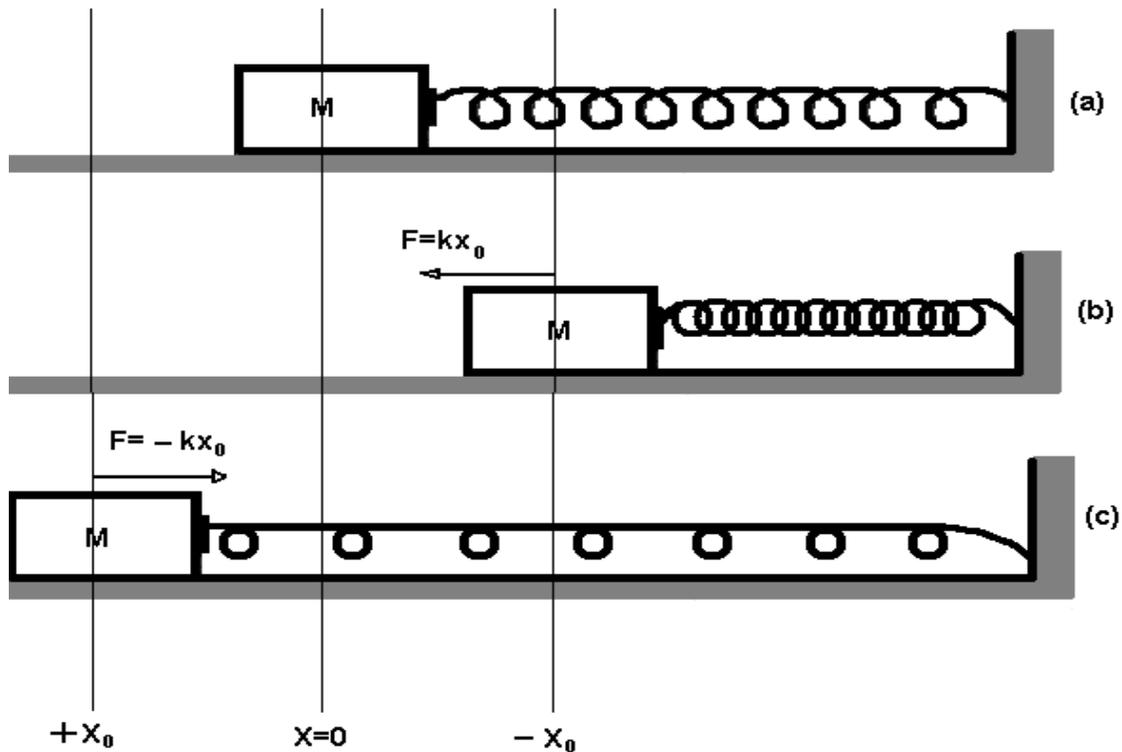


Figura 6.4.1 Movimiento vibratorio del resorte

En el inciso (a) el sistema aparece en su posición de equilibrio; no hay fuerza horizontal que actúe sobre la masa en esta posición.

En el inciso (b) la masa se mueve para comprimir el resorte, durante la compresión se realiza trabajo sobre el y por lo consiguiente se almacena energía potencial.

El resorte comprimido ejerce una fuerza sobre la masa que tiende llevarla nuevamente a la posición $x=0$, como se observa en el inciso (c)

De esta forma toda la energía potencial almacenada se convierte en energía cinética. Desde luego la masa no se parará en la posición $x=0$, puesto que su energía cinética debe perderse realizando trabajo antes de que pueda alcanzar el reposo. Cuando la masa continúa hacia la izquierda de $x=0$ empieza a tensar el resorte y a almacenar energía en el. En el momento en que la masa alcanza la

posición mostrada en la parte (c) de la figura, ella ha perdido toda su energía cinética realizando trabajo contra el resorte; la energía cinética se ha transformado completamente en energía potencial de resorte estirado.

Evidentemente, el resorte acelerará ahora a la masa hacia la derecha. En el momento en que la masa alcanza la posición $x=0$, toda la energía estará de nuevo en forma de energía cinética. La masa comprimirá otra vez el resorte hasta la posición $x= -x_0$, en cuyo punto toda la energía cinética se habrá transformado en energía potencial almacenada en el resorte comprimido. Ahora el proceso se repetirá por si solo una vez más, y el cuerpo seguirá vibrando continuamente entre $x= +x_0$ y $x= -x_0$ si no hay pérdidas por rozamiento.

Hay diversos términos que se aplican a este movimiento vibratorio:

- Amplitud de la vibración. Es la distancia x_0 de la figura 6.4.1. y constituye el desplazamiento máximo del objeto respecto a su posición de equilibrio.
- Periodo de la vibración, T . El periodo de la vibración es el tiempo invertido en una oscilación completa, o sea, el tiempo que invierte la masa que, partiendo de $-x_0$ se mueve hasta $+x_0$ y retorna nuevamente a $-x_0$.
- Frecuencia de la vibración, f . Es el número de oscilaciones completas que el sistema efectúa en la unidad de tiempo.
- El desplazamiento, es la distancia entre la posición de equilibrio y el objeto en cualquier momento durante la vibración.

6.5 Movimiento Armónico Simple

El movimiento oscilatorio puede repetirse a si mismo regularmente, como en el caso de un balancín de reloj o un resorte con un peso como el de la figura 6.5.1. Cuando el moviendo se repite a intervalos de tiempo τ , se le llama periódico. El tiempo de repetición T es el periodo de oscilación y su recíproco, $f=1/T$ es la

frecuencia. Si se designa el movimiento por $x(t)$, todo movimiento periódico debe satisfacer la relación $x(t)=x(t+\tau)$.

El movimiento periódico más simple es al movimiento armónico, el cual se ilustra en la figura 6.5.1.

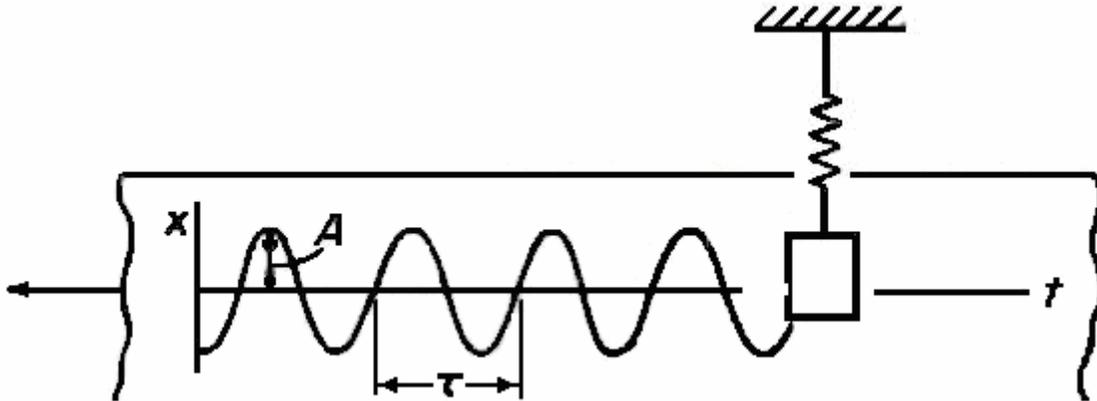


Figura 6.5.1 Movimiento Armónico Simple

Si la masa se desplaza de su posición de reposo, por ejemplo, hacia arriba durante el proceso de compresión del resorte, se realiza trabajo sobre él y, por consiguiente, se almacena la energía potencial en él. El resorte comprimido ejerce una fuerza sobre la masa que tiende a llevarla nuevamente a la posición inicial y se libera, oscilará hacia arriba y hacia abajo, así se logra obtener la ecuación de movimiento 6.5.1.

$$X = A \text{ sen } 2\pi \frac{t}{T}$$

Ecuación 6.5.1 Ecuación del Movimiento Armónico Simple

Donde A es la amplitud de la oscilación, constituye el desplazamiento máximo del objeto respecto a su posición de equilibrio y T es el periodo de vibración, es el tiempo invertido en una oscilación completa, o sea, el tiempo que invierte la masa en desplazarse de una posición inicial a una posición final. El movimiento se repite

cuando $t=T$, su recíproco es la frecuencia de vibración, que es el número de oscilaciones completas que el sistema efectúa en la unidad de tiempo $f = \frac{1}{T}$

Ejemplos de movimiento armónico:

- Movimiento periódico
- Movimiento oscilatorio
- Movimiento vibratorio
- Movimiento vibratorio armónico simple

6.5.1 Movimiento periódico

Un movimiento se dice periódico cuando a intervalos iguales de tiempo, todas las variables del movimiento (velocidad, aceleración, etc.), toman el mismo valor.

6.5.2 Movimiento oscilatorio

Es el movimiento periódico en los que la distancia del móvil al centro, pasa alternativamente por un valor máximo y un mínimo.

6.5.3 Movimiento vibratorio

Es aquel movimiento oscilatorio que tiene su origen en el punto medio, de forma que las separaciones a ambos lados, llamadas amplitudes, son iguales.

6.5.4 Movimiento vibratorio armónico simple

Es el movimiento vibratorio con aceleración variable, producido por una fuerza que se origina cuando el cuerpo se separa de su posición de equilibrio.

Un resorte cuando lo separamos de su posición de equilibrio, estirándolo o comprimiéndolo, adquiere movimiento vibratorio armónico simple, pues la fuerza recuperadora de ese resorte es la que genera una aceleración, la cual le confiere ese movimiento de vaivén, tal como se muestra en la figura 6.5.1.

6.6 Sistema con un solo grado de libertad

Muchos sistemas pueden vibrar en más de una manera y dirección. Si un sistema está restringido de modo que solo puede vibrar de una manera, o si se necesita únicamente una coordenada independiente para determinar por completo la localización geométrica en cualquier instante mediante un solo número.

6.7 Vibración Libre

Todo sistema que posea masa y elasticidad es capaz de vibrar libremente, es decir, sin excitación externa. Vibración libre es el movimiento periódico que se observa cuando el sistema se desplaza de su posición de equilibrio estático; al efectuarse este desplazamiento actúan algunas fuerzas, por ejemplo, en un resorte las fuerzas que actúan son: la fuerza del resorte, la fuerza de fricción y el peso de la masa. Debido a la presencia de la fricción, la vibración disminuirá con el tiempo. En estos sistemas es de gran importancia su frecuencia natural de vibración que es principalmente una función de la masa y de la rigidez del sistema.

6.8 Vibración Libre con un grado de libertad

La vibración libre de un sistema de un grado de libertad, existe, cuando dicho sistema está libre de fuerzas externas. El movimiento se mantiene por la transferencia cíclica de energía, entre las formas potencial y cinética.

El cuerpo es libre de moverse verticalmente tal y como se muestra en la figura 6.8.1

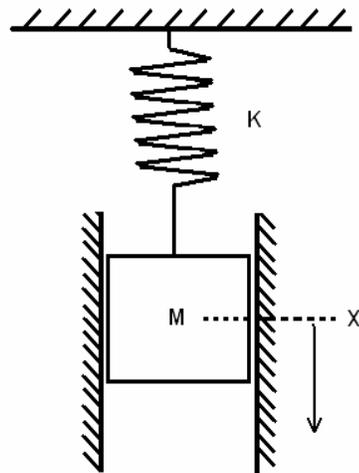


Figura 6.8.1 Vibración Libre con un grado de libertad

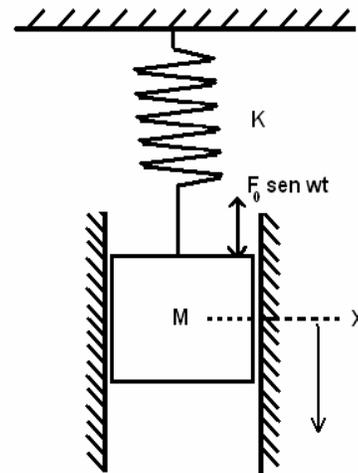


Figura 6.9.1 Vibración Forzada con un grado de libertad

6.9 Vibración Forzada con un grado de libertad

Cuando se aplica una fuerza a un cuerpo rígido el efecto externo sobre éste consiste en cambiar su movimiento o en crear fuerzas resistentes (reacciones) ejercidas sobre el cuerpo dado por otros cuerpos. Naturalmente, esos dos efectos pueden ser simultáneos.

Cuando actúan estas fuerzas externas sobre el sistema durante su movimiento vibratorio, la vibración se denomina vibración forzada, esta es mantenida por una fuerza excitadora alternativa, tiene una frecuencia y una amplitud que dependen de la frecuencia y la amplitud de la fuerza excitadora. Como resultado, el sistema vibrará en la frecuencia de la fuerza de excitación, sin importar las condiciones iniciales ni la frecuencia natural del sistema. En la figura 6.6.2 se muestra un ejemplo de un sistema de vibración forzada con un grado de libertad, donde $F_0 \sin \omega t$ es la fuerza excitadora.

6.10 Vibración Amortiguada

En la realidad, la mayor parte de los sistemas de ingeniería encuentran durante su movimiento vibratorio, fricción o resistencia en forma de amortiguamiento. La fricción seca de Coulomb, al amortiguamiento magnético, el amortiguamiento interno, la fricción de los fluidos, el amortiguamiento del aire, etc., siempre retardarán el movimiento y causan la desaparición eventual de la oscilación. Si el amortiguamiento es fuerte, el movimiento oscilatorio no ocurrirá, se dice entonces que el sistema es sobreamortiguado. Si el amortiguamiento es poco, la oscilación es posible, se dice entonces que el movimiento es subamortiguado. Un sistema críticamente amortiguado es aquel en el cual la cantidad de amortiguamiento es tal que el movimiento resultante está sobre la línea del límite de los dos casos mencionados anteriormente; es decir, que al poner en libertad la masa, esta simplemente retornará a su posición de equilibrio estático.

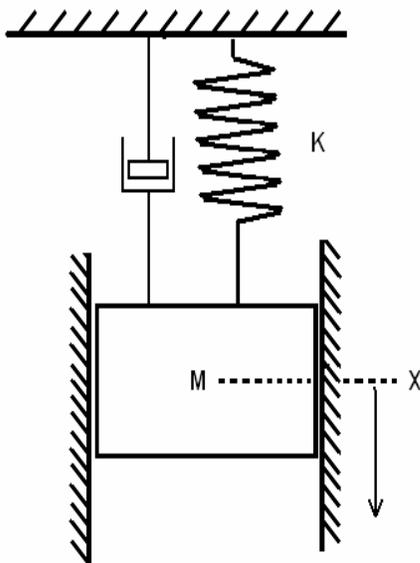


Figura 6.10.1 Vibración Libre Amortiguada de un Grado de Libertad

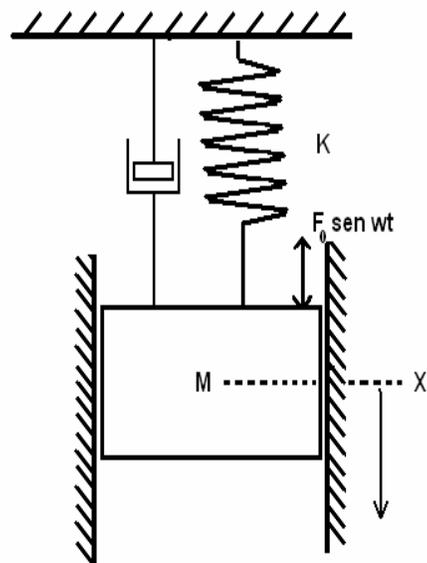


Figura 6.10.2 Vibración Forzada Amortiguada de un Grado de Libertad

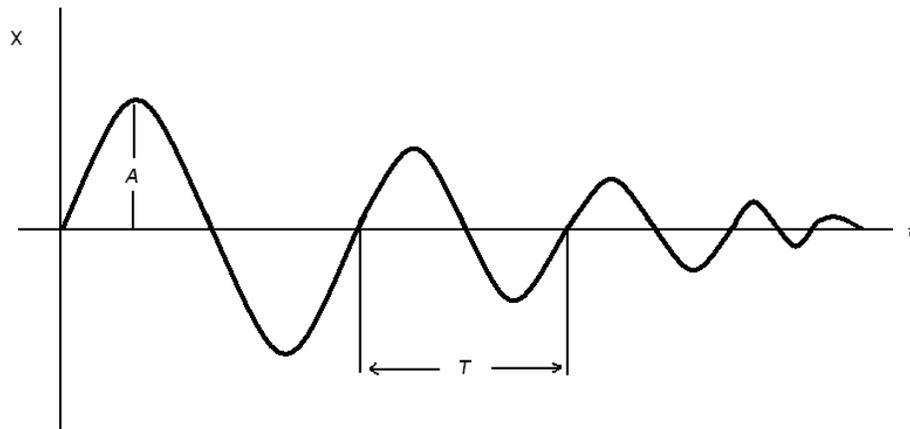


Figura 6.10.3 Gráfica de Vibración Libre Amortiguada de un Grado de Libertad

En la figura 6.10.1 se tiene un sistema de vibración libre amortiguada de un grado de libertad y en la figura 6.10.3 se tiene el comportamiento de la misma, se puede observar que a diferencia de la vibración libre, esta si logra estabilizarse. En cambio en una vibración forzada, esta estará vibrando hasta que la fuerza de excitación sea menor que la del amortiguamiento.

6.11 Máquinas de Acción Vibratoria

En el proyecto y explotación de las máquinas rápidas modernas es necesario prevenir la aparición de vibraciones peligrosas mediante la aplicación de medidas que conduzcan a su eliminación; pero en otros muchos casos es conveniente hacer uso de las vibraciones para resolver ciertas tareas tecnológicas.

La gran eficacia de las máquinas vibratorias se explica porque su acción tecnológica sobre el material u objeto trabajado tiene el carácter de impulsos de alta frecuencia, que se caracterizan por pequeños desplazamientos con considerables valores de la velocidad y aceleración. Bajo la influencia de las oscilaciones del órgano de trabajo, de pequeña amplitud y gran frecuencia, el material trabajado adquiere en muchos casos propiedades especiales, por ejemplo, mayor movilidad, con lo cual disminuyen su coeficiente efectivo de

razonamiento interior, su resistencia al desplazamiento y, por lo tanto, el desgaste del órgano de trabajo.

La teoría de las máquinas de acción vibratoria incluye dos campos estrechamente relacionados: estudio de las características del material sometido a vibración, y el análisis de la dinámica de la propia máquina.

Las máquinas vibratorias de construcción relativamente simple, constituyen sistemas dinámicos en los cuales la forma de la trayectoria y la ley de variación de la velocidad y aceleración del órgano de trabajo no dependen de las dimensiones geométricas de los eslabones, sino de los parámetros dinámicos del conjunto: magnitud de las masas, rigidez de los elementos elásticos, carácter de la excitación creada por el dispositivo de accionamiento, factores de amortiguamiento, etc.

El proyecto y el análisis dinámico de las máquinas vibratorias exigen el planteo y la resolución de ecuaciones diferenciales lineales y, a veces, de ecuaciones no lineales, lo cual presenta con frecuencia una considerable dificultad. En la actualidad se utilizan en gran escala las computadoras para efectuar estas tareas.

Los elementos constructivos esencialmente importantes de las máquinas de acción vibratoria son los vibradores. Se distinguen los siguientes:

- Vibradores mecánicos de inercia, que crean la fuerza de excitación (rotativa o dirigida) mediante la rotación de las masas desequilibradas: pueden ser de una o varias masas, simples o de auto centrado, con magnitud constante o regulable de la fuerza de excitación y de la frecuencia de oscilación.
- Vibradores neumáticos e hidráulicos, con o sin regulación.
- Vibradores electromagnéticos: pueden ser de uno o dos tactos, de resonancia y por golpe, y estar alimentados con corriente alterna, con

impulsos de corriente rectificadas, con corriente continua intermitente o simultáneamente con corriente alterna y continua.

- Mecanismos excéntricos de accionamiento: pueden ser desequilibrados, equilibrados, con volante de puesta en marcha y aumento de la excentricidad durante esta fase, con amplitud regulada de la oscilación o sin regulación.

En las máquinas vibratorias de baja frecuencia es aconsejable el empleo de mecanismos excéntricos de accionamiento porque crean grandes fuerzas de excitación con una pequeña velocidad angular. Para frecuencias de oscilación mayores, solo se utilizan dichos mecanismos en máquinas equilibradas, que trabajan en régimen de resonancia.

El empleo de vibradores de inercia en máquinas de baja frecuencia exige un aumento excesivo de las masas desequilibradas, y su empleo en máquinas de alta frecuencia conduce a sobre cargas inadmisibles en los cojinetes. En grandes máquinas vibratorias de elevada potencia, los vibradores de inercia son por el contrario insustituibles, puesto que permiten crear considerables fuerzas de excitación aun siendo de pequeñas dimensiones y poco peso. Debido al tiempo que requiere para alcanzar su velocidad de régimen, el empleo de este tipo de vibradores en alimentadores y dosificadores de precisión es muy limitado.

El accionamiento electromagnético puede considerarse como el sistema más perfeccionado; se emplea en máquinas de alta frecuencia. Este tipo de accionamiento asegura la obtención directa de un movimiento alternativo de traslación exento de superficies de rozamiento y de cojinetes, lo cual permite sincronizar varios vibradores en una misma máquina y regular su régimen de trabajo.

6.12 Vibradores Electromagnéticos

A Continuación en la fig. 6.12.1 se muestra los esquemas de los vibradores electromagnéticos mas utilizados .

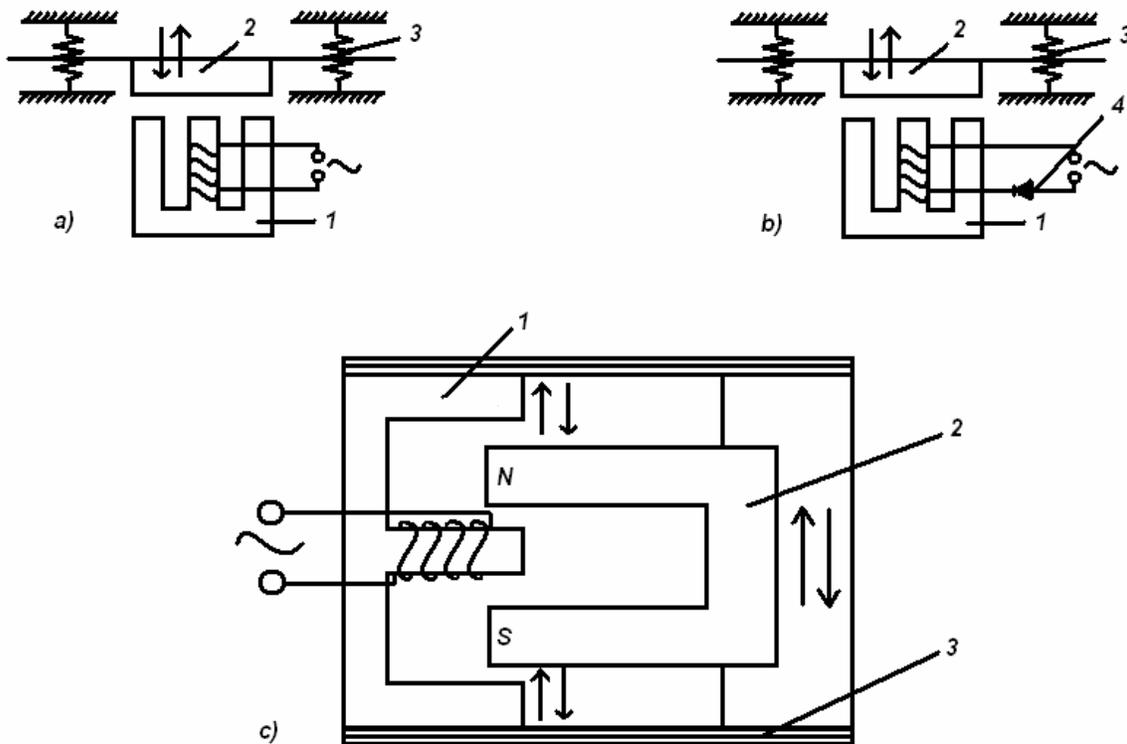


Fig. 6.12.1 Esquemas de Vibradores electromagnéticos

a) Este es el esquema de un vibrador electromagnético de un periodo, Se compone de un inductor (1), el inducido (2) y el sistema elástico (3). El vibrador se alimenta de una red de 50 Hz. Al aumentar el flujo magnético, el inducido es atraído por el inductor; al disminuir el flujo, el inducido retrocede bajo la acción del sistema elástico. Al invertirse el signo del flujo, la atracción se convierte en repulsión. Por tanto la frecuencia de los impulsos es el doble de la frecuencia de la corriente de alimentación,

b) Esquema de vibrador de dos periodos. El funcionamiento es el mismo que el del inciso a), solo que en este tipo de vibrador la alimentación se efectúa a través

de un rectificador 4, esto ocasiona que la frecuencia de las oscilaciones del inducido es dos veces menor.

c) Esquema de vibrador con imán permanente. Por el esquema de la polaridad del imán se ve que existen dos fuerzas de atracción y dos fuerzas de repulsión sobre el inducido.

En el ciclo positivo, el inductor tiene una fuerza magnética **N**, entonces el inducido en el extremo **N** tiene una fuerza de repulsión y en el extremo **S** tiene una fuerza de atracción, cuando el ciclo cambia a negativo se invierte la fuerza magnética en el inductor y ahora, en el inducido en el extremo **N** sufre una fuerza de atracción y en el extremo **S** una fuerza de repulsión.

ELECTROMAGNETISMO

7.1 Electromagnetismo

El Electromagnetismo es una rama de la Física que estudia y unifica los fenómenos eléctricos y magnéticos. Ambos fenómenos se describen en una sola teoría, cuyos fundamentos fueron sentados por Faraday y formulados por primera vez de modo completo por Maxwell. La formulación consiste en cuatro ecuaciones diferenciales vectoriales que relacionan el campo eléctrico, el campo magnético y sus respectivas fuentes materiales (corriente eléctrica, polarización eléctrica y polarización magnética), conocidas como las ecuaciones de Maxwell.

El electromagnetismo es una teoría de campos, es decir, las explicaciones y predicciones que provee se basan en magnitudes físicas vectoriales dependientes de la posición en el espacio y del tiempo. El Electromagnetismo describe los fenómenos físicos macroscópicos en los cuales intervienen cargas eléctricas en reposo y en movimiento, usando para ello campos eléctricos y magnéticos y sus efectos. Por ser una teoría macroscópica, es decir, aplicable sólo a un número muy grande de partículas y a distancias grandes respecto de las dimensiones de éstas, el Electromagnetismo no describe los fenómenos atómicos y moleculares

Los descubrimientos de Oersted y luego de Ampère, al observar que la aguja de una brújula variaba su posición al pasar corriente a través de un conductor situado próximo a ella, demostraron que había alguna influencia entre ambos. También los estudios de Faraday, en el mismo campo, sugerían que la electricidad y el magnetismo eran manifestaciones de un mismo fenómeno.

La idea anterior fue propuesta y materializada por el físico inglés Maxwell, quien luego de estudiar los fenómenos eléctricos y magnéticos concluyó que son producto de una misma interacción, denominada interacción electromagnética, lo que le llevó a formular, las ecuaciones llevan su nombre, en las que se describe el

comportamiento del campo electromagnético. Estas ecuaciones dicen esencialmente que:

- Existen portadores de cargas eléctricas, y las líneas del campo eléctrico parten desde las cargas positivas y terminan en las cargas negativas.
- No existen portadores de carga magnética; por lo tanto, el número de líneas del campo magnético que salen desde un volumen dado, debe ser igual al número de líneas que entran a dicho volumen.
- Un imán en movimiento o, dicho de otra forma, un campo magnético variable, genera una corriente eléctrica llamada corriente inducida.
- Cargas eléctricas en movimiento generan campos magnéticos.

7.1.1 Campos Magnéticos

El campo magnético es una región del espacio en la que una carga eléctrica puntual que, desplazándose a una velocidad v , sufre una fuerza perpendicular y proporcional a la velocidad y a una propiedad del campo, llamada inducción magnética, en ese punto:

$$F = qv \cdot B$$

Un campo magnético tiene dos fuentes que lo originan. Una de ellas es una corriente eléctrica de convección, que da lugar a un campo magnético estático. Por otro lado un corriente de desplazamiento origina un campo magnético variante en el tiempo, incluso aunque aquella sea estacionaria.

La relación entre el campo magnético y una corriente eléctrica está dada por la ley de Ampère.

En el campo magnético no existen monopolos magnéticos, sólo dipolos magnéticos, lo que significa que las líneas de campo magnético son cerradas, esto

es, el número neto de líneas de campo que entran en una superficie es igual al número de líneas de campo que salen de la misma superficie. Un claro ejemplo de esta propiedad viene representado por las líneas de campo de un imán, donde se puede ver que el mismo número de líneas de campo que salen del polo norte vuelve a entrar por el polo sur, desde donde vuelven por el interior del imán hasta el norte.

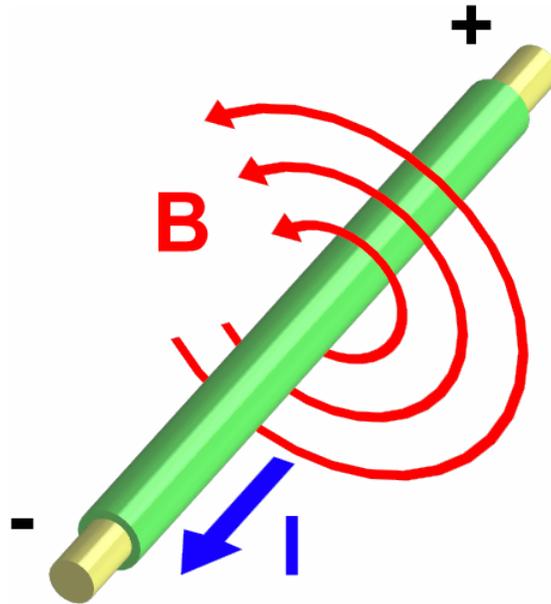


Figura 7.1.1.1 Sentido del campo magnético

Como se puede ver en la Figura 7.1.1.1, el sentido del campo magnético viene dado por la regla de la mano derecha, siendo las pautas a seguir las siguientes:

- En primer lugar se imagina un vector qv , en la misma dirección de la trayectoria de la carga en movimiento. El sentido de este vector depende del signo de la carga, esto es, si la carga es positiva y se mueve hacia la derecha, el vector $+qv$ estará orientado hacia la derecha. No obstante, si la carga es negativa y se mueve hacia la derecha, el vector es $-qv$ va hacia la izquierda.
- En segundo lugar, se imagina un vector Ur que va orientado desde la carga hasta el punto en el que se quiere calcular el campo magnético.

- A continuación, se señalan con los cuatro dedos de la mano derecha (índice, medio, anular y meñique), desde el primer vector qv hasta el segundo vector U_r , por el camino más corto o, lo que es lo mismo, el camino que forme el ángulo menor entre los dos vectores. El pulgar extendido indicará en ese punto el sentido del campo magnético.

El módulo del campo magnético generado por una única carga en movimiento (no por una corriente eléctrica) se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{(qv) \cdot \vec{u}_r}{r^2}$$

donde

$$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2}$$

La unidad del campo magnético en el Sistema Internacional de Unidades es el Tesla, pese a que a menudo se emplea el Gauss. Sin embargo, la conversión es directa: $1T = 10000 \text{ G}$

El flujo magnético, generalmente representado con la letra griega Φ , es una medida de la cantidad de magnetismo, a partir de la fuerza y la extensión de un campo magnético.

En la Figura 7.1.1.2 se dibuja la representación del flujo magnético que atraviesa un área.

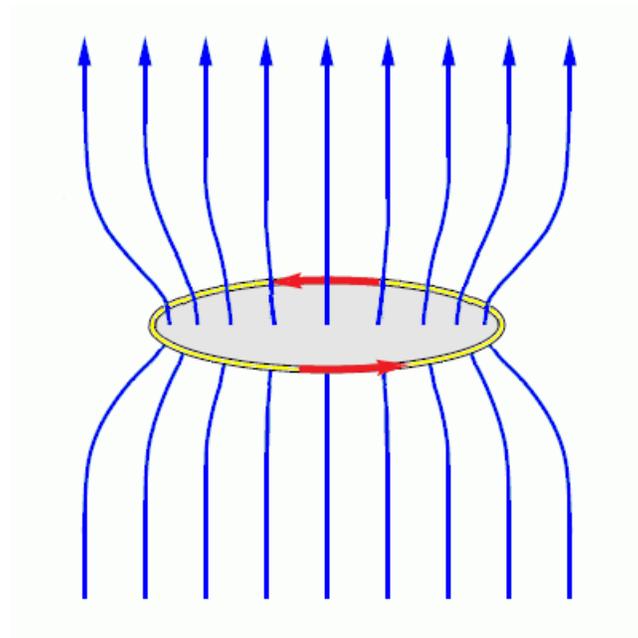


Figura 7.1.1.2 Flujo magnético a través de un área

El flujo (Φ) a través de un área perpendicular a la dirección del campo magnético, viene dado por el producto de la densidad de campo magnético o número de líneas de fuerza por unidad de superficie (B) por la superficie (S).

$$\phi = B \cdot S$$

La unidad de flujo magnético en el Sistema Internacional de Unidades es el weber y se designa por Wb. En el C.G.S. se utiliza el maxwell ($1 \text{ weber} = 10^8 \text{ maxwells}$).

En un Inductor o bobina, se denomina inductancia, L , a la relación entre la cantidad de flujo magnético, Φ que lo atraviesa y la corriente, I , que circula por ella:

$$L = \frac{\Phi}{I}$$

El flujo que aparece en esta definición es el flujo producido por la corriente I exclusivamente. No deben incluirse flujos producidos por otras corrientes ni por imanes situados cerca ni por ondas electromagnéticas.

Desgraciadamente, esta definición es de poca utilidad porque no sabemos medir el flujo abrazado por un conductor. Lo único que sabemos medir son las variaciones del flujo abrazado por un conductor y eso solo a través el voltaje V inducido en el conductor por la variación del flujo. Con ello llegamos a una definición de inductancia equivalente pero hecha a base de cantidades que sabemos medir: la corriente, el tiempo y la tensión:

$$V = L \frac{dI}{dt}$$

La inductancia siempre es positiva, salvo en los raros circuitos electrónicos especialmente concebidos para simular inductancias negativas.

De acuerdo con el Sistema Internacional de Medidas, si el flujo se expresa en webers y la intensidad en amperios, el valor de la inductancia vendrá en henrios (H).

Los valores de inductancia prácticos van de unos décimos de nH para un conductor de 1 milímetro de largo hasta varias decenas de miles de Henrios para bobinas hechas de miles de vueltas alrededor de núcleos ferromagnéticos.

El término "inductancia" fue empleado por primera vez por Oliver Heaviside en febrero de 1886, mientras que el símbolo L se utiliza en honor al físico Heinrich Lenz.

7.1.2 El Solenoide

El solenoide es un hilo metálico en el cual se enrolla un cable en forma de bobina por el que circula una corriente eléctrica. Cuando esto sucede, se genera un campo magnético dentro del solenoide que se comporta como un imán. Como se observa en la Figura 7.1.2.1.

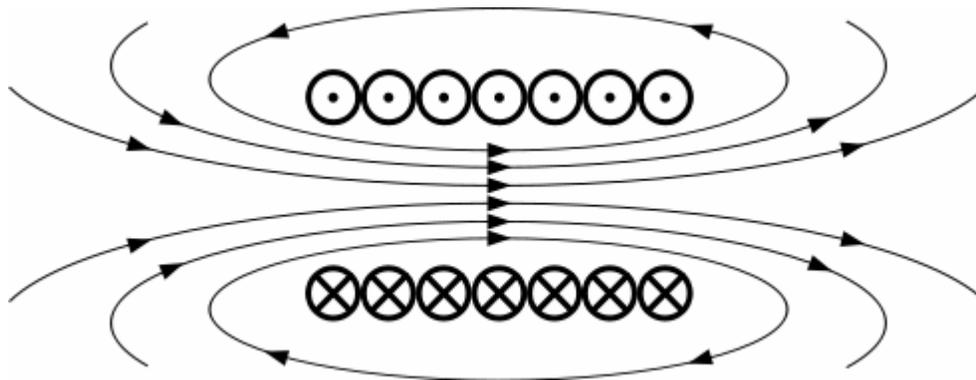


Figura 7.1.2.1 Campo magnético de un solenoide

El valor de la inductancia viene determinado exclusivamente por las características geométricas de la bobina y por la permeabilidad magnética del espacio donde se encuentra. Así, para un solenoide, la inductancia, de acuerdo con las ecuaciones de Maxwell, viene determinada por:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l}$$

donde μ es la permeabilidad absoluta del núcleo, N es el número de espiras, A es el área de la sección transversal del bobinado y l la longitud de las líneas de flujo.

El cálculo de l es bastante complicado a no ser que la bobina sea toroidal y aún así, resulta difícil si el núcleo presenta distintas permeabilidades en función de la

intensidad que circule por la misma. En este caso, la determinación de I se realiza a partir de las curvas de imantación

En física se denomina permeabilidad magnética a la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través suyo los campos magnéticos, la cual está dada por la relación entre la intensidad de campo magnético existente y la inducción magnética que aparece en el interior de dicho material.

El grado de magnetización de un material en respuesta a un campo magnético, se denomina permeabilidad absoluta y se suele representar por el símbolo μ :

$$\mu = \frac{B}{H}$$

donde B es la inducción magnética (también llamada densidad de flujo magnético) en el material, y H es intensidad de campo magnético.

ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DEL TRANSDUCTOR DE BAJAS FRECUENCIAS

8.1 Etapas del Sistema

El sistema propuesto se compone de los bloques mostrados en la figura 8.1.1

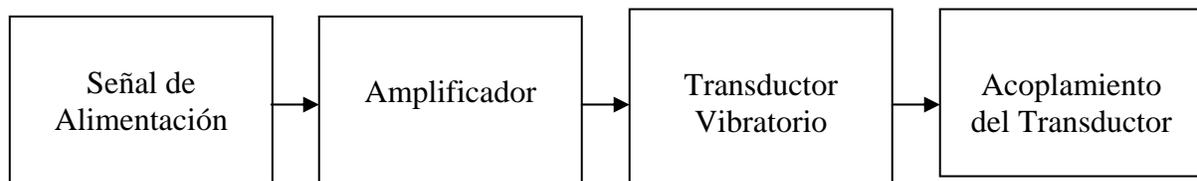


Figura 8.1.1

8.2 Señal de Alimentación

El primer elemento considerado fue la Señal de Alimentación del sistema. Durante las pruebas de funcionamiento se utilizó un generador de funciones para probar el sistema en diferentes rangos bien definidos, tanto en amplitud como en frecuencia, usándose una señal senoidal con amplitud de 12 Volts y frecuencias en un rango de 10 Hz a 120 Hz. Posterior a la caracterización del sistema, se empleó un reproductor de DVD comercial con salidas discretas en los 6 canales de audio y específicamente se empleó la salida de LFE para alimentar al sistema.

Considerando que el transductor diseñado posee la capacidad de reproducir frecuencias menores a 20 Hz y que estas pueden no siempre estar presentes en una película de DVD, se utilizó un procesador digital de señales con un programa de Pitch para reducir la frecuencia de la señal de entrada del sistema a la mitad, es decir “bajar” la frecuencia una octava y así aprovechar la capacidad del sistema.

8.3 Amplificador

Para la selección del amplificador se tomó en cuenta el tipo de señales con las que trabajaría el sistema, al ser éstas únicamente bajas frecuencias y tomando en consideración que no todos los amplificadores responden de la misma manera a diferentes frecuencias, se optó por un amplificador clase D ya que este tipo de amplificadores son los mas utilizados en transductores de bajas frecuencias o subwoofers debido a que poseen la característica de ser lineales en su amplificación, brindan un excelente rendimiento (superior al 90%), además de su reducido tamaño y poco peso. Por lo anterior, las pruebas realizadas con este amplificador garantizaron las menores pérdidas posibles en relación a la señal de entrada lo cual resultó un factor importante para mantener buen control de las diferentes señales con las que se trabajó.

8.4 Diseño del Transductor Vibratorio

Para ésta etapa, se realizaron varias propuestas en el diseño del vibrador, la necesidad consistía en reproducir vibraciones capaces de ser controladas tanto en frecuencia como en amplitud.

Analizando los sistemas comerciales de vibración empleados para dar masaje, se observó que en su mayoría dichos dispositivos son vibradores rotativos y son implementados mediante un motor de corriente directa y una masa desbalanceada en su eje, presentando el inconveniente de que la frecuencia y la amplitud no pueden ser controladas de manera independiente, por lo que se descartó la posibilidad de emplearlos para el diseño propuesto.

Posterior a esto se analizó el utilizar solenoides comerciales a fin de poder controlar tanto amplitud como frecuencia de manera independiente. Para lograrlo se construyó un prototipo utilizando un solenoide marca Jameco con un voltaje de

operación de 12V, al efectuar pruebas con este prototipo se encontró el inconveniente de que el desplazamiento del núcleo en el solenoide era muy corto debido a que los solenoides están diseñados para funcionar principalmente como actuadores tipo switch, por lo que el desplazamiento de su núcleo resulto demasiado brusco para los fines deseados.

Considerando las limitantes que se presentaban con los elementos comerciales, se implemento un primer prototipo de vibrador el cual consta de dos solenoides y una masa ferromagnética, centrada entre los solenoides por medio de tensores elásticos, como se muestra en la Figura 8.4.1.

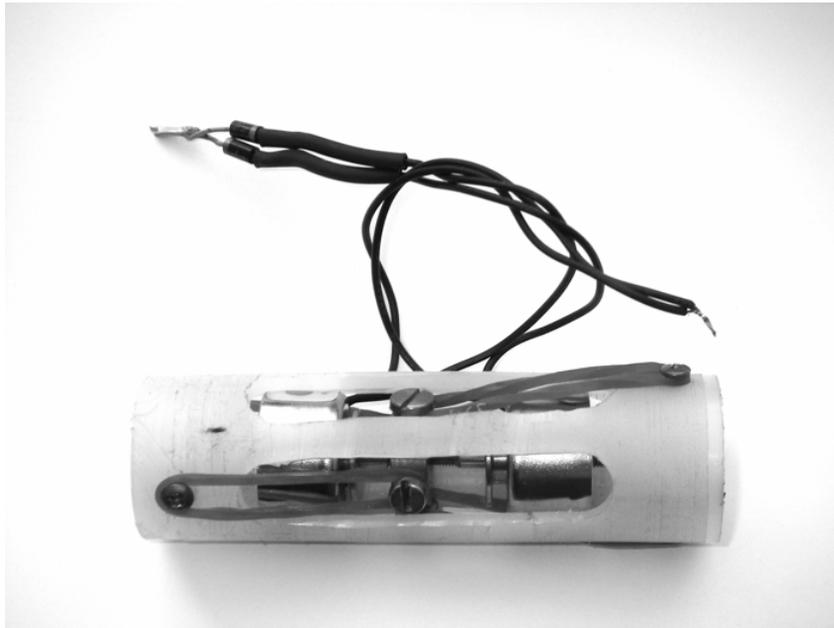


Figura 8.4.1 Prototipo del vibrador con solenoides

Su funcionamiento básico consiste en energizar un solenoide a la vez con uno de los semiciclos de una señal senoidal, para ello simplemente bastó con colocar un diodo en el circuito de cada solenoide. En el semiciclo positivo el primer solenoide tira de la masa central, que originalmente se encuentra en equilibrio por medios elásticos, en el semiciclo negativo se activa el segundo solenoide que tira de la masa central en la dirección contraria al primer solenoide, teniendo como resultado un movimiento continuo que provoca la vibración deseada. La frecuencia

de la vibración esta en completa correlación con la frecuencia de la señal alimentada, mientras que la amplitud de la señal de entrada controla la intensidad con que los solenoides tiran de la masa.

En estado de reposo, la masa permanece equidistante entre los dos solenoides por medio de 4 tensores elásticos, sin embargo, el mantener este equilibrio mediante elementos mecánicos resulta poco conveniente para el propósito deseado, debido a la dificultad en el ajuste de los tensores.

Considerando la problemática anterior, se pensó construir una bobina para que se adecuara más al objetivo deseado y conseguir el desplazamiento de un núcleo más largo y uniforme, así mismo se planteó la posibilidad de usar un imán en el núcleo en lugar de utilizar solo material ferromagnético, incrementando la eficiencia de la fuerza producida por el campo magnético de la bobina y, sustituir los tensores elásticos que mantienen el núcleo en equilibrio por dos imanes adicionales colocados a los extremos del imán central, de tal manera que los imanes laterales lo mantuvieran en equilibrio al central, como se observa en la Figura 8.4.2.



Figura 8.4.2 Ilustración del Prototipo de vibrador con Imanes

Los imanes utilizados son de forma cilíndrica y se introdujeron en un tubo plástico para delimitar el movimiento en un eje y para que fuera el soporte de las bobinas. El material de los imanes utilizados es Neodimio grado N40, el número después de la N representa el producto de energía magnética en megagauss-oersteds [MGOe]. (1 MGOe = 7958 T·A/m = 7958 J/m³).

Para determinar la polaridad de los imanes se usó una brújula y el entendimiento de que polos opuestos se atraen como se muestra en la figura 8.4.3



Figura 8.4.3 Determinación de la polaridad del imán con una brújula

Para el cálculo de la bobina se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- Mecánico. El diámetro y longitud de la bobina, que están dados por el diámetro del tubo plástico que contiene a los imanes, mientras que para la longitud se tomó en cuenta la longitud del imán central.

Diámetro = 15 mm = 1.5 cm = 0.015 m

Longitud = 25 mm = 2.5 cm = 0.025 m

- Eléctrico. El calibre del cable de la bobina, que será seleccionado con base a la corriente y voltaje que alimentarán a la bobina. Estos parámetros están dados principalmente por la salida del amplificador, aunque también se podría hacer un

diseño específico de la bobina y en base a esto construir un amplificador, pero resulta mucho más fácil y económico adecuar la bobina a un amplificador. En nuestro caso los valores máximos de corriente y voltaje a la salida del amplificador serán de 12 V y 10 A, respectivamente.

Los parámetros eléctricos están muy ligados con los parámetros magnéticos, ya que dependiendo del número de vueltas requeridas para generar el campo magnético, dependerá también la longitud del cable y por ende la resistencia.

En este caso se utilizó el calibre 26 AWG, que tiene un diámetro de 0.4049 mm = 0.04049 cm = 0.4049×10^{-3} m

- Magnético. La magnitud del campo magnético generado, una consideración importante aquí es que los cálculos se hacen tomando una corriente constante, y en nuestro caso la corriente esta dada por una señal que se podría considerar aleatoria debido a que proviene de una señal de audio, por lo que para el calculo de la bobina se tomaron en cuenta los valores máximos de voltaje y corriente.

Número de vueltas propuestas.- 500

- Cálculos:

Considerando que se tiene una longitud de bobina de 2.5 cm y el diámetro del cable utilizado es de 0.04049 cm, tenemos que el número de vueltas por capa es de aproximadamente 60 vueltas, considerando que existirá una distancia de separación entre vuelta y vuelta (59 espacios) de aproximadamente de 0.011966 mm, quedando entonces 8 capas de 60 vueltas.

Con los datos mencionados y a partir de la de la Inductancia, Fórmula 8.4.1, mostrada a continuación:

$$L = k \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell}$$

Fórmula 8.4.1 Fórmula de la Inductancia

Donde

L → Inductancia en Henry [H]

μ_0 → Permeabilidad del vacío = $4\pi \times 10^{-7}$ [T·m/A]

N → Número de vueltas del solenoide

A → Área transversal que abarca el inductor [m²]

ℓ → Longitud del solenoide

k → Constante de corrección, en caso de que la proporción de radio/longitud (a/l) se encuentre entre 0 y 10

De acuerdo con la Figura 8.4.4, se observan los valores descritos anteriormente:

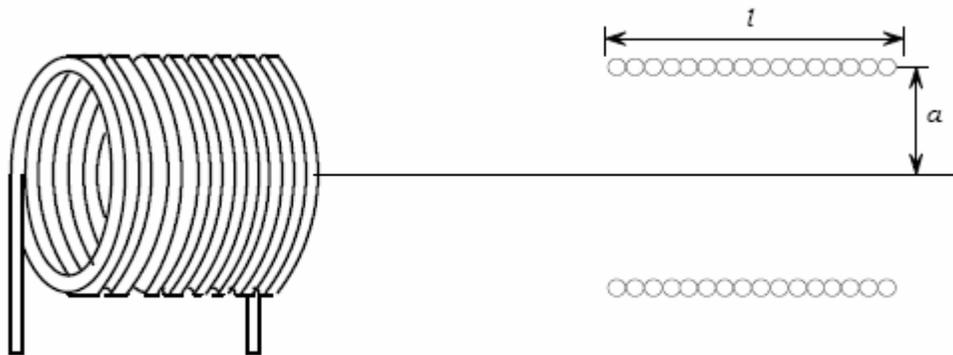


Figura 8.4.4 Bobina de una capa

Para nuestro caso la relación de radio (0.0075 m) / longitud (0.0.25 m) es de 0.3 y de acuerdo a la Gráfica de Nagaoka, mostrada en la Figura 8.4.5, donde nos indica que se tiene en las abscisas el valor de $2a/l$ y en las ordenadas la constante

k, tenemos que la relación $2a/l = 0.6$ de acuerdo a nuestros valores, obteniendo como valor de k igual a 0.79.

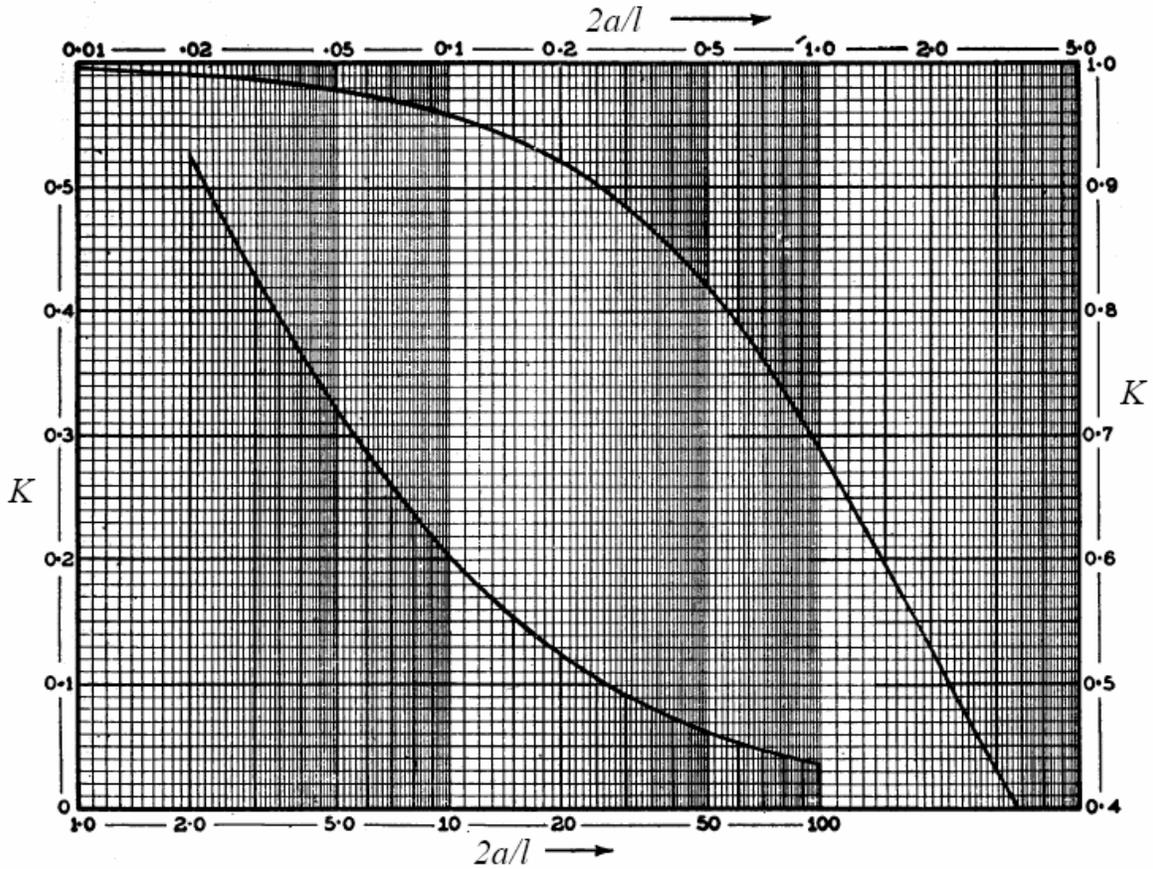


Figura 8.4.5 Gráfica de Nagaoka para distintos valores de $2a/l$

Sustituyendo los valores en la Fórmula 8.4.1, de la inductancia obtenemos entonces que:

$$L = 0.79 \frac{(4\pi \times 10^{-7}) \cdot (60)^2 \cdot (\pi \times 0.0075^2)}{0.025} = 25.262[\mu H]$$

y teniendo en consideración que son 8 capas entonces la inductancia total sera $L_T = L_1 + L_2 + \dots + L_8$, por lo que se tendra:

$$L_T = 202.097915[\mu H]$$

El comportamiento de una bobina con respecto a la frecuencia varió de acuerdo al rango de frecuencia utilizado, en nuestro caso para frecuencias bajas de entre 10 Hz y 120 Hz, pueden ignorarse los efectos capacitivos en la bobina, de acuerdo a su circuito equivalente mostrado en la Figura 8.4.6,

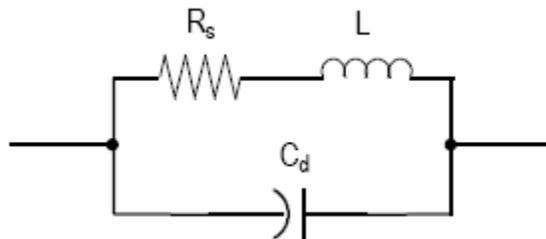


Figura 8.4.6 Circuito equivalente de una bobina

De hecho, el inductor es entre los componentes pasivos de un circuito, el que probablemente es más susceptible de presentar cambios drásticos con la frecuencia. En cualquier bobina, la proximidad entre las espiras da lugar a una capacidad distribuida que no puede ignorarse en altas frecuencias (en nuestro caso se utilizan bajas frecuencias, ya mencionado anteriormente).

La propiedad esperada de un inductor en corriente alterna es su reactancia. Los elementos reales presentan otras propiedades tales como, en este caso, capacidad o resistencia. EL factor de calidad "Q" es un número que nos indica cuánto se aproxima el inductor real al ideal, cuanto mayor sea el Q, más perfecto será el inductor. Tanto la resistencia y la capacidad intervienen en el Q.

El Q se obtiene efectuando el cociente entre la reactancia y la resistencia del inductor. (La resistencia es distinta a la de corriente continua, por lo que no servirá medirla con un multímetro común), como se muestra en la Fórmula 8.4.2:

$$Q = \frac{X_L}{R}$$

Fórmula 8.4.2 Fórmula de la Calidad

Así, cuanto más baja sea la resistencia de la bobina, más alto será el Q y más "ideal" será nuestro inductor.

En un solenoide (sin núcleo) "Q" depende fundamentalmente de su geometría. (ésto es porque los parámetros físicos quedan "escondidos" detrás de los geométricos y esto es una ventaja), ya que de acuerdo a la Fórmula 8.4.3 es posible conocer el Q de un solenoide:

$$Q = 7.5D\phi\sqrt{f}$$

Fórmula 8.4.3 Fórmula de la Calidad de un Solenoide

Donde: D = diámetro de la bobina en mm, f = frecuencia en MHz, ϕ = coeficiente extraído del gráfico de la Figura 8.4.7 que se muestra a continuación. (Atención, la figura emplea cm en lugar de mm y la constante difiere).

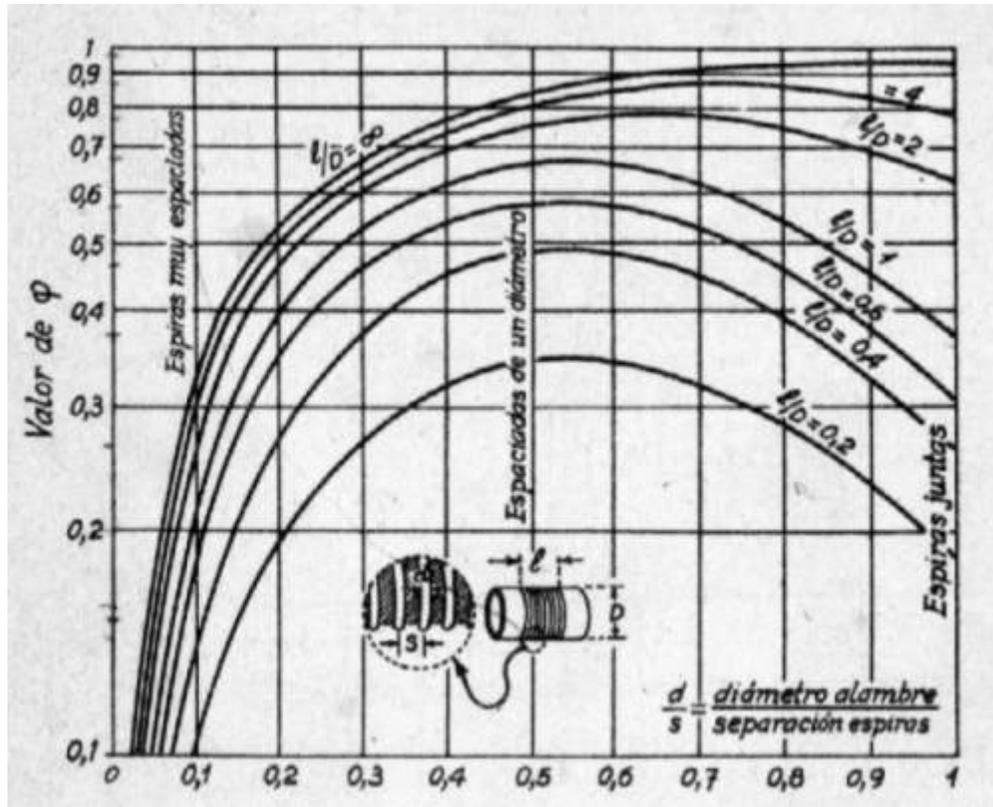


Figura 8.4.7 Valores de ϕ

Para nuestro caso la longitud es de 25 mm y el diámetro es de 15 mm, por lo que la relación longitud/diámetro, en nuestro caso, será igual a 1.66 y la relación d/s (diámetro alambre / separación espiras) es de acuerdo a lo mencionado de diámetro del alambre = 0.04049 cm y la separación “calculada” entre espiras = 0.0011966 cm, por lo que la separación espiras $s=0.4049+0.011966=0.416896$, y se tiene entonces que $d/s=(0.4049/0.416896)=0.97$, pero se considera para cuestiones prácticas que están juntas ≈ 1 , y de acuerdo a la Figura 8.4.7 se tiene aproximadamente una $\phi = 0.5$.

Así, para los valores de frecuencia de 10 Hz = 0.00001 MHz y 120 Hz = 0.00012 MHz, diámetro $D = 25$ mm y $\phi = 0.5$, se tienen los siguientes valores de Q :

$$Q_{10} = 0.296 \quad \text{y} \quad Q_{120} = 1.026$$

Con esto nos damos cuenta que

- El Q es directamente proporcional al diámetro de la bobina.
- El Q de una bobina es mayor a medida que se eleva la frecuencia.
- El Q es mayor a medida que el coeficiente ϕ aumenta.

A su vez el coeficiente ϕ es

- Mayor cuando la relación longitud a diámetro (l/D) de la bobina aumenta (bobina "larga").
- Máximo para una relación diámetro del alambre versus separación entre centros de las espiras (d/s) = aproximadamente 0,55 (separación entre espiras igual al diámetro del alambre aproximadamente).

Puede verse que coincide con la noción intuitiva de que una bobina de generoso diámetro con alambre "gordo" tendrá buen Q.

Con este valor obtenido de Q y recordando

$$Q = \frac{X_L}{R}, \quad \text{entonces} \quad R = \frac{X_L}{Q}$$

donde

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_T$$

y sustituyendo

$$X_{L10} = 2 \cdot \pi \cdot (0.00001) (202.097915) = 0.012698 \text{ ohms}$$

$$X_{L120} = 2 \cdot \pi \cdot (0.00012) (202.097915) = 0.152378 \text{ ohms}$$

tenemos que

$$R_{10} = 0.042898 \text{ ohms} \quad \text{y} \quad R_{120} = 0.148516 \text{ ohms}$$

La capacidad distribuida de una bobina puede estimarse de igual manera de acuerdo a consideraciones geométricas, con la siguiente expresión

$$C_d \text{ [pF]} = K D,$$

donde D se expresa en mm y, K depende de la relación longitud a diámetro (l/D) de la bobina de acuerdo a la tabla siguiente:

I/D	0.1	0.3	0.5	0.8	1	2	4	6	8	10	15	20	30
K	0.096	0.06	0.05	0.05	0.046	0.05	0.072	0.092	0.112	0.132	0.186	0.236	0.34

Donde se obtiene que la relación l/d es igual a 1.66 y por interpolación el valor aproximado de K es de 0.048, y sustituyendo en la fórmula $C_d = KD$, se obtiene

$$C_d = 0.048 \times 15 = 0.72 \text{ [pF]}$$

Así, basandonos en el Circuito Equivalente del Inductor, la Reactancia Capacitiva esta dada por:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

y se observa que esta tiende a ser muy grande, por lo que en la Figura 8.4.6 se tomara como un circuito abierto el Capacitor y únicamente se tendrá que la impedancia estará dada por:

$$Z_L = R + j2\pi f L_T$$

y su modulo estará dado por:

$$|Z_L| = \sqrt{R^2 - (2\pi f L_T)^2}$$

donde, sustituyendo los valores obtenemos

$$|Z_{L10}| = 0.040975\Omega \quad \text{y} \quad |Z_{L120}| = 0.034088\Omega$$

Una vez obtenidos los parámetros y caracterizada la bobina, se construyo el inductor empleando un torno con un adaptador para poder contabilizar el número de vueltas como puede apreciarse en la figura 8.4.8

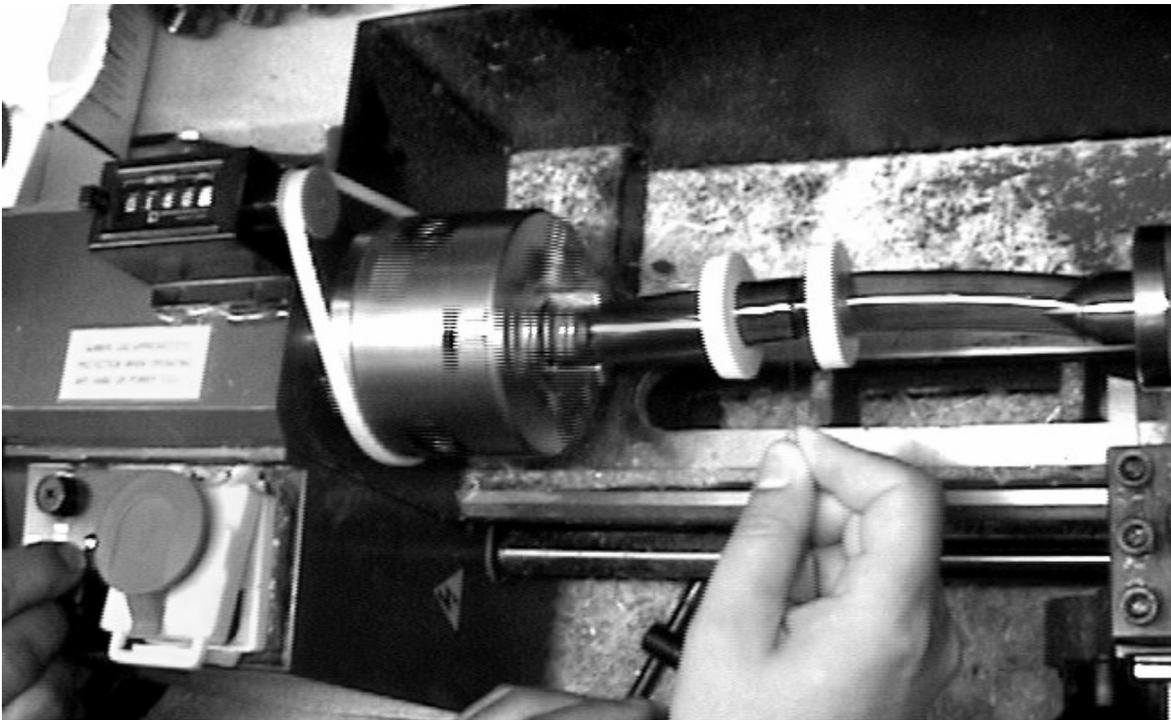


Figura 8.4.8 Construcción de la Bobina

Al igual que el prototipo de los solenoides con tensores elásticos, fue necesario emplear diodos a fin de que cada bobina trabajara con los semiciclos positivo y negativo respectivamente.

Finalmente el prototipo con Imanes se puede apreciar en Figura 8.4.9, físicamente armado.



Figura 8.4.9 Prototipo con imanes

8.5 Acoplamiento del Transductor

Finalmente una parte importante de la operación del sistema consiste en el acoplamiento final del dispositivo en el lugar adecuado para que el usuario sea capaz de percibir los efectos de bajas frecuencias de un sistema de realidad virtual. En este caso fue pensado para colocarse en una tarima aunque su funcionalidad permite ser integrado incluso en sillones de salas cinematográficas siempre que se emplee la proporción adecuada.

CONCLUSIONES

Con la finalidad de experimentar la vibración que producen las señales de audio, se diseñó y construyó un dispositivo capaz de brindar una mayor sensación y percepción de eventos de señales de bajas frecuencias, dentro de Sistemas de Realidad Virtual (SRV); dicho dispositivo puede ser utilizado en aplicaciones de sistemas de entretenimiento.

Para mostrar su funcionamiento, se utilizó un sistema de entretenimiento doméstico de reproducción de películas (DVD), manejando la señal de salida obtenida del canal de subwoofer, la cual contiene señales de bajas frecuencias, logrando exaltar la experiencia de percibir sensaciones reales de vibración en la reproducción de varias escenas de películas y documentales, esto, a través de la generación de vibraciones relacionadas con el audio utilizado, teniendo atención a que dicho efecto no fuera una distracción sino mas bien un complemento a la sensación visual y auditiva, ayudando a que el entorno global generado por el sonido y las escenas de video fuera lo más real posible.

Una característica importante del sistema es que incluso al usar audífonos, se puede percibir la sensación de estar expuesto a niveles de presión sonora elevados, **sin importar** el volumen que se tenga al utilizar los audífonos. Además, comparando la experiencia, no es lo mismo por ejemplo el escuchar música a un alto nivel de volumen utilizando bocinas de gran tamaño que usar audífonos a un alto volumen, ya que la percepción y experiencia de movimiento y presión en el ambiente diferencia dichos eventos, sin embargo cada una de estas situaciones tiene sus desventajas, en la primera se tiene la perturbación de áreas circundantes, la posible distorsión del sonido y tal vez la molestia del alto volumen de sonido y en la segunda, se tiene la posibilidad de causar daño al órgano auditivo.

Así, una gran ventaja del Sistema de Efectos Perceptibles y Realidad Virtual de Bajas Frecuencias, es el no dañar al ser humano al reproducir las sensaciones de vibraciones asociadas al sonido escuchado, ya que no es necesario utilizar los sistemas de audio a gran volumen para tener la percepción de un efecto real de vibración, además de complementar un Sistema de Realidad Virtual para obtener una sensación más aproximada a un evento real.

Cabe mencionar que este dispositivo se puede construir a diferentes escalas, por ejemplo el dispositivo construido en este proyecto es para ser localizado muy cerca del cuerpo, pero se puede construir a una escala mayor para hacer vibrar un sillón, una plataforma e incluso una habitación.

El tener una experiencia realista de efectos especiales en realidad virtual y conseguir la calidad de percepción sin distorsionar el sonido y sin perturbar el ambiente se consiguió a través de la implementación del sistema de vibración con conceptos básicos de física del sonido, electrónica y electromagnetismo complementándolo con áreas como vibraciones y sus efectos en el cuerpo humano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Audio 3D / J.C.

Carrazon, Juan A. G. LLeo.

Anaya Multimedia : Sociedad General de Autores y Editores, Madrid 1996

Equipos de audio

Bejerano Tome, Mariano.

Ed Síntesis, Madrid 1997

Física

Joseph W. Kane / Morton M. Sternheim.

Ed. Reverte S.A. 1982

Fundamentos de Física

F. Bueche.

McGraw-Hill Book Company. 1968

Mecánica Analítica para Ingenieros

Fred B. Seely, M.S. y Newton E. Ensign, M.A.

Mexico : Uteha, 1987

Mecánica de las Vibraciones

J.P. Den Hartog.

Mexico : Ed continental, 1964

Mecanismos

S.N.Kozhevnikov,I.Yesipenko,M.Raskim.

.Barcelona: Ed G. Gili, 1970

Teoría de las Vibraciones

Thompson, William Tyrrell.
Ed. MexicoPrentice Hall, c1981

Teoría y Problemas de Vibraciones mecánicas

William W. Seto.
Ed. McGraw-Hill, 1971

Introducción práctica a la Realidad Virtual

Parra Marquez, Juan Carlos.
Ediciones Universidad del Bio-Bio, Chile. 2001

Realidad Virtual

Pino Gonzalez, L.M.
Ed Paraninfo, Madrid 1995

Realidad Virtual: Creaciones y Desarrollo

Stampe Dave.
Ed Anaya, Espana 1995

Realidad Virtual: La última frontera

Sin Autor.
Ed CEDISA1996

Sonido Profesional

Clemente Tribaldos.
Ed. Paraninfo S.A. 1992

Spatial audio

Rumsey, Francis.
Ed Focal, Oxford. 2001

Tecnología básica del sonido

Ignasi Cuenca, David / Eduard Gómez, Juan.

Ed. Paraninfo S.A. 1995