



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**CORRECCIÓN DE DISTORSIÓN
EN ALTAVOCES
ELECTRODINÁMICOS
APLICANDO CONTROL
RETROALIMENTADO**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A N:
MARÍA DE LA CONSOLACIÓN ACEVES ANTA
GUSTAVO VILLANUEVA HERNÁNDEZ
Director: M. en I. Pablo Francisco Lara Reyes

MÉXICO, D.F.

**TESIS CON
FALTA DE ORIGEN**

1994



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A mis padres:

Con profundo agradecimiento y admiración.

A ti padre, porque siempre serás mi mejor ejemplo,
a pesar de nuestras diferencias.

A ti madre, por tu dedicación y esmero. Por aquellos
momentos que en silencio me
escuchabas, comprendías y esperabas.

Porque a pesar de la adversidad y los momentos
difíciles, me brindaron fortaleza y confianza,
legándome la más grande y preciada herencia.

Consolación

A Gustavo:

Mi más sincera admiración y agradecimiento
a mi compañero y amigo; por ser la persona
que más apoyo me brindó en el camino que
hoy terminamos juntos.

Por todo: t ...dt

Consolación

Dedicatoria

A mis padres, que pacientemente han prodigado en mi lo mejor de sí mismos. Este trabajo es, antes que nada, fruto de su dedicación, empeño y ejemplo.

A Consolación, con afecto, por el apoyo incondicional, su amistad y las palabras de aliento que siempre fueron una motivación extra para culminar este proyecto.

Al Ing Pablo Lara Reyes por el apoyo, entusiasmo, dedicación y ese afán por lograr siempre lo mejor, por la amistad con lo cual me ha distinguido, pero sobre todo por que siempre me alentó... jamás lo olvidaré.

Al Ing Reynaldo Rosas Hajar por ser suya la idea original de ésta tesis, pero sobre todo por la confianza y amistad que ha depositado en mí, y a quien admiro por que ha logrado asociar la luz del pensamiento con la nobleza del corazón.

A todas aquellas personas que siempre me han manifestado su confianza y amistad .

Gustavo

INDICE

1 INTRODUCCIÓN	1
2 ANTECEDENTES	4
2.1 Conceptos generales de acústica	4
2.2 Descripción de un altavoz electrodinámico	7
2.3 Clasificación de altavoces	9
2.4 Características técnicas de altavoces	10
2.5 El problema de la reproducción de bajas frecuencias	14
3 MODELADO Y SIMULACION DE UN SISTEMA ACUSTICO	18
3.1 Modelo lineal	18
3.2 Modelo no lineal	21
3.3 Implantación de los modelos en una computadora digital	24
3.4 Sistema acústico	27
3.5 Simulación del sistema acústico en lazo abierto	28
4 CORRECCIÓN DE LA DISTORSIÓN	44
4.1 Aplicación del control retroalimentado	44
4.2 Selección de la variable de retroalimentación	45
4.3 Diseño del controlador	48
4.4 Sintonización del controlador PID	49
4.5 Simulación del sistema acústico en lazo cerrado	53

5 CONCLUSIONES

59

6 REFERENCIAS

66

INTRODUCCIÓN

El altavoz (o bocina) es el elemento más limitado de toda la cadena de reproducción de sonido. Debido a esa limitación se han hecho muchos intentos para mejorar la conversión electroacústica; en especial se han desarrollado transductores digitales, pero hasta ahora no se tiene una alternativa que compita en costo y eficiencia con un altavoz convencional (o electroacústico).

Algunos de los problemas de los altavoces convencionales son su limitado ancho de banda, su característica de radiación direccional, y el hecho de que el cono radia señales acústicas por sus dos caras al mismo tiempo, lo que da por resultado su cancelación cuando se encuentran en el espacio.

La reproducción de bajas frecuencias presenta problemas especiales a los altavoces, ya que demanda grandes niveles de potencia, debido en parte a la relativamente limitada capacidad auditiva del oído humano, en dicho rango de frecuencia; esto trae consigo la necesidad de generar grandes desplazamientos del cono del altavoz, lo que provoca distorsión en la salida acústica.

El problema de distorsión, por desplazamientos grandes del cono, ha sido objeto de reciente interés, debido a su gran efecto en la reproducción de baja frecuencia, y a que no es sino hasta fines de la década de los 80 [6] que se comienzan a desarrollar los modelos analíticos que permiten analizar adecuadamente el problema de distorsión por desplazamientos grandes del cono de un altavoz convencional.

De entre los fenómenos de distorsión, el más importante, para sistemas acústicos, es el de la distorsión por intermodulación, que es el que se presenta cuando dos o más señales son distorsionadas simultáneamente.

Este trabajo, se enfoca al problema de la corrección de la distorsión por intermodulación causada por desplazamientos grandes del cono de altavoces convencionales en la reproducción de bajas frecuencias, cuando éstos trabajan con grandes potencias. No se atacarán el resto de los problemas anteriormente planteados para altavoces.

La mayoría de los intentos que se han hecho para mejorar la reproducción de sonido en altavoces se han enfocado principalmente a cambiar aspectos de su construcción (por ejemplo, aumentando el radio del altavoz, reduciendo la rigidez del sistema de suspensión, etc.). Otros métodos de corrección se basan en la aplicación de técnicas especiales de filtrado (como por ejemplo las reportadas en [7] y [10]). Estos métodos son soluciones de lazo abierto. Por otro lado, existen resultados experimentales de métodos de retroalimentación para corrección de distorsión armónica [2] y [4]. El presente trabajo, propone el uso de la retroalimentación para corregir el problema de la distorsión por intermodulación. Se decidió verificar y evaluar esta propuesta de manera teórica, ya que hacerlo de forma experimental requiere una cantidad de trabajo y tiempo que excedería los límites razonables de un trabajo de tesis de licenciatura. Por otro lado, se considera adecuado que antes de una realización experimental exista un desarrollo analítico que la sustente.

Este trabajo tiene también como objetivo presentar el análisis de altavoces de manera sencilla, evitando la necesidad del conocimiento en detalle de la teoría de los sistemas acústicos, procurando que sólo sea necesaria la teoría básica de dinámica de sistemas físicos y control.

Para la demostración teórica de la propuesta, motivo de este trabajo, se buscaron modelos matemáticos de los sistemas acústicos. Se encontró un modelo lineal [16] que muestra las características más simples de altavoces, pero que no es capaz de reproducir los fenómenos de distorsión. Este modelo describe adecuadamente a un altavoz cuando se tiene señal de entrada pequeña. Los efectos de distorsión pueden

reproducirse en un modelo no lineal cuyos parámetros no son constantes sino que dependen del desplazamiento del cono del altavoz [11].

El diseño del control se realizó con base en el modelo lineal del altavoz. El desempeño del altavoz, en lazo abierto y cerrado, se analizó con base en simulaciones realizadas en una computadora digital del tipo personal. En dichas simulaciones se utilizó el paquete de asistencia matemática Matlab, y en especial su módulo de sistema no lineales Simulink [15].

Los resultados obtenidos se compararon con una de las soluciones de corrección de distorsión por intermodulación más avanzada (Filtro espejo, Klippel, 1992) [10]. El resultado de la comparación fue razonablemente favorable para el desempeño de la retroalimentación.

El trabajo escrito se estructura de la siguiente manera. En el capítulo segundo se presentan los antecedentes y conceptos generales relacionados con los sistemas acústicos, las características de los altavoces y los problemas de reproducción del sonido, especialmente en baja frecuencia. El capítulo tres describe el modelado de un altavoz electromecánico; se presenta la obtención de un modelo lineal de señal pequeña y de un modelo no lineal de señal grande, además se muestran los efectos de distorsión por intermodulación y armónica, mediante simulaciones realizadas en una computadora personal usando el modelo no lineal. En el cuarto capítulo se presenta la propuesta de corrección de distorsión mediante la aplicación de la técnica de control retroalimentado; se describe el diseño de un controlador PID basado en el modelo lineal del altavoz y finalmente se llevan a cabo simulaciones del sistema realimentado usando el modelo no lineal del altavoz. El quinto capítulo contiene las conclusiones sobre el desempeño del control retroalimentado propuesto; se incluyen también recomendaciones para trabajos que en el futuro pudieran continuar con lo que se presenta en este escrito.

ANTECEDENTES

2.1 CONCEPTOS GENERALES DE ACÚSTICA

Para comprender los trabajos técnicos que se ocupan de este campo se requiere conocer los conceptos básicos de la acústica. Este capítulo contiene una lista con una breve descripción de los conceptos relevantes de la teoría básica relacionada con altavoces, que se espera puedan facilitar la consulta de las referencias utilizadas en este trabajo.

La lista de definiciones que sigue no es de modo exhaustiva y se presentarán términos adicionales a medida que se les necesite más adelante.

Ondas sonoras

Ondas sonoras son las ondas longitudinales en las que se propaga el sonido. No todas las ondas de esta clase son perceptibles por el oído humano.

Cuando las ondas sonoras contienen frecuencias en el intervalo de 20 a 20 kHz, se hallan en la gama audible. Las ondas de frecuencia inferior a 20 Hz se llaman ondas infrasónicas y son inaudibles, las ondas de frecuencia mayor a 20 kHz también se consideran inaudibles y son llamadas ultrasónicas. Por lo general, las ondas infrasónicas son generadas por fuentes de gran magnitud, pues su longitud de onda es muy larga, en comparación con las audibles y las ultrasónicas.

Las ondas sonoras pueden originarse en cuerdas vibrantes, membranas tensas, y otras fuentes. Su longitud de onda depende de la velocidad del sonido en el medio en que se propagan las ondas, al igual que de su frecuencia. En el aire, donde la velocidad del sonido es igual a los 344 m/s, la longitud de onda para la frecuencia de 20 Hz es aproximadamente de 16 m, en tanto que a 20 kHz corresponde un valor aproximado de 1.6 cm.

Sonido

Es un pequeño cambio en la presión que viaja a través del aire a una velocidad esencialmente constante (344 m/s a 20 °C de temperatura ambiente).

Acústica

Ciencia que se encarga del estudio de las ondas sonoras. La palabra acústica como adjetivo, califica lo que está asociado con las ondas sonoras o los medios, fenómenos, aparatos, cantidades, o unidades, relativos a ella.

Presión estática

La presión estática en un punto es la presión que existiría en ausencia de ondas sonoras, su valor se define, en general, como de 10^5 Pa.

Presión sonora instantánea

La presión sonora instantánea en un punto es la variación incremental de la presión estática causada en un instante cualquiera por la presencia de una onda sonora. Su unidad es el microbar (μBar).

Densidad del aire

La densidad del aire está dada por

$$\rho = 1.29 \frac{273}{T} \frac{P}{760} \quad \text{kg/m}^3 \quad (2.1)$$

donde T es la temperatura absoluta en grados Kelvin y P es la presión barométrica en milímetros de mercurio. En acústica se considera que la densidad del aire es $\rho=1.18 \text{ kg/m}^3$ a una temperatura ambiente de $T=295 \text{ K}$ y presión barométrica estática de $P = 751 \text{ mm Hg}$.

Nivel de presión sonora

El nivel de presión sonora de un sonido o spl, se mide en decibeles y se calcula como la relación existente entre la presión sonora efectiva, Pr, y la presión sonora eficaz de referencia, Pref. Esto es

$$\text{spl} = 20 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_{\text{ref}}} \right) \text{ dB} \quad (2.2)$$

El mínimo nivel de presión sonora audible, o Pref, es definido como $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$.

Distorsión

En términos generales, la distorsión se define como cualquier energía no deseada presente en la banda de paso del circuito de interés. Distorsión armónica y por intermodulación son formas de distorsión no lineal, las cuales cambian la forma de la onda en el dominio del tiempo y el contenido espectral en el dominio de la frecuencia

Distorsión armónica

Distorsión armónica es la generación de señales no deseadas con frecuencias enteras de la frecuencia de una onda senoidal, cuando ésta es amplificada en un dispositivo no lineal. Distorsión de amplitud es otro nombre para la distorsión armónica. Generalmente, el término distorsión de amplitud se usa cuando se analiza una forma de onda en el dominio del tiempo, mientras que el término distorsión armónica se usa cuando el análisis se realiza en el dominio de la frecuencia.

Se definen varios grados de distorsión armónica. La distorsión armónica de grado n es la razón de amplitud de la n-ésima armónica a la amplitud de la frecuencia fundamental.

Distorsión por intermodulación

La distorsión por intermodulación consiste en la generación de señales no deseadas cuando dos o más frecuencias son amplificadas en un dispositivo no lineal. Cabe mencionar que es muy difícil medir todos los componentes de la distorsión por intermodulación.

2.2 DESCRIPCIÓN DE UN ALTAVOZ ELECTRODINÁMICO

El altavoz es el elemento encargado de transformar las señales eléctricas provenientes de un amplificador, en ondas sonoras capaces de ser detectadas por el oído humano. Es por tanto un transductor electroacústico del que existen algunas variantes, aunque el más utilizado es el electrodinámico, que es el tipo de altavoz que encontramos en las televisiones, aparatos de radio, etc.

La figura 2.1 ilustra la construcción de un altavoz electrodinámico montado en un gabinete de caja cerrada (conocido también como *baffle* o sonodeflector). El altavoz está constituido por un diafragma, o cono, hecho generalmente de papel o aluminio, el cual está montado por medio de suspensiones flexibles en el centro y la periferia, de modo que puede moverse en dirección del eje x. La corriente que pasa por una bobina móvil acoplada al cono, interactúa con el flujo del entrehierro de un imán permanente y crea una fuerza magnetomotriz que provoca el movimiento axial de la bobina móvil y del cono.

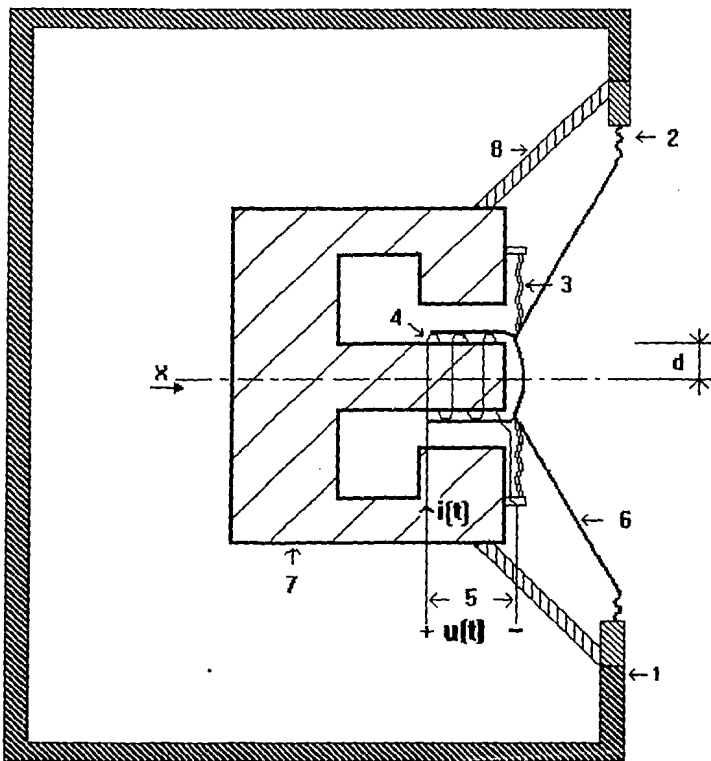


Fig 2.1 Corte esquemático de un altavoz electrodinámico montado en un sonodector de caja cerrada

Donde:

1. Sonodector de caja cerrada
2. Suspensión de borde flexible
3. Suspensión central flexible
4. Bobina móvil
5. Conexiones eléctricas
6. Cono
7. Imán permanente
8. Estructura de soporte.

2.3 CLASIFICACIÓN DE ALTAVOCES

Los altavoces se dividen, según el rango de frecuencia en el que son utilizados, en tres tipos básicos: altavoces para graves, altavoces para medios y altavoces para agudos.

El ancho de banda, o rango de frecuencia en el que se utiliza un altavoz, tiene como límite inferior la frecuencia de resonancia del altavoz, mientras que el límite superior está dado por la frecuencia de corte del altavoz. A continuación se describen brevemente cada uno de los tipos de altavoces:

Altavoces para tonos graves

Son altavoces cuya frecuencia de resonancia es muy baja con el propósito de que puedan reproducir sonidos de frecuencia muy bajas. Estos altavoces deben ser de grandes dimensiones ya que la frecuencia de resonancia guarda relación inversa con el diámetro del diafragma.

En bajas frecuencias el rendimiento de este tipo de altavoz es bueno, ya que se mueve todo el diafragma en conjunto. En la medida que aumenta la frecuencia del cono, el desempeño se deteriora al sólo irradiar energía la porción que se encuentra en la periferia, permaneciendo inmóvil el resto del cono. De esta manera, el rendimiento de una unidad de bajos, (conocida también por su nombre en inglés: *woofer*) disminuye en la medida en que la frecuencia aumenta.

La frecuencia de resonancia de una unidad reproductora de baja frecuencia se ubica, generalmente alrededor de los 20 Hz, y la frecuencia de corte se debe ubicar alrededor de 1 kHz.

El diámetro del cono de un altavoz de este tipo es relativamente grande, suele estar entre 12 y 30 cm, y requiere de una bobina móvil de diámetro grande y larga, pues la bobina debe efectuar un recorrido relativamente grande, que a veces alcanza o sobrepasa los 20 mm, y es importante que el entrehierro provea un campo magnético de densidad uniforme durante todo el recorrido de la bobina móvil.

Altavoces de medios

Su gama de frecuencias suele estar comprendida entre 400 y 8 kHz, son de dimensiones más reducidas que los altavoces para graves, entre 7 y 12 cm. de diámetro.

De estos altavoces existen realizaciones con membrana convencional, otras utilizan una cúpula vibrante y también las hay de tipo trompeta, que suelen presentar una eficiencia más elevada.

Altavoces de agudos

Se trata en este caso de bocinas con diafragmas de pequeñas dimensiones, ya que también lo serán las longitudes de onda de las señales que debe reproducir. Las frecuencias de resonancia y corte de estas bocinas son de 2 kHz y 20 kHz, respectivamente.

En la actualidad estas bocinas son del tipo trompeta, las cuales están blindadas en su parte trasera con una carcasa metálica con el fin de evitar la interacción con otras bocinas. Son bocinas de precio elevado y se destruyen de inmediato si se les aplica alguna señal de baja frecuencia.

2.4 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE ALTAVOCES

Las características técnicas más importantes de un altavoz son:

- Impedancia**
- Resistencia mecánica**
- Factor fuerza**
- Directividad**
- Respuesta en frecuencia**
- Rendimiento transiente**
- Rendimiento**
- Potencia máxima, mínima y de régimen**

Impedancia

La impedancia de la altavoz depende de su principio de funcionamiento, así como de su forma constructiva y materiales empleados. Se pueden considerar tres factores que conforman la impedancia eléctrica del altavoz: a) la resistencia eléctrica de la bobina, b) la reactancia inductiva del arrollamiento (bobina móvil) y c) la resistencia inducida por corrientes parásitas.

La resistencia eléctrica se calcula como:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.3)$$

donde:

- R = Resistencia eléctrica de la bobina
- r = Resistividad del alambre empleado
- l = Longitud total del alambre
- S = Sección transversal del alambre

La reactancia inductiva se calcula de la siguiente manera:

$$X_L = 6.28 f L \quad (2.4)$$

donde:

- X_L = Reactancia inductiva de la bobina móvil
- f = frecuencia de la señal que excita a la altavoz, Hz
- L = Inductancia de la bobina móvil, H

Se procura en general que la reactancia inductiva sea la menor posible y para ello la bobina debe tener pocas vueltas.

La resistencia inducida por corrientes parásitas, es la que se presenta como consecuencia de las corrientes inducidas en la bobina causadas por el desplazamiento de la bobina en el campo magnético en el cual se encuentra contenida.

Si bien se desea que el altavoz tenga impedancia constante en toda la gama de audio (para no modificar la recta de carga del transistor de salida del amplificador) esto es imposible prácticamente. La impedancia de un altavoz suele definirse a una frecuencia de 1 kHz.

Resistencia mecánica

La resistencia mecánica del altavoz, Z_m , es la constante de proporcionalidad entre una fuerza aplicada al altavoz y la velocidad que adquiere el mismo, sus unidades son $N s m^{-1}$.

Factor Fuerza

El Factor fuerza, B_l , es la constante de proporcionalidad entre la intensidad de corriente eléctrica que se produce en la bobina y la fuerza aplicada al altavoz, sus unidades son $N s m^{-1}$.

Directividad

Esta propiedad se refiere a las características direccionales de radiación sonora de un altavoz para las frecuencias de interés. Algunas fuentes son no direccionales, lo que equivale a decir que radian el sonido igualmente en todas las direcciones y, como tales, denominánse radiadores esféricos. Otras pueden ser altamente direccionales, sea por que su tamaño es inherentemente grande en comparación con la longitud de onda, o a causa de un diseño especial.

Respuesta en frecuencia

Como los altavoces son sistemas no lineales, la información de la intensidad sonora generada por el altavoz en función de la frecuencia se construye experimentalmente. Para ello, se suministra al altavoz una señal de potencia fija y frecuencia variable, luego se mide la potencia sonora generada por dicho altavoz en función de la frecuencia de entrada, en el rango de frecuencias de estudio. Con estos datos se construye una curva de potencia sonora en función de la frecuencia, como la mostrada en la figura 2.2 [5].

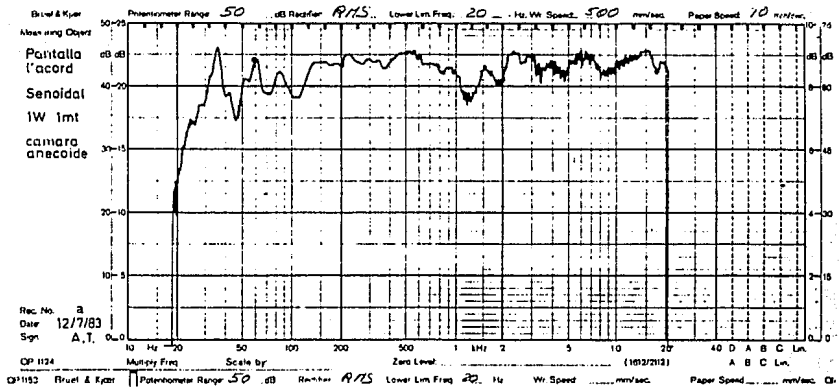


Fig 2.2 Respuesta en frecuencia experimental en un altavoz

El máximo que se encuentra en la zona de bajas frecuencias corresponde a la frecuencia de resonancia, F_r . En las altas frecuencias se encuentra la frecuencia de corte, F_c , correspondiente a la máxima frecuencia que se considera que el altavoz es capaz de reproducir correctamente.

La frecuencia de corte del altavoz se define como aquella en la cual la intensidad sonora cae aproximadamente 3 dB del centro de la banda.

Para determinar experimentalmente la frecuencia de resonancia se aplica un impulso de tensión a la bobina móvil, así el cono vibrará a su frecuencia de resonancia.

La frecuencia de resonancia depende del material de construcción del cono, del sistema de suspensión utilizado, del diámetro del diafragma, etc.

La frecuencia de resonancia varía en relación inversa al diámetro del cono. Por otro lado, un altavoz con cono construido con material rígido tendrá una frecuencia de

resonancia superior que otro cuyo diafragma no lo es. Una suspensión más rígida en el diafragma aumentará la frecuencia de resonancia del altavoz.

Como es imposible conseguir un altavoz que posea respuesta plana en toda la banda de audio se recurre a la utilización conjunta de 2, 3 o más altavoces que trabajen en distintos centros de banda para cubrir todo el espectro audible.

Rendimiento

Este corresponde a la eficiencia del altavoz. Su valor generalmente es muy reducido, es difícil de determinar y pocos fabricantes lo suministran, en su lugar se suele especificar el nivel de presión sonora producida por el altavoz a una determinada distancia, generalmente un metro, cuando es alimentado con una potencia de un Watt.

Potencia máxima, mínima y de régimen

La potencia máxima o admisible, es el valor máximo de potencia que se le puede aplicar al altavoz durante un corto tiempo sin destruirlo.

Se llama potencia de régimen al máximo valor de potencia que puede soportar el altavoz en régimen continuo. Este valor es menor que el anterior.

La potencia mínima depende del altavoz y de su recinto acústico y es la potencia que se le debe suministrar a un altavoz para obtener el mínimo nivel adecuado de audición.

2.5 EL PROBLEMA DE LA REPRODUCCIÓN DE BAJAS FRECUENCIAS

De los tres rangos de frecuencias en los cuales se desempeñan los altavoces, el que mayor importancia parece tener respecto al agrado que ha de causar en quien lo escucha, es el de bajas frecuencias. Una de las razones de éste fenómeno puede ser que en dicho rango se encuentran la mayor gama de frecuencias de voces e instrumentos musicales como se muestra en la fig 2.3 [12].

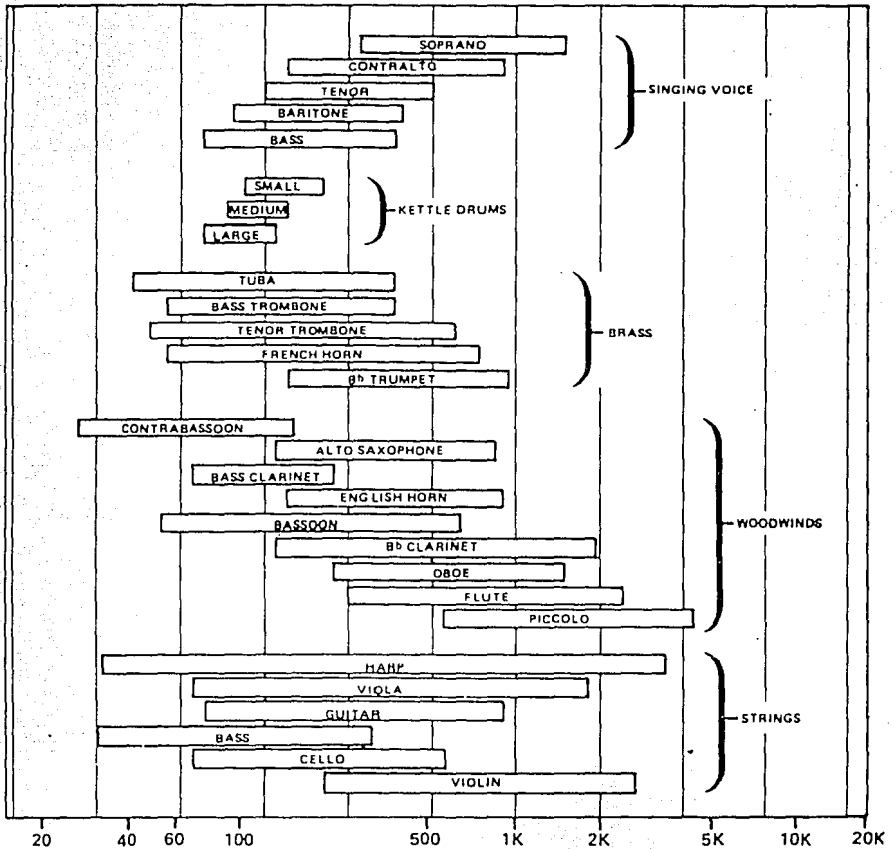


Fig 2.3 Rangos de frecuencias de voces e instrumentos musicales en Hz

En cualquier tipo de altavoz, el cono o membrana está radiando por sus dos caras al mismo tiempo y crea simultáneamente ondas de presión y de depresión. Esto quiere decir que estas dos señales estarán en oposición de fase, lo que dará lugar, cuando se encuentren en el espacio, a su cancelación. Este fenómeno que se conoce como

cortocircuito acústico [5] es particularmente importante en altavoces para graves. Esta cancelación de la señal podría evitarse separando la señal emitida por la parte frontal de su membrana de la que emite por su parte posterior mediante un gabinete (conocido como sonodeflector) cuya dimensión en la dirección de irradiación fuera superior a la longitud de onda para la cual queremos evitar su cancelación. Por ejemplo, para una señal de 50 Hz, la dimensión en cuestión debe ser del orden de 3.5 m. Como no es práctico construir gabinete con esta dimensión la solución del cortocircuito acústico es parcial. Por otro lado, esta solución plantea varios problemas, el más importante es que se modifican las características del altavoz al aumentar su rigidez, ya que en sus desplazamientos ha de comprimir el aire encerrado en el sonodeflector, por lo que si se desea una buena respuesta en bajas frecuencias hay que hacer la caja suficientemente grande para que no altere demasiado las características del altavoz.

Para la reproducción de sonido en bajas frecuencias es necesario utilizar grandes potencias, para compensar la limitada capacidad auditiva del oído humano en estas frecuencias. El manejo de altas potencias en altavoces ocasiona que el cono del altavoz tenga grandes desplazamientos; cuando esto sucede se generan distorsiones importantes (tanto armónicas como por intermodulación) en la presión acústica que radia el cono

Por otro lado, el problema de mantener en los altavoces una salida acústica uniforme a muy bajas frecuencias es difícil de resolver [6]. Un método para mejorar la respuesta de baja frecuencia es aumentar el radio de los altavoces. La impedancia de radiación aumenta como la cuarta potencia del radio del altavoz y por consiguiente la eficiencia. Sin embargo el aumento en la eficiencia no es tan alto como se esperaría, debido a que la masa del altavoz también aumenta con el radio[6].

También es un problema importante el de procurar una frecuencia de resonancia baja para abarcar correctamente las frecuencias más bajas del espectro audible. Esto se puede lograr reduciendo la rigidez del sistema de suspensión. [6]. Sin embargo, si se reduce demasiado la rigidez del sistema mecánico, su desplazamiento a bajas frecuencias es muy grande, lo cual puede causar distorsión armónica y por intermodulación.

La distorsión armónica y por intermodulación debido a desplazamientos grandes del cono es uno de los problemas más graves en la reproducción de bajas frecuencias. Sin embargo, no ha sido sino hasta fines de la década de los 80 y principios de la de los 90 que se generaron las bases analíticas (principalmente modelos matemáticos) que están permitiendo resolver adecuadamente el problema de la distorsión que ocurre por desplazamientos grandes del cono del altavoz [4, 8]. De entre los problemas de distorsión, el de intermodulación es el que tiene mayor importancia práctica, puesto que en la mayor parte de los casos, los altavoces trabajan simultáneamente con señales de diferente frecuencia.

Este trabajo se enfocará a la solución del problema de distorsión por intermodulación en altavoces convencionales (altavoces electrodinámicos) debido a desplazamientos grandes del cono del altavoz, ocasionados por grandes potencias de la señal de entrada (señal grande).

El resto de los problemas de la reproducción en baja frecuencia (cortocircuito acústico, respuesta plana, frecuencia de resonancia baja) no se atacarán. Sin embargo, se espera que las técnicas propuestas en este trabajo tengan un efecto benéfico en la solución de dichos problemas.

MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA ACÚSTICO

En bajas frecuencias los componentes eléctricos, mecánicos y acústicos de un altavoz electrodinámico (ver figura 2.1) se conducen como elementos concentrados y la interacción entre ellos puede ser modelada por un circuito con parámetros concentrados [11]. Así, se considera que la bobina móvil tiene N vueltas y una resistencia e inductancia, R y L respectivamente. El cono y la bobina móvil tienen una masa total m . El efecto total de las suspensiones del cono puede ser representado por medio de una rigidez mecánica K y una resistencia mecánica Z_m . La rigidez del aire encerrado en el gabinete, K_B , corresponde a una compresión adiabática y reversible.

Todos los elementos mecánicos comparten la misma velocidad, por lo que se considera que están conectados en paralelo. La resistencia y el inductor eléctricos están conectados en serie. La fuerza aplicada al cono del altavoz depende de la corriente en la bobina, dicha dependencia está definida por lo que se conoce en acústica como factor fuerza, o Bl , (ver sección 2.4). Este factor no es otra cosa que un motor eléctrico lineal, que enlaza el sistema eléctrico con el mecánico de un altavoz.

3.1 MODELO LINEAL DEL ALTAVOZ

En el modelo lineal los parámetros concentrados son generalmente asumidos como constantes al considerar excursiones muy pequeñas de la bobina móvil; esto es, se obtiene un modelo de señal pequeña [9].

El circuito de parámetros concentrados lineal se ilustra en la figura 3.1.

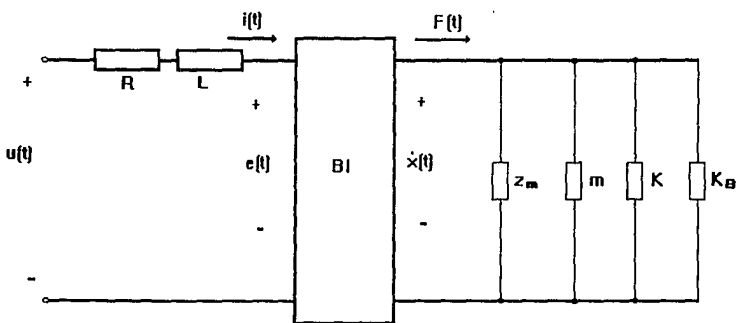


Fig 3.1 Circuito de parámetros concentrados lineal

Donde:

- $u(t)$ = Voltaje entre las terminales de la bobina, V
- $e(t)$ = Tensión inducida, o fuerza contraelectromotriz, V
- $i(t)$ = Corriente en la bobina, A
- $x(t)$ = Excursión de la bobina, m
- m = Masa mecánica de la bobina móvil y el cono, kg
- Z_m = Resistencia mecánica de suspensión, $N s m^{-1}$
- R = Resistencia eléctrica de la bobina móvil, Ω
- L = Inductancia de la bobina móvil, H
- Bl = Factor fuerza, $N A^{-1}$
- F = Fuerza mecánica, N

Del circuito de la figura 3.1 se obtiene

$$u(t) = e(t) + Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (3.1)$$

donde $e(t)$ corresponde a la fuerza electromotriz o voltaje inducido por el movimiento de la bobina. Dicho voltaje está gobernado por la ley de inducción de Faraday

$$e(t) = -\frac{d\phi(t)}{dt} \quad (3.2)$$

$\phi(t)$ es el flujo que encierra la bobina, que puede ser expresado como

$$\phi(t) = BA(t) \quad (3.3)$$

siendo B el vector de inducción magnética y $A(t)$ el área que limita el circuito magnético. Dicha área se obtiene al multiplicar la longitud del conductor, l , por el desplazamiento de la bobina móvil, x , (en donde se considera que, de acuerdo con la figura 2.1, $l = 2 \pi d N$).

Por lo tanto la ecuación 3.2 se puede expresar como

$$e(t) = Bl \frac{dx(t)}{dt} \quad (3.4)$$

Por otro lado, la interacción del campo magnético del imán y la corriente de excitación de la bobina provoca una fuerza mecánica $F(t)$ sobre el cono, la cual produce un deslizamiento horizontal en el eje axial. De acuerdo con la ecuación de la fuerza de Lorentz se establece la relación

$$F(t) = Bli(t) \quad (3.5)$$

Finalmente, haciendo un balance de fuerzas, se obtiene la ecuación que gobierna el desplazamiento del cono

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + Z_m \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) + K_B x(t) = F(t) \quad (3.6)$$

Las ecuaciones 3.1, 3.4, 3.5 y 3.6 describen el comportamiento de la bocina y dan lugar al diagrama de bloques, con $s=d/dt$, presentado en la figura 3.2

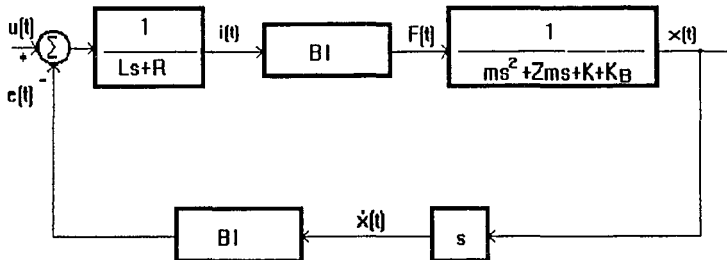


Fig 3.2 Diagrama de bloques de un altavoz de radiación directa

3.2 MODELO NO LINEAL DEL ALTAVOZ

Para señales de entrada pequeñas el altavoz se aproxima a un sistema lineal. Sin embargo, la generación de componentes de distorsión (armónicos, intermodulación) en los altavoces reales indican que el altavoz es un sistema no lineal. Para una potencia grande de entrada las amplitudes de los armónicos de distorsión se incrementan rápidamente y alcanzan el mismo orden de magnitud que la fundamental. Los componentes de distorsión reaccionan con la fundamental y causan efectos no lineales adicionales que no pueden explicarse ni predecirse por el modelo lineal de señal pequeña. Un modelo expandido no lineal es requerido para describir el comportamiento de altavoces sobre el rango total de su capacidad de manejo de potencia.

En el modelo no lineal algunos de los parámetros del modelo varían substancialmente si la excitación eléctrica es incrementada y produce excursiones grandes de la bobina. Los elementos que dependen de la excursión de la bobina son [9]:

$B_l(x)$ = Factor fuerza

$L(x)$ = Inductancia de la bobina

$K(x)$ = Rigidez mecánica de la suspensión

$K_B(x)$ = Rigidez mecánica del aire en el recinto

Excluyendo los efectos de histéresis, la dependencia de los parámetros no lineales en función de la excursión de la bobina puede ser descrita, aproximadamente, por series de potencias truncadas [9]:

$$B_l(x) = B_{l0} + B_{l1}x + B_{l2}x^2 \quad (3.7)$$

$$L(x) = L_0 + L_1x + L_2x^2 \quad (3.8)$$

$$K(x) = K_0 + K_1x + K_2x^2 \quad (3.9)$$

$$K_B(x) = K_{B0} + K_{B1}x + K_{B2}x^2 \quad (3.10)$$

Donde las constantes B_{l0} , L_0 , K_0 y K_{B0} modelan el comportamiento lineal. Las constantes que afectan a los términos de primer grado (B_{l1} , L_1 , K_1 y K_{B1}) especifican la asimetría responsable principalmente de la distorsión de segundo grado. Los coeficientes que afectan a los términos de segundo grado (B_{l2} , L_2 , K_2 y K_{B2}) especifican las no linealidades que producen las distorsiones de tercer grado.

Por otro lado, la variación de la inductancia por el movimiento en x crea una fuerza, F_{mag} . Para calcularla se parte de la expresión de la energía acumulada en un inductor, la cual está dada por:

$$E = \frac{1}{2} i^2 L \quad (3.11)$$

Considerando que la energía evaluada en un desplazamiento infinitesimal dx es:

$$dE = F_{mag} dx \quad (3.12)$$

Sustituyendo 3.11 en 3.12 y despejando F_{mag} se obtiene:

$$F_{\text{mag}}(i, x) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx} \quad (3.13)$$

Con las consideraciones mencionadas, el circuito del modelo no lineal queda como se ilustra en la figura 3.3

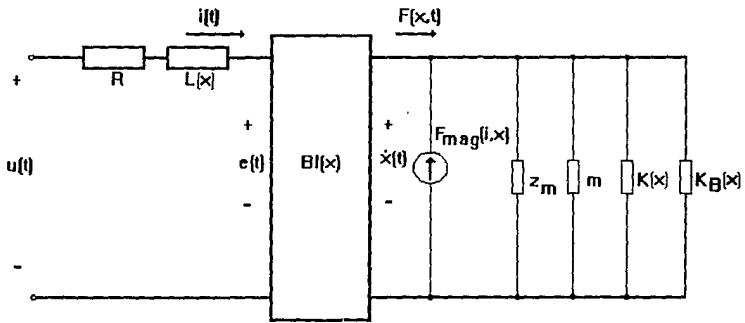


Fig 3.3 Circuito de parámetros concentrados no lineal.

Procediendo del circuito anterior, la siguiente relación de voltaje puede ser derivada:

$$u(t) = e(t) + Ri(t) + \frac{d[L(x)i(t)]}{dt} \quad (3.14)$$

Donde

$$e(t) = Bl(x) \frac{dx(t)}{dt} \quad (3.15)$$

Ahora $F(t)$ se expresa como una función del tiempo y del desplazamiento

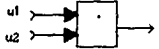
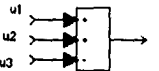


$$F(x, t) = B(x)i(t) \quad (3.16)$$

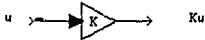
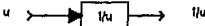
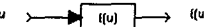
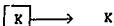
Haciendo un balance de fuerzas, se obtiene la siguiente ecuación, que describe el comportamiento del cono en el modelo no lineal.

$$F(x, t) + F_{mag}(i, x) = m \frac{d^2x(t)}{dt} + Z_m \frac{dx(t)}{dt} + K(x)x(t) + K_B(x)x(t) \quad (3.17)$$

3.3 IMPLANTACIÓN DE LOS MODELOS EN UNA COMPUTADORA DIGITAL

Para simular el comportamiento tanto del modelo lineal como del no lineal se utilizó el paquete de asistencia matemática para simulación de sistemas no lineales, Simulink de Math Works Inc.[15]. Su uso requiere la representación del sistema a simular en un diagrama de bloques, donde cada bloque puede representar operaciones y/o funciones matemáticas. A continuación se presenta una lista en que se describen los bloques de Simulink utilizados en este trabajo.

Bloques	Definición
	Producto
	Suma
	Derivador
	Integrador

Bloques	Definición
	Ganancia
	Divisor
	Función
	Constante

Para obtener la representación en diagrama de bloques del modelo no lineal del altavoz se uso una representación similar a la usada en computadoras analógicas. Para ello, se despejó di/dt y d^2x/dt^2 de las ecuaciones 3.14 a 3.17 obteniéndose las siguientes ecuaciones que son la base para formar el diagrama

$$\frac{di}{dt} = \frac{u - Ri - \frac{dL(x)}{dx} \frac{dx}{dt} i - \frac{Bl(x)}{dx}}{L(x)} \quad (3.18)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{Bl(x)i - Z_m \frac{dx}{dt} - K(x)x - K_B(x)x + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx}}{m} \quad (3.19)$$

Donde los bloques $L(x)$, $Bl(x)$, $K(x)$ y $K_B(x)$ evalúan las ecuaciones 3.7 a 3.10, y el bloque $f(u)$ evalúa la derivada $d[L(x)i(t)]/dt$, que es igual a

$$\frac{d[L(x)i(t)]}{dt} = \frac{dL(x)}{dx} \frac{dx}{dt} i(t) \quad (3.20)$$

El diagrama de bloques del modelo no lineal, usando la representación de Simulink se ilustra en la figura 3.4

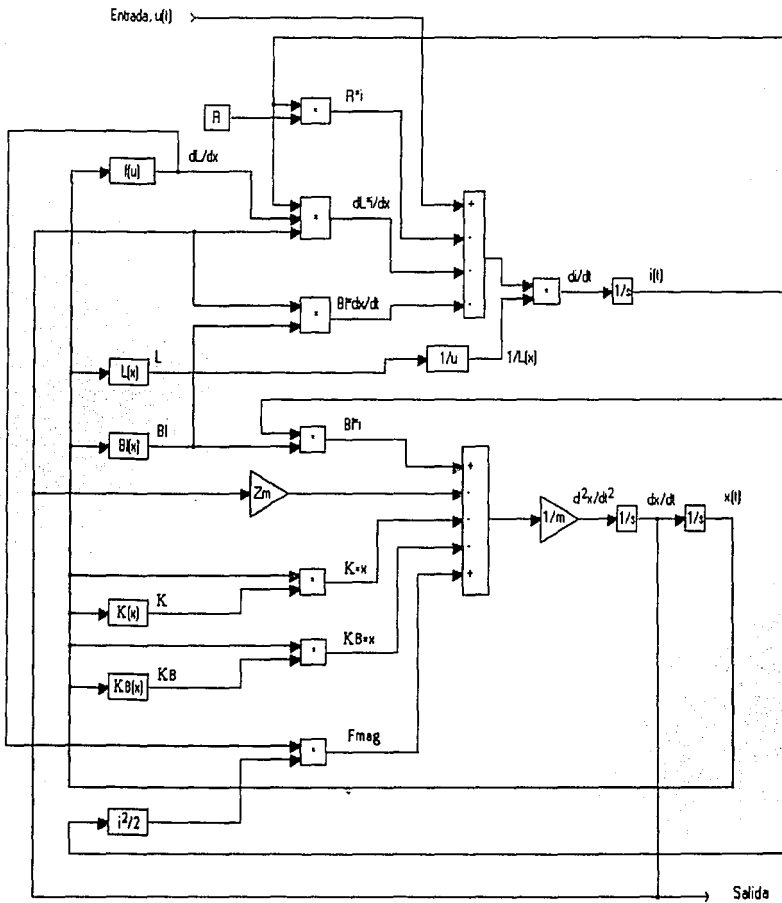


Fig 3.4 Diagrama de bloques del modelo no lineal, usando la representación de Simulink

Para la simulación del modelo lineal se utiliza el mismo diagrama de bloques de la fig 3.4, pero en los bloques función $L(x)$, $Bl(x)$, $K(x)$ y $K_B(x)$ se utilizan sólo los términos constantes o lineales.

3.4 SISTEMA ACÚSTICO

Como lo que se desea analizar en un sistema acústico es el comportamiento de la presión acústica radiada por el cono, fue necesario considerar el medio de transmisión de las ondas sonoras. Así, resulta el diagrama de bloques de la fig 3.5, que se define como sistema acústico.

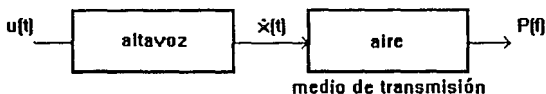


Fig 3.5 Diagrama de bloques del sistema acústico en lazo abierto

La magnitud de la presión sonora producida por el movimiento del cono puede calcularse a partir de la velocidad del mismo a una distancia r (en metros) como [3]:

$$P(r) = \frac{S \dot{x} f \rho}{r} \quad (3.21)$$

Donde:

P = Presión acústica, Pa

f = Frecuencia, Hz

S = Área proyectada del cono del altavoz, m^2

ρ = Densidad ambiente del aire, kg/m^3

El bloque del medio de transmisión de la figura 3.5 se realiza con base en la ecuación 3.20 de la forma siguiente: primero se obtiene el espectro en frecuencia de la velocidad del cono, aplicando la transformada rápida de Fourier. Posteriormente esta señal se multiplica por la densidad ambiente, por el área del cono, por la

frecuencia de todas las señales en el rango de frecuencia analizado (lo que corresponde a una recta con pendiente unitaria) y se divide entre la distancia r .

En la ecuación 3.21 se está despreciando el efecto Doppler de las velocidades relativas del cono del altavoz y de las ondas sonoras. Esta significación se considera razonable generalmente [6].

3.5 SIMULACIÓN DEL SISTEMA ACÚSTICO EN LAZO ABIERTO

Los valores de los parámetros del altavoz y del medio de transmisión usados en la simulación fueron tomados de [6 y 9] y corresponden a un altavoz para graves Phillips AD80603/W4. Los datos del medio de transmisión se obtuvieron de [6]. Todos estos datos se listan a continuación.

m	$= 0.019 \text{ kg}$
R	$= 3.2 \Omega$
Z_m	$= 1 \text{ N s m}^{-1}$
L_0	$= 0.0004 \text{ H}$
L_1	$= 0.02 \text{ H m}^{-1}$
L_2	$= -3.125 \text{ H m}^{-2}$
B_{l0}	$= 4.6 \text{ N A}^{-1}$
B_{l1}	$= 175 \text{ N A}^{-1} \text{ m}^{-1}$
B_{l2}	$= -0.0652 \text{ N A}^{-1} \text{ m}^{-2}$
K_0	$= 1\,000 \text{ N m}^{-1}$
K_1	$= -12\,500 \text{ N m}^{-2}$
K_2	$= -3\,125\,000 \text{ N m}^{-3}$
K_{B0}	$= 1\,500 \text{ N m}^{-1}$
K_{B1}	$= 87\,500 \text{ N m}^{-2}$
K_{B2}	$= 59\,375\,000 \text{ N m}^{-3}$
S	$= 0.020 \text{ m}^2$
r	$= 1 \text{ m}$
ρ	$= 1.18 \text{ kg m}^{-3}$

En el análisis de la distorsión por intermodulación, se utilizó como entrada al sistema acústico en lazo abierto la suma de dos señales senoidales de 40 Hz y 300 Hz, respectivamente. Ambas frecuencias se encuentran dentro de la gama de altavoces para graves. Las pruebas se realizaron con tres diferentes amplitudes de las señales de entrada, mismas que se denominan señal pequeña, señal media y señal grande. En estas pruebas se simula el sistema acústico tanto con el modelo del altavoz lineal como con el no lineal.

Para analizar el fenómeno de distorsión armónica se alimentó al sistema acústico con una señal senoidal de frecuencia fija (40 Hz), y con una amplitud que corresponde al caso de señal de entrada grande (16 Volts). En la simulación se utilizaron tanto el modelo lineal como el no lineal del altavoz.

Las señales de entrada utilizadas en las pruebas de distorsión por intermodulación son:

A) Señal pequeña: $u_1(t) = 0.25 \cos(80 \pi t) + 0.25 \cos(600 \pi t)$

B) Señal media: $u_2(t) = 4 \cos(80 \pi t) + 4 \cos(600 \pi t)$

C) Señal grande: $u_3(t) = 8 \cos(80 \pi t) + 8 \cos(600 \pi t)$

Para la señal de entrada grande, $u_3(t)$, se utilizaron los valores, tanto de amplitud como de frecuencia reportados en [10]. Esto con el fin de comparar posteriormente los resultados obtenidos con los de dicho artículo.

La señal de entrada usada en la prueba de distorsión armónica es:

Señal grande: $u_4(t) = 16 \cos(80 \pi t)$

CASO DE DISTORSIÓN POR INTERMODULACIÓN

A continuación se presentan las gráficas de los resultados de las diferentes simulaciones, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. Estas incluyen la señal de entrada en el dominio del tiempo, la velocidad del cono en el

dominio del tiempo para el modelo lineal y el no lineal, y el nivel de presión sonora en el dominio de la frecuencia para los modelos del altavoz lineal y no lineal. Se muestran estas gráficas para los casos de señal de entrada pequeña media y grande

Al final de la presentación de los resultados del caso de distorsión por intermodulación se hacen algunos comentarios de estos.

A) CASO DE SEÑAL PEQUEÑA

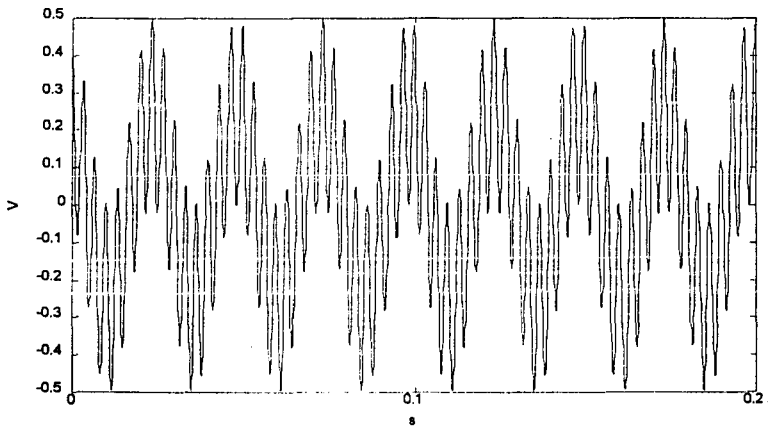


Fig 3.6 Entrada de señal pequeña $u_1(t)$

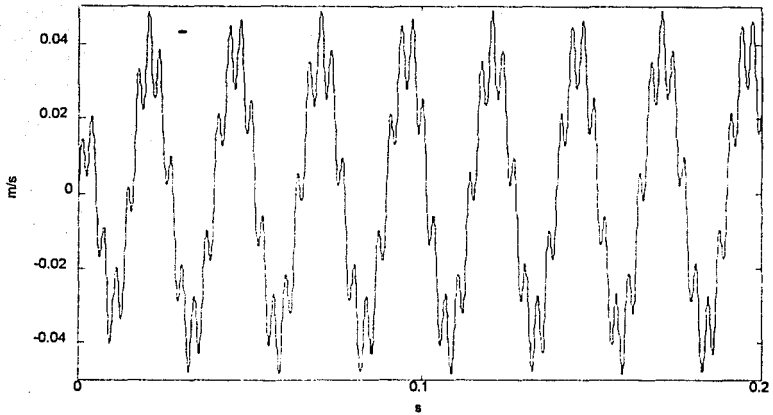


Fig 3.7 Velocidad del cono para el modelo lineal en señal pequeña

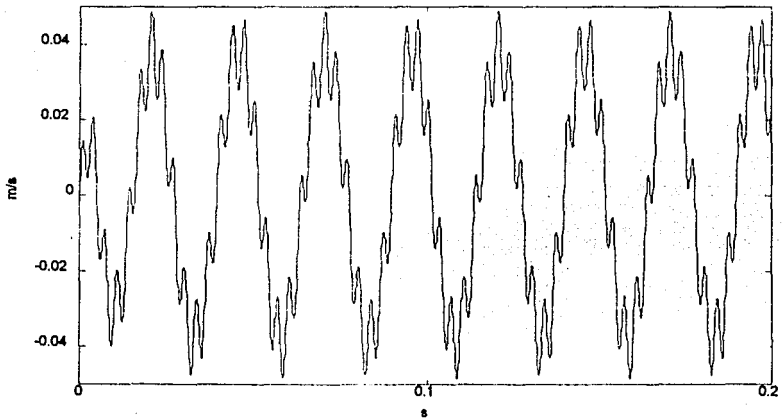


Fig 3.8 Velocidad del cono para el modelo no lineal en señal pequeña

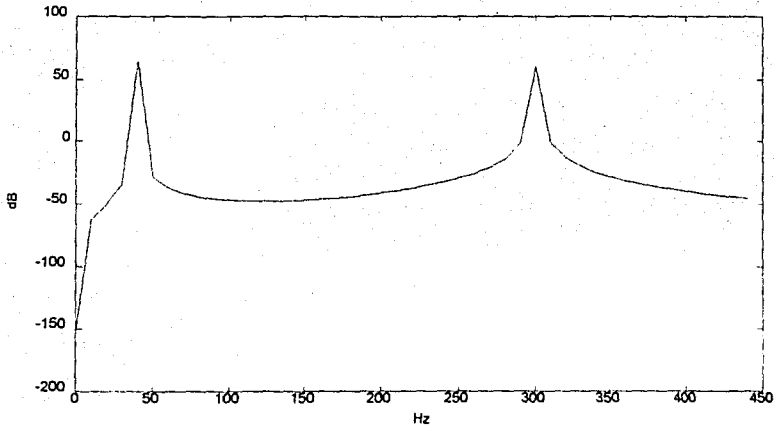


Fig 3.9 Nivel de presión sonora para el modelo lineal en señal pequeña

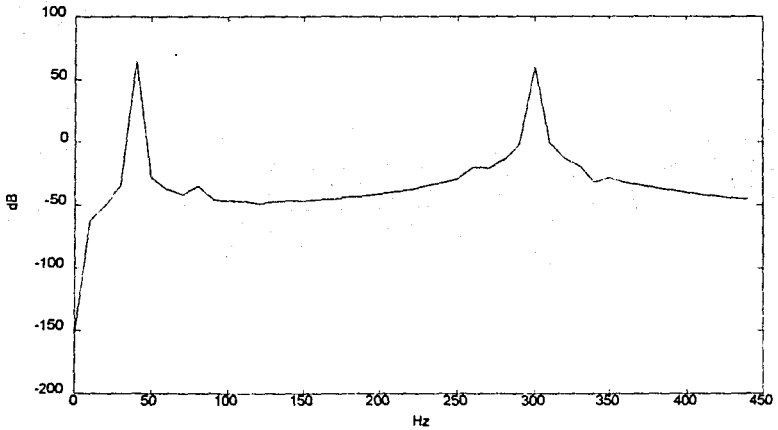


Fig 3.10 Nivel de presión sonora para el modelo no lineal en señal pequeña

B) CASO DE SEÑAL MEDIA

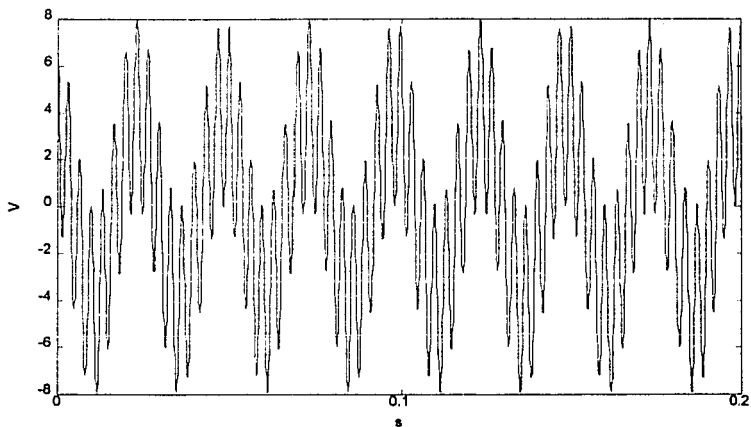


Fig 3.11 Entrada de señal media, $u_2(t)$

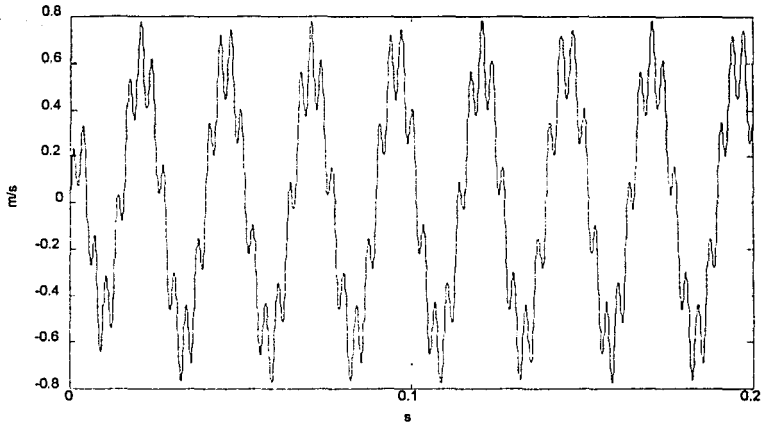


Fig 3.12 Velocidad del cono para el modelo lineal en señal media

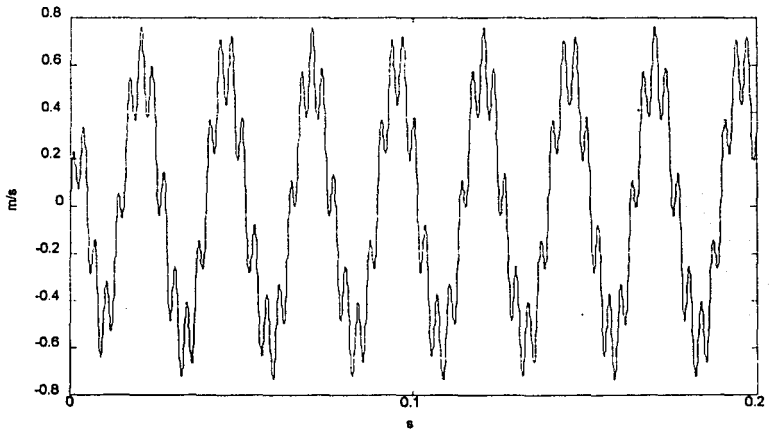


Fig 3.13 Velocidad del cono para el modelo no lineal en señal media

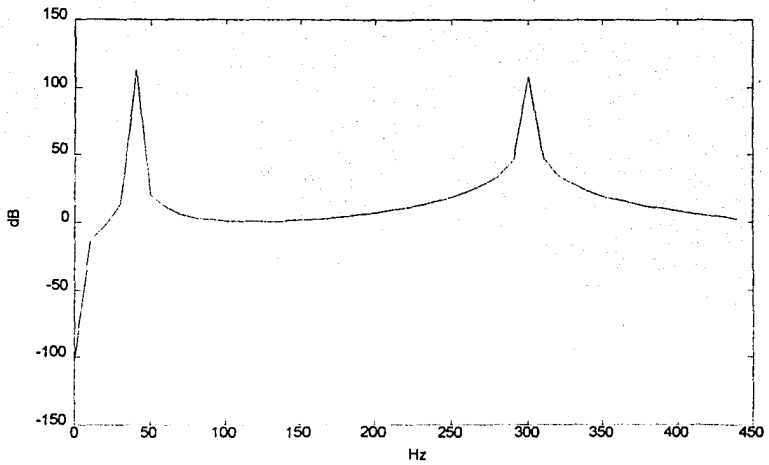


Fig 3.14 Nivel de presión sonora para el modelo lineal en señal media

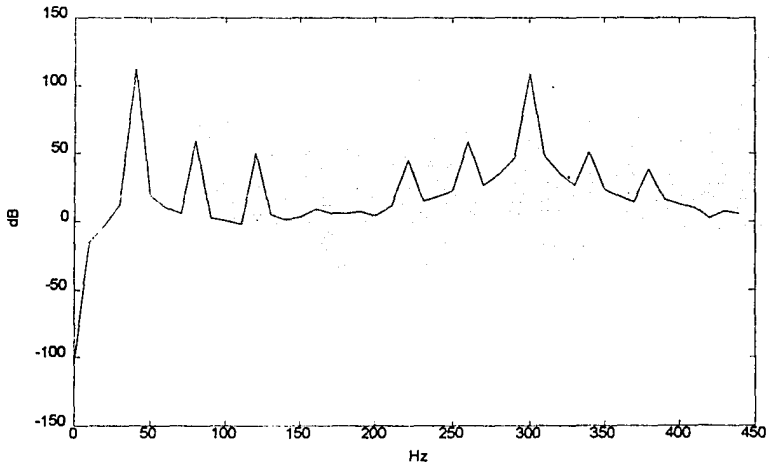


Fig 13.5 Nivel de presión sonora para el modelo no lineal en señal media

C) CASO DE SEÑAL GRANDE

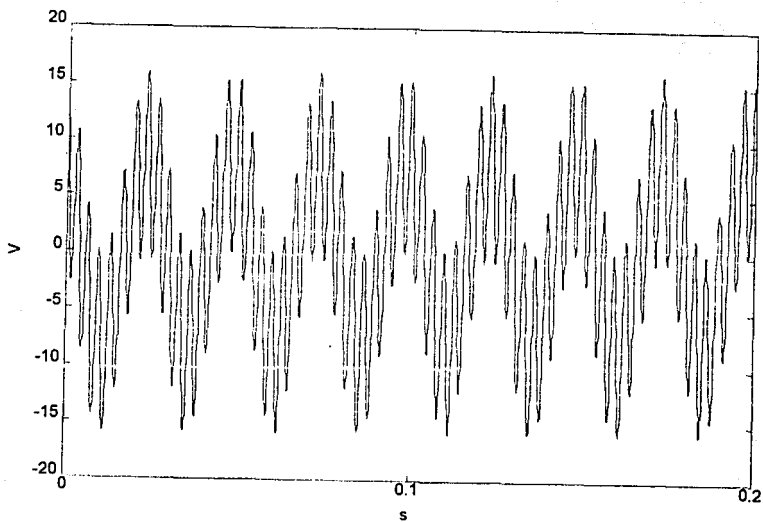


Fig 3.16 Entrada de señal grande, $u_3(t)$

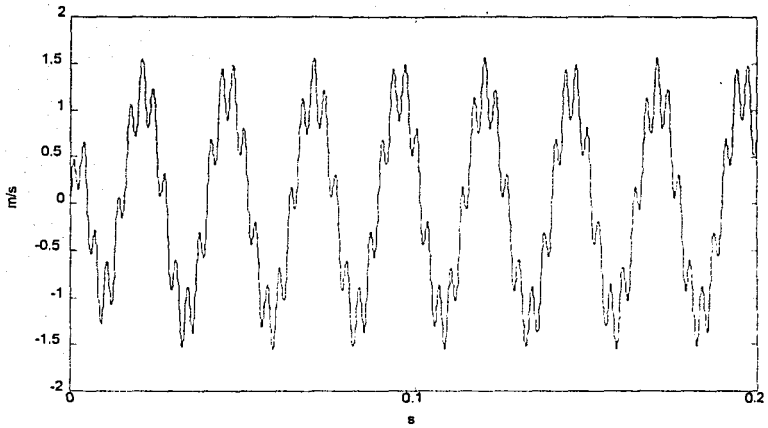


Fig 3.17 Velocidad del cono para el modelo lineal en señal grande

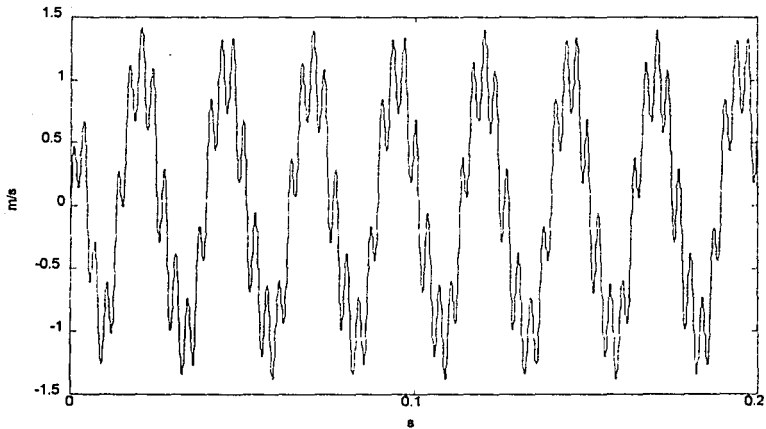


Fig 3.18 Velocidad del cono para el modelo no lineal en señal grande

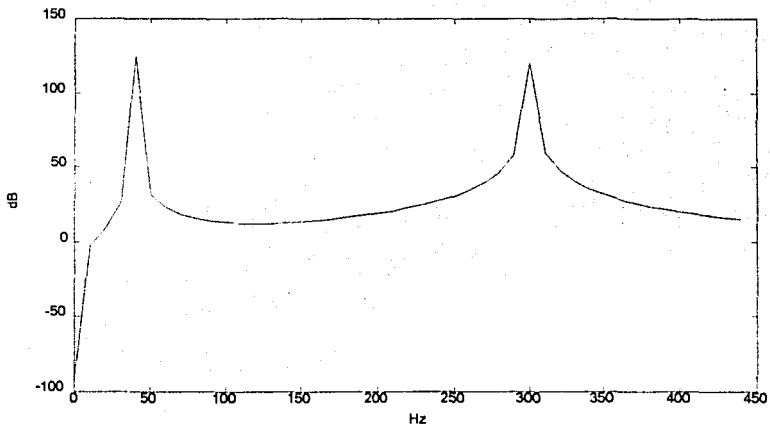


Fig 3.19 Nivel de presión sonora para el modelo lineal en señal grande

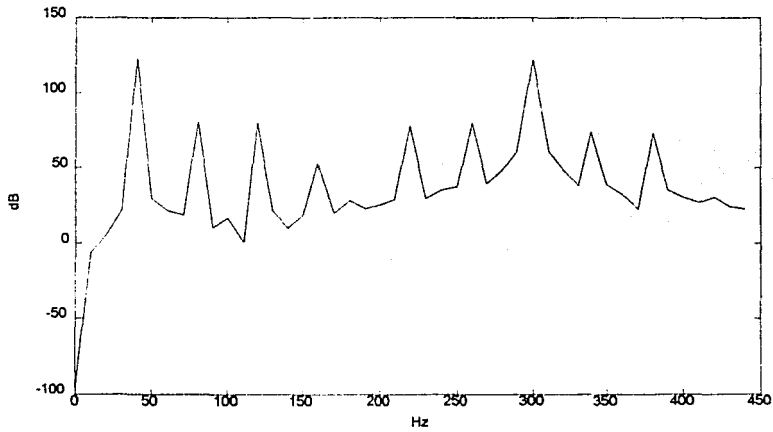


Fig 3.20 Nivel de presión sonora para el modelo no lineal en señal grande

Para señal de entrada pequeña (fig 3.6), los modelos lineal y no lineal presentan un desempeño similar, como se observa al comparar las figuras 3.7 y 3.9 (modelo lineal), contra la figura 3.8 y 3.10 (modelo no lineal). Se aprecia que los efectos de distorsión mostrados por el modelo no lineal son relativamente pequeños.

Cuando se incrementa la amplitud de la señal de entrada (fig 3.11, entrada de señal media) el modelo lineal muestra un comportamiento libre de distorsión, figuras 3.12 y 3.14, mientras que el modelo no lineal empieza a mostrar los efectos de distorsión figuras 3.13 y 3.15.

Con la señal de entrada grande (fig 3.16), las componentes de distorsión se incrementan rápidamente en el modelo no lineal (fig 3.20), en completa discordancia con el modelo lineal (fig 3.19) que aparece sin cambio alguno.

Como era de esperarse, el modelo no lineal presenta un fuerte efecto de distorsión por intermodulación, cuando la amplitud de las señales de entrada es grande, alejándose por completo del comportamiento del modelo lineal; y en excursiones pequeñas del cono ambos modelos (lineal y no lineal), se comportan de modo muy semejante.

CASO DE DISTORSIÓN ARMÓNICA

En seguida se muestran los resultados gráficos del caso de distorsión armónica ; se presentan la gráfica en el dominio del tiempo de la señal de entrada de la velocidad del cono para el modelo lineal y para el no lineal. Asimismo, se incluyen las gráficas en el dominio de la frecuencia de los niveles de presión sonora para los modelos lineal y no lineal. Al final de la presentación de las gráficas se hace un breve comentario de las mismas.

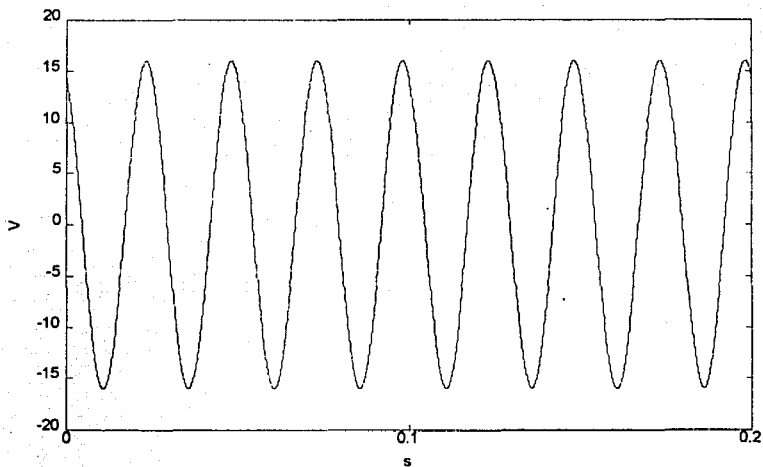


Fig 3.21 Entrada de señal grande, $u_4(t)$

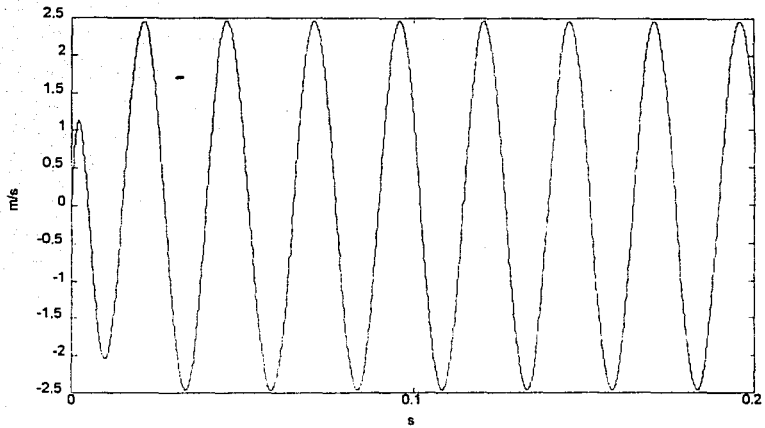


Fig 3.22 Velocidad del cono modelo lineal para entrada grande

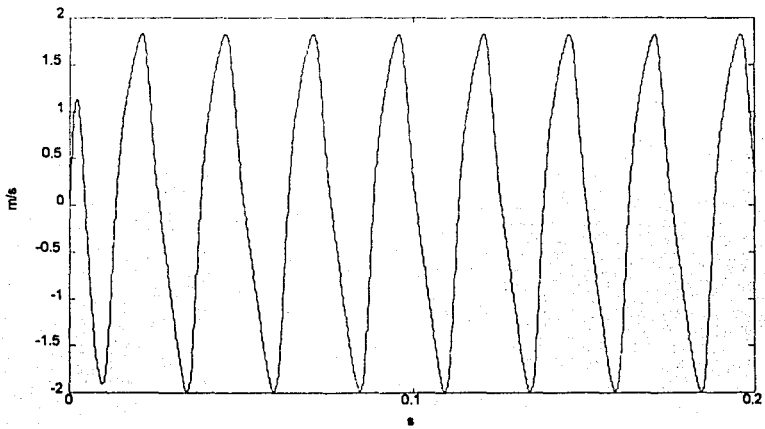


Fig 3.23 Velocidad del cono modelo no lineal entrada grande

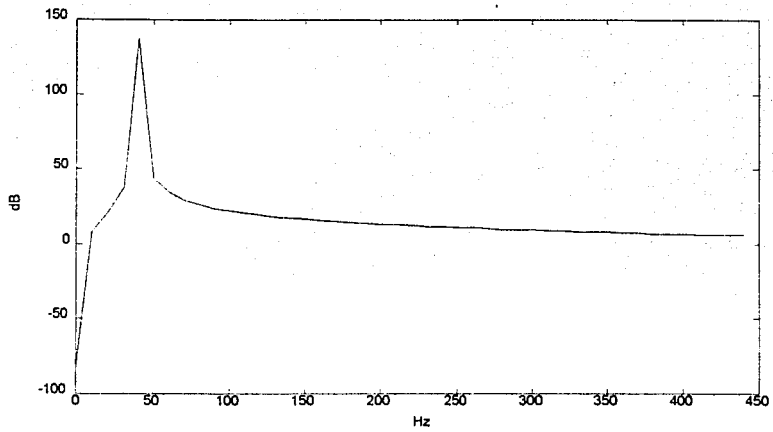


Fig 3.24 Nivel de presión sonora para el modelo lineal en entrada grande

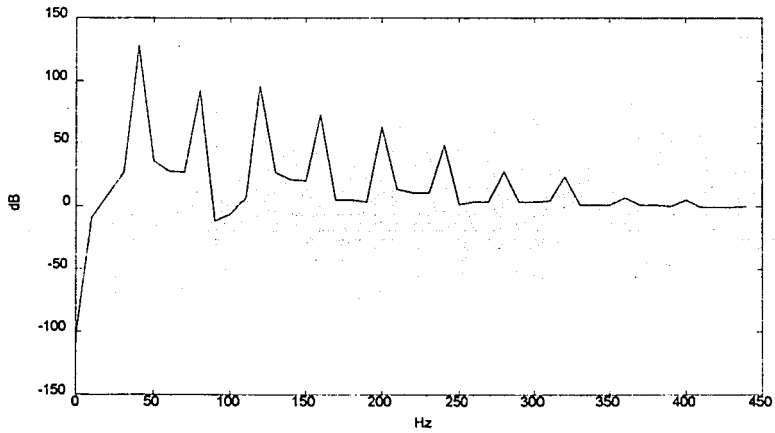


Fig 3.25 Nivel de presión sonora para el modelo no lineal en señal grande

Como puede observarse de la figura 3.25 los componentes de distorsión presentes en señal grande son muy importantes y efectivamente aparecen como armónicos o múltiplos enteros de la fundamental.

CORRECCIÓN DE LA DISTORSIÓN

4.1 APLICACIÓN DEL CONTROL RETROALIMENTADO

Como se mencionó en el capítulo anterior, las variaciones de los parámetros de un altavoz son responsables de la aparición de componentes de distorsión en la señal acústica radiada. La mayor parte de los métodos que se han propuesto para solucionar este problema (filtros, gabinetes especiales, etc [6, 7, 10, 12]) son técnicas de control en lazo abierto. Ahora bien, se sabe que la ventaja principal de un sistema de control de lazo cerrado, esto es, aquel que tiende a mantener una relación preestablecida entre la salida y una entrada de referencia, comparándolas y utilizando la diferencia como medio de control, es que el uso de la retroalimentación hace que la respuesta del sistema sea relativamente insensible a perturbaciones externas y a variaciones internas de los parámetros del sistema. Debido a esta característica se sabe que la retroalimentación suaviza las no linealidades de los sistemas [5]. De hecho la retroalimentación se ha utilizado con éxito en la corrección de la distorsión armónica y en el mejoramiento de la respuesta en frecuencia (respuesta más plana y mayor ancho de banda) [2] y [4].

El diagrama de bloques de un sistema de control retroalimentado se muestra en la figura 4.1

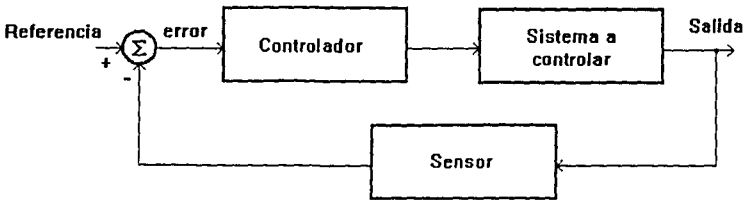


Fig 4.1 Sistema de control retroalimentado

Considerando las ventajas antes mencionadas se propone que el uso de un control retroalimentado puede disminuir los efectos de distorsión por intermodulación causados por excursiones grandes de la bocina del cono. Para verificar esto se aplicará un control realimentado al sistema acústico descrito en la sección 3.5. El diseño del controlador se hará con base en el modelo lineal del altavoz, mientras que su desempeño (en este caso, su habilidad para corregir las distorsiones) se evaluará con base en simulaciones del modelo no lineal.

Con los valores del sistema acústico descrito en la sección 3.5, el esquema de bloques del sistema acústico a controlar queda como se ilustra en la figura 4.2.

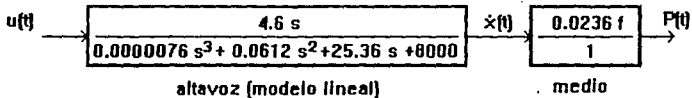


Fig 4.2 Diagrama de bloques del sistema acústico.

4.2 SELECCIÓN DE LA VARIABLE DE RETROALIMENTACIÓN

La información que se encuentra en discos y cintas está relacionada directamente con la presión acústica, ya que los micrófonos utilizados para registrar sonido convierten la presión acústica en señales eléctricas, las cuales son almacenadas después en forma analógica o digital. Así las señales disponibles, como entradas del sistema acústico, deben considerarse referencias de presión acústica. Por tanto, para cerrar el lazo de control la señal a retroalimentar debería ser la presión acústica

producida por el sistema. Lo anterior puede lograrse utilizando como sensor un micrófono de gradiente de presión, el cual entrega un voltaje proporcional a la presión acústica. Sin embargo, un sensor de este tipo sería poco atractivo en aplicaciones prácticas, ya que añadiría componentes no lineales al sistema (de la misma naturaleza que las del altavoz) y su instalación sería engorrosa para el usuario. Por ello, se propone utilizar un sensor de la velocidad del desplazamiento del cono, y a partir de esta variable obtener un valor de tensión que corresponda a un valor medio de presión acústica.

Para determinar el valor de dicha constante se simuló el sistema acústico con el modelo lineal del altavoz en lazo abierto con una señal de entrada de $8 \text{ V}_{\text{pico}}$ (que corresponde a un punto de operación nominal o de señal media) figura 4.2 y se obtuvo la respuesta de la presión acústica que se ilustra en la figura 4.3. Se observa de la fig 4.3 que el cociente de la amplitud de la señal de entrada entre la amplitud de la presión acústica en estado estacionario, resultó de 10.2 V s m^{-1} . Se consideró apropiado utilizar éste valor como el del sensor para el control retroalimentado.

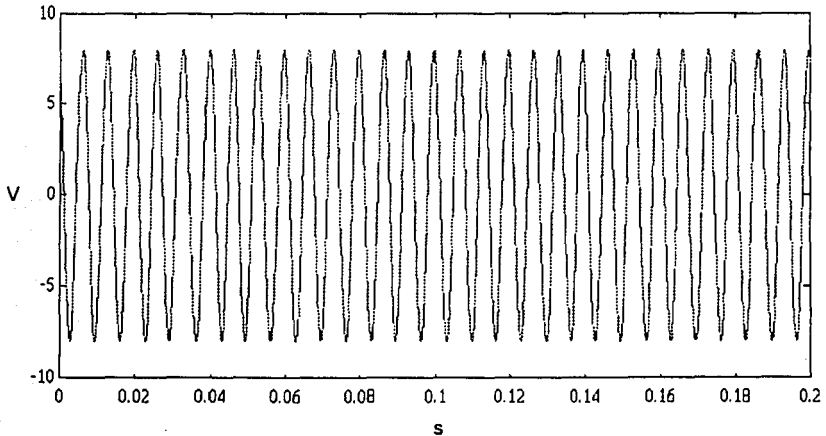


Fig 4.2 Señal de entrada correspondiente a un punto de operación medio.

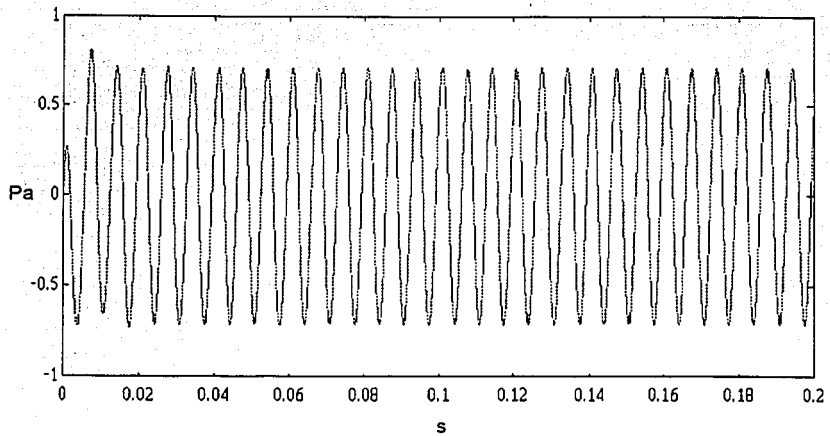


Fig 4.3 Presión acústica del altavoz para un punto de operación de señal media

Así, el modelo del sensor será una ganancia de proporcionalidad entre la velocidad del cono y una tensión eléctrica, como se muestra en la figura 4.4

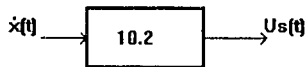


Fig 4.4 Diagrama del sensor

Es obvio que el uso del sensor propuesto, al ser éste un valor fijo calculado en un punto de operación del sistema acústico, es poco robusto. Sin embargo, se decidió utilizarlo debido al gran atractivo de la simplicidad de realización de dicho esquema.

Cabe mencionar que un sensor de este tipo es factible de ser construido a partir de dispositivos inductivos de desplazamiento.

Con el uso del sensor mencionado, el circuito de lazo cerrado queda como se aprecia en la figura 4.5.

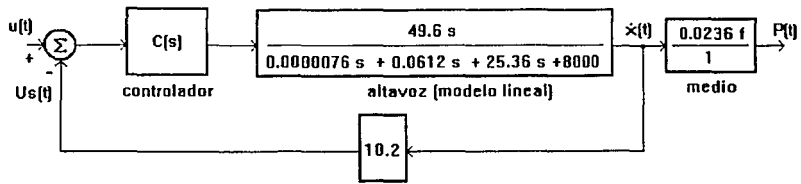


Fig 4.5 Sistema de control de lazo cerrado

4.3 DISEÑO DEL CONTROLADOR

Ya definido el esquema de control, el siguiente paso es seleccionar la estructura del controlador. Como una primera aproximación, se propone un control de tipo PID. La función de transferencia de un controlador PID puede representarse, en forma general, como

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad 4.1$$

donde

K_p = Ganancia proporcional

T_I = Tiempo integral

T_D = Tiempo derivativo

La función representada en un diagrama de bloques tipo Simulink de la transferencia de la ec 4.1 está dada en la figura 4.6.

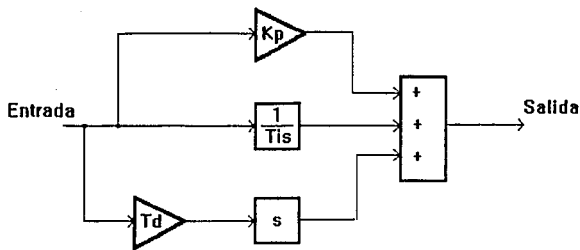


Fig 4.6 Diagrama esquemático del controlador PID

4.4 SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR

El proceso de ajuste de los valores de las constantes del controlador, para que cumpla con las especificaciones de operación, se conoce como sintonización del controlador. Los métodos más usados para sintonización de controladores PID son los métodos de ajuste de la curva de reacción y estabilidad crítica, conocidos como de Ziegler-Nichols. En el método de ajuste de la curva de reacción se obtiene la respuesta de la planta a controlar ante una entrada escalón, la curva resultante deberá tener forma de s , de otra manera no se puede aplicar éste método. En la figura 4.7 se muestra la respuesta del altavoz ante una entrada escalón, se observa que ésta no tiene forma de s , por lo que este método no puede aplicarse y por lo tanto se recurre al segundo método.

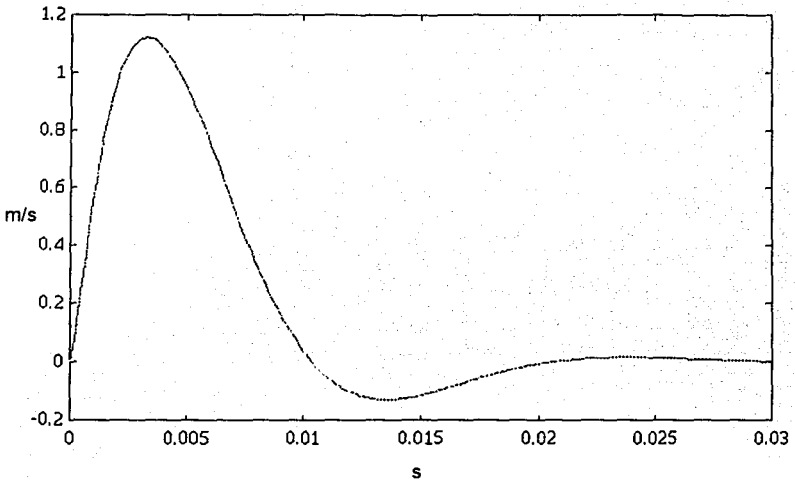


Fig 4.7 Velocidad del cono del altavoz ante una entrada escalón

El segundo método de sintonización, o de estabilidad crítica, está basado en la evaluación del sistema en el límite de estabilidad. Para ello se construye un control retroalimentado proporcional como el mostrado en la fig 4.8 y se incrementa la ganancia del controlador hasta que el sistema presente oscilaciones sostenidas

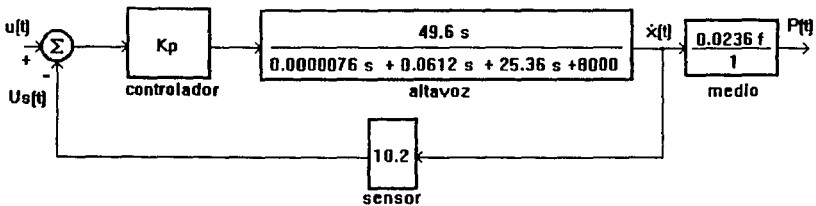


Fig 4.8 Sistema de lazo cerrado con control proporcional

De acuerdo a lo anterior se obtiene la representación en simulink del sistema acústico en lazo cerrado, mostrado en la figura 4.9

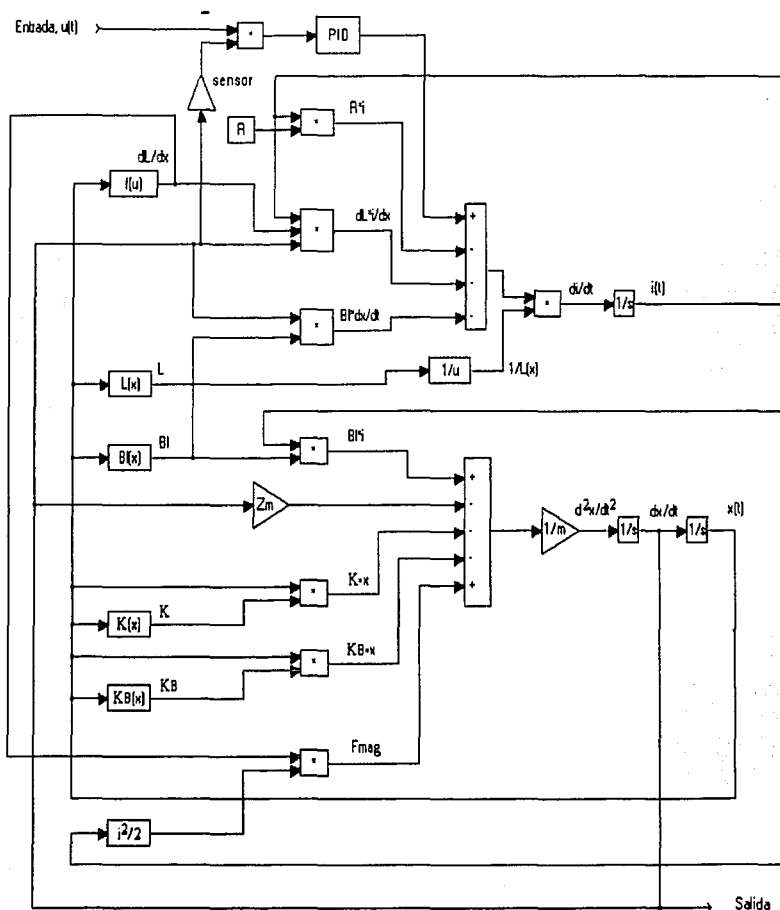


Fig 4.9 Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado, usando la representación de Simulink

Para poder establecer el valor de K_p para el cual el altavoz presenta oscilaciones sostenidas, se obtiene la función de transferencia de lazo cerrado de la entrada a la velocidad del cono,

$$\frac{\dot{X}(s)}{U(s)} = \frac{42.96 K_p s}{0.0000076 s^3 + 0.0612 s^2 + (25.36 + 46.92 K_p) s + 8000} \quad (4.2)$$

Se puede obtener, de forma analítica, el valor de K_p para el cual el sistema es inestable aplicando el criterio de estabilidad de Routh,

s^3	0.0000076	25.36 + 46.92 K_p
s^2	0.612	8000
s^1	(15.52 + 28.715 K_p) - 0.061	
	0.612	
s^0	8000	

Se observa en el arreglo de Routh que los coeficientes de la primer columna son positivos para todos los valores positivos de K_p . Por lo tanto, el sistema de lazo cerrado no presentará oscilaciones sostenidas. Así, el segundo método tampoco se aplica.

Como no fue posible usar los métodos de Ziegler-Nichols, se decidió proceder de la siguiente manera para ajustar los valores del controlador, se analizó el lugar geométrico de las raíces del sistema lineal en lazo cerrado para diferentes combinaciones de K_p , T_i y T_d , buscando que las raíces estuvieran colocadas de tal manera que representaran un sistema dinámico con un desempeño adecuado (sobrepaso pequeño, rápida respuesta, etc.) luego se probaron dichos valores del controlador en el sistema en lazo cerrado con el modelo no lineal, estas dos actividades se realizaron de manera iterativa hasta obtener un desempeño del sistema no lineal que se consideró satisfactorio.

De hecho se probaron también diferentes combinaciones del controlador, se observó que el uso de un control puramente proporcional era insuficiente para obtener un buen desempeño. La acción integrativa fue la que resultó más relevante. Finalmente, se llegó a la conclusión de que el mejor desempeño se lograba con la combinación de las tres acciones.

Los valores del controlador con los cuales se encontró mejor desempeño son:

$$K_p = 6.36$$

$$T_i = 0.00035$$

$$T_d = 0.0006$$

Y las raíces en lazo cerrado del sistema lineal que generaron están en:

$$-5625.167 + j 2293.597$$

$$-5625.167 - j 2293.597$$

$$-506.5081$$

4.5 SIMULACIÓN DEL SISTEMA ACÚSTICO EN LAZO CERRADO

A continuación se presentan las gráficas del sistema en lazo cerrado correspondientes a los casos de corrección de la distorsión por intermodulación, primero y armónica después.

CORRECCIÓN DE LA DISTORSIÓN POR INTERMODULACIÓN

Los resultados de la corrección de la distorsión por intermodulación se presenta para los casos de señal pequeña, media y grande. En cada caso se muestran la velocidad del cono en el tiempo y el nivel de presión en función de la frecuencia. En todos los casos se usa el modelo no lineal del altavoz.

CASO A) SEÑAL PEQUEÑA

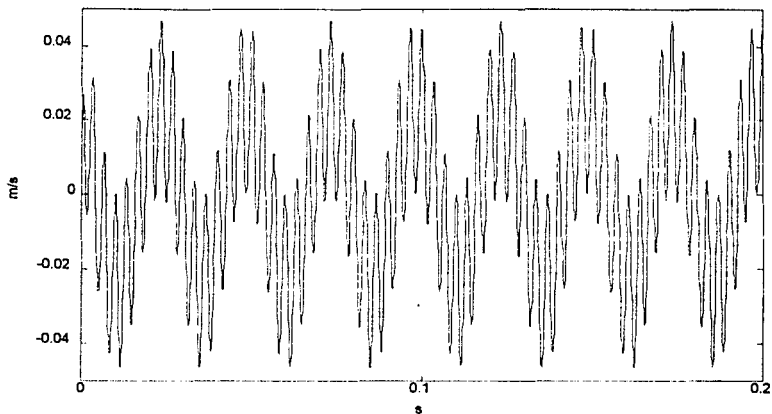


Fig 4.10 Velocidad del cono en lazo cerrado para entrada pequeña, $u_1(t)$.

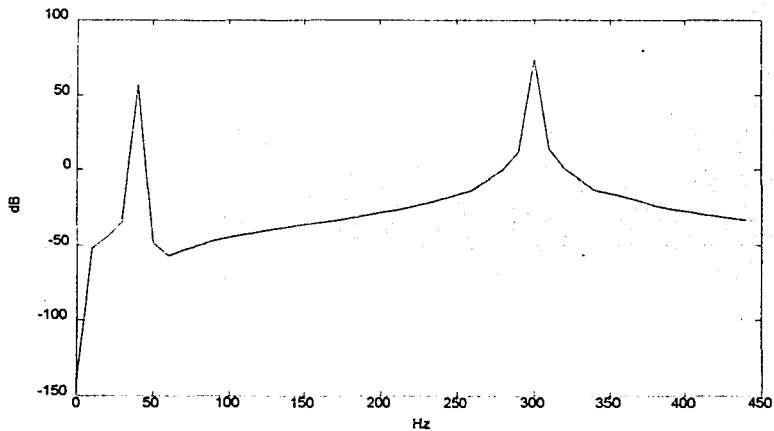


Fig 4.11 Nivel de presión sonar en lazo cerrado para entrada pequeña

CASO B) SEÑAL MEDIA

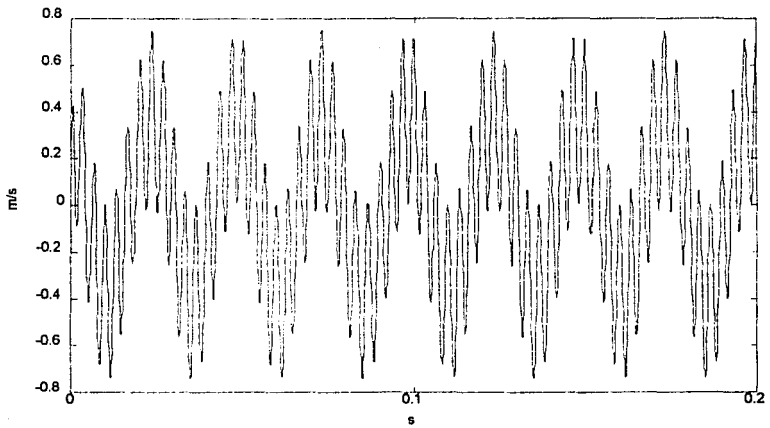


Fig 4.12 Velocidad del cono en lazo cerrado para entrada media, $u_2(t)$.

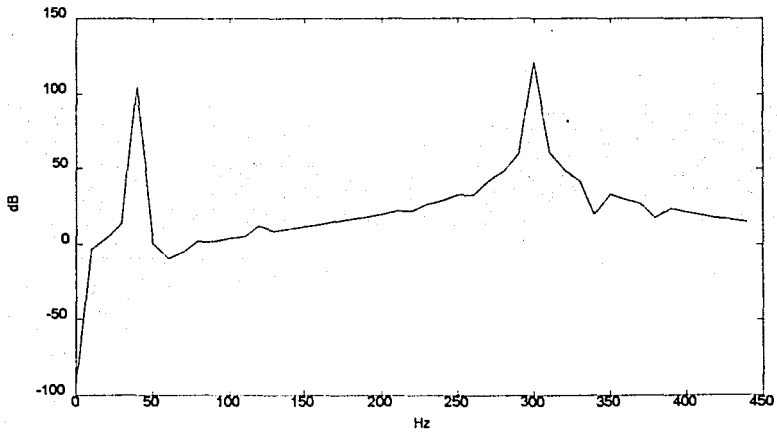


Fig 4.13 Nivel de presión sonora en lazo cerrado para señal media

CASO C) SEÑAL GRANDE

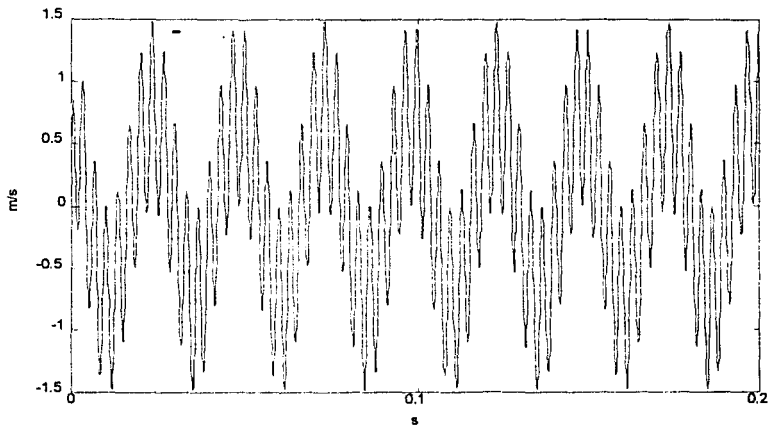


Fig 3.14 Velocidad del cono en lazo cerrado para entrada grande, $u_3(t)$.

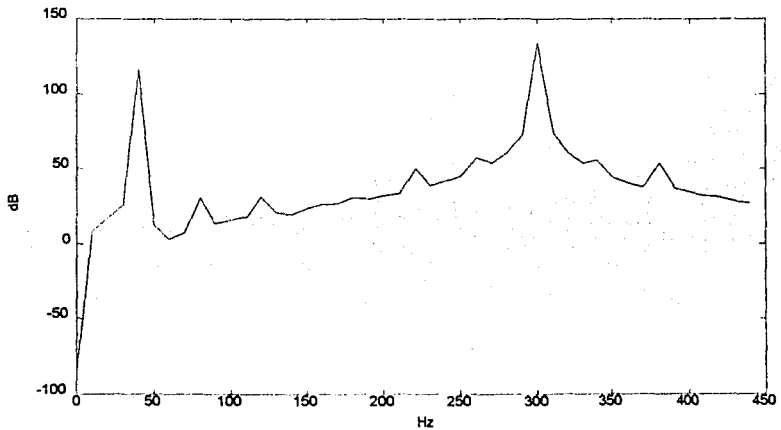


Fig 3.15 Nivel de presión sonora en lazo cerrado para entrada grande

Como puede observarse la retroalimentación atenúa efectivamente los componentes de distorsión por intermodulación. Esto se nota claramente al comparar el nivel de presión sonora para entrada grande en lazo abierto (figura 3.20), contra la gráfica correspondiente en lazo cerrado (fig 4.15). Asimismo puede apreciarse el gran parecido que guarda la velocidad del cono del sistema retroalimentado con la señal de entrada

En el capítulo 5 se hace un análisis cuantitativo para evaluar los resultados de la retroalimentación.

No se incluyó en las simulaciones los efectos de saturación del amplificador, debido a que estos pueden variar mucho en cada amplificador comercial, y no se tienen datos de valores típicos. Sin embargo, la señal del controlador para el caso de señal grande (figura 4.16) muestra que los valores del amplificador con retroalimentación están en valor que se considera razonables para un amplificador comercial.

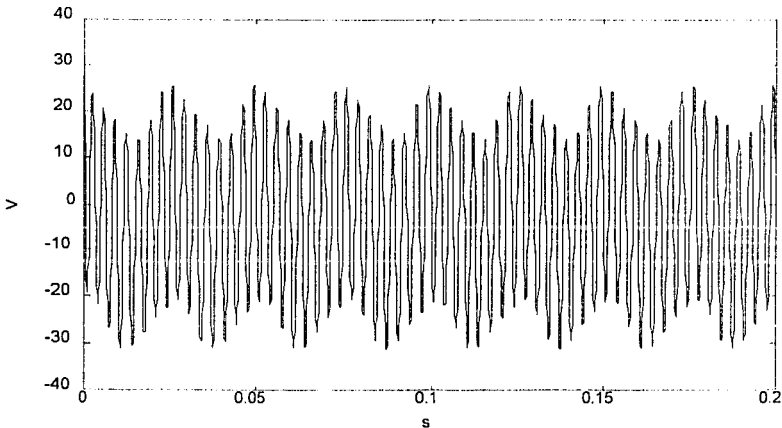


Fig 4.16 Salida del controlador PID, para señal de entrada grande

CORRECCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA

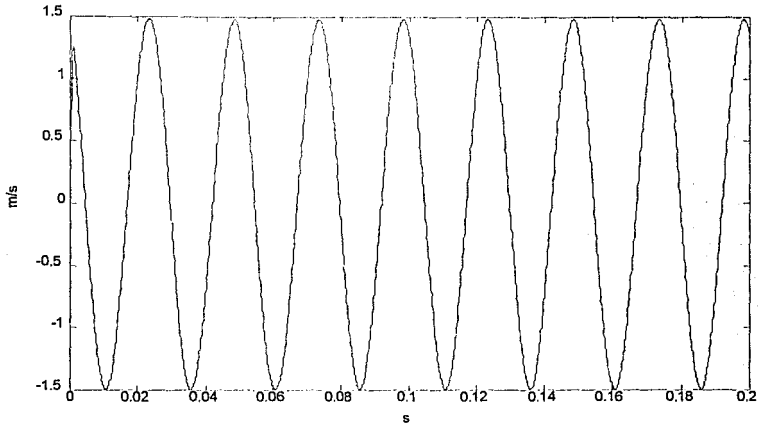


Fig 4.17 Velocidad del cono en lazo cerrado para entrada grande, $u_4(t)$.

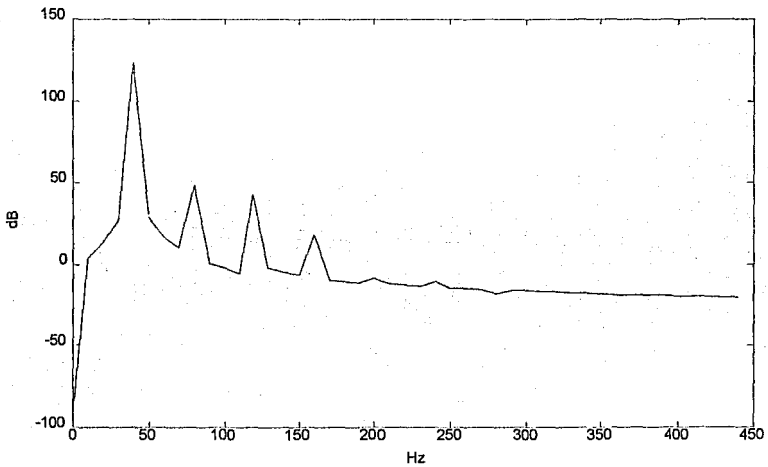


Fig 4.18 Nivel de presión sonora en lazo cerrado para entrada grande (distorsión armónica).

CONCLUSIONES

Para evaluar los resultados obtenidos en este trabajo, se decidió compararlos con los reportados por Klippel, 1992 [10]. Dicho autor propone, para corregir la distorsión por intermodulación, el uso de un filtro no lineal cuya característica principal es que utiliza una sintonización o aprendizaje inicial en un esquema realimentado. Una vez que el filtro se ha sintonizado se le deja funcionando en lazo abierto. Este filtro, llamado filtro espejo (*Mirror filter*), representa el estado del arte en la corrección de la distorsión por intermodulación, al menos hasta el inicio de este trabajo. Cabe mencionar que en el caso del trabajo de Klippel [10] los resultados son experimentales y que no reportan las condiciones del medio de transmisión.

En primer lugar, con el objetivo de evaluar la técnica de simulación usada, se comparan los niveles de presión sonora obtenidos en este trabajo con los reportados en [6] para las mismas condiciones; esto es, el sistema acústico sin corrección y bajo señal de entrada grande. En ambos casos se utiliza el mismo altavoz (cuyos datos se anotan en el capítulo 3) y la misma señal de entrada (que es la utilizada en el capítulo 3 para el análisis de distorsión por intermodulación bajo señal grande, $u_3(t)$). El nivel de presión sonora que se reporta en [10] se ilustra en la fig. 5.1. El nivel que se reporta en este trabajo y que se muestra en la figura 3.20 se repite aquí para facilitar el análisis (figura 5.2). Al comparar las gráficas mencionadas se observa una aceptable semejanza cualitativa del fenómeno de distorsión por intermodulación en lo que se refiere a la amplitud de las frecuencias fundamentales así como al valor de frecuencia en el que se ubican las componentes de distorsión y sus magnitudes respectivas.

En la tabla 5.1 se muestra el cociente de cada componente de distorsión contra cada una de las fundamentales, para el caso del resultado de la referencia 10 y para el de los obtenidos en el capítulo 3. Se obtiene en promedio una variación del 20% entre ambos resultados.

SISTEMA ACÚSTICO SIN CORRECCIÓN DE LA REF 10	SISTEMA ACÚSTICO SIN CORRECCIÓN DEL CAP. 3	DIFERENCIA
d1/f1 = 91.4 %	d1/f1 = 67.2 %	24.2 %
d2/f1 = 85.9 %	d2/f1 = 67.2 %	18.7 %
d3/f1 = 68.7 %	d3/f1 = 45.9 %	22.9 %
d4/f1 = 71.8 %	d4/f1 = 65.5 %	6.30 %
d5/f1 = 82.0 %	d5/f1 = 67.2 %	14.8 %
d6/f1 = 82.0 %	d6/f1 = 62.2 %	19.8 %
d7/f1 = 67.9 %	d7/f1 = 62.2 %	5.70 %
d1/f2 = 92.8 %	d1/f2 = 67.2 %	25.6 %
d2/f2 = 87.3 %	d2/f2 = 67.2 %	20.1 %
d3/f2 = 69.8 %	d3/f2 = 45.9 %	23.9 %
d4/f2 = 73.0 %	d4/f2 = 65.5 %	7.50 %
d5/f2 = 83.3 %	d5/f2 = 67.2 %	16.1 %
d6/f2 = 83.3 %	d6/f2 = 62.2 %	21.1 %

Tabla 5.1 Componentes de distorsión

Ahora bien, con los resultados obtenidos en el capítulo 3, quedó claro que el altavoz en señal pequeña presenta poca distorsión y que su comportamiento es muy semejante al del modelo lineal, mientras que en señal grande el comportamiento del altavoz sólo puede modelarse de forma no lineal. Con los resultados encontrados en el capítulo 4 se pudo comprobar que el altavoz es un sistema susceptible de ser mejorado, en lo que toca a la distorsión por intermodulación, utilizando técnicas de control retroalimentado, ya que se observó una notable disminución de dichas componentes de distorsión en todos los casos (señal pequeña, mediana y grande).

Para comparar la técnica de retroalimentación y la del filtro espejo en la reducción de distorsión, se muestran los resultados gráficos de la corrección aplicando el filtro espejo (en la figura 5.3 que presenta la presión sonora en el tiempo y la frecuencia [10]) y la gráfica de la corrección que se logra aplicando la retroalimentación, ver fig. 5.4; bajo las mismas condiciones de la señal de entrada y para el mismo altavoz. La señal de entrada utilizada corresponde al caso de señal grande en el análisis de

distorsión por intermodulación del capítulo 4 (la gráfica de la fig. 5.4 es la misma de la fig. 4.15 que se reproduce de nuevo para facilitar la comparación de las dos técnicas).

En la tabla 5.2, se hace un análisis cuantitativo del desempeño de las dos técnicas de corrección, se aprecia en dicha tabla que para el caso del filtro espejo las componentes de distorsión se reducen en promedio un 14.03%, mientras que con el controlador PID la reducción es, en promedio, de 42.3%. Aparentemente, los resultados que se obtienen con la retroalimentación son mucho mejores que los que se obtienen con el filtro espejo; no obstante, es necesario tomar dichos resultados con cierta reserva, ya que estos son solo teóricos y no han tomado en cuenta algunos efectos como el de saturación, efecto Doppler, etc. Sin embargo, un logro tan bueno motiva intentar la construcción de un prototipo para validar experimentalmente lo aquí presentado.

FILTRO ESPEJO	CORRECCIÓN	RETROALIMENTACIÓN	CORRECCIÓN
d1/f1 = 69.7 %	23.7 %	d1/f1 = 27.5 %	58.9 %
d2/f1 = 64.9 %	24.4 %	d2/f1 = 27.5 %	58.9 %
d3/f1 = 63.1 %	8.1 %	d3/f1 = 22.4 %	51.2 %
d4/f1 = 66.1 %	8.0 %	d4/f1 = 44.8 %	31.6 %
d5/f1 = 69.7 %	14.9 %	d5/f1 = 51.7 %	23.0 %
d6/f1 = 66.8 %	16.1 %	d6/f1 = 50.0 %	19.6 %
d7/f1 = 65.2 %	3.9 %	d7/f1 = 48.2 %	22.5 %
d1/f2 = 71.1 %	23.3 %	d1/f2 = 23.8 %	64.5 %
d2/f2 = 66.2 %	24.1 %	d2/f2 = 23.8 %	64.5 %
d3/f2 = 64.4 %	7.7 %	d3/f2 = 19.4 %	57.7 %
d4/f2 = 67.4 %	7.6 %	d4/f2 = 38.8 %	40.7 %
d5/f2 = 71.1 %	14.6 %	d5/f2 = 44.7 %	35.6 %
d6/f2 = 70.1 %	15.7 %	d6/f2 = 43.2 %	30.4 %
d7/f2 = 66.5 %	3.6 %	d7/f2 = 41.7 %	32.8 %

Tabla 5.2 Comparación de la corrección de distorsión por intermodulación

Otro logro significativo es el hecho de presentar de manera simple el modelo del altavoz con base en la teoría de dinámica de sistemas físicos y dejar el argot y los términos técnicos innecesarios de acústica. Permitiendo un entendimiento claro para aquel que no tenga conocimientos profundos del tema.

El controlador aquí presentado (control PID) no es, de modo alguno, la única solución al problema de retroalimentación planteado, y de hecho es sólo una primera aproximación. El modelo implantado en computadora permite que algún interesado explore otras alternativas, utilizando el paquete de asistencia matemática Simulink, el cual facilita la aplicación de diversas técnicas de control.

El sensor fue considerado como una constante, fijada a partir de un valor específico del comportamiento del altavoz, se considera que puede obtenerse alguna mejora al hacer el valor del sensor variable en función del punto de operación del sistema.

Si bien el trabajo se enfoca a los beneficios de la retroalimentación en la disminución de componentes de distorsión por intermodulación, se considera posible que problemas adicionales, como el del cortocircuito acústico puedan corregirse en algún grado con esta técnica. De hecho, se encontró que la retroalimentación sí ayuda efectivamente a lograr una respuesta más plana del altavoz, como puede observarse al comparar la figura 5.5 (que corresponde a la identificación de la magnitud y fase del sistema acústico en lazo abierto) con la figura 5.6 (que corresponde a la del sistema en lazo cerrado). Esta última figura muestra una respuesta en magnitud prácticamente plana y una respuesta en fase con cambios más suaves.

Quedan por modelar con detalle algunas características presentes en el comportamiento de los altavoces, tales como el efecto Doppler [6] y otros fenómenos que ocurren en el interior del baffle. Estos factores deben ser incorporados al modelo para tener una respuesta más cercana a la realidad. Esta incorporación no será sencilla y puede ser un tema interesante para futuros trabajos de tesis en esta misma área. Para lograr incorporar estos fenómenos será sumamente importante contar, primero, con un prototipo físico del sistema acústico.

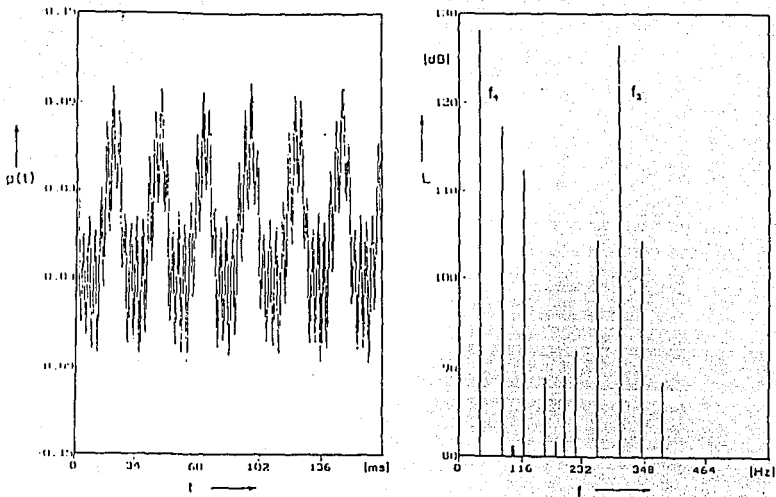


Fig 5.1 Presión sonora reportada en [10], sin corrección.

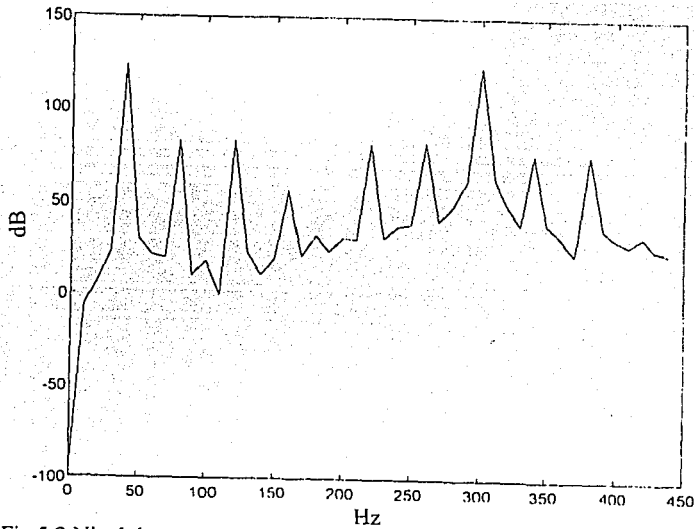


Fig 5.2 Nivel de presión sonora sin corrección para el sistema del capítulo 3.

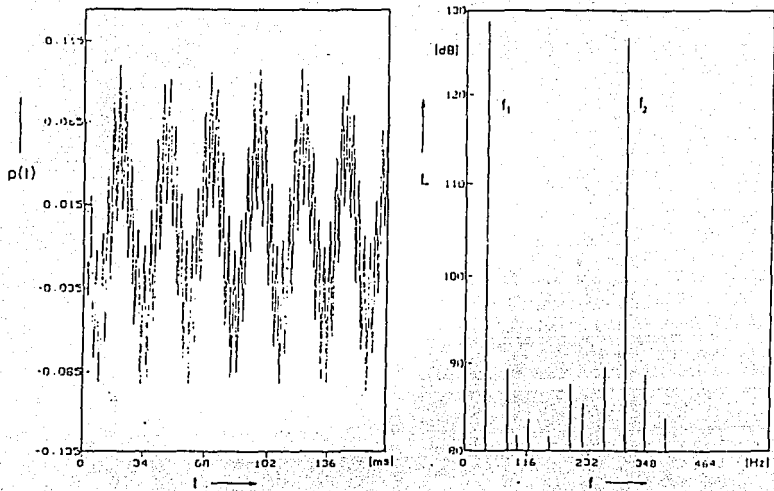


Fig 5.3 Corrección de la distorsión con el filtro espejo.

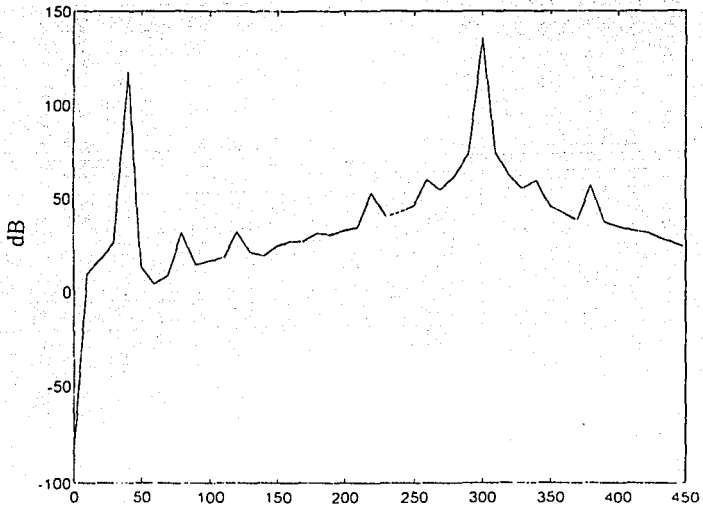


Fig 5.4 Corrección de la distorsión con retroalimentación.

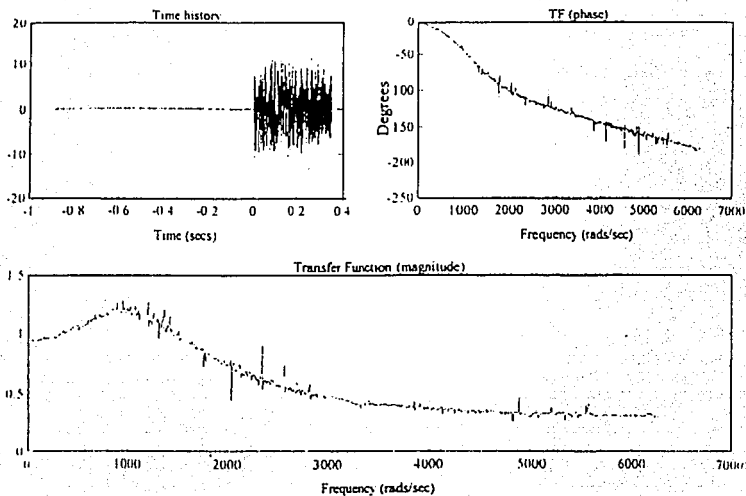


Fig 5.5 Magnitud y fase del sistema acústico en lazo abierto.

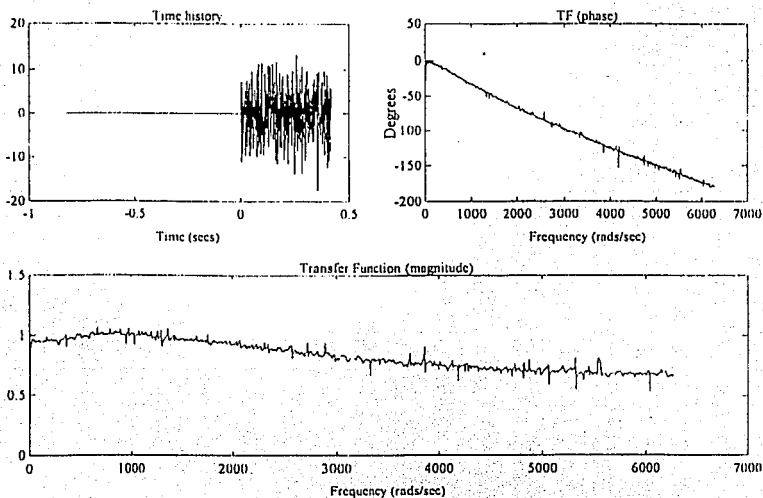


Fig 5.6 Magnitud y fase del sistema acústico en lazo cerrado.

REFERENCIAS

- 1.- Alta fidelidad: Auriculares y cajas acústicas., Ed. Orbis, España, 1986.
- 2.- Catrysse J. A. , On the Design of Some Feedback Circuits for Loudspeakers. J. Audio Eng. Soc., vol 33, pp. 430-435, junio 1985.
- 3.- Colloms M., High Performance Loudspeakers, Ed John Wiley and Sons, 1991.
- 4.- De Greef D., Acceleration feedback Loudspeaker. Wireless World, pp. 32-36, septiembre 1981.
- 5.- Franklin G. F., Control de sistemas dinámicos con retroalimentación, Ed Addison-Wesley Iberoamericana, 1991.
- 6.- Kaizer A. J., Modeling of the Nonlinear Response of an Electrodynamic Loudspeaker by a Volterra Series Expansion. J. Audio Eng. Soc., vol 35, pp. 421-433, junio 1987.
- 7.- Keele D. B., Dgx audio DDL-1 speaker and DDA-1 digital processing amp. audio, vol. 77, No 11, pp 48-64 noviembre 1993.
- 8.- Kinsler L. E., Fundamentos de Acústica., Ed Limusa, México, 1990.
- 9.- Klippel W., Dynamic measurement and interpretation of the Nonlinear Parameters of Electrodynamic Loudspeakers. J. Audio Eng. Soc., vol 38, pp. 944-955, diciembre 1990.

10.- Flippel W., The mirror Filter -A New Basis for Reducing Nonlinear Distortion and Equalizing Response in Woofer Systems, J. Audio Eng. Soc., vol 40, pp 675-691, septiembre, 1992.

11.- Klippel W., Nonlinear large signal Behavior of Electrodynamic Loudspeakers at Low Frequencies. J. Audio Eng. Soc., vol 40, pp. 483-496, junio 1992.

12.- Langford Jess, Diseños digitales. Audio profesional y producción musical. Año 3, No. 31, pp 3-11.

13.- Matlab for Windows user's guide. The Math Works, Inc., 1991.

14.- Principios básicos para el uso de ecualizadores. Audio profesional y producción, Año 3, No. 31, 1993.

15.- Simulink user's guide, The Math Works, Inc., 1992.

16.- Verde Rodarte M. C. Carrera Méndez R. A., Series del Instituto de Ingeniería No. D-32, junio 1992.