

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

DESARROLLO DE UNA RED DE CRUCE ACTIVA DE TIPO Y ORDEN VARIABLE PARA ALTAVOCES

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

Ronal Arturo Erquínigo Agurto

ASESOR: Dr. Jorge Néstor Moreno Ruiz

Lima, Agosto de 2012

RESUMEN

La presente tesis consiste en el desarrollo de un prototipo de red de cruce, la cual tendrá características tales como el ser de 3 vías, con salidas para bajos, medios y agudos; el implementar más de un tipo de alineamiento, los cuales serán de tipo Butterworth y Linkwitz - Riley hasta cuarto orden; y el de tener frecuencias de corte configurables. Todas estas características la harían compatible con redes de cruce comerciales.

El diseño del circuito implementado está basado en bloques de filtros bajo topologías de filtros analógicos, tal como la topología Sallen-Key. Se utiliza para esto amplificadores operacionales con características adecuadas para audio, así como condensadores y potenciómetros digitales. Estos últimos permitirán obtener diferentes frecuencias de corte, así como los dos tipos de alineamientos mencionados. El control de los potenciómetros lo realiza un microcontrolador, el cual identifica mediante pulsadores la función que el usuario desea implementar. La variación del orden de los filtros hasta cuarto orden se consigue mediante la conexión en cascada de bloques de primer y segundo orden que conforman el circuito. Esta conexión se realiza de forma mecánica mediante configuraciones de *jumpers*.

Se implementa el diseño en una tarjeta doble capa y se realizan sobre este pruebas para identificar las respuestas en frecuencia y el espectro de ruido de fondo en cada salida del circuito. La prueba de respuesta en frecuencia permite identificar las diferentes configuraciones de alineamiento, orden y frecuencias de corte programadas; mientras que la medición del espectro del ruido de fondo permite realizar la caracterización Señal a Ruido del Circuito. Los resultados del prototipo son buenos, consiguiéndose errores aceptables para el uso en audio profesional respecto a las funciones implementadas, así como una relación Señal a Ruido adecuada, la cual se optimizó blindando la tarjeta.

Se incluye en los anexos sets de mediciones completas que pueden ser de utilidad para personas que en futuros trabajos requieran revisar esta tesis.

FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Desarrollo de una red de cruce activa de tipo y orden variable para altavoces
 Área : Electroacústica # 1028
 Asesor : Lic. Jorge Moreno Ruiz
 Alumno : Ronal Arturo Erquínigo Agurto
 Código : 20070246
 Fecha : Viernes 20 de Julio de 2012

Descripción y Objetivos

En el campo del refuerzo sonoro se debe asegurar un adecuado nivel de presión sonora y una buena distribución de sonido en la audiencia. Estos indicadores dependen fundamentalmente del correcto diseño del sistema de altavoces. La directividad y el manejo de potencia del sistema de altavoces, dos parámetros importantes para lograr los objetivos mencionados al inicio, dependen en parte del correcto diseño de la red de cruce del sistema.

Las redes de cruce determinan el ancho de banda de trabajo de cada uno de los altavoces del sistema de altavoces, así como la directividad del sistema en las frecuencias de cruce. El diseño de la red de cruce se lleva a cabo mediante constantes pruebas, variando los parámetros de los filtros que los conforman hasta conseguir la respuesta óptima del sistema.

El objetivo de esta tesis es diseñar e implementar un circuito electrónico que consista de una red de cruce conformada por filtros analógicos de tipo y orden variable y que pueda ser conectado a un sistema de altavoces que sea de 3 vías. Para el diseño de los filtros se usarán topologías de filtros activos que tengan la posibilidad de variar su frecuencia de cruce. El control digital de los filtros se conseguirá mediante el control de potenciómetros digitales por microcontrolador. Se desarrollará la entrada de audio y las salidas de audio no balanceadas, con una etapa de pre-amplificación cada una.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

Dr. Ing. BENJAMÍN CASTAÑEDA APHAN
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

Jorge Moreno Ruiz
20/07/2012

MÁXIMO 50 PÁGINAS

FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Desarrollo de una red de cruce activa de tipo y orden variable para altavoces

Índice

Introducción

1. Sistemas de Reproducción en Refuerzo Sonoro
2. Redes de Cruce
3. Diseño de una Red de Cruce de 3 vías
4. Implementación y Resultados de Pruebas

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos

Máximo: 50 páginas

J. J. J.
20/07/2012

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

Dr. Ing. BENJAMÍN CASTAÑEDA APHAN
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

MÁXIMO 50 PÁGINAS

A mis padres, por su gran paciencia

A mis amigos, por su ayuda incondicional

A Dios, por su constante protección



INDICE

INTRODUCCION

CAPÍTULO 1

1. SISTEMAS DE REPRODUCCION EN REFUERZO SONORO	1
1.1 Descripción del Sonido	1
1.2 Representación Eléctrica del Sonido	1
1.3 Modelo General de un Sistema de Refuerzo Sonoro	1
1.4 Funciones de un Sistema de Refuerzo Sonoro	2
1.5 Componentes de un Sistema de Reproducción de Sonido	3
1.6 Mercado del Refuerzo Sonoro	5

CAPÍTULO 2

2. REDES DE CRUCE	6
2.1 Función de una Red de Cruce en un Sistema de Refuerzo Sonoro	6
2.2 Evolución de las Redes de Cruce	6
2.3 Parámetros de un Altavoz	7
2.3.1 Respuesta en Frecuencia de un Altavoz	7
2.3.2 Características de Directividad	8
2.4 Influencia de las Redes de Cruce en los Sistemas de Altavoces	8
2.4.1 Control del Ancho de Banda del Altavoz	8
2.4.2 Control de la Fase del Sistema de Altavoces	9
2.5 Tipos de Redes de Cruce	10
2.5.1 Redes de Cruce Pasivas	10
2.5.2 Redes de Cruce Activas	10
2.5.3 Redes de Cruce Digitales	11
2.6 Tipos de Alineamiento en Redes de Cruce	11
2.6.1 Tipo Butterworth	12
2.6.2 Tipo Linkwitz-Riley	14
2.7 Modelos Comerciales de Redes de Cruce	16
2.7.1 Redes de Cruce con Filtros Activos Analógicos	16
2.7.2 Redes de Cruce Digitales	18

<u>CAPÍTULO 3</u>	
3. DISEÑO DE UNA RED DE CRUCE DE 3 VIAS	22
3.1 Requerimientos del Diseño	22
3.2 Propuesta de Diseño	22
3.2.1 Diagrama de Bloques del Circuito	23
3.3 Diseño del Hardware por Etapas	24
3.3.1 Etapa de Procesamiento de Audio	24
3.3.1.1 Red de Cruce de 3 Vías	24
3.3.1.2 Entrada No Balanceada	32
3.3.1.3 Salidas No Balanceadas	33
3.3.2 Etapa de Control	34
3.3.2.1 Interfaz Etapa de Audio	35
3.3.2.2 Interfaz de Usuario	35
3.3.3 Etapa de Regulación de Voltaje	37
3.4 Programa del Microcontrolador	39
3.4.1 Diagrama de Flujo.	40
3.5 <i>Layout</i> Circuito Impreso	42
3.5.1 Consideraciones del <i>Layout</i>	42
<u>CAPÍTULO 4</u>	
4. IMPLEMENTACION Y RESULTADOS DE PRUEBAS	43
4.1 Implementación total del Circuito	43
4.2 Pruebas realizadas en el Circuito	43
4.2.1 Respuesta en Frecuencia de cada Bloque	43
4.2.1.1 Banco de Pruebas	44
4.2.1.2 Análisis de Resultados de las Pruebas	45
4.2.2 Caracterización Señal a Ruido del Circuito	50
4.2.2.1 Banco de Pruebas	50
4.2.2.2 Análisis de Resultados de las Pruebas	51
<u>CONCLUSIONES</u>	54
<u>RECOMENDACIONES</u>	54
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	55
<u>ANEXOS</u>	58

INTRODUCCION

En el campo del refuerzo sonoro se debe asegurar un adecuado nivel de presión sonora y una buena distribución de sonido en la audiencia. Estos indicadores dependen fundamentalmente del correcto diseño del sistema de altavoces. La directividad y el manejo de potencia del sistema de altavoces, dos parámetros importantes para lograr los objetivos mencionados al inicio, dependen en parte del correcto diseño de la red de cruce del sistema.

Las redes de cruce determinan el ancho de banda de trabajo de cada uno de los altavoces del sistema de altavoces, así como la directividad del sistema en las frecuencias de cruce. El diseño de la red de cruce se lleva a cabo mediante constantes pruebas, variando los parámetros de los filtros que la conforman hasta conseguir la respuesta óptima del sistema.

El objetivo de esta tesis es diseñar e implementar un circuito electrónico que consista de una red de cruce conformada por filtros analógicos de tipo y orden variable y que pueda ser conectado a un sistema de altavoces que sea de 3 vías. Para el diseño de los filtros se usará topologías de filtros activos que tengan la posibilidad de variar su frecuencia de cruce. El control digital de los filtros se conseguirá mediante el control de potenciómetros digitales por microcontrolador. Se desarrollará la entrada de audio y las salidas de audio no balanceadas, con una etapa de pre-amplificación cada una.

CAPITULO 1

1. SISTEMAS DE REPRODUCCION DE SONIDO EN REFUERZO SONORO

1.1 Descripción del Sonido

Lo que las personas entendemos por sonido es en realidad un fenómeno físico que consiste en la perturbación fluctuante de la presión en un medio (usualmente el aire)[1] debido al movimiento fluctuante de las partículas que lo conforman.

Los humanos percibimos estas fluctuaciones con nuestros oídos en el espectro que va desde los 20 Hz hasta los 20000 Hz. Para frecuencias mayores de este espectro, el sonido es percibido por instrumentos de ultrasonido. Podemos asociar, como una primera aproximación, a la amplitud de la variación de la presión de las partículas de aire con el *nivel de sonido*, así como la frecuencia con que éstas fluctúan con el *tono* [1].

1.2 Representación Eléctrica del Sonido

Es importante comprender que el sonido, para ser procesado por los equipos de audio, debe transducirse en una señal eléctrica, la cual puede ser de corriente o voltaje [1]. La amplitud de la señal eléctrica se entiende como *nivel de señal*, el cual se expresa en decibelios. El otro parámetro a considerar es la fase de la señal. En este caso la fase de una señal representa el retardo de ésta respecto a otra señal para cada frecuencia que compone su espectro. En un equipo de procesamiento de sonido se puede considerar el desfase entre la señal de salida del equipo respecto a la señal de entrada del equipo.

1.3 Modelo General de un Sistema de Refuerzo Sonoro

El objetivo fundamental de un sistema de refuerzo sonoro consiste en la amplificación de sonido en vivo, con el objeto de que éste pueda ser percibido por una mayor cantidad de oyentes. Estos sistemas pueden variar desde muy sencillos (por ejemplo en un discurso con un orador) hasta extremadamente complejos (en el caso de un concierto masivo).

En la figura 1.1 se presenta el modelo conceptual de un sistema de refuerzo sonoro.

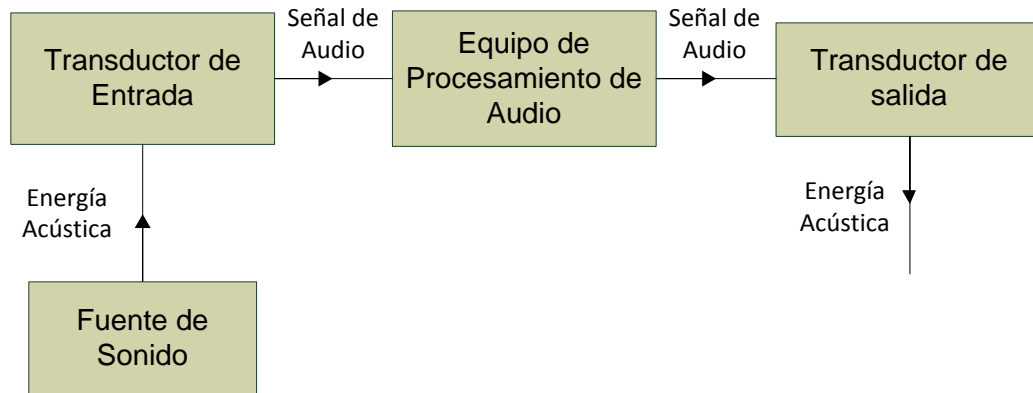


Figura 1.1: Modelo Conceptual de un Sistema de Sonido. Modificado de [1]

Los transductores de entrada son aquellos que convierten la señal acústica en señal eléctrica, como lo son los micrófonos. Como elementos transductores de salida tenemos a los altavoces y los auriculares. Como equipo de procesamiento de audio tenemos a los preamplificadores, mezcladoras, ecualizadores, procesadores de efectos, redes de cruce, entre otros. Otras fuentes de sonido que permiten la transducción a una señal de audio son reproductores de discos compactos, reproductores mp3, instrumentos musicales (ejm: Pastillas magnéticas en una guitarra eléctrica); entre otros.

1.4 Funciones de un Sistema de Refuerzo Sonoro

El refuerzo sonoro de ambientes implica la aplicación de diversas técnicas complementarias a la acústica arquitectónica. El tópico fundamental de un refuerzo sonoro está en cómo la audiencia recibe la información de los altavoces. Para lograr un adecuado refuerzo sonoro se debe de contar con el equipamiento de audio adecuado (micrófonos, altavoces, sistemas de procesamiento de sonido) además, para tener una solución óptima, el especialista en refuerzo sonoro debe tener un conocimiento detallado y específico no solo de los requerimientos tecnológicos que el sistema debe cumplir, sino también de la acústica arquitectónica del recinto en cuestión.

Se pueden identificar los siguientes requerimientos en un sistema de refuerzo sonoro [2]:

- Mejorar la inteligibilidad del diálogo y la claridad de la música, que permiten una comprensión mejor del mensaje por parte de la audiencia.

- Extensión del Rango Dinámico, que determina el nivel de la señal acústica respecto al ruido de fondo [1].
- Mejora del balance acústico entre las diferentes formas de información (discurso, música con voces, música instrumental).
- Obtener un nivel de presión sonora adecuado en el ambiente.
- Obtener una adecuada distribución del sonido en la audiencia.
- Considerar la apreciación personal de la audiencia y los factores psicoacústicos.

1.5 Componentes de un Sistema de Reproducción de Sonido

MICRÓFONOS:

Son los transductores de entrada del sistema de refuerzo sonoro. Su función es la de transformar las vibraciones debidas a la presión acústica ejercida sobre su cápsula por las ondas sonoras en energía eléctrica. Existen diversos tipos de micrófonos, los que se clasifican según el tipo de transductor acústico mecánico o el transductor mecánico eléctrico.

Transductor Acústico – Mecánico	Transductor Mecánico – Eléctrico
Micrófonos de Presión	Micrófono Dinámico
Micrófonos de Gradiente de Presión	Micrófono Electrostático (Por capacitancia)

Tabla 1.1: Clasificación de Micrófonos

EQUIPOS DE PROCESAMIENTO DE SONIDO:

Los equipos de procesamiento de sonido son diversos, y se clasifican según su función en la cadena de reproducción de sonido. Se puede mencionar los siguientes:

- Preamplificadores
- Amplificadores
- Limitadores
- Compresores
- Retardadores
- Mezcladoras

- Ecuiladores
- Equipos de Procesamiento Digital de Audio

ALTAVOCES:

Los altavoces son los elementos finales en la cadena de reproducción de sonido. Son transductores electroacústicos que convierten señales eléctricas en señales acústicas. Se diseñan para radiar energía audible en un medio fluido como lo es el aire [3]. De acuerdo al rango de frecuencias se clasifican de la siguiente forma:

Altavoz de Bajos.- *Woofers*. De los altavoces de bobina móvil, es el que posee el mayor tamaño (12'' a 18'' de diámetro). Reproducen frecuencias desde los 20 Hz hasta los 500 Hz. En un sistema de 4 vías se incluye el *subwoofer* que reproduce la porción desde los 20 hasta los 100 Hz y el *woofer* que reproduce desde los 100 Hz hasta los 500 Hz [3].

Altavoz de Medios.- Poseen un tamaño menor a los anteriores (4'' a 6'' y de 8'' a 10'' de diámetro). Reproducen bandas entre 500 Hz y 3000 Hz [3].

Altavoz de Agudos.- Altavoces de alta frecuencia, pueden llegar a superar los 20 kHz y poseen diámetros entre 1'' y 3'' [3].

En refuerzo sonoro, estos altavoces se pueden asociar en un sistema de altavoces de 2, 3 ó más vías.

Bocinas.- Son guías de onda que se acoplan al diafragma de un excitador de compresión o un altavoz en caso de bocinas para baja frecuencia. Actualmente la finalidad de estos dispositivos es la radiación de sonido con directividad constante y la mayor eficiencia posible.

Line Arrays.- Un arreglo vertical de cajas acústicas utilizado en refuerzo sonoro para amplios ambientes. Permiten un mejor control de la directividad de la radiación acústica a partir de la interferencia constructiva que producen sus gabinetes de altavoces.



Figura 1.2: Line Array, modelo TTL33a de la marca RCF [6]

1.6 Mercado del Refuerzo Sonoro

En el Perú, existen pocos especialistas en refuerzo sonoro. Las áreas que tienen mayor demanda son la de los cines, estudios de grabación y en conciertos en vivo. No existe un mercado nacional de fabricación de equipos de audio (sólo de altavoces) aunque si existe una oferta aceptable de comercialización de equipos de audio. Por ejemplo, DENKY AUDIOPRO es una empresa nacional que hace proyectos integrales de audio, diseña altavoces y es representante y distribuidora de algunas marcas extranjeras [13].

CAPITULO 2

2. REDES DE CRUCE

2.1 Función de una Red de Cruce en un Sistema de Refuerzo Sonoro

Debido a las limitaciones de los altavoces que se emplean en diseños para refuerzo sonoro, se hace necesario emplear redes de cruce de 2 ó más vías para reproducir el espectro audible en su totalidad. Cada vía se asocia a un altavoz o a varios del mismo tipo, el o los cuales reproducirán una porción del espectro audible. La señal eléctrica que proviene del sistema de reproducción tiene que filtrarse antes de que llegue a cada uno de los altavoces. El filtro que debe hacer esta función puede ser pasivo (cuando se construye en base de condensadores, bobinas y resistencias) o activo (implementado analógicamente en base a amplificadores operacionales o digitalmente cuando se basa en un algoritmo DSP). La función principal de la red de cruce es canalizar una parte del espectro a cada altavoz del sistema (fig. 2.1). La red de cruce completa debe permitir la reconstrucción completa del espectro en el rango audible.

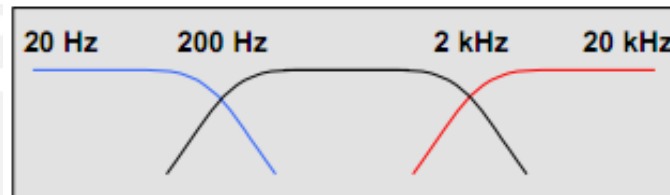


Figura 2.1: Esquema de una red de cruce de 3 vías

2.2 Evolución de las Redes de Cruce

La evolución de las redes de cruce no es reciente, dado que desde sus inicios eran implementadas con filtros pasivos pasa-bajo, pasa-alto y pasa-banda, y hasta hace dos décadas, los filtros para audio empleados por la industria eran generalmente de tipo Bessel y Butterworth. Durante la década de los 70s y 80s, se publicaron diversos artículos relacionados a las redes de cruce. En el año 1976, Seigfreid Linkwitz junto con Russ Riley propusieron una nueva topología de filtros activos basada en filtros Butterworth en cascada [5]. El aporte que dieron corresponde al tipo de filtro más usado en la actualidad por las redes de cruce.

Posteriormente, con la aparición de los procesadores digitales de señales, se integraron en un solo dispositivo la función de las redes de cruce y otros algoritmos

digitales tales como efectos de sonido, ecualizadores paramétricos y retardo. La robustez de los procesadores digitales para variar los parámetros de los filtros digitales que implementan los hacen preferidos en sistemas de audio profesional, pero a un costo elevado de adquirir.

2.3 Parámetros de un Altavoz

En refuerzo sonoro, se considera diversos parámetros para el diseño del sistema de altavoces, tales como respuesta en frecuencia, sensibilidad del altavoz, impedancia del altavoz, máxima potencia y directividad. Explicaremos dos de ellos que tienen relación directa con las redes de cruce.

2.3.1 Respuesta en Frecuencia de un Altavoz

Existe una relación entre el nivel de sonido producido por un altavoz y la potencia eléctrica que se le aplica desde el amplificador; nos referimos a la eficiencia, que sorprendentemente en un altavoz fluctúa entre el 2 y el 3%. Otro parámetro de importancia es la respuesta en frecuencia del altavoz tanto en magnitud como en fase. La figura 2.2 muestra la magnitud de la respuesta en frecuencia de un altavoz. Este parámetro es usualmente especificado aplicando 1 Watt de potencia al altavoz y midiendo a un metro de distancia en el eje del altavoz. La evaluación de sistemas de gran formato para refuerzo sonoro escapa a esta regla.

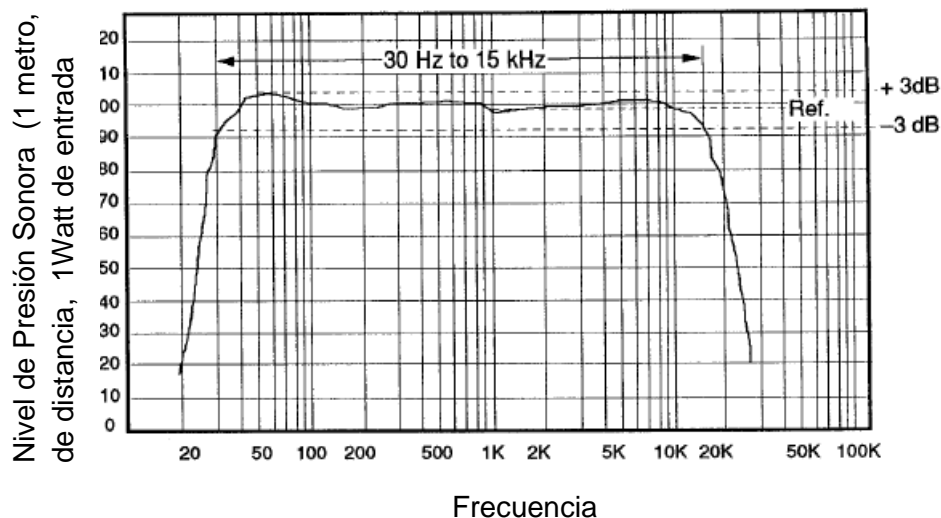


Figura 2.2: Respuesta en frecuencia de un sistema de altavoces. Gráfica de Magnitud.

Modificado de [1]

2.3.2 Características de Directividad

En refuerzo sonoro, el control de la directividad de altavoces es una prioridad, ya que permite dirigir el sonido de los altavoces a la audiencia, controlar la reverberación, y mejorar la inteligibilidad y claridad. Cada altavoz de un sistema de altavoces presenta un patrón de radiación, así como el sistema completo, el cual determina cómo se distribuye el nivel de presión sonora espacialmente.

Es importante comprender que la directividad para un altavoz no es uniforme para todo el rango de frecuencias. En principio, cuando el altavoz reproduce frecuencias más altas, la distribución del sonido que radia del altavoz es más directiva. A medida que disminuye la frecuencia del sonido radiado, la distribución tiende a ser omnidireccional. En el caso de altavoces de radiación directa, este fenómeno se debe a la relación entre el diámetro del altavoz y la longitud de onda acústica que corresponde a la frecuencia radiada. En el altavoz cargado con bocina, la directividad dependerá de la geometría de ésta.

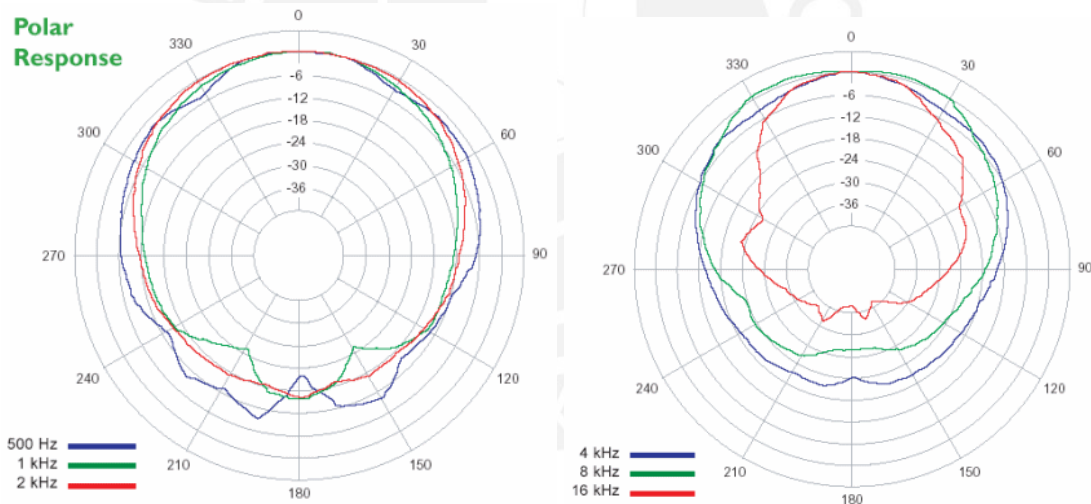


Figura 2.3: Patrones de Radiación para diferentes frecuencias de un Altavoz

2.4 Influencia de las Redes de Cruce en los Sistemas de Altavoces

2.4.1 Control del Ancho de Banda del Altavoz

Como se deduce del ítem anterior, los altavoces no están diseñados para responder uniformemente en todo el espectro audible, por lo que se requiere un filtro que limite su ancho de banda permitiendo que éste reproduzca sonido en el ancho de banda donde

su respuesta es uniforme. Sin embargo, el manejo de potencia también debe tomarse en cuenta para determinar el ancho de banda de trabajo óptimo de cada altavoz en el sistema de altavoces.

Las redes de cruce, como filtros eléctricos, aplican una pendiente al ancho de banda útil de los altavoces. La pendiente de la respuesta acústica total, no dependerá solamente del filtro eléctrico, sino también de la pendiente propia del altavoz. La respuesta final después de aplicar el filtro al altavoz será resultado de la interacción entre la respuesta del altavoz, que normalmente es un pasa-banda, con el filtro correspondiente. La pendiente resultante es la suma en decibeles de ambas respuestas en frecuencia.

Otro factor a considerar para la elección de la frecuencia de corte del filtro, son las características de directividad que se desea del altavoz. Por ejemplo, si se quiere que el altavoz de bajos presente un patrón de radiación omnidireccional, se tendrá cuidado de elegir la frecuencia de corte del filtro pasa-bajo a una frecuencia máxima en el que el patrón de radiación del *woofer* aún sea omnidireccional, y por cierto se aplica el mismo criterio con los altavoces que manejan el resto del ancho de banda. Cabe mencionar que las redes de cruce pueden tener influencia sobre la orientación de los lóbulos de radiación del sistema de altavoces completo.

2.4.2 Control de la Fase del Sistema de Altavoces

En un sistema de dos vías, una red de cruce se compone por un filtro pasa-bajo y otro pasa-alto, cada uno de estos conectado a un respectivo altavoz. El objetivo de la red de cruce es que la suma acústica de los dos altavoces presente una magnitud constante para todo el espectro (lo que incluye a la frecuencia de cruce). Cuando ambos filtros están en fase, se dice que están correlacionados, y cuando estos filtros se aplican a los altavoces correspondientes y la suma de ambas fases varía linealmente sin discontinuidades, decimos que los altavoces están temporalmente alineados. Cuando no están en fase, están no correlacionados. El que los filtros estén correlacionados o no, determina también cómo es el patrón de radiación del sistema de altavoces en la frecuencia de cruce y en sus alrededores.

Para concluir este acápite, cabe recalcar, que tal como en el ítem 2.4.1, la respuesta acústica total del sistema en cuanto a fase no sólo dependerá de las funciones de transferencia de los filtros eléctricos de la red de cruce, sino que evidentemente también dependerá del desfase que aporten los altavoces. Por ende, todo el análisis presentado en el presente ítem, deberá considerar la respuesta filtro-altavoz.

2.5 Tipos de Redes de Cruce

2.5.1 Redes de Cruce Pasivas

El diseño de redes de cruce está altamente influenciado por la variación de la carga, es decir, por la impedancia del altavoz, la cual varía fuertemente en todo el ancho de banda del altavoz. Por otro lado, en los altavoces de media y alta frecuencia, la frecuencia de resonancia del altavoz muchas veces se encuentra ubicada en las cercanías de la frecuencia de corte de este tipo de transductores. Todo esto lleva a que la red de cruce pasiva, que en principio se conecta directamente al altavoz, normalmente no presente las pendientes calculadas con carga constante.

Una solución es colocar redes de compensación de impedancia en paralelo con el altavoz para estabilizar la magnitud de la impedancia a un valor constante.

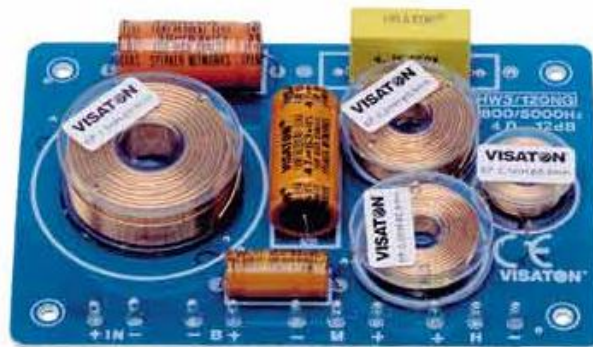


Figura 2.4: VISATON HW 3/120 NG 4 OHM, Red de Cruce Pasiva de 3 vías [8]

2.5.2 Redes de Cruce Activas

Los filtros activos son circuitos electrónicos que aparte de tener las características de filtraje de un filtro pasivo, sus respuestas en frecuencia son independientes de la impedancia del altavoz pues entre el altavoz y el filtro siempre habrá un amplificador. La segunda cualidad importante es que no habrá interacción entre vías. En una red de

cruce activa, cada vía se conecta a un amplificador (en la red de cruce pasiva hay un solo amplificador de potencia antes de ésta). Esto último permite variar el nivel de salida de cada altavoz independientemente de los otros.

En general podemos distinguir las siguientes ventajas sobre las redes de cruce pasivas para un sistema de altavoces [7]:

- Baja Distorsión por Intermodulación, debido a que los amplificadores actúan en una banda limitada (no es el caso de las redes de cruce pasivas).
- Mejor manipulación de la fase a partir de un circuito de retardo adicional.
- Control independiente de ganancia para cada altavoz.
- La variación de la impedancia del altavoz no afecta las características del filtro.

Estos filtros también son más baratos de implementar respecto a los pasivos de alta calidad, ya que en el caso de los pasivos, para bajas frecuencias se requiere inductores (con núcleo de aire y bajo calibre de alambre) más grandes y por ende más caros de lo que es un amplificador operacional.

2.5.3 Redes de Cruce Digitales

Dos familias de filtros son conocidas: FIR (*Finite Impulse Response*) e IIR (*Infinite Impulse Response*). Por el año 2000, sólo los filtros IIR eran implementados en productos comerciales. Los filtros IIR se caracterizan por tener una respuesta en frecuencia tal como la de los filtros activos, pero con la ventaja de no tener error de tolerancia por componentes [4]. Los filtros FIR pueden implementar funciones que serían muy complejas usando filtros activos (por ejemplo, un *roll-off* de -100 dB/octava). Sin embargo, esta complejidad lleva a que el retardo total de este filtro sea considerable [4].

2.6 Tipos de Alineamiento en Redes de Cruce

Cuando hablamos de tipos de alineamiento, nos referimos a la función matemática que deben implementar los filtros de una red de cruce. En esta sección explicaremos los tipos de alineamiento Butterworth y Linkwitz - Riley, ambos para configuraciones de varios tipos de orden, los cuales serán implementados en el presente trabajo de tesis. Se hará un análisis gráfico de cada tipo, el cual es ideal, pues no se considera la

respuesta de un altavoz; sin embargo, permitirá comprender la utilidad de cada tipo de filtro en un sistema de altavoces. Un análisis detallado de los efectos de estos filtros en sistemas de altavoces específicos cae fuera del alcance de esta tesis.

2.6.1 Tipo Butterworth

Los polinomios normalizados de las funciones de tipo Butterworth son los siguientes:

Butterworth Primer Orden	$1 + s_n$
Butterworth Segundo Orden	$1 + \sqrt{2}s_n + s_n^2$
Butterworth Tercer Orden	$1 + 2s_n + 2s_n^2 + s_n^3$
Butterworth Cuarto Orden	$1 + 2.613s_n + 3.414s_n^2 + 2.613s_n^3 + s_n^4$

Tabla 2.1: Polinomios Normalizados Butterworth

En todos los casos, las frecuencias de corte presentan una atenuación de -3 dB. Con estos polinomios podemos analizar gráficamente el efecto de la suma acústica ideal que tendría el bloque pasa-bajo con el pasa-alto en un sistema de 2 vías:

BUTTERWORTH PRIMER ORDEN:

Es el único de todos los tipos que presenta no solo una transferencia plana en magnitud, sino también lineal en fase. Sin embargo, su baja pendiente provoca mucho traslape entre los dos altavoces.

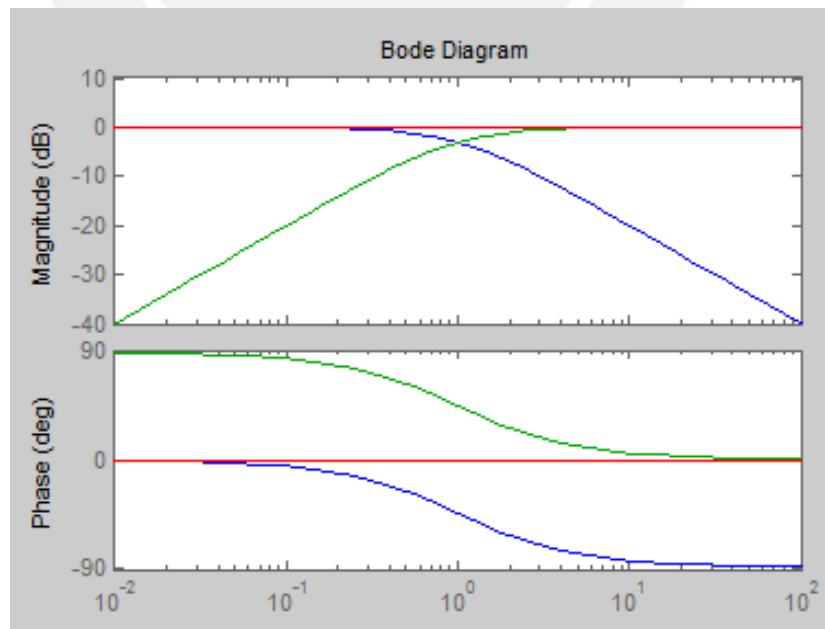


Figura 2.5: Red de Cruce de 2 Vías 1er orden Butterworth

BUTTERWORTH SEGUNDO ORDEN:

Para garantizar una continuidad en fase, el filtro pasa-alto debe ser invertido para que se ponga en fase con el filtro pasa-bajo. Si no fuera éste el caso, existiría interferencia destructiva en el eje para la frecuencia de cruce, debido al desfase de 180°.

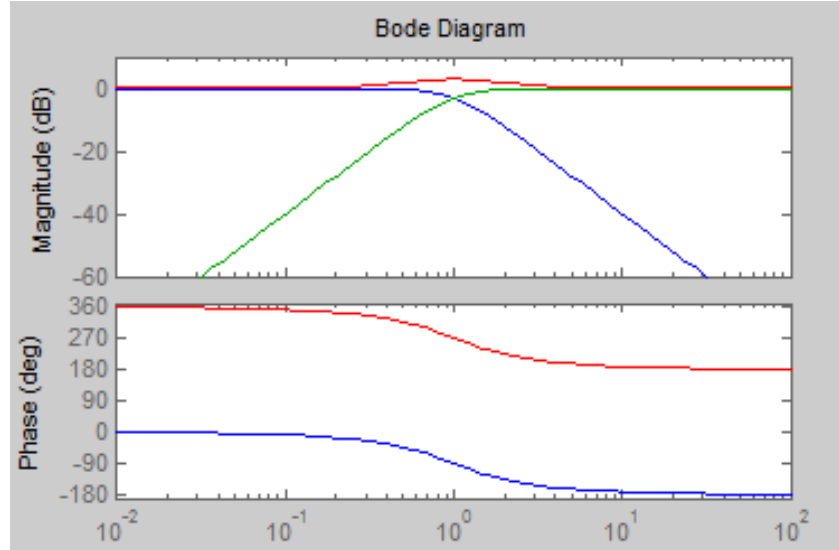


Figura 2.6: Red de Cruce de 2 Vías 2do orden Butterworth

BUTTERWORTH TERCER ORDEN:

Su pendiente más pronunciada lo hace atractivo en más aplicaciones. El problema es que es una red de cruce no correlacionada, por lo que a pesar de tener una respuesta plana en el eje, presenta una inclinación del patrón de radiación para la frecuencia de cruce.

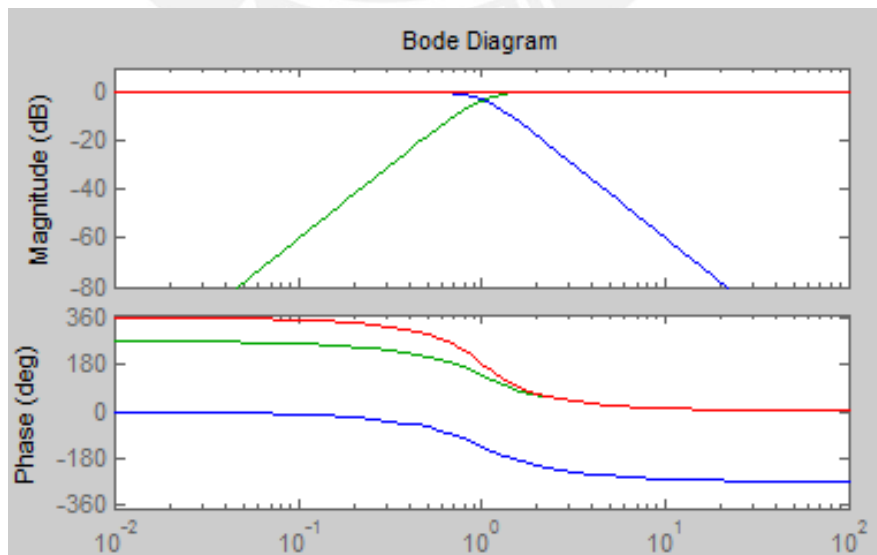


Figura 2.7: Red de Cruce de 2 Vías 3er orden Butterworth

BUTTERWORTH CUARTO ORDEN:

Debido a que es una red de cruce correlacionada, la suma acústica presenta una ganancia de +3 dB.

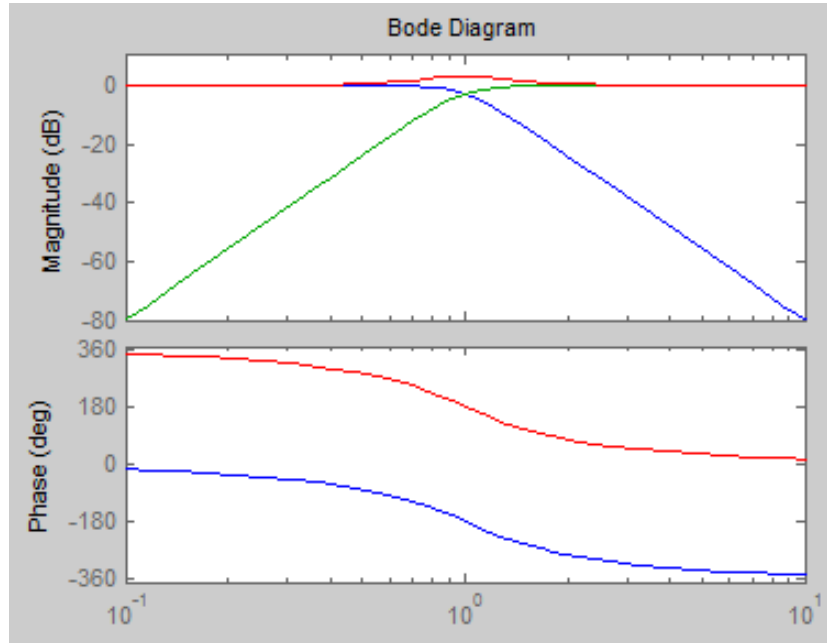


Figura 2.8: Red de Cruce de 2 Vías 4to orden Butterworth

2.6.2 Tipo Linkwitz - Riley

En 1976, Seigfreid Linkwitz propuso utilizar la combinación de dos filtros Butterworth en cascada, por lo que siempre son de orden par. Los filtros de este tipo, debido a que son correlacionados en fase, presentan un patrón de radiación en el eje para la frecuencia de cruce. También, debido a su naturaleza de Butterworth en cascada, las frecuencias de cruce se encuentran a -6 dB, por lo que a esta frecuencia la suma acústica total se encuentra a 0 dB, garantizando una respuesta plana en magnitud.

Linkwitz - Riley Segundo Orden	$1 + 2s_n + s_n^2$
Linkwitz - Riley Cuarto Orden	$1 + 2\sqrt{2}s_n + 4s_n^2 + 2\sqrt{2}s_n^3 + s_n^4$

Tabla 2.2: Polinomios Normalizados Linkwitz - Riley

LINKWITZ - RILEY SEGUNDO ORDEN:

Al igual que en el caso de Butterworth segundo orden, la fase del filtro pasa-alto debe ser invertida, pero en este caso sí se presenta una respuesta plana para todo el espectro.

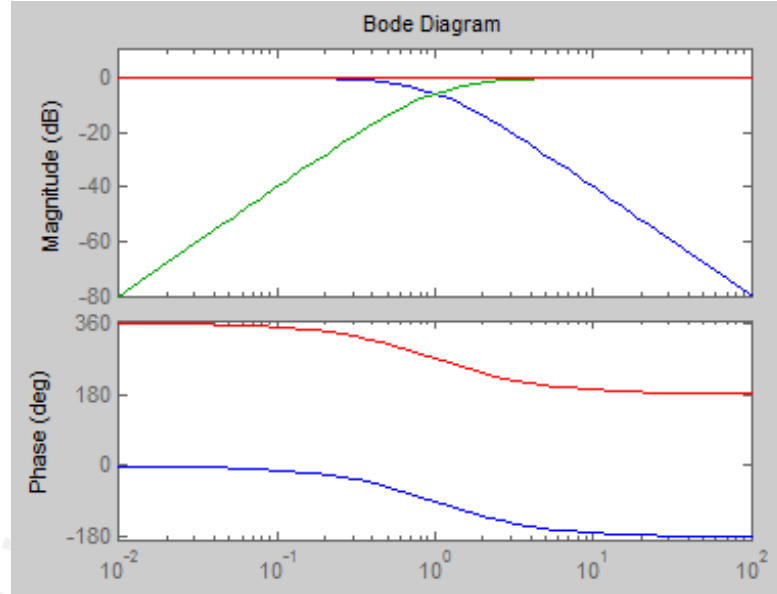


Figura 2.9: Red de Cruce de 2 Vías 2do orden LR

LINKWITZ - RILEY CUARTO ORDEN:

Es el estándar utilizado para los dispositivos basados en amplificadores operacionales, debido a su pendiente pronunciada y a su respuesta acústica plana.

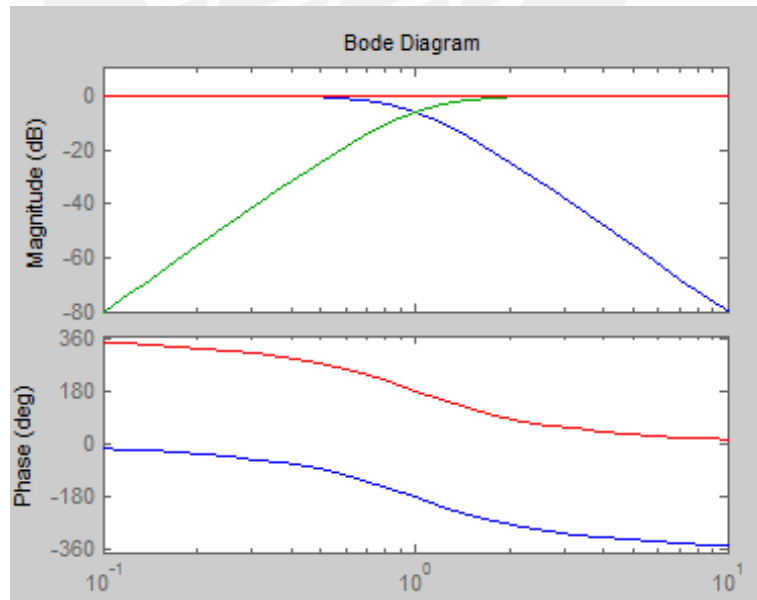


Figura 2.10: Red de Cruce de 2 Vías 4to orden LR

2.7 Modelos Comerciales de Redes de Cruce

2.7.1 Redes de Cruce con Filtros Activos Analógicos

Este tipo de redes de cruce tuvieron su auge en los años 80s. Todos los modelos presentados implementan el tipo de alineamiento Linkwitz - Riley de cuarto orden, implementado en una topología de filtros de variable de estado. Según el modelo, presentan configuraciones de 3 vías ó 4 vías (con *subwoofer*) para un solo canal de entrada, o configuraciones estéreo de 2 ó 3 vías para dos canales de entrada.

Presentamos las características técnicas de los siguientes modelos:

RANE AC22S ACTIVE CROSSOVER:



Red de cruce activa estéreo de dos vías (configuración estéreo) con opción monoaural para subwoofer. Emplea el alineamiento Linkwitz - Riley de cuarto orden para minimizar la discontinuidad en fase en la región de cruce [9].



Figura 2.11: RANE AC22S (vista frontal) [9]

La tabla 2.3 muestra las especificaciones técnicas de este modelo:

Especificaciones	<p>Crossover: Alineamiento: Linkwitz – Riley Roll-off: 24 dB/octava. Rango: 70 Hz – 3.6 kHz (de bajos a agudos)</p> <p>Retardo: Nulo hasta 2 ms</p> <p>Entradas: Tipo: Balanceadas Conectores: XLR Impedancia: 20 kΩ Rango de Ganancia: Nula hasta +6 dB</p> <p>Salidas: Tipo: Balanceadas Conectores: XLR Impedancia: 200 Ω Rango de Ganancia: Nula hasta +12 dB</p> <p>Filtro Infrasónico: 20 Hz, 18 dB/octava, Butterworth Filtro Ultrasónico: 40 kHz, 6 dB/octava, Bessel THD + 17uído: 0,02% SNR: 92 dB, +4 dBu, Ancho de Banda de 20 kHz Suministro: 100 – 240 VAC, 50 – 60 Hz Consumo: max. 7 W</p>
------------------	---

Tabla 2.3: Especificaciones técnicas modelo AC22S [9]

RANE AC23S ACTIVE CROSSOVER:

Crossover activo cuya salida puede ser configurada como estéreo de 2 ó 3 vías, o monoaural de 4 ó 5 vías. Emplea el alineamiento Linkwitz - Riley de cuarto orden para minimizar la discontinuidad en fase en la región de cruce. Usa conectores XLR activos balanceados tanto en las entradas como en las salidas [10].



Figura 2.12: RANE AC23S (vista frontal) [10]

La tabla 2.4 muestra las especificaciones técnicas de este modelo:

Especificaciones	<p>Crossover: Alineamiento: Linkwitz - Riley Roll-off: 24 dB/octava. Rango (3 vías): 70 Hz – 1 kHz (de bajos a medios) Rango (3 vías): 190 Hz – 7 kHz (de medios a agudos) Rango (2 vías): 190 Hz – 7 kHz (de bajos a agudos)</p> <p>Retardo: Nulo hasta 2 ms</p> <p>Entradas: Tipo: Balanceadas Conectores: XLR Impedancia: 20 kΩ Rango de Ganancia: Nula hasta +6 dB</p> <p>Salidas: Tipo: Balanceadas Conectores: XLR Impedancia: 200 Ω Rango de Ganancia: Nula hasta +12 dB</p> <p>Filtro Infrasónico: 20 Hz, 18 dB/octava, Butterworth Filtro Ultrasónico: 40 kHz, 6 dB/octava, Bessel THD + ruido: 0,02% SNR: 92 dB, +4 dBu, Ancho de Banda de 20 kHz Suministro: 100 - 240 VAC, 50 – 60 Hz Consumo: max. 7 W</p>
------------------	--

Tabla 2.4: Especificaciones técnicas modelo AC23S [10]

2.7.2 Redes de Cruce Digitales

Las redes de cruce digitales vienen implementadas como algoritmos DSP dentro de los equipos de procesamiento de audio digital. Estos equipos por lo general presentan otras funciones como ecualización, compresores, limitadores; etc. Las redes de cruce digitales representan el estado estándar en cuanto a aplicaciones de refuerzo sonoro se refiere, debido a su robustez para implementar más tipos de alineamiento en configuraciones multicanal de varias vías por la cantidad de entradas y salidas de audio que presentan. Cabe destacar que estos equipos no presentan error por tolerancia de componentes, como es el caso de los filtros activos analógicos.

Presentamos las características técnicas de los siguientes modelos:

TOA DP-0206 PROCESADOR DIGITAL DE SEÑALES:

Modelo para aplicaciones permanentes de la compañía TOA ELECTRONICS de Japón. Presenta la función de red de cruce entre otras como alineamiento de altavoces y retardo. Presenta funciones como compresor, limitadores, filtrado multi-banda, ecualización paramétrica y gráfica, filtros pasa-bajo, pasa-alto, pasa-todo y rechaza-banda, entre otras funciones [11].



Figura 2.13: TOA DP-0206 (vista frontal y posterior) [11]

Se especifica las características principales del dispositivo y las relacionadas a la función de *crossover*.

<p>Especificaciones</p>	<p><i>Crossover</i>:</p> <p>Pasa-banda configurable a 2, 3 ó 4 vías. Roll-off: Configurable a -6, -12, -18 y -24 dB/octava. Ganancia: -12 dB a 12 dB Alineamientos: Bessel (-12/-18/-24 dB/octava) Butterworth (-12/-18/-24 dB/octava) Linkwitz - Riley (-12/-24 dB/octava) Q variable (-12/-18/-24 dB/octava)</p> <p>Entradas:</p> <p>Número: 2 (expandible hasta 6) Tipo: Electrónicamente balanceadas, 10 kΩ Apantallamiento: Directo al chasis y filtro RFI al chasis. Conector: Bloque removible de 4 polos</p>
-------------------------	--

	<p>Salidas:</p> <p>Número: 6 (expandibles hasta 10) Tipo: Electrónicamente balanceadas. Impedancia de carga mínima: 600 Ω Conectores: Bloque removible de 3 polos.</p> <p>Características Generales:</p> <p>Conversión A/D – D/A: 24 bits Frecuencia de muestreo: 48 kHz Procesador: 3*Motorola 56364, 24 bit, 100 MIPS, 100 MHz Distorsión armónica total (THD): Menor a 0.05% Retardo de Propagación: Menor a 1.4 ms Rango Dinámico: 110 dB Suministro: 100 - 240 VAC, 50 – 60 Hz Consumo: max. 30 W</p>
--	--

Tabla 2.5: Especificaciones técnicas modelo DP-0206 [11]



DRIVERACK 4800 SISTEMA DE DIRECCION DE ALTAVOCES:

Este equipo digital de procesamiento de audio presenta funciones de ecualización paramétrica independiente para todas sus entradas y salidas, ecualización gráfica en sus entradas, mezclador en las entradas y salidas, hasta 680 ms de retardo en las entradas y hasta 1360 ms en las salidas; entre otros algoritmos DSP.



Figura 2.14: DriveRack 4800 (vista frontal y posterior) [12]

Se especifica las características principales del dispositivo y las relacionadas a la función de *crossover*.

<p>Especificaciones</p>	<p><i>Crossover</i>:</p> <p>Configuraciones monoaural y multicanal: 1x1, 1x2, 1x3, 1x4, 1x5, 1x6, 1x7, 1x8, 2x2, 2x3, 2x4 2x5, 2x6, 2x7, 2x8, 3x3, 3x4, 3x6, 3x7, 4x4, 4x5, 4x8</p> <p>Alineamientos: Bessel (6/12/18/24/36/48 dB/octava) Butterworth (6/12/18/24/36/48 dB/octava) Linkwitz - Riley (12/24/36/48 dB/octava)</p> <p>Ganancia Salidas: Nula hasta 20 dB Presenta Ajuste de Fase</p> <p>Entradas:</p> <p>Número: 4 Tipo: Electrónicamente balanceadas, 50 kΩ, filtro RF Conector: XLR hembra Máximo Nivel de Entrada: Selección por software, hasta +28 dBu CMRR: 40 dB, 1 kHz</p> <p>Salidas:</p> <p>Número: 8 Tipo: Electrónicamente balanceadas, 30 Ω, filtro RF Conectores: XLR Macho Máximo Nivel de Salida: Selección por software, hasta +24 dBu</p> <p>Características Generales:</p> <p>Conversión A/D – D/A: 24 bits Frecuencia de muestreo: 96 kHz Distorsión armónica total y ruido (THD+ruido): 0.004% (+4 dBu, 1 kHz y 0 dB de ganancia de entrada) Rango Dinámico: 114 dB Suministro: 100 - 240 VAC, 50 – 60 Hz Consumo: max. 45 W</p>
-------------------------	--

Tabla 2.6: Especificaciones técnicas modelo DriveRack 4800 [12]

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO DE UNA RED DE CRUCE DE 3 VIAS

3.1 Requerimientos del Diseño

Llegado a este punto debemos mencionar los requerimientos del circuito a desarrollar:

- Diseñar e implementar un circuito red de cruce, basado en filtros activos, que tenga la opción de variar el tipo y el orden de los filtros que lo conforman. Los alineamientos a desarrollar son Butterworth de 1,2,3 y 4to orden, así como Linkwitz - Riley de 2 y 4to orden.
- La red de cruce deberá desarrollarse para un sistema de altavoces de 3 vías.
- El circuito deberá incluir una etapa de ganancia a la entrada (*master level*) y ganancias de salida (bajos, medios y agudos).
- Se diseñará para un nivel de voltaje máximo de entrada de 300 mV por limitaciones de los componentes electrónicos. Este nivel de entrada permite hacerlo compatible con equipos de audio doméstico. Para hacerlo compatible con otros equipos de audio profesional (+4 dBu) deberá incluirse un atenuador en la entrada.
- Se podrá variar las frecuencias de cruce de bajos a medios (200 Hz a 1600 Hz) y de medios a agudos (2 kHz a 16 kHz).
- Se busca la optimización, minimizando la cantidad de componentes.
- La red de cruce deberá tener una S/N de por lo menos 90 dB.

3.2 Propuesta de Diseño

Debido a que se plantea el diseño de una red de cruce usando topologías de filtros activos analógicos, la cantidad de amplificadores operacionales a usar es considerable, sobre todo por el hecho de que se tiene por requerimiento implementar filtros de hasta cuarto orden. Por otro lado, como se requiere implementar un circuito de 3 vías, deberíamos tener una configuración de filtros pasa-bajo, pasa-banda y pasa-alto, esto en principio duplicaría la cantidad de componentes que tendría una red de 2 vías, donde sólo se incluiría un filtro pasa-bajo con un filtro pasa-alto. Por otro lado, está la necesidad de variar las frecuencias de corte de los filtros, por lo que en principio se debería incluir potenciómetros para este fin.

A pesar de las aparentes desventajas, se decidió por desarrollar la red de cruce con topologías de filtros activos, debido a que se tiene mayor conocimiento de diseño de filtros activos analógicos. El diseño será aceptable mientras el circuito no sea innecesariamente grande, así como tampoco el costo de implementación.

3.2.1 Diagrama de Bloques del Circuito

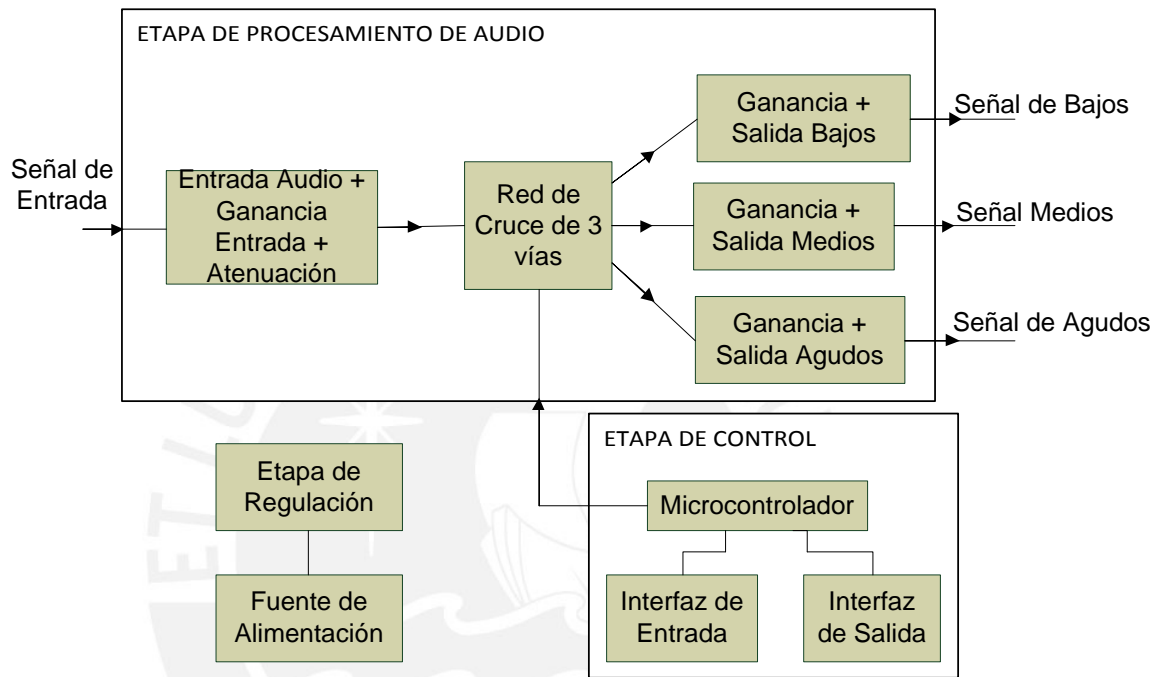


Figura 3.1: Diagrama de Bloques del Circuito a implementar

Descripción: En lo que concierne a la etapa de audio, las entradas y salidas con ganancia serán circuitos a base de amplificadores operacionales. Estas etapas requerirán de una alimentación dual, la cual deben obtener de la fuente de alimentación. El bloque de Red de Cruce de 3 vías constará de un banco de filtros, a base de amplificadores operacionales (requerirán de la fuente dual) y de potenciómetros digitales, los cuales se polarizarán a partir de la etapa de regulación.

En lo que concierne a la etapa de control, ésta está basada en un microcontrolador, el cual configurará los potenciómetros digitales del Bloque de Red de Cruce de 3 vías para obtener frecuencias de cruce variables y diferentes tipos de alineamiento (LR y Butterworth) para varios ordenes (1, 2, 3 y 4) por la variación del factor de calidad de

los filtros. El bloque de interfaz de entrada se conforma de pulsadores que nos permitirán seleccionar todas las configuraciones disponibles, mientras que el bloque de interfaz de salida se conforma por LED's indicadores que nos permitirán identificar la configuración que es aplicada en ese momento.

3.3 Diseño del Hardware por Etapas

3.3.1 Etapa de Procesamiento de Audio

3.3.1.1 Red de Cruce de 3 Vías

ARQUITECTURA RED DE CRUCE:

Para el diseño de una red de cruce activa, lo primero es la elección de la topología. La siguiente tabla muestra una comparación entre posibles topologías a usar:

	Topología Sallen – Key	Topología MFB	Topología de Variable de Estado
Ventajas	Presenta la menor cantidad de componentes.	Presenta control independiente del factor de calidad del filtro.	De un solo circuito se obtiene el filtro pasa–alto y pasa-bajo. Permite una variación independiente de sus parámetros.
Desventajas	No hay control independiente de la frecuencia de cruce ni del orden.	Presenta una resistencia más que Sallen – Key.	Presenta mayor cantidad de componentes, pasivos y activos. Necesariamente un filtro por cada orden.

Tabla 3.1: Topologías de Filtros Activos

Debido a que se busca optimizar el circuito en cuanto a tamaño, y debido a la posibilidad de utilizar bloques independientes de segundo orden para obtener todas las configuraciones, se opta por la topología Sallen - Key.

Una red de cruce de 3 vías se conforma por un filtro pasa–bajo, por un pasa-banda y por un pasa–alto. La arquitectura típica que se utiliza en redes activas analógicas, como en [14] es como se presenta en la figura 3.2.

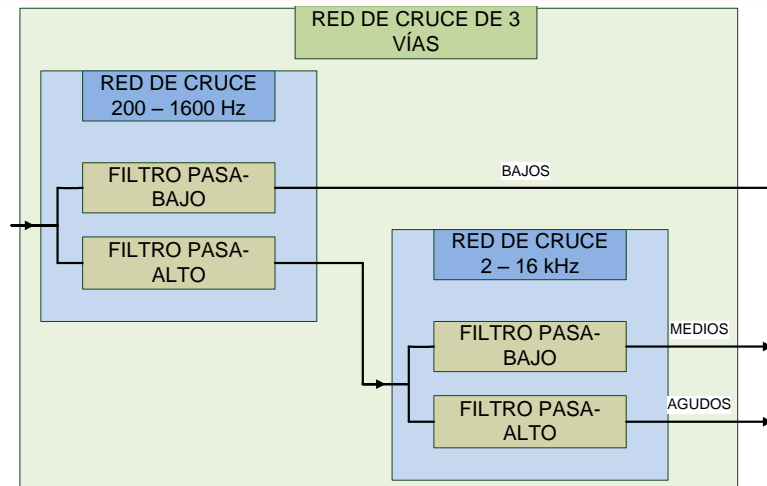


Figura 3.2: Diagrama de Bloques Red de Cruce de 3 vías

El circuito propuesto se conforma por dos bloques similares, sólo que configurados a diferentes frecuencias. En sí afirmamos que una red de cruce de 3 vías se conforma por dos redes de 2 vías. La metodología de diseño se desarrollará para un sub-bloque (red de bajos a medios) y se concluirán valores para ambos.

Para identificar la forma en que podemos diseñar este circuito en base a topologías Sallen - Key, lo primero es definir los polinomios normalizados de todos los tipos y órdenes de alineamiento a implementar, así como las configuraciones en cascada que necesitan para implementarse:

Alineamiento	Polinomio Normalizado	Bloque 1er Orden	Bloques 2do Orden (Factores de Calidad)
B1	$s + 1$	Si	No
B2	$s^2 + 1.4142s + 1$	No	Q= 0.707
B3	$(s^2 + s + 1)(s + 1)$	Si	Q= 1
B4	$(s^2 + 0.7654s + 1)(s^2 + 1.8478s + 1)$	No	Q= 0.54, Q=1.31
LR2	$s^2 + 2s + 1$	No	Q=0.5
LR4	$(s^2 + 1.4142s + 1)(s^2 + 1.4142s + 1)$	No	Q= 0.707, Q= 0.707

Tabla 3.2: Configuraciones en cascada tipos de filtros

A continuación presentamos el diagrama de bloques del sub-bloque red de cruce de 2 vías (bajos a medios). La arquitectura propuesta en principio permite obtener todas las

funciones de la tabla 3.2. Se presenta el bloque pasa-bajo (fig. 3.3) y el bloque pasa-alto (fig. 3.4) que conforman la red de cruce de 2 vías.

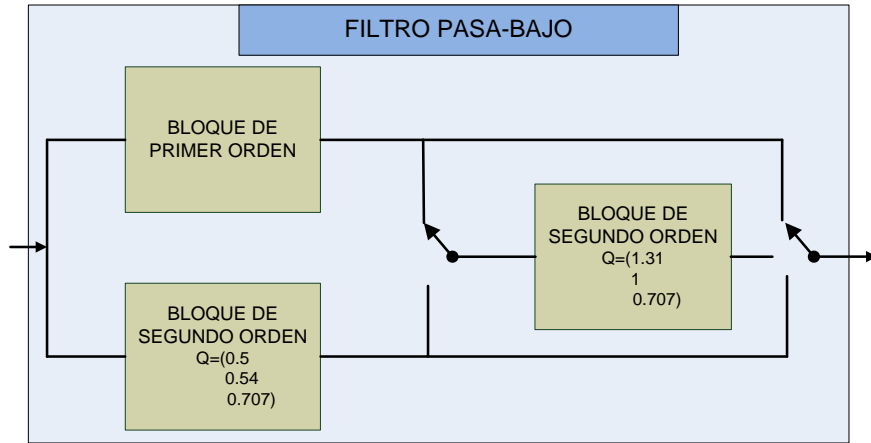


Figura 3.3: Bloque Pasa - Bajo

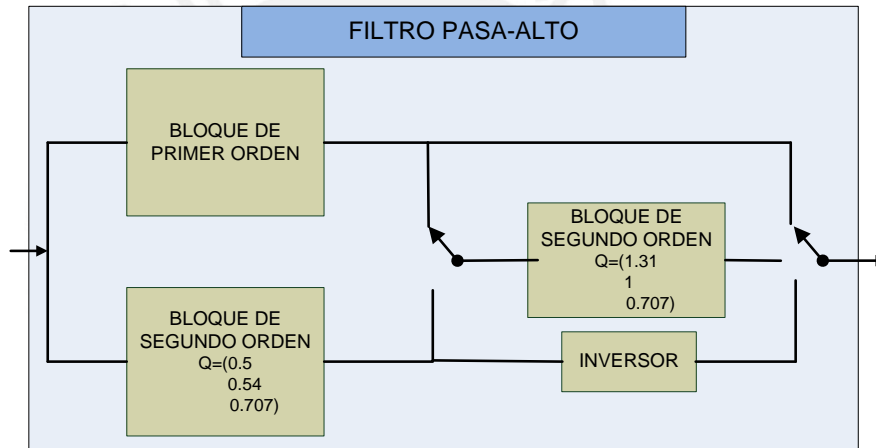


Figura 3.4: Bloque Pasa - Alto

Tanto el filtro pasa-bajo como el pasa-alto presentan dos bloques de segundo orden, que deben ser configurados para 3 tipos de factores de calidad cada uno. Un bloque de primer orden adicional y las configuraciones de los *jumpers* nos permitiría elegir entre todos los alineamientos planteados en la tabla 3.2. El bloque inversor del filtro pasa-alto nos permitirá invertir la señal en caso se pretenda usar los alineamientos Butterworth y Linkwitz-Riley de segundo orden, para conseguir que la señal esté en fase con la del bloque pasa-bajo.

ELECCION DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL:

Hasta este punto podemos saber la cantidad de amplificadores operacionales a usar en la red de cruce de 3 vías: Si cada bloque de segundo orden necesita un *opamp*, al

igual que el bloque de primer orden, el filtro pasa-bajo necesitaría 3 *opamp*. El filtro pasa-alto necesitaría uno más (4) por el inversor, con lo que sumaría a 7. Considerando la red de cruce de medios a agudos, la cantidad se duplicaría a 14.

En la siguiente tabla presentamos posibles opciones de amplificadores operacionales para audio:

Parámetro	TL072 [15]	NE5532 [16]	NJM5534 [17]	MC33078 [18]
Alimentación	+/-18 V	+/-15 V	+/-22 V	+/-18 V
Slew Rate	16 V/us	9 V/us	13 V/us	7 V/us
CMRR	86 dB	100 dB	100 dB	100 dB
PSR	86 dB	100 dB	100 dB	105 dB
Voltaje de Ruido equivalente	15 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	5 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	3.3 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	4.5 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Ancho de Banda de Ganancia Unitaria	4 MHz	10 MHz	10 MHz	16 MHz
Precio (Dólares)	0.44	0.34	0.82	0.82

Tabla 3.3: Comparación de *Opamps*

Como el nivel de entrada para el bloque red de cruce de 3 vías es de 300 mV, el mínimo *slew rate* se define en función de la razón de cambio máxima de la señal.

$$SWR = 0.3V * 2 * \pi * 20000\text{Hz} = 0.0377V/us$$

Incluso considerando un margen adecuado (encima de 20 kHz), el requerimiento de *slew rate* es cumplido por todos los amplificadores. Entre los amplificadores operacionales, el NE5532 tiene una mejor relación de prestaciones (excepto por el *slew rate*) respecto al precio.

ELECCION DE LOS POTENCIOMETROS DIGITALES:

El diseño plantea un control digital de los factores de calidad y frecuencias de corte de los filtros. Considerando que cada bloque de segundo orden precisa de 2 potenciómetros, y el bloque de primer orden sólo de uno, cada filtro pasa-bajo necesitaría de 4. Contando los 4 filtros necesarios, sumarían en total 20. Debido a esto,

se plantea utilizar algún integrado que incluya de 5 a más potenciómetros, para disminuir el tamaño del circuito implementado, y que a la vez permita modularizar las etapas dentro del circuito impreso. Por consideraciones de precio se decidió importar 4 integrados AD5206BN100. El integrado incluye 6 potenciómetros de 100 kΩ cada uno.

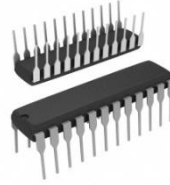


Figura 3.5: AD5206BN100 [26]

Se detallan sus características en la siguiente tabla [19]:

Alimentación	Singular de 2.7 a 5.5 V ó dual de +/-2.7 V
Control	Interfaz SPI
Número de Divisiones	256
Ancho de Banda (-3 dB)	69 kHz
Tolerancia Resistencia	+/-30%
Coeficiente de Temperatura	700 ppm/°C
Error diferencial no lineal	+/- 0.25 LSB
Rango de Voltaje V_a , V_b , V_w	VSS a VDD
Corriente máxima pulsante I_a , I_b , I_w	+/- 20mA

Tabla 3.4: Parámetros AD5206BN100

Debido a que la señal de audio estará referida a tierra, y a que los voltajes de los terminales de los potenciómetros tienen que estar en el rango de VSS a VDD, se decide por una alimentación dual de los integrados. Los valores de resistencia de los potenciómetros en principio no deberían ser menores a:

$$Resistencia = \frac{2.7V}{20mA} = 135 \Omega$$

Donde el valor de las resistencia se define por [19]:

$$RWB(Dx) = (Dx)/256 \times 100 \text{ k}\Omega + 45 \Omega$$

Donde Dx define uno de los 256 valores con que puede programarse un potenciómetro.

ELECCION DE LOS CONDENSADORES:

Llegado a este punto debemos elegir los valores de condensadores que se incluirán en cada bloque de primer orden o segundo orden. Sus valores deben ser tales que permitan tener un control amplio de las frecuencias de cruce gracias a los potenciómetros. A partir de las fórmulas presentadas en el Anexo A1, se realizaron tablas en Excel para hallar los valores de R1 y R2 de la topología Sallen – Key a partir de valores constantes de factor de calidad, frecuencia de cruce y capacitancia de condensadores. La siguiente tabla resume los valores hallados para los bloques de segundo orden:

		200 – 1600 Hz		2 – 16 kHz	
		Pasa-bajo	Pasa-alto	Pasa-bajo	Pasa-alto
Q= 0.5, 0.54, 0.707	C2	33nF	12nF	3.3nF	1.2nF
	C1	15nF	12nF	1.5nF	1.2nF
Q= 0.707, 1, 1.31	C2	100nF	22nF	10nF	2.2nF
	C1	12nF	22nF	1.2nF	2.2nF

Tabla 3.5: Condensadores elegidos para los bloques de segundo orden

El diseño se basó en los condensadores de la red de cruce de 200 a 1600 Hz. En el Anexo A2 se presentan los valores calculados para R1 y R2 de los bloques de segundo orden propuestos. La elección de los condensadores se optimizó para obtener un amplio rango de variación de R1 y R2 de 200 a 1600 Hz, buscando obtener valores cercanos a 100 kΩ para 200 Hz, y los mayores posibles para 1600 Hz.

Para los bloques de primer orden se usa la topología VCVS y debido a que:

$$\frac{1}{2 * \pi * 200 * 10 * 10^{-9}} = 79577 \Omega$$

Y a que:

$$\frac{1}{2 * \pi * 1600 * 10 * 10^{-9}} = 9947 \Omega$$

Con un condensador de 10nF podemos implementar el bloque de primer orden, obteniendo un rango amplio de variación del potenciómetro. El circuito final para la red de cruce de 200 a 1600 Hz se muestra en las figuras 3.6 y 3.7.

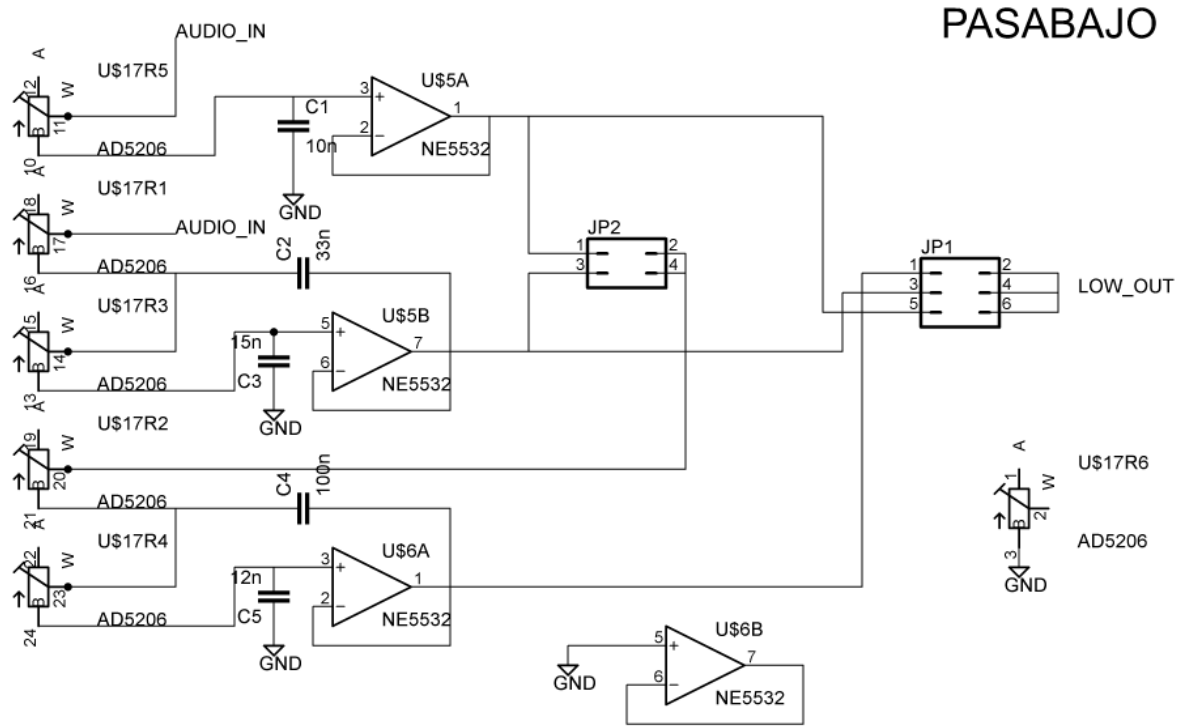


Figura 3.6: Filtro pasa-bajo, de 200 a 1600 Hz

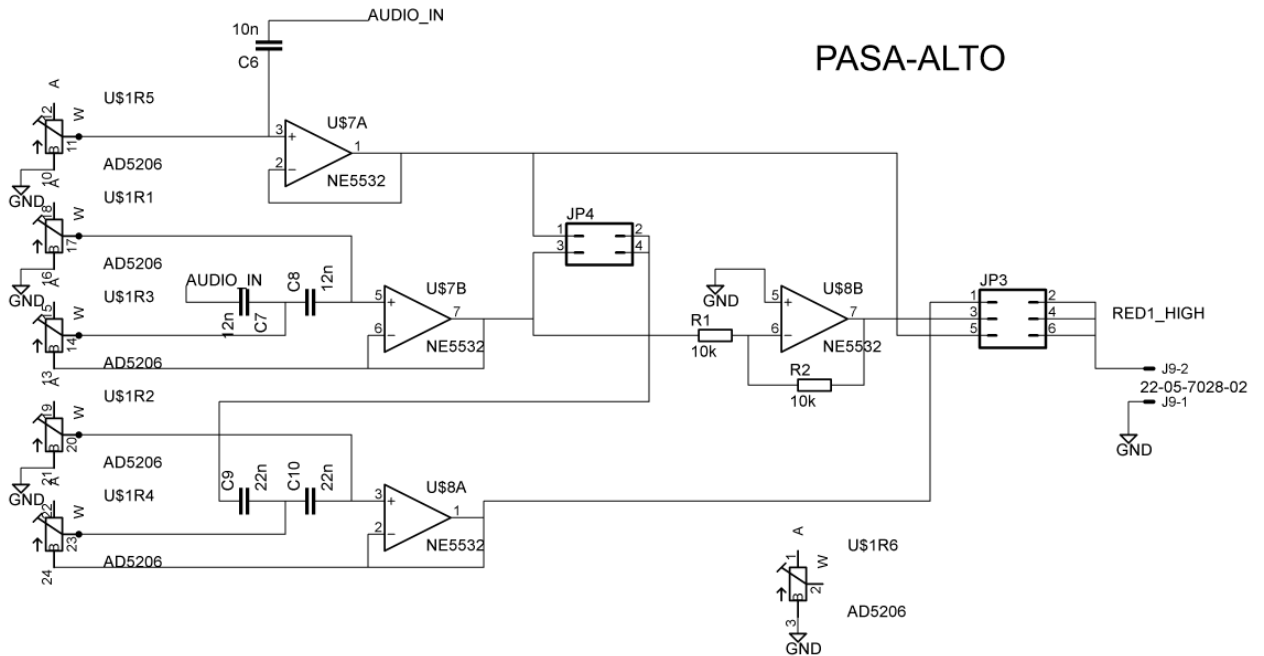


Figura 3.7: Filtro pasa-alto, de 200 a 1600 Hz

Para la red de 2 kHz a 16 kHz, el circuito es similar al mostrado en 3.6 y 3.7, sólo cambian los valores de todos los condensadores, que son divididos entre 10. Los valores de los potenciómetros digitales son los mismos que para la red de 200 Hz a 1.6

kHz (Anexo A2), con la salvedad que ahora se obtiene frecuencias de corte diez veces mayores. En 3.8 y 3.9 se muestra la red de donde se obtiene los medios y agudos.

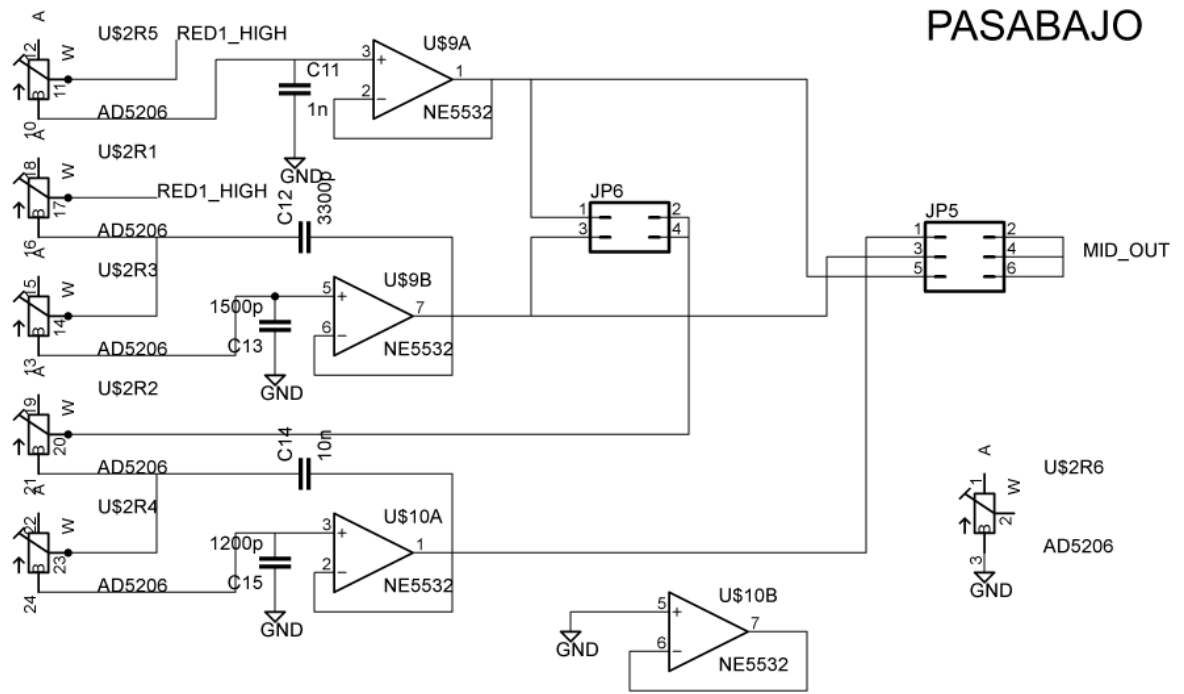


Figura 3.8: Filtro pasa-bajo, de 2 kHz a 16 kHz

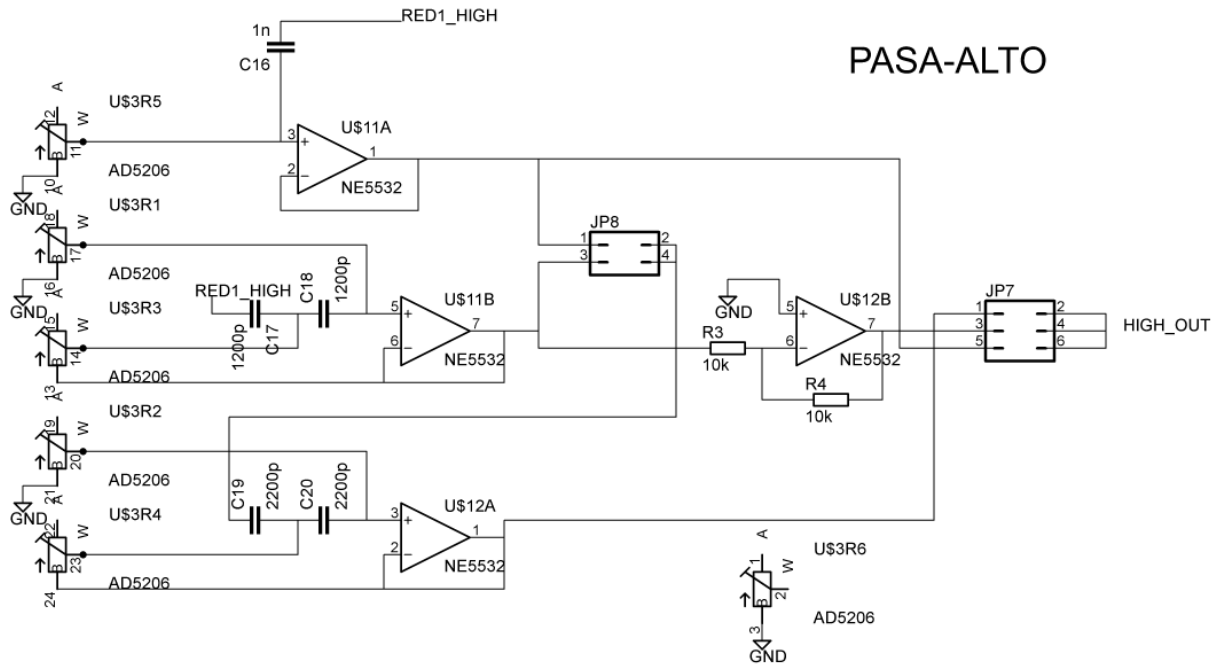


Figura 3.9: Filtro pasa-alto, de 2 kHz a 16 kHz

Los condensadores de Mylar son los más usados en Audio, pero debido al poco presupuesto disponible se decidió utilizar condensadores cerámicos; además, éstos presentan un mayor rango de valores. Los condensadores utilizados presentan una tolerancia del 10%. Para la implementación de la etapa inversora en el filtro pasa-alto, se usará resistencias SMD comerciales.

3.3.1.2 Entrada No Balanceada

El estándar profesional se basa en líneas de audio balanceadas, las cuales permiten la transmisión de la señal de audio en dos líneas (apantalladas). Las entradas balanceadas, presentan un CMRR que permite eliminar el ruido aditivo de las dos líneas respecto a tierra. La construcción de una entrada balanceada incluye componentes de precisión. Para el presente trabajo, una entrada no balanceada cumple los requerimientos, pues la sensibilidad del circuito es mínima ante la entrada de audio de 300 mV.

ENTRADA NO BALANCEADA (MASTER LEVEL)

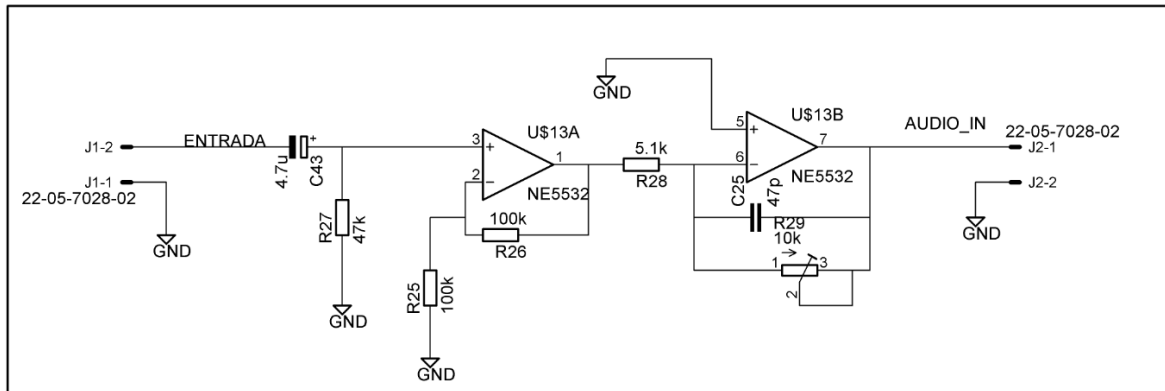


Figura 3.10: Entrada No balanceada con Ganancia

La entrada no balanceada propiamente dicha es un amplificador en modo no inversor, con una ganancia de +6 dB y una impedancia de entrada de 47 kΩ [20]. El condensador cerámico de 47 pF filtra parcialmente las radiofrecuencias. La siguiente etapa es un amplificador inversor con ganancia configurable hasta +6 dB aproximadamente. Las dos etapas generan una ganancia de hasta +12 dB aproximadamente. Para una señal de 300 mV, la salida de esta etapa puede llegar hasta 1.2 V, lo que es un nivel adecuado para los potenciómetros digitales.

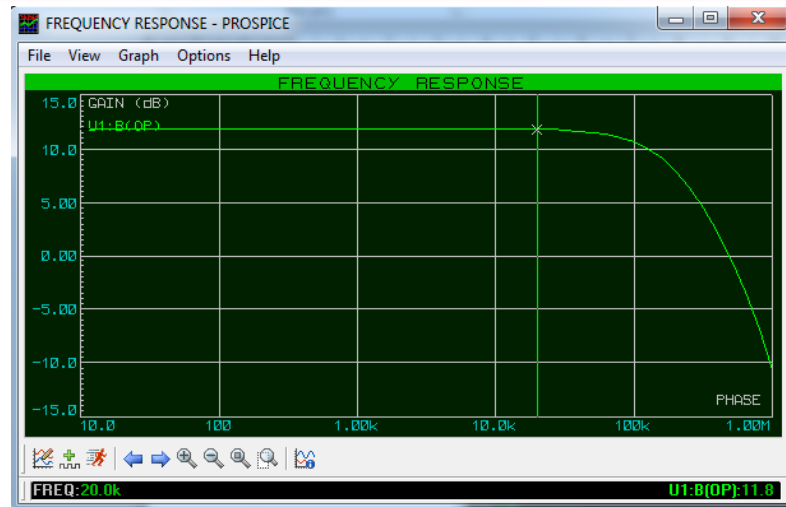


Figura 3.11: Simulación Respuesta en frecuencia en ISIS PROTEUS

De la figura 3.11 observamos que el circuito (fig. 3.10) presenta una respuesta plana en magnitud, con una ganancia de 11.8 dB hasta pasado los 20 kHz.

3.3.1.3 Salidas No Balanceadas

SALIDA BAJOS NO BALANCEADA (CON GANANCIA)

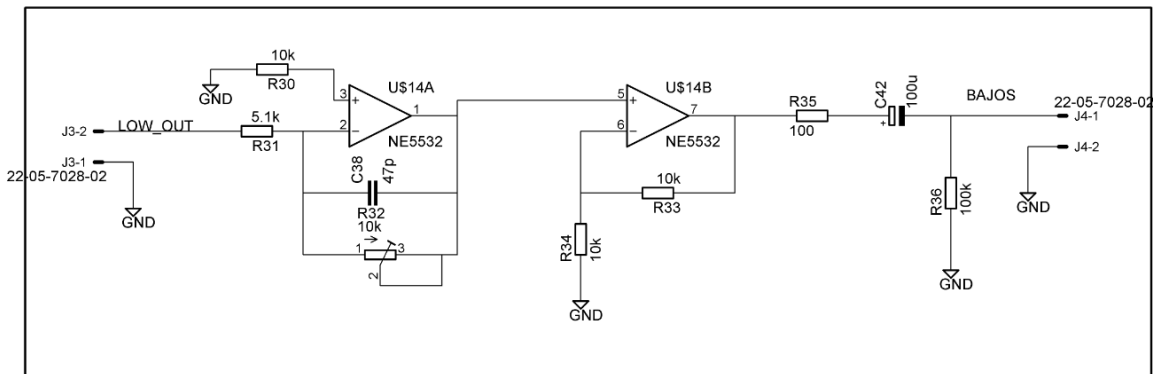


Figura 3.12: Salida No balanceada con Ganancia (Bajos)

El circuito de la Figura 3.12 presenta dos etapas. La primera es una de ganancia (hasta +6 dB) basada en un amplificador inversor. La salida no balanceada consiste de un amplificador no inversor (ganancia de +6 dB) y una etapa de impedancia de salida. Para equipos de audio semiprofesional, (que presentan una impedancia de entrada mínima de 600 Ω), los valores de la resistencia de salida y del condensador electrolítico deben estar entre 47 y 220 Ω y entre 47 y 220 μF respectivamente [20].

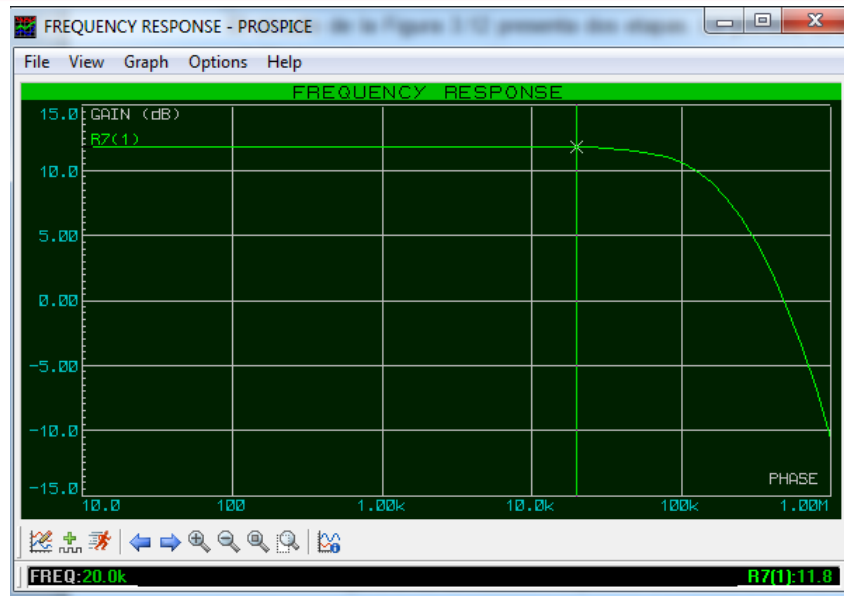


Figura 3.13: Simulación Respuesta en frecuencia en ISIS PROTEUS

La Figura 3.13 muestra la respuesta en frecuencia (magnitud) del circuito (fig. 3.12). La ganancia del circuito se mantiene en 11.8 dB hasta pasado los 20 kHz.

3.3.2 Etapa de Control

La función principal de la etapa de control es la de configurar los 4 integrados AD5206BN100. También necesita una interfaz que permita al usuario configurar la función requerida, así como elementos indicadores que permitan al usuario saber la configuración concurrente.

Para la elección del microcontrolador, se considera parámetros como el número de puertos, frecuencia máxima de trabajo, memoria Flash, entre otros. Hasta este punto, es un requerimiento que el microcontrolador pueda funcionar con una alimentación de +2.5 V, pues ésta es la misma alimentación de los potenciómetros digitales. Las señales digitales de comunicación deben tener niveles entre 0 y 2.5 voltios.

Como la comunicación con los potenciómetros digitales es SPI, no se requiere mayor cantidad de pines, por lo que se puede elegir un microcontrolador con poco número de pines. En este sentido se optó por el Atmega88 de Atmel, pues presenta el menor número de pines (28) de la familia Mega AVR de Atmel [21].

Parámetro	Valor
Voltaje de Operación	1.8 V a 5.5 V
Memoria Flash	8 kBytes
Máximo puertos de I/O	23
Max. Frecuencia de Operación (2.7 V)	10 MHz

Tabla 3.6: Características ATmega88 [22]

3.3.2.1 Interfaz Etapa de Audio

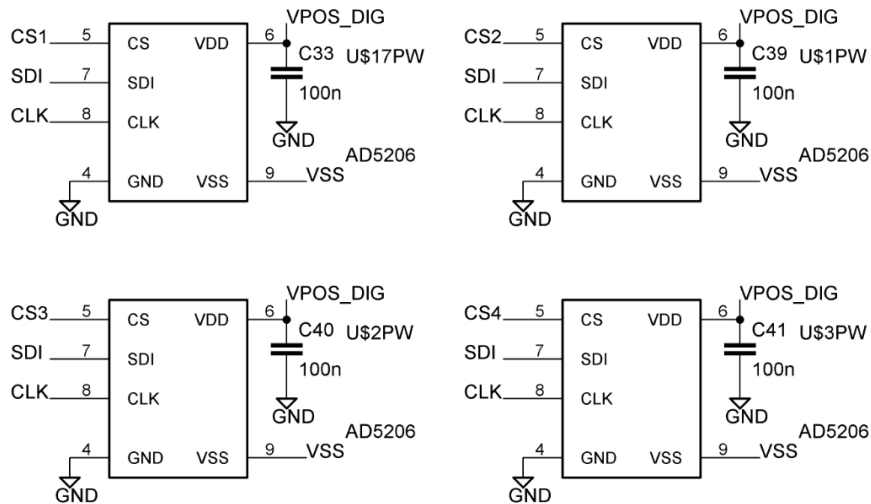


Figura 3.14: Interfaz Microcontrolador – Potenciómetros Digitales

La comunicación SPI requiere de 3 pines: SDI (data), CLK (reloj) y CS (selector). Las señales SDI y CLK son comunes a los 4 AD5206BN100, mientras que los selectores requerirán de un pin independiente del microcontrolador. La figura 3.14 muestra este esquema. En total se requerirá 6 pines para esta interfaz.

3.3.2.2 Interfaz de Usuario

Para esta etapa se utilizaron, por cada red (de 200 Hz a 1600 Hz y de 2 kHz a 16 kHz) 4 LEDs indicadores para la frecuencia de cruce, 2 LEDs para el tipo de alineamiento, y dos pulsadores para cambiar el tipo de alineamiento y la frecuencia de cruce, independientemente. La única desventaja es que el orden del filtro no presenta un control digital. En los esquemáticos de la red de cruce (figuras 3.6 a 3.9) se observa que el orden se puede conseguir cambiando la posición de los *jumpers*.

ETAPA DE CONTROL (uC)

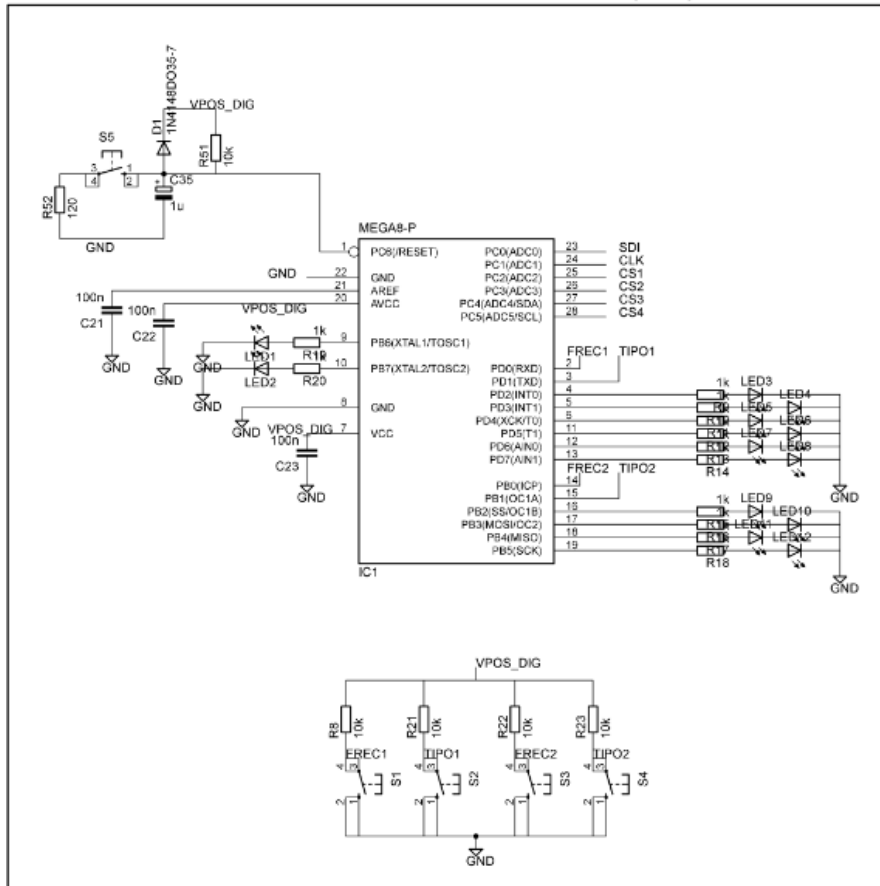


Figura 3.15: Interfaz de Usuario, Etapa de Control

La distribución de puertos del microcontrolador es como sigue:

Etapa	Pines	Función
Interfaz Etapa de Audio	PC0	SDI
	PC1	CLK
	PC5 – PC2	CS4 – CS1
	PC6	Reset
Interfaz Usuario Red 200 a 1600 Hz	PD1 – PD0	Selección Tipo – Frecuencia
	PD3 – PD2	Indicadores Tipo
	PD7 – PD4	Indicadores Frecuencia
Interfaz Usuario Red 2 a 16 kHz	PB1 – PB0	Selección Tipo – Frecuencia
	PB3 – PB2	Indicadores Tipo
	PB7 – PB4	Indicadores Frecuencia

Tabla 3.7: Distribución de Pines

3.3.3 Etapa de Regulación de Voltaje

El circuito recibirá una alimentación dual externa de +/-10 V, para la polarización de los amplificadores operacionales. Sin embargo para la alimentación del microcontrolador y de los potenciómetros digitales se necesita un voltaje de +2.5 V. Además, debido a que los potenciómetros digitales tienen una alimentación dual, se precisará de un regulador de voltaje negativo a -2.5 V.

Componente	Consumo Unitario	Cantidad	Consumo Total
Atmega88 (1.8 V, 1 MHz)	0.2 mA	1	0.2 mA
Leds Indicadores	0.8 mA	12	9.6 mA
Pulsadores	0.25 mA	4	1 mA
Pulsador Reset	0.25 mA	1	0.25 mA
AD5206BN100	0.012 mA	4	0.048 mA
TOTAL			11.098 mA

Tabla 3.8: Consumo de Corriente de Componentes a la salida del regulador (+2.5 V)

Se concluye que los LEDs indicadores, para mantener un brillo adecuado, consumen más energía que los otros componentes. La solución con LEDs no es óptima, pero es una opción más sencilla de implementar.

Para el regulador positivo se elige el LM317 y para el negativo, se elige el LM337. Ambos presentan una corriente máxima de 1.5 A, son ajustables y son comunes en el mercado nacional.

Para el LM317 [23]:

$$V_{out} = 1.25 * \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) + I_{adj}(R2)$$

Si $R1 = R2 = 1 \text{ k}\Omega$, entonces $V_{out} \approx 2.5 \text{ V}$

Para el LM337 [24]:

$$V_{out} = -1.25 * \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) - I_{adj}(R2)$$

Si $R1 = R2 = 1 \text{ k}\Omega$, entonces $V_{out} \approx -2.5 \text{ V}$

ETAPA DE REGULACION

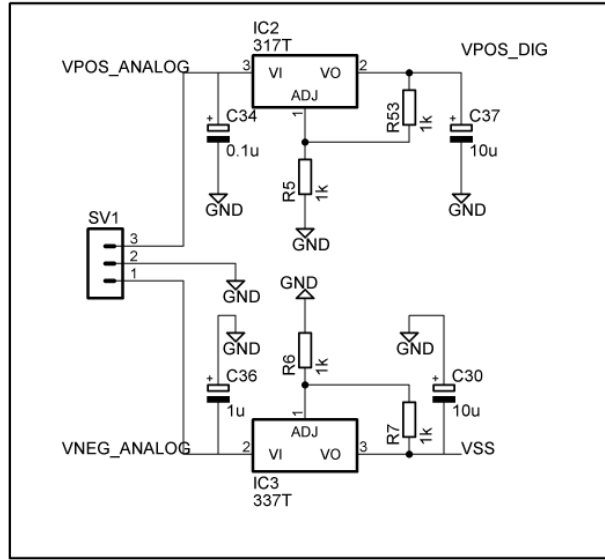


Figura 3.16: Etapa de Regulación

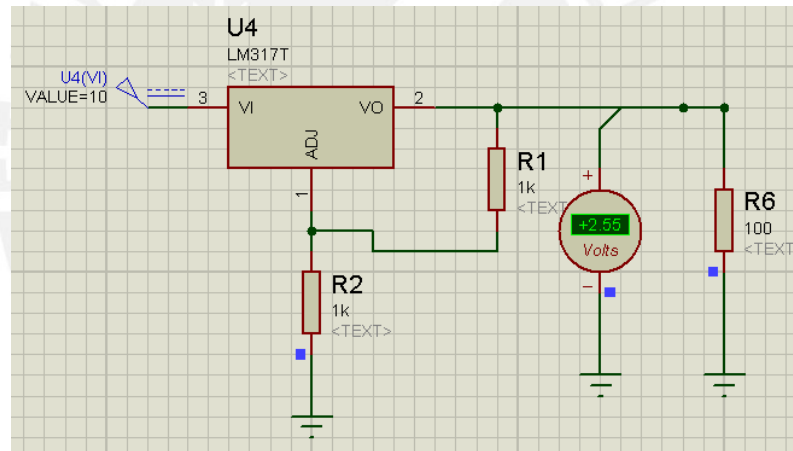


Figura 3.17: Etapa de Regulación LM317, Simulación ISIS PROTEUS

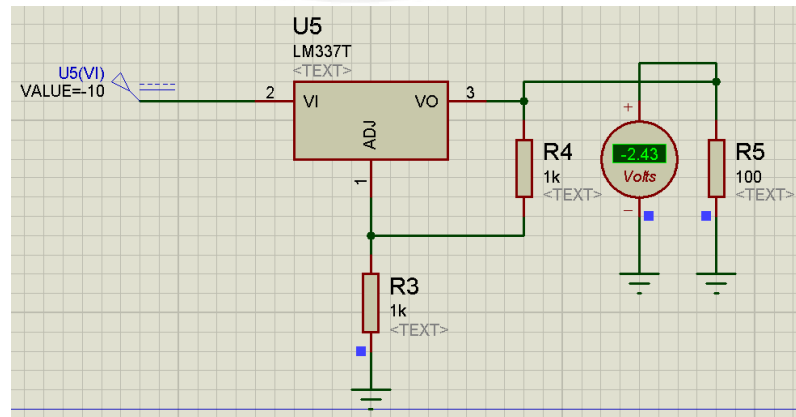


Figura 3.18: Etapa de Regulación LM337, Simulación ISIS PROTEUS

La figura 3.17 muestra la simulación para el LM317 (voltaje de salida 2.55 V), mientras que la figura 3.18 la muestra para el LM337 (voltaje de salida de -2.43 V) para una entrada de +10 V y -10 V y una carga de 25.5 y -24.3 mA respectivamente.

3.4 Programa del Microcontrolador

Las rutinas y subrutinas del microcontrolador son las siguientes:

LAZO PRINCIPAL:

Verifica si ha sido pulsado alguno de los 4 pulsadores (frecuencia o tipo para las redes 1 ó 2). Actualiza la variable *último pulsador* y llama a las subrutinas MODIFICA RED DE CRUCE y ACTUALIZA INDICADORES. Ver diagrama de flujo (fig. 3.20).

ENVIA DATA:

Subrutina que modifica el valor de la resistencia de uno de los 6 potenciómetros de uno de los 4 integrados AD5206BN100 mediante el formato SPI (fig. 3.19). Los primeros 3 bits de la trama identifican al potenciómetro y los últimos 8 el valor que éste tomará.

DIRECCION			DATO							
B10	B9	B8	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
A2	A1	A0	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0

Figura 3.19: Trama del Protocolo SPI

MODIFICA RED DE CRUCE:

Utiliza ENVIA DATA para actualizar los valores de los potenciómetros digitales según el valor de las variables de frecuencia y tipo para las redes 1 ó 2. El modo como se ejecutará dependerá del último pulsador pulsado.

ACTUALIZA INDICADORES:

Configura los LEDs indicadores según el valor de las variables de frecuencia y tipo para las redes 1 ó 2. Para indicar la frecuencia de cruce se tiene 4 LEDs por red (15 valores), mientras que para indicar el tipo se tiene 2 LEDs por red (6 valores).

3.4.1 Diagrama de Flujo

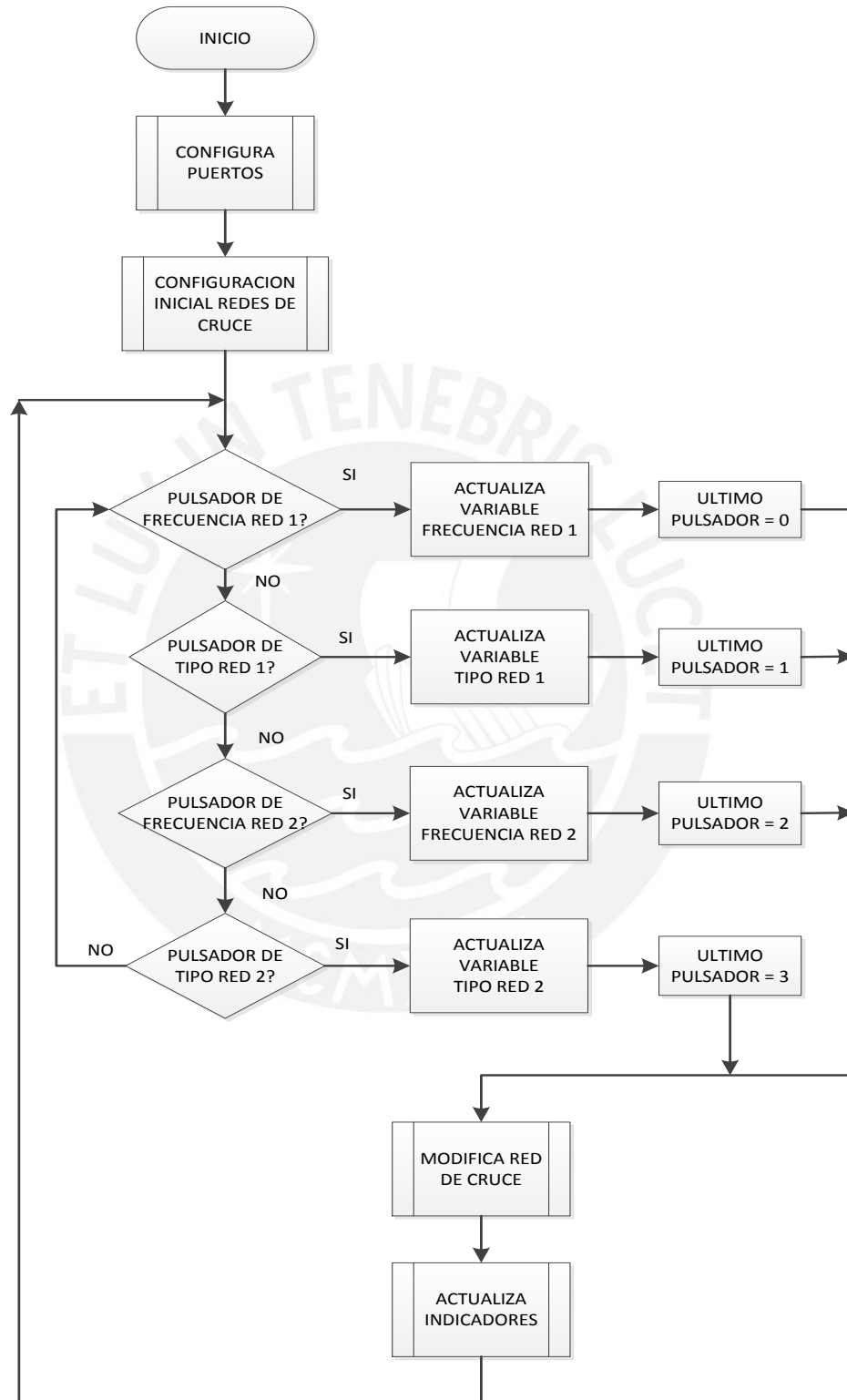


Figura 3.20: Diagrama de Flujo Principal

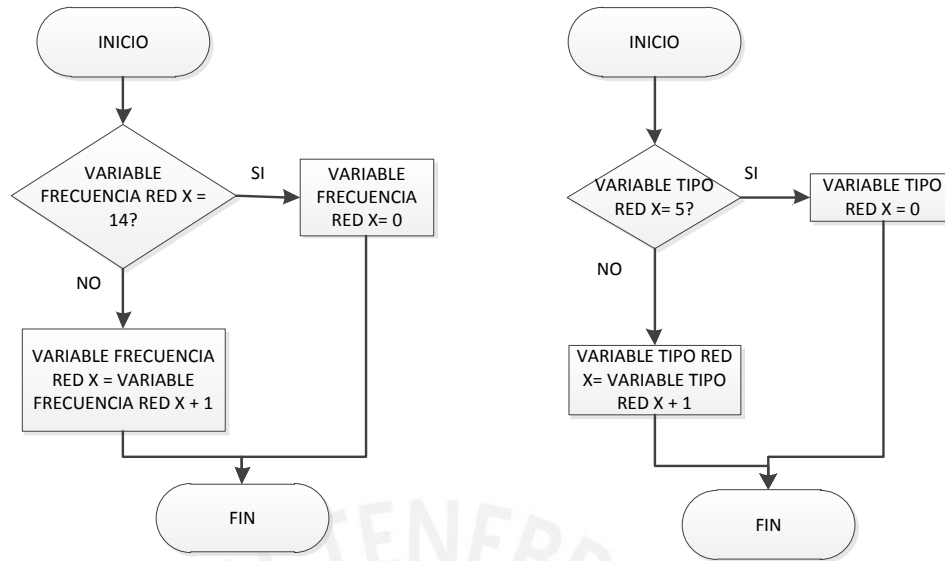


Figura 3.21: Rutina Actualiza Variable Frecuencia Red 1 ó 2 (izq.) y rutina Actualiza Variable Tipo Red 1 ó 2 (der.)

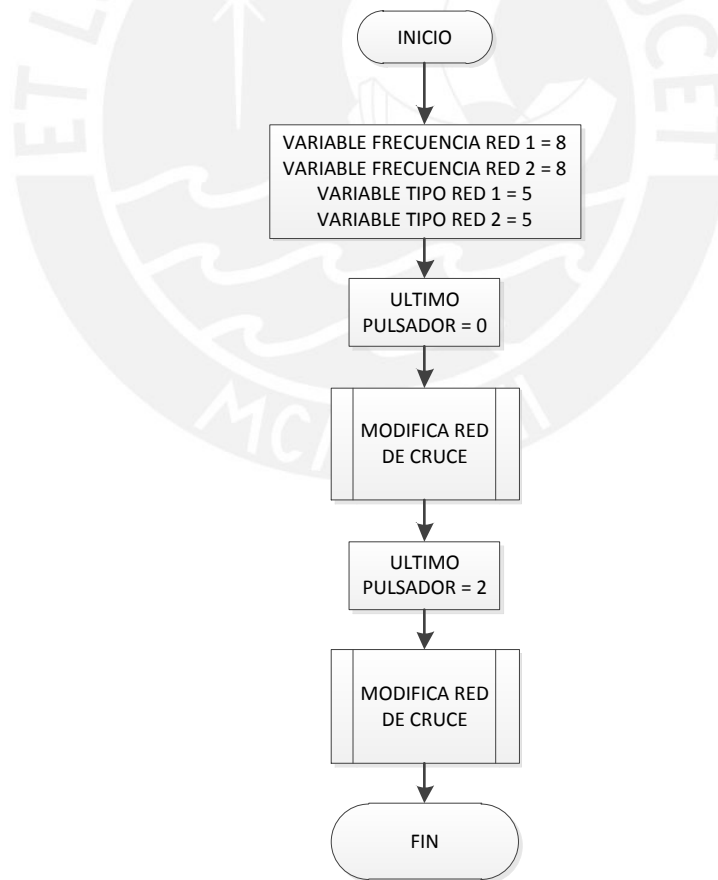


Figura 3.22: Subrutina CONFIGURACION INICIAL REDES DE CRUCE (Red 1: LR4 y 1 kHz; Red 2: LR4 y 10 kHz)

3.5 *Layout* Circuito Impreso

3.5.1 Consideraciones del *Layout*

Para la realización del *layout*, se considera que existe una tierra analógica y una tierra digital, que deben estar al mismo nivel de referencia. El posicionamiento de componentes debe separar la Etapa de Audio con la de Control, para evitar la contaminación de la señal de audio con corrientes de retorno de las señales digitales cuando se utiliza un solo plano a tierra [25].



CAPÍTULO 4

4. IMPLEMENTACION Y RESULTADOS DE PRUEBAS

4.1 Implementación total del Circuito

La implementación final de esta tesis consiste en un circuito de 17 cm * 12 cm de dimensiones a doble capa. Tal como se especificó en las consideraciones del *layout*, se aprecia (fig. 4.1) una marcada distribución de las etapas del circuito (control, procesamiento de audio y regulación). También se aprecia una distribución simétrica en la etapa de procesamiento de audio, que entre otras cosas permite separar físicamente las etapas de entrada y salida para cada filtro. El costo del prototipo implementado se encuentra en el Anexo A4.

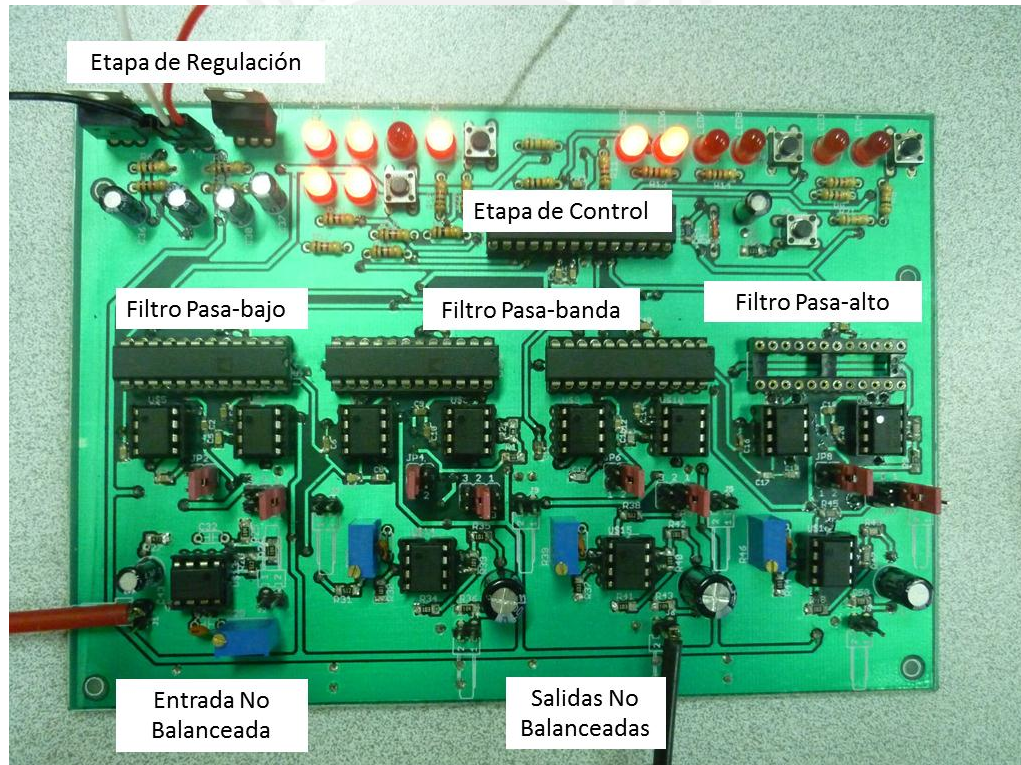


Figura 4.1: Circuito Red de Cruce de 3 Vías Implementado

4.2 Pruebas Realizadas en el Circuito

4.2.1 Respuesta en Frecuencia de cada Bloque

La prueba principal realizada al circuito Red de Cruce de 3 Vías consiste en la respuesta en frecuencia del mismo, tanto en magnitud como en fase. La respuesta en

frecuencia permitirá identificar el correcto funcionamiento del programa del microcontrolador, la correcta programación de los integrados AD5206BN100, y en general el funcionamiento total de todo el circuito según como fue diseñado. Las pruebas realizadas consideran la mayoría de todos los casos posibles; esto es, considerando los 6 tipos de alineamiento (entre Butterworth y Linkwitz - Riley) para las primeras 7 frecuencias programadas para cada una de las dos redes (la red 1 consiste en el filtro pasa-bajo de los graves con el bloque pasa-alto del filtro pasa-banda de los medios, mientras que la red 2 consiste en el bloque pasa-bajo del filtro pasa-banda de los medios con el filtro pasa-alto de los agudos).

Antes de realizar esta prueba, se comprobó el funcionamiento de cada sub-etapa de toda la etapa de procesamiento de audio (red de cruce, entrada y salidas no balanceadas) con un osciloscopio.

4.2.1.1 Banco de Pruebas

El banco de pruebas consiste en un analizador de audio (fig. 4.2), cuya salida se configura a un nivel de 100 mV, la cual se conecta a la entrada del circuito. La salida del circuito (graves, medios o agudos) se conecta a la entrada de alta impedancia (1Mohm) del analizador. El analizador es capaz de generar barridos sinusoidales de amplitud constante entre 1 Hz y 40 kHz. Para evaluar la respuesta en frecuencia en magnitud y fase de los distintos filtros se emplean barridos en el rango audible con una resolución de 1/48 oct. para la primera red y 1/24 oct. para la segunda red.



Figura 4.2: Analizador de Audio Modelo 2012 Marca Brüel & Kjaer

La alimentación dual de ± 10 V se consigue mediante dos fuentes reguladas conectadas en serie (fig. 4.4). Tanto la tierra del circuito como la del generador se conectan entre sí y con una conexión equipotencial con el pozo a tierra del laboratorio. Esta última conexión es vital para proteger al analizador y al circuito implementado. Las conexiones del analizador se aprecian en la figura 4.3.

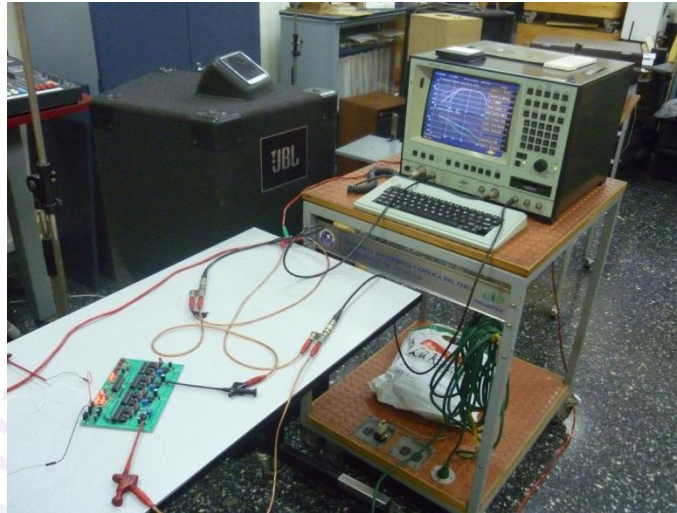


Figura 4.3: Conexiones entre el Circuito y el Analizador de Audio



Figura 4.4: Fuentes reguladas conectadas en serie

4.2.1.2 Análisis de Resultados de las Pruebas

Para el análisis de resultados de respuesta en frecuencia, los resultados se clasifican según los datos obtenidos para cada bloque pasa-alto o pasa-bajo de las dos redes. Los resultados se representan también de forma gráfica por grupos de curvas de magnitud y fase. La totalidad de las gráficas medidas se incluye en el Anexo A5. Las tablas siguientes pretenden demostrar los valores reales de frecuencias de corte (para una ganancia -3 ó -6 dB) y ganancias (en las frecuencias de corte programadas). Se resalta los valores que representan una mayor desviación según frecuencia nominal. También se muestran las pendientes medidas según tipo de alineamiento.

FILTRO PASA-BAJO:

	Frecuencias (Hz)					
	200	300	400	500	600	700
B1	211.349	316.228	421.697	530.884	630.958	739.18
B2	214.412	316.228	421.697	530.884	640.103	749.894
B3	211.349	320.812	421.697	546.386	630.958	728.618
B4	214.412	320.812	427.809	530.884	630.958	749.894
LR2	211.349	320.812	421.697	538.58	640.103	760.764
LR4	214.412	320.812	421.697	538.58	649.382	760.764

Tabla 4.1: Frecuencias de Corte Reales en Hz (-3 ó -6 dB)

B1	B2	B3	B4	LR2	LR4
5.95	11.96	18.34	23.86	11.88	23.82

Tabla 4.2: Pendientes (-dB/oct)

FILTRO PASA-BANDA (BLOQUE PASA-ALTO):

	Frecuencias (Hz)					
	200	300	400	500	600	700
B1	-3.03	-3.04	-3.05	-3.05	-3.04	-3.05
B2	-3.62	-3.66	-3.67	-3.60	-3.69	-3.60
B3	-3.32	-3.43	-3.39	-3.39	-3.47	-3.47
B4	-3.83	-3.92	-4.03	-4.00	-4.10	-4.16
LR2	-6.42	-6.47	-6.46	-6.41	-6.42	-6.12
LR4	-6.86	-6.96	-7.01	-6.89	-6.92	-6.97

Tabla 4.3: Ganancias Frecuencias de Corte Programadas (dB)

B1	B2	B3	B4	LR2	LR4
5.74	11.96	17.88	23.84	11.49	23.1

Tabla 4.4: Pendientes (+dB/oct)

FILTRO PASA-BANDA (BLOQUE PASA-BAJO):

	Frecuencias (kHz)						
	2kHz	3kHz	4kHz	5kHz	6kHz	7kHz	8kHz
B1	2.05	3.07	4.1	5.16	6.31	7.29	8.18
B2	1.88	2.82	3.65	4.73	5.62	6.49	7.08
B3	2	2.74	3.98	5.01	5.96	6.49	7.29
B4	1.88	2.82	3.76	4.73	5.62	6.68	7.5
LR2	1.88	2.82	3.76	4.73	5.62	6.31	7.5
LR4	1.94	2.9	3.76	4.73	5.62	6.68	7.72

Tabla 4.5: Frecuencias de Corte Reales en kHz (-3 ó -6 dB)

	Frecuencias (kHz)						
	2kHz	3kHz	4kHz	5kHz	6kHz	7kHz	8kHz
B1	-2.84	-2.83	-2.82	-2.82	-2.8	-2.86	-2.82
B2	-3.54	-3.5	-3.81	-3.6	-3.49	-3.69	-3.87
B3	-3.12	-4.04	-3.11	-3.11	-3.15	-4.22	-3.86
B4	-3.89	-3.73	-3.84	-4	-3.97	-4.15	-3.75
LR2	-6.4	-6.51	-6.52	-6.54	-6.47	-6.93	-6.43
LR4	-6.68	-6.67	-6.8	-6.89	-6.77	-6.99	-6.74

Tabla 4.6: Ganancias Frecuencias de Corte Programadas (dB)

B1	B2	B3	B4	LR2	LR4
5.78	11.95	18.68	23.48	11.68	23.25

Tabla 4.7: Pendientes (-dB/oct)

FILTRO PASA-ALTO:

	Frecuencias (kHz)						
	2kHz	3kHz	4kHz	5kHz	6kHz	7kHz	8kHz
B1	1.83	3.07	3.65	4.6	5.46	6.49	7.5
B2	1.88	2.82	3.76	4.73	5.62	6.49	7.5
B3	2.05	3.07	4.1	5.16	6.13	7.08	8.18
B4	2	2.99	3.98	5.01	5.96	7.08	7.94
LR2	1.83	2.74	3.65	4.6	5.46	6.31	7.29
LR4	1.94	2.9	3.87	4.87	5.79	6.88	7.94

Tabla 4.8: Frecuencias de Corte Reales en kHz (-3 ó -6 dB)

	Frecuencias (kHz)						
	2kHz	3kHz	4kHz	5kHz	6kHz	7kHz	8kHz
B1	-2.63	-3.09	-2.64	-2.63	-2.64	-2.58	-2.7
B2	-2.58	-2.55	-2.51	-2.48	-2.54	-2.35	-2.5
B3	-3.27	-3.31	-3.25	-3.26	-3.32	-3.14	-3.38
B4	-3.07	-3.02	-2.91	-3.11	-3.03	-2.81	-2.87
LR2	-5.31	-5.36	-5.28	-5.23	-5.23	-5.08	-5.37
LR4	-5.52	-5.55	-5.56	-5.52	-5.58	-5.34	-5.85

Tabla 4.9 Ganancias frecuencias de Corte Programadas (dB)

B1	B2	B3	B4	LR2	LR4
5.89	12.11	17.95	23.54	11.72	23.46

Tabla 4.10: Pendientes (+dB/oct)

A continuación se representan las familias de curvas para el alineamiento Linkwitz - Riley de cuarto orden para los bloques de filtros tanto en magnitud como en fase:

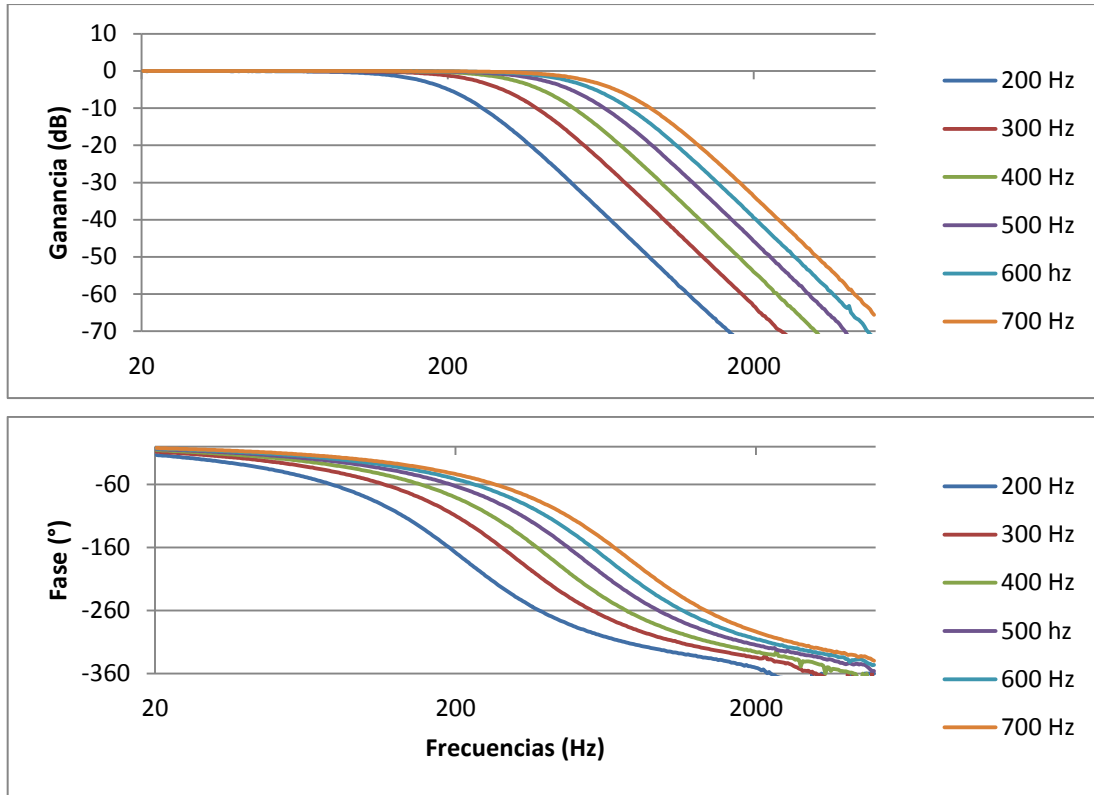


Figura 4.5: Alineamiento LR4, Filtro Pasa-bajo

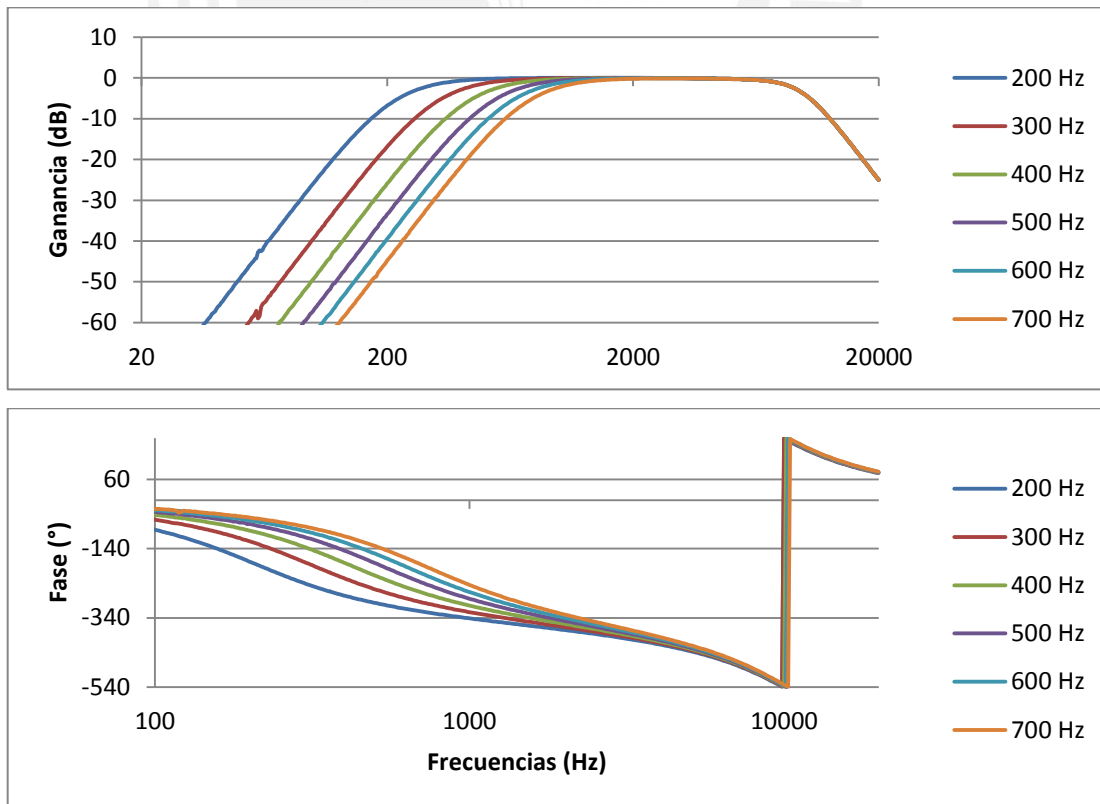


Figura 4.6: Alineamiento LR4, Filtro Pasa-banda (Bloque Pasa-alto)

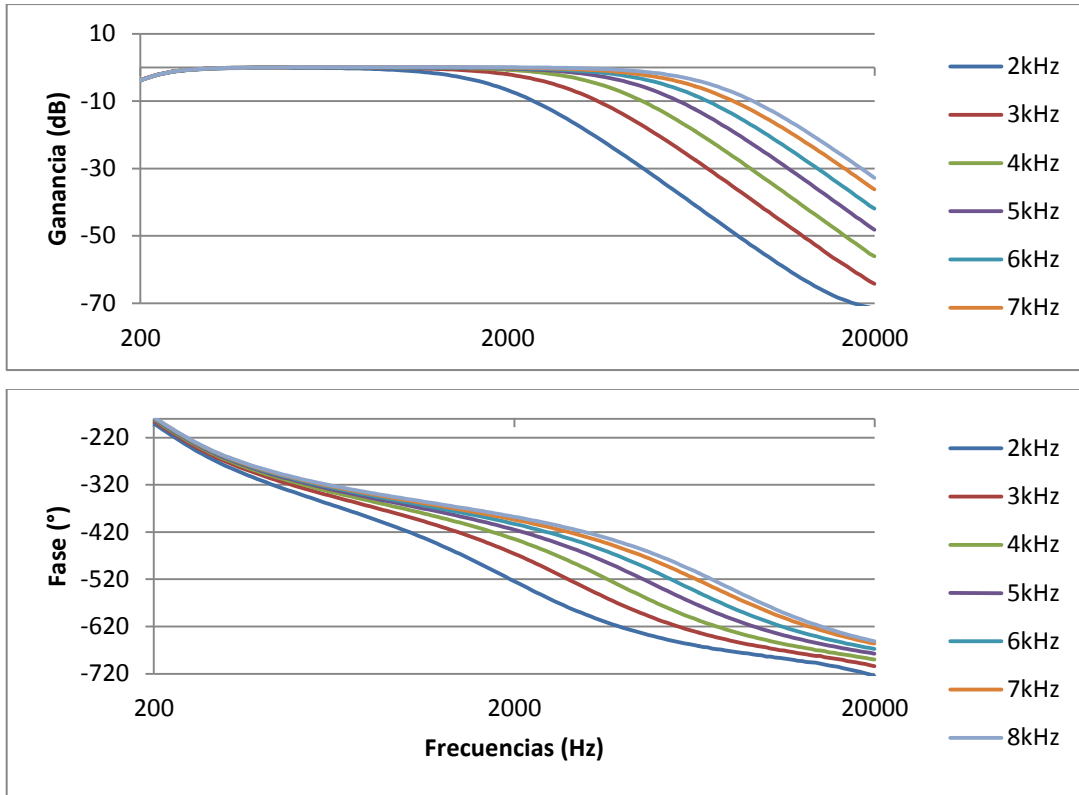


Figura 4.7: Alineamiento LR4, Filtro Pasa-banda (Bloque Pasa-bajo)

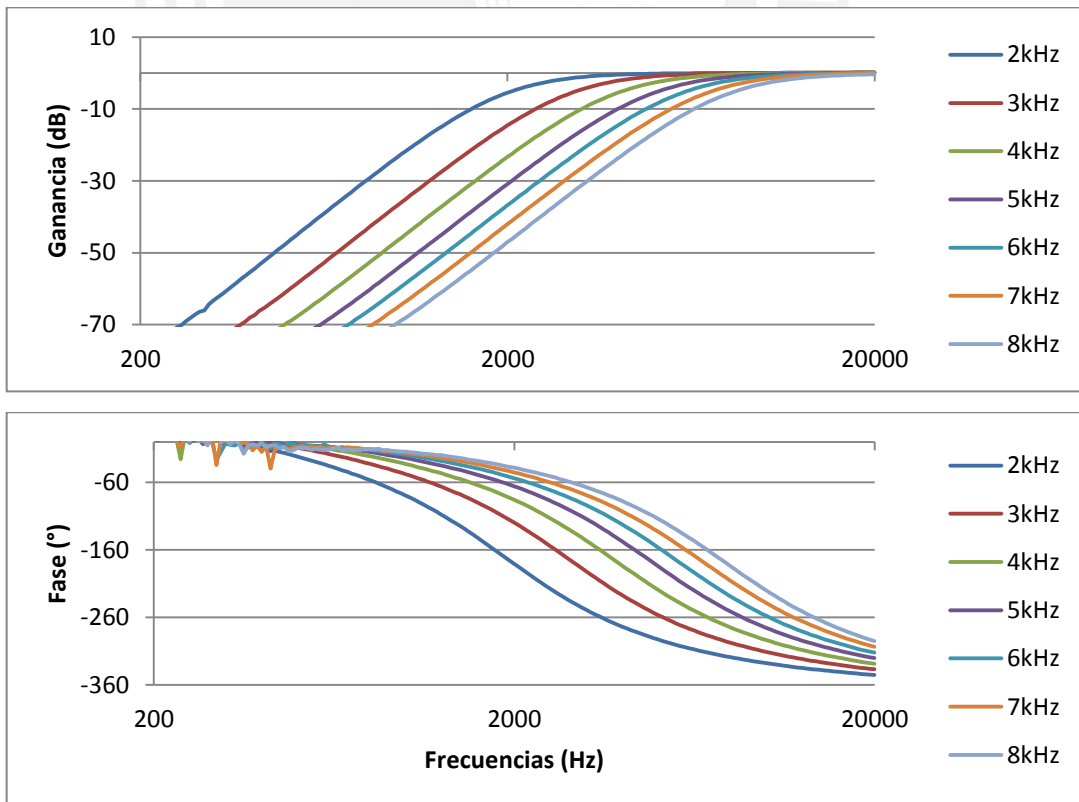


Figura 4.8: Alineamiento LR4, Filtro Pasa-alto

Las curvas mostradas demuestran la validez del diseño para configurarse a diferentes frecuencias de corte. Se aprecia las características de ganancia (pendientes) y fase típicas de los filtros Linkwitz - Riley de cuarto orden.

4.2.2 Caracterización Señal a Ruido del Circuito

La segunda prueba realizada permite determinar la relación señal a ruido para cada una de las 3 salidas del circuito (bajos, medios y agudos). El método para realizar esta prueba consiste en cortocircuitar la entrada y medir el ruido de fondo en una de las 3 salidas con un analizador de FFT de dos canales, midiendo el autoespectro en uno de sus canales. Se midió el ruido de fondo para 2 configuraciones de frecuencias de corte para cada uno de los 6 alineamientos implementados para cada una de las 3 salidas.

4.2.2.1 Banco de Pruebas

Para esta prueba se utiliza el analizador de FFT 2035 de Brüel & Kjaer (fig. 4.9). Este analizador presenta una matriz de salida de 800 líneas. Las pruebas se realizan con un rango en frecuencia de 0 a 1.6 kHz y de 0 a 25.6 kHz. Es necesario medir en estos dos rangos para garantizar una buena resolución en la medición.



Figura 4.9: Analizador de FFT Modelo 2035 Marca Brüel & Kjaer

Al igual que la prueba anterior, la tierra del circuito y la del analizador deben conectarse al pozo a tierra del laboratorio. Para conseguir la relación S/N planteada en los requerimientos de esta tesis, es necesario blindar el circuito y conectar este blindaje con la tierra del circuito (fig. 4.10).

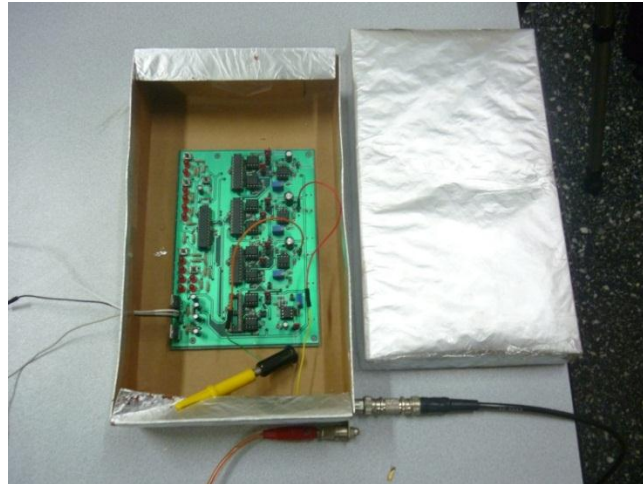


Figura 4.10: Apantallamiento electromagnético del circuito

4.2.2.2 Análisis de Resultados de las Pruebas

Para todos los casos medidos, se presenta las gráficas de los espectros de ruido de fondo tanto para el rango de 0 a 1.6 kHz como para el rango de 0 a 25.6 kHz en el Anexo A6.

Las tablas siguientes resumen los máximos valores de ruido medidos por el analizador en el rango audible para los distintos alineamientos y para dos configuraciones de frecuencias de corte. Se resalta el máximo valor por salida:

	B1	B2	B3	B4	LR2	LR4
200 Hz	3.37	1.99	3.24	3.14	4.29	10.9
1000 Hz	7.1	1.97	2.36	1.35	5.77	

Tabla 4.11: Niveles Máximos de Ruido en micro-voltios salida Bajos

	B1	B2	B3	B4	LR2	LR4
800Hz - 4kHz	2.32	1.68	1.9	1.38	2.35	1.71
200Hz - 10kHz	1.85	4.34	1.58	2.66	2.58	1.46

Tabla 4.12: Niveles Máximos de Ruido en micro-voltios salida Medios

	B1	B2	B3	B4	LR2	LR4
2kHz	1.71	4.37	2.93	1.98	3.68	1.16
10kHz	1.63	4.61	1.93	1.14	2.25	1.47

Tabla 4.13: Niveles Máximos de Ruido en micro-voltios salida Agudos

La relación S/N se define como:

$$\frac{S}{N} = 20 * \log\left(\frac{\text{nivel referencia}}{\text{nivel ruido}}\right)$$

Para una señal de referencia de 300 mV, se determina la S/N mínima por salida.

Salida	S/N
Bajos	92.51 dB
Medios	96.79 dB
Agudos	96.27 dB

Se obtiene así una relación S/N de por lo menos **92.51 dB** en todos los casos, cumpliendo los requerimientos de diseño.

Se presenta las gráficas de los espectros para los casos máximos por salida (tablas 4.11 a 4.13). En los espectros de 0 a 25.6 kHz debe tomarse en cuenta los valores de ruido de fondo comprendidos entre 1 y 25 kHz para garantizar una buena resolución.

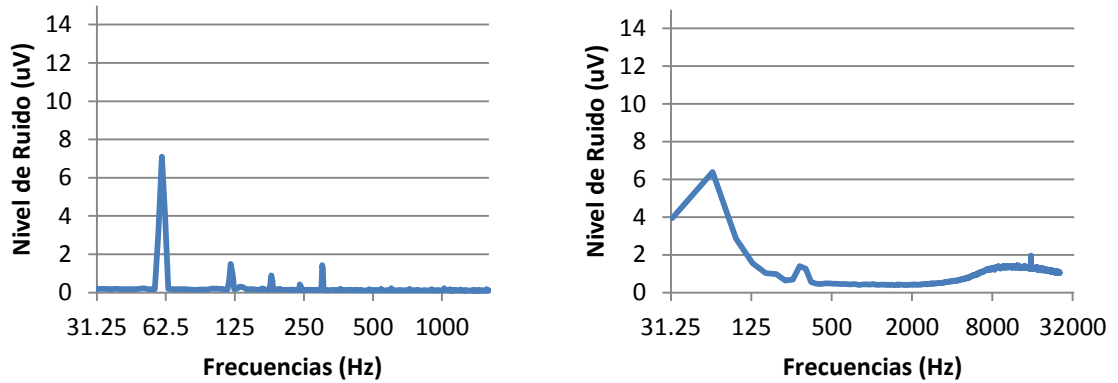


Figura 4.11: Espectro de ruido salida Bajos (B1, Fc = 1000 Hz)

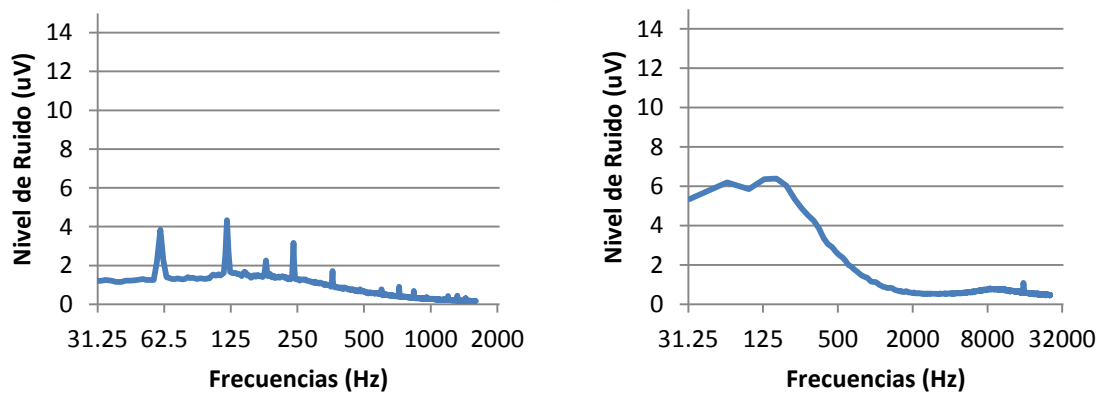
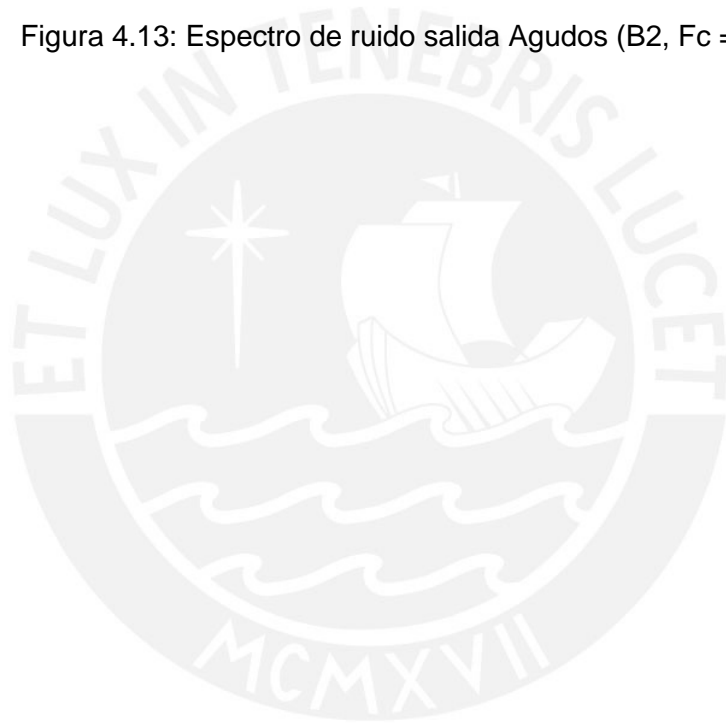


Figura 4.12: Espectro de ruido salida Medios (B2, Bw = 200 Hz – 10 kHz)



Figura 4.13: Espectro de ruido salida Agudos (B2, Fc = 10 kHz)



CONCLUSIONES

- Ha sido posible diseñar una red de cruce basada en topologías de filtros activos, potenciómetros digitales y amplificadores operacionales, consiguiendo las características de una red de cruce comercial.
- Los errores y tolerancias encontrados son aceptables para un dispositivo de este tipo para uso profesional.
- Se ha podido demostrar que la configuración implementada blindada adecuadamente permite obtener una relación S/N de 92.51 dB para un nivel de referencia de 300 mV, la cual es adecuada para una aplicación profesional.

RECOMENDACIONES

- Este trabajo puede ser perfeccionado agregándole al sistema líneas de retardo de tiempo que permitan el alineamiento temporal de altavoces en una caja de uso doméstico o de sistemas de altavoces en audio profesional.
- Se puede mejorar el diseño para adaptarlo a un sistema de dos vías de uso general o de 4 vías para incluir un subwoofer.
- Se recomienda mejorar la etapa de interfaz de salida reemplazando los LEDs indicadores por una pantalla LCD lo que permitiría disminuir el consumo de potencia del circuito total.
- Se recomienda culminar este proyecto en su totalidad pues la implementación de cada parte del dispositivo acarrea un grado importante de dificultad, que al ser superado por el diseñador ampliará de forma importante el criterio de diseño de éste.

BIBLIOGRAFIA

- [1] DAVIS, Gary y Ralph Jones
1990 *The Sound Reinforcement Handbook*. Milwaukee: Hal Leonard Publishing Education.
- [2] AHNERT, Wolfgang y Frank Steffen
1999 *Sound Reinforcement Engineering: Fundamentals and Practice*. Londres: E & amp
- [3] PUEO, Basilio y Miguel ROMÁ
2003 *Electroacústica. Altavoces y Micrófonos*. Madrid: Pearson Educación, SA.
- [4] MITCHELL, Jay
2000 "Frequency Crossroads". *Sound and Video Contractor*. Volumen 18, número 11, pg. 26
- [5] BOHN, Dennis
2005 "Linkwitz-Riley Crossovers: A Primer". [Consulta: 16 de Octubre de 2011]
<<http://www.rane.com/note160.html>>
- [6] GROUP TECHNOLOGIES INC
2006 "Line up for the RCF line array" [Consulta 17 de Junio de 2012]
<<http://www.gtaust.com/filter/12/09.shtml>>
- [7] DICKASON, Vance
2006 *The loudspeaker design cookbook*. Séptima Edición. New Hampshire: Audio Amateur Press
- [8] VISATON GERMANY
2007 "HW 3/120 NG 4 OHM" [Consulta: 16 de Octubre de 2011]
<http://www.visaton.de/en/chassis_zubehoer/weichen/285.html>
- [9] RANE CORPORATION
2007 *Hoja de Datos Red de Cruce Activa AC 22S*. Mukilteo. [Consulta: 11 de Abril de 2012]
<<http://www.rane.com/pdf/ac22sdat.pdf>>
- [10] RANE CORPORATION
2007 *Hoja de Datos Red de Cruce Activa AC 23S*. Mukilteo. [Consulta: 11 de Abril de 2012]
<<http://www.rane.com/pdf/ac23sdat.pdf>>
- [11] TOA ELECTRONICS, INC
2001 *Hoja Técnica Procesador Digital de Señales DP-0206*. San Francisco [Consulta: 12 de Noviembre de 2011]
<http://www.toaelectronics.com/spec_sheets/dp-0206_spec.pdf>

- [12] DBX, INC
2001 *Manual de Usuario del Sistema de Procesamiento de Señales DRIVERACK 4800.* Utah [Consulta: 02 de Junio de 2012]
<<ftp://ftp.dbxpro.com/pub/PDFs/Manuals/English/4800-4820%20Manual%2018-0353-B.pdf>>
- [13] DENKY AUDIOPRO
2012 “Acerca de Denky Audio Pro”. [Consulta: 20 de Junio de 2012]
<<http://www.denky.com/>>
- [14] RANE CORPORATION
2007 *Diagrama Esquemático Red de Cruce AC 22S.* Mukilteo. [Consulta: 11 de Abril de 2012]
<<http://www.rane.com/pdf/ac22ssch.pdf>>
- [15] ST MICROELECTRONICS
2008 *Hoja Técnica del Amplificador Operacional TL072.* [Consulta: 10 de Junio de 2012]
<<http://elcodis.com/parts/1322239/TL072CDT.html>>
- [16] TEXAS INSTRUMENTS INC.
2009 *Hoja Técnica del Amplificador Operacional NE5532.* [Consulta: 10 de Junio de 2012]
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne5532.pdf>>
- [17] JAPAN RADIO CORPORATION LTD.
2011 *Hoja Técnica del Amplificador Operacional NJM5534.* [Consulta: 10 de Junio de 2012]
<http://us.100y.com.tw/pdf_file/33-JRC-NJM5534.pdf>
- [18] MOTOROLA INC.
2006 *Hoja Técnica del Amplificador Operacional MC33078.* [Consulta: 10 de Junio de 2012]
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/mc33078.pdf>>
- [19] ANALOG DEVICES INC.
2010 *Hoja Técnica del Circuito Integrado AD5206.* [Consulta: 10 de Abril de 2012]
<http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD5204_5206.pdf>
- [20] WHITLOCK, Bill
1995 “Interconnection of Balanced and Unbalanced Equipment” [Consulta: 08 de Mayo de 2012]
<<http://www.jensen-transformers.com/an/an003.pdf>>
- [21] ATMEL CORPORATION
2012 “ATmega88” [Consulta: 20 de Junio de 2012]
<<http://www.atmel.com/devices/ATMEGA88.aspx>>

[22] ATMEL CORPORATION

2011 *Hoja Técnica del Microcontrolador ATmega88*
[Consulta: 10 de Mayo de 2012]
<<http://www.atmel.com/Images/8271s.pdf>>

[23] NATIONAL SEMICONDUCTORS

1996 *Hoja Técnica del Regulador LM317* [Consulta: 10 de Mayo de 2012]
<<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/nationalsemiconductor/DS009063.PDF>>

[24] NATIONAL SEMICONDUCTORS

1995 *Hoja Técnica del Regulador LM337* [Consulta: 10 de Mayo de 2012]
<<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/nationalsemiconductor/DS009067.PDF>>

[25] W. OTT, Henry

2001 "Partitioning and Layout of a Mixed Signal PCB"
[Consulta: 02 de Junio de 2012]
<http://www.hottconsultants.com/pdf_files/june2001pcd_mixedsignal.pdf>

[26] DIGI-KEY CORPORATION

2012 "AD5206BN100" [Consulta: 20 de Junio de 2012]
<<http://www.digikey.com/product-detail/en/AD5206BN100/AD5206BN100-ND/617183>>

ANEXOS

ANEXO A1: TOPOLOGIAS FILTROS ACTIVOS

ANEXO A2: VALORES DE RESISTENCIAS

ANEXO A3: DESARROLLO DEL ERROR POR PROPAGACION

ANEXO A4: DESARROLLO DEL PRESUPUESTO

ANEXO A5: GRAFICAS PRUEBAS RESPUESTA EN FRECUENCIA

ANEXO A6: GRAFICAS PRUEBAS CARACTERIZACIÓN SEÑAL A RUIDO

ANEXO A7: DIAGRAMA ESQUEMATICO RED DE CRUCE DE 3 VIAS