

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIE
Facultad de
Ingeniería Eléctrica

Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Medición de parámetros de comportamiento de amplificadores de audio en un laboratorio docente.

Autor: Javier Alejandro Hernández Rodríguez.

Tutor: Dr.C. Miguel Mendoza Reyes.

Santa Clara , Enero 2023
Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIE
Facultad de
Ingeniería Eléctrica

Academic Department of Telecommunications and Electronics

TRABAJO DE DIPLOMA

Title: Measurement of parameters of conduct of amplifiers of audio in an educational laboratory.

Author: Javier Alejandro Hernández Rodríguez.

Thesis Director: Dr.C. Miguel Mendoza Reyes.

Santa Clara , January 2023

Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419



ACTA DE CONFORMIDAD PARA ESTUDIANTES DE PREGRADO

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Por una parte: _____
estudiante de la carrera de: _____

en la facultad de: _____

_____, en lo adelante **EI ESTUDIANTE**. Con número de identidad permanente: _____ o pasaporte: _____.

Y por otra parte _____ Jefe del Departamento Docente de:

_____ en la ya mencionada facultad, en lo adelante **EL JEFE DE DEPARTAMENTO**, y

_____ profesor(es) encargado(s) de tuturar el Trabajo de Diploma **DEL ESTUDIANTE**, en lo adelante **EL TUTOR**.

Reconocen que:

- I. A **EL ESTUDIANTE** se le ha aprobado como tema de investigación para su Trabajo de Diploma el titulado _____
- II. **EL ESTUDIANTE** no divulgará información concerniente a la investigación, tanto durante el desarrollo como tras la culminación de esta sin la debida autorización **DEL TUTOR** o **EL JEFE DE DEPARTAMENTO**.
- III. Que el Trabajo de Diploma fruto de la labor investigativa de **EL ESTUDIANTE** y la asesoría de **EL TUTOR**, resulta de **TITULARIDAD EXCLUSIVA** de la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- IV. **EI ESTUDIANTE** una vez aprobada su tesis para la defensa, depositará una copia electrónica de la misma en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- V. A partir de la defensa y aprobación del Trabajo de Diploma, la publicación total, parcial o la elaboración de cualquier obra que se derive de esta investigación por parte de **EL ESTUDIANTE**, contará con la coautoría de **EL TUTOR** y viceversa, resultando de referencia obligada esta obra en cualquier otra que se elabore. El incumplimiento de esta cláusula, puede llevar consigo el inicio de procesos de plagio. Todo lo anterior de acuerdo a la normativa de Derecho de Autor vigente en Cuba.

Y para que así conste se firma la presente en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, a los _____ días del mes de _____ del año 20____.

EL ESTUDIANTE

JEFE DE DEPARTAMENTO

TUTOR

TUTOR



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

Pensamiento

“El éxito no es un accidente, es trabajo duro, perseverancia, aprendizaje, estudio, sacrificio y lo más importante de todo, amor por lo que estás haciendo o aprendiendo a hacer.”

Pelé

Dedicatoria

A mis padres.

Agradecimientos

A mis padres por su entrega y sacrificio incondicional.

A mi amiga Ariham por su apoyo y motivación.

A mi tutor quien desde sus clases despertó mi inclinación por el mundo del sonido.

A los técnicos del laboratorio Jorge Luis y su hijo Luis Jorge.

Sinceramente ¡gracias!

Tarea técnica

- Actualización de los contenidos de trabajo.
- Actualización de las fuentes bibliográficas.
- Asimilación de los materiales y métodos de la investigación.
- Realización de experimentos y obtención de resultados de simulación.
- Análisis de los resultados experimentales.
- Terminación de la escritura del informe de tesis.

Firma del Autor

Firma del Tutor

Resumen

El presente Trabajo de Diploma se realizó atendiendo a la necesidad de incorporar actividades prácticas reales en el tema “Amplificadores de Potencia” de la asignatura “Sistemas de Audio” impartida en la carrera Telecomunicaciones y Electrónica. Se tratan los fundamentos teóricos de los amplificadores de potencia de audio y se propone una compilación de ejercicios prácticos de laboratorio real teniendo en cuenta los requerimientos de la asignatura. A partir de la disponibilidad de equipos y componentes se presentan guías para la realización de las mediciones de los principales parámetros de los amplificadores de potencia de audio. El procesamiento y análisis de los resultados de la implementación de las guías así como la valoración económica de las propuestas permitieron confirmar la viabilidad de las mismas. El resultado de esta investigación contribuye a solucionar el déficit de actividades prácticas reales en la asignatura.

Tabla de contenidos

Pensamiento	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Tarea técnica	iv
Resumen	v
Introducción	1
Capítulo 1 Fundamentos de los amplificadores de potencia de audio	4
1.1 Funciones del amplificador de potencia de audio (APA)	4
1.2 Secciones del APA	4
1.3 Tipos de APA	6
1.3.1 Configuraciones de amplificadores de audio	6
1.3.2 Amplificadores integrados	11
1.4 Parámetros de comportamiento del APA	12
1.5 Medición de los parámetros de comportamiento del APA	18
1.6 Tendencias	24
1.7 Normas vigentes	26
1.8 Conclusiones del capítulo	27

Capítulo 2 Propuestas de ejercicios prácticos de laboratorio real	28
2.1 Temas de ejercicios prácticos a realizar	28
2.2 Variantes de implementación	28
2.3 Recursos disponibles	29
2.4 Selección de variantes de implementación	31
2.5 Diseño y montaje de módulos amplificadores de potencia basados en el TBA810 ..	34
2.6 Diseño experimental	35
2.6.1 Procedimiento para determinar la sensibilidad	37
2.6.2 Procedimiento para determinar la impedancia de entrada y salida	38
2.6.3 Procedimiento para determinar la ganancia de tensión	39
2.6.4 Procedimiento para determinar la potencia de salida	40
2.6.5 Procedimiento para determinar el ancho de banda	40
2.6.6 Procedimiento para determinar la respuesta de fase	41
2.6.7 Procedimiento para determinar la THD	42
2.7 Conclusiones del capítulo	43
Capítulo 3 Análisis de resultados	45
3.1 Relación de resultados experimentales	45
3.2 Procesamiento de resultados	46
3.3 Valoración económica	50
3.4 Análisis de factibilidad de las propuestas	51

3.5 Comparación de los resultados obtenidos	52
3.6 Conclusiones del capítulo	53
Conclusiones generales	54
Recomendaciones	55
Referencias bibliográficas	56

Introducción

La experiencia como dinámica educativa tiene un gran aporte en la formación del conocimiento. Esto se debe a que los componentes de incertidumbre, vivencias personales y de complejidades que distinguen los problemas que tiene la práctica real, no se pueden adquirir en el aula, ni tampoco reproducir en laboratorios de simulación. La incorporación de dinámicas de aprendizaje contribuye a una formación competente y eficiente de la docencia. La capacidad de aplicar conocimientos teóricos y prácticos para resolver problemas, la capacidad de involucrarse personalmente en el trabajo, de trabajar bajo presión y en equipo garantizan experiencias realmente auténticas que se pueden conseguir singularmente en ámbitos prácticos [1].

Los programas de estudio de diversas universidades de gran prestigio, contemplan temas relacionados con la producción, transmisión y procesamiento del sonido. Estos han sido dirigidos desde cursos hasta asignaturas de varias carreras de corte tecnológico, social, artístico, entre otros. Paralelamente, la asignatura Sistemas de Audio es impartida durante el primer semestre de tercer año de la carrera Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica en la “Universidad Central Marta Abreu de Las Villas” [2].

La asignatura Sistemas de Audio presenta en su modalidad presencial un total de 48 horas clases; distribuidas entre conferencias, clases prácticas, laboratorios simulados y guías de ejercicios para la ejercitación del estudiante. Debido a que se realizan dos cortes evaluativos mediante pruebas de control parcial y no tener examen final es importante el uso de evaluaciones sistemáticas en cada actividad docente para tener el control de la evolución del aprendizaje, pudiendo ser dichas actividades evaluativas mediante preguntas orales, preguntas escritas, foros y la observación del profesor.

La formación universitaria debe continuar aproximando los estudiantes a una realidad profesional en la que se deberán desempeñar una vez que hayan finalizado sus estudios. Por ello, se consideran importantes aquellas actividades diseñadas para desarrollar los créditos prácticos de las asignaturas científicas que se imparten en la universidad, con objetivos lo suficientemente explícitos, que

Introducción

ayuden a los estudiantes, además de aprender ciencia, aprendan sobre la ciencia y también, aprendan a hacer ciencia [3].

Definición del problema

La asignatura Sistemas de Audio cuenta con buena cantidad de actividades teóricas, así como laboratorios de simulación virtual. Sin embargo, en su disciplina carece de actividades prácticas de desarrollo en un laboratorio real. Existen limitaciones por disponibilidad de equipamiento y principalmente de componentes para su realización. Por consiguiente, se plantea la necesidad de dar respuesta a la siguiente

Interrogante científica:

¿Es posible implementar prácticas reales de laboratorio en el tema amplificadores de potencia de audio en la asignatura Sistemas de Audio?

Para dar respuesta a la anterior interrogante y atendiendo a la problemática anteriormente descrita, el presente trabajo se realiza para dar cumplimiento a los siguientes objetivos:

Objetivo general

- Diseñar actividades reales de laboratorio a partir del uso del equipamiento y componentes existentes.

Para apoyar el cumplimiento del objetivo general se trazaron los siguientes

Objetivos específicos

- Aumentar la proporción de actividades prácticas en la disciplina de la asignatura.
- Seleccionar las actividades de evaluación de aprendizaje más apropiadas atendiendo a la disponibilidad de recursos existentes.
- Implementar las actividades y ejercicios evaluativos en el laboratorio real docente.

Tareas de la investigación

Las tareas a desarrollar como parte del trabajo investigativo son:

- Actualización de los contenidos de trabajo.
- Actualización de las fuentes bibliográficas.
- Asimilación de los materiales y métodos de la investigación.
- Realización de los experimentos y obtención de resultados de simulación.

Introducción

- Análisis de los resultados experimentales.

Estructura del informe

El informe de la tesis está estructurado en tres capítulos. El primero se encuentra dedicado a los fundamentos de los amplificadores de potencia de audio, dirigido desde las etapas y tipos hasta los amplificadores de potencia integrados y las tendencias actuales que existen. El segundo capítulo propone el diseño de ejercicios prácticos de laboratorio real con sus variantes de implementación a partir de los recursos disponibles, basados en los amplificadores de potencia integrados. El tercero y capítulo final presenta el análisis de los resultados experimentales obtenidos. Por último, se tienen las conclusiones del trabajo investigativo y posteriormente, se ofrecen recomendaciones.

Capítulo 1 Fundamentos de los amplificadores de potencia de audio

Este primer capítulo se encuentra dirigido a las bases teóricas o fundamentos de los amplificadores de potencia de audio. Para ello se realizó una revisión bibliográfica con la información científica necesaria para estudiar el tema.

1.1 Funciones del amplificador de potencia de audio (APA)

La función de un amplificador de potencia de audio es aumentar un parámetro concreto de la señal eléctrica recibida en su entrada, para entregarla a una carga generalmente de baja impedancia que, por consiguiente, conduzca a un incremento de la potencia de salida de dicha señal. Esta es una tarea exigente, ya que se requiere amplificar una señal sin alterar sus características y consecuentemente en señales auditivas, su espectro contempla un rango bastante amplio de frecuencias, las cuales deben ser amplificadas con la misma ganancia para evitar distorsionar la forma de la onda y por lo tanto no afectar la calidad del sonido.

En un amplificador de potencia se suele aumentar la amplitud de la señal de entrada, pues el circuito está diseñado para ser capaz de proporcionar corrientes inusualmente altas a su salida. Todos los amplificadores requieren de una tensión de alimentación continua que es la encargada de polarizar los transistores que los componen y teniendo en cuenta la tensión de entrada se modifica su punto de trabajo para obtener una correcta amplificación [4].

1.2 Secciones del APA

En la actualidad existen amplificadores de audio desde 2 hasta 5 etapas de amplificación. Sin embargo, la mayoría de los amplificadores convencionales tienen una arquitectura de 3 etapas, debido a que poseen una estructura robusta y menos complicada, además de ser económicamente factibles. Estas pueden variar dependiendo del tipo de amplificador que queramos construir. Las 3 etapas son [6], [7]:

- Etapa de entrada o etapa diferencial: Es la parte del circuito encargada de recibir la señal de audio para amplificarla posteriormente. La etapa diferencial básica consta de dos entradas, una inversora y otra no inversora, con dos salidas desfasadas 180 grados. Esta amplifica una diferencia entre ambas señales y no la parte común, lo que sirve, por ejemplo, para cancelar los ruidos que se inducen en la línea. La habilidad de no amplificar la parte común y sí la diferencial se llama rechazo

Capítulo 1

al modo común (CMRR, Common Mode Rejection Ratio). Las señales de entrada suelen ser de baja intensidad y tensión por lo que esta etapa debe estar bien diseñada pues resulta fácil añadir ruido degradando la calidad del dispositivo. Esta etapa también permite restar una parte de la señal realimentada de la señal de entrada, conocido como la técnica de realimentación negativa permitiendo estabilizar la ganancia, así como corregir la distorsión.

- Etapa de amplificación de tensión: Es la encargada de aumentar la tensión de entrada y adecuarla según la tensión de salida deseada. Dicha ganancia de tensión es mucho mayor que en la etapa diferencial. Vale destacar el papel exigente que desempeña esta etapa y eso se debe principalmente a que da una salida de tensión de gran amplitud que define en gran medida la potencia del amplificador.

- Etapa de salida o etapa de amplificación de corriente: También conocida como etapa de potencia, es la encargada de incrementar la corriente suministrada a la carga. La cantidad de corriente proporcionada dependerá tanto del tipo de configuración empleada como del valor de la carga normalmente entre 2 y 16 Ω . Además, posee una ganancia de tensión unitaria levemente menor que la unidad. Idealmente tiene una impedancia de entrada infinita, para no degenerar el trabajo previo de las etapas de ganancia de voltaje, que tienen altas impedancias de salida; en la práctica la impedancia de entrada depende del tipo de transistor empleado a la salida, pero en general se obtienen valores muy altos, mayores a 100 K Ω . Por otra parte, la mayoría de los amplificadores en su etapa de salida cuentan con un circuito de realimentación negativa, realimentando parte de la señal de salida a la entrada lo que constituye una mejora en cuanto a la estabilidad de la ganancia y la reducción de la distorsión.

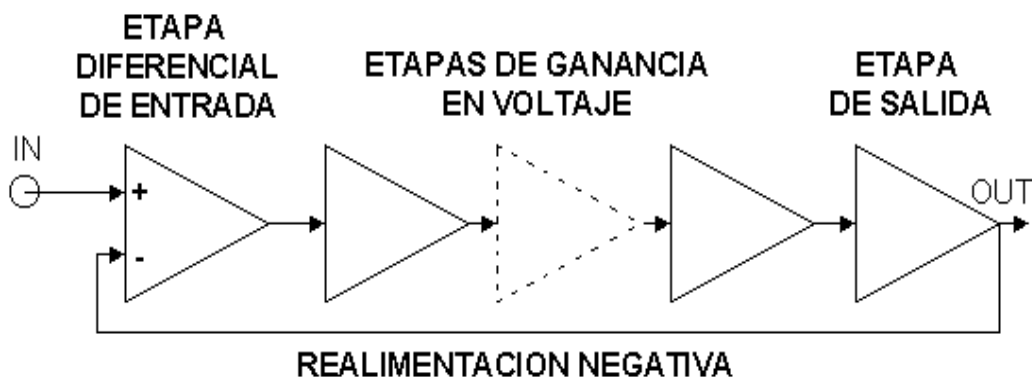


Figura 1.1: Estructura lógica representativa de las etapas del amplificador de potencia

Capítulo 1

Es útil señalar lo importantes que constituyen los acoples de impedancias para cada una de las etapas antes mencionadas. El acoplamiento establece la forma en la cual se conectan las distintas etapas amplificadoras, dependiendo de la naturaleza de la aplicación y las características de respuesta que se desean. Las etapas previas a la de salida requieren preservar la ganancia de tensión obtenida para cada una de las fases de amplificación y para ello es consecuente lograr una alta impedancia de entrada y muy baja impedancia de salida, idealmente infinito y cero respectivamente. De forma similar en la etapa de salida o de potencia se requiere máxima transferencia de potencia a la carga. Con el objetivo de preservarla se hace necesario que tanto la impedancia de salida como la de entrada para la siguiente etapa de potencia sean iguales [7].

1.3 Tipos de APA

Existen diferentes clasificaciones para los amplificadores electrónicos, según la variable tomada en consideración. Una posible clasificación los divide en amplificadores de señales débiles y de señales fuertes. Otra clasificación es según la frecuencia de las señales a amplificar, ya sean frecuencias de audio o videofrecuencias. Estos, a su vez, pueden contar con monoetapas o multietapas y dentro de estos últimos también pueden ser discretos, integrados o híbridos. Además, se tienen a lazo abierto o a lazo cerrado y dentro de los anteriores se sitúan también balanceados y desbalanceados. Pueden clasificarse según como esté conectada su carga terminal, es decir, flotante o referida a tierra. Además, referido a las relaciones de las variables de salida con las variables de entrada del amplificador, lo que resulta en amplificadores de tensión, corriente, dígame transconductancia y transimpedancia.

Por último, según su forma de operación o trabajo se dividen en las siguientes clases: A, AB, B, C, D, E, G y H. De aquí el rendimiento que ofrecen los amplificadores de potencia.

1.3.1 Configuraciones de amplificadores de audio

Las configuraciones de los amplificadores de potencia de audio se diferencian a partir de la estructura de la etapa de amplificación de salida. Entre las más utilizadas podemos encontrar las clases: A, AB, B, C y D.

- Amplificador clase A

Capítulo 1

Dentro de esta clase se encuentran equipos cuyos elementos activos trabajan en la región lineal, es decir, existe una corriente fluyendo permanentemente a través de ellos y una tensión aplicada en sus extremos. La configuración no emplea transistores en corte, lo que equivale a que el transistor conducirá durante los 360 grados de la señal de entrada. Este modo de trabajo hace que dichos amplificadores sean muy poco eficientes logrando rendimientos máximos de 25 %, aunque las eficiencias alcanzadas por etapas en emisor común son del 12,5 % [6]. La baja eficiencia de estos equipos los hace inadecuados para sistemas de audio de gran potencia dados los problemas de calentamiento de los componentes electrónicos. Estos amplificadores introducen muy pequeñas cantidades de distorsión, por lo que son útiles en sistemas en los que la integridad de la señal es muy importante y la potencia manejada es muy pequeña [6], [8]. La siguiente figura muestra un amplificador clase A seguidor de emisor.

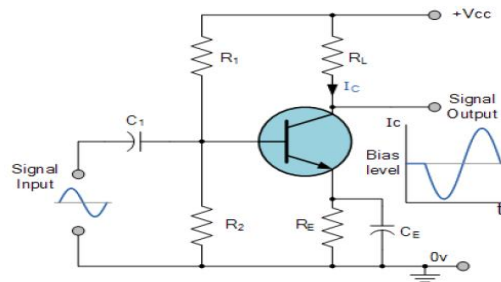


Figura 1.2: Amplificador clase A

- Amplificador clase B

Los amplificadores clase B se caracterizan por tener intensidad casi nula a través de sus transistores cuando no hay señal en la entrada del circuito. Cada transistor que compone un amplificador clase B solo amplifica un semiciclo de la señal de entrada, esto implica una conducción durante 180 grados de la señal de entrada. A continuación, la figura muestra el esquema de un amplificador clase B utilizando transistores bipolares.

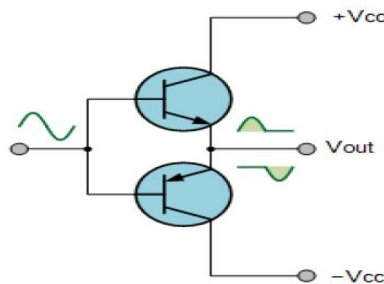


Figura 1.3: Amplificador clase B

Capítulo 1

Valorándose que la salida V_{out} está conectada a una resistencia y esta posee una referencia a tierra y la señal sinusoidal de entrada tiene valor 0 V, suponiendo que en un principio la tensión V_{out} es 0 V, los semiciclos positivos polarizarán la unión base emisor del transistor NPN en sentido directo haciendo que la corriente circule desde V_{cc} hacia la resistencia. En este caso el transistor inferior tendrá su unión base emisor polarizada de forma inversa impidiendo que el transistor conduzca. Del mismo modo cuando la señal de entrada sea negativa respecto a 0 V, se polarizará la unión base emisor del transistor PNP en sentido directo, la corriente circulará desde $-V_{cc}$ hacia la resistencia y el transistor superior estará en corte sin conducción. A este arreglo se le conoce comúnmente como configuración Push Pull.

Se conoce que la señal de tensión en el punto V_{out} será en valor absoluto la entrada menos la caída de tensión del diodo de la unión base emisor de los transistores, en este sentido son amplificadores de corriente con ganancia de tensión igual a la unidad. De este modo cuando la intensidad que circula por la carga disminuye como consecuencia de la disminución de la tensión de entrada, la relación entre la tensión base emisor y la intensidad de base acrecienta su no linealidad; así la distorsión debida al cruce por cero de la señal de salida hace que la THD (Total Harmonic Distorsion) de estos sistemas sea de 2 a 3 veces superior que para los amplificadores clase A [6]. En términos teóricos este tipo de amplificadores alcanza eficiencias de 78,5 % [9]. Otras fuentes plantean que la eficiencia máxima que pueden alcanzar es de 50 % [6].

- Amplificador clase AB

Como se ha descrito anteriormente los amplificadores clase B sufren de distorsión de cruce por cero cuando la señal de entrada se aproxima a 0 V respecto a la salida V_{out} . Los amplificadores clase AB introducen sistemas de polarización que posibilitan que los dos transistores estén conduciendo determinada cantidad de corriente cuando no hay señal de entrada. La figura mostrada a continuación muestra las mejoras realizadas al circuito de amplificación clase B.

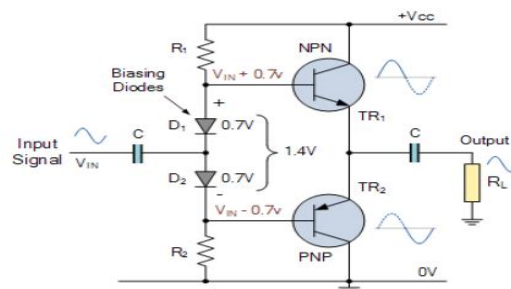


Figura 1.4: Amplificador clase AB

Capítulo 1

Si la tensión aplicada V_{in} es mayor que 0 V, el terminal del cátodo de D1 aumentará su tensión. Si asumimos que la variación de la tensión de dicho terminal respecto a tierra es pequeña entonces la caída de tensión en el diodo se mantendrá elevando el voltaje de la base del transistor NPN. Si la salida está a $V_{cc}/2$ respecto a tierra para una señal de entrada 0 V, el aumento de la tensión en la base incrementará la tensión base emisor forzando al transistor NPN a conducir más corriente. Dado que la diferencia de potencial entre las bases de los transistores se mantiene, el transistor PNP entrará en corte cuando la entrada supere un determinado valor de tensión. Sin embargo, dado que ninguno de los transistores del amplificador están en corte para una entrada de 0 V, esta topología evita la distorsión de cruce por cero de los amplificadores clase B.

Estos amplificadores reúnen la ventaja de la mayor eficiencia de la clase B con la poca distorsión introducida en los de clase A. La eficiencia teórica lograda por este tipo de sistemas será menor que la de los amplificadores clase B debido a la cantidad de corriente que ambos transistores conducen con una entrada de 0 V para evitar la distorsión de cruce por cero [10].

- Amplificador clase C

En los amplificadores clase C el transistor conduce durante un tiempo inferior al 50 % del período de la señal de entrada. Un esquema del amplificador clase C lo podemos observar en la siguiente figura.

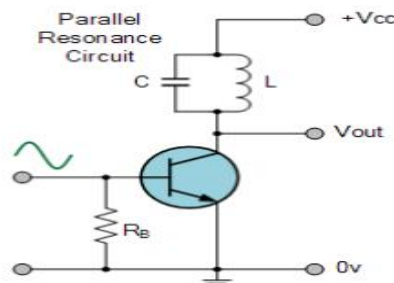


Figura 1.5: Amplificador clase C

El amplificador clase C se diseña para una frecuencia fija, esta frecuencia coincide con la de oscilación libre del circuito LC. De esta manera los pulsos de corriente generados por la conmutación del transistor son equivalentes a impulsos aplicados sobre el circuito LC provocando la oscilación libre del mismo. Para evitar el amortiguamiento de la tensión en los terminales de dicho circuito el transistor cargará el condensador y la bobina cada vez que este conduzca corriente.

Capítulo 1

Este tipo de equipos son utilizados principalmente en sistemas de radiofrecuencia [6], en los que la frecuencia alta de conmutación del BJT hace que el porcentaje de conducción de 50 % de los transistores del amplificador clase B suponga pérdidas elevadas.

- Amplificadores clase D

Los amplificadores clase D utilizan transistores que pasan de un estado de plena conducción al estado de corte y viceversa, conectando y desconectando de la carga las tensiones de alimentación. En la siguiente imagen podemos ver el principio de operación de un amplificador clase D en configuración de medio puente. El esquema de trabajo consiste en que cuando S1 conduce S2 está en corte y cuando S1 está en corte S2 conduce, así la forma de onda de la tensión que el puente de transistores impone a la carga es de tipo cuadrado. Es posible controlar el tiempo en que la onda cuadrada aplicada a la carga está en alto y el tiempo en que está en bajo valor generando de esta forma una señal modulada en ancho de pulso (PWM), que puede ser filtrada recuperando la señal de audio original.

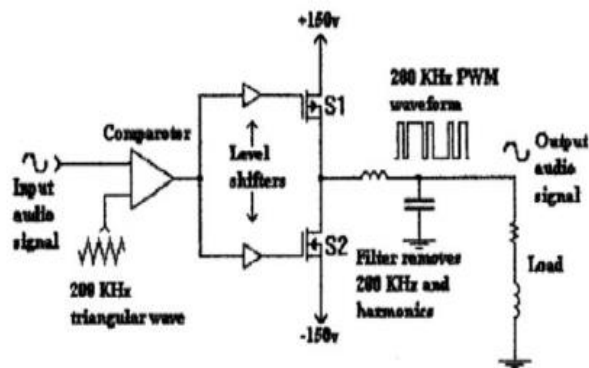


Figura 1.6: Amplificador clase D

El funcionamiento de los transistores en corte o saturación, con el empleo de MOSFET, hace que cuando conducen corriente, caiga poca tensión entre los terminales de potencia y cuando estén en corte no circule corriente reduciendo las pérdidas en los dispositivos.

La forma de generar la señal PWM en amplificadores clase D analógicos consiste típicamente en comparar la entrada de la señal de audio con una onda triangular, la salida del comparador estará en su valor alto si la señal de audio es mayor que la onda triangular y tendrá valor bajo si la señal de audio es menor que la triangular. La señal de salida del comparador se encargará de controlar el encendido y apagado de los interruptores S1 y S2. Al pasar la señal PWM por el filtro formado por una bobina y el capacitor de la imagen superior, podremos recuperar la señal de audio [6].

Capítulo 1

El marcado comportamiento no lineal de estos amplificadores hace que las distorsiones obtenidas sean altas [12]. De esta manera el uso de bucles de realimentación que corrijan la distorsión introducida en sistemas clase D es típico. Teóricamente, estos amplificadores tienen una eficiencia de 100%, aunque en términos prácticos la mayor parte de las implementaciones comprenden una eficiencia de 80 a 90 % [6].

1.3.2 Amplificadores integrados

En el campo de los amplificadores de potencia de audio, los amplificadores de potencia integrados han desplazado en gran medida a aquellos con componentes discretos. Sus contrastadas características en cuanto a funciones, versatilidad y calidad los sitúan de preferencia para la implementación de equipos de sonido. En cuanto a sus principales ventajas se pueden citar:

- Pequeño tamaño y muy poco peso.
- Reducción considerable en el número de componentes para su propósito de aplicación.
- Garantía de uniformidad para posibles sustituciones.
- Bajo costo del circuito integrado.
- Posibilidad de trabajar con frecuencias más altas al eliminar conductores.
- Fiabilidad, calidad y diversidad de funcionamiento.

A continuación, se consideran los amplificadores integrados frecuentemente utilizados, así como sus principales especificaciones técnicas, que ofrecen varios fabricantes en el mercado actual [12].

Tabla 1.1: Resumen de las características fundamentales de los amplificadores integrados comúnmente utilizados

Modelos	Series	Fuente	Carga	Potencia	THD	Funciones integradas
Amplificadores integrados híbridos STK y LA (Sanyo)	STK4100-X	Alimentación simétrica	4Ω 8Ω	Desde 6W X2 hasta 120W X2	0,08% 0,4%	Mute
	STK401-XXX	Alimentación simétrica	3Ω 6Ω	Desde 10W X2 hasta 120W X2	0,08% 0,4%	Standby
	STK402-XXX	Alimentación simétrica	6Ω	Desde 15W X2 hasta 80W X2	0,4%	Mute Standby
	STK433-XXX	Alimentación simétrica	4Ω 6Ω	Desde 20W X2 hasta 100W X2	0,4%	Mute Standby
	LA	Alimentación única	4Ω 8Ω	0,02W	1% 10%	Mute Standby

Capítulo 1

			16Ω	Desde 5W X2 hasta 30W X2		SCP
Amplificadores integrados monolíticos TDA (NXP-ST Microelectronics)	TDA15XX TDA20XX	Alimentación única Alimentación simétrica	2Ω 4Ω 8Ω	Desde 6W hasta 40W Desde 2W X2 hasta 22W X2 11W X4	0,1% 0,5% 0,8% 1% 10%	Mute Standby SCP TSP
	TDA70XX TDA72XX TDA73XX TDA75XX	Alimentación única Alimentación simétrica	2Ω 4Ω 6Ω 8Ω	Desde 20W hasta 80W Desde 5W X2 hasta 30W X2 Desde 8W X4 hasta 40W X4	0,5% 0,8% 1% 10%	Mute Standby DCVC SCP TSP
	TDA85XX	Alimentación única	2Ω 4Ω	25W X2 40W X2 7W X4 12W X4 25W X4	10%	Mute Standby SCP
	LM18XX LM28XX LM38XX	Alimentación simétrica	4Ω 6Ω 8Ω	Desde 20W hasta 60W 25W X2 32W X2	0,015% 0,1%	Mute Standby SCP TSP
Amplificadores integrados monolíticos LM (National Semiconductor)	LM47XX	Alimentación simétrica	4Ω 6Ω 8Ω	120W Desde 30W X2 hasta 60W X2 25W X3	0,1% 0,5%	Mute SCP TSP

1.4 Parámetros de comportamiento del APA

Existen diversos parámetros que describen el comportamiento de los amplificadores de potencia de audio. Su estudio resulta de suma importancia, pues a partir de estos es posible comprender el desempeño y calidad del dispositivo que se está evaluando. Seguidamente se muestran las características fundamentales de estudio [13-15].

- Impedancias

- Impedancia de entrada

Es la resistencia que presenta internamente la etapa de entrada ante las señales introducidas. Se expresa en Ω o en KΩ. La impedancia de entrada (Z_i) varía según el tipo de transductor. Puede ir desde los 100 KΩ en el caso de entradas de línea, hasta rondando 1 KΩ en las entradas de baja

Capítulo 1

impedancia. Estas variaciones las tiene que compensar el preamplificador, para que se produzca una buena transmisión en tensión en estrecha relación con la sensibilidad de la entrada.

- Impedancia de salida

Para que se produzca una óptima transferencia de potencia en la última etapa del amplificador con la carga (los altavoces), la impedancia de salida tiene que ser suficientemente pequeña. Su valor depende en gran manera del tipo de amplificador. Los amplificadores de líneas (70 - 100 V) tienen una impedancia baja, en decenas de Ω , mientras que la etapa conectada directamente a los altavoces tiene una impedancia mucho más pequeña. Los fabricantes del amplificador indican el valor de la carga mínima que se puede conectar a la salida debido a que conectar un altavoz de menor impedancia puede ocasionar daños en el equipo.

Para cualquier altavoz, su nivel de impedancia depende en gran medida de la frecuencia de la señal aplicada. Esto es un gran inconveniente, pues hace que la respuesta en frecuencia efectiva sobre la carga varíe proporcionalmente. Dicha situación en parte se soluciona colocando como carga no solo un altavoz, sino un sistema compuesto por varios, que conjuntamente trabajen en distinto rango de frecuencias. Así se proporciona globalmente una impedancia que, ante las variaciones de frecuencia dará una respuesta más cercana a la lineal.

• Ganancia

Cuando nos referimos al término ganancia de un amplificador de potencia de audio, principalmente podemos citar la ganancia de tensión y la ganancia de potencia del mismo.

- Ganancia de tensión

La ganancia de tensión representa la relación entre la tensión de salida y la tensión de entrada de la señal. Generalmente se representa en dB. En condiciones de ganancia menor que 1 (0 dB), hablamos de atenuación.

$$G_v = 20 * \log\left(\frac{V_o}{V_i}\right) \text{ [dB]} \quad (1.1)$$

Como unidad de medida absoluta de tensión, se utiliza en amplificadores el dBu y el dBV.

$$G_v = 20 * \log\left(\frac{V_o}{0,775 \text{ V}}\right) \text{ [dBu]} \quad (1.2)$$

Siendo 0,775 V el valor de referencia.

$$G_v = 20 * \log\left(\frac{V_o}{1 \text{ V}}\right) \text{ [dBV]} \quad (1.3)$$

Capítulo 1

Siendo 1 V el valor de referencia.

El término dBu expresa el nivel de señal en dB referido a 0,775 V RMS, donde 0,775 V RMS es la tensión aproximada que aplicada a una impedancia de 600 Ω , disipa una potencia de 1 mW. Se emplea la referencia de una impedancia de 600 Ω por ser la impedancia de las líneas telefónicas analógicas antiguas. El otro término dBv se utiliza en documentación USA, en Europa se utiliza el término dBv con la v minúscula.

- Ganancia de potencia

La ganancia de potencia representa la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada de la señal. Igualmente, se suele representar en dB y en condiciones de ganancia menor que 1 (0 dB), hablamos de atenuación.

$$G_p = 10 * \log \left(\frac{P_o}{P_i} \right) \text{ [dB]} \quad (1.4)$$

• Potencia de salida

La potencia de salida de un amplificador de audio, especifica la potencia eléctrica máxima que puede proporcionar a los altavoces, sin que se produzca distorsión en la señal y el equipo sufra consecuencias. Se suele indicar en Watts (W) sobre una carga específica de salida representada en Ohm (Ω). Existen varias formas de expresar la potencia de salida:

- Potencia nominal, RMS o máxima útil

La potencia máxima eficaz, RMS (Root Mean Square) o potencia media a régimen continuo, es la potencia eléctrica real verificable con instrumentos que puede proporcionar cada canal de la etapa de salida durante un minuto a una frecuencia de 1 KHz sobre la impedancia nominal de salida especificada por el fabricante (normalmente 2, 4, 8 Ω). Esta viene dada por la expresión:

$$P_{\text{RMS}} = \frac{V_{\text{O}_{\text{RMS}}}^2}{Z_L} \quad (1.5)$$

Siendo V_o la tensión máxima RMS sin distorsión con la Z_L mínima admisible y Z_L la impedancia conectada a la salida.

- Potencia de pico, admisible y la potencia musical (PMPO)

La potencia de pico es la potencia máxima impulsiva, que puede soportar cada cierto tiempo el amplificador sin deteriorarse. Se suele tomar como duración de ese pico de señal unos 5 ms, pero debido a que no existe una metodología establecida, los resultados varían según el criterio de quien

Capítulo 1

realiza la medición. La potencia de pico puede llegar a ser el doble que la potencia RMS, por cada canal.

La potencia PMPO se refiere a la salida de potencia de todos los canales de amplificación sumados, utilizando una señal de prueba de 5 KHz con una Z_L cercana a 0Ω un instante antes de que el equipo se deteriore. La potencia PMPO se cuenta que sea la suma de 4 veces la potencia RMS de todos los canales juntos.

- Sensibilidad

Indica el nivel mínimo de señal aplicada a la entrada capaz de producir la máxima potencia de salida sin ocasionar distorsión. Si se supera el valor de sensibilidad, la señal de salida sufrirá un recorte en los picos de la onda (tanto en los ciclos superiores como inferiores), quedando distorsionada de tal modo que puede causar daño en ciertos equipos como los tweeter. Para evitar este gran problema, la mayoría de equipos profesionales cuentan con un control de nivel de la entrada, que nos permite atenuar la señal si resulta excesiva.

La sensibilidad de voltaje (S_v) expresada en dB atendiendo a una entrada acústica de L_p , referida a 94 dB SPL (1 Pa) y 1 V puede ser determinada como:

$$S_v = 20 * \log E_o - L_p + 94 \text{ [dB]} \quad (1.6)$$

Siendo E_o la tensión de salida del micrófono en circuito abierto y L_p el nivel de presión acústica de entrada.

- Respuesta en frecuencia (ancho de banda)

La respuesta en frecuencia de los amplificadores de potencia de audio expresa el rango de frecuencias dentro del cual el amplificador responde de igual forma (respuesta plana) ante las frecuencias audibles (20 Hz a 20 KHz) con la misma potencia, teniendo la misma tensión efectiva en la carga. Esta se mide en dB.

La ganancia de tensión comienza a disminuir cuando nos aproximamos a los límites del ancho de banda del amplificador, resultando que cae 3 dB en las frecuencias de corte y mucho más cae fuera de estas. Las frecuencias en las que se produce la atenuación en ganancia de tensión de 3 dB son las llamadas frecuencias de corte; f_1 la inferior y f_2 la superior. El rango de frecuencias comprendido se define como el ancho de banda ($f_2 - f_1$). La ganancia de tensión puede variar ligeramente en el ancho de banda del amplificador dentro de un margen de respuesta plana que debería ser muy limitado.

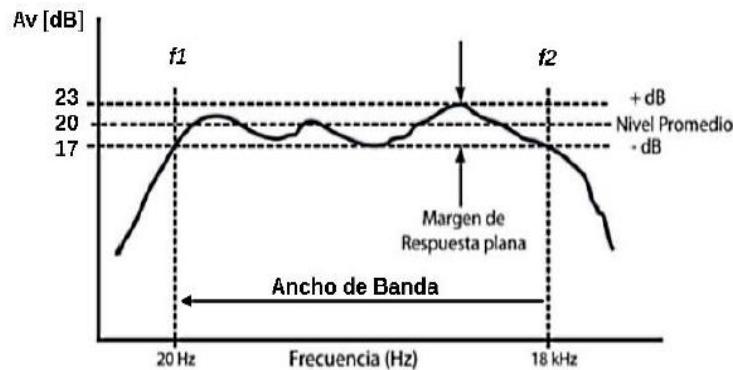


Figura 1.7: Ancho de banda del amplificador

- Respuesta de fase

Indica la relación en la fase entre las frecuencias medias con respecto a las altas o bajas. Este desfase (adelantamiento o retraso) en el espectro de audiofrecuencias no debería ser superior a los 15° , para que no se produzcan cancelamientos de la señal.

La interpretación del sonido por parte del cerebro humano no distingue demasiado el retardo de fase, sobre todo en bajas frecuencias. Por eso un retardo de 15° , aunque supone una deformación considerable de la forma de onda original, al humano no le parece una distorsión grave del sonido como así supondría simplemente una THD de 1 %.

- Distorsión

Es un parámetro que evalúa el nivel de las señales no deseadas presentes en la salida de un amplificador respecto a la señal de entrada. Se tiene para la potencia nominal de salida y una frecuencia de 1 KHz. Las causas de la distorsión pueden ser múltiples; en el caso de los amplificadores, la más usual es el sobre nivel de entrada, es decir, sobrepasar la potencia recomendada por el fabricante, lo que produce a la salida un recorte de la señal. En efectos prácticos no percibimos la distorsión de igual manera en todo el rango de frecuencias, para bajas frecuencias podemos llegar al 5 % sin apenas notarlo. Sin embargo, una distorsión mayor a 0,5 % en medias y altas frecuencias se hace plenamente notoria.

Fundamentalmente, se presentan dos tipos de distorsión, la distorsión armónica total (Total Harmonic Distortion o THD) y distorsión de intermodulación (Inter Modulated Distortion o IMD).

- Distorsión armónica total

Se produce cuando en la salida del amplificador, además de la señal de entrada amplificada, aparecen algunos de sus armónicos que distorsionan la señal de modo indeseado. La distorsión

Capítulo 1

armónica total supondría la suma efectiva de todos los armónicos indeseados y debe ser como máximo de 0,1 % para la alta fidelidad, en todo el espectro de frecuencias.

La distorsión armónica total es posible calcularla a través de la siguiente expresión:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} \quad (1.7)$$

Siendo $V_2, V_3, V_4, \dots, V_n$ los valores RMS del segundo, tercer y cuarto armónico hasta la n -ésima tensión armónica y V_1 el valor de tensión RMS de la componente fundamental.

La siguiente figura muestra una señal fundamental como referencia a la señal de entrada al amplificador y en la salida la onda distorsionada debido a la aparición de armónicos indeseables.

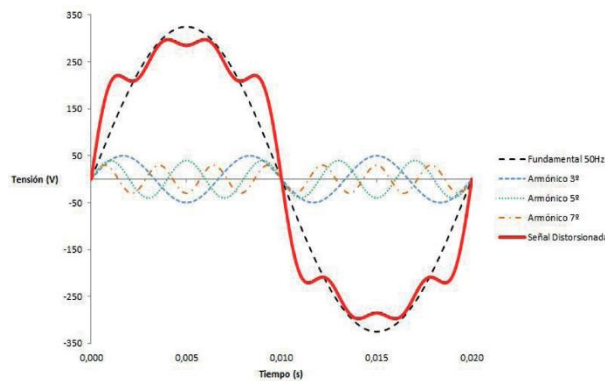


Figura 1.8: Efectos de la distorsión armónica total

- Distorsión de intermodulación

La distorsión de intermodulación proviene de la incapacidad de un amplificador para reproducir exactamente la envolvente y la fase de la señal de entrada. Si dos tonos son reproducidos a la vez, pueden interactuar en el equipo y combinarse mediante la suma y diferencia para producir otros nuevos tonos, que generalmente, no son armónicos entre sí ni con los anteriores. De esta forma la señal pasa a través de un sistema no lineal (la señal de salida no es una combinación lineal de la señal de entrada).

Entre las causas fundamentales que la originan se encuentran los efectos de cruce por cero, la reducción de ganancia con corriente elevada y la saturación del dispositivo, que provoca tanto un aplanamiento en la cima de la onda, como modulación de fase indeseada.

La imagen que se muestra a continuación representa la distorsión debida a los efectos del recorte en los picos de la onda amplificada.

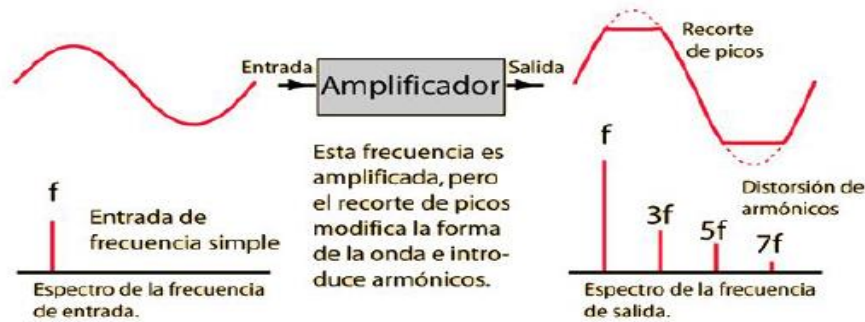


Figura 1.9: Efectos de la distorsión de intermodulación

- Relación señal/ruido

Se define como el cociente entre el nivel de la señal de salida y el nivel de ruido que aparece en ella. Aunque un valor considerable es a partir de 80 dB, para que la relación señal/ruido (SNR) esté por debajo del umbral de audición debe ser de al menos 90 dB. El fabricante suele indicar el valor de la SNR para 1 KHz, que no necesariamente va a ser el valor mayor en todo el rango del ancho de banda.

La SNR se indica normalmente en dB y puede expresarse como relación de voltajes o como relación de potencias. Dado que normalmente lo que medimos son las señales en tensión, se suele utilizar el formato expresado:

$$SNR = 20 * \log\left(\frac{V_o}{V_r}\right) \text{ [dB]} \quad (1.8)$$

Siendo V_o la tensión de señal de salida sin presentar distorsión con impedancia mínima y V_r la tensión de la señal de salida sin introducir señal en la entrada al mismo volumen.

1.5 Medición de los parámetros de comportamiento del APA

En este tema están dirigidos los esfuerzos a la realización de una metodología didáctica para efectuar las mediciones pertinentes de los parámetros de los amplificadores de potencia de audio. Para ello se desempeña la siguiente cronología [16-18].

- Determinación de la impedancia de entrada del amplificador

Para determinar la impedancia de entrada la frecuencia de la señal de prueba a utilizar debe estar dentro del ancho de banda del amplificador de modo que, para continuar, teniendo en cuenta la aplicación se considera una señal sinusoidal de 1 KHz que deberá ser introducida al amplificador. La amplitud de la señal de entrada se ajustará hasta obtener la máxima amplificación en la señal

Capítulo 1

de salida sin distorsión, debido al recorte en los picos de la onda. Con el material de instrumentación adecuado, tomar lectura del nivel de tensión correspondiente en la señal de salida. Se conecta en serie entre el generador de señales y la entrada del amplificador, una resistencia variable (R_{e1}) cuidando su graduación en el mínimo valor. Luego, se incrementa el valor de R_{e1} hasta que la lectura de tensión de la señal de salida sea la mitad de la magnitud medida inicialmente. A continuación, se retira la resistencia variable; en estas condiciones el valor numérico de R_{e1} será igual a la impedancia de entrada del amplificador.

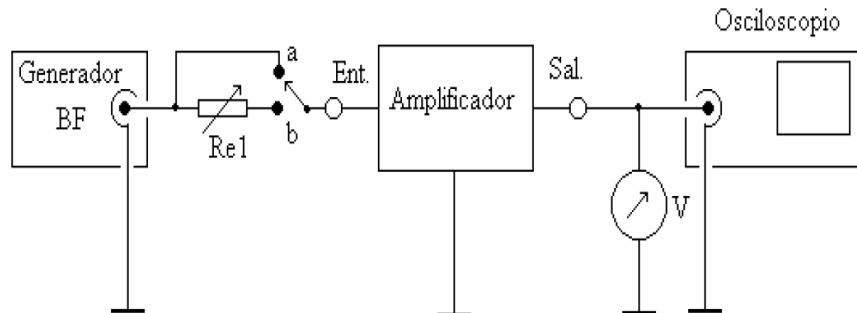


Figura 1.10: Diagrama de conexiones para determinar la impedancia de entrada

- Determinación de la impedancia de salida del amplificador

A partir de las consideraciones del apartado anterior, en este caso se conecta en los terminales de salida del amplificador, una resistencia de carga variable (R_{c1}) cuidando de que esté ajustada con su valor máximo. Posteriormente, se disminuye el valor de R_{c1} hasta que la lectura de tensión en la señal de salida se reduzca a la mitad de la obtenida para la carga desconectada y en condiciones de máxima excursión sin distorsión. En esta situación el valor de la impedancia de salida del amplificador es numéricamente igual a la resistencia de carga de acuerdo al teorema de máxima transferencia de energía. Su valor puede determinarse de forma indirecta, retirando y midiendo el valor de la resistencia de carga R_{c1} .

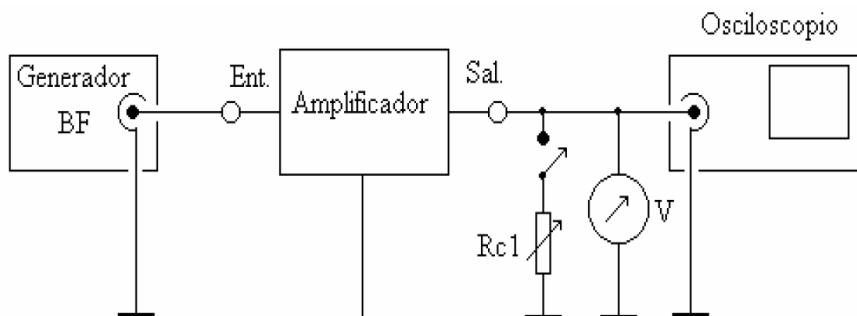


Figura 1.11: Diagrama de conexiones para determinar la impedancia de salida

Capítulo 1

- Determinación de la ganancia de tensión del amplificador

Para determinar la ganancia de tensión del amplificador se requiere su trabajo con la salida en condiciones de carga próximas al circuito abierto, por ello bastará con realizar las mediciones sin carga conectada a los terminales de salida. Similar a las propuestas anteriores, se introduce una señal sinusoidal de 1 KHz de frecuencia que garantice la máxima excursión en la señal de salida sin ocasionar saturación en el amplificador.

Una de las formas más comunes de expresar el valor de ganancia de un amplificador es en decibeles y resulta más fácil determinarla mediante el empleo de instrumentos que posean escalas calibradas en dB, como puede ser un multímetro para medir la salida y un generador de señales con indicación en dB para medir la entrada. De esta forma la ganancia de tensión será directamente la diferencia entre las lecturas tomadas a la salida y entrada del amplificador.

$$G_v(\text{dB}) = V_o(\text{dB}) - V_i(\text{dB}) \quad (1.9)$$

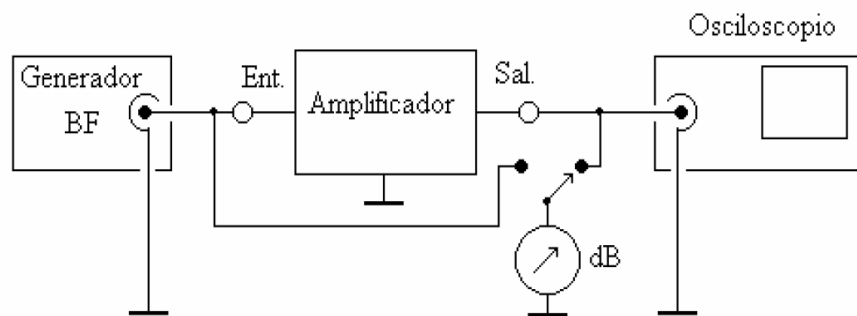


Figura 1.12: Diagrama de conexiones para determinar la ganancia de tensión

En caso de no contar con las características especificadas anteriormente para los instrumentos de medición, otra forma de hallar la ganancia de tensión, bastará con tomar las mediciones correspondientes de tensión en la entrada y salida del amplificador. Por último, se determina la relación siendo el resultado de magnitud adimensional.

$$G_v = \frac{V_o}{V_i} \quad (1.10)$$

- Determinación de la ganancia de potencia del amplificador

La potencia de salida del amplificador se medirá para la condición de resistencia de carga igual a la impedancia de salida del mismo, así como para máxima excursión de la señal de salida, sin producirse saturación, para lo cual se deberán disponer los instrumentos de forma similar a experiencias anteriores.

Capítulo 1

Con la máxima tensión de salida y la resistencia de carga determinamos la potencia de salida a través de la expresión (1.5).

Para hallar la potencia suministrada al amplificador se considera su impedancia de entrada, así como la tensión aplicada a la entrada que garantiza la máxima amplitud en la señal de salida.

$$P_i = \frac{V_{i_{RMS}}^2}{Z_i} \quad (1.11)$$

Finalmente, la ganancia de potencia se obtiene como la relación entre P_o/P_i . Dado que comúnmente, es expresada en dB, basta con calcularla según la expresión (1.4).

- Determinación de la sensibilidad del amplificador

Es el valor eficaz de la señal sinusoidal aplicada a la entrada del amplificador que produce la máxima tensión en la señal de salida sobre la carga nominal, sin llegar a producirse la saturación.

- Determinación de la respuesta en frecuencia (ancho de banda) del amplificador

La respuesta en frecuencia de un amplificador se determina efectuando un barrido de frecuencia, manteniendo constante el nivel de la señal aplicada a la entrada, que debe tener un valor suficiente para obtener la máxima tensión de salida sin ocasionar saturación. El ancho de banda viene dado por los límites de frecuencia entre los cuales el nivel de salida no cae más de 3 dB respecto al valor para una frecuencia media y es posible calcularlo mediante la expresión:

$$BW = f_{cs} - f_{ci} \quad (1.12)$$

Siendo f_{cs} la frecuencia de corte superior y f_{ci} la frecuencia de corte inferior.

De acuerdo con el planteamiento anterior se propone el procedimiento:

- Ajustar el nivel y la frecuencia del generador de señales según se ha descrito.
- Determinar las frecuencias cuadrantales superior e inferior (0,707 de la amplitud de salida en la zona plana).
- Disminuir el valor de la frecuencia hasta obtener el valor de corte inferior.
- Aumentar el valor de la frecuencia hasta obtener el valor de corte superior.
- Tomar algunas lecturas intermedias entre los dos valores obtenidos.
- Llevar los datos relevados a un gráfico de amplitud contra frecuencia.

- Determinación de la respuesta de fase del amplificador

Capítulo 1

Para hallar el desfasaje entre las señales de entrada y salida del amplificador, en un primer caso es posible obtenerla directamente a través del osciloscopio, en otra variante se puede encontrar indirectamente. Para ello se conecta un canal a la entrada y otro a la salida del amplificador. El periodo de una señal corresponde con una fase de 360° . El desfase indica el ángulo de atraso o adelanto que posee una señal con respecto a otra (tomada como referencia). Ya que en el osciloscopio es posible medir los tiempos, la diferencia existente entre ambas señales determina su desfasaje.

Aunque lo anterior es válido, otra mejor forma se puede desempeñar conectando un altavoz al amplificador con los requerimientos de carga que este necesita. Se introduce una señal de audio para luego a través de un transductor (micrófono) externo recibir el sonido amplificado. Mediante un osciloscopio se conecta un canal a la entrada del amplificador y otro al micrófono. De esta forma en pantalla será posible comprobar el desfasaje para el espectro de frecuencias del sonido amplificado. Es importante mencionar que se deberá contar con las características del local correspondientes, pues el ruido ambiental puede afectar en gran medida a los resultados.

- Determinación de la distorsión del amplificador por diversos métodos

Existen dos formas de saber si el amplificador bajo estudio produce distorsión. Para determinar las características de linealidad o alinealidad del amplificador, se puede ensayar con un solo tono (ensayo monotonal) o con dos (ensayo bitonal). El primero nos dará la distorsión que puede introducir el amplificador al entregar una señal de múltiples frecuencias, a partir de la señal sinusoidal pura recibida; pero este método es incompleto para analizar la distorsión ya que un amplificador trabaja con señales de entrada complejas (múltiples frecuencias). Un estudio más completo de la distorsión se hace con el ensayo bitonal.

- Ensayo monotonal

Una forma de verificar la distorsión utilizando el osciloscopio es fijando las sondas, una del canal 1 a la entrada y otra del canal 2 a la salida del amplificador. La señal muestreada por el canal 2 se invierte y en las operaciones se resta a la señal de entrada. De forma que como resultado se tendrá una línea recta careciendo de distorsión, en cambio la línea será curva siguiendo las diferencias entre las dos señales, teniendo en cuenta que mientras mayor sea, mayor distorsión presentará. Este método es cualitativo y no permite conocer las componentes armónicas ni el grado de distorsión que introduce el circuito.

Capítulo 1

Otro modo preciso de examinar la distorsión es posible realizando la transformada rápida de Fourier, teniendo en cuenta el empleo del osciloscopio para analizar la señal de salida amplificada. Así se descompone la señal en sus componentes espectrales individuales, es decir, se convierte desde el dominio del tiempo a sus componentes en frecuencia. Para el caso, se toma lectura de cada una de las amplitudes correspondientes a sus armónicos y dado que los de orden superior no tienen una potencia significativa respecto a la componente fundamental, se consideran los tres o cuatro primeros.

Con el mismo procedimiento y con mayor exactitud también se puede realizar el análisis mediante un analizador de espectros para tomar lectura de las componentes armónicas.

- Ensayo bitonal

El ensayo bitonal está dirigido fundamentalmente a determinar el comportamiento del amplificador ante la distorsión de intermodulación mediante la combinación de dos tonos. Para ello, se introducen dos tonos simultáneamente, uno de ellos con una frecuencia mayor a la de corte inferior (f_2) y otro de frecuencia un poco menor a la de corte superior (f_1). La amplitud del tono agudo debe ser 4 veces menor a la amplitud del tono grave, pero suficientemente grande para ser distinguido del ruido. Además, la amplitud del grave, no debe saturar al amplificador. Los dos tonos se suman mediante un mezclador lineal (amplificador lineal o transformador con derivación central en el devanado primario). La salida del amplificador atraviesa un filtro pasa alto con el objetivo de bloquear las componentes de baja frecuencia y tener limpio el espectro alrededor de f_1 para poder identificar las componentes de la modulación.

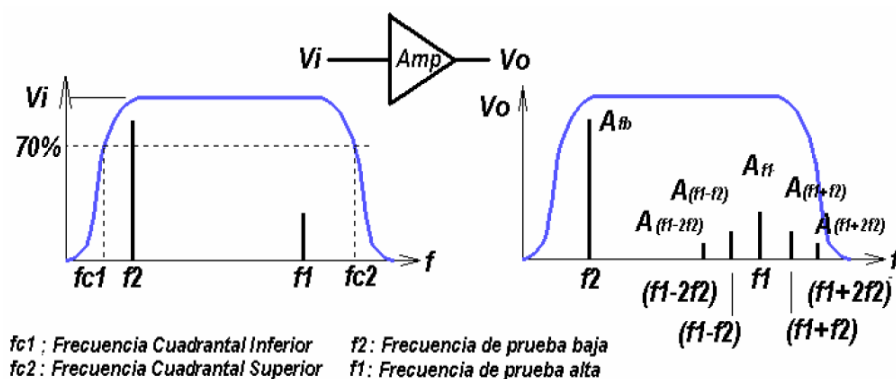


Figura 1.13: Aparición de armónicos indeseados en la señal amplificada

Si el amplificador no es lineal, la señal grave polarizará instantáneamente al dispositivo activo en distintas regiones de la curva de transferencia, lo cual se traducirá en una variación de la ganancia.

Capítulo 1

Por lo tanto, el más afectado será el tono agudo, haciendo que la amplitud de él sea diferente en función del valor instantáneo del tono grave. Esto dará una señal de salida cuya envolvente estará modulada en amplitud donde el grado de modulación va a depender del cambio de ganancia en el punto de trabajo instantáneo.

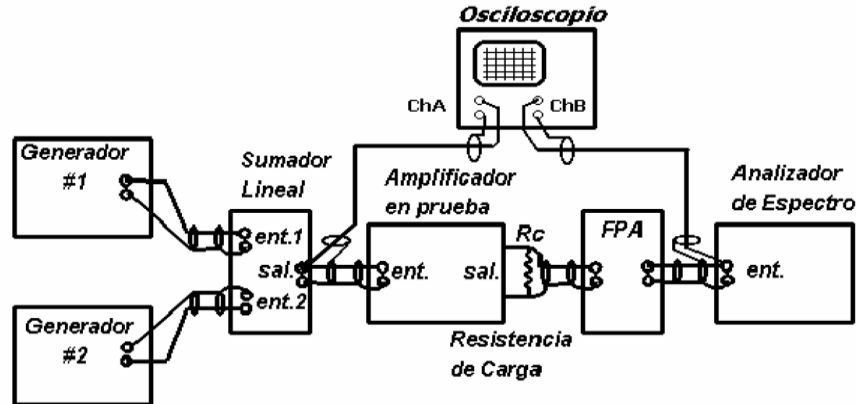


Figura 1.14: Diagrama de conexiones para determinar la distorsión

Para tener una noción cuantitativa de la distorsión, la señal de salida se observa con un analizador de espectro sintonizado en el ancho de banda del amplificador. Así se toma lectura para las componentes espectrales correspondientes.

$$\text{IMD} = \sqrt{\left[\frac{A(f_1 - f_2) - A(f_1 + f_2)}{Af_1} \right]^2 + \left[\frac{A(f_1 - 2f_2) - A(f_1 + 2f_2)}{Af_1} \right]^2 + \dots} \quad (1.13)$$

- Determinación de la relación señal/ruido del amplificador

El cálculo de la SNR se realiza a partir de la diferencia entre el nivel de la señal de salida cuando el equipo funciona a su máxima potencia nominal y el nivel de ruido en la salida existente cuando no se introduce señal a la entrada.

Similar a las experiencias anteriores, se conecta el generador de señales a la entrada del amplificador y se introduce una señal de 1 KHz de frecuencia hasta obtener la máxima excursión a su salida sin ocasionar recortes en los picos de la misma.

Este término es trabajado principalmente en dB, para ello se calcula su magnitud según la expresión (6).

Capítulo 1

1.6 Tendencias

En los últimos años se ha producido el paso de señales estereofónicas a sonido envolvente. Inicialmente, estos sistemas estaban pensados para grandes salas cinematográficas, sin embargo, en la actualidad es posible encontrar numerosos equipos domésticos con estas funcionalidades. Adicionalmente, han aparecido otros soportes para grabación de música, con frecuencias de muestreo y resoluciones muy superiores a los convencionales 44,1 KHz y 16 bits por muestra.

La tendencia hacia el audio digital resulta un tema muy tratado en la cotidianidad. La intención de recrear el sonido de una forma más natural que la proporcionada por un sistema estéreo, ha supuesto la ampliación del número de canales. Los dos sistemas mayoritarios de sonido envolvente son DTS (Digital Theater Systems) y Dolby Digital, incompatibles entre sí, que trabajan con algoritmos de codificación de audio digital distintos. Por ejemplo, DTS requiere una tasa de bits mayor que Dolby Digital. De cada uno de ellos existen varias versiones, fruto de la evolución tecnológica.

















	DOLBY SURROUND	Dolby Surround		Digital dts surround
	DOLBY SURROUND PRO • LOGIC	Dolby Surround Pro Logic		dts
	DOLBY SURROUND PRO LOGIC II	Dolby Surround Pro Logic II		dts extended surround
	DOLBY DIGITAL	Dolby Digital		dts neo:6
		Dolby Headphone		dts 96/24
	VIRTUAL SURROUND	Virtual Dolby Surround		dts es 96/24
	VIRTUAL DIGITAL	Virtual Dolby Digital		dts digital out
				dts interactivo
				dts virtual:

Figura 1.15: Logotipos de los sistemas Dolby Digital y Digital Theater Systems respectivamente

La empresa Dolby aprovechó su experiencia al crear reductores de ruido sobre comportamiento perceptivo del ser humano ante los sonidos. Sin embargo, los sistemas de sonido envolvente no son sistemas reductores de ruido sino métodos de recrear los sonidos con una naturalidad superior en base a incrementar el número de canales.

Por su parte, Digital Theater Systems es la alternativa al sistema Dolby Digital. En el entorno doméstico existen varias versiones de prestaciones y características diferentes. DTS utiliza el algoritmo de codificación Coherent Acoustics (acústica coherente), diseñado para aplicaciones profesionales y de consumo que ofrece una alta flexibilidad y soporta múltiples canales de audio,

Capítulo 1

frecuencias de muestreo hasta 192 KHz y 24 bits por muestra de resolución. Mediante la compresión Coherent Acoustics a igualdad de información (tasa de bits), se plantea un esquema de codificación más sofisticado capaz de obtener una mejor calidad que PCM, teniendo en cuenta las características de la música y del oído humano [19].

Entre otras tendencias relevantes podemos citar la integración Wireless. El mundo se ha acostumbrado a la facilidad y sencillez de las conexiones Wireless. Con la apertura del espectro radioeléctrico, la disponibilidad del ancho de banda ha aumentado de forma espectacular. Este ancho de banda adicional hace que la tecnología inalámbrica sea una opción para apoyar las aplicaciones de audio, que indica como esta tendencia continuará impactando en el futuro de la industria. Los servicios celulares con 5G aportan mayores velocidades, menor latencia (respuestas más rápidas) y la capacidad de conectar más dispositivos simultáneamente sin problemas. A través de la tecnología avanzada de antenas, 5G permite niveles mucho más altos de transmisión de datos, que se traduce no solo en la facilidad de utilización sino en una mejor calidad de sonidos.

Los sistemas audiovisuales heredados se diseñaron en torno a dispositivos de entrada (como micrófonos) y dispositivos de salida (como altavoces). Para que los sistemas funcionaran juntos, era necesario contar con otros dispositivos electrónicos especialmente diseñados para procesar las señales y dirigirlas a la ubicación adecuada. Las señales de audio y video se han convertido en señales digitales y una de las formas más eficientes de transmitir las es a través de paquetes Ethernet. La tecnología audiovisual sobre IP supera muchos de estos retos al transmitir los datos audiovisuales a través de una red o de Internet. Además, es rentable y fácilmente escalable. Por esta razón, se ve el continuo crecimiento de AV sobre IP como otra tendencia que persistirá en el futuro de la industria [20].

1.7 Normas vigentes

Las mediciones del sistema de audio constituyen un medio para cuantificar su rendimiento. Estas se realizan para varios propósitos; los diseñadores toman medidas para poder especificar el desempeño de un equipo, los ingenieros de mantenimiento lo hacen para garantizar que el equipo siga funcionando según las especificaciones, o para garantizar que los defectos acumulativos de una ruta de audio estén dentro de los límites considerados aceptables. Las mediciones del sistema

Capítulo 1

de audio a menudo se adaptan a los principios psicoacústicos para medir el sistema de una manera que se relacione con la audición humana.

Por estas razones, se ha diseñado e incorporado un conjunto de técnicas de medición subjetivamente válidas atendiendo a estándares internacionales como la CEI (Comisión Electrotécnica Internacional) y la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones). Estos métodos de medición de la calidad de audio son utilizados por ingenieros en la mayor parte del mundo, así como por algunos profesionales de audio.

La CEI presentó en el año 2018 las referencias normativas para el equipamiento en sistemas de sonido dirigido a las mediciones en los amplificadores de audio, extendidas hasta 2024. Dentro de las características a especificar y sus métodos de medición dispone según [21] los siguientes:

- Propiedades de la fuente de alimentación.
- Tolerancia de las variaciones de voltaje de la fuente de alimentación (a largo plazo).
- Tolerancia de las variaciones de frecuencia de la fuente de alimentación.
- Tolerancia de ondas y armónicos de la fuente de alimentación.
- Características de entrada y salida.
- Características limitantes.
- Características de los circuitos de protección.
- Tiempo sostenido para voltaje o potencia de salida nominal (distorsión limitada).
- Ganancia.
- Respuesta en frecuencia y fase.
- Distorsión.
- Ruido.
- Entradas y salidas balanceadas.
- Diafonía y separación en amplificadores multicanal.
- Diferencias de ganancia y fase entre canales en amplificadores multicanal.
- Dimensiones y masa.

1.8 Conclusiones del capítulo

Los contenidos expuestos en el capítulo son de suma importancia para la asignatura Sistemas de Audio ya que resulta necesario el estudio de los temas de contenido teórico para comprender los amplificadores de potencia de audio. Sus formas de implementación, la descripción y análisis de

Capítulo 1

cada uno de sus parámetros de funcionamiento, así como la actualidad relevante que le acontecen se considera una formación previa para desarrollar correctamente y con destreza las actividades prácticas.

Capítulo 2 Propuestas de ejercicios prácticos de laboratorio real

El segundo capítulo constituye el antecedente de los análisis experimentales. Teniendo en cuenta las variantes de implementación según los recursos disponibles, se toman en consideración las actividades prácticas a desarrollar en el laboratorio docente, así como también el procedimiento desarrollado y la configuración necesaria en los instrumentos de medición.

2.1 Temas de ejercicios prácticos a realizar

Dentro del contenido de la asignatura Sistemas de Audio, existen temas de interés práctico que requieren de su evaluación como contribución al plan de estudio.

En los amplificadores de potencia de audio hay parámetros de mucha importancia, es por eso que la mayor parte del trabajo está dedicado a las mediciones de sus prestaciones. Como respuesta, se pretenden determinar los siguientes parámetros del amplificador:

- Sensibilidad.
- Impedancia de entrada.
- Impedancia de salida.
- Ganancia de tensión.
- Potencia de salida.
- Respuesta en frecuencia (ancho de banda).
- Respuesta de fase.
- Distorsión armónica total.

2.2 Variantes de implementación

Acorde con las propuestas de medición de los parámetros del amplificador de potencia de audio, que se citaron en el capítulo anterior, se resumen las formas de implementación dirigidas a desarrollar las actividades prácticas en el laboratorio docente.

- Sensibilidad a partir de la señal introducida.
- Impedancias de entrada y salida mediante el empleo de resistencias variables.
- Ganancia de tensión a través de lecturas de la tensión de entrada y salida del circuito.
- Potencia de salida mediante la resistencia de carga y la tensión aplicada a sus extremos.
- Ancho de banda apoyado en el barrido de frecuencias.

Capítulo 2

- Respuesta de fase
 - Respuesta de fase indirectamente.
 - Respuesta de fase directamente.
- Distorsión armónica total
 - THD a partir de criterio cualitativo.
 - THD a partir de FTT.

2.3 Recursos disponibles

Atendiendo al equipamiento disponible en el laboratorio de la facultad, los puestos de trabajo se encuentran surtidos con una fuente de alimentación variable indispensable para la realización de las pruebas experimentales, así como también se dispone de las protoborad necesarias para montar los circuitos. Dentro de los instrumentos de medición existen multímetros analógicos y digitales, se cuenta con un modelo generador de señales y tres modelos de osciloscopios.

Seguidamente, se muestra una descripción de las características fundamentales de los modelos de osciloscopios y el generador de señales disponible en el laboratorio:

- Osciloscopio de la marca Rigol modelo DS1052E
Pertenece a la serie de osciloscopios DS1000D/E. Cuenta con almacenamiento digital, es ideal para realizar pruebas de producción, diseño, desarrollo, mantenimiento y demás aplicaciones que necesiten pruebas y reparaciones de circuitos analógicos digitales, así como en educación y entrenamiento [22].
 - 2 Canales analógicos con un ancho de banda de 50 MHz.
 - 16 Canales digitales opcionales (osciloscopio con analizador lógico).
 - Pantalla TFT LCD Mono/Color con resolución de 320x234.
 - Rango de la base de tiempos desde 5 ns/div hasta 50 s/div.
 - Sensibilidad vertical desde 2 mV/div hasta 5 V/div.
 - Proporciona almacenamiento e impresión mediante USB.
 - Intensidad ajustable de la forma de onda, para una visualización más efectiva.
 - Cuenta con filtros digitales, incluye FPB, FPA, FPB, FBR.
 - Funciones matemáticas de suma, resta, multiplicación y FFT.
- Osciloscopio de la marca Rigol modelo MSO1074Z

Capítulo 2

Pertenece a la serie de osciloscopios DS1000Z/MSO1000Z. Tiene una profundidad de memoria extremadamente alta, amplio rango dinámico, pantalla clara, excelente tasa de captura de forma de onda y funciones de disparo integrales. Constituye un útil instrumento de alto rendimiento para diversos campos como la comunicación, aeroespacial, defensa, sistemas integrados, computadoras, investigación y educación. Los campos de prueba permiten a los usuarios medir señales analógicas y digitales al mismo tiempo [23].

- 4 Canales analógicos con un ancho de banda de 70 MHz.
- 16 Canales digitales.
- Frecuencia de muestreo en tiempo real de 1 GSa/s de los canales analógicos y digitales.
- Fuente de señal de 25 MHz de doble canal.
- Tasa de captura de forma de onda de 30000 wfms/s.
- Funciones de grabación y reproducción de forma de onda en tiempo real.
- Ruido de base bajo.
- Rango dinámico vertical amplio de 1 mV/div a 10 V/div.
- Pantalla LCD TFT WVGA de 7 pulgadas de resolución 800x480.
- Múltiples funciones de operación matemática de forma de onda.
- Interfaces USB, Host USB, LAN.

- Osciloscopio de la marca Gratten modelo GA1202CAL

Pertenece a la serie de osciloscopios GA1000. Presenta almacenamiento digital de pequeño tamaño, una pantalla LCD TFT y un menú emergente para la visualización, que puede mejorar notablemente la eficiencia de trabajo por su facilidad de uso. El osciloscopio tiene una frecuencia de muestreo en tiempo real de hasta 1 GSa/s, por lo que es capaz de captar señales complejas y rápidamente cambiantes [24].

- 2 Canales analógicos con un ancho de banda de 200 MHz.
- Frecuencia de muestreo en tiempo real de 1 GSa/s.
- Pantalla LCD TFT a color de 7 pulgadas de ancho.
- Funciones de filtrado digital y grabación de forma de onda.
- Interfaces USB, RS-232.
- Admite conexión a PC para comunicación remota.

- Generador de señales de la marca Rigol modelo DG1032Z

Capítulo 2

Pertenece a la serie de generadores de señales DG1000Z. Es un generador multifuncional que combina muchas funciones en una, incluido el generador de funciones, forma de onda arbitraria, ruido, pulsos, armónicos, el modulador analógico/digital y el contador [25].

- 2 Canales de frecuencia de salida máxima (sinusoidal) 30 MHz.
- Pantalla a color de 3,5 pulgadas de resolución 320x240.
- Memoria de forma de onda arbitraria para cada canal.
- Generador de armónicos de 8 órdenes incorporado.
- Contador de frecuencia de función completa de 7 dígitos/s con ancho de banda de 200 MHz.
- Hasta 160 formas de onda integradas.
- Frecuencia de muestreo de 200 MSa/s, resolución vertical de 14 bits.
- Varias funciones de modulación: AM, FM, PM, ASK, FSK, PSK y PWM.
- Función de suma de forma de onda estándar.
- Interfaces USB, LAN.

Se disponen además de elementos pasivos como resistencias, capacitores tanto electrolíticos como cerámicos, inductores, diodos y dentro de los elementos activos diferentes modelos de transistores y circuitos integrados. Referente a los elementos pasivos resulta de mucha importancia la tolerancia que presentan dichos componentes y más en aplicaciones de audio donde se necesitan etapas idénticas de procesamiento. Otra de las características relevantes es la capacidad de disipación de potencia de cada componente a utilizar.

2.4 Selección de variantes de implementación

Para los ensayos experimentales propuestos se decide utilizar un amplificador de potencia de audio integrado. Esto resulta muy conveniente, pues primeramente se necesitan muy pocos componentes externos para lograr una adecuada amplificación. El tiempo asignado al desarrollo de actividades prácticas en el laboratorio docente es limitado y para el objetivo que se persigue, la implementación de un amplificador integrado resulta un ahorro considerable del mismo. La potencia de operación de estos dispositivos suele ser relativamente baja y dado que se requieren medir sus parámetros de comportamiento no es factible trabajar con potencias elevadas. Desde el punto de vista adquisitivo, resulta más económico que implementar un amplificador de audio con componentes discretos.

Capítulo 2

Dado que existen varios modelos de osciloscopios al alcance, se plantea la necesidad de elegir aquel que mejores prestaciones tenga para la aplicación a propósito. Por ello, se decidió emplear el osciloscopio de la marca Rigol modelo MSO1074Z, pues el equipo cuenta con 4 canales permitiendo monitorear 4 señales al mismo tiempo. Su ancho de banda es considerable, ya que con 70 MHz resulta suficiente analizar señales amplificadas en el rango audible (20 Hz – 20 KHz). El ruido de base es bajo, que posibilita una lectura más clara, menos afectada por interferencias que alejen su comportamiento de la realidad. La pantalla tiene una resolución mucho más grande en comparación a los otros modelos, además tiene una excelente tasa de captura, permitiendo visualizar datos de las señales con mayor facilidad. Presenta un rango dinámico vertical desde 1 mV/div hasta 10 V/div para atender señales lo suficientemente pequeñas. Entre otras consideraciones, tienen en común múltiples funciones de operación matemática, la interfaz USB y frecuencias de muestreo en tiempo real de hasta 1 GSa/s.

Teniendo en cuenta los requerimientos para desempeñar cada una de las mediciones de los parámetros de comportamiento del amplificador de audio y según la descripción de los recursos disponibles en el laboratorio docente, se realiza una selección de las variantes adecuadas que se proponen implementar.

- Para determinar la sensibilidad del amplificador se utiliza como elemento principal el osciloscopio, ya que esta es la forma más fácil que se tiene para comprobar la saturación de la señal de salida amplificada ante los diferentes niveles de tensión aplicados a la entrada del circuito.
- Las impedancias de entrada y salida, ganancia de tensión y potencia de salida respectivamente son analizadas teniendo en cuenta el multímetro digital, debido a que se requieren resultados precisos y se puede manejar con mayor destreza atendiendo a que se tomaran varias lecturas de las mediciones.
- El ancho de banda del amplificador se analiza a través osciloscopio, pues independientemente que se necesita tomar lectura de la tensión en la señal amplificada, se tiene la posibilidad de monitorear el comportamiento de la ganancia del amplificador para las distintas frecuencias que experimenta la señal introducida.
- Para medir el desfasaje existen dos posibilidades principalmente, indirectamente a través del retardo de tiempo entre ambas señales, o la elegida, tomado directamente en el osciloscopio en

Capítulo 2

términos de grados. Así se reducen errores en la medición y se agiliza el procedimiento para obtener el resultado.

- Para medir la distorsión armónica total se plantearon también dos posibilidades, ambas con el osciloscopio. La primera de ellas desarrollada a partir del análisis cualitativo referente a los resultados obtenidos en la resta de las señales; que, aunque permite evaluar el parámetro no ofrece el grado de distorsión que introduce el circuito. Sin embargo, a través de la transformada rápida de Fourier se puede conocer en magnitud la distorsión existente.

Equipamiento:

- A. Fuente de alimentación.
- B. Generador de señales.
- C. Multímetro digital.
- D. Osciloscopio digital.

Componentes:

- A. Resistores.
- B. Capacitores.
- C. Altavoz (Resistencia de carga).

Tabla 2.1: Variantes a evaluar para la implementación de los ejercicios de laboratorio

Parámetros	Variantes	Equipamiento	Componentes	Referencias
Sensibilidad	1	A, B, D	A, B	[18]
Impedancia de entrada	1	A, B, C	A, B	[16]
Impedancia de salida	1	A, B, C	A, B	
Ganancia de tensión	1	A, B, C	A, B, C	[16], [18]
Potencia de salida	1	A, B, C	A, B, C	[18]
Ancho de banda	1	A, B, D	A, B, C	[16]
Respuesta de fase	1	A, B, D	A, B, C	[17]
	2	A, B, D	A, B, C	
THD	1	A, B, D	A, B, C	[16]
	2	A, B, D	A, B, C	

2.5 Diseño y montaje de módulos amplificadores de potencia basados en el TBA810

El TBA810 es circuito integrado monolítico diseñado para su uso como amplificador clase B de baja frecuencia. Consta de 12 pines, además de dos pestañas planas para ayudar con la disipación del calor. Entre sus especificaciones técnicas más relevantes según [29] es posible mencionar:

- Necesita una fuente de alimentación simple desde 4 hasta 20 V de corriente directa.
- Potencia de salida máxima de 7 W para cargas de 4 Ω con 16 V de alimentación.
- Corriente de salida máxima de 2,5 A soportando picos de hasta 3,5 A.
- Ancho de banda comprendido desde 40 Hz a 20 KHz.
- Eficiencia máxima de 70 %.
- Presenta una distorsión de hasta 0,3 % para una señal de prueba de 1 KHz.
- Ganancia de voltaje máxima de 40 dB operando en lazo cerrado.

Como parte de su hoja de especificaciones técnicas el fabricante ofrece un circuito de aplicación del mismo, que a continuación se representa en la figura.

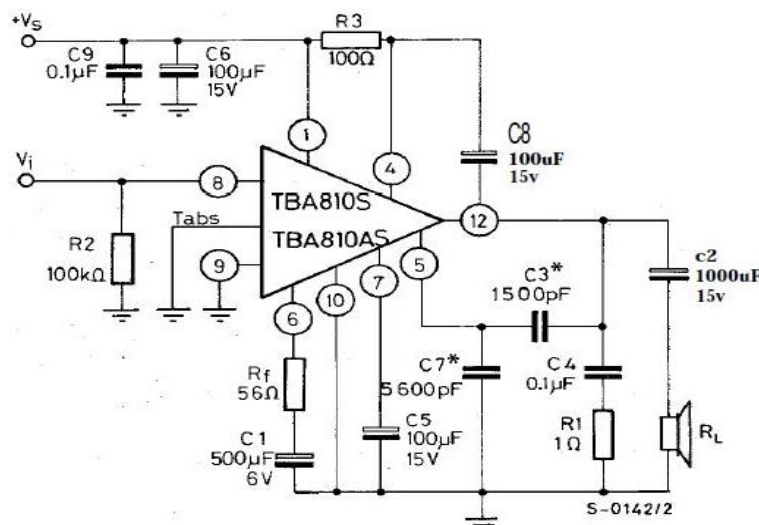


Figura 2.1: Circuito amplificador de audio utilizando el TBA810

Para simular el circuito se propuso la utilización del software NI Multisim. Sin embargo, la simulación analógica no fue posible desarrollarla debido a la ausencia del modelo necesario en el programa.

Como parte del máximo aprovechamiento del tiempo se piensa en la posibilidad de implementar módulos amplificadores de audio. Con esa iniciativa, se creó un módulo con una huella (footprint) para el diseño del circuito impreso (PCB) para luego realizar el montaje. Con esta variante se

Capítulo 2

agiliza la realización de las prácticas de laboratorio al evitar el consumo de tiempo por parte de los estudiantes en el montaje de los componentes y se reduce además la posibilidad de cometer fallas en la interconexión y por tanto de dañar los componentes.

2.6 Diseño experimental

Para la realización de las actividades prácticas primeramente se necesita detallar la disposición y configuraciones previas con la que se utiliza el equipamiento del laboratorio docente.

Consideración 1:

La fuente de alimentación ofrece hasta 30 V con una corriente máxima de 3 A. Para los ensayos fue regulada a 12 V y se ajustó a la máxima demanda de corriente para garantizar el consumo requerido por el amplificador. Las puntas de la fuente se fijan a los contactos del canal de salida correspondiente y su otro extremo se conecta a los terminales de alimentación del circuito polarizado correctamente.

Consideración 2:

En el generador de señales se pulsa el botón “Sine”, correspondiente a la señal sinusoidal y en el apartado se ajusta según su control variable tanto la frecuencia como la amplitud de la onda generada. Fue utilizado el canal 1 por lo que para habilitar su salida se oprime el botón “Output 1”. La sonda se conecta al canal correspondiente en el generador de señales y su otro extremo se fija a la entrada del circuito amplificador, teniendo en cuenta la polaridad adecuada.

Consideración 3:

En el osciloscopio se utilizan los canales 1 y 2 para analizar las señales. Por consiguiente, la sonda correspondiente al canal 1 se fija a la entrada y la sonda referente al canal 2 se fija a la salida del circuito amplificador, ambas conectadas con la requerida polarización.

La señal de audio trabajada es sinusoidal y para su análisis es necesario bloquear la componente DC leída por el osciloscopio. Como respuesta se pulsa la tecla correspondiente al canal en que se va a efectuar la configuración, en su menú se selecciona la opción “Acoplamiento” y allí se elige “AC”.

Como se trabaja con señales relativamente pequeñas se coloca el selector de las puntas de prueba en la escala “1X”, ya que no es necesario introducir atenuación. Para ello en el osciloscopio se

Capítulo 2

requieren configurar los canales bajo el mismo factor de atenuación; entonces se pulsa la tecla referente al canal, luego en el menú se selecciona la opción “Sonda” y allí se elige “1X”.

Para visualizar correctamente las señales en el osciloscopio es necesario ajustar los controles según la preferencia. Mediante los mandos “Scale”, con el control horizontal es posible controlar el periodo (s/div) y a través del control vertical se puede controlar la amplitud de la señal (V/div). Con los mandos “Position”, el control horizontal permite desplazar la señal en el plano horizontal y el control vertical ajusta su desplazamiento en el plano vertical. Las señales pueden ser centradas automáticamente con solo pulsar ambos controles.

Luego de atender la disposición y configuraciones respecto al equipamiento del laboratorio, se propone una guía con los procedimientos a seguir para tomar las mediciones de los parámetros correspondientes al módulo amplificador de audio. De esta forma, se facilita el desarrollo de las actividades que permitan estudiar el desempeño del amplificador apoyado en los conocimientos adquiridos en la asignatura Sistemas de Audio.

2.6.1 Procedimiento para determinar la sensibilidad

Equipamiento:

- Fuente de alimentación.
- Generador de señales.
- Osciloscopio digital.

Componentes:

- Resistencias.
- Capacitores.

Guía:

1. Con el generador de señales introducir la señal de audio de amplitud inicial 50 mVpp y frecuencia 1 KHz.
2. Visualizar el segundo canal del osciloscopio y ajustar su ganancia a 2 V/div con período de 200 us/div.
3. Mediante el generador de señales incrementar gradualmente el nivel de tensión de la señal de entrada hasta observar en la pantalla del osciloscopio la máxima amplificación sin producirse recortes en los picos de la onda.

Capítulo 2

4. Tomar nota del nivel de tensión aplicado en la entrada, que se representa en la pantalla del generador de señales.
5. En el osciloscopio tomar nota de la lectura de la amplitud máxima que presenta la señal amplificada. Para ello, en el panel se pulsa la tecla “Medición”, allí en el apartado “Fuente” se elige “CH2” como origen de la medición y por último en el menú desplegable en la parte izquierda de la pantalla, se selecciona la opción “V_{máx}”.

2.6.2 Procedimiento para determinar la impedancia de entrada y salida

Equipamiento:

- Fuente de alimentación.
- Generador de señales.
- Multímetro digital.

Componentes:

- Resistencias.
- Capacitores.

Impedancia de entrada

Guía:

1. Se utiliza una resistencia variable de 100 K Ω ajustada desde su mínima deflexión y se conecta en serie entre la salida del generador de señales y la entrada del amplificador.
2. Las puntas del multímetro digital se conectan a los puertos “VDC/VAC” y “COM” respectivamente y su otro extremo se fija a los terminales de salida del circuito. Para configurar la escala de medición de tensión alterna se pulsa la tecla “~V” y se ajusta el rango a 20 V.
3. Con el generador de señales se introduce la señal de audio de amplitud 160 mV_{pp} y frecuencia 1 KHz.
4. Posteriormente, la resistencia variable se gradúa desde su mínima deflexión hasta obtener aproximadamente 1,7 V en la lectura del multímetro y en esas condiciones se retira del circuito.
5. El multímetro digital se desconecta de los terminales de salida. En el panel se pulsa la tecla “ Ω ” y luego se configura el rango de medición a 200 K Ω .

Capítulo 2

6. Por último, se colocan las puntas de prueba en los extremos utilizados de la resistencia variable y se toman notas de varias lecturas de su valor correspondiente.

Impedancia de salida

Guía:

1. Se utiliza una resistencia variable de $220\ \Omega$ ajustada desde su máxima deflexión (debe presentar buena disipación de potencia, aproximadamente $3\ W$ para una medición instantánea) y se conecta a los terminales de salida del amplificador.
2. Las puntas del multímetro digital se fijan a los terminales de salida del circuito para medir el nivel de tensión de la señal amplificada; se debe configurar la escala de medición a tensión alterna con el rango a $20\ V$.
3. Con el generador de señales se introduce la señal de audio de amplitud $160\ mV_{pp}$ y frecuencia $1\ KHz$.
4. Posteriormente, la resistencia variable se gradúa desde su máxima deflexión hasta obtener aproximadamente $1,7\ V$ en la lectura del multímetro y en esas condiciones se retira del circuito.
5. El multímetro digital se desconecta de los terminales de salida. En el panel se pulsa la tecla “ Ω ” y luego se configura el rango de medición a $200\ \Omega$.
6. Por último, se colocan las puntas de prueba en los extremos utilizados de la resistencia variable y se toman notas de varias lecturas de su valor correspondiente.

2.6.3 Procedimiento para determinar la ganancia de tensión

Equipamiento:

- Fuente de alimentación.
- Generador de señales.
- Multímetro digital.

Componentes:

- Resistencias.
- Capacitores.
- Altavoz (Resistencia de carga).

Guía:

Capítulo 2

1. Conectar la resistencia de carga de 8Ω a los terminales de salida del amplificador.
2. Mediante el generador de señales introducir la señal de audio de amplitud 160 mVpp y frecuencia 1 KHz.
3. El multímetro digital se posiciona en la escala de tensión alterna y se ajusta el rango a 200 mV. Se colocan las puntas en los terminales de entrada y se toman notas de varias lecturas.
4. Con el multímetro en la escala de tensión alterna, se ajusta nuevamente el rango de medición a 20 V y esta vez se conectan las puntas a los terminales de salida del circuito. En estas condiciones también se toman notas de varias lecturas correspondientes.
5. Para determinar la potencia de salida, bastará con sustituir en la expresión (8) cada uno de los resultados obtenidos en las mediciones y calcular.

2.6.4 Procedimiento para determinar la potencia de salida

Equipamiento:

- Fuente de alimentación.
- Generador de señales.
- Multímetro digital.

Componentes:

- Resistencias.
- Capacitores.
- Altavoz (Resistencia de carga).

Guía:

Con las mediciones efectuadas, se consideran los resultados obtenidos a partir de las notas tomadas referentes a las lecturas de tensión máxima en la señal amplificada, entregada a la resistencia de carga de 8Ω . Conociendo entonces la carga y la tensión que se le entrega; es posible mediante la expresión (3) determinar la máxima potencia de salida.

2.6.5 Procedimiento para determinar el ancho de banda

Equipamiento:

- Fuente de alimentación.
- Generador de señales.
- Osciloscopio digital.

Capítulo 2

Componentes:

- Resistencias.
- Capacitores.
- Altavoz (Resistencia de carga).

Guía:

1. Conectar la resistencia de carga de 8Ω a los terminales de salida del amplificador.
2. Mediante el generador de señales introducir la señal de audio de amplitud 160 mVpp y frecuencia 1 KHz.
3. A través del control variable del generador de señales, disminuir linealmente la frecuencia de la señal introducida al circuito manteniendo constante el nivel de tensión, hasta que la señal amplificada se encuentre atenuada a 70,7 % de su amplitud (3 V).
4. En el panel del osciloscopio pulsar la tecla "Cursor", en el menú disponible se elige un cursor para vincularlo al canal de la señal que se requiere medir "CH2" y por último en "Modo" se selecciona "Manual"; de esta forma a través del control de posición horizontal se facilita explorar el nivel de tensión a partir de las variaciones que experimenta la señal de salida.
5. Configurar el período de representación de las señales en el osciloscopio a 10 ms/div y tomar nota de la frecuencia de corte inferior.
6. A través del control variable del generador de señales, esta vez, aumentar linealmente la frecuencia de la señal introducida al circuito manteniendo constante el nivel de tensión, hasta que la señal amplificada se encuentre atenuada a 70,7 % de su amplitud (3 V).
7. Volver a configurar el período de representación de las señales a 10 us/div y tomar nota de la frecuencia de corte superior.
8. Conociendo las frecuencias cuadrantales, el ancho de banda del amplificador se puede determinar mediante la expresión (10).

2.6.6 Procedimiento para determinar la respuesta de fase

Equipamiento:

- Fuente de alimentación.
- Generador de señales.
- Osciloscopio digital.

Capítulo 2

Componentes:

- Resistencias.
- Capacitores.
- Altavoz (Resistencia de carga).

Guía:

1. Conectar la resistencia de carga de 8Ω a los terminales de salida del amplificador.
2. Mediante el generador de señales introducir la señal de audio de amplitud 160 mVpp y frecuencia 1 KHz.
3. El osciloscopio se configura con una ganancia de 100 mV/div para la señal de entrada y una ganancia de 2 V/div para la señal de salida. El período de representación será 200 us/div, igual para ambas señales.
4. En el panel del osciloscopio se pulsa la tecla “CH1” con el objetivo de medir el retardo de la señal de entrada respecto a la de salida. En la zona izquierda de la pantalla se encuentra la opción “Fase”, siendo visible dos formas de medición, una atendiendo al flanco de subida y otra al de bajada; se selecciona.
5. Tomar nota del retardo existente entre ambas señales, que se muestra directamente en términos de grados en la parte inferior de la pantalla.

2.6.7 Procedimiento para determinar la THD

Equipamiento:

- Fuente de alimentación.
- Generador de señales.
- Osciloscopio digital.

Componentes:

- Resistencias.
- Capacitores.
- Altavoz (Resistencia de carga).

Guía:

1. Conectar la resistencia de carga de 8Ω a los terminales de salida del amplificador.

Capítulo 2

2. Mediante el generador de señales introducir la señal de audio de amplitud 160 mVpp y frecuencia 1 KHz.
3. En el panel del osciloscopio se pulsa la tecla “Math”, allí en “Operación” seleccionar la opción “FTT” y en “Fuente” elegir “CH2” que contempla la señal que se requiere evaluar.
4. Configurar los parámetros que intervienen en la representación de la respuesta FTT:
 - En “Modo de visualización” seleccionar “Completo”, pues así el canal de origen y los resultados de la operación FFT se muestran en una misma ventana en toda la pantalla del osciloscopio.
 - Ajustar la frecuencia central a 7 KHz, con una resolución de 1 KHz/div y la tensión offset a -200 mV.
 - En el apartado “Ventana” se llega a un compromiso entre la resolución de frecuencia y la precisión de la amplitud con la que se muestran los resultados de la operación FTT; se selecciona la ventana “Blackman” ya que es la más adecuada para determinar los armónicos.
 - En “Unidad” seleccionar “Vrms” como unidad de medida para tomar lectura del nivel de tensión de cada componente espectral de los armónicos.
5. La señal analizada en el canal 2 del osciloscopio interviene en la representación de la respuesta FTT, por ello se ajusta la ganancia a 100 mV y 1 ms de período. A través del control variable “Intensidad” se reduce al máximo la intensidad de la señal amplificada con el objetivo de tener una mejor apreciación de los armónicos de la señal.
6. Para realizar la medición, se pulsa la tecla “Cursor” y se selecciona uno de los cursores disponibles para asociarlo a la respuesta “Math”, en “Modo” elegir “Manual”. Mediante el control de posición horizontal explorar y tomar lectura del nivel de tensión de cada una de las componentes espectrales de los armónicos en la señal amplificada.

2.7 Conclusiones del capítulo

Como parte del desarrollo de los ejercicios prácticos primeramente se realiza una caracterización del equipamiento de instrumentación y los componentes disponibles. A partir de entonces se evalúan las posibilidades que permitan satisfacer propuestas de actividades en el laboratorio. De

Capítulo 2

esta forma se pretende que los estudiantes aprovechen al máximo su docencia y para ello es importante la aplicación de guías que le faciliten el aprendizaje.

Capítulo 3 Análisis de resultados

En el capítulo 3 se exponen los resultados de las actividades realizadas en el laboratorio docente y como parte de ellos son presentadas un conjunto de mediciones de los parámetros del amplificador de audio. Además, se determina que tan determinantes son las propuestas presentadas con su correspondiente valoración económica.

3.1 Relación de resultados experimentales

Como parte del desarrollo del circuito implementado en la herramienta de simulación NI Multisim, no fue posible evaluar el comportamiento de los parámetros del amplificador de audio, aunque sí se dispone de su montaje. En representación, la siguiente captura tomada muestra el circuito equivalente.

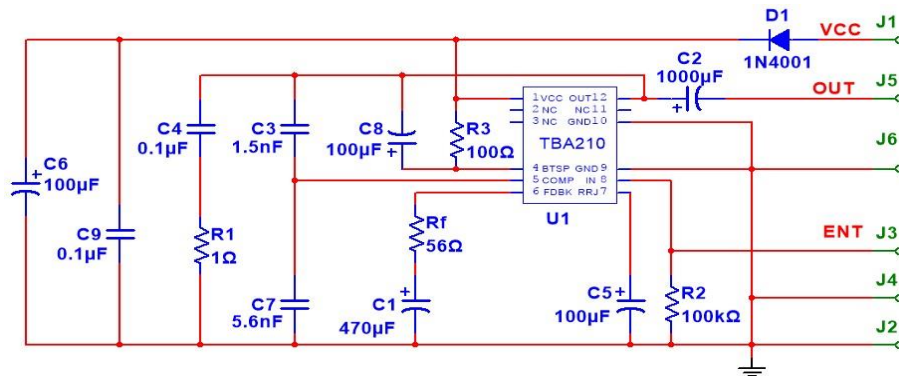


Figura 3.1: Montaje del circuito en NI Multisim

El empleo de módulos amplificadores es otra de las propuestas reflejadas anteriormente que constituye una ventaja para el desempeño de los estudiantes. Con ese objetivo se desarrolló de forma simplificada un circuito impreso diseñado y montado para la realización de las prácticas.

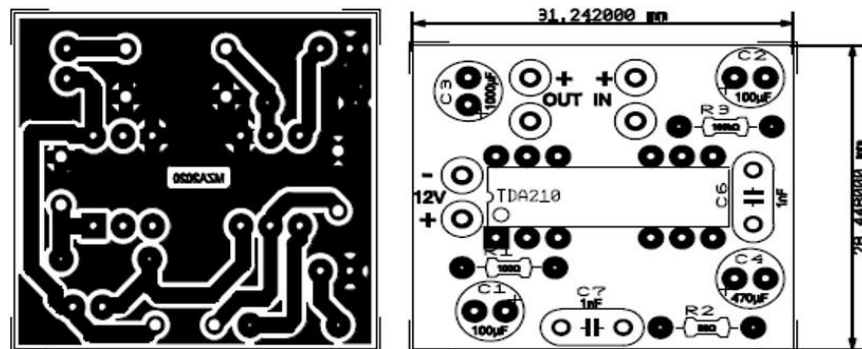


Figura 3.2: Diseño del circuito impreso

3.2 Procesamiento de resultados

Con el objetivo de reflejar los resultados obtenidos se emplean tablas para mostrar las mediciones de los parámetros del amplificador de audio, de manera que facilite hacer luego un procesamiento de las mismas, teniendo en cuenta que en ocasiones fueron tomadas hasta 10 lecturas correspondientes en un lapso de aproximadamente 15 segundos.

- Sensibilidad

La lectura de tensión en los terminales de salida del amplificador de audio apenas tiene fluctuaciones, es casi invariable; por ello se considera despreciable tomar varias medidas. La máxima excursión de la señal de salida se encuentra para una señal de entrada de amplitud 80 mV.

Tabla 3.1: Medición de la sensibilidad del amplificador

Instrumento de medición	Sensibilidad	Vo
Osciloscopio	80 mV	4.27 V

- Impedancia de entrada y salida

Tabla 3.2: Mediciones de la impedancia de entrada y salida del módulo amplificador

Instrumento de medición	Zi	Zo
Multímetro digital	39,261 KΩ	3,947 Ω
	40,748 KΩ	4,410 Ω
	40,619 KΩ	4,102 Ω
	39,741 KΩ	3,896 Ω
	41,392 KΩ	4,027 Ω
	39,926 KΩ	4,310 Ω
	39,631 KΩ	4,349 Ω
	41,192 KΩ	4,284 Ω
	40,914 KΩ	4,401 Ω
	40,257 KΩ	3,961 Ω

El valor medio de las mediciones puede determinarse:

$$\bar{M} = \frac{M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 + M_7 + M_8 + M_9 + M_{10}}{10} \quad (3.1)$$

Siendo $M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$ los valores de cada una de las mediciones puntuales realizadas y \bar{M} el valor medio correspondiente.

Entonces, el valor medio para la impedancia de entrada y salida del módulo amplificador resulta:

$$\bar{Z} = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8 + Z_9 + Z_{10}}{10}$$

Capítulo 3

Donde

$$\bar{Z}_i = 40,368 \text{ K}\Omega$$

$$\bar{Z}_o = 4,169 \Omega$$

- Ganancia de tensión

Tabla 3.3: Mediciones de la tensión de entrada y salida

Instrumento de medición	V_i	V_o	G_v	$d (G_v)$
Multímetro digital	56,892 mV	3,541 V	62,241	1,808
	57,169 mV	3,516 V	61,502	1,069
	56,925 mV	3,347 V	58,797	1,636
	56,871 mV	3,339 V	58,712	1,721
	56,984 mV	3,492 V	61,280	0,847
	56,159 mV	3,411 V	60,738	0,305
	56,397 mV	3,375 V	59,844	0,589
	57,524 mV	3,394 V	59,001	1,432
	57,276 mV	3,498 V	61,073	0,640
	57,439 mV	3,512 V	61,143	0,710

El valor medio de ganancia de tensión visto a partir de la expresión (3.1) se determina:

$$\bar{G}_v = \frac{G_{v_1} + G_{v_2} + G_{v_3} + G_{v_4} + G_{v_5} + G_{v_6} + G_{v_7} + G_{v_8} + G_{v_9} + G_{v_{10}}}{10}$$

Donde

$$\bar{G}_v = 60,433$$

La desviación define la diferencia que existe entre una medición puntual (X) y el valor medio de las mediciones correspondientes (\bar{X}), según:

$$d = |X - \bar{X}| \quad (3.2)$$

Por consiguiente, la ganancia promedio de tensión atendiendo a la desviación máxima se obtiene:

$$G_v = 60,433 \pm 1,808$$

En términos de decibeles se traduce:

$$G_v = 35,6 \text{ dB} \pm 5,1 \text{ dB}$$

- Potencia de salida

Con el apoyo de la lectura de tensión tomada en los terminales de salida del amplificador para el apartado anterior y con la resistencia de carga de 8Ω utilizada, según la expresión (1.5) la potencia de salida puede ser determinada.

Tabla 3.4: Tensión y potencia de salida respectivamente

Instrumento de medición	V_o	P_o
Multímetro digital	3,541 V	1,567 W
	3,516 V	1,545 W
	3,347 V	1,400 W
	3,339 V	1,394 W
	3,492 V	1,524 W
	3,411 V	1,454 W
	3,375 V	1,424 W
	3,394 V	1,440 W
	3,498 V	1,530 W
	3,512 V	1,542 W

El valor medio de la potencia de salida atendiendo a la expresión (3.1) se determina:

$$\overline{P_o} = \frac{P_{o_1} + P_{o_2} + P_{o_3} + P_{o_4} + P_{o_5} + P_{o_6} + P_{o_7} + P_{o_8} + P_{o_9} + P_{o_{10}}}{10}$$

Donde

$$\overline{P_o} = 1,482 \text{ W}$$

- Respuesta en frecuencia (ancho de banda)

La amplitud máxima medida en el osciloscopio para la señal de salida con frecuencia de 1 KHz es 4,27 V y de aquí el 70,7 %, corresponde a una señal de amplitud máxima 3 V. La señal amplificada debe verse atenuada hasta 3 V de su amplitud para cada una de las frecuencias de corte, o lo que es igual, 3 dB respecto a frecuencias de la zona plana, garantizando la condición descrita.

Tabla 3.5: Frecuencias de corte

	Frecuencia central	Frecuencia de corte inferior	Frecuencia de corte superior
Frecuencia del generador de señales	8 KHz	35 Hz	15 KHz
Amplitud de la señal de salida	12,6 dB (4,27 V)	9,5 dB (3 V)	9,5 dB (3 V)

De esta forma el ancho de banda del amplificador queda limitado según la expresión (1.12).

Donde

$$BW = 14,965 \text{ KHz}$$

- Respuesta de fase

Capítulo 3

Como parte del procedimiento descrito, siguiendo cada uno de los pasos es posible obtener directamente el desfase entre las señales de entrada y salida del amplificador. En la parte inferior derecha de la pantalla se muestra automáticamente la relación de fase. La captura tomada representa la lectura de un desfase promedio de 3,270 grados, de la señal de entrada (adelantada) en relación con la señal de salida.

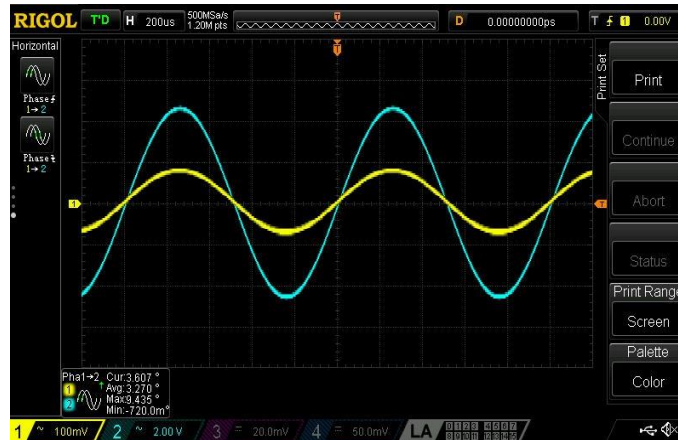


Figura 3.3: Desfase entre las señales de entrada y salida

- Distorsión armónica total (THD)

En la captura siguiente se observan cada uno los componentes armónicos que presenta la señal de salida amplificada. Como corresponde, para formas de onda simétricas, aparecen armónicos impares (múltiplos 3, 5, 7, ... de la frecuencia fundamental). Como se había detallado se toman en consideración hasta el armónico de tercer o cuarto orden, ya que se aprecia como su amplitud disminuye progresivamente llegando a ser despreciable.



Figura 3.4: Componentes armónicos de la señal amplificada

Tabla 3.6: Componentes espectrales

Frecuencia	Amplitud
f1	568 mV
2f1	180 mV
3f1	104 mV
4f1	68 mV

La magnitud de la distorsión armónica total puede obtenerse atendiendo a la expresión (1.7).

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1}$$

$$THD = \frac{\sqrt{180 \text{ mV}^2 + 104 \text{ mV}^2 + 68 \text{ mV}^2}}{568 \text{ mV}}$$

$$THD = 0,38$$

3.3 Valoración económica

Para realizar la valoración económica de la propuesta implementada se tiene en consideración el valor de cada uno de los componentes con los que se implementó el amplificador de audio [26], así como también el costo correspondiente al módulo integrado en el mercado actual.

Tabla 3.7: Precio de los componentes utilizados para implementar el circuito

Componente	Costo del conjunto	Costo de la unidad	Unidades utilizadas	Precio
Resistencia de 1 Ω (1/4 W)	\$0,99 (100 PCS)	\$0,0099	1	\$0,0099
Resistencia de 56 Ω (1/4 W)	\$0,99 (100 PCS)	\$0,0099	1	\$0,0099
Resistencia de 100 Ω (1/4 W)	\$0,99 (100 PCS)	\$0,0099	1	\$0,0099
Resistencia de 100 $K\Omega$ (1/4 W)	\$0,99 (100 PCS)	\$0,0099	1	\$0,0099
Resistencia de 3,9 Ω (3 W)	\$1,50 (20 PCS)	\$0,075	2	\$0,15
Capacitor cerámico de 1500 pF	\$0,52 (100 PCS)	\$0,0052	1	\$0,0052
Capacitor cerámico de 5600 uF	\$0,52 (100 PCS)	\$0,0052	1	\$0,0052
Capacitor cerámico de 0,1 uF	\$0,52 (100 PCS)	\$0,0052	2	\$0,0104
Capacitor electrolítico de 100 uF	\$0,47 (50 PCS)	\$0,0094	3	\$0,0282

Capítulo 3

Capacitor electrolítico de 500 uF	\$0,33 (10 PCS)	\$0,033	1	\$0,033
Capacitor electrolítico de 1000 uF	\$0,42 (10 PCS)	\$0,033	1	\$0,033
Circuito integrado TBA810	\$6 (10 PCS)	\$0,60	1	\$0,60

Un módulo amplificador de audio con características similares se puede encontrar en el mercado con un valor de €10,75. Entre sus especificaciones técnicas según [27] están:

- Necesita una fuente de alimentación simple de 8 a 18 V de corriente directa.
- Potencia máxima de 7 W para una carga de 4 Ω y 2 W para 8 Ω .
- Sensibilidad de entrada 40 mV.
- Distorsión armónica total de 0,05 % para una señal de prueba de 1 KHz de frecuencia.
- Ancho de banda comprendido desde 20 Hz hasta 20 KHz.

El importe total del circuito implementado es de \$0,9046, aproximadamente \$1, que en comparación a su adquisición directa resulta notablemente económico.

3.4 Análisis de la factibilidad de las propuestas

Las propuestas implementadas para las actividades prácticas, han sido desarrolladas satisfactoriamente, aunque también se han tenido que tomar alternativas como parte de la solución.

Para las mediciones de sensibilidad, impedancia de entrada y salida, ganancia de voltaje y potencia de salida del amplificador, la calidad de los resultados obtenidos depende estrechamente de que los materiales de instrumentación se encuentren bien calibrados, así como también de la tolerancia de los componentes utilizados para la implementación del circuito.

Para determinar el ancho de banda, el análisis del comportamiento del amplificador cuando se le aplica una señal de entrada cuadrada permite determinar en forma rápida y simple las características de respuesta en frecuencia del mismo. La principal desventaja está en que los resultados obtenidos no son precisos dado que el método se funda en un modelo ideal siendo una aproximación al circuito real. Por su parte, el modelo desarrollado constituye una ventaja teniendo en cuenta que la señal probada presenta características semejantes a una señal de audio. El mayor inconveniente está en que las pruebas son realizadas atendiendo a un tono y no a señales complejas;

Capítulo 3

como es sabido la ganancia de un amplificador de audio se encuentra determinada por su comportamiento ante las distintas frecuencias que experimenta la señal de entrada.

Algo similar ocurre para el análisis de la respuesta de fase del amplificador. Los ensayos realizados se analizan para un tono, así como para condiciones de máxima potencia entregada a la carga. Por consiguiente, aunque la prueba es determinante, resulta interesante analizar el comportamiento para distintos niveles de tensión y frecuencia debido a que la respuesta en frecuencia de los amplificadores no es totalmente plana.

Idealmente, el mejor test que se le podría realizar es empleando una señal de audio compleja, utilizando un parlante como carga y un micrófono para recibir la señal amplificada; ya que así se garantiza al máximo un desempeño lo más cercano posible al comportamiento real.

Con el objetivo de determinar la distorsión armónica total se realizó la transformada rápida de Fourier a la señal amplificada; una de las funciones matemáticas que dispone el osciloscopio. Los resultados obtenidos permiten tener una noción cuantitativa del parámetro, sin embargo, como es adecuado corresponde mediante un analizador de espectros, que no se dispone en el laboratorio docente. Actualmente, los osciloscopios ya incorporan técnicas para realizar trazas en señales del dominio del tiempo a frecuencia. Aunque ambas prácticas se desarrollan teniendo en cuenta el mismo principio, el analizador de espectros es un equipo específicamente diseñado para eso, que comprende capturas a un mayor rango de frecuencias permitiendo resultados más precisos.

3.5 Comparación de los resultados obtenidos

Para comparar los resultados de las mediciones obtenidas con los valores esperados, se utiliza como referencia la información ofrecida por el fabricante en la hoja de datos del TBA810.

Tabla 3.8: Comparación de los resultados obtenidos

Parámetros	Condiciones de prueba	Especificaciones técnicas del TBA810	Condiciones de prueba	Resultados de los ensayos experimentales
Sensibilidad (Sv)	V _s = 14,4 V f = 1 KHz R _L = 4 Ω	80 mV	V _s = 12 V f = 1 KHz R _L = 8 Ω	80 mV
Ganancia de voltaje (Gv)	V _s = 14,4 V f = 1 KHz R _L = 4 Ω Lazo cerrado	Mínima: 34 dB Nominal: 37 dB Máxima: 40 dB	V _s = 12 V f = 1 KHz R _L = 8 Ω Lazo cerrado	Mínima: 30,5 dB Nominal: 35,6 dB Máxima: 40,7 dB
Potencia de salida (P _o)	V _s = 9 V f = 1 KHz	2,5 W	V _s = 12 V f = 1 KHz	1,482 W

Capítulo 3

	$RL = 4 \Omega$		$RL = 8 \Omega$	
Ancho de banda (BW)	$V_s = 14,4 \text{ V}$ $RL = 4 \Omega$	Desde 40 Hz hasta 10 KHz	$V_s = 12 \text{ V}$ $RL = 8 \Omega$	Desde 35 Hz hasta 15 KHz
Distorsión armónica total (THD)	$V_s = 14,4 \text{ V}$ $f = 1 \text{ KHz}$ $RL = 4 \Omega$	0,003	$V_s = 12 \text{ V}$ $f = 1 \text{ KHz}$ $RL = 8 \Omega$	0,38

Como se puede observar los resultados obtenidos concuerdan en gran medida con las especificaciones que ofrece el fabricante en su hoja de datos, a pesar de que para el test de prueba las consideraciones difieren en cuanto al voltaje de alimentación del circuito y la resistencia de carga utilizada.

3.6 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se concretaron los objetivos que se han venido persiguiendo a lo largo del proyecto investigativo. Ante los posibles desperfectos prácticos que involucran las mediciones electrónicas se desempeñó un procesamiento de las mismas con el objetivo de concluir resultados más precisos. Las mediciones fueron desarrolladas satisfactoriamente y los resultados obtenidos se acercan notablemente a las especificaciones tomadas como referencia. Por otra parte, se desarrollaron las actividades prácticas teniendo en cuenta las limitaciones de materiales y constituyendo económicamente un ahorro considerable.

Conclusiones generales

En el presente trabajo se proponen actividades para la realización de prácticas de laboratorio reales como apoyo a la asignatura optativa Sistemas de Audio. Las guías obtenidas como resultado de esta investigación contribuyen a solucionar el déficit de actividades prácticas reales en la asignatura. Como conclusiones generales de esta tesis pueden citarse las siguientes:

- Las guías propuestas cubren un tema importante de los contenidos del plan de la asignatura, en el cual se integran nuevos aspectos a la vez que se reutilizan y reafirman otros contemplados dentro del plan de estudios de la carrera de Telecomunicaciones y Electrónica.
- Se han diseñado siete actividades de laboratorio, dedicadas a la medición de parámetros de comportamiento de los amplificadores de potencia de audio. En estas se ha tenido en cuenta la disponibilidad de componentes y las particularidades del equipamiento del laboratorio de electrónica de la facultad de Ingeniería Eléctrica de la UCLV.
- El diseño e implementación práctica de un circuito modular de amplificador de potencia basado en el integrado TBA810 es otro resultado de este trabajo. Este simplifica el desarrollo de las actividades prácticas al reducir el tiempo de montaje del circuito y minimizar las posibilidades de roturas durante las prácticas.
- Las propuestas de prácticas fueron desarrolladas según las guías diseñadas. Los resultados obtenidos de las mediciones realizadas corroboraron la factibilidad de la implementación de estas, lo cual además ha sido confirmado desde el punto de vista económico.

Recomendaciones

Como complemento y desarrollo de otras actividades futuras se recomienda:

- Reproducir el montaje de los circuitos modulares basados en el TBA810, de manera que se garantice el cubrimiento de todos los puestos de laboratorios.
- Extender los análisis experimentales utilizando señales de audio complejas.

Referencias bibliográficas

- [1] C. R. Vitale, «La incorporación de la práctica estudiantil en las universidades latinoamericanas como nuevo paradigma educativo», *Universidades*, vol. 61, n.º 48, Art. n.º 48, 2011.
- [2] Frank Emilio Francesena Álvarez, «Actividades evaluativas a distancia de la asignatura Sistemas de Audio», Tesis, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, 2021.
- [3] E. Banet, «ACTIVIDADES PRÁCTICAS EN LA ENSEÑANZA UNIVERSITARIA», p. 16, 2011.
- [4] Guillermo Serrano Callergues, «Diseño e implementación de un amplificador de audio en clase AB en puente de baja potencia», Tesis, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2013.
- [5] Douglas Self, *Audio Power Amplifier Design*, Edición 6. 2013.
- [6] «Diseño de amplificadores - PCPfiles en www.pcpaudio.com», *PCP audio*. <https://www.pcpaudio.com/> (accedido 11 de noviembre de 2022).
- [7] F. D. A. Leon, «Ampli...cadores Multietapa», Accedido: 12 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/38696627/Ampli_cadores_Multietapa
- [8] X. Jiang, «Fundamentals of Audio Class D Amplifier Design: A Review of Schemes and Architectures», *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, vol. 9, n.º 3, pp. 14-25, 2017, doi: 10.1109/MSSC.2017.2712368.
- [9] J. Millman & C. Halkias, *Electrónica integrada*. España, Barcelona, 1976.
- [10] Bob Cordell, *Designing Audio Power Amplifiers*. 2011.
- [11] H. C. Foong y M. T. Tan, «An Analysis of THD in Class D Amplifiers», en *APCCAS 2006 - 2006 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems*, dic. 2006, pp. 724-727. doi: 10.1109/APCCAS.2006.342110.
- [12] Aldo Agustin Paredes Romero, «Diseño simplificado de circuitos electronicos para sistemas de sonido de alta fidelidad», Tesis, México, 2013.
- [13] José Francisco Alonso Calvo, «Parámetros de un amplificador integrado de audio». [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/390834921/Parametros-de-un-amplificador-integrado-de-audio-Jose-Fco-Alonso-Calvo>
- [14] Antonio Moisés Zorzano Martínez, «Amplificador de audio de alta fidelidad para sistemas activos de altavoces con bajo consumo de energía», Tesis, Universidad de Zaragoza, 2004.

- [15] Ramon Pinyol, «Armónicos: Causas, efectos y minimización», 2016. Accedido: 10 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.salicru.com/files/pagina/72/278/jn004a00_whitepaper-armonics_.pdf
- [16] «Mediciones en amplificadores de audio», 2007. [En línea]. Disponible en: <http://www1.frm.utn.edu.ar/medidase2/tp/tp6.pdf>
- [17] «Técnicas de medida». <http://www.uco.es/oscivirtual/Tutorial/TecnicasMedida.html> (accedido 7 de noviembre de 2022).
- [18] «Mediciones en el amplificador de potencia de audio - PDF Free Download». <https://docplayer.es/68573774-Mediciones-en-el-amplificador-de-potencia-de-audio.html> (accedido 4 de noviembre de 2022).
- [19] Marcos Faúndez Zanuy, «Nuevas tendencias en audio digital». https://www.researchgate.net/publication/359014606_Nuevas_tendencias_en_audio_digital (accedido 6 de noviembre de 2022).
- [20] K. R. Scott, «3 tendencias de Audio y Video para 2023», *CPV MICRO*, 2022. <https://cpvmicro.com/tendencias-audio-y-video/> (accedido 6 de noviembre de 2022).
- [21] International Electrotechnical Commission 60268-3, «Sound system equipment – Part 3: Amplifiers». 2018. [En línea]. Disponible en: https://webstore.iec.ch/preview/info_iec60268-3%7Bed5.0%7Db.pdf
- [22] RIGOL TECHNOLOGIES, INC., «Manual de usuario para los osciloscopios digitales de la serie DS1000D/E». 2009. Accedido: 11 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.manualslib.es/manual/162109/Rigol-Ds1000D-Serie.html#manual>
- [23] RIGOL TECHNOLOGIES, INC., «User's Guide MSO1000Z/DS1000Z Series Digital Oscilloscope». 2015. Accedido: 12 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.manualslib.com/manual/1254213/Rigol-Mso1000z-Series.html#manual>
- [24] GRATTEN TECHNOLOGIES, «User's Manual GA1000 Series Digital Storage Oscilloscope». 2012. Accedido: 12 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.manualslib.com/manual/1301664/Gratten-Ga1022cal.html?page=2#manual>
- [25] RIGOL TECHNOLOGIES, INC., «User's Guide DG1000Z Series Function/Arbitrary Waveform Generator». 2016. Accedido: 12 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.manualslib.com/manual/1240790/Rigol-Dg1062z.html#manual>
- [26] «AliExpress - Online Shopping for Popular Electronics, Fashion, Home & Garden, Toys & Sports, Automobiles and More.» (accedido 14 de noviembre de 2022).
- [27] «AMPLIFICADOR MONO 7W», *Diotronic (Barcelona) - Calle Muntaner, 49*. <https://diotronic.com/modulos/14854-amplificador-mono-7w> (accedido 14 de noviembre de 2022).