



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“ESTUDIO COMPARATIVO DE LA AMPLIFICACIÓN BASADA
EN TRANSISTORES, CONTRA LA AMPLIFICACIÓN BASADA
EN VÁLVULAS TERMOIÓNICAS, PARA APLICACIONES DE
AUDIO (AF)”

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

**ESPECIALIZACIÓN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN
INDUSTRIAL**

Presentado por:

RICARDO RUBÉN PÉREZ RODRÍGUEZ

Guayaquil – Ecuador

2015

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres y a mi esposa que siempre me ayudaron a lo largo de mis estudios para lograr todo lo que me he propuesto.

Además quiero agradecer especialmente a Miguel Yapur quien consideró que la temática de esta tesis merecía un estudio a profundidad.

DEDICATORIA

Dedicado a todos mis amigos músicos que necesitaban conocer cuál era la diferencia real entre los distintos tipos de amplificación para guitarras y otros instrumentos, que hasta ahora debían conformarse con teorías empíricas y apreciaciones personales de quienes se consideraban entendidos en la materia.

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



MSc. Sara Ríos Orellana

SUBDECANA DE LA FIEC



MSc. Miguel Yapur Auad

DIRECTOR DE TESIS



Ing. Holger Cevallos Ulloa

MIEMBRO PRINCIPAL

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ricardo Pérez Rodríguez', is written over a horizontal line.

Ricardo Pérez Rodríguez

RESUMEN

Este estudio busca comprobar, de una manera teórica y práctica, las diferencias entre la amplificación lograda por circuitos que emplean transistores de cualquier tipo, con la amplificación lograda por circuitos con válvulas termoiónicas. Si bien el mercado actual ha desplazado, en una gran medida, la utilización de tubos al vacío, existe un mercado bastante específico que valora de manera especial la amplificación basada en válvulas. El problema es que no existe en nuestro medio una explicación técnica, concreta y con parámetros eléctricos reales, acerca de la diferencia entre estos dos tipos de amplificación, que si bien están determinados en su totalidad por una variedad extensa de componentes, deben su peculiaridad al elemento principal y distinto entre ambos: los transistores y las válvulas termoiónicas. Para esto se abordarán aspectos constructivos y los conceptos fundamentales, con el mayor detalle posible, del funcionamiento de cada uno, para entender el porqué de sus diferencias en la aplicación de amplificación de señales en el rango de frecuencias audibles.

ÍNDICE GENERAL

	PAG.
AGRADECIMIENTO.....	II
DEDICATORIA.....	III
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....	IV
DECLARACIÓN EXPRESA	V
RESUMEN.....	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VII
ABREVIATURAS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	XVI
 I	
CAPÍTULO 1:	
ANTECEDENTES.....	1
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3 SOLUCIÓN PROPUESTA.....	3
1.4 OBJETIVOS.....	4
1.5	
METODOLOGÍA.....	5

CAPÍTULO 2: ANÁLISIS DE LOS TRANSISTORES MÁS UTILIZADOS EN AMPLIFICACIÓN DE AUDIO.....	6
2.1 FUNCIONAMIENTO DE LOS TRANSISTORES.....	7
2.2 TIPOS DE TRANSISTORES.....	12
2.3 SISTEMAS DE POLARIZACIÓN Y AMPLIFICACIÓN PARA CADA TIPO DE TRANSISTOR.....	22
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS CIRCUITOS INTEGRADOS MÁS UTILIZADOS EN AMPLIFICACIÓN DE AUDIO.....	29
3.1 CARACTERÍSTICAS, VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS CIRCUITOS INTEGRADOS.....	30
3.2 TIPOS DE CIRCUITOS INTEGRADOS.....	31
3.3 SISTEMAS DE POLARIZACIÓN Y AMPLIFICADORES CON CIRCUITOS INTEGRADOS.....	32
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE LAS VÁLVULAS TERMOIÓNICAS MÁS UTILIZADAS EN AMPLIFICACIÓN DE AUDIO.....	34
4.1 FUNCIONAMIENTO DE LAS VÁLVULAS TERMOIÓNICAS.....	35
4.2 TIPOS DE VÁLVULAS TERMOIÓNICAS.....	51

4.3 CIRCUITOS Y AMPLIFICADORES PARA CADA TIPO DE VÁLVULAS.....	53
CAPÍTULO 5: COMPARACIÓN DE LOS VARIOS TIPOS DE AMPLIFICADORES Y LAS MEJORES OPCIONES.....	63
5.1 CONSUMO DE ENERGÍA.....	64
5.2 COMPLEJIDAD DEL CIRCUITO NECESARIO PARA SU OPERACIÓN.....	68
5.3 DURACIÓN DE LOS ELEMENTOS CONSTITUTIVOS.....	72
5.4 COSTO EN EL MERCADO.....	74
5.5 FIDELIDAD EN LA AMPLIFICACIÓN.....	75
CAPÍTULO 6: PRUEBAS EXPERIMENTALES DE AMPLIFICADORES.....	..83
6.1 ELEMENTOS UTILIZADOS EN LA EXPERIMENTACIÓN.....	84
6.2 PRIMER PROTOCOLO DE PRUEBAS.....	90

6.3 IMÁGENES CAPTADAS DE LAS PRUEBAS DEL PRIMER EXPERIMENTO.....	9
1	
6.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS GRÁFICOS OBTENIDOS DEL PRIMER EXPERIMENTO.....	111
6.5 SEGUNDO PROTOCOLO DE PRUEBAS.....	112
6.6 IMÁGENES CAPTADAS DEL SEGUNDO EXPERIMENTO.....	113
6.7 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS GRÁFICOS OBTENIDOS DEL SEGUNDO EXPERIMENTO.....	116
CONCLUSIONES	Y
RECOMENDACIONES.....	118
BIBLIOGRAFÍA.....	12

ABREVIATURAS

[A]	Amperios
BJT	Transistor bipolar de unión
Ea	Potencial eléctrico
Gm	Transconductancia
Hz	Hercios
JFET	Transistor de efecto de campo de unión
Opamp	Amplificador operacional
mA	miliamperios
Mosfet	Transistor de efecto de campo “metal-óxido Semiconductor”
[V]	Voltios
Vdc	Voltaje de corriente directa
Vref	Voltaje de referencia
[W]	Vatios o Watts

ÍNDICE DE FIGURAS

PAG.

Figura 2.1 Polarización de un diodo.....	10
Figura 2.2 Curva de funcionamiento de un transistor BJT.....	12
Figura 2.3 Curva de funcionamiento de un diodo.....	13
Figura 2.4 Esquemáticos de tipos de transistores.....	15
Figura 2.5 Estructura de un JFET.....	16
Figura 2.6 Curva de funcionamiento de un JFET.....	17
Figura 2.7 Estructura de un MOSFET.....	18
Figura 2.8 Curva de funcionamiento de un MOSFET tipo N.....	20
Figura 2.9 Curva de funcionamiento de un MOSFET tipo P.....	21
Figura 2.10 Diagrama de Amplificador Clase A.....	23
Figura 2.11 Diagrama de Amplificador Clase B.....	24
Figura 2.12 Diagrama de Amplificador Clase AB.....	25
Figura 2.13 Diagrama de Amplificador Clase D.....	26
Figura 2.14 Diagrama Funcional de Amplificador Clase D.....	27
Figura 3.1 Diagrama interno de un circuito integrado.....	32
Figura 4.1 Tipos de cátodos en una válvula termoiónica.....	37
Figura 4.2 Curva de funcionamiento de un triodo.....	39
Figura 4.3 Esquemático de un triodo.....	40
Figura 4.4 Estructura interna de tetrodo de haz dirigido.....	46

Figura 4.5 Varios tipos de válvulas termoiónicas.....	52
Figura 4.6 Diferentes configuraciones par válvulas.....	54
Figura 4.7 Curva del triodo ECC83.....	55
Figura 4.8 Diferentes polarizaciones para el Vbias.....	57
Figura 4.9 Diferentes acoples de cargas.....	58
Figura 4.10 Esquemático de un amplificador simple a tubos.....	62
Figura 5.1 Comparación de eficiencias entre clases de amplificadores.....	67
Figura 5.2 Imagen real de un amplificador a transistores.....	71
Figura 5.3 Imagen real de un amplificador a tubos.....	71
Figura 5.4 Curvas de funcionamiento de un BJT.....	77
Figura 5.5 Región de operación de un BJT.....	77
Figura 5.6 Curvas de funcionamiento de un Triodo.....	79
Figura 5.7 Curvas de funcionamiento de un Pentodo.....	80
Figura 5.8 Curva de funcionamiento de un MOSFET.....	81
Figura 6.1 Amplificador construido con un LM386.....	84
Figura 6.2 Amplificador construido con dos TDA2003.....	85
Figura 6.3 Amplificador a válvulas.....	86
Figura 6.4 Diagrama de pines de una válvula 12AX7.....	87
Figura 6.5 Diagrama de pines de una válvula EL84.....	87
Figura 6.6 Osciloscopio Fluke 190-204.....	88
Figura 6.7 Ipad con aplicación para generación de ondas.....	89
Figura 6.8 55Hz, onda sinusoidal Amplificador a válvulas.....	91

Figura 6.9 55Hz, onda sinusoidal Amplificador con LM386.....	91
Figura 6.10 55Hz, onda sinusoidal Amplificador con TDA2003.....	91
Figura 6.11 55Hz, onda triangular Amplificador a válvulas.....	92
Figura 6.12 55Hz, onda triangular Amplificador con LM386.....	92
Figura 6.13 55Hz, onda triangular Amplificador con TDA2003.....	92
Figura 6.14 55Hz, onda tipo sierra Amplificador a válvulas.....	93
Figura 6.15 55Hz, onda tipo sierra Amplificador con LM386.....	93
Figura 6.16 55Hz, onda tipo sierra Amplificador con TDA2003.....	93
Figura 6.17 55Hz, onda cuadrada Amplificador a válvulas.....	94
Figura 6.18 55Hz, onda cuadrada Amplificador con LM386.....	94
Figura 6.19 55Hz, onda cuadrada Amplificador con TDA2003.....	94
Figura 6.20 440Hz, onda sinusoidal Amplificador a válvulas.....	95
Figura 6.21 440Hz, onda sinusoidal Amplificador con LM386.....	95
Figura 6.22 440Hz, onda sinusoidal Amplificador con TDA2003.....	95
Figura 6.23 440Hz, onda triangular Amplificador a válvulas.....	96
Figura 6.24 440Hz, onda triangular Amplificador con LM386.....	96
Figura 6.25 440Hz, onda triangular Amplificador con TDA2003.....	96
Figura 6.26 440Hz, onda tipo sierra Amplificador a válvulas.....	97
Figura 6.27 440Hz, onda tipo sierra Amplificador con LM386.....	97
Figura 6.28 440Hz, onda tipo sierra Amplificador con TDA2003.....	97
Figura 6.29 440Hz, onda cuadrada Amplificador a válvulas.....	98
Figura 6.30 440Hz, onda cuadrada Amplificador con LM386.....	98

Figura 6.31 440Hz, onda cuadrada Amplificador con TDA2003.....	98
Figura 6.32 1760Hz, onda sinusoidal Amplificador a válvulas.....	99
Figura 6.33 1760Hz, onda sinusoidal Amplificador con LM386.....	99
Figura 6.34 1760Hz, onda sinusoidal Amplificador con TDA2003.....	99
Figura 6.35 1760Hz, onda triangular Amplificador a válvulas.....	100
Figura 6.36 1760Hz, onda triangular Amplificador con LM386.....	100
Figura 6.37 1760Hz, onda triangular Amplificador con TDA2003.....	100
Figura 6.38 1760Hz, onda tipo sierra Amplificador a válvulas.....	101
Figura 6.39 1760Hz, onda tipo sierra Amplificador con LM386.....	101
Figura 6.40 1760Hz, onda tipo sierra Amplificador con TDA2003.....	101
Figura 6.41 1760Hz, onda cuadrada Amplificador a válvulas.....	102
Figura 6.42 1760Hz, onda cuadrada Amplificador con LM386.....	102
Figura 6.43 1760Hz, onda cuadrada Amplificador con TDA2003.....	102

Figura 6.44 3520Hz, onda sinusoidal Amplificador a válvulas.....	
103	
Figura 6.45 3520Hz, onda sinusoidal Amplificador con LM386.....	
103	
Figura 6.46 3520Hz, onda sinusoidal Amplificador con TDA2003.....	
103	
Figura 6.47 3520Hz, onda triangular Amplificador a válvulas.....	
104	
Figura 6.48 3520Hz, onda triangular Amplificador con LM386.....	
104	
Figura 6.49 3520Hz, onda triangular Amplificador con TDA2003.....	
104	
Figura 6.50 3520Hz, onda tipo sierra Amplificador a válvulas.....	
105	
Figura 6.51 3520Hz, onda tipo sierra Amplificador con LM386.....	
105	
Figura 6.52 3520Hz, onda tipo sierra Amplificador con TDA2003.....	
105	
Figura 6.53 3520Hz, onda cuadrada Amplificador a válvulas.....	
106	
Figura 6.54 3520Hz, onda cuadrada Amplificador con LM386.....	
106	

Figura 6.55 3520Hz, onda cuadrada Amplificador con TDA2003.....	
106	
Figura 6.56 14080Hz, onda sinusoidal Amplificador a válvulas	
107	
Figura 6.57 14080Hz, onda sinusoidal Amplificador con LM386.....	
107	
Figura 6.58 14080Hz, onda sinusoidal Amplificador con TDA2003.....	107
Figura 6.59 14080Hz, onda triangular Amplificador a válvulas.....	
108	
Figura 6.60 14080Hz, onda triangular Amplificador con LM386.....	
108	
Figura 6.61 14080Hz, onda triangular Amplificador con TDA2003.....	
108	
Figura 6.62 14080Hz, onda tipo sierra Amplificador a válvulas.....	
109	
Figura 6.63 14080Hz, onda tipo sierra Amplificador con LM386.....	
109	
Figura 6.64 14080Hz, onda tipo sierra Amplificador con TDA2003.....	
109	
Figura 6.65 14080Hz, onda cuadrada Amplificador a válvulas.....	
110	

Figura 6.66 Amplificador a válvulas Amplificador con LM386.....	
110	
Figura 6.67 Amplificador con LM386 Amplificador con TDA2003.....	
110	
Figura 6.68 Amplificador a Válvulas 220Hz Distorsión.....	
113	
Figura 6.69 Amplificador a Válvulas 880Hz Distorsión.....	
113	
Figura 6.70 Amplificador a Válvulas 7040Hz Distorsión.....	
113	
Figura 6.71 Amplificador a Válvulas 14080Hz Distorsión.....	
114	
Figura 6.72 Amplificador con LM386 220Hz Distorsión.....	
114	
Figura 6.73 Amplificador con LM386 880Hz Distorsión.....	
114	
Figura 6.74 Amplificador con LM386 7040Hz Distorsión.....	
115	
Figura 6.75 Amplificador con TDA2003 880Hz Distorsión.....	
115	
Figura 6.76 Amplificador con TDA2003 1760Hz Distorsión.....	
115	

INTRODUCCIÓN

Este estudio se enfoca en analizar los elementos más importantes de la amplificación de frecuencias de audio. Estos elementos, que se denominan activos, dentro de la amplificación, se pueden dividir en dos grandes grupos: los transistores y las válvulas termoiónicas; teniendo una consideración especial para los circuitos integrados. Este estudio inicia con una revisión de los aspectos constructivos que tienen estos dispositivos, para luego pasar a la funcionalidad de los mismos, incluyendo distintos entornos y acondicionamientos necesarios para lograr dicha funcionalidad; o para mitigar efectos colaterales del objetivo principal, que es la amplificación de señales eléctricas con frecuencias entre los veinte y veinte mil Hertz. Posterior a estos análisis teóricos se realizarán pruebas experimentales, que permitan llegar a una conclusión final en la comparación de varios aspectos importantes entre estos tipos de amplificación, para, de una manera técnica y concreta, entender la diferencia en la amplificación basada en transistores y la basada en válvulas termoiónicas.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

Hoy en día se da por sentado que la amplificación del sonido, o de señales eléctricas que representen un sonido, para ser más exactos, está totalmente asignada a elementos de estado sólido, a transistores siendo más específicos, dejando de lado elementos que fueron los precursores para este tipo de aplicación. Los tubos al vacío o válvulas termoiónicas desde la invención de una de sus primeras versiones, el triodo, permitió amplificar una señal eléctrica que se tomaba desde un micrófono, otro elemento que ya se había inventado décadas atrás. Hasta ese entonces el silencio de las masas era indispensable, ya fuera para un parlamento o para presentar una pieza musical, ya que éstos sólo podían reproducirse a volumen natural. Al aparecer posteriormente, la ventaja en costos y la reducción de tamaño junto con la mayor eficiencia en cuanto al manejo de la energía que llegaron a alcanzar los elementos de estado sólido, o mejor dicho los transistores, hizo

que la gran mayoría de fabricantes de amplificadores se fuera por ese camino. Sin embargo la calidad del sonido era inferior a la que había logrado alcanzarse ya con los tubos al vacío. Esa brecha con el tiempo se ha ido cerrando, inclusive con las últimas versiones de dispositivos de estado sólido se dice que se ha igualado o superado la calidad de amplificación conseguida con los tubos, pero eso es algo que se revisará con más detalle en este estudio.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Existen en el mercado de amplificadores de audio una gran variedad de equipos que transforman las señales eléctricas en sonido; estos equipos oscilan en costos desde unos pocos dólares hasta miles. Una de las diferencias más importantes, si escogemos una potencia fija, es el método de amplificación: los modernos transistores (BJT, FET, MOSFET, CMOS) que ahora pueden venir incluso en integrados comerciales o las antiguas válvulas de vacío (TRIODOS, PENTODOS, ETC.); si bien los primeros son los más prácticos y económicos, son los segundos los que cuestan miles de dólares y los más apetecidos por los clientes más exigentes.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La necesidad de buscar una explicación con datos precisos y concretos de las diferencias entre la amplificación a base de transistores y la basada en válvulas; por qué una de ellas es mucho más eficiente que la otra en cuanto a la amplitud de la onda producida con la misma potencia consumida y las diferencias en cuanto a la calidad del sonido final; diferencia cuya explicación suele darse de una manera muy subjetiva entre los usuarios de estos equipos, pero que si se logra cuantificar técnicamente podríamos crear una herramienta real de análisis y comparación e incluso determinar si vale la pena pensar en producir este tipo de equipos en nuestro país.

1.3 SOLUCIÓN PROPUESTA

Por medio de un estudio teórico y práctico se puede lograr crear un documento que permita entender, de una manera concreta y técnica, las diferencias reales entre los tipos de amplificación que se ha mencionado. Algo que habilite a los usuarios de amplificadores de audio para entender las ventajas y desventajas de cada tipo de amplificación, si realmente se

justifica el valor de los equipos que se ofrece en el mercado y si la aplicación para la cual se va a destinar el equipo requiere escoger uno u otro amplificador.

1.4 OBJETIVOS

Obtener parámetros diferenciadores entre los distintos amplificadores basados en transistores y circuitos integrados; encontrar cuál o cuáles son los tipos de transistores con mayores ventajas funcionales y compararlos con los tipos de amplificadores que utilizan válvulas termoiónicas, los cuales también tienen varias alternativas, como son los triodos, pentodos, etc.; analizar no sólo los tipos de elementos constitutivos sino los circuitos de polarización asociados y cómo todo el sistema afecta la calidad de amplificación conseguida, y así lograr tener información clara y objetiva que permita comparar los amplificadores entre sí.

1.5 METODOLOGÍA

Primero se investigará teóricamente los diferentes amplificadores de transistores, las diferencias entre ellos y cuáles son los circuitos y topologías idóneas para la amplificación en frecuencias auditivas; luego se hará el mismo análisis entre las alternativas de circuitos de amplificación por medio de los varios tipos de válvulas termoiónicas; después se hará una comparación de varios aspectos entre los sistemas de cada tipo. Por último se efectuarán ejercicios experimentales con amplificadores de transistores y de válvulas, para medir y comprobar los datos teóricos con los prácticos, lo cual nos permitirá llegar a una conclusión final.

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DE LOS TRANSISTORES MÁS UTILIZADOS EN AMPLIFICACIÓN DE AUDIO

Existe un gran variedad de transistores utilizados en aplicaciones de audio, desde los iniciales de germanio hasta los de efecto de campo y con diferentes compuestos que logran mejorar varias características de su funcionalidad, a continuación se verá desde sus partes constitutivas y principios de funcionamiento hasta los varios tipos de transistores utilizados en este campo.

2.1 FUNCIONAMIENTO DE LOS TRANSISTORES

Los transistores son elementos eléctricos semiconductores. La propiedad principal de éstos es su capacidad de permitir o no el paso controlado de

corriente eléctrica. Esta propiedad está fuertemente influenciada por la introducción cuidadosamente controlada de impurezas en cantidades específicas en la masa de la que se cultiva el cristal de semiconducción durante su proceso de fabricación.

El principal material del que se componen los semiconductores es el Silicio, debido a su disponibilidad y costo, además tiene muy buenas propiedades térmicas. Inicialmente se utilizaba el Germanio, pero la influencia de la temperatura en sus propiedades eléctricas lo volvía inconveniente. El Silicio se “contamina” con materiales como el boro o el aluminio, con lo cual se consigue un semiconductor con una deficiencia de electrones de valencia que se suele llamar material tipo “P”; ahora que si se “contamina” con fósforo se conseguirá un excedente de electrones y se llamará material tipo N. Ambos, el tipo P y el N pueden ser altamente conductores dependiendo de los niveles de “contaminación” a los que se expongan durante su fabricación.

Existe además el nivel Fermi de cada material, que es el nivel de energía de los electrones, el mismo será más bajo en un material P y más alto en un material N, en el segundo de hecho este nivel se aproximaría al de un “material conductor” debido a su gran cantidad de electrones libres. Sucede entonces que al tener una íntima unión de un material P con un

N se produce en dicha unión una difusión de los electrones libres, con lo cual el nivel de Fermi es igual en ambos lados. Esto causa un cambio en el potencial eléctrico relativo en las dos regiones, además de otros efectos interesantes.

El primer efecto es que en la unión de un P y un N la banda de conducción se desplaza, con lo cual para poder tener un flujo de electrones a través de dicha unión es necesario un voltaje que rompa este desplazamiento eléctrico. La distancia en Voltaje entre estas dos bandas de conducción está alrededor de los 0.58V a temperatura ambiente para una unión en Silicio, y baja si la temperatura aumenta.

El segundo efecto es la creación de una zona de agotamiento, que básicamente es una franja en donde los electrones en exceso de un lado de la unión llenan los agujeros o ausencia de electrones del otro lado. Esto deja una franja donde no hay posibilidad de flujo de corriente. Sin embargo la aplicación de voltaje a través de la unión puede de una manera proporcional, aumentar o disminuir el ancho de esta zona. Se puede observar dicho comportamiento en la figura 2.1. Este efecto es el que define la aplicación de semiconductores como diodos. Es importante tener en cuenta que al aplicar un voltaje invertido la corriente es mínima (de fuga); pero irá aumentando en una muy pequeña proporción mientras aumente el voltaje negativo aplicado. Esto sucederá hasta que el voltaje

negativo sea lo suficientemente grande como para ionizar la unión y producir un efecto avalancha donde habrá un gran flujo en sentido contrario. Esta situación en general se intenta evitar ya que el calor implicado eleva la temperatura demasiado, al punto que puede dañar el diodo. Sin embargo algunos diodos se fabrican considerando esta particularidad y permitiendo por una alta contaminación del silicio, una ruptura a voltajes no tan elevados, manteniendo así la temperatura a niveles que no dañen el dispositivo; éstos se conocen como diodos Zener y el bajo voltaje que requieren para su ionización inversa es menor a 5.5 [V].

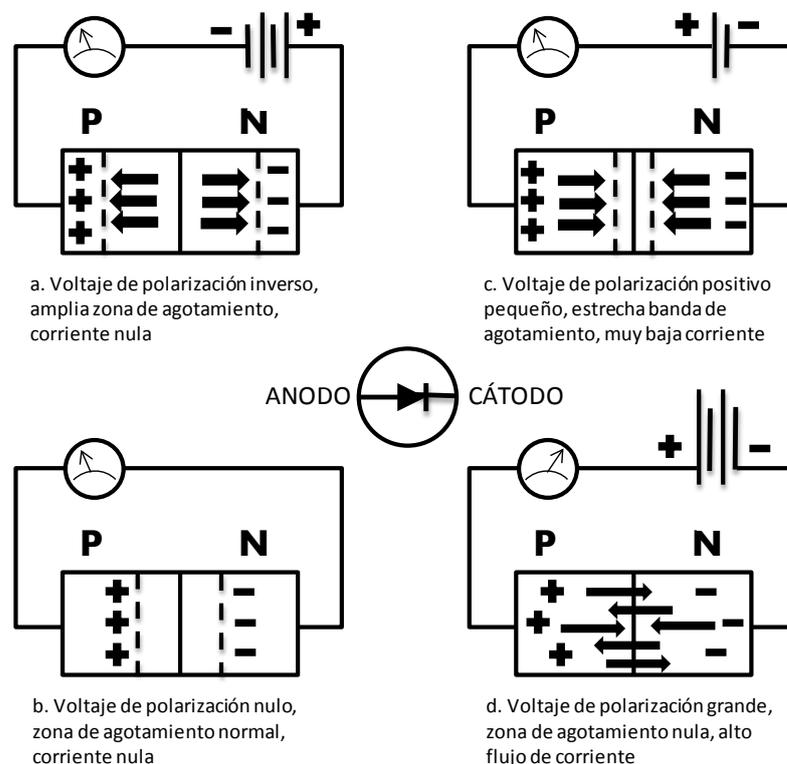


Figura 2.1 Polarización de un diodo

Si se elabora una unión semiconductor de tres capas, conformada por material N, P y N en ese orden, esto podría actuar como un elemento amplificador conocido como transistor de unión. En la práctica una de las capas tipo N está ligeramente contaminada, y para su función se llamará colector; la otra parte N estará en cambio muy contaminada para ser bastante más conductora, ésta parte al tener muchos electrones libres y ser la fuente del flujo de corriente, se llamará emisor. El nivel de contaminación en la región tipo P, conocida como base, será determinado por la aplicación que tuviere el dispositivo

Recordando el segundo efecto de la zona de agotamiento, si un voltaje inverso es aplicado en esta nueva disposición NPN, entre el colector y la base, no habrá una significativa corriente fluyendo por la unión (a menos que hayamos llegado al umbral negativo que hace peligrar la integridad física de la unión además). Si se aplica un voltaje positivo también habrá un rango (menor que el anterior) en que no se produzca ningún paso de corriente por la unión. Si consideramos que la base o el material P es considerablemente fino encontraremos que la zona de agotamiento producida entre el colector y la base se llega a encontrar con la zona de agotamiento entre la base y el emisor, así que se extiende sobre toda la base, impidiendo flujo de corriente. De esta misma manera, si la base

comienza a tener mayor voltaje positivo, contra el emisor, los electrones podrán empezar a fluir desde el emisor a la zona de la base; esto no necesariamente quiere decir que fluya hacia el circuito que estuviera conectado a la base, ya que dependerá de la geometría de las uniones y del potencial positivo que tenga el colector, de hecho una gran cantidad de electrones irán directamente del emisor, pasando por la base, hacia el colector. Esto se traduce en una relación entre el voltaje aplicado a la unión base-emisor versus la corriente del colector. Esta se muestra en la figura 2.2 e indica la posibilidad de manejar una corriente relativamente grande de colector por medio de un pequeño voltaje aplicado a la base-emisor; aquí también se puede apreciar que aunque con menos influencia el nivel del voltaje colector-emisor es también un factor a considerarse.

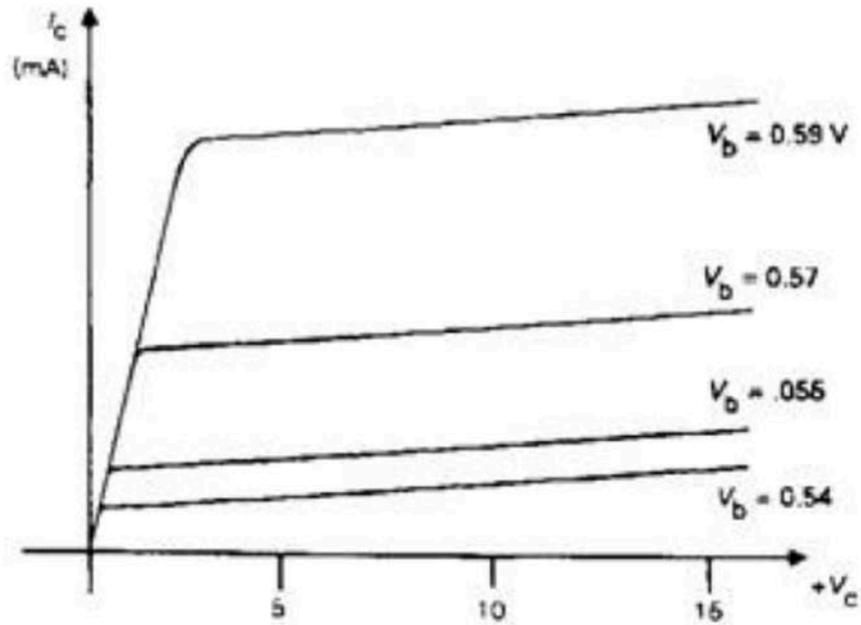


Figura 2.2 Curva de funcionamiento de un transistor BJT

2.2 TIPOS DE TRANSISTORES

BJT

El transistor que se ha desarrollado en la explicación del funcionamiento de estos dispositivos se conoce como transistor de unión bipolar o por sus siglas BJT, donde la corriente que circula por el colector (y emisor en su mayoría) depende o es controlada por la corriente que circula por el circuito de la base. Podemos ver en la figura 2.3 la relación no tan lineal entre estos dos valores en el transistor BJT.

Los transistores de unión se encuentran en una gran variedad de presentaciones, para un gran rango de voltajes de colector, corrientes y disipación de energía. Siempre que se considere la disipación de calor necesaria, que la integridad del encapsulado se mantenga, todos estos dispositivos semiconductores tienen una vida prácticamente indefinida.

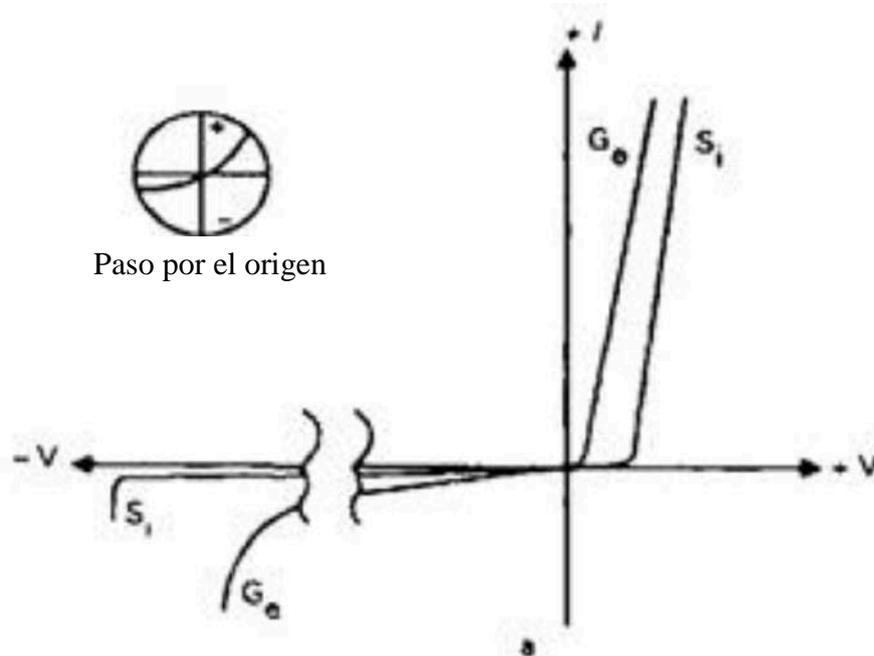


Figura 2.3 Curva de funcionamiento de un diodo

La conductancia mutua de un transistor bipolar es el cociente entre la variación de la corriente del colector y la variación correspondiente del voltaje de base-emisor, con lo cual este parámetro es un indicador de la efectividad del voltaje de control para permitir el flujo de corriente por el

colector. El BJT se caracteriza por tener altos valores de Conductancia Mutua o Transconductancia (g_m) que resume el tener capacidad de una alta amplificación de señales.

Una ventaja práctica de los BJT es que el material P y el N se pueden lograr con igual facilidad, así que es posible construir estructuras PNP de la misma manera que se construyen NPN, como las que hemos analizado ya. Esto es bastante conveniente para los diseñadores de circuitos. Los símbolos esquemáticos para los transistores BJT, PNP y NPN se pueden observar en la figura 2.4. Es interesante sin embargo entender que estas dos estructuras no son idénticas, recordemos que el material tipo N tiene un exceso de electrones y el P una carencia de los mismos; y el flujo de electrones por un medio saturado de ellos es más rápido que el flujo en un sistema en donde lo que se mueve son los espacios dejados por los electrones que dejan cierta ubicación y pasan a adoptar otra. El efecto final es que el flujo de corriente en un material P es ligeramente más lento y más ruidoso que en un N. Cuando analizamos los BJT tenemos que el PNP, con una región N de base tiene menor ruido que su equivalente NPN, sin embargo las amplias regiones de material N en el NPN dan un rendimiento bueno de HF por la misma movilidad que permiten sus electrones. Este tipo de características son interesantes al momento de aplicaciones en amplificadores de

potencia.

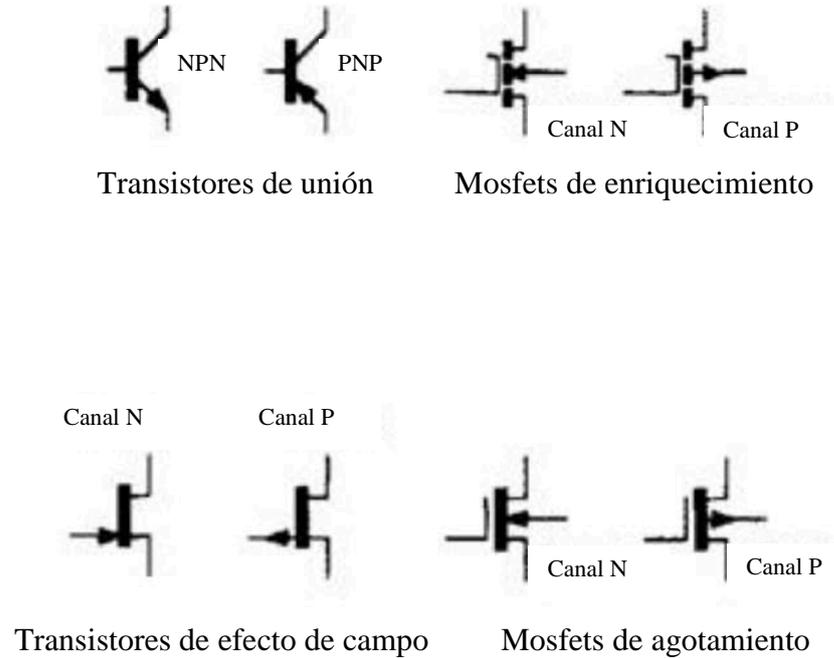


Figura 2.4 Esquemáticos de tipos de transistores

JFET

Recordando la zona de agotamiento en la unión P-N, sucede que el voltaje negativo aplicado produce un aumento en dicha zona. Este efecto lo utiliza el transistor FET (Field Effect Transistor) que al tener una contaminación adecuada en el material semiconductor (distinta a los BJT) permite que este efecto de campo regule la cantidad de corriente que pueda pasar por el "canal" desde un electrodo llamado Surtidor hasta uno llamado Drenador, que serán la entrada y salida del canal

respectivamente. El electrodo donde se aplica el voltaje que controla el paso de corriente se llama Compuerta o Gate y usualmente se utilizan dos zonas en paralelo para mejorar la acción de este campo regulador sobre el canal. La disposición de las partes se puede observar en la figura 2.5

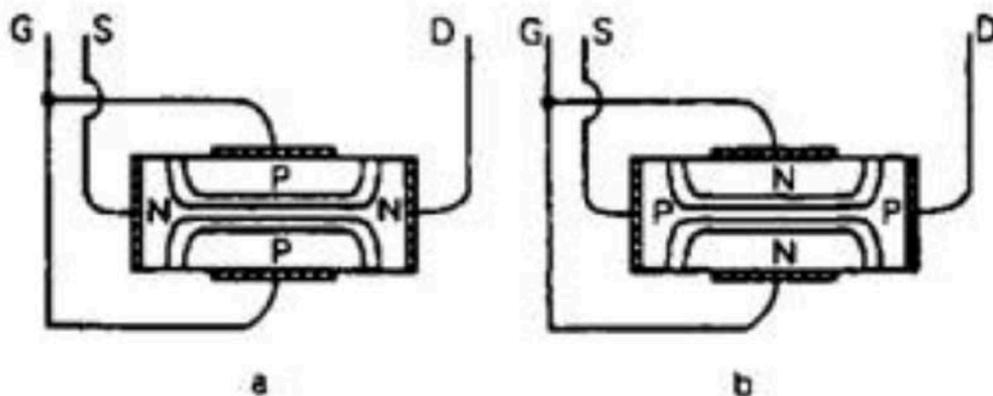


Figura 2.5 Estructura de un JFET

Si existiera un voltaje entre los dos extremos del canal (entre el Drenador y el Surtidor) como normalmente sucede, la zona de agotamiento será asimétrica, sin embargo la corriente del Drenador seguirá dependiendo del voltaje de la compuerta, de hecho la corriente del Drenador es casi completamente independiente del voltaje del mismo, esto lo podemos

apreciar en la figura 2.6 donde la relación entre el voltaje de la compuerta y la corriente del Drenador es más lineal que la relación entre el voltaje de la base y la corriente del colector en los BJT.

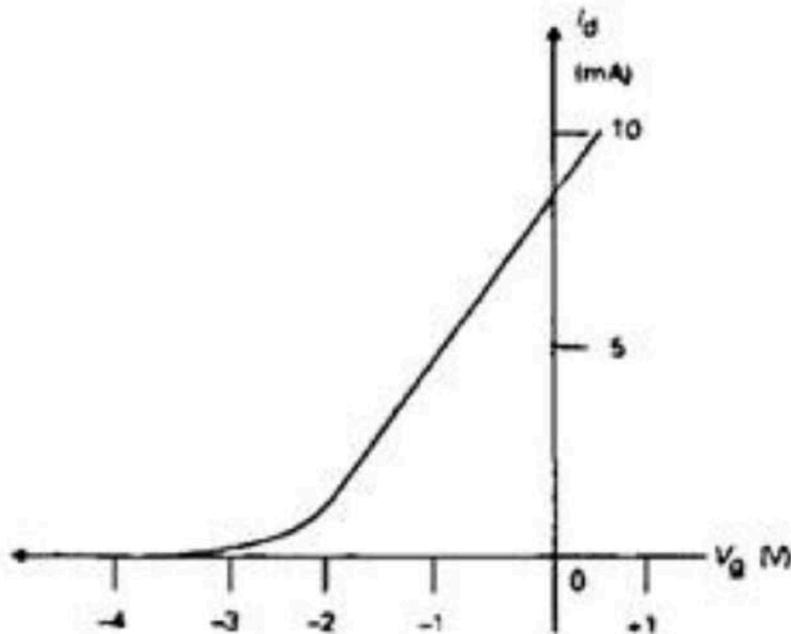


Figura 2.6 Curva de funcionamiento de un JFET

En comparación con los BJT, los FET son dispositivos que manejan relativamente bajo voltaje, bajo poder, con voltajes restringidos a 25 ó 40V y una disipación libre al aire de unos 400mW. Una de las limitantes importantes de este transistor es que el bajo voltaje de ruptura del mismo limita cargas en el Drenador que sean de alto valor en ohmios, con lo cual se deben manejar corrientes pequeñas; todo esto a pesar de tener una ganancia de etapa considerable, que para este semiconductor se

puede calcular aproximadamente multiplicando la transconductancia por la resistencia de la carga.

$$(2.1) \quad M = g_M R_L$$

IGFET o MOSFET

Los transistores de efecto de campo con compuerta aislada (Insulated Gate Field Effect Transistors) se han convertido en el más ampliamente usado transistor de efecto de campo, no sólo en cuanto a amplificadores de audio sino en muchas más aplicaciones. Su modo de operación es realmente sencillo.

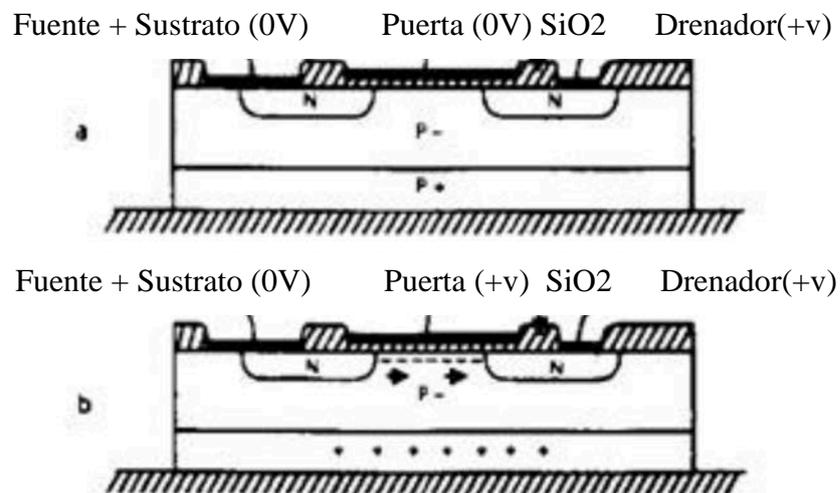


Figura 2.7 Estructura de un MOSFET

Podemos ver en la figura 2.7 un esquemático de este transistor, aquí se aprecia la construcción con una tira de material P muy ligeramente

contaminada, en la que en cada extremo una pequeña región tipo N se ha difundido. Así tenemos que una de las partes N es el Surtidor, la otra es el Drenador y la parte P es el canal. El Surtidor y el canal además están unidos por el electrodo de conexión (aluminio); existe otro electrodo sobre el canal (silicio policristalino comúnmente), pero que se coloca eléctricamente aislado del mismo (por sílice o nitruro de silicio para el Mosfet hecho de silicio), y un último electrodo exclusivamente sobre el Drenador. Con esta configuración el Mosfet se asemeja a un JBT NPN con la base conectada permanentemente a su emisor, una condición en la cual no debería haber ninguna conducción ya que no existe el voltaje necesario de polarización para que pasen los electrones de una zona a otra. Sin embargo, si se coloca una carga positiva en la compuerta aislada, tendremos una película de cargas negativas que creará un “puente conductor” en el canal y que permitirá el paso de electrones entre el Surtidor y el Drenador.

Ante el “puente” de electrones creado por electrostática, al poner voltaje positivo en la compuerta, si se aplica un voltaje entre el Drenador y el Surtidor, habrá un corriente fluyendo entre estos, controlada por el mismo nivel de voltaje aplicado a la compuerta. Esta relación entre el voltaje aplicado y la corriente del Drenador se puede hacer muy lineal según un adecuado diseño de la estructura del MOSFET, y la podemos observar en la figura 2.8.

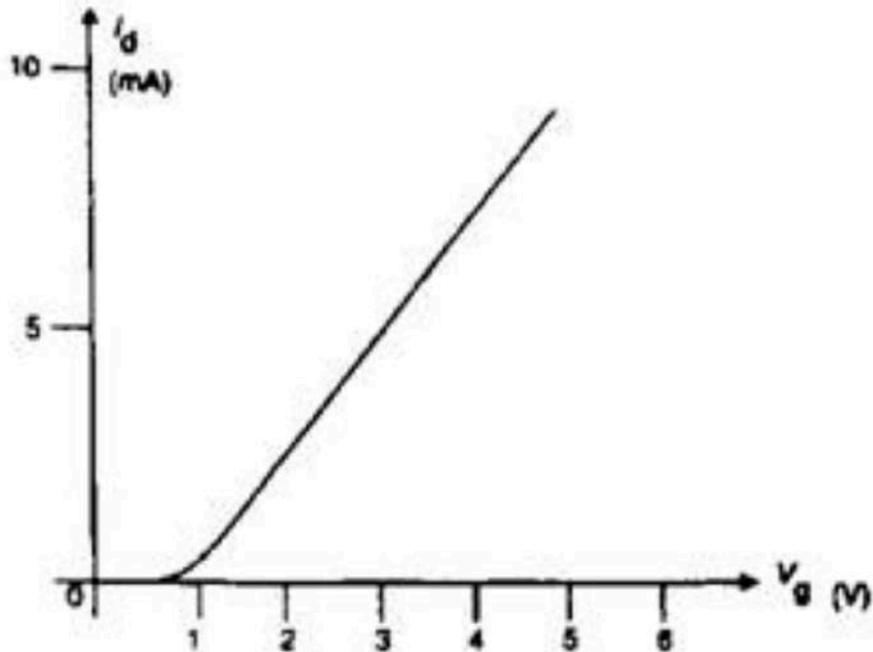


Figura 2.8 Curva de funcionamiento de un MOSFET tipo N

El modelo de MOSFET descrito hasta ahora se conoce como N-Mosfet, pero si cambiamos los materiales a la inversa tendremos el P-Mosfet, que tiene un Surtidor y Drenador tipo P y el canal en material tipo N, con la única diferencia funcional que aquí ante la ausencia de voltaje en la compuerta el transistor sí conducirá corriente ente el Surtidor y el Drenador, y cuando se aplica voltaje (negativo) a la compuerta el flujo de corriente se detiene. Se puede observar la curva de la corriente del Drenador vs. el voltaje de la compuerta en la figura 2.9.

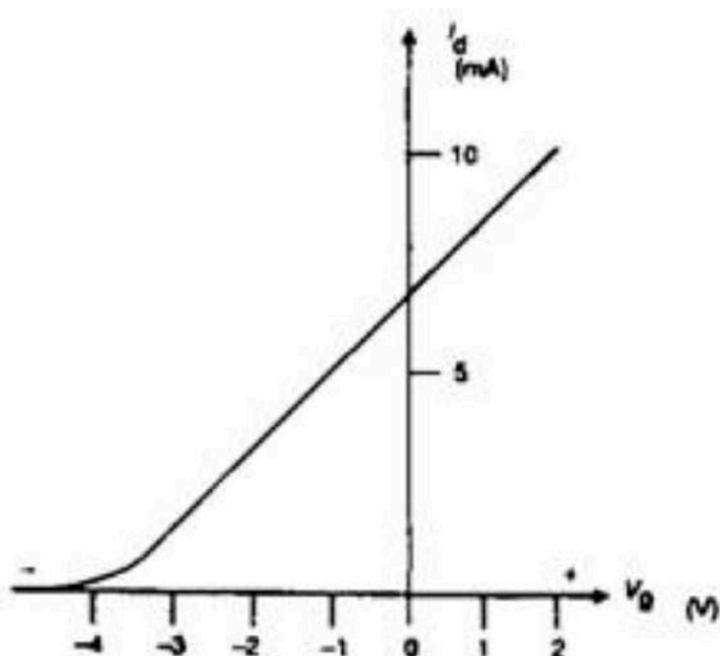


Figura 2.9 Curva de funcionamiento de un MOSFET tipo P

Existe sin embargo un problema con los MOSFET, que el canal de conducción puede ser demasiado largo y fino para manejar flujos considerables o potencias grandes, pero esto se compensa al momento de la fabricación de estos dispositivos de dos maneras, la primera es construirlos de tal manera que los canales sean verticales y no horizontales, con lo cual se logra que el canal sea corto, y por otro lado se logra una disposición en el diseño del dispositivo de manera que hayan múltiples transistores operando en paralelo. Además existen varias configuraciones constructivas, la T, D, V y U que alteran

físicamente la forma de la disposición de los materiales, pero que funcionan bajo el mismo principio.

2.3 SISTEMAS DE POLARIZACIÓN Y AMPLIFICACIÓN PARA CADA TIPO DE TRANSISTOR

Existen varios tipos de circuitos a lo largo del desarrollo de los amplificadores de audio con transistores, en la más importante categorización tenemos los siguientes:

Clase A, en donde un solo transistor maneja toda la señal de entrada, siempre está polarizado para estar en la zona activa, y se entiende como la manera más pura de amplificar. Se pueden encontrar configuraciones en cascada, pero siempre estará cada transistor manejando la onda en su totalidad. Sin embargo esta disposición, que de hecho es la más sencilla, implica que el transistor esté siempre consumiendo energía y por eso es la más ineficiente, pudiendo mejorar su rendimiento cuando se utiliza con un transformador a la salida en vez de una resistencia. Se puede observar una configuración clase A en la figura 2.10

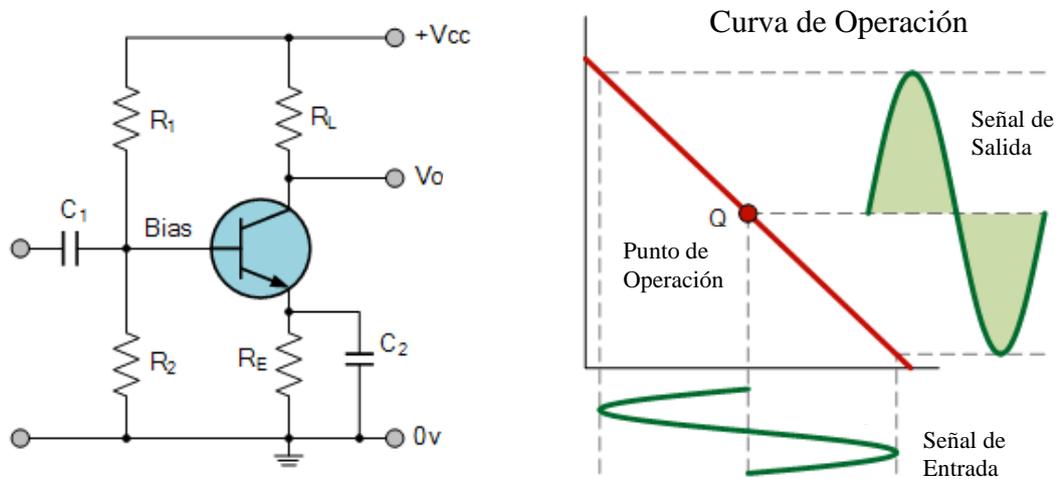


Figura 2.10 Diagrama de Amplificador Clase A

Clase B, que utiliza dos transistores los cuales se colocan en una configuración llamada push pull, de la cual y por el cableado de sus terminales de base, se encontrarán polarizados sólo cuando haya una señal de entrada para amplificar, además está la característica que el primer transistor manejará la parte positiva de la onda y el segundo la parte negativa. En esta configuración se logra una mucho mejor eficiencia, sin embargo existe una distorsión por el re acople de las dos partes amplificadas. En la figura 2.11 se puede apreciar esta configuración.

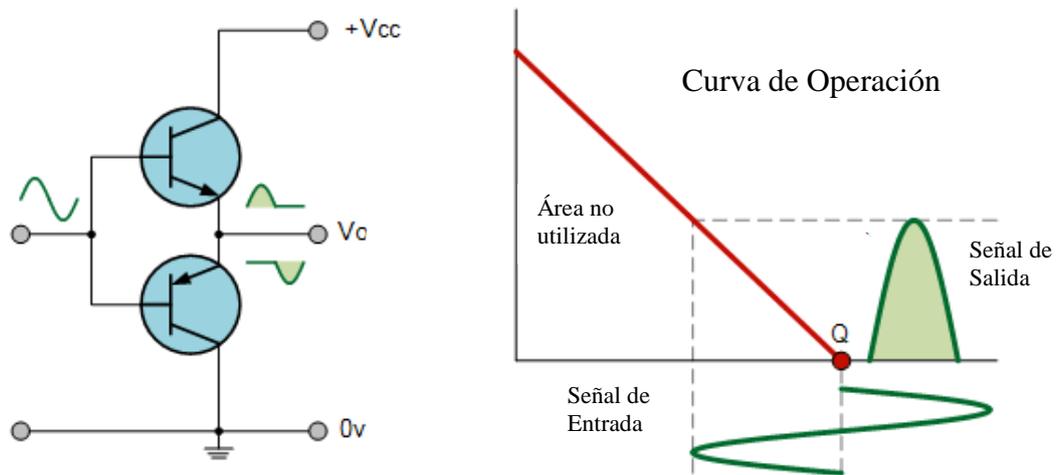


Figura 2.11 Diagrama de Amplificador Clase B

Clase AB, en donde el funcionamiento de la clase B se mejora, colocando elementos a la entrada de los voltajes de base que extienden el ciclo de trabajo de los transistores, amplificando cada uno un poco más que la mitad de la onda, esto permite un mejor acople posterior de cada parte amplificada y mantiene mucho de la ventaja en el rendimiento del amplificador Clase B. Ésta además es la configuración más utilizada hoy en día para equipos de audio de buena fidelidad, y se puede observar en la figura 2.12

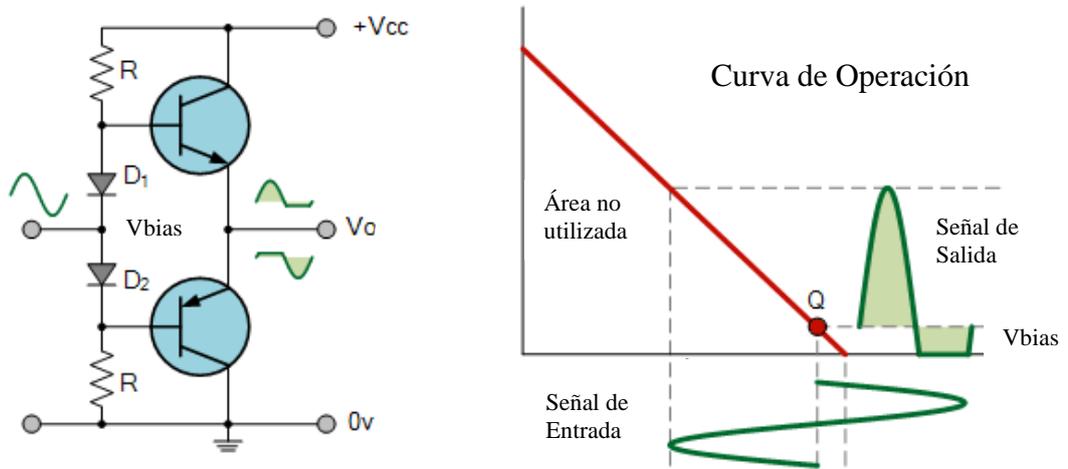


Figura 2.12 Diagrama de Amplificador Clase AB

Clase D

Este arreglo funciona distinto a los anteriores, se trata de transistores que funcionan en una manera lógica, encendidos completamente o apagados, permitiendo más que el paso de una señal una modulación por ancho de pulsos. Luego del arreglo de transistores que se colocarán de manera push pull, se tiene una cantidad de pulsos que hay que "promediar" y de ahí alimentar los parlantes con este promedio, el cual se verá, si la teoría se cumple, como un equivalente a la onda que generó la modulación por ancho de pulsos pero amplificada. En cuanto a la calidad de la onda resultante se tiene un pobre resultado, sobre todo en altas frecuencias, donde los filtros no pueden "promediar" tan bien las señales resultantes; sin embargo hoy en día se ha logrado nuevos avances acondicionando la onda resultante. En general se puede decir que para

frecuencias bajas este tipo de amplificadores puede ser una alternativa interesante, considerando que tiene una de las más altas eficiencias, llegando teóricamente a un 100% y en la práctica al 90% de rendimiento. Podemos ver la configuración de un Clase D en la figura 2.13 donde es importante distinguir que la señal de entrada más que controlar análogamente al transistor, lo que hace es polarizarlo o no, controlado además con una señal de control de alta frecuencia que permite al sistema funcionar con una modulación de pulsos, esto se puede apreciar mejor en un diagrama más funcional en la figura 2.14.

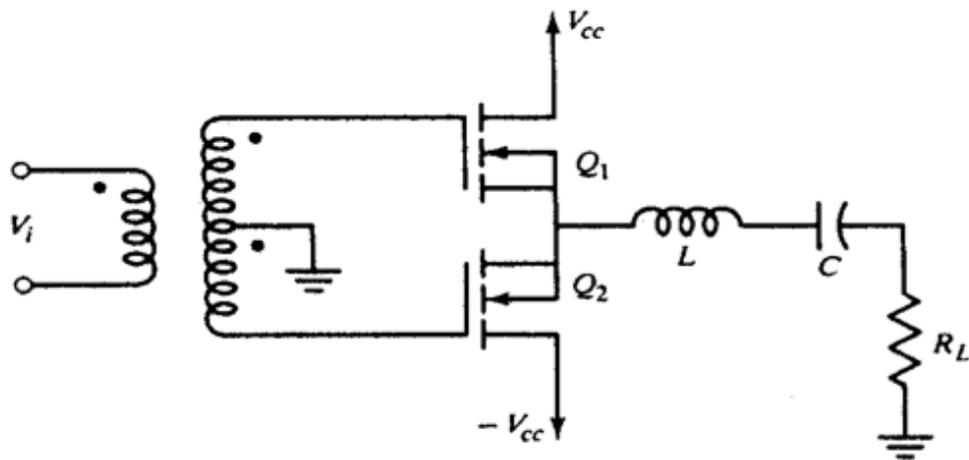


Figura 2.13 Diagrama de Amplificador Clase D

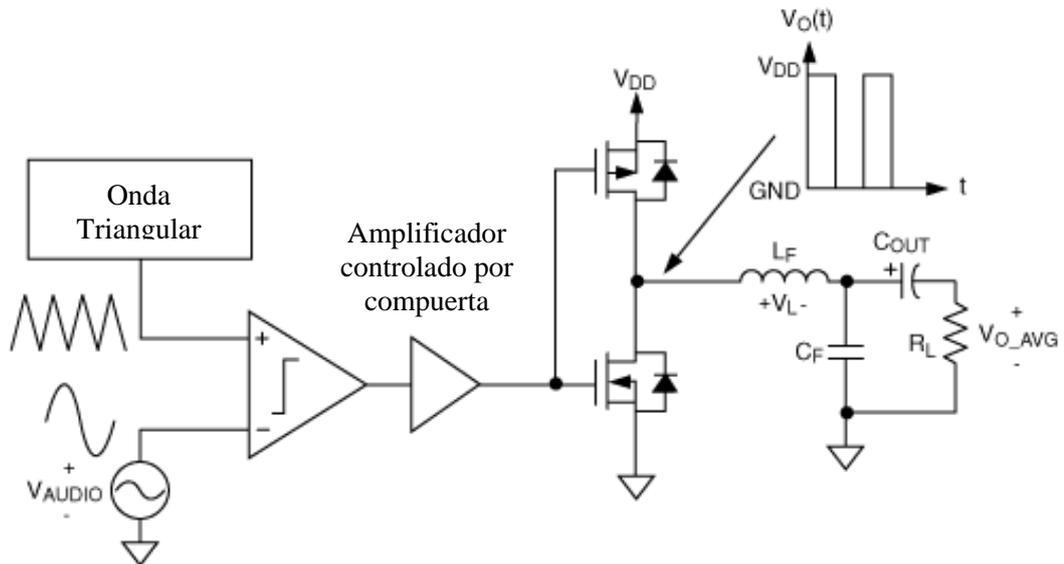


Figura 2.14 Diagrama Funcional de Amplificador Clase D

En general y para todos los tipos de amplificadores descritos la disposición del transistor es de emisor (o Surtidor) común, por lograrse así la mayor amplificación posible, y es la disposición que se puede apreciar en los gráficos mostrados.

Si bien existen otros tipos de amplificadores, como los Clase C, Clase E, y algunos más, no serán objeto de este análisis pues no se utilizan en la amplificación de audio.

Alguna consideración interesante tienen los arreglos electrónicos adicionales que buscan solucionar problemas asociados como la regulación exacta o dinámica que puedan requerir los transistores para

sus corrientes o voltajes de excitación, y que agregan elementos activos como un mosfet antes de la compuerta o de la base de un transistor, inclusive existen arreglos que colocan un amplificador de baja potencia antes de la base de un BJT que funciona como comparador y optimiza el consumo de energía, logrando en otros arreglos además monitorear las temperaturas de trabajo de los elementos activos e intentando mover los puntos de operación para compensar alteraciones que pudieran ser provocadas por éstas. Así mismo circuitos de retroalimentación que permiten “revisar” la onda de salida con respecto a la de entrada.

Lo más importante luego de este análisis es darse cuenta que si bien los circuitos permiten colocar a los elementos activos en las zonas de operación que se desee, siguen siendo éstos elementos y sus características individuales los principales factores que determinan las limitaciones hasta dónde puede llegar el desempeño de un amplificador, ya sea en la calidad de reproducción, velocidad de conmutación, capacidad de amplificación, etc.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE LOS CIRCUITOS INTEGRADOS MÁS UTILIZADOS EN AMPLIFICACIÓN DE AUDIO

Existen desde el desarrollo del transistor prácticamente, de hecho el primer chip o circuito integrado fue un arreglo de transistores de germanio, los primeros transistores que se utilizaron. Definitivamente ofrece ventajas que algunos elementos requieren para ser una alternativa u opción real en el desarrollo de amplificadores. Para el caso de los MOSFET el hecho de ser “apilables” en un circuito integrado y tener la capacidad de colocar arreglos en paralelo de múltiples transistores de este tipo le permite sobrellevar esa desventaja de manejo de baja ganancia contra un BJT.

3.1 CARACTERÍSTICAS, VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS CIRCUITOS INTEGRADOS

Los circuitos integrados son dispositivos de múltiples componentes, que pueden ser activos y pasivos, en cualquier tipo de arreglos y

combinaciones, por medio de la tecnología de semiconductores. Se pueden lograr circuitos completos en un solo paquete de muy pequeñas dimensiones. Este circuito “empaquetado” requerirá simplemente las conexiones de entradas, de salidas y de alimentación de voltaje para cumplir con alguna función electrónica específica.

Los circuitos integrados se fabricaron originalmente para llevar a cabo varias funciones lógicas, en donde debido al reducido tamaño físico de los dispositivos permitiría una alta velocidad de operación y una gran cantidad de interconexiones. De cualquier manera ésta se ha convertido en el área de mayor crecimiento en todo el campo de componentes electrónicos.

Los circuitos integrados se hacen ahora para una enorme variedad de aplicaciones, desde microprocesadores digitales hasta amplificadores operacionales de alta ganancia lineal y bajo ruido. La cantidad de funcionalidades que se alcanzan con estos dispositivos es muy alta y la complejidad de disposiciones que se logran los hacen una alternativa muy cómoda para amplificadores de propósito general. Sin embargo, existen limitaciones al momento de manejar corrientes muy elevadas, ya que como se indicó en un principio su concepción y por ende su tamaño consideraba transacciones electrónicas lógicas y no manejo de señales amplificadas de audio. A pesar de esto están muy presentes en los

amplificadores comerciales de audio manejando en su interior transistores todo tipo y circuitos completos de amplificación.

3.2 TIPOS DE CIRCUITOS INTEGRADOS

Entre los más utilizados encontramos los siguientes:

Tip 142, que es un arreglo Darlington de dos BJT en cascada.

LM 386, que es un opamp completo

TDA 2003, que también maneja un opamp completo con BJTs

JRC 4558, el cual es un preamplificador para sobrecargar señales

NE 5532, que es un opamp de muy bajo ruido

Éstos son algunos de los integrados más comúnmente encontrados en los equipos de amplificación localmente. Hay cierta dificultad en realidad en este tipo de investigación ya que con el mismo desarrollo y acceso a la tecnología con que se cuenta hoy en día la facilidad de replicar diseños de ciertos fabricantes hacen que los mismos borren algunas numeraciones de los componentes electrónicos como los chips de los equipos ensamblados que sacan al mercado. Podemos apreciar los elementos que constituyen uno de estos circuitos integrados en la figura

3.1

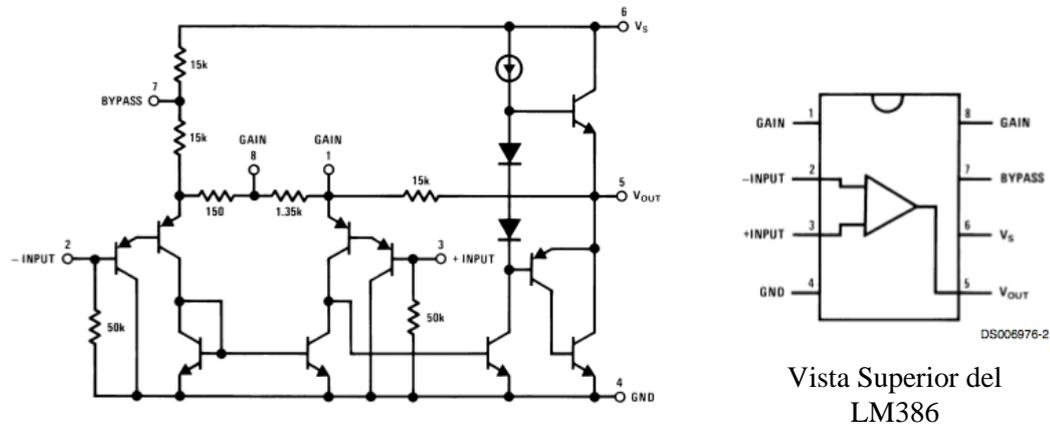


Figura 3.1 Diagrama interno de un circuito integrado

3.3 SISTEMA DE POLARIZACIÓN Y AMPLIFICADORES CON CIRCUITOS INTEGRADOS

Los sistemas de polarización y los amplificadores que se manejan para los circuitos integrados son exactamente los mismos que se han revisado en el capítulo de polarización y amplificación de transistores, ya que se puede entender al integrado como una simple “empaquetado” de varios transistores o de un circuito con más elementos que complementan el funcionamiento de un transistor, pero siempre en las mismas configuraciones esquemáticas que los transistores que se revisó en la

sección anterior. Tal vez la gran diferencia que se consigue con el empaquetamiento de una alta cantidad de elementos electrónicos, activos y pasivos, se pueda valorar al momento de analizar los transistores en aplicaciones de lógica matemática o como procesadores y memorias de datos.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE LAS VÁLVULAS TERMOIÓNICAS MÁS UTILIZADAS EN AMPLIFICACIÓN DE AUDIO

Las válvulas termoiónicas o “tubos” como comúnmente se les denomina fueron el primer dispositivo que permitió lograr una amplificación electrónica del sonido. Si bien posteriormente el desarrollo de los transistores casi borró su utilización, en el campo de amplificación de audio los más exigentes aficionados a la alta calidad y muchas aplicaciones de amplificación de instrumentos musicales mantienen en vigencia a los tubos.

4.1 FUNCIONAMIENTO DE LAS VÁLVULAS TERMOIÓNICAS

El primero de estos dispositivos, o una de sus primeras aplicaciones en todo caso, fue como diodo rectificador, y su nombre viene de la similitud de operación de esta aplicación con la válvula de un “tubo” neumático de auto, la cual dejaba pasar el aire en un sentido pero no en el otro;

además debido a que la manera en que operaba era controlando el flujo de electrones generados térmicamente (que fueron llamados “termions”) el nombre completo fue válvula termoiónica.

Conocidos también como tubos al vacío (vacuum tubes), este elemento consiste en un cátodo calentado, montado al vacío en un tubo sellado de vidrio o metal. Otros electrodos como ánodos o rejillas son dispuestas alrededor del cátodo de modo que se consigan diferentes funciones a partir de su construcción. El nombre descriptivo para cada tipo de válvula se basa en el número de electrodos internos que lleve, así una válvula con dos electrodos (un ánodo y un cátodo) será un diodo; uno con tres electrodos (un cátodo, una rejilla y un ánodo) será un triodo; si tiene cuatro (un cátodo, dos rejillas y un ánodo) será un tetrodo, y así sucesivamente.

Para entender la manera en que trabajan los tubos e incluso para saber cómo obtener el mejor desempeño de ellos, es de suma importancia entender la función de los electrodos internos y la manera en que las diferentes agrupaciones de éstos afectan o varían las características de la válvula.

EL CÁTODO

Es la fuente de electrones con los que opera la válvula, puede ser construido de dos maneras, la primera es con un tramo corto de resistencia de níquel y doblado en forma de V, soportado entre un par de alambres rígidos en su base y un resorte con una muy suave tensión en su parte superior; la segunda construcción es por medio de un tubo metálico generalmente de níquel, con un grupo de cables calentadores que pueden ser de níquel o de tungsteno que están dispuestos dentro del tubo metálico, como se puede ver en la figura 4.1. Ya sea que se trate de un filamento calentado directamente o un tubo calentado indirectamente, su funcionamiento es el mismo, aunque el filamento de calentamiento directo es mucho más eficiente en términos de emisión de electrones disponibles desde el cátodo, en relación con la cantidad de energía necesaria para llegar a la temperatura de funcionamiento requerida (cerca de los 775°C para determinados tubos). Estos cátodos se cubren entonces con óxidos de calcio, bario y estroncio, que durante el funcionamiento del tubo y con la temperatura apropiada permite una reacción química entre el níquel y dicha cubierta de óxido, liberando electrones hacia la superficie del cátodo que formarán la capa de emisión de electrones del tubo. La cantidad de emisión de electrones del cátodo depende directamente de la temperatura, que deberá ser lo suficientemente alta como para tener una buena emisión sin olvidar que mientras más temperatura se maneje menor será la vida del cátodo.

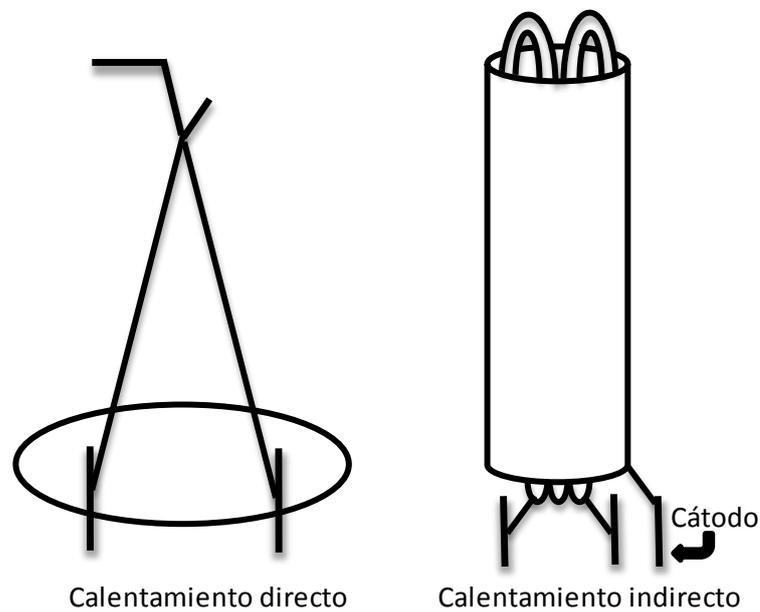


Figura 4.1 Tipos de cátodos en una válvula termoiónica

EL ÁNODO

En la válvula más sencilla, el diodo, el cátodo está rodeado por un tubo o placa de metal, llamado ánodo, usualmente de níquel, y éste atraerá los electrones de la superficie del cátodo en la medida en que se cargue positivamente con respecto a éste último. La cantidad de corriente que fluya dependerá de varios factores: la proximidad de la placa del ánodo al cátodo, el área efectiva del cátodo, el voltaje en el ánodo y la temperatura del cátodo. Para una temperatura de cátodo fija, existirá una relación $R_a = \frac{dV_a}{dI_a}$ entre el voltaje del ánodo y el flujo de corriente, determinada por la siguiente fórmula:

$$R_a = \frac{dV_a}{dI_a}$$

(4.1)

Los electrones al viajar hacia el ánodo y chocar con él, debido a su voltaje positivo, transfieren su energía cinética al mismo haciendo que el ánodo aumente su temperatura. Es importante controlar que esta temperatura no rebase las recomendaciones del fabricante, ya que podría darse una contaminación del vacío de la válvula por gases liberados del ánodo.

LA REJILLA (TRIODO)

Si el cátodo se rodea de una rejilla o malla metálica, la corriente que viaja del cátodo hacia el ánodo se puede controlar por el voltaje aplicado a esta rejilla. De manera que si la rejilla es cargada positivamente, más electrones se verán atraídos a salir del cátodo, y se fomentará su flujo hacia el ánodo; al contrario, si la rejilla se carga negativamente repelerá los electrones del cátodo y disminuirá el flujo, pudiendo incluso detenerlo. Ésta es la característica más importante de la válvula termiónica, que con el control de un pequeño voltaje aplicado a la rejilla se puede controlar un flujo considerablemente grande de corriente entre el cátodo y el ánodo, lo cual permite amplificar pequeñas señales eléctricas; y como la relación entre el voltaje de la rejilla y la corriente del ánodo es relativamente lineal, como se puede ver en la figura 4.2, esta

amplificación causa una mínima distorsión en la señal amplificada. El factor de amplificación de una válvula, que opera con una carga teóricamente infinita en el ánodo se indica por el símbolo griego μ .

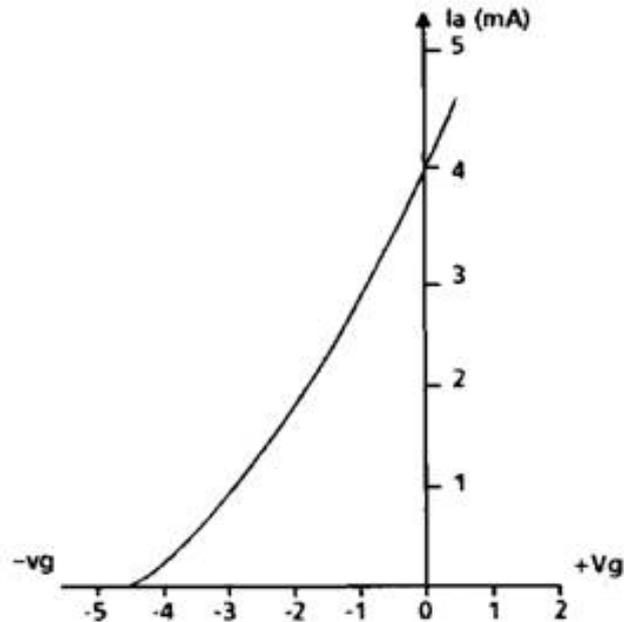


Figura 4.2 Curva de funcionamiento de un triodo

Existen válvulas con múltiples rejillas, sin embargo la rejilla más cercana al cátodo será la que más influencia tenga sobre los electrones que viajan hacia el ánodo, por lo cual es la que llevará el nombre de rejilla de control. La efectividad del control del flujo de corriente de la válvula por medio del voltaje aplicado a la rejilla se incrementa cuando la distancia entre el cátodo y la rejilla es menor, y cuando la distancia entre el cátodo y el ánodo es mayor, ya que se deja mayor control a la rejilla que al efecto eléctrico entre cátodo y ánodo. Sin embargo por otro lado la

resistencia a la corriente entre cátodo y ánodo también aumentará y eso en cambio limita la cantidad de flujo que manejaría la válvula. Otro factor a considerarse es el paso de la espiral o rejilla que permite el fluido de electrones hacia el ánodo, a más estrecha separación de la espiral mayor resistencia encontrarán los electrones en su camino, con lo cual existe una nueva consideración para dicho parámetro.

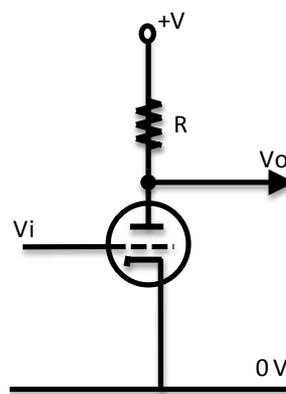


Figura 4.3 Esquemático de un triodo

La ganancia de etapa de un amplificador de una sola válvula, como la que se puede ver representada con su símbolo en la figura 4.3, está dada por la siguiente ecuación:

$$(4.2) \quad M = \frac{\mu R}{R + R_a}$$

Donde R_a es la resistencia de paso de corriente del ánodo debido a factores constructivos de la válvula como ya vimos. Así tenemos por ejemplo la válvula 6SN7, que tiene espacios pequeños entre el cátodo y la rejilla, y también entre la rejilla y el ánodo, además que maneja espacios relativamente grandes entre las espiras de la misma rejilla, con lo cual conseguimos una válvula con alto manejo de corriente entre cátodo y ánodo, pero con un bajo factor de amplificación; mientras que una válvula como la 6SL7, tendrá una resistencia mayor entre ánodo y cátodo, o lo que es lo mismo, una alta impedancia, y esto significará una alta amplificación con los valores adecuados de impedancia conectados al ánodo (R), aunque esto requiera valores altos de Voltaje como alimentación DC del sistema.

CARGA ESPACIAL DE ELECTRONES

Aunque una nube de electrones rodean cualquier cátodo calentado a su punto de operación, la presencia de ella adquiere mayor importancia si introducimos una rejilla con carga negativa al sistema; entonces el área entre el cátodo y la rejilla de control será completamente ocupada por la nube de electrones y será la principal fuente de electrones del sistema. Esta nube de electrones, llamada Carga Espacial de Electrones conlleva

varias ventajas operativas importantes, la primera es que al actuar como un reservorio de electrones permite una grande, aunque breve en tiempo, corriente de electrones que estaría disponible siempre, y que además actuaría como protección del cátodo ante iones positivos creados por la colisión de electrones con gases residuales en el entorno y que se podrían ver atraídos por el electrodo con mayor carga negativa; y por último, la emisión de electrodos desde el cátodo sufre ruidos conocidos como “shot noise”, que hace referencia a la irregularidad de emisiones debido al mismo material, cosa que se podría hacer significativamente notable a muy bajas corrientes y/o altas frecuencias, y el “flicker noise”, que se incrementa a medida que la temperatura aumenta y afecta al flujo producido desde el cátodo, en ambos casos, el reservorio de electrones de la nube minimiza o “absorbe” estos problemas y sirve para estabilizar el flujo hacia el ánodo.

En el caso de un triodo usado como una válvula de potencia de amplificación de salida, donde altas corrientes son requeridas, el espacio entre las espiras de la malla debe ser grande, además de tener un espacio pequeño total entre cátodo y ánodo, lo cual limita el espacio que se puede dejar entre el cátodo y la rejilla, esto elimina la posibilidad de tener una considerable carga espacial de electrones, lo que obliga a tener un cátodo con una alta capacidad de emisión, mayor a la que se puede lograr con un método de calentamiento indirecto, esto quiere decir

que se debe usar un filamento calentado directamente; usualmente el voltaje para calentar éste será bajo, para minimizar el zumbido (hum) inducido, y la corriente deberá ser alta (2.5A a 2.5V por ejemplo en una válvula 2A3). Los cátodos calentados directamente se utilizan también en los rectificadores de válvula con tubos como el 5U4 o el 5Y3, debido a que la alta capacidad de emisión del cátodo reduce la caída de tensión a través de la válvula y aumenta la salida de tensión final.

TETRODO Y PENTODO

Aunque el triodo tiene cualidades apropiadas como amplificador, como un bajo nivel de ruido y un bajo factor de distorsión, sufre la desventaja de tener una significativa capacitancia ($\sim 2.5\text{pF}$) entre la rejilla y el ánodo. Esto no debería ser mayor problema, pero en una etapa de amplificación por ejemplo de 100, el efecto Miller aumentará la capacitancia por un factor de 101 ($\sim 252.5\text{pF}$), lo que podría influir en el rendimiento de la etapa. Una solución fue crear una rejilla adicional entre la rejilla de control y el ánodo, logrando bajar significativamente la capacitancia (0.025pF).

Por otro lado al colocar una malla adicional buscaba además lograr una casi total independencia de la corriente del ánodo con su voltaje, lo que a R_A y a μ a valores muy altos. Desafortunadamente la presencia de esta

nueva rejilla causaba que al caer el voltaje del ánodo durante la dinámica de su operación, a menos del voltaje de la nueva rejilla, los electrones que golpeaban al ánodo a su vez desprendían otros que además por el calor del ánodo salían y eran recolectados por esta nueva rejilla, lo cual causaría irregularidades en la relación entre la corriente del ánodo y el voltaje. Esto afecta especialmente a la aplicación de amplificación de audio como un alto nivel de distorsión de la señal amplificada.

Para contrarrestar este efecto se agregó una tercera rejilla, que se conectaría al cátodo y se llamaría de supresión ya que suprimiría la emisión de electrones desde el ánodo. Ésta válvula consta de cinco electrodos y se llama Pentodo. Un ejemplo de pentodo es la EF86, que además tiene una pantalla de malla de alambre dentro del tubo de vidrio y que rodea todos los componentes internos, para reducir la influencia de campos eléctricos en el flujo de electrodos entre el cátodo y ánodo. Un pentodo puede de hecho tener una ganancia de etapa casi de diez veces la de un triodo de mediana impedancia, además responderá mucho mejor a las altas frecuencias debido a su mucho más baja impedancia entre ánodo y rejilla. Sin embargo el triodo tendrá una figura de distorsión de aproximadamente la mitad de un pentodo.

Otra solución que se implementó para la no completa linealidad de los tetrodos, especialmente enfocado en los amplificadores de potencia de audio, fue la alineación de los hilos de la rejilla de control y de la rejilla de pantalla, de manera que el flujo de electrones se mantuviera en unos bien definidos haces de electrones, que además llevarían cualquier electrón secundario hacia el ánodo, un proceso que fue mejorado por la inclusión, dentro de la caja del ánodo, de dos electrodos de confinamiento del haz de electrones para modificar el patrón del campo electrostático interno.

Éstos están conectados internamente al cátodo, y tienen la forma que se puede observar en la figura 4.4. Estas válvulas se suelen llamar Tetrodo de Haz Dirigido, y tienen una menor distorsión que un pentodo de salida. Válvulas de este tipo, como las muy conocidas 6L6, la 807, la KT66 y KT88, son ampliamente utilizadas en las etapas de salida de los amplificadores de muy alta calidad de los años 1950s e inicios de los 1960s. Los pentodos y los tetrodos de haz dirigido, pueden ser usados con sus rejillas de pantalla conectadas a sus ánodos; de ese modo sus características se asemejan a un triodo que tiene un espacio similar entre el cátodo y la rejilla de control, y entre la rejilla de control y el ánodo, entendiéndose como analogía en el pentodo las distancias entre el cátodo y la rejilla, y entre la rejilla de control y la rejilla de pantalla. El uso

más común de este tipo de conexión es en las etapas de potencia de salida, donde el tetrodo de haz dirigido se comporta como un triodo de potencia, pero sin la necesidad de calentarse directamente por filamento, evitando así el “hum” inducido en el cátodo.

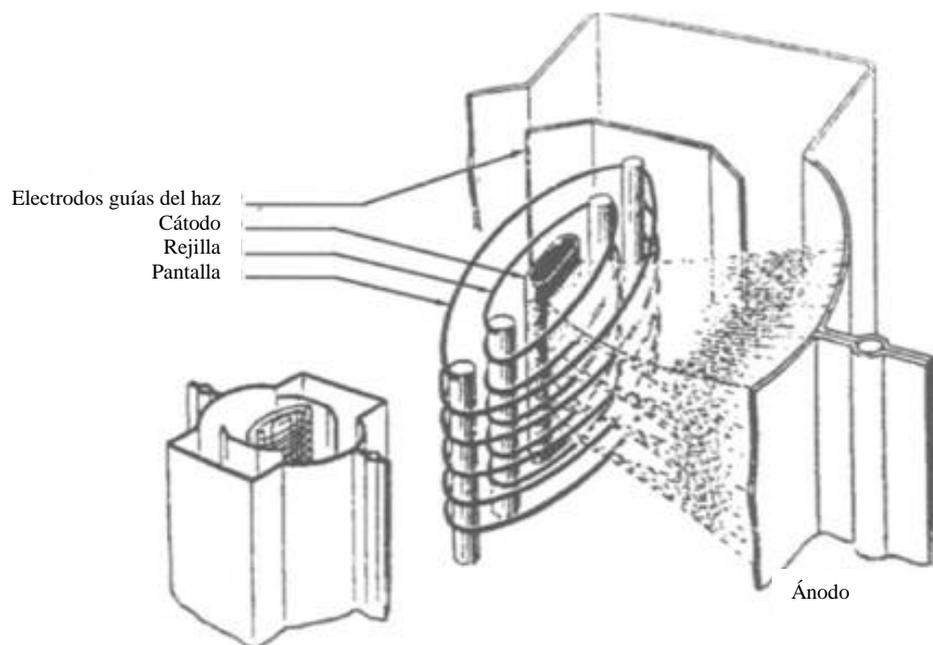


Figura 4.4 Estructura interna de tetrodo de haz dirigido

PARÁMETROS DE LA VÁLVULA

Además de la resistencia a la corriente que fluye por el ánodo, R_A , y del factor de amplificación μ , mencionados antes, existe también la Conductancia Mutua o Transconductancia (g_m) que es una medida de cuánto cambia la corriente del ánodo ante una variación de voltaje en la rejilla de control. Tradicionalmente g_m se medirá en mA/V o

miliSiemenes, escrito como mS; y será un indicador de la ganancia de etapa probable que tendría un circuito empleando una válvula determinada. Esto será de particular importancia en el caso de una etapa de amplificación con un pentodo, donde el valor de R_a es bastante alto en comparación con la resistencia de la carga; por ejemplo en el caso de una EF86, que tiene $2.5M\Omega$ de R_a , y por otro lado tiene una g_m de $2mA/V$, en este caso la ganancia de etapa (M) se puede determinar aproximadamente por la siguiente ecuación:

$$(4.3) \quad M = g_m R_L$$

Que para una carga de $100K$ en el ánodo podría ser de -200 .

Las características de las válvulas están definidas por las siguientes ecuaciones:

$$(4.4) \quad R_a = \frac{dV_a}{dI_a}$$

Para un voltaje de rejilla de control constante;

$$(4.5) \quad g_m = -\frac{dI_a}{dV_g}$$

Para un voltaje de ánodo constante; y

$$\mu = -\frac{dV_a}{dV_g}$$

(4.6)

Para una corriente de ánodo constante.

El signo menos indica la inversión de fase que se obtiene de la señal original debido a que la misma al aumentar restringe mayormente el paso de corriente por la válvula. Por último la relación entre estos parámetros está dada por la siguiente expresión:

(4.7)
$$\mu = g_m R_a$$

EL VACÍO DE LA VÁLVULA

La preservación del vacío para la libre circulación de los electrones dentro de la válvula es muy importante, y como no es posible lograr un perfecto vacío durante la construcción de la misma, un mecanismo adicional para este fin es la colocación de un pequeño contenedor, dentro de la válvula, alejado de los electrodos de la misma, que contiene pequeñas cantidades de material reactivo, como calcio o magnesio.

Luego se puede calentar este recipiente para que los reactivos se evaporen, logrando que se limpie el rastro de gases que surgen de los procesos químicos, aunque la idea es tener el cuidado suficiente para que no haya interacción de los reactivos con los electrodos de la válvula. En todo caso es importante estar conscientes que el vacío absoluto no es posible, y que cuando se pueda apreciar la pérdida de un nivel aceptable en el interior de la válvula, la misma debe ser remplazada evitando así que corrientes descontroladas lleguen a producirse averiando otros componentes del circuito eléctrico en donde funcione dicho dispositivo.

TEMPERATURA DE OPERACIÓN

Para un funcionamiento óptimo la temperatura del cátodo debe ser constante y específica, a un valor al que la válvula trabaje de la mejor manera, con lo cual el calentador o los filamentos deben ser escogidos correctamente. Una consideración especial en los circuitos además será entonces el nivel de exactitud de la fuente para este calentamiento, teniendo en cuenta además que los voltajes entre cátodo y calentador deben ser bajos, por las corrientes de fuga cátodo-calentador.

En la práctica, el cableado del calentador, que trabaja a 6.3Vac por lo general, se instala como un par trenzado para minimizar la inducción de los zumbidos a partes sensibles del sistema, así como colocarlo dentro

del tubo del cátodo, para las válvulas de bajo ruido, como el EF86. En todo caso, con el desarrollo de la tecnología no hay ninguna razón para no colocar una fuente DC de buena regulación actual para hacer este trabajo si hablamos de un amplificador de alta fidelidad a tubos hoy en día.

MICROFONÍA

Cualquier vibración física de la rejilla, o del filamento en los cátodos directamente calentados, y que altere la distancia entre el cátodo y la rejilla de control, causará una fluctuación en la corriente del ánodo, y eso producirá un sonido de timbre audible cuando se tope el envoltorio de la válvula; esto es un efecto conocido como "microfonía" para el caso de válvulas utilizadas en amplificadores de audio. Esto se combate diseñando una rígida sujeción para las partes de la válvula desde el alambrado de sus electrodos hasta las bases que sujetan la válvula en el circuito eléctrico. Sin embargo la misma producción de sonido y vibraciones de cualquier otro tipo de fuente podrían ser responsables de producir este efecto en las válvulas, con lo cual es recomendable que el circuito amplificador esté en lo posible alejado de posibles focos de vibración para evitar distorsiones en la señal original que se desea amplificar exclusivamente.

4.2 TIPOS DE VÁLVULAS TERMOIÓNICAS

Como ya se pudo ver en la explicación del funcionamiento de las válvulas, para lo cual fue necesario revisar cada componente de ella y su específica función, las válvulas se catalogan principalmente por el número del número de electrodos que tengan, así tenemos los Diodos, de dos electrodos, que es la más básica forma del tubo termoiónico y de donde saca su nombre la válvula; los Triodos, que son las válvulas que ya podemos utilizar para amplificación de señales eléctricas, pero que se ven limitadas porque en etapas altas de amplificación el efecto Miller introduce distorsiones para determinadas frecuencias; los Tetrodos que vimos que tienen ciertos problemas de linealidad, sobre todo en amplificación de frecuencias de audio; los Pentodos que corrigen la no linealidad del tetrodo con una rejilla adicional de supresión; y los Tetrodos de Haz Dirigido, que por medio de la alineación de las rejillas de control y de pantalla, más la adición de placas para guiar los haces de electrones consiguen tener una linealidad apropiada para su utilización en amplificadores de audio. En la figura 4.5 se aprecian algunos tipos de tubos al vacío.



Figura 4.5 Varios tipos de válvulas termoiónicas

Además de los que se ha mencionado existen válvulas que son combinaciones de los anteriores en un solo bulbo, o que incluyen elementos adicionales, en realidad existe una gran variedad, pero que tienen su aplicación en campos distintos al de amplificación de frecuencias de audio, por lo cual limitaremos su categorización a los ya expuestos.

4.3 CIRCUITOS Y AMPLIFICADORES PARA CADA TIPO DE VÁLVULAS

El diseño de amplificadores de voltaje a base de tubos es relativamente más sencillo si lo comparamos con los circuitos de estado sólido, aunque en parte sea porque no hay tantas opciones en realidad. Además las

válvulas son relativamente lineales en sus características de transferencia de entrada y salida, por lo que se requiere mucho menos complejidad en la elaboración del circuito para lograr mejoras en el desempeño y para reducir distorsiones en la forma de la onda amplificada.

Las configuraciones de los circuitos que podemos encontrar para amplificadores de frecuencias bajas sólo considerarán de hecho triodos y pentodos, los cuales se pueden utilizar en cualquiera de los cinco arreglos mostrados en la figura 4.6. Ahí encontramos la configuración de cátodo aterrizado, rejilla de control aterrizada, cascada, cátodos acoplados, y seguidor de cátodo. En estas figuras por practicidad sólo se muestran las disposiciones utilizando triodos.

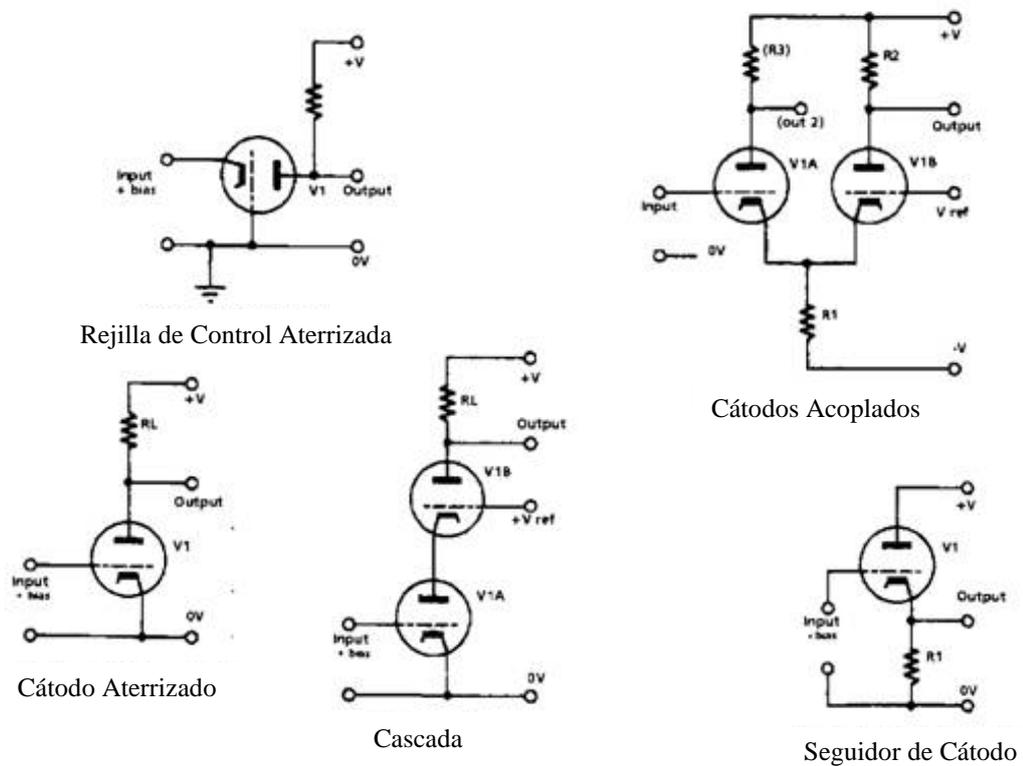


Figura 4.6 Diferentes configuraciones par válvulas

CÁTODO ATERRIZADO

Las principales diferencias en un amplificador de cátodo aterrizado, estarán en la manera en que se polariza la rejilla (bias) y la manera en que se acopla la carga al cátodo. Tenemos por ejemplo la curva de un triodo ECC83 en la figura 4.7, en donde observamos el rango lineal de la relación entre el voltaje de la rejilla de control y la corriente de salida del ánodo; aquí la manera de colocar la señal eléctrica para ser amplificada es por medio de un circuito que lleve el “cero” o el centro de las oscilaciones de la misma al punto medio de la región lineal de la válvula.

Así mismo se debe considerar esa ubicación tratando de manejar las menores corrientes de ánodo que sea posible debido a que existe una relación inversa entre la vida del cátodo y los niveles de corriente a través de la válvula.

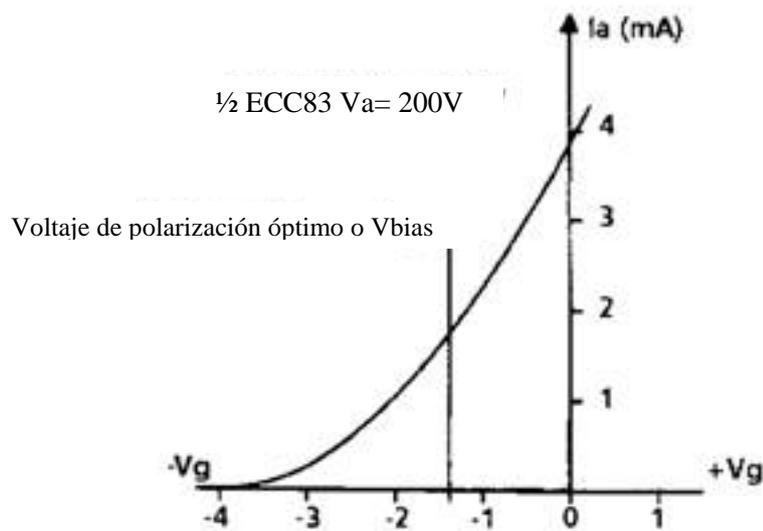


Figura 4.7 Curva del triodo ECC83

Tenemos en la figura 4.8 algunos circuitos para acondicionar el voltaje de entrada a la rejilla de control, que básicamente buscará aplicar un voltaje estático para desplazar la señal hasta el punto que queremos en la curva de la válvula. El primero de ellos deja esto a efectos intrínsecos de la válvula; mientras en la segunda se puede introducir un voltaje fijo como referente adicional para desplazar la señal de control de la rejilla; por último tenemos el tercer método que de hecho es el más usado, en

donde un circuito agregado al cátodo asegurará que se mantenga positivo contra la rejilla de control, asegurando el trabajo en la zona de linealidad. Sin embargo, existe una desventaja en los arreglos de polarización del cátodo contra los sistemas donde el cátodo está fijado a la referencia o a tierra, que es la resta del voltaje generado en el cátodo del voltaje del ánodo, lo cual reduce el voltaje no distorsionado del ánodo.

Las cargas en el ánodo por su parte se pueden resumir así mismo en tres configuraciones, que podemos ver en la figura 4.9 de las cuales la más utilizada como acoplamiento entre etapas es la primera, ya que permite una amplia ganancia de ancho de banda y una relación de fase y frecuencia bastante sencilla. Sin embargo al hacer un análisis más profundo de las cargas conectadas al ánodo se determina que hay una caída de voltaje por la resistencia que lo conecta a la fuente, de ahí las otras configuraciones que se pueden apreciar aparecen como una solución a esta eventualidad, aunque sacrificando las características de fase y frecuencia de la señal original, por lo cual arreglos de este tipo se consideran más para acoplamiento al final de la cadena de amplificación y como acople a la carga del altavoz.

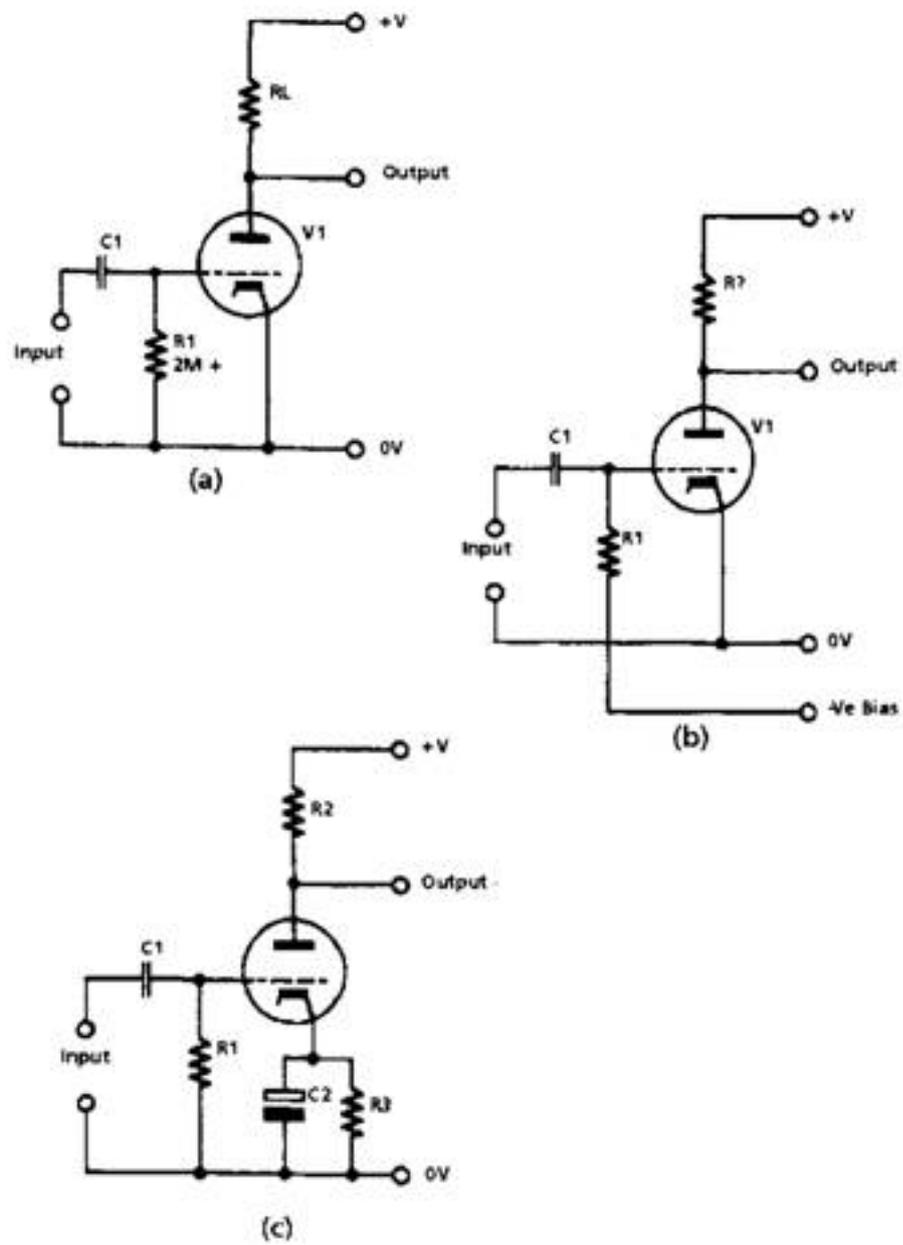


Figura 4.8 Diferentes polarizaciones para el Vbias

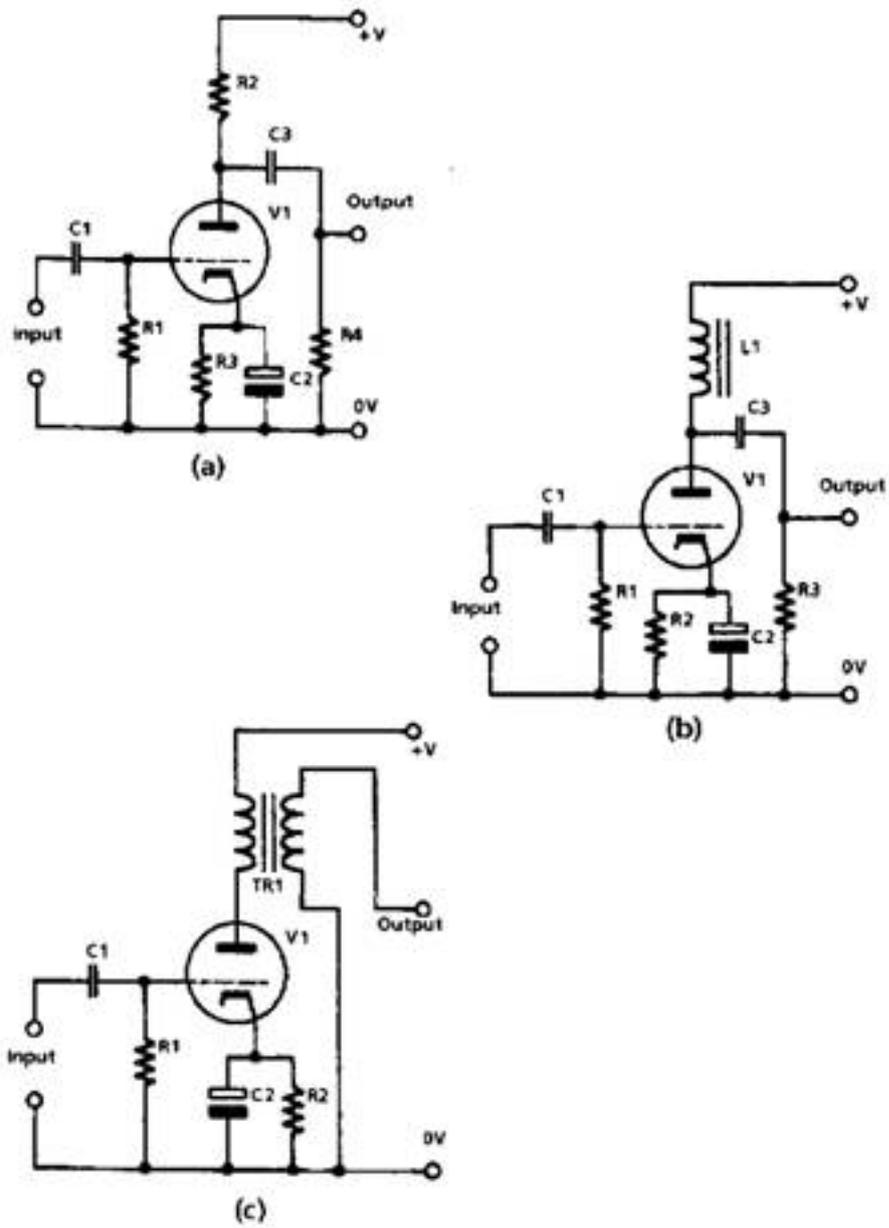


Figura 4.9 Diferentes acoples de cargas

REJILLA DE CONTROL ATERRIZADA

Esta configuración se utiliza principalmente en amplificadores para radio frecuencias, ya que es efectiva para manejar muy altas frecuencias; por esta razón no será parte de este estudio.

CASCADA

Este arreglo tiene varias ventajas, como una buena linealidad y un buen aislamiento entre la entrada y la salida del circuito, además de una buena impedancia de entrada. Sin embargo tiene la pequeña desventaja de la necesidad de una fuente adicional de voltaje para la válvula VIB, como es el $+V_{ref}$, además, el arreglo de las dos válvulas limita el voltaje de salida del circuito. Para este tipo de arreglos son necesarias válvulas específicas fabricadas con especiales consideraciones. Esta configuración se puede observar en la figura 4.6.

CÁTODOS ACOPLADOS

Esta configuración, más conocida como long-tailed pair, que aparece en el literal d de la figura 4.6; tiene un arreglo en que el VIB se parece a la configuración de rejilla aterrizada, pero conectada en realidad a una fuente fija de V_{dc} , y usando como entrada a su cátodo. Una desventaja, sin embargo, de esta configuración es que la ganancia de la etapa en esta disposición es aproximadamente la mitad que la de cátodo a tierra.

Esto se debe a que si bien V1A está tratando de transmitir a su cátodo las variaciones que ingresan por su rejilla, V1B está (en su propio circuito) intentando mantener fijo el voltaje de su cátodo; lo cual da como resultado que, si ambos tubos son idénticos, se produzca un cambio de voltajes en la señal de los cátodos, que es la mitad de la amplitud de la señal de entrada en la rejilla de V1A. Una ventaja importante de este diseño es que si la resistencia de la cola de cátodos es alta, y si ambos circuitos de ánodo tienen resistencias idénticas, los voltajes de las señales desarrolladas en los ánodos serán muy parecidos, idealmente iguales, pero en oposición de fase. Esto permite que este arreglo se use como un divisor de fases que preceda a una etapa de salida push-pull, con grandes ventajas en rendimiento en comparación con un transformador con tab central para la división de la señal. Además permite un interesante control por medio de la referencia V_{ref} conectada a la rejilla del V1B para lograr un equilibrio correcto entre las dos válvulas.

SEGUIDOR DE CÁTODO

Es la última configuración de las mostradas en la figura 4.6, la del literal e, y es un arreglo que normalmente da una baja impedancia de salida a una ganancia ligeramente menor a la unidad. Un voltaje DC de

polarización normalmente será escogido para tener al tubo trabajando en su mejor zona de linealidad. La principal aplicación del seguidor de cátodo es transformar una señal con una muy alta impedancia en otra virtualmente igual pero con una impedancia muy baja, evitando el uso de transformadores, que introducirían distorsiones o errores fase/frecuencia.

Existen por supuesto más configuraciones pero que básicamente surgen de la combinación de las anteriormente citadas. Al igual que para los transistores, los distintos circuitos que se puedan diseñar alrededor de las válvulas termoiónicas buscan crear las condiciones operacionales óptimas de el funcionamiento de éstas. Con lo cual la principal limitante y quien determina el alcance o eficiencia del amplificador sigue siendo el elemento activo del mismo, el tubo al vacío. Como ejemplo de un amplificador simple se puede ver la figura 4.10 en donde además se puede apreciar la conexión de la rejilla no sólo de control sino la de pantalla además y su apropiada polarización.

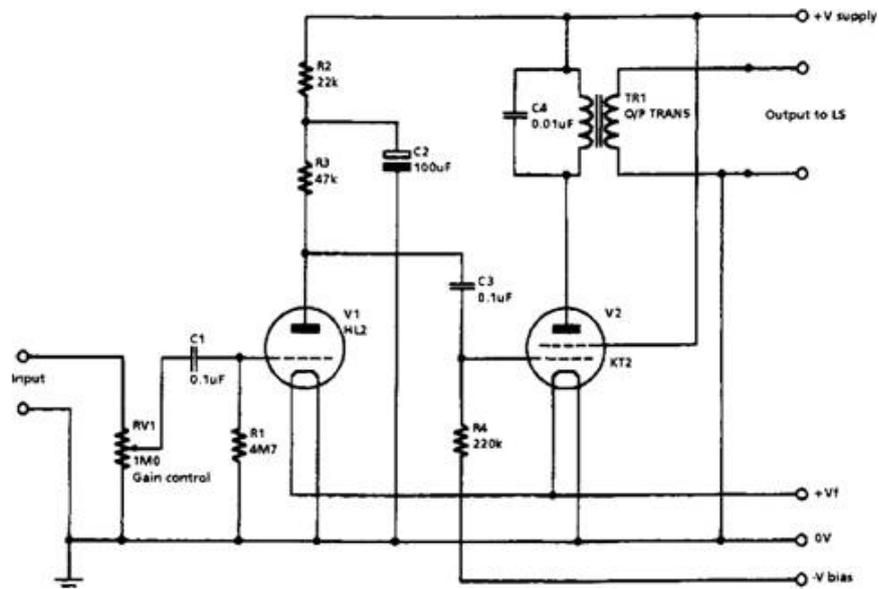


Figura 4.10 Esquemático de un amplificador simple a tubos

CAPÍTULO 5

COMPARACIÓN DE LOS VARIOS TIPOS DE AMPLIFICADORES Y LAS MEJORES OPCIONES

La comparación entre la amplificación lograda por medio de transistores y la lograda por válvulas termoiónicas se puede hacer en varios campos de análisis. Para este estudio se han escogido los siguientes:

- Consumo de Energía
- Complejidad del circuito necesario para su operación
- Duración de los elementos constitutivos
- Costo en el mercado
- Fidelidad de la Amplificación

5.1 CONSUMO DE ENERGÍA

Se puede determinar la necesidad de energía de un sistema de amplificación principalmente por la cantidad de elementos constitutivos

necesarios en el circuito eléctrico para crear las condiciones necesarias de funcionamiento del elemento activo de amplificación.

Así, tenemos por ejemplo que los amplificadores menos eficientes se encuentran en la familia de los amplificadores a tubos. La gran mayoría de válvulas son de calentamiento indirecto, y se requiere en estos casos una fuente que alimente una resistencia (filamento) que sólo tiene la función de llevar a altas temperaturas al cátodo y prepararlo para emitir electrones. Sin mencionar el consumo del transformador para generar este voltaje adicional para el sistema. Además tenemos la muy frecuente necesidad de una fuente regulable DC que proporcione, en la gran mayoría de casos, un voltaje bias para polarización de la rejilla de control, con lo cual tenemos un consumo adicional de energía. Además la diferencia entre triodos y pentodos, a favor de estos últimos, no es sólo mejor en su funcionamiento en toda la gama de frecuencias, logra además optimizar su eficiencia en algunos casos casi al doble, con lo cual los circuitos con pentodos son más eficientes que los que utilizan triodos. Los circuitos con tetrodos logran una eficiencia intermedia entre los dos anteriormente especificados. Para tener una idea más precisa un amplificador en base a pentodos puede tener cerca del 30% de eficiencia.

Luego tenemos los transistores BJT, en estos el consumo es menor desde el hecho de necesitar menos componentes y fuentes DC dedicadas, sin mencionar el más importante factor diferenciador que es el de prescindir de altas temperaturas para su operación, la simple polarización eléctrica logra permitir el paso de corriente controlada por el flujo de electrones desde la base al emisor sin necesidad de crear una nube de electrones como se requiere en los tubos.

Por último tenemos al más eficiente en cuestión de consumo de energía, el transistor de efecto de campo FET, el cual al no requerir un flujo de corriente para el control de la amplificación, reduce el consumo en comparación con el BJT. Esto baja la producción de calor y la pérdida de energía en este aspecto. Por supuesto entra en esta categoría el FET más utilizado, el IGBT o MOSFET.

Por otro lado se tienen las configuraciones que pueden tener los amplificadores, y que independiente al elemento activo que se utilice, ya sea un tubo al vacío, un BJT o un Mosfet, tienen marcadas diferencias en cuanto a consumo entre sí. Así los amplificadores clase A tienen la más baja eficiencia, encontrando amplificadores clase A con un rendimiento del 10% al 25% y que si llevan un acople por transformador a la salida podrían subir hasta un 50% de eficiencia. Luego, se tiene el rendimiento

de los Clase B que pueden llegar hasta un 78%; y con un resultado muy similar están los más utilizados de Clase AB. Todos estos valores considerando estos arreglos con transistores BJT. Es importante mencionar que las configuraciones Clase A y AB son las más utilizadas además en los amplificadores a tubos, y que sus eficiencias son más bajas que sus equivalentes con transistores, principalmente por lo ya mencionado, el consumo térmico para lograr poner al tubo en temperatura de operación, la cual puede estar entre 200 y 300 grados centígrados.

Existe además el modelo de muy alta eficiencia, el Clase D que puede llegar a valores cercanos al 90% pero con una teoría de amplificación completamente distinta que ya se pudo revisar anteriormente. En este tipo de amplificadores se suele encontrar principalmente MOSFETs por su capacidad de rápido encendido y apagado, que es como se opera en este tipo de configuración. En la figura 5.1 se observa una gráfica de la comparación de consumo energético según la clase de amplificación.

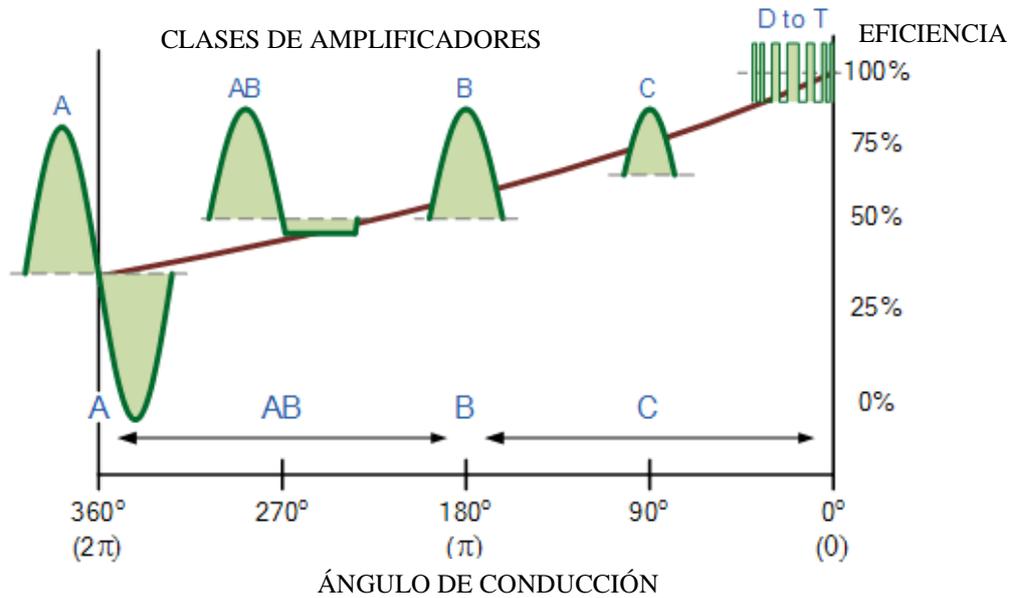


Figura 5.1 Comparación de eficiencias entre clases de amplificadores

De cualquier manera este aspecto comparativo es uno de los menos importantes para los usuarios de equipos de alta fidelidad, salvo que se trate de equipos portátiles de reproducción de audio, donde sí es determinante la duración de las baterías que alimentan los circuitos de amplificación. Aquí encontramos amplificadores Clase D con complejos filtros a la salida o incluso una particular clase G que emplea múltiples fuentes de alimentación para hacer más eficiente un modelo AB y mejorar sustancialmente su consumo.

5.2 COMPLEJIDAD DEL CIRCUITO NECESARIO PARA SU OPERACIÓN

Existe una muy grande cantidad de amplificadores, con diseños muy variados, sin embargo está claro que el modelo de amplificador más sencillo es el que hace mejor su trabajo sin necesidad de circuitos adicionales ni compensaciones de ningún tipo, o al menos con la menor cantidad de éstos. Con este criterio se puede analizar, igual que en el parámetro anterior, el tipo de configuración del amplificador, Clase A, AB, D, y el tipo de elemento activo del mismo, Triodos, Tetrodos, Pentodos, BJTs o Mosfets, que son las variedades que se utilizan en general en las aplicaciones de audio.

Empezando por el tipo de elemento activo de amplificación se puede dividir la comparación en dos grandes grupos, los amplificadores de válvulas y los de transistores. Si el amplificador es a válvulas, ya sean triodos o pentodos, se requieren componentes como fuentes para el calentamiento del cátodo de cada tubo, una fuente muchas veces independiente para la regulación del voltaje bias para polarizar la rejilla de control así mismo de cada tubo y por último el transformador de acoplamiento de la carga que al manejar voltajes mucho más altos que los circuitos de transistores también manejan relaciones específicas. Sin

embargo, la linealidad de los tubos y sobre todo de los pentodos hace que no sean necesarios circuitos adicionales para mejorar la fidelidad de la onda amplificada, pudiéndose encontrar amplificadores a tubos realmente simples.

Por otra parte están los amplificadores de transistores, que no requieren elementos de calentamiento, ni ajustes de voltajes de bias con fuentes independientes, de hecho los niveles de voltaje empleados son bastante manejables y permiten simplificar los elementos de alimentación del circuito; incluso el transformador de salida sirve para ajustar impedancias no tan lejanas como en el amplificador de válvulas y es más sencillo de encontrar comercialmente hablando. Pero hay que recordar que los transistores reemplazan a los tubos principalmente por su eficiencia y practicidad, y la evolución de la búsqueda de esas mejoras lleva a sacrificar la calidad de la amplificación en muchos casos, por lo cual los amplificadores a transistores pueden volverse muy complejos por todos los circuitos de compensación que se terminan agregando.

Detallando un poco más, los amplificadores clase A son muy sencillos, pero ineficientes, en cambio mientras se va logrando mayor eficiencia, ya sea desde la adición del transformador de acople de carga pasando por los circuitos de los clase AB, y llegando a los arreglos que incluyen

retroalimentaciones dinámicas, se va también haciendo más complejo el amplificador. De hecho la facilidad de la electrónica de semiconductores actual ha permitido que sea muy fácil agregar circuitos a los amplificadores de audio para diferentes funciones, como preamplificación, ecualización, filtros, etc.; sin embargo esto hace más complejos los diagramas desde el punto de vista de análisis o reparaciones si fuera necesario.

La conclusión final a la que se puede llegar es que mientras más eficiente energéticamente es el amplificador es más complejo, si se considera el no perder calidad en la amplificación de la señal de entrada.

En la figura 5.2 se puede observar un amplificador de transistores de varias etapas, y en la figura 5.3 uno a válvulas.

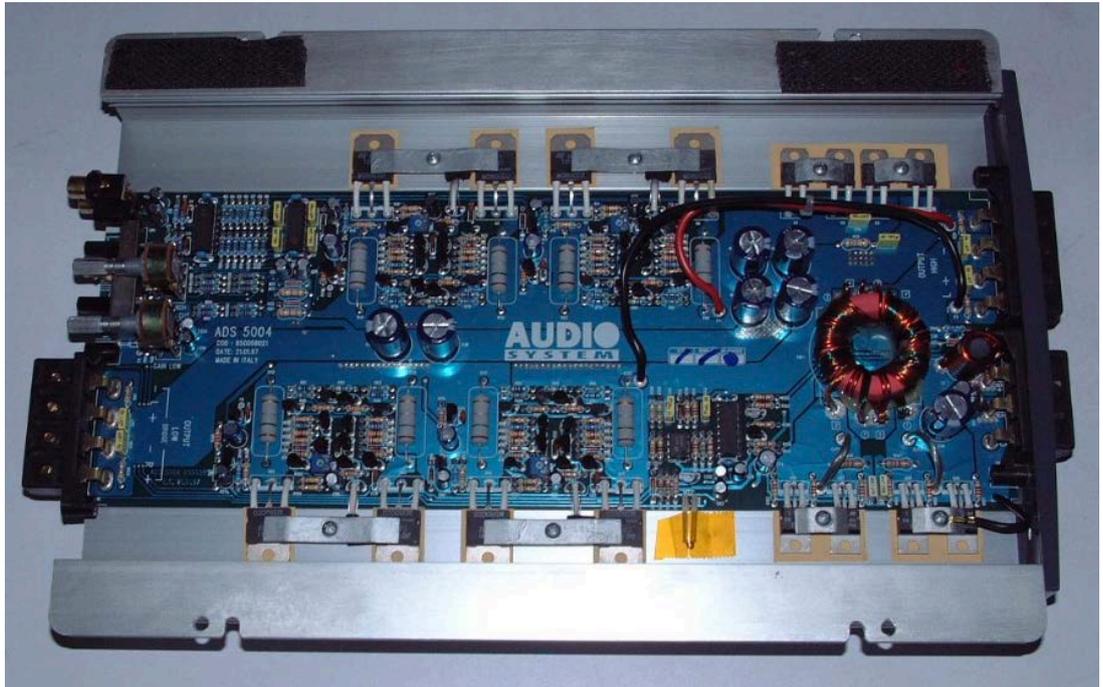


Figura 5.2 Imagen real de un amplificador a transistores



Figura 5.3 Imagen real de un amplificador a tubos

5.3 DURACIÓN DE LOS ELEMENTOS CONSTITUTIVOS

En este aspecto hay que considerar dos situaciones, la operación normal del equipo en condiciones muy controladas y la operación con eventos fuera de este control. Para el primer caso un amplificador a transistores teóricamente no tiene elementos que se desgasten con el uso, con lo cual su duración debería ser teóricamente infinita. En cambio en el caso de los amplificadores a válvulas tenemos que el desgaste en operación normal de los electrones que se desprenden del cátodo acaba con las propiedades amplificadoras del equipo, con lo cual luego de un periodo de tiempo que pudiera ser de 2 a 5 años, dependiendo de la utilización del amplificador, las válvulas deberán ser remplazadas, cosa que es fácilmente ejecutable por el usuario ya que los tubos están colocados en conectores de fácil acceso para su intercambio; aquí lo más importante es tener en cuenta la disponibilidad de las mismas, ya que algunas son bastante difíciles de encontrar, sin embargo los amplificadores a tubos que se encuentran en el mercado utilizan dispositivos comunes que son las válvulas que han logrado mejores desempeños a lo largo del tiempo.

La otra situación que se analiza es cuando los amplificadores son sometidos a condiciones no tan controladas, que principalmente son dos;

la primera es al transporte frecuente del mismo, en cuyo caso los equipos a transistores son los que mejor soportan este manejo, entendiéndose que son elementos sólidos y aguantan mejor los golpes o vibraciones intrínsecos a la transportación; los equipos a tubos en cambio suelen ser más pesados por los transformadores que requieren, lo cual aumenta la posibilidad de caídas fuertes, y los tubos al ser intercambiables, podrían desprenderse de su conector por la vibración del transporte y romperse, recordando que tienen un envoltorio final de vidrio que conserva el vacío para su operación. La otra condición no controlada es la variación de voltaje por fallas en la alimentación, ante lo cual en cambio las válvulas termoiónicas son mucho más robustas que los transistores de estado sólido; estos últimos pueden quemarse si se exponen a polaridades inadecuadas o a sobre voltajes. El remplazo de transistores sí requerirá la intervención de un técnico ya que no se consideran elementos que deban tener ningún tipo de recambio normalmente y los diseños no incluyen ninguna facilidad para su intercambio. Los equipos de alta gama en todo caso incluyen varios tipos de protecciones para preservar los delicados elementos de estado sólido.

El resto de partes son bastante comunes y no deberían desgastarse con el uso normal ni con eventualidades como las expuestas.

5.4 COSTO EN EL MERCADO

Los precios de los amplificadores pueden variar muchísimo, independiente a su consumo, esta variable está más que nada relacionada con la calidad de su amplificación, que suele ir de la mano con la calidad de sus componentes y por consiguiente con su duración. Sin embargo existe un salto adicional en el tema de precios cuando se habla de amplificadores tipo “boutique” armados a mano y no en serie como la gran mayoría.

Para efectos de limitar el universo de amplificadores se considerará exclusivamente los de alta fidelidad.

Entre los equipos de bajas potencias, consideradas hasta los 20[W] de salida, hay una gran variedad incluso de kits para armar amplificadores de alta fidelidad. Entre estos equipos encontramos precios que van desde 20USD para los basados en transistores hasta 200 USD para ciertas unidades que utilizan tubos.

En los equipos de potencias por encima de los 80[W], que pueden llegar a 200 y 300[W] están los amplificadores de alta fidelidad que en transistores oscilan desde 150 USD hasta 1000USD en modelos que

incluyen además controles digitales; y los que se basan en válvulas que pueden ser desde los artesanales con costos desde 500USD hasta los de reconocidas marcas como McIntosh con sistemas de varios miles de dólares.

Un capítulo aparte pero que guarda cierta relación son los amplificadores de instrumentos musicales, en donde el análisis que vale la pena hacerse se reduce a equipos de potencias alrededor de 100[W], y donde los equipos a transistores van desde 300USD hasta 600USD y los que son con válvulas oscilan entre 900USD hasta 5000USD, dependiendo de las etapas de preamplificación y posibles parametrizaciones.

5.5 FIDELIDAD EN LA AMPLIFICACIÓN

Esta es por mucho la más compleja comparación entre los amplificadores, y si bien se puede caer en lo subjetivo, vale la pena analizar las curvas de comportamiento y de amplificación de cada elemento activo de amplificación.

BJT

Para empezar se analizará el comportamiento del transistor BJT en su configuración más utilizada, la de emisor común, debido a su capacidad de amplificar voltaje, corriente o potencia. Las curvas de la figura 5.4 nos indican su comportamiento y la necesidad de colocar su operación en una región determinada, limitada por un voltaje de base emisor superior a los 0.7[V], y sin embargo lo suficientemente pequeño para que la corriente de base no se aleje demasiado de la zona en que mantiene cierta linealidad con la corriente del colector; y que deberá considerar además el no sobrepasar el límite de potencia que puede manejar el transistor según el fabricante, un ejemplo de esta curva se puede observar en la figura 5.5 y es el resultado de la graficación de los datos de Disipación, Corriente y Voltaje Máximos del Colector entregados por el fabricante. Esta limitación de parámetros del colector es en realidad quien limita la amplificación del transistor, más allá del hecho de tener un factor de amplificación muy alto. Si bien hemos encontrado que se puede hablar de una relación lineal de amplificación, ésta se reduce a una región muy pequeña y es además resultado de una conjetura, ya que en realidad la curva es exponencial, lo cual implica una relación muy delicada y limitada para conseguir un amplio rango de equivalencias en cuanto a la potencia de salida. Hay quienes empíricamente traducen esto como una compresión natural de este tipo de circuitos que no permite

tener demasiado rango dinámico a la salida de estos amplificadores, más allá de si se utilizan en disposiciones clase A, B ó AB; que más van a afectar el rendimiento del equipos que la transconductancia o directamente la calidad de amplificación.

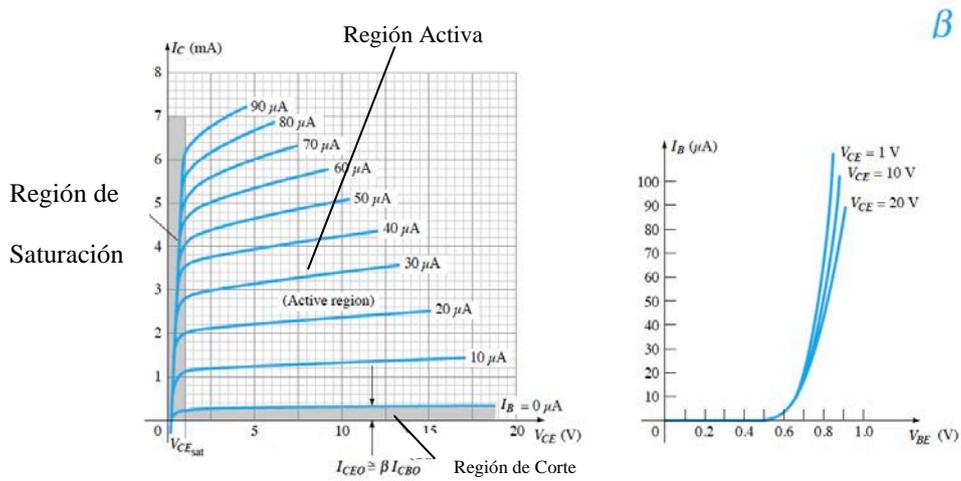


Figura 5.4 Curvas de funcionamiento de un BJT

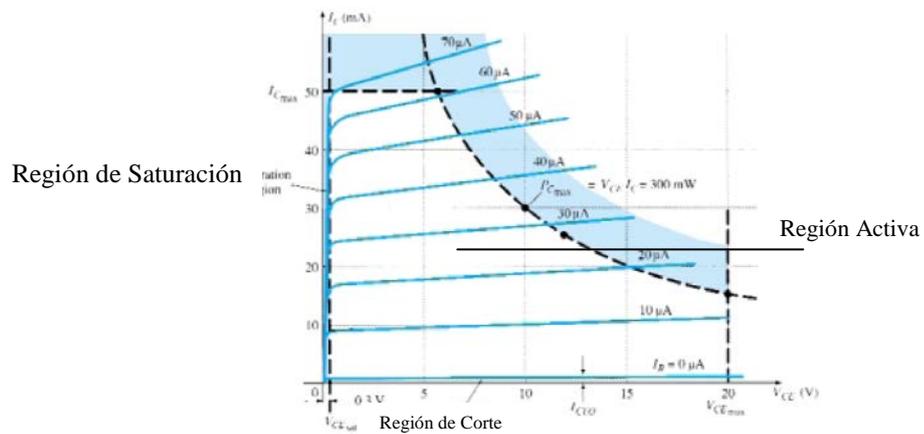


Figura 5.5 Región de operación de un BJT

TRIODOS

El funcionamiento de los triodos como amplificadores, que ya se examinó incluso constructivamente depende para este efecto al voltaje aplicado a la rejilla de control que mientras más polaridad negativa adquiere menos permite el paso de electrones del cátodo al ánodo. En la figura 5.6 se puede observar la relación entre la corriente del ánodo (o plate) y el voltaje de polarización ánodo-cátodo para un triodo 6550, con diferentes curvas determinadas por las corrientes de control de la rejilla; además la zona de operación delimitada por el fabricante será muy parecida a la que aparecía en los transistores. Estas curvas en su mayoría son bastante lineales, paralelas y equidistantes entre sí, con lo cual la relación entre el voltaje de la rejilla de control y la corriente del ánodo es prácticamente lineal; además no dependen de flujos de corriente para el control, por ende no habrá alteraciones por la temperatura. Por último tenemos la ventaja de una alta impedancia de entrada que favorece el acople para señales de entrada.

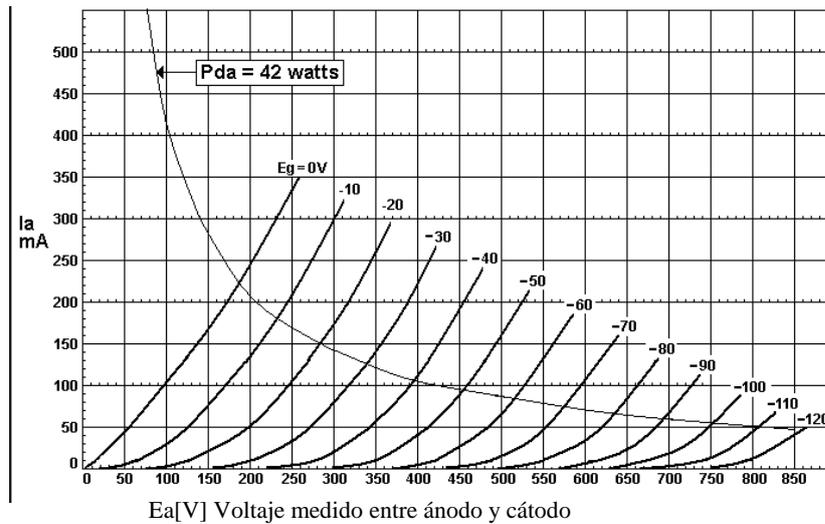


Figura 5.6 Curvas de funcionamiento de un Triodo

PENTODOS

Estos elementos que tienen rejillas adicionales, cuyo funcionamiento se vio en capítulos anteriores, logran conseguir aislar más la acción del voltaje de ánodo a cátodo de la acción de control del voltaje de la rejilla, consiguiendo un comportamiento definido por la curva de la figura 5.7 en donde se puede apreciar que con un nivel mucho menor de voltaje en la rejilla de control y con una curva bastante más independiente a los efectos del voltaje del ánodo se controla la corriente del mismo. Esto quiere decir una amplificación mayor y más capacidad de ganancia.

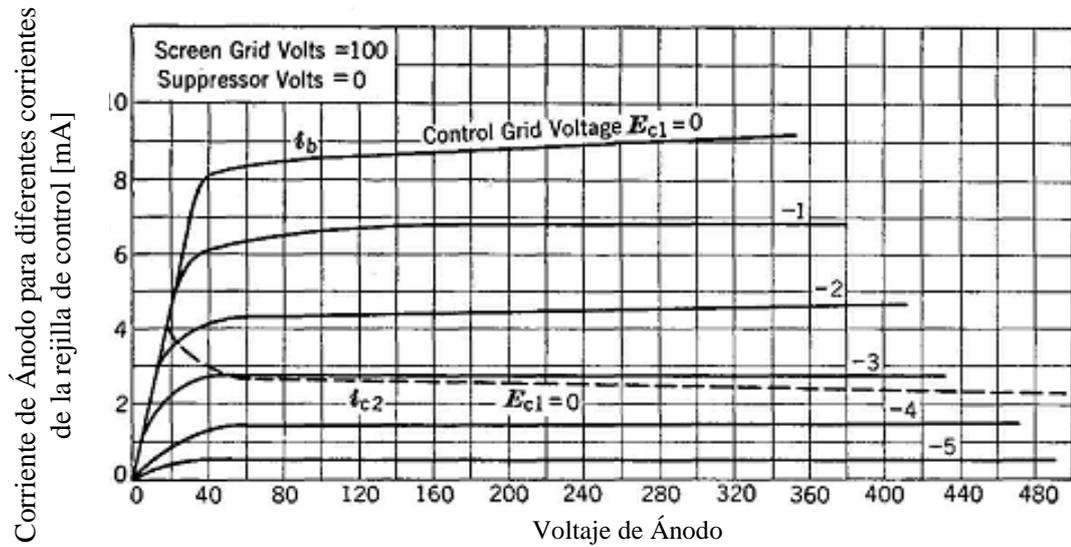


Figura 5.7 Curvas de funcionamiento de un Pentodo

JFET y MOSFET

Si bien existen diferencias entre estos dos tipos, la gran mayoría de amplificadores de audio que se construyen con transistores de efecto de campo se hace con Mosfets hoy en día, y si la relación entre la entrada y salida de los transistores bipolares es exponencial en realidad, la que existen entre la entrada y salida de los dispositivos JFET y Mosfets es más bien cuadrática, con lo que, si se acondiciona correctamente la porción de la curva donde se trabaja se puede conseguir una linealidad bastante aceptable, mejor que la de los BJTs, casi tan lineal como la de un triodo. Sin embargo hay limitaciones, con la capacidades de manejo

de corriente, pero que se suplen colocando semiconductores de este tipo en paralelo. Está además la ventaja de la muy alta impedancia de entrada de estos elementos, su inmunidad a cambios por temperatura y su bajo grado de ruido de operación. La curva de corriente de Drenador contra el voltaje de puerta a Surtidor se puede observar en la figura 5.8. La desventaja sería la baja ganancia que ofrecen y la alta sensibilidad a su manipulación.

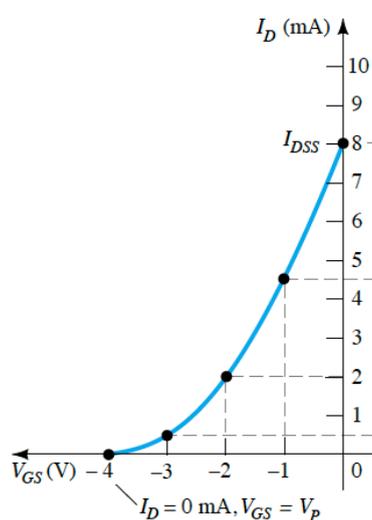


Figura 5.8 Curva de funcionamiento de un MOSFET

CLASES DE AMPLIFICADORES

Si bien se han analizado cada uno de los elementos activos de los amplificadores, la configuración en que se dispongan éstos también afectará en alguna medida la calidad de la amplificación, como el bajar la distorsión de reacople de las etapas que se obtiene en un amplificador

Clase AB comparado con el Clase B. Sin embargo la principal función de estos arreglos obedece a mejoras en rendimiento energético.

A pesar de este análisis existen hoy equipos de alta fidelidad en el mercado que utilizan amplificadores Clase D que incluyen una serie de realimentaciones y acondicionamientos que supuestamente permiten mejorar mucho la calidad de amplificación, pero esto no se ha podido comprobar ni teórica ni experimentalmente.

CAPÍTULO 6

PRUEBAS EXPERIMENTALES DE AMPLIFICADORES

El parámetro más importante de este estudio era lograr encontrar la diferencia en la calidad de amplificación que se puede conseguir con distintos amplificadores, con ese fin se compararon tres amplificadores, dos de transistores en circuitos integrados y uno de válvulas termoiónicas.

6.1 ELEMENTOS UTILIZADOS EN EL EXPERIMENTO

1. Un amplificador basado en el integrado LM836, que se armó siguiendo el esquemático de la figura 6.1

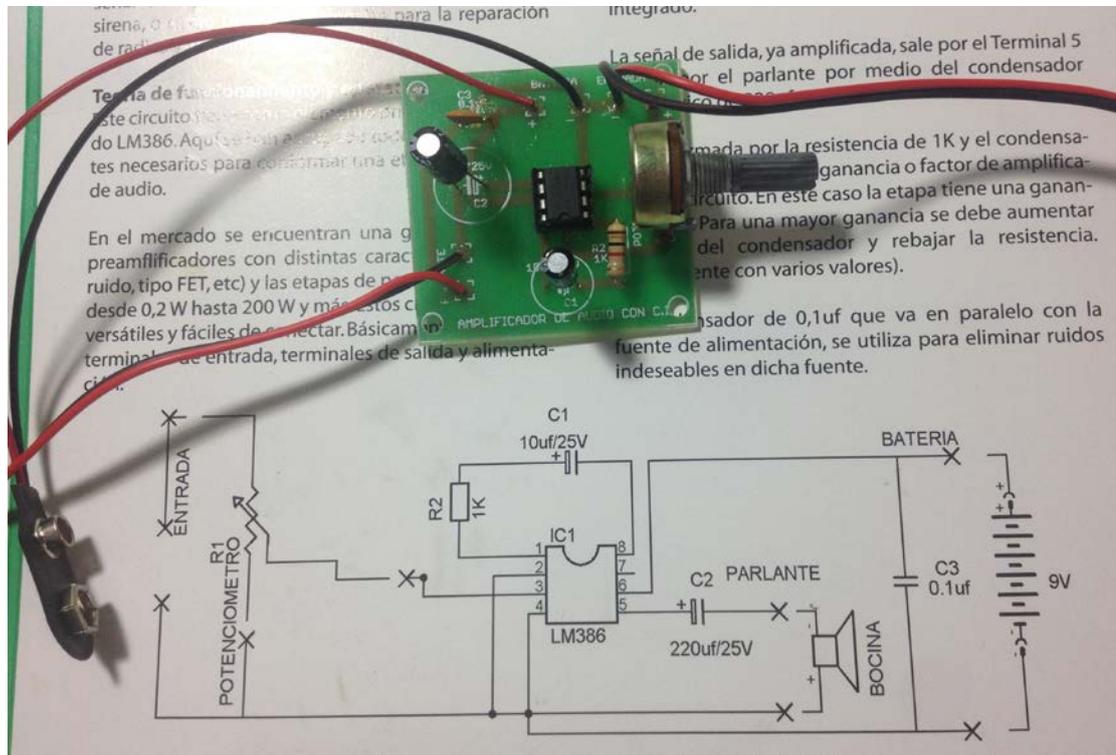


Figura 6.1 Amplificador construido con un LM386

2. Un amplificador estéreo con dos integrados TDA2003, según el esquemático de la figura 6.2

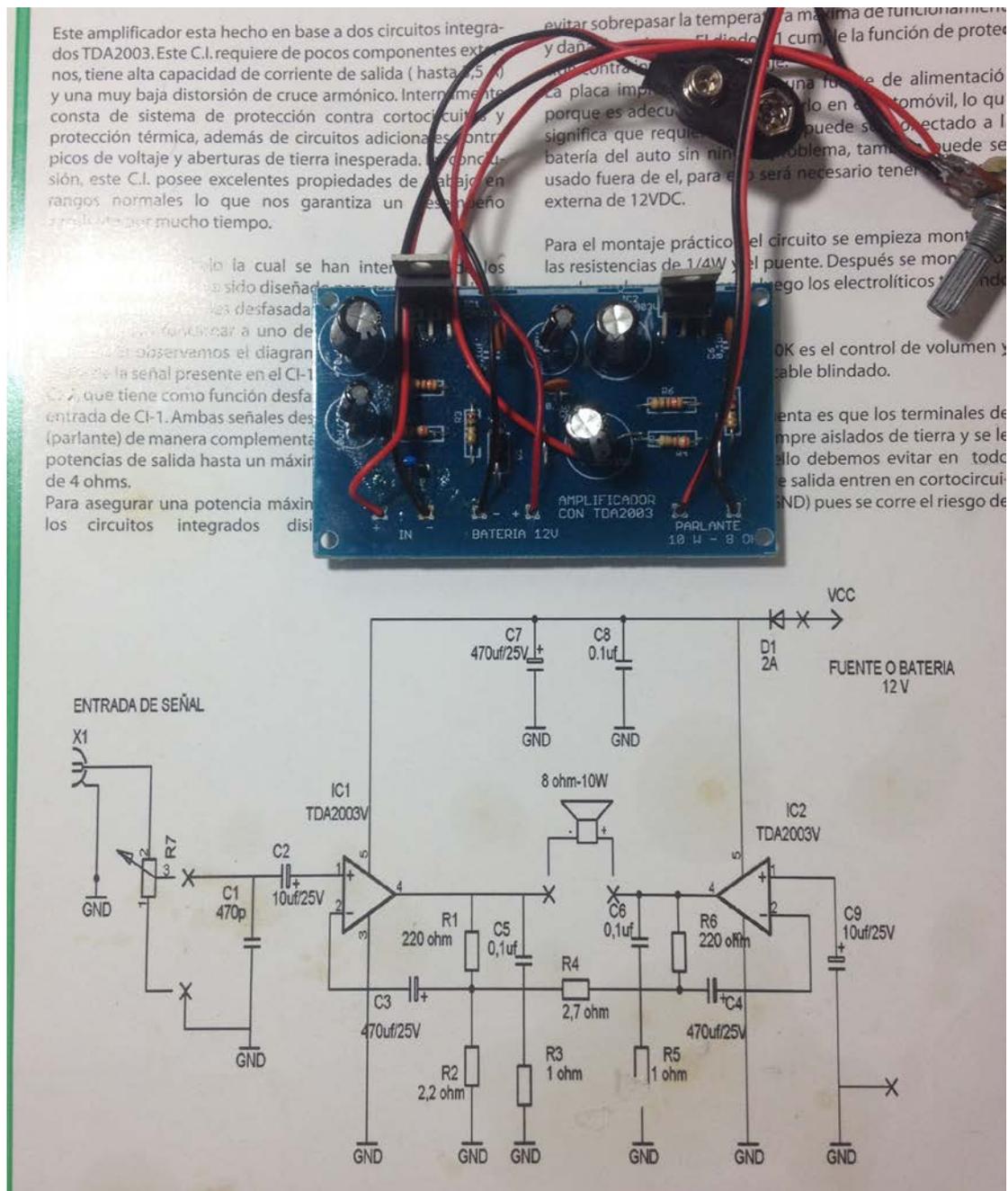


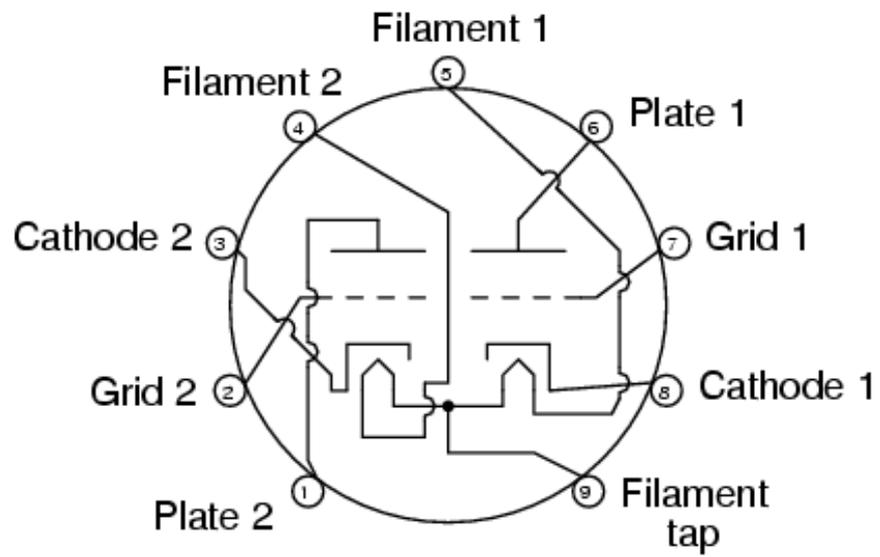
Figura 6.2 Amplificador construido con dos TDA2003

3. Un amplificador a tubos que utiliza una etapa previa con un 12AX7 que tiene dos triodos (estéreo) y una válvula EL84 para amplificación

por cada canal, el equipo se puede ver en la figura 6.3, y los diagramas de las válvulas en las figuras 6.4 y 6.5

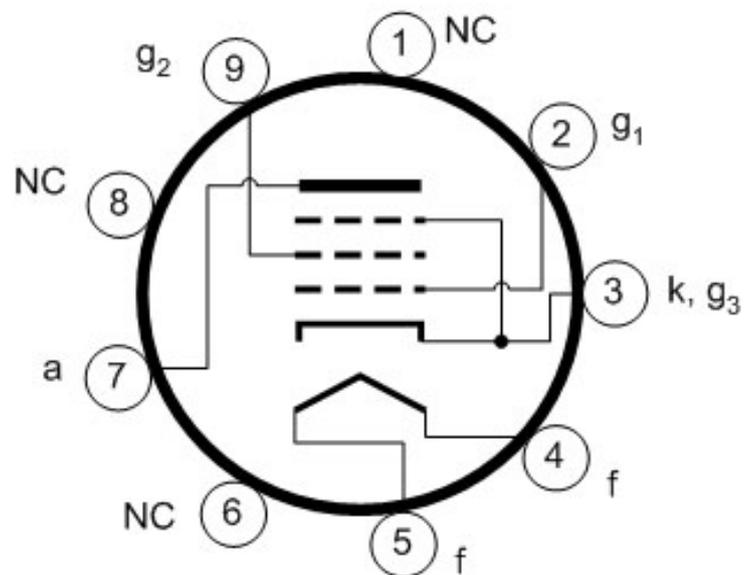


Figura 6.3 Amplificador a válvulas



Válvula 12AX7

Figura 6.4 Diagrama de pines de una válvula 12AX7



Válvula EL84

Figura 6.5 Diagrama de pines de una válvula EL84

4. Un Osciloscopio Fluke 190-204 para medir la forma de onda a la entrada y salida de los amplificadores. Se puede observar en la figura 6.6



Figura 6.6 Osciloscopio Fluke 190-204

5. Una aplicación de ipad como generador de onda para crear las señales de prueba para los amplificadores.

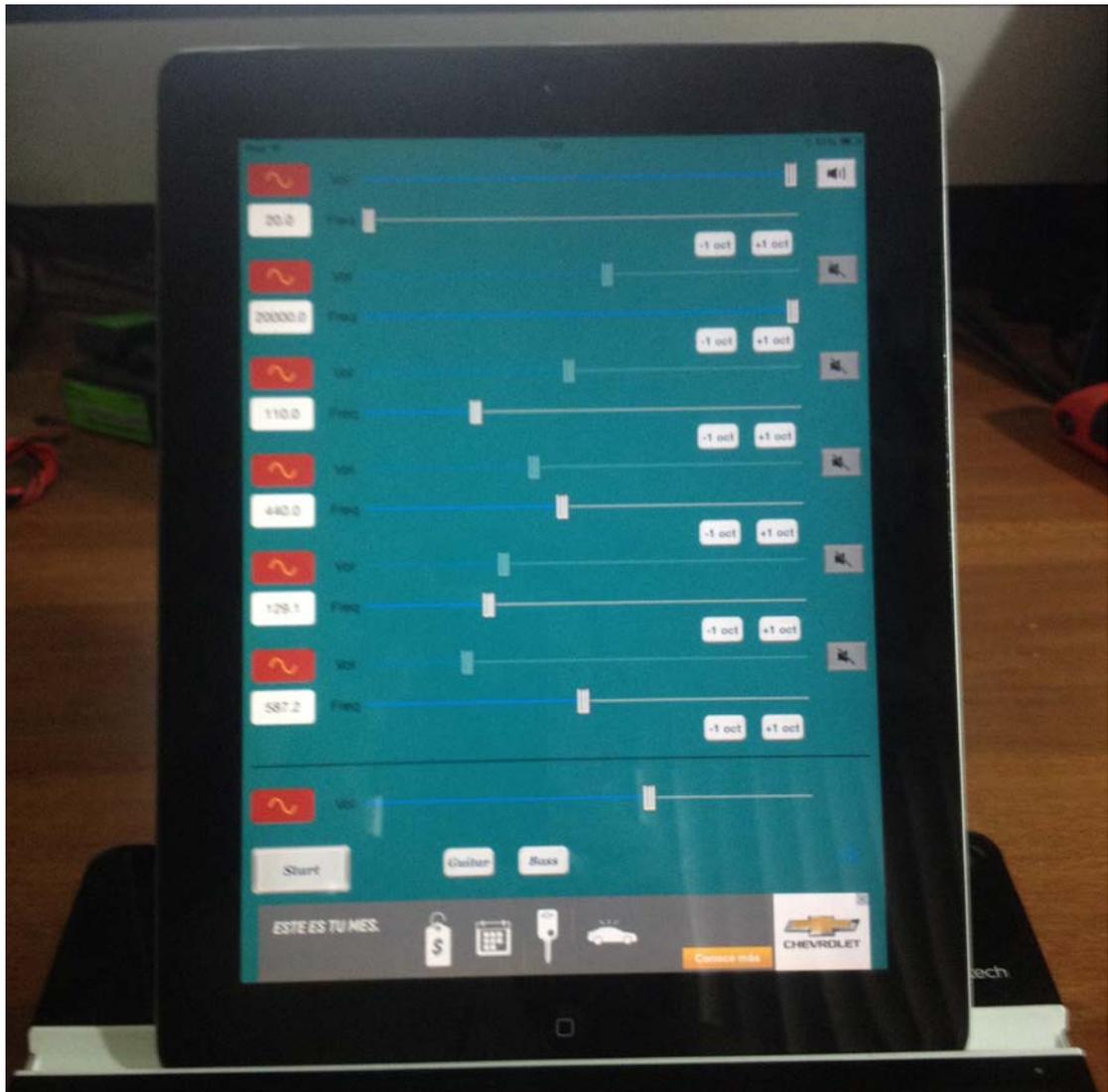


Figura 6.7 Ipad con aplicación para generación de ondas

6.2 PROTOCOLO DE PRUEBAS

En el experimento se buscó comparar una señal de entrada producida por un generador de onda a una determinada frecuencia, y comparar esta señal con la que aparecía a la salida del amplificador; contrastando no solo diferentes frecuencias para las muestras, a lo largo del rango auditivo, sino además entre varios tipos de señales, como sinusoidales, triangulares, cuadradas y tipo sierra.

Las frecuencias a las que se hicieron las distintas mediciones para cada amplificador fueron: 55, 110, 220, 440, 880, 1760, 3520, 7040 y 14080 Hz.

A continuación se presentarán sólo gráficas de las siguientes frecuencias más relevantes y en donde se encontraron diferencias apreciables para comparar entre los amplificadores probados. En las mismas se puede apreciar en negro la señal del generador de onda que se proporciona para la entrada de los amplificadores, la salida está graficada en rojo y se tomó en paralelo al voltaje del parlante de 8ohms que se utilizó para los tres amplificadores.

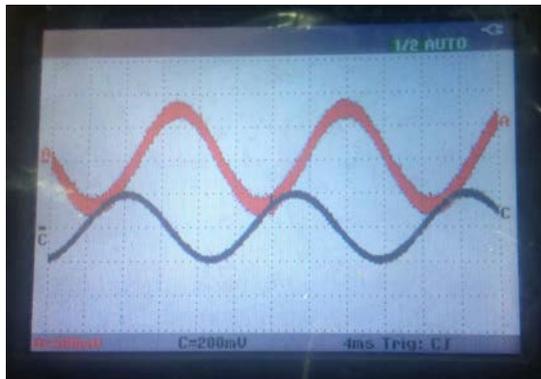
6.3 IMÁGENES CAPTADAS DE LAS PRUEBAS

Frecuencia de la onda 55Hz, onda sinusoidal



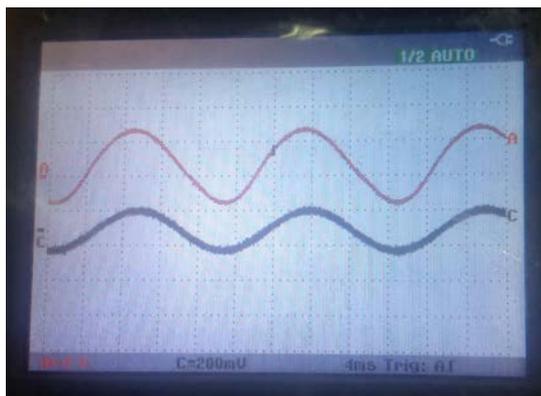
Amplificador a válvulas

Figura 6.8



Amplificador con LM386

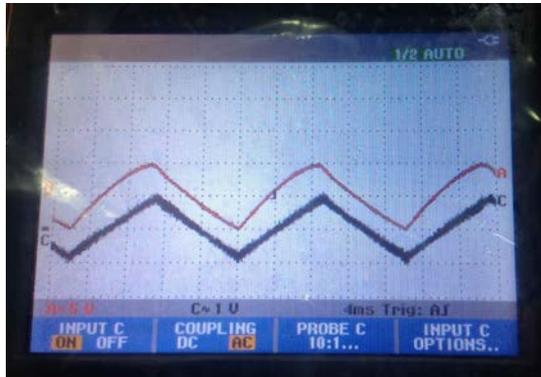
Figura 6.9



Amplificador con TDA2003

Figura 6.10

Frecuencia de la onda 55Hz, onda triangular



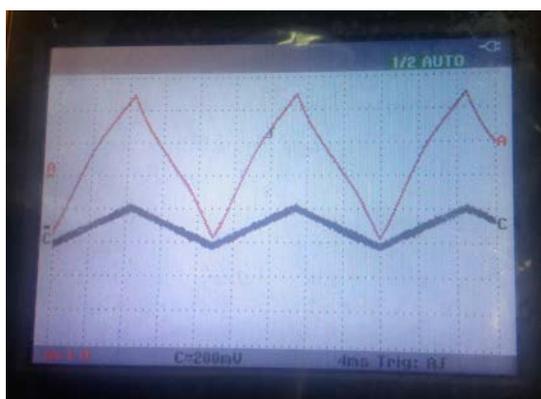
Amplificador a válvulas

Figura 6.11



Amplificador con LM386

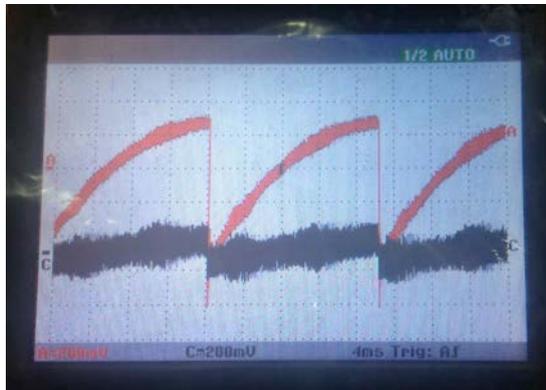
Figura 6.12



Amplificador con TDA2003

Figura 6.13

Frecuencia de la onda 55Hz, onda tipo sierra



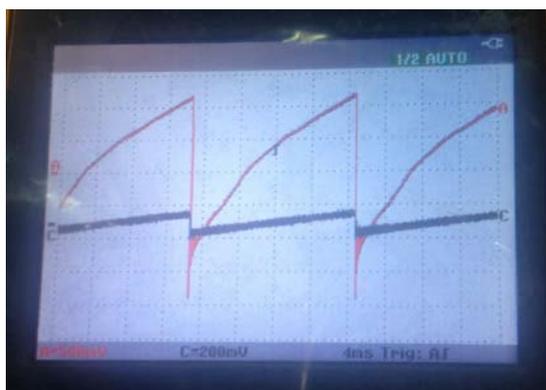
Amplificador a válvulas

Figura 6.14



Amplificador con LM386

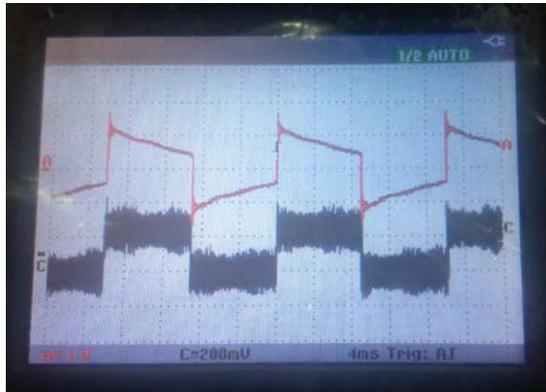
Figura 6.15



Amplificador con TDA2003

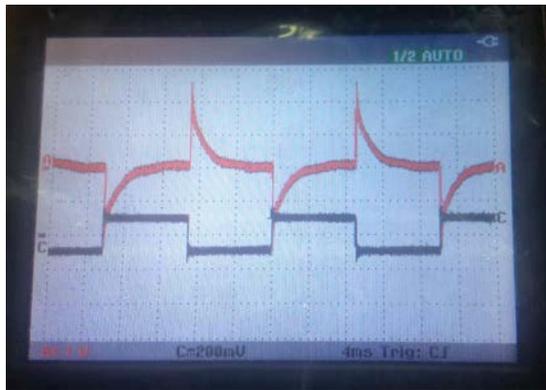
Figura 6.16

Frecuencia de la onda 55Hz, onda cuadrada



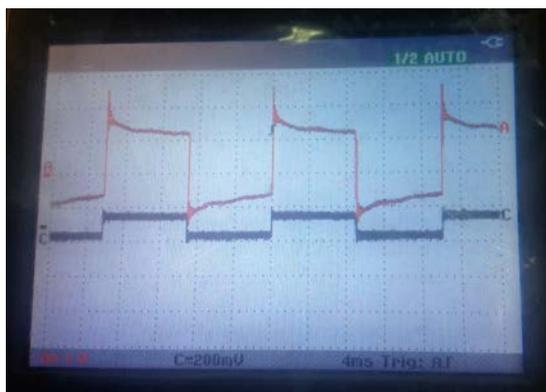
Amplificador a válvulas

Figura 6.17



Amplificador con LM386

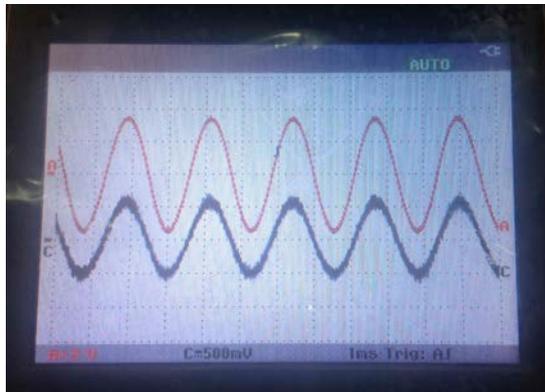
Figura 6.18



Amplificador con TDA2003

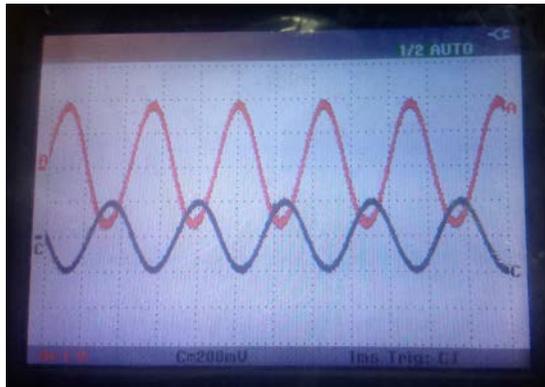
Figura 6.19

Frecuencia de la onda 440Hz, onda sinusoidal



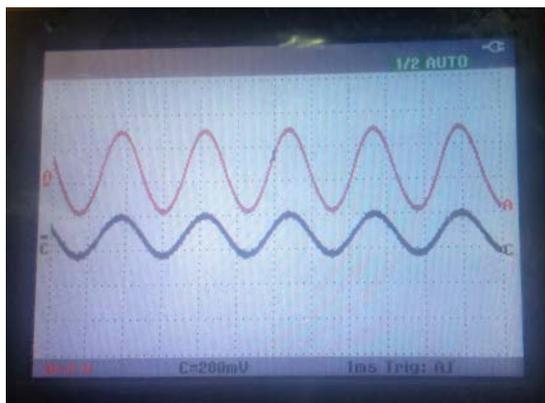
Amplificador a válvulas

Figura 6.20



Amplificador con LM386

Figura 6.21



Amplificador con TDA2003

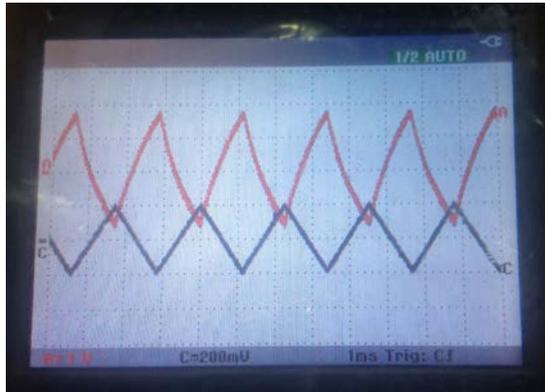
Figura 6.22

Frecuencia de la onda 440Hz, onda triangular



Amplificador a válvulas

Figura 6.23



Amplificador con LM386

Figura 6.24



Amplificador con TDA2003

Figura 6.25

Frecuencia de la onda 440Hz, onda tipo sierra



Amplificador a válvulas

Figura 6.26



Amplificador con LM386

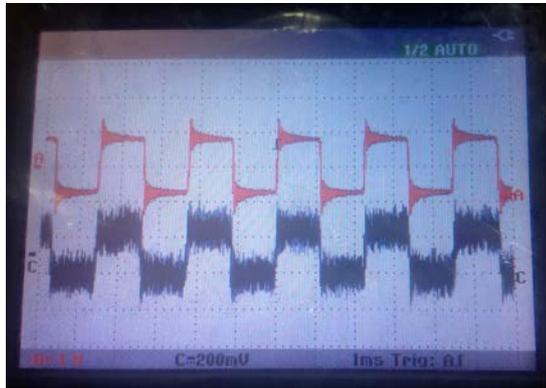
Figura 6.27



Amplificador con TDA2003

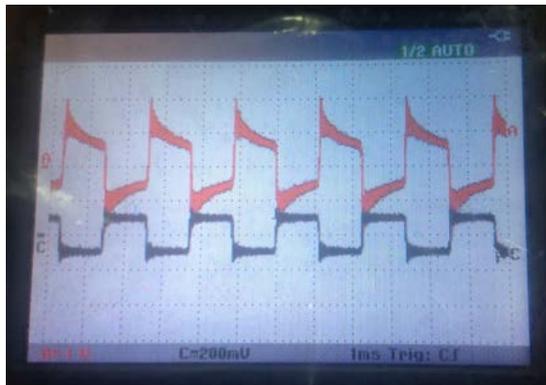
Figura 6.28

Frecuencia de la onda 440Hz, onda cuadrada



Amplificador a válvulas

Figura 6.29



Amplificador con LM386

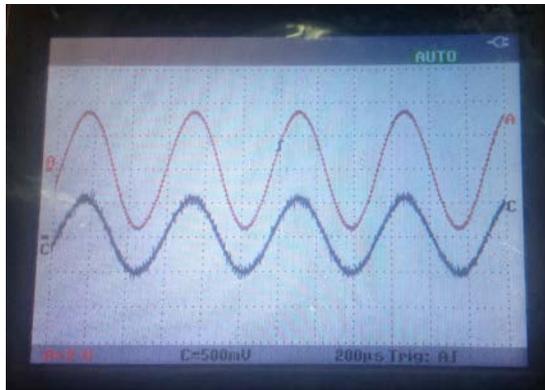
Figura 6.30



Amplificador con TDA2003

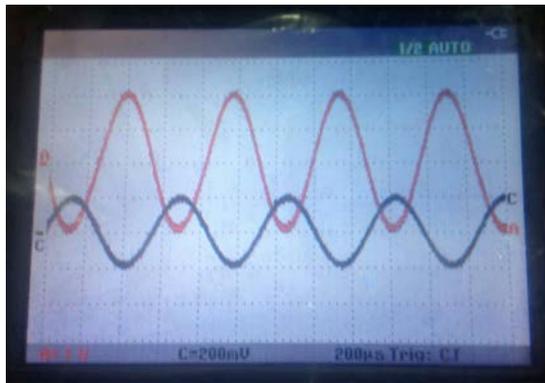
Figura 6.31

Frecuencia de la onda 1760Hz, onda sinusoidal



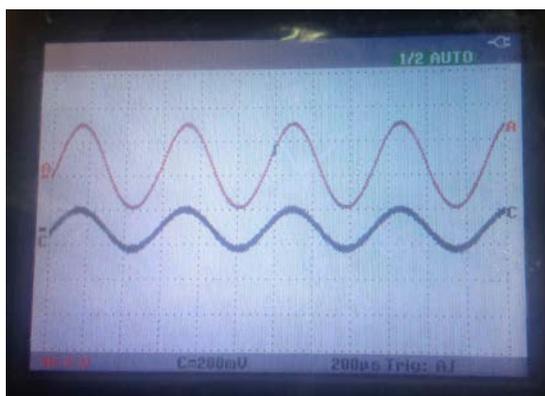
Amplificador a válvulas

Figura 6.32



Amplificador con LM386

Figura 6.33



Amplificador con TDA2003

Figura 6.34

Frecuencia de la onda 1760Hz, onda triangular



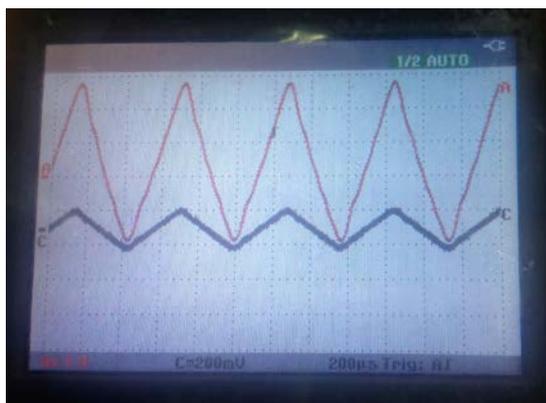
Amplificador a válvulas

Figura 6.35



Amplificador con LM386

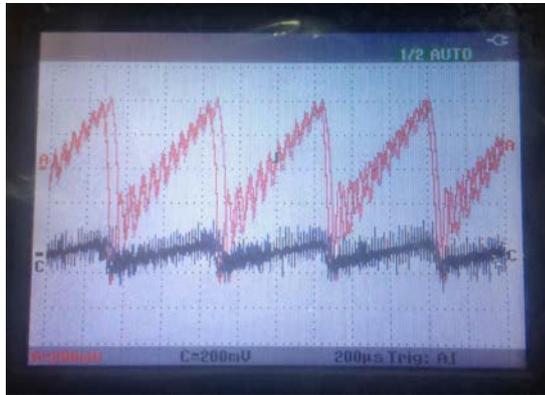
Figura 6.36



Amplificador con TDA2003

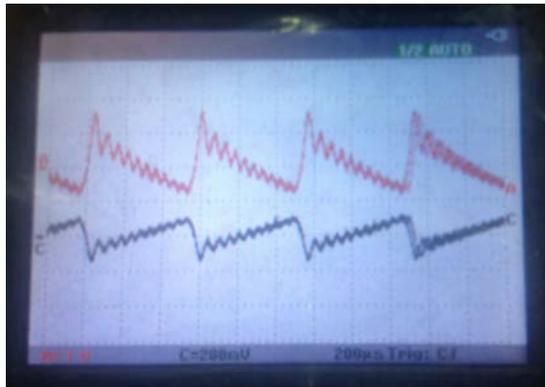
Figura 6.37

Frecuencia de la onda 1760Hz, onda tipo sierra



Amplificador a válvulas

Figura 6.38



Amplificador con LM386

Figura 6.39



Amplificador con TDA2003

Figura 6.40

Frecuencia de la onda 1760Hz, onda cuadrada



Amplificador a válvulas

Figura 6.41



Amplificador con LM386

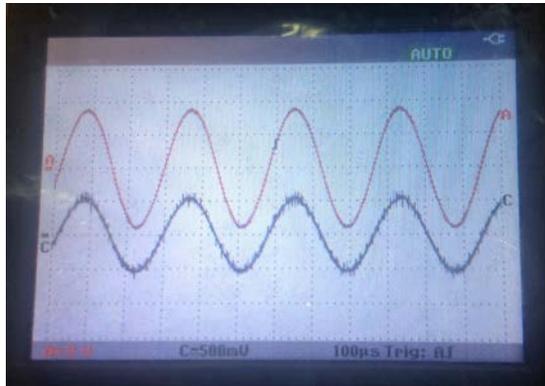
Figura 6.42



Amplificador con TDA2003

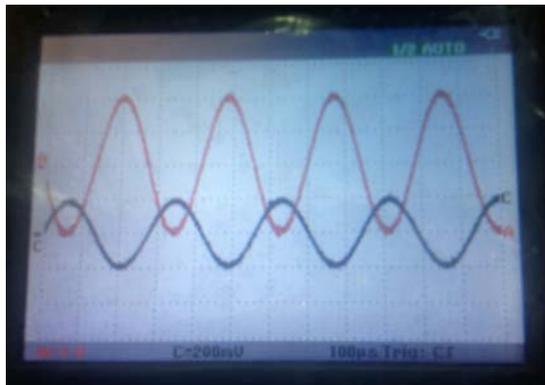
Figura 6.43

Frecuencia de la onda 3520Hz, onda sinusoidal



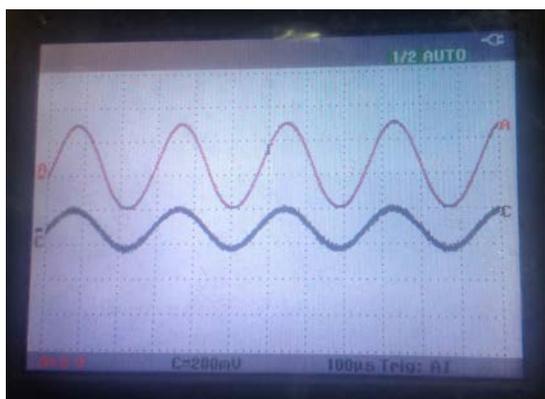
Amplificador a válvulas

Figura 6.44



Amplificador con LM386

Figura 6.45



Amplificador con TDA2003

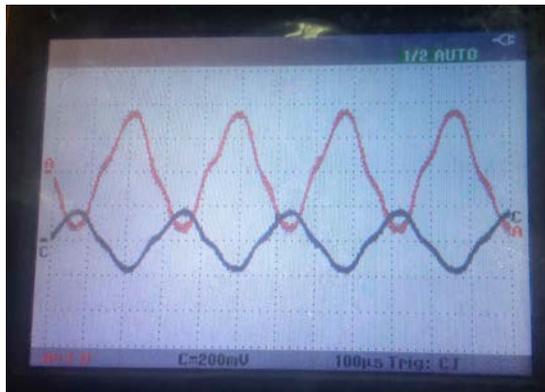
Figura 6.46

Frecuencia de la onda 3520Hz, onda triangular



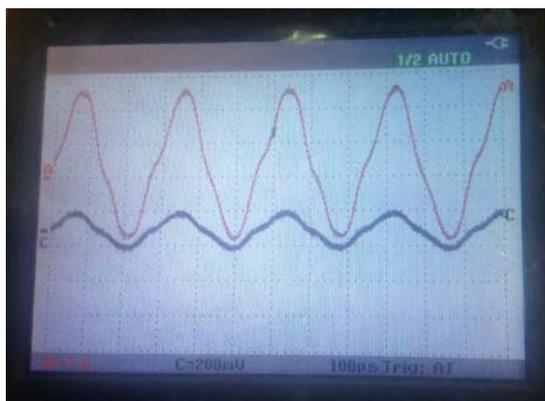
Amplificador a válvulas

Figura 6.47



Amplificador con LM386

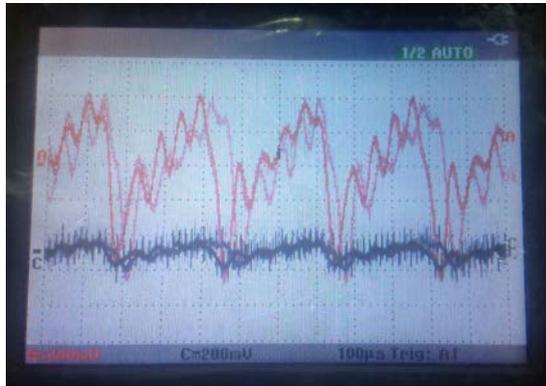
Figura 6.48



Amplificador con TDA2003

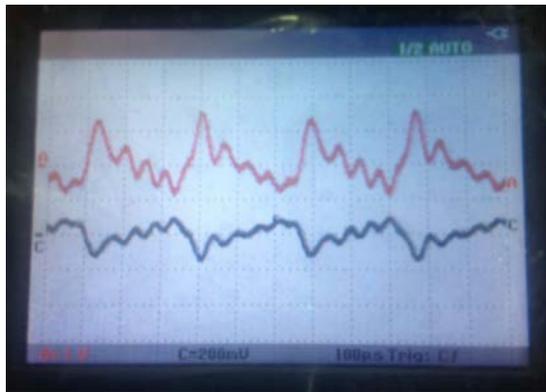
Figura 6.49

Frecuencia de la onda 3520Hz, onda tipo sierra



Amplificador a válvulas

Figura 6.50



Amplificador con LM386

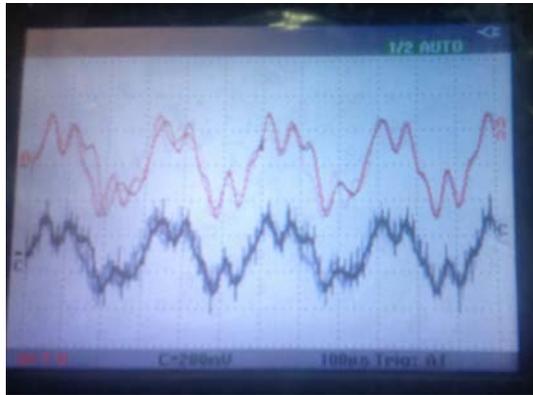
Figura 6.51



Amplificador con TDA2003

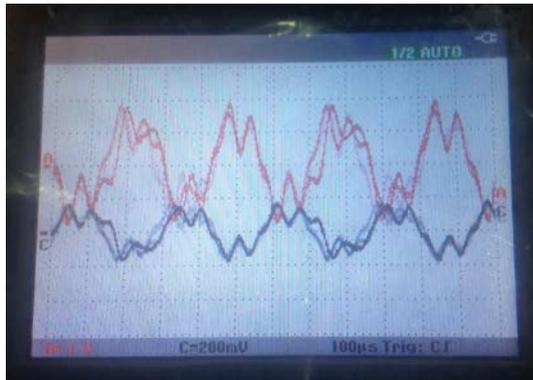
Figura 6.52

Frecuencia de la onda 3520Hz, onda cuadrada



Amplificador a válvulas

Figura 6.53



Amplificador con LM386

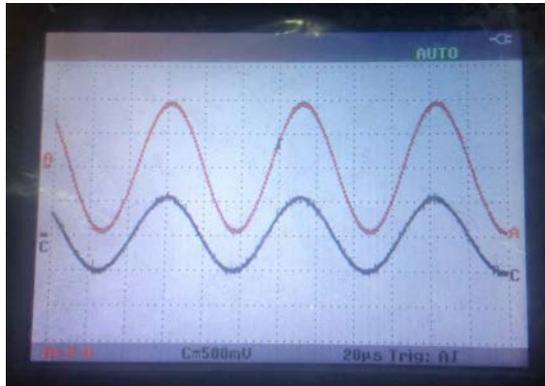
Figura 6.54



Amplificador con TDA2003

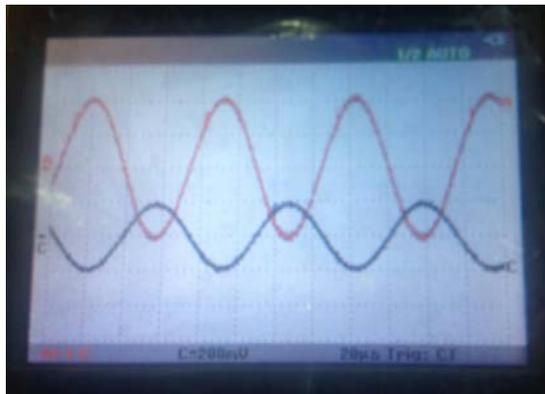
Figura 6.55

Frecuencia de la onda 14080Hz, onda sinusoidal



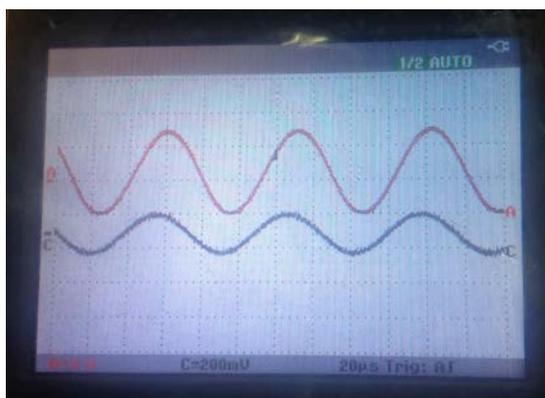
Amplificador a válvulas

Figura 6.56



Amplificador con LM386

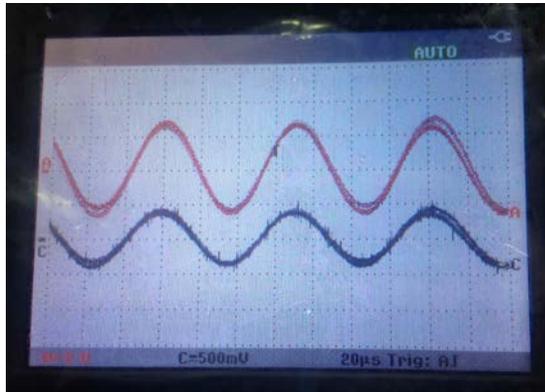
Figura 6.57



Amplificador con TDA2003

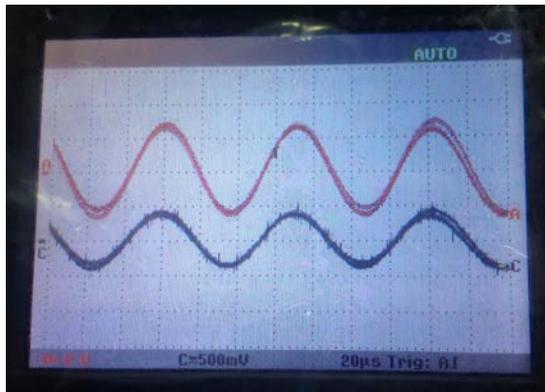
Figura 6.58

Frecuencia de la onda 14080Hz, onda triangular



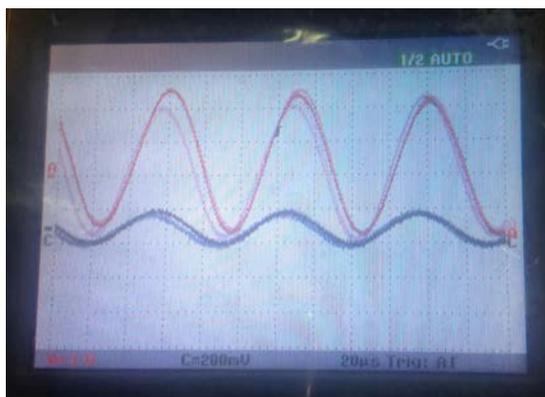
Amplificador a válvulas

Figura 6.59



Amplificador con LM386

Figura 6.60



Amplificador con TDA2003

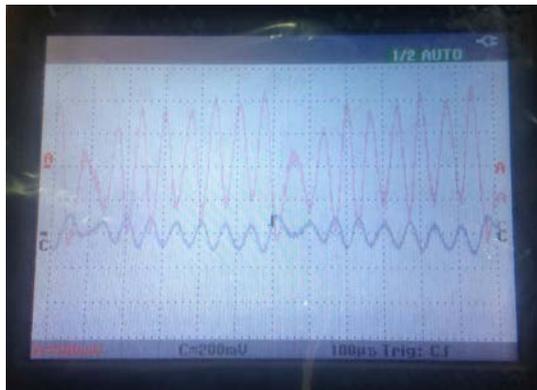
Figura 6.61

Frecuencia de la onda 14080Hz, onda tipo sierra



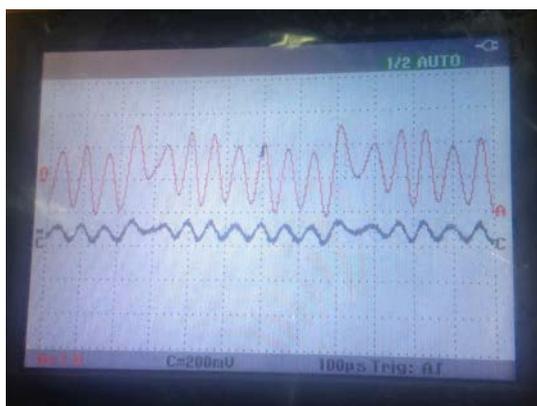
Amplificador a válvulas

Figura 6.62



Amplificador con LM386

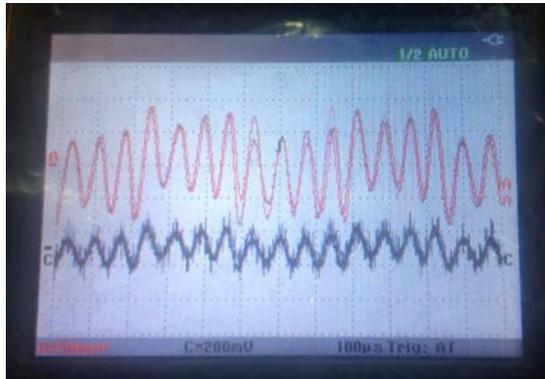
Figura 6.63



Amplificador con TDA2003

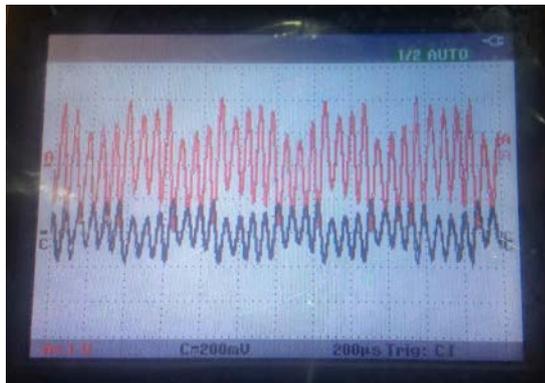
Figura 6.64

Frecuencia de la onda 14080Hz, onda cuadrada



Amplificador a válvulas

Figura 6.65



Amplificador con LM386

Figura 6.66



Amplificador con TDA2003

Figura 6.67

6.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS GRÁFICOS OBTENIDOS

La disposición de los gráficos se ha colocado de tal manera que sea más sencillo comparar la amplificación de cada equipo. Además obviaremos la salida negativa del amplificador con el integrado LM386, debido a que esa es la disposición de la salida de ese amplificador en particular. Otro punto importante es notar que para ondas distintas a las sinusoidales, a altas frecuencias se tuvo una pérdida de definición por parte del generador de onda digital y no se pudo hacer una comparación más allá de contrastar la señal de entrada con la de salida.

Un punto importante a destacar es que la configuración de los amplificadores a transistores se alimentó con una batería de 9Vdc, de ahí que las señales de entrada en los gráficos del amplificador de válvulas, el cual se alimentó con corriente AC a un rectificador interno, tenía la introducción de ruido por dicha rectificación (además de la introducida por los transformadores de acople del mismo) y los amplificadores de transistores no. Sin embargo, la salida del amplificador a válvulas dejó ver que los filtros capacitivos y de inducción de los amplificadores comerciales en general, logran mermar con bastante efectividad el ruido que se pueda introducir en un proceso de amplificación.

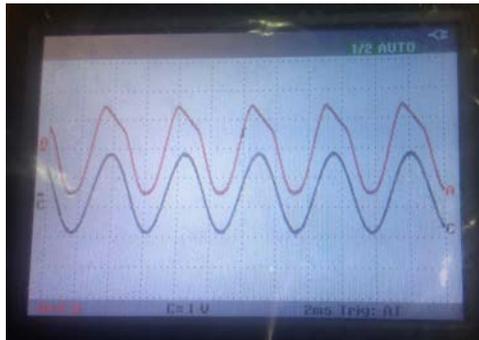
Al repasar las imágenes se debe considerar que para este experimento se utilizó señales controladas generadas por un dispositivo digital y de muy baja amplitud, para probar los amplificadores en su región más lineal, lo que arroja que salvo para el amplificador del integrado LM386, los resultados fueron bastante similares entre el amplificador a válvulas y el que utilizaba el integrado TDA2003. Buscando entonces una diferencia cuando los amplificadores trabajan a altas potencias o con señales mayores se realizó un segundo experimento que buscaba llegar al límite de manejo de corriente de los componentes introduciendo una señal mayor a la entrada de cada amplificador. Para esto se mostrarán nada más las frecuencias donde se encontraron las diferencias más notorias.

6.5 SEGUNDO PROTOCOLO DE PRUEBAS

Se intentó ahora de una manera experimental aumentar la señal de entrada con ondas sinusoidales en cada amplificador, hasta lograr una distorsión en la señal de salida. La meta era observar la manera en que cada dispositivo se comporta al llegar al límite de manejo de corriente, esto nos daría una idea de su comportamiento al manejar señales más altas o que en todo caso exijan un mucho mayor flujo de corriente.

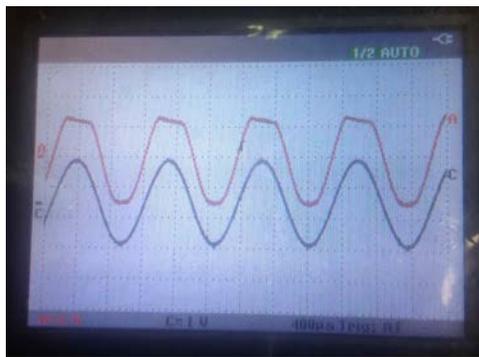
6.6 IMÁGENES CAPTADAS DEL SEGUNDO EXPERIMENTO

Amplificador a Válvulas



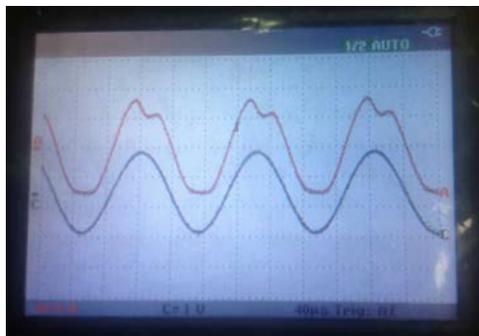
220Hz

Figura 6.68



880Hz

Figura 6.69



7040Hz

Figura 6.70

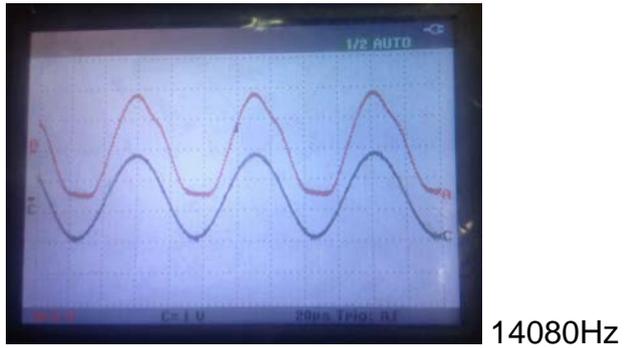


Figura 6.71

Amplificador con LM386

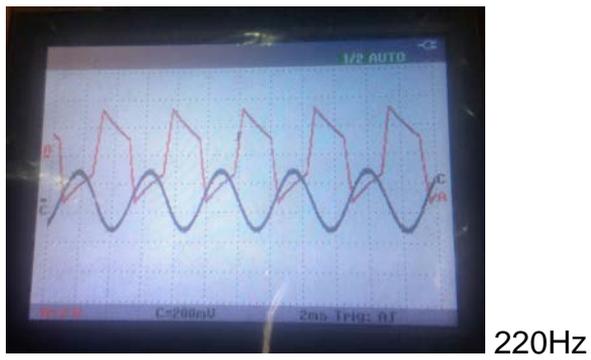


Figura 6.72

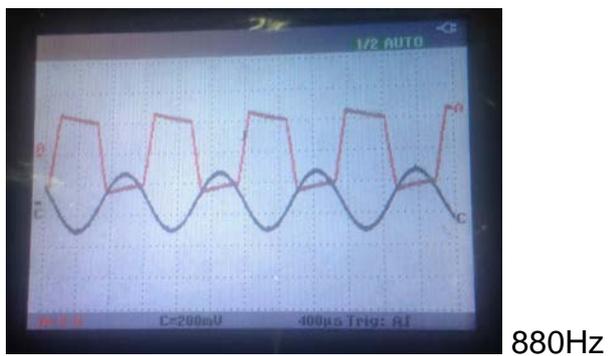


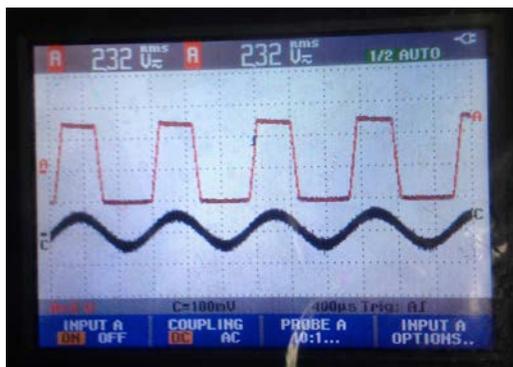
Figura 6.73



7040Hz

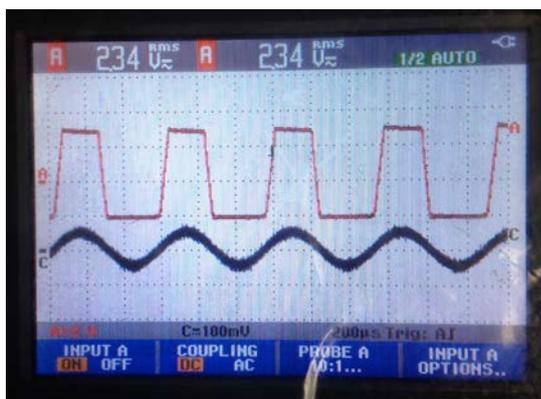
Figura 6.74

Amplificador con TDA2003



880Hz

Figura 6.75



1760Hz

Figura 6.76

6.7 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS GRÁFICOS OBTENIDOS DEL SEGUNDO EXPERIMENTO

Aquí se puede observar una clara diferencia en la forma en que se distorsiona la onda producida por el amplificador de tubos al vacío contra la forma en que se distorsiona la onda de los amplificadores de transistores. Éste puede ser además un indicador de lo que sucede en altas potencias con estos mismos elementos, momentos en los que se requieren fuertes flujos de corriente momentáneos y que pondrían a los elementos activos a trabajar cerca de su capacidad máxima. Se puede observar a la válvula termoiónica intentar seguir suministrando corriente desde su reserva en la nube de electrones, manteniendo en lo posible la forma del voltaje de la señal amplificada, que al agotarse hace visible la distorsión, pero con una recuperación rápida y sin demasiados armónicos introducidos a la señal de salida, como sí se puede observar en las ondas con puntas muy definidas resultantes de la distorsión de los amplificadores a transistores. Esto podría ser un fenómeno con mayor efecto en los amplificadores con transistores de efecto de campo que tienen aún más limitado el manejo de altas potencias, y si bien existen arreglos en paralelo para manejarlas seguramente habrá colaterales por dichas configuraciones, por ejemplo si se coloca una protección para el transistor esto afectaría la linealidad de la

amplificación. Lastimosamente no fue posible contar con un amplificador de este tipo en este experimento.

Este experimento se vuelve aun más interesante cuando se analizan amplificadores que se busca utilizar en esta específica zona “con distorsión”, como son los amplificadores de instrumentos como la guitarra eléctrica en donde un amplificador de transistores no puede lograr lo que se consigue con su equivalente a válvulas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Después de haber hecho un estudio a profundidad de las diferentes características constitutivas, de los distintos elementos activos de amplificación de señales eléctricas para frecuencias de audio, de los varios arreglos o configuraciones que se pueden emplear para colocar estos elementos en su punto de operación óptimo, y de las condiciones que deben cumplirse para que este proceso se ejecute, se puede concluir que:

1. Dependiendo de la señal que se vaya amplificar y de la potencia que se requiera manejar será posible o no percibir alguna diferencia en la amplificación de sonido.
2. A bajas potencias y con señales eléctricas que no sobrepasen cierto umbral, la diferencia en la linealidad de cada tipo de amplificador, y de cada tipo de elemento amplificador en realidad, será prácticamente imperceptible, incluso para equipos de medición; considerando, por supuesto,

configuraciones que hayan eliminado problemas intrínsecos a ellas mismas, como distorsiones por reacople de señales o ruidos por interferencias o transformadores, etc.

3. A potencias elevadas o con señales que exijan a un circuito manejar entradas cercanas al límite de su zona de linealidad, o de su capacidad de flujo de corriente, sí habrán diferencias medibles, que incluso que se puedan percibir por el oído humano. Así podemos encontrar, en altas potencias, cierto grado de distorsión en los amplificadores a transistores que será mucho menos notoria en su equivalente a tubos; o en el mejor de los casos los equipos a transistores utilizarán limitadores que impidan al sistema llegar a situaciones en las que la distorsión sea evidente; resultando una amplificación no totalmente fiel en cuanto a las intensidades de la señal original.

4. Estas pequeñas diferencias en linealidad, un poco más evidentes en el manejo de potencias altas, 50 ó 100 [W], se hace especialmente notoria cuando el amplificador se utiliza para amplificar un instrumento musical; y ésta fue una de las razones por las cuales se emprendió este estudio en un principio. Estos dos factores son realmente sensibles para quien percibe el sonido amplificado luego de haberlo producido en su interpretación con algún instrumento, típicamente una guitarra eléctrica, que es donde más populares

son los amplificadores de tubos; la linealidad y manejo de voltajes mayores que permite una amplificación de válvulas le hace sentir a un músico que realmente tiene un amplio rango de intensidades para su interpretación; las curvas de los transistores, si bien algunas alcanzan cierto grado de linealidad son muy limitadas y no manejan un rango de voltajes de entrada muy amplio, lo que se traduciría como una falta de “resolución” al acomodar las señales para que se puedan amplificar; esto lo describen algunos músicos como un sonido “comprimido” o con “falta de dinámica”.

5. Otra característica que vale resaltar es la amplificación de frecuencias graves, las mismas demandan un gran flujo de corriente debido al desplazamiento de aire que se requiere hacer por parte del parlante; con lo cual los tubos, que reaccionan mejor a las sobre-corrientes que puedan solicitar los circuitos que mueven estas bobinas, tienen un mejor desempeño que los transistores, pudiendo los primeros mantener una buena dinámica en la amplificación de graves, que con transistores se puede percibir como un bajo comprimido o limitado en amplitud.

6. Por último, los amplificadores de tubos al requerir transformadores de acoplamiento específicos para sus parlantes, tienen el problema de incluir armónicos de la señal amplificada que suelen ser de segundo grado, y en un amplificador de instrumentos esto más allá de ser un problema a corregirse

con filtros, se cataloga por los músicos usuarios de los mismos, como un enriquecimiento de los sonidos, al contar de pronto con la octava superior del sonido amplificado. Para estas aplicaciones este defecto se considera una virtud adicional de este tipo de amplificación. Algo un poco injusto además en la comparación con los transistores pero real.

RECOMENDACIONES

1. Un amplificador debe adquirirse o fabricarse según el uso que se le vaya a dar, si es para escuchar música a bajo volumen, amplificar sonido para eventos, amplificar instrumentos en una banda musical, oír música en el vehículo, etc.
2. Existen muchas marcas y modelos de amplificadores en el mercado que ofrecen una gran variedad de características, como sonido más brillante, ecualizaciones, bajos extra potentes, y más; cuando en realidad lo que debería primar es que la amplificación sea lo más respetuosa posible y evite alterar la señal que se está amplificando. De ahí la mal interpretación de los ecualizadores que lo que buscan en realidad es “igualar” totalmente la señal siendo un compensador de cualquier deficiencia de la amplificación asociada.

3. La potencia de los amplificadores en el mercado también es un tema interesante, y con el cual se debe tener cierta precaución, ya que la mayoría de equipos mantiene cierta calidad de amplificación pero sólo a bajos volúmenes; entonces si uno requiere equipos de alta potencia debería probarlos a dichas potencias al momento de adquirirlos.

4. Para el caso puntual de la aplicación con instrumentos musicales las características que nos brinda la amplificación por medio de válvulas termoiónicas es sumamente notoria al momento de interpretar alguna melodía en un conjunto con más músicos; ya que la posibilidad de variar intensidades, sólo con la interpretación, permite un nivel de expresión muy alto al ejecutante, además de darle el control de “aparecer u ocultarse” en la mezcla de sonidos. Por otra parte, si bien hablamos de equipos no tan portátiles como los fabricados a transistores, la confiabilidad y la robustez eléctrica de los equipos con tubos al vacío son muy superiores.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Linsley Hood John, VALVE AND TRANSISTOR AUDIO AMPLIFIERS, Newnes, First published 1997, Reprinted 2006
- [2] Boylestad Robert y Nashelsky Louis, ELECTRONIC DEVICES AND CIRCUIT THEORY, Prentice Hall, 1989
- [3] A.Holt Charles, CIRCUITOS ELECTRÓNICOS DIGITALES Y ANALÓGICOS, Reverté, 1989
- [4] Somathan Nair B y Deepa S.R., SOLID STATE DEVICES, PHI Learning Private Limited, 2010
- [5] Deshpande N.P., ELECTRONIC DEVICES & CIRCUITS, Tata McGraw-Hill, 2007
- [6] Spieler Helmut, INTRODUCTION TO RADIATION DETECTORS AND ELECTRONICS,
http://www-hysics.lbl.gov/~spieler/physics_198_notes_1999/PDF/Jan-19.pdf,
consultado 2 de mayo de 2015
- [7] Calven J, Vacuum Tubes,
<http://mysite.du.edu/~etuttle/electron/elect27.htm>, consultado el 2 de mayo de 2015
- [8] Elliot Rod, Valves vs. Transistors, <http://sound.westhost.com/valves/valve-trans.html>, consultado el 5 de mayo de 2015