

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN AMPLIFICADOR DE AUDIO UTILIZANDO  
TUBOS AL VACÍO**

**GILBERTO BARRIGA PÉREZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BUCARAMANGA  
2010**

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN AMPLIFICADOR DE AUDIO UTILIZANDO  
TUBOS AL VACÍO**

**GILBERTO BARRIGA PEREZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero Electrónico.**

**Director:  
Ing. Raúl Restrepo Agudelo**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BUCARAMANGA  
2010**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

## DEDICATORIA

En mi primer lugar dedico este proyecto y agradezco a Dios sobre todas las cosas. Gracias por darme las magnificas oportunidades de realizarme como persona, y de rodearme de gente tan maravillosa las cuales han aportado en mi vida. De darme siempre una luz y una guía a través de la vida, y de poder salir siempre delante de todas las adversidades.

En segundo lugar lo dedico a mis padres, las mejores personas que Dios colocó en mi vida. Las personas que siempre han estado conmigo, que siempre me han amado más que sus propias vidas. Gracias a mi padre por ser mi ejemplo a seguir, por ser siempre mi guía. Gracias a mi madre, la que toda una vida me enseñó los ejemplos del amor y la ternura los cuales siempre llevaré en mi corazón. Gracias a los dos por darme las herramientas para disfrutar de la vida.

Gracias también a mi hermana, Andrea, la persona que siempre vivirá junto a mi toda la vida, el ser más hermoso que Dios y mis Padres han podido darme, porque ella siempre ha estado a mi lado, siempre me ha apoyado, siempre me ha escuchado y siempre estaré en deuda con ella.

También doy gracias a mis grandes amigos. A mi gran amigo, mi amigo de toda la vida, Mario Díaz, la persona con la que he compartido los mejores momentos de mi vida, la persona que ha crecido junto a mí, gracias a él por estar siempre cuando lo he necesitado.

A mi mejor amiga, Berenice Meneses, una amiga incondicional la cual siempre ha estado a mi lado apoyándome, brindándome su gran amistad y todo su amor, gracias por compartir grandes momentos juntos.

A mi segunda familia, Sandunga, mis compañeros con los que compartí los placeres de la vida y la música. Porque entre risas y llanto siempre hemos estado juntos y conviviendo las mejores experiencias. Porque con ellos conocí las culturas de varios países, en especial nuestra vivencia en Francia, el cual logró que mi vida profesional continuara en este hermoso país.

A mi maestro Fernando Remolina, la persona que siempre entre paciencia y regaños ha forjado en mí el amor por la música de nuestro país y su gran diversidad.

A mi gran amigo y director Iván Suarez, quien hizo posible nuestro sueño de la música y de llevarla a otro continente, y por ser esa persona quien nos inculcó también el amor por el folclor colombiano.

A Antonio Luis, mi compañero de la música y de la vida en la última década, esa persona quien me inculco el amor a Dios con su prodigiosa voz y por siempre estar con buenas palabras en los momentos de mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar agradezco a mi director de proyecto, el Ingeniero Raúl Restrepo Agudelo quien durante toda mi carrera profesional compartió conmigo sus conocimientos y con su paciencia siempre estuvo en frente de este proyecto para lograr su culminación

Al Ingeniero Alex Monclou, quien durante toda mi vida profesional estuvo siempre atento a mis inquietudes y siempre me dio un aliento para seguir adelante.

Y en general a muchas personas que me acompañaron a lo largo de mi carrera profesional y que han influenciado para bien o mal, pero que han marcado mi vida.

## CONTENIDO

RESUMEN.....	19
ABSTRACT.....	20
INTRODUCCIÓN.....	21
OBJETIVOS.....	22
OBJETIVO GENERAL.....	22
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
1. MARCO TEÓRICO.....	23
1.1 EL DIODO.....	23
1.2 EL TRANSISTOR.....	23
1.2.1 APLICACIONES.....	24
1.2.2 TRANSISTOR BJT.....	25
1.2.3TRANSISTOR FET.....	26
1.3 GUITARRA ELECTRICA.....	28
1.3.1 ORIGENES.....	28
1.3.2 MICROFONOS O PASTILLAS.....	28
1.4 AMPLIFICACION DE AUDIO.....	32
1.4.1 ENTRADA DE LA SEÑAL DÉBIL AL AMPLIFICADOR.....	33
1.4.2 PRE-AMPLIFICACIÓN.....	34
1.4.3 AMPLIFICACION O POTENCIA.....	34
1.4.4 CLASES DE AMPLIFICACIÓN.....	35
1.5 FUENTES DE ALIMENTACION.....	38
1.6 ALTAVOZ.....	39
2. INTRODUCCIÓN A LOS TUBOS AL VACIO.....	41
2.1 HISTORIA.....	41

2.2 ESTRUCTURA INTERNA DE LOS TUBOS AL VACIO.....	44
2.2.1 FILAMENTO.....	44
2.2.2 CÁTODO.....	45
2.2.3 ANODO.....	45
2.2.4 VACIO.....	46
2.2.5 REJILLA O GRILLA.....	46
2.3 TRIODO.....	47
2.3.1 AMPLIFICADOR TRIODO DE CÁTODO COMUN.....	48
2.3.2 CONDICIONES EN EL PUNTO DE OPERACIÓN.....	52
2.3.3 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DINAMICOS.....	52
2.3.3.1 DEFINICION DEL FACTOR DE AMPLIFICACIÓN.....	55
2.3.3.2 CONDUCTANCIA MUTUA Y RESISTENCIA DE ANODO.....	58
2.3.4 POLARIZACION DE CÁTODO.....	59
2.3.5 CONDENSADOR DE DESACOPLE EN EL CATODO.....	61
2.3.6 SELECCIÓN DE LA RESISTENCIA DE REJILLA.....	63
2.3.7SELECCION DE LA CAPACITANCIA DE ACOPLA EN LA SALIDA.....	65
2.4 PENTODO.....	66
2.4.1 GRAFICA CARACTERÍSTICA DEL PENTODO.....	67
2.4.2 EF86, PENTODO DE ALTA CALIDAD EN AUDIO Y PARA SEÑALES DÉBILES.....	69
3. CRITERIOS PARA EL DESARROLLO DEL AMPLIFICADOR.....	73
3.1 INTRODUCCION.....	73
3.2 ETAPA PRE-AMPLIFICADORA.....	74
3.2.1 PRIMERA ETAPA VALVULAR.....	74
3.2.1.1 PUNTO DE FUNCIONAMIENTO.....	75
3.2.1.2 POLARIZACION DEL CATODO.....	76



3.2.1.3 RESISTENCIA DE GRILLA.....	77
3.2.1.4 CALCULO DE LA GANANCIA DE LA PRIMERA ETAPA.....	77
3.2.1.5 PARAMETROS DINAMICOS.....	78
3.2.1.5.1 CALCULO DE LA RESISTENCIA INTERNA DE ANODO.....	78
3.2.1.5.2 CALCULO DEL FACTOR DE AMPLIFICACIÓN.....	80
3.2.1.5.3 CALCULO DE LA CONDUCTANCIA MUTUA.....	81
3.2.1.6 CALCULO DEL CAPACITOR DE DESACOPLE EN EL CÁTODO.....	81
3.2.1.7 CAPACITOR DE ACOUPLE EN LA ENTRADA.....	82
3.2.1.8 IMPEDANCIA DE SALIDA DE LA ETAPA.....	82
3.2.1.9 DISEÑO FINAL DE LA PRIMERA ETAPA.....	83
3.2.2 SEGUNDA ETAPA VALVULAR.....	85
3.2.2.1 PUNTO DE FUNCIONAMIENTO.....	86
3.2.2.2 POLARIZACION DEL CÁTODO.....	87
3.2.2.3 RESISTENCIA DE GRILLA DEL TRÍODO DE LA SEGUNDA ETAPA.....	87
3.2.2.4 CAPACITOR DE ACOUPLE EN LA ENTRADA.....	88
3.2.2.5 CALCULO DE LA GANANCIA DE LA SEGUNDA ETAPA.....	88
3.2.2.6 PARAMETROS DINAMICOS.....	89
3.2.2.6.1 CALCULO DE LA RESISTENCIA DE ANODO SEGUNDA ETAPA.....	89
3.2.2.6.2 CALCULO DEL FACTOR DE AMPLIFICACIÓN.....	91
3.2.2.6.3 CONDUCTANCIA MUTUA.....	92
3.2.2.7 CALCULO DEL CAPACITOR DE DESACOPLE EN EL CATODO.....	92
3.2.2.8 IMPEDANCIA DE SALIDA DE LA ETAPA.....	93
3.2.2.9 DISEÑO FINAL DE LA SEGUNDA ETAPA VALVULAR.....	93
3.3 ETAPA AMPLIFICADORA.....	94
3.3.1 DISEÑO ETAPA DE POTENCIA.....	95

3.3.2 PUNTO DE FUNCIONAMIENTO.....	95
3.3.3 CALCULO DE LA RESISTENCIA DE CÁTODO.....	97
3.3.4 POLARIZACION DE LA GRILLA DE PANTALLA.....	98
3.3.5 REJILLA O GRILLA SUPRESORA.....	99
3.3.6 RESISTENCIA DE GRILLA DE CONTROL.....	99
3.3.7 CAPACITOR DE ACOPLA DE ENTRADA.....	99
3.3.8 CALCULO DE LA POTENCIA DEL PENTODO.....	99
3.3.9 DISEÑO FINAL DE LA ETAPA AMPLIFICADORA.....	101
3.4 FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....	102
3.5 TRANSFORMADOR DE SALIDA.....	105
3.6 DISEÑO FINAL DEL AMPLIFICADOR.....	108
3.7 CONSTRUCCION DEL AMPLIFICADOR.....	110
4 PRUEBAS EN EL AMPLIFICADOR.....	119
4.1 RESPUESTA EN FRECUENCIA.....	119
4.2 RUIDOS.....	123
4.2.1 MICROFONIA.....	123
4.2.2 RUIDO TÉRMICO.....	124
4.2.3 RUIDOS EN LOS TUBOS.....	124
4.2.4 SNORING NOISE (RONQUIDOS).....	125
4.3 DISTORSION Y ARMONICOS.....	126
4.3.1 AMPLIFICADOR A TRANSISTORES.....	127
4.3.2 PROYECTO AMPLIFICADOR A TUBOS DE VACIO.....	129

## LISTA DE FIGURAS

<b>Fig. 1</b> Diferentes tipos de Diodos	23
<b>Fig. 2</b> Tipos comunes de transistores	24
<b>Fig. 3</b> Replica del primer transistor fabricado	25
<b>Fig. 4</b> Transistor BJT	26
<b>Fig. 5</b> Simbología del transistor FET y MosFET	27
<b>Fig. 6</b> Transistor FET Canal N	27
<b>Fig. 7</b> Modelo Actual Fender Telecaster	29
<b>Fig. 8</b> Pastilla Single Coil	
<b>Fig.9</b> Diferentes tipos de pastillas Humbucker	31
<b>Fig. 10.</b> Amplificadores en distintas versiones de la casa Marshall	33
<b>Fig. 11</b> Clases de amplificación	37
<b>Fig. 12</b> Etapas de una fuente de alimentación lineal	38
<b>Fig. 13.</b> Parlante para amplificador de guitarra	39
<b>Fig. 14</b> Válvula creada por Fleming	42
<b>Fig. 15</b> Esquema del Trío do	42
<b>Fig. 16</b> Esquema del tetrodo	43
<b>Fig. 17</b> Esquema del Pentodo	44
<b>Fig.18</b> Trío do 12AX7 EH	47
<b>Fig. 19</b> Características del ánodo para el tubo 12ax7/ECC83	49
<b>Fig.19</b> Amplificador de Cátodo Común	49
<b>Fig. 20</b> Línea de carga sobre las características de ánodo.	50
<b>Fig. 21</b> Polarización de la grilla con una fuente adicional DC	51

<b>Fig. 22</b> Área de operación segura	52
<b>Fig. 23</b> Equivalente Thévenin del ánodo del triodo.	53
<b>Fig.24</b> Determinación resistencia interna de ánodo $r_a$	54
<b>Fig. 25</b> Fragmento del datasheet 12ax7 EH	55
<b>Fig. 26</b> Fragmento del datasheet ECC83S marca J/J	55
<b>Fig. 27</b> Determinación de $\mu$	56
<b>Fig. 28</b> Valores de $V_a$ para determinación de $\mu$	57
<b>Fig. 29</b> Determinación grafica de $g_m$	59
<b>Fig. 30</b> Circuito con resistencia en grilla y cátodo	60
<b>Fig. 31</b> Nuevo circuito con capacitor de desacople en cátodo	62
<b>Fig. 32</b> Pentodo internamente	66
<b>Fig. 33</b> Espectro del pentodo E55L	68
<b>Fig. 34</b> Circuito utilizando EF86	69
<b>Fig. 35</b> Características de Ánodo para EF86	70
<b>Fig. 36</b> Grafica 12ax7EH con punto de trabajo	76
<b>Fig. 37</b> Punto de Funcionamiento	78
<b>Fig. 38</b> Selección $r_a$	79
<b>Fig. 39</b> Selección $\mu$	80
<b>Fig. 40</b> Pruebas primera etapa	84
<b>Fig. 41</b> Pruebas primera etapa	85
<b>Fig. 42</b> Punto de Funcionamiento	87

<b>Fig. 43</b> Calculo de ganancia	89
<b>Fig. 44</b> Selección $r_a$	90
<b>Fig. 45</b> Selección $\mu$	91
<b>Fig. 46</b> Amplificación segunda etapa	94
<b>Fig. 47</b> Selección $\mu$	96
<b>Fig. 48</b> Resistencia de cátodo	97
<b>Fig. 49</b> Potencia en el pentodo	100
<b>Fig. 50</b> Transformador de potencia	103
<b>Fig. 51</b> Diseño final amplificador	109
<b>Fig. 52</b> Construcción del amplificador	110
<b>Fig. 53</b> Construcción del amplificador	111
<b>Fig. 54</b> Construcción del amplificador	112
<b>Fig. 55</b> Construcción del amplificador	113
<b>Fig. 56</b> Construcción del amplificador	114
<b>Fig. 57</b> Construcción del amplificador	115
<b>Fig. 58</b> Construcción del amplificador	117
<b>Fig. 59</b> Construcción del amplificador	118
<b>Fig. 60</b> Tabla de frecuencias de las nota musicales	129

## LISTA DE GRAFICAS

<b>Grafica 1</b>	Esquema más común para el diseño de un amplificador de audio	32
<b>Grafica 2</b>	Primera etapa del previo	75
<b>Grafica 3.</b>	Diseño Final Primera Etapa	83
<b>Grafica 4.</b>	Diseño Final Primera Etapa	86
<b>Grafica 5</b>	Diseño Final Segunda Etapa	93
<b>Grafica 6</b>	Diseño Etapa de potencia	95
<b>Grafica 7</b>	Diseño final amplificación	101
<b>Grafica 8</b>	Diseño fuente de alimentacion	104
<b>Grafica 9</b>	Señal senoidal	107
<b>Grafica 10</b>	Respuesta en frecuencia Prueba 1	120
<b>Grafica 11</b>	Respuesta en frecuencia Prueba 2	121
<b>Grafica 12</b>	Respuesta en frecuencia Prueba 3	123
<b>Grafica 13</b>	Prueba #1	128
<b>Grafica 14</b>	Respuesta en frecuencia Prueba 2	130

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Respuesta en frecuencia Prueba 1	120
<b>Tabla 2</b> Respuesta en frecuencia Prueba 2	121
<b>Tabla 3</b> Respuesta en frecuencia Prueba 3	122

## **LISTA DE ANEXOS**

**ANEXO A: DATASHEET DEL TRIODO 12AX7 EH**

**ANEXO B: DATASHEET DEL PENTODO 6L6 GC**



## GLOSARIO

**Diodo:** Es un dispositivo electrónico construido con materiales semiconductores que permite el paso de corriente en una única dirección con funcionamiento similar a los interruptores.

**Dopaje:** Consiste en el hecho de adicionar impurezas intencionalmente sobre un semiconductor extremadamente puro para poder cambiar sus propiedades eléctricas.

**Ánodo:** Es el electrodo positivo hacia el cual se dirigen los iones negativos

**Cátodo:** Es el electrodo negativo hacia el cual se dirigen los iones positivos.

**Tubo de Vacío:** Llamado también como válvula de vacío, es un elemento amplificador inventado en la primera mitad del siglo XX en el cual se encuentran como mínimo dos elementos o electrodos; ánodo y cátodo. Estos se encuentran encapsulados en un envase, que por lo general es vidrio, y en vacío o algunos gases dependiendo del tipo de válvula.

**Tríodo:** Es un tipo de válvula al vacío consistido internamente de tres electrodos cuyo uso principal es la amplificación de señales de muy baja potencia.

**Pentodo:** Es otro tipo de válvula al vacío el cual está construido internamente por cinco electrodos y cumple también una función de amplificación con otras características diferentes al tríodo.

**Sonido:** Es el fenómeno el cual involucra la propagación de una señal en forma de ondas elásticas (audibles o no) a través de un fluido u otro medio elástico ocasionadas por el movimiento vibratorio de un cuerpo.

**Longitud de onda:** Es la distancia que recorre la onda en un intervalo de tiempo transcurrido entre dos picos consecutivos.

**Respuesta en frecuencia:** Es un parámetro en el cual se describen las frecuencias que puede reproducir un equipo de audio y en el cual se muestra la forma como varía la amplitud de la señal de salida con respecto a las variaciones de frecuencia su señal de entrada.

**Amplificador:** Equipo o conjunto de dispositivos cuya función es el de amplificar o multiplicar una señal de entrada.

**Pre-amplificador:** Es una de las etapas de un amplificador el cual consiste en amplificar en una pequeña proporción una señal de audio y darle una calidad sonora propia de dicho equipo.

**Amplificador de Potencia:** Etapa de un amplificador el cual consiste en recibir una señal de audio y darle la potencia suficiente para entregarla a los altavoces.

**Armónico:** Estos son componentes propios de la frecuencia fundamental y sus frecuencias están dadas en múltiplos de la dicha frecuencia fundamental. Se catalogan en armónicos pares o impares.

**Señal de audio:** Es una señal eléctrica convertida por un transductor de una señal sonora y la cual se encuentra limitada por el rango audible del ser humano (20Hz – 20KHZ)

**Distorsión:** Es la deformación de una señal de entrada sufrida al pasar por un equipo electrónico.

**Ganancia:** Es una magnitud con la cual se expresa la relación existente entre la señal de salida y su señal de entrada al paso por un equipo o elemento electrónico.

**Transformador de salida:** Es un dispositivo el cual para amplificadores con tubos al vacío tiene la función de acoplar la señal amplificada proveniente de las etapas anteriores y entregarla a los altavoces.

**Guitarra eléctrica:** Modificación hecha sobre una guitarra acústica (o de madera sin amplificar) con el objetivo de poder captar el sonido proveniente de las cuerdas a través de micrófonos y amplificar dicha señal.

**Micrófono de Guitarra eléctrica:** Conocido también como pastillas. Es un transductor capaz de convertir las vibraciones producidas por las cuerdas en señales eléctricas para ser amplificadas.

**Potencia de salida:** Es la cantidad de energía entregada por un equipo amplificador. Hay varios tipos de potencia, como potencia eléctrica, o potencia sonora.

**Hoja característica del tubo:** Llamados también como Datasheet. Son las gráficas o curvas dadas por cada fabricante de los tubos al vacío en el cual se observan sus comportamientos y se describen los usos y limitaciones de dichos tubos. Cada fabricante proporciona dichas hojas.

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN AMPLIFICADOR DE  
AUDIO UTILIZANDO TUBOS AL VACÍO

**AUTOR:** GILBERTO BARRIGA PEREZ

**FACULTAD:** FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**DIRECTOR:** RAÚL RESTREPO AGUDELO

### RESUMEN

El equipo amplificador está constituido por varias etapas diseñadas siguiendo criterios tanto para la utilización de los tubos al vacio como para el diseño de equipos amplificadores de audio. Las etapas que constituyen el presente equipo son tres; la primera etapa pre-amplificadora o de acople de la señal de audio de entrada, la etapa amplificadora o de potencia y la etapa alimentadora o de suministro de energía al equipo.

Al final se ha obtenido un amplificador de audio de 20W utilizando como elemento amplificador los tubos al vacio junto a la documentación necesaria sobre su diseño, construcción y operación.

El presente Trabajo de Grado se relaciona con el sentido del oído humano; y aunque éste contenga consideraciones estéticas o artísticas, el objetivo de la investigación recae en el campo científico para dar solución a un problema señalado en la Acústica abordado desde la Electrónica. El tema se enmarca en la amplificación del sonido y específicamente en el de la guitarra. El interés fundamental consiste en apoyarnos en la electrónica para lograr una mejor calidad del sonido, partiendo del hecho de que los “Tubos al Vacío” constituyen un componente de gran aprecio por los músicos en cuanto a su alta fidelidad sonora; con base en esto, se propone diseñar y construir un “Amplificador de Audio” basado en tubos al vacío.

**PALABRAS CLAVE:** Tubos vacio, tríodo, pentodo, amplificación, guitarra eléctrica, transformador, armónicos, potencia, pre-amplificación.

**V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO**

## **ABSTRACT OF THESIS PROJECT**

**TITULO:** DESIGN AND CONSTRUCTION OF A VALVE AMPLIFIER  
**AUTOR:** GILBERTO BARRIGA PEREZ  
**FACULTAD:** FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
**DIRECTOR:** RAÚL RESTREPO AGUDELO

### **ABSTRACT**

Valve amplifiers are constructed in stages, each of which has to comply to an industry standard both in terms of amplification of the audio signal and valve usage. The different stages are three: pre-amplification, the power stage and the power supply. At the end we obtained a 20W audio amplifier using the valve as an amplifier element with the necessary documentation of their design, construction and operation. This thesis is related to the meaning of human hearing, and although it contains aesthetic or artistic considerations, the objective of the research influence the scientific field to solve a problem identified in the acoustic approached from the electronics. The topic is framed in sound amplification and specifically in the guitar. The primary interest is to rely on electronics for better sound quality, given the fact that the "vacuum tubes" are a component of great appreciation for the musicians in their high-fidelity sound, on this basis, is to design and build an "Audio Amplifier" based on vacuum tubes.

**KEYWORDS:** Valve, vacuum tube, triode, pentode, valve amplification, power, distortion.

**V° B° THESIS DIRECTOR**

## INTRODUCCIÓN

La amplificación de señales de audio, especialmente de instrumentos como la guitarra eléctrica, data de la primera parte del siglo XX en cual los músicos de dicha época se veían en la necesidad de aumentar el volumen producido por sus instrumentos.

En esta primera mitad de siglo XX el único elemento amplificador era el tubo al vacío, el cual poseía sus desventajas pero el cual fue de muy gran acogida por los músicos dado por su gran calidad sonora.

Luego de la invención del transistor, y de su implementación sobre los amplificadores de guitarra eléctrica, estos tubos al vacío pasaron a un segundo plano, ya que los transistores ofrecían características diferentes a los tubos, como su reducido coste y peso. Sobre los años ochenta, estos elementos obsoletos, los tubos de vacío, renacieron nuevamente y lideran desde dicha época el mercado de la amplificación ya que son los preferidos por los amantes de la guitarra eléctrica ya que produce una calidad sonora muy superior a los contruidos a base de transistores y como se explicará en el presente proyecto dichos tubos poseen características propias no conocidas por la mayoría de los músicos y el mercado en general el cual los hacen tan apetecidos hoy en día.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar y construir un amplificador de 20W para guitarra eléctrica, que utilice como elemento fundamental el tubo al vacío.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Generar un documento que presente los temas relacionados con los principios básicos de la tecnología de los tubos al vacío, mostrando el estado del arte de la tecnología.
2. Especificar los elementos que integran, además de los tubos al vacío, el amplificador de audio.
3. Determinar los parámetros de diseño, construcción y prueba de los amplificadores de audiofrecuencia (AF) con tubos de vacío.
4. Establecer la diferencia que hay entre las respuestas sonoras de los amplificadores transistorizados y los de tubos de vacío, midiendo lo siguiente: Respuesta en frecuencia y distorsión armónica.
5. Documentar el procedimiento para el diseño y construcción de amplificadores con tubos al vacío.

# 1. MARCO TEORICO

## 1.1 EL DIODO

El diodo es un dispositivo semiconductor que permite la circulación de corriente en un solo sentido entre sus dos terminales y bloqueando el paso de corriente en su sentido contrario.



**Fig. 1** Diferentes tipos de Diodos

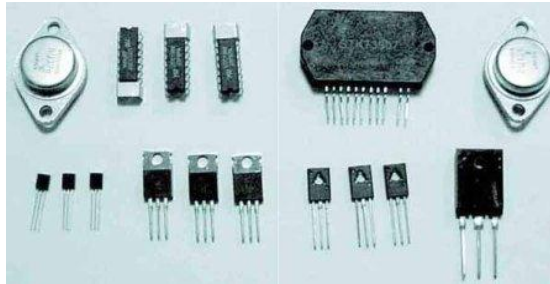
Fuente: [6]

Se puede decir que en el diodo existen dos estados; uno de encendido y otro estado de apagado. Al estar el diodo en estado de encendido se dice que habrá una circulación de corriente entre sus terminales al cumplirse una condición inicial comportándose este, idealmente, como un circuito cerrado entre sus terminales. Al encontrarse en un estado de apagado, al no cumplirse la condición inicial, este dispositivo se comportaría como un circuito abierto entre sus dos terminales.

## 1.2 EL TRANSISTOR

Es un dispositivo o elemento semiconductor que cumple las funciones principales de conmutación y amplificación, en la que una pequeña corriente o voltaje aplicado sobre alguno de sus terminales controla la corriente entre los otros dos terminales,

la cual para el audio cumplirá esta última función, la de amplificar las señales deseadas en la entrada a un equipo diseñado.



**Fig. 2** Tipos comunes de transistores

Fuente: [7]

El objetivo principal de su invención, el transistor bipolar, en 1947 en los laboratorios BELL en Estados Unidos por los científicos John Bardeen, Walter Houser Brattain y William Shockley fue el de reemplazar los viejos “tríodos de vacío” por su tamaño y robustez, los que les hizo obtener el premio nobel de física en 1956.

El transistor es considerado como un gran suceso frente a su precedente; el tubo o válvula termiónica, debido a que es mucho más pequeño, ligero, robusto y funciona con tensiones bajas, hasta con baterías puede funcionar.

Una manera simplificada de explicar su funcionamiento es que el transistor consta de tres partes; una parte encargada de la emisión de electrones llamada emisor, la otra parte que se encarga de recibir estos electrones llamada colector y la tercera parte encargada de la modulación o control de este paso de electrones entre las dos etapas anteriores, llamada base. También funciona como un interruptor permitiendo el paso o no de energía.

### 1.2.1 Aplicaciones

Los dos principales tipos de transistores permiten responder a sus necesidades de la electrónica analoga, digital, de la electrónica de potencia y de alta tensión.

- La tecnología bipolar es más utilizada en la electrónica analoga y en electrónica de potencia.
- La tecnología FET o CMOS son utilizados principalmente en tecnología digital, realización de operaciones lógicas. Sus características de funcionamiento se asemejan a los tubos de vacío. Ellos ofrecen una mejor linealidad en el área de la amplificación Hi-Fi, por lo tanto menos distorsión.
- Una combinación de las dos tecnologías es utilizada en los IGBT.

Los sustratos utilizados van del germanio, el silicio, el arsenio de galio, el silicio-germanio y más recientemente el carburo de silicio, el nitruro de galio y el antimonio de indio.



Para la gran mayoría de aplicaciones los transistores están contruidos con silicio más que con los otros materiales exóticos tales como el arsenio de galio y el nitruro de galio ya que estos son más utilizados para fabricar transistores utilizados en hiperfrecuencias y micro-ondas.

- Un transistor bipolar está construido de dos partes de sustrato semiconductor dopado idénticamente (P o N) separados por una delgada capa de semiconductor dopado inversamente; por lo que existen dos tipos: N-P-N o P-N-P.
- Un transistor de efecto de campo normalmente está compuesto por una barrera semiconductor dopada de N o P y rodeado por el centro de un anillo semiconductor dopado inversamente. Se habla en los transistores FET de canal N o canal P.

### 1.2.2 Transistor BJT

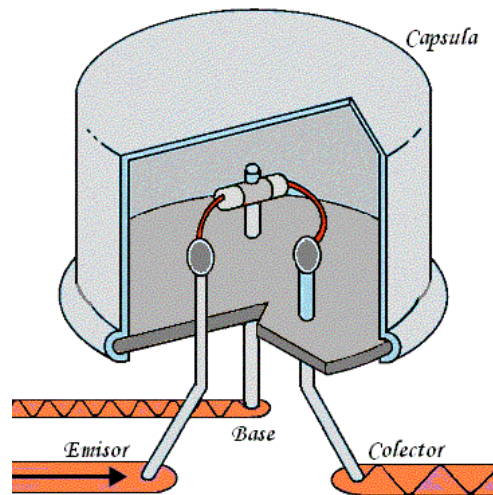
De su nombre en inglés (Bipolar Junction Transistor), es un dispositivo electrónico construido con materiales semiconductores, fabricados anteriormente con germanio, pero la mayoría de los transistores BJT actuales están hechos a partir de Silicio y algunos otros de arseniuro de galio.

Son llamados transistores bipolares porque ellos conducen mediante el uso de los portadores minoritarios y mayoritarios. El transistor de juntura bipolar, fue el primer transistor producido en masa, formando una combinación de dos diodos de juntura. Un transistor NPN está formado por una capa muy delgada de material tipo-p entre dos delgadas capas de material tipo-n, formando así este transistor. Lo mismo sucede con los transistores PNP, una delgada capa de material tipo-n se encuentra entre dos delgadas capas de material tipo-p. Este tipo de uniones producen dos junturas **p-n**; una unión base-emisor y una unión base-colector, separadas por una delgada región llamada base. Estos transistores BJT tienen 3 terminales; base, emisor y colector. Es muy útil en amplificación debido a que circula una corriente entre emisor y colector controlado por una corriente muy pequeña en la base.



**Fig. 3 Replica del primer transistor fabricado**

Fuente: [8]



**Fig. 4 Transistor BJT**

Fuente: [9]

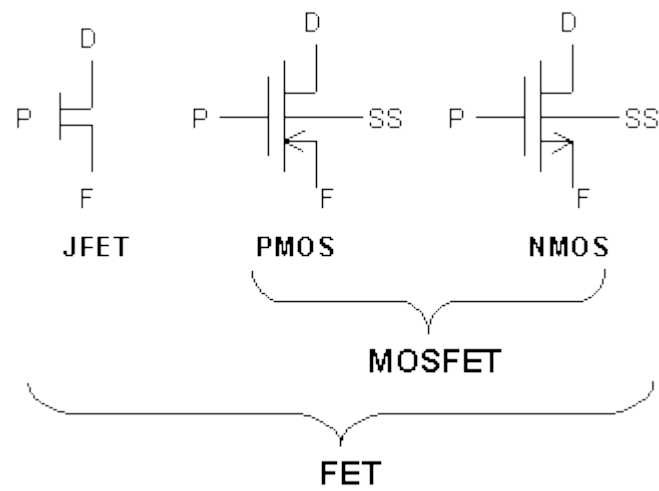
### 1.2.3 Transistor FET

Luego de la invención del transistor bipolar BJT, se crearon otros tipos de transistores denominados FET (Field Effect Transistor) ó transistores de efecto de campo. Estos, a diferencia de los BJT, no utilizan la corriente de base encargada de la modulación en los BJT sino que funcionan con un voltaje aplicado sobre el terminal de compuerta, gate o reja de control graduando así la conductancia del canal entre sus otros dos terminales, llamados fuente y drenador, permitiendo así el paso de corriente entre estos dos terminales. Existe una analogía entre estos transistores FET y los tubos al vacío y se dice que los transistores FET se proponen como resistencias que son controladas por un voltaje.

El transistor FET es un elemento electrónico que controla el paso de corriente por un canal semiconductor aplicando un campo eléctrico perpendicular al flujo de corriente en este canal de material semiconductor.

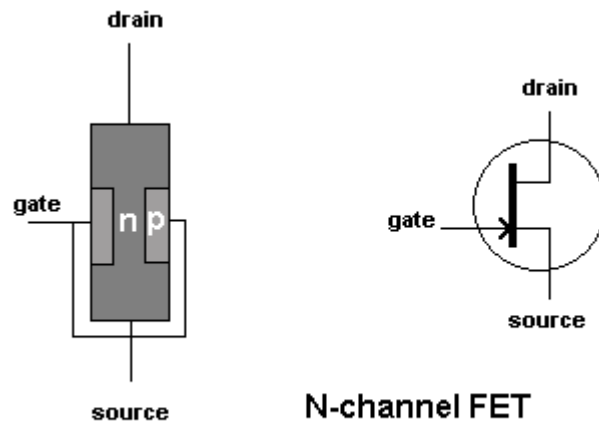
Existen varios tipos de transistores de efecto de campo como:

- JFET (Junction Field Effect Transistor)
- MOSFET (Metal-oxide Semiconductor FET)
- MISFET (Metal-Insulator Semiconductor FET)
- CHEMFET (Chemical FET)
- ISFET (Ion Sensitive FET)
- EOSFET (Electrolyte Oxide Semiconductor FET)
- ENFET ( Enzymatic FET)
- MODFET ( Modulation-Dopped FET)
- HEMT (High Electron Mobility Transistor)



**Fig. 5 Simbología del transistor FET y MosFET**

Fuente: [10]



**Fig. 6 Transistor FET Canal N**

Fuente: [11]

## 1.3 GUITARRA ELECTRICA

La guitarra eléctrica es un instrumento de cuerda, pero clasificado entre los instrumentos que producen sonidos a través de la electrónica, y está constituido de un cuerpo (el más común es en cuerpo solido) produciendo su sonido por medio de las pastillas o micrófonos que captan y transforman las vibraciones de las cuerdas en señal eléctrica. Esta señal eléctrica, la gran mayoría de veces, es modificada por una cadena de efectos o pedales de efectos, alterando en si su calidad y potencia sonora y agregando distintos sonidos a dicha señal eléctrica “limpia” que viene de la guitarra.

### 1.3.1 Orígenes

La primera guitarra eléctrica conocida data de 1924, cuando un ingeniero de la famosa empresa *Gibson Guitar Corporation*, Lloyd Loar, realiza el primer prototipo, el cual consta de una guitarra acústica amplificada por un rustico micrófono hecho en esa época, pero no fue aprobada en ese entonces por dicha empresa para su comercialización.

Varias personas colaboraron y aportaron al diseño de la guitarra eléctrica, pero fue hasta 1930 cuando la marca Rickenbacker fabrico la primera guitarra compuesta de micrófonos de tungsteno.

Hacia los años 40, un guitarrista e inventor, Les Paul, fabrica lo que él llamaría la primera guitarra de cuerpo solido, ya que no incorpora una caja de resonancia y argumentando que su cuerpo es totalmente plano. Otras investigaciones proponen que antes de la invención de esta guitarra cuerpo solido ya se habían inventado en las marcas AudioVox y Rickenbacker en 1935.



**Fig. 7** Modelo Actual Fender Telecaster

Fuente: [12]

Hacia el año de 1950, el electricista y fabricante de amplificadores Leo Fender fabricaría como lo que se conoce actualmente como la primera guitarra eléctrica de cuerpo solido comercializada, llamada por él como Fender Telecaster y hacia el año 1954 crearía la que seria, hoy en día muy famosa, la Fender Stratocaster. Ese mismo año saldría a la venta la Gibson Les Paul.

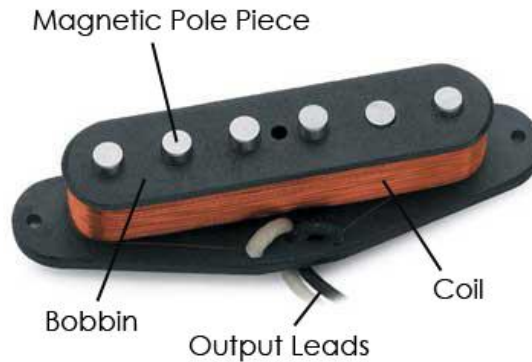
### **1.3.2 Micrófonos o pastillas**

Es una pieza transductora, ya que convierte la energía acústica de las vibraciones de la cuerda en una señal eléctrica para ser enviada a un amplificador. La mayoría de las veces, las guitarras no poseen un sonoridad acústica propia, producido por su cuerpo de madera, por lo que el sonido es producido por la interacción entre cuerda, micrófono y amplificador.

Las pastillas son materiales electromagnéticos, ya que están formados por un imán permanente que se encuentra rodeado por un bobinado de alambre de cobre.

Al principio, se crearon los micrófonos de devanado simple, o llamados en ingles "*Single Coil*", asociadas siempre a la marca fender, compuestos por un solo imán rodeado de una bobina y 6 polos, uno por cada cuerda, produciendo un sonido puro y transparente. El campo magnético producido en el imán atraviesa la bobina, la cual está sometida a las variaciones de ese campo inducidas por las cuerdas en

movimiento. El problema de estos micrófonos de devanado simple es que generan sonidos parásitos, ya que captan las perturbaciones electromagnéticas de los 50 o 60 Hz en el ambiente (por lo general el ruido “HUM” producido por los transformadores, teléfonos, pantallas de video, etc.)



**Fig. 8** Pastilla Single Coil

Fuente: [13]

Este problema fue solucionado en la marca Gibson, por el ingeniero Seth E. Lover, quien creó las pastillas de doble bobina o “Humbuckers” con el fin de eliminar este ruido “HUM” producido por las pastillas single coil. Estas pastillas están compuestas por 2 bobinas paralelas, o 2 micrófonos de bobina simple, por lo que la polaridad del campo es inversa con el fin de anular las perturbaciones electromagnéticas exteriores.

Estos micrófonos se caracterizan porque tienen una salida el doble de intensidad que las pastillas de bobina simple debido a que están conectadas en serie. También producen un sonido más “cálido” y lleno de bajos y medios respecto a la ecualización general del sonido de este tipo de micrófonos.

Un problema producido por estas pastillas es el hecho de estar conectadas en serie, haciendo que la inductancia del embobinado aumente y algunos armónicos de las frecuencias altas son cancelados, produciendo un recorte de la señal.



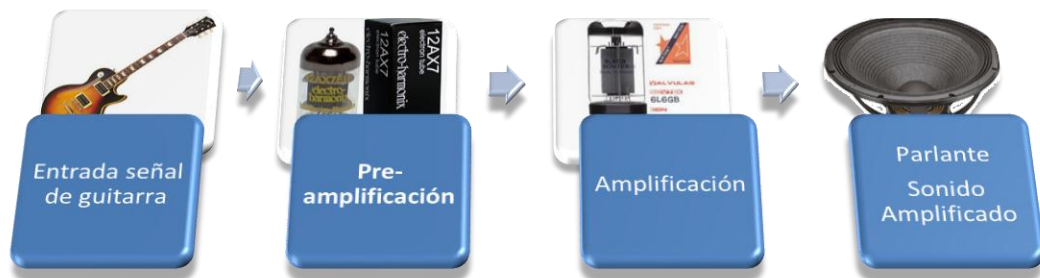
**Fig.9** Diferentes tipos de pastillas Humbucker

Fuente: [14]

Estos elementos transductores, las pastillas, convierten esa energía acústica proveniente de la vibración de las cuerdas en una señal eléctrica, muy débil, ya que se encuentra entre los 100mV hasta el 1V, dependiendo del tipo de pastilla utilizada, según su referencia propia y también si es humbucker o una pastilla de bobina simple. Una cantidad mayor de flujo magnético causaría una salida mayor, afectando la amplitud del sonido producido por la cuerda y un embobinado mayor causaría por lo tanto una impedancia de salida mayor y afectando las frecuencias altas del sonido producido por las cuerdas lo que hace posible generar distintos tipos de pastillas o micrófonos, variando la cantidad de su embobinado y el material con el que esté construido el imán. Actualmente las pastillas, o micrófonos, de mayor calidad del mercado son las que están construidas con un imán hecho en ALNICO, que es una combinación de Aluminio, níquel y cobalto, haciendo de estas pastillas las más solicitadas actualmente por los guitarristas.

## 1.4 AMPLIFICACIÓN DE AUDIO

Un amplificador de audio es un todo un sistema electrónico que aumenta el voltaje y/o la corriente de una señal eléctrica de entrada que ha sido capturada previamente. Este sistema de amplificación no debe alterar o deformar la señal eléctrica que entra, tan solo debe amplificarla con una buena calidad de sonido, pero en algunos casos como el amplificador de guitarra eléctrica puede agregar ciertos efectos deseados por el usuario.



**Grafica 1** Esquema más común para el diseño de un amplificador de audio

Fuente: Autor

Todo este sistema electrónico encargado de amplificar una señal de audio está compuesto por varias etapas. La primera parte es la encargada de acondicionar esa señal y darle un poco de potencia a la señal de entrada, que es muy débil, para poder entregarla a la siguiente etapa. Esta etapa es denominada como etapa pre-amplificadora, o simplemente como preamplificador o previo. La siguiente etapa está encargada de tomar esa señal proveniente de la pre-amplificación y amplificarla a la potencia por la cual está diseñado y enviar esta señal con suficiente potencia a los parlantes y así convertir esta energía eléctrica en acústica. En un amplificador existe una o varias fuentes de alimentación, que son encargadas de suministrar energía a todo lo necesario dentro del amplificador.

Los amplificadores de audio no necesariamente son ofrecidos en el mercado con la unión de todas estas etapas anteriores. Se pueden obtener pre-amplificadores, etapas de potencia y gabinete de parlantes todos vendidos por separado. En el mercado se ofrecen varias opciones llamadas como “cabezal” o “cabeza” al equipo amplificador que incluye solo la etapa de pre-amplificación y la etapa de potencia, no incluyendo una caja de parlantes, que también es vendida como “gabinete de parlantes”. Cuando se habla de un amplificador que incluye las dos etapas,



preamplificadora y amplificadora, junto a los parlantes, estos equipos amplificadores son llamados como “combos”. Todas estas opciones de amplificación ofrecen al guitarrista la posibilidad de mezclar equipos con características que se adapten más a sus gustos.



**Fig. 10.** Amplificadores en distintas versiones de la casa Marshall

Fuente: [15]

Algunos equipos ofrecidos en el mercado de gama baja los controles de ecualización como el de otras opciones de un amplificador son omitidos para bajar los costos, por lo que es común encontrar amplificadores en el mercado de muy poca potencia con tan solo sus controles de volumen master y volumen de pre-amplificador.

#### **1.4.1 Entrada de la Señal débil al amplificador**

Como ya se hablo anteriormente, el voltaje de salida de una guitarra eléctrica varía entre  $100\text{mV}_{\text{rms}}$  hasta  $1\text{V}_{\text{rms}}$ , dependiendo del tipo de pastillas utilizada. La guitarra eléctrica maneja entre  $5\text{k}\Omega$  y  $15\text{k}\Omega$  de impedancia de salida aproximadamente, dependiendo del tipo de guitarra utilizada. Para esto se debe diseñar el amplificador

con una impedancia de entrada igual o mayor, para cumplir el teorema de máxima transferencia de potencia en el cual se habla que para una mayor transferencia de potencia entre las dos fuentes tiene que haber impedancia de salida igual a la impedancia de entrada ya que un no correcto acople de impedancias causara una calidad de la señal eléctrica muy mala y también se busca evitar las reflexiones que en nuestro caso, si son muy altas, pueden dañar la fuente. Para un amplificador de guitarra es necesario colocar una impedancia de entrada mayor a la impedancia de una guitarra eléctrica, ya que no se sabe qué tipo de guitarra eléctrica se esté utilizando y si luego de la guitarra hay procesadores de efectos que también van a modificar esa impedancia, por lo tanto se aconseja utilizar una impedancia de entrada en un amplificador entre los 100k $\Omega$  y 200k $\Omega$ .

### **1.4.2 Pre-amplificación**

El objetivo de esta etapa es el de amplificar un poco la señal débil de entrada que le llega y hacerle un proceso para luego entregarla a la etapa siguiente de amplificación. Esta etapa puede involucrar varias etapas de pre-amplificación.

Una señal débil es muy sensible al ruido, por lo que un mal diseño y construcción de una etapa de pre amplificación causaría una disminución significativa de la relación Señal/Ruido.

Se habla de que esta es la parte más importante en todo el proceso de amplificación ya que agrega al sonido una “personalidad” y un “color” trabajando sobre ciertos rangos de frecuencia, y dándole una ecualización característica.

Luego de que la señal es amplificada, un poco, por esta etapa puede pasar a una etapa intermedia en la cual a la señal se le pueden agregar efectos o se puede ecualizar dependiendo de los criterios del diseñador.

En esta etapa de pre-amplificación la señal se puede distorsionar logrando la saturación del elemento utilizado. En el caso de este proyecto, se logra una saturación de la señal en las válvulas del pre-amplificador.

### **1.4.3 Amplificación o Potencia**

La propia señal de una guitarra eléctrica en si no tiene potencia, es una señal débil ya que su amplitud de voltaje y corriente son muy bajas al entrar al amplificador. Cuando esta señal pasa por la etapa de pre-amplificación, esta etapa le da a la señal un “cuerpo” característico dependiendo de su diseño y los materiales con los que está construida dicha etapa, pero aun le falta potencia para poder mover un parlante.

La principal labor de esta etapa es la de suministrar un nivel fijo de ganancia a una señal procesada y entregar potencia a una carga, como lo es un parlante. Esto se debe hacer sin añadirle a la señal ruidos, oscilaciones. Adicionalmente, debería poder soportar abusos como lo son circuitos abiertos o cortos circuitos.

La influencia de esta etapa en la calidad y coloración del sonido es muy baja, ya que esto hace parte de la etapa de pre-amplificación. Sin embargo, muchos músicos quienes utilizan equipos de amplificación con tubos al vacío, utilizan esta etapa para añadir a su señal de guitarra una coloración característica al saturar los tubos de potencia y así añadir una distorsión extra a su sonido.

#### **1.4.4 CLASES DE AMPLIFICACIÓN**

Los amplificadores de audio están constituidos de diversos circuitos amplificadores nombrados comúnmente “etapa de potencia”. Estos circuitos se encuentran categorizados como clase A, B, AB, y C para amplificadores “análogos”. Existen también amplificadores clase D y E, que utilizan circuitos digitales internamente (no son comunes dentro de la amplificación de guitarra).

##### **Clase A**

Este tipo de amplificador solo utiliza 1 elemento amplificador (tubo de vacío o transistor) para amplificar la señal. Ofrece una fidelidad muy alta pero por lo general son utilizados en baja potencia. Muy pocas veces son utilizados en los amplificadores esta clase A para generar potencia, ya que tienen a calentarse y consumir mayor potencia, a menos que no haya una señal de entrada, ya que la corriente circula durante todo el ciclo de la señal de entrada. El transistor o tubo de vacío se encuentra polarizado todo el tiempo, nunca se apagan. La máxima eficiencia teórica de salida de onda senoidal es del 50%. Este tipo de amplificadores son los más preferidos por los músicos, ya que logran un buen desempeño en sonidos limpios y la señal es prácticamente libre de ruidos, pero es difícil llegar a saturación con estos amplificadores ya que se necesitan grandes cantidades de volumen, por lo tanto para mayor potencia se necesitan mayor cantidad de elementos amplificadores.

##### **Clase B**

En esta clase de amplificación la corriente de reposo es cero, y la corriente solo circula durante el semi-ciclo positivo de la señal de entrada. El transistor o válvula por consiguiente se apaga para el semi-ciclo negativo de la señal de entrada generando por consiguiente una gran distorsión. La máxima eficiencia teórica de salida es de 78.5% para un amplificador push-pull clase B.

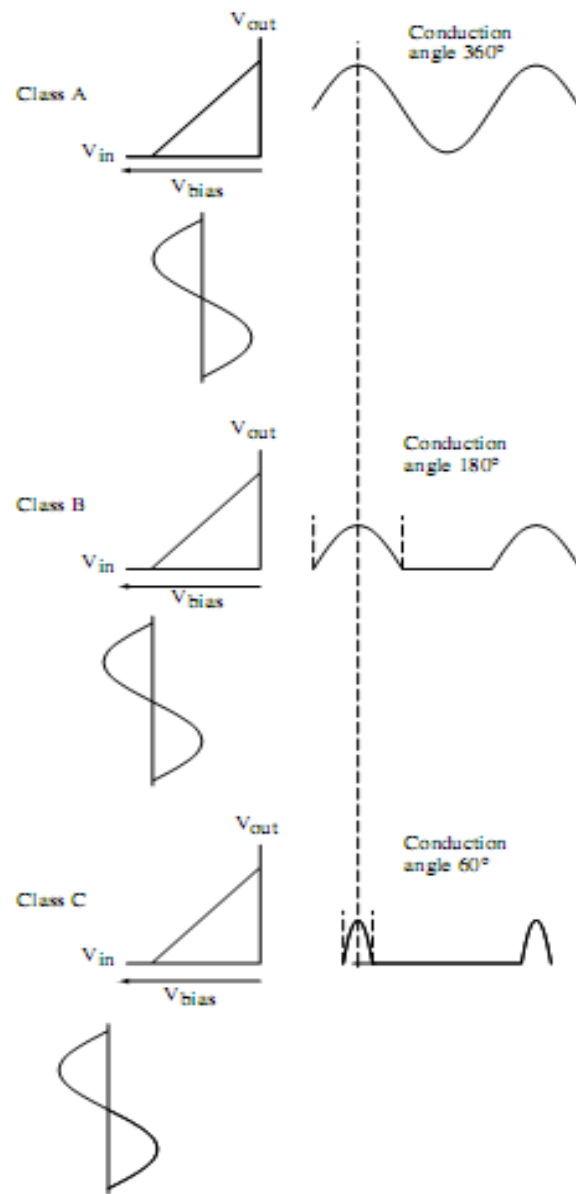
### **Clase AB**

Esta clase funciona igual a la clase B pero con la diferencia de que existe una pequeña corriente que circula por los 2 transistores (configuración push-pull) constantemente, reduciendo por tanto la "distorsión por cruce" producida en la clase B. Como en los amplificadores clase A hay una corriente constante polarizando el elemento amplificador, pero en esta es relativamente baja. Son los amplificadores más comercializados ya que consumen menos potencias y pueden llegar a ser más económicos, dejando a decisión del músico entre un amplificador de esta clase por su calidad y precio, o por un amplificador de clase A que son más preferidos, pero mucho más costosos por la cantidad de elementos necesarios para lograr potencia.

### **Clase C**

En esta clase la corriente circula en menos de un semi-ciclo de la señal de entrada. La señal de salida por tanto contiene números armónicos que son filtrados por un circuito de carga muy selectivo de acuerdo a la frecuencia central de la señal a amplificar. Este tipo de amplificación es solo usado en radiofrecuencia, jamás en audio.

De acuerdo a lo dicho anteriormente la clase A tiene un ángulo de conducción de  $360^\circ$ , Clase B de  $180^\circ$  y la Clase C  $<180^\circ$ . La transición entre la clase A y la clase B es bastante amplia, por lo que entre ese intermedio se encuentra la clase AB.



**Fig. 11** Clases de amplificación

Fuente: Morgan Jones [4]

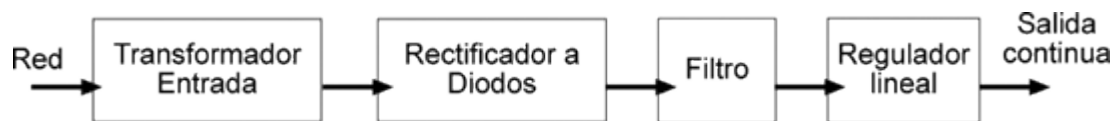
## 1.5 Fuentes de Alimentación

Una fuente de potencia, o de alimentación, es un dispositivo que convierte un voltaje en otro que sea conveniente mientras que entrega potencia, para nuestro caso convierte el voltaje de suministro de la red eléctrica y lo convierte a los voltajes necesarios para alimentar las distintas etapas del amplificador.

Un amplificador construido con tubos al vacío requiere una fuente de alta tensión DC y una o varias fuentes de baja tensión AC, ya que los tubos requieren altas tensiones DC para su polarización, para un correcto funcionamiento entre  $300V_{DC}$  y  $500V_{DC}$ , y una fuente de baja tensión para su calentamiento, dependiendo de la configuración pueden ser  $5V_{AC}$ ,  $6.3V_{AC}$  ó  $12.6V_{AC}$ , el cual se explicará más adelante.

Existen dos tipos de fuentes fundamentales de alimentación, lineales y conmutadas.

Una fuente típicamente está constituida por las siguientes etapas:



**Fig. 12** Etapas de una fuente de alimentación lineal

Fuente: [16]

- Transformador de entrada: Reduce la tensión de la red de suministro de 120V o 220V a un voltaje deseado para ser tratado. Solo trabaja con corrientes alternas por lo que su entrada y salida serán alternas.
- Rectificador: Es el encargado de convertir esa tensión alterna proveniente del transformador en una tensión continua. Para realizar esta acción se utilizan Diodos. En algunos amplificadores utilizan diodos en formato de tubo al vacío.
- Filtro: El voltaje obtenido en la carga está en forma de pulsos, proveniente de la etapa de rectificación, pero es una tensión no deseable. Lo que se necesita es una tensión que sea constante y para esto es necesario implementar sobre la fuente un filtro. El más común para estos casos es el filtro RC con el objetivo de suavizar esta señal pulsante.
- Regulador: Es un circuito que se encarga de proporcionar una tensión estable de salida. En algunas fuentes este elemento no es necesario.

## 1.6 ALTAVOZ

El altavoz o parlante, es un elemento transductor electromecánico destinado a producir sonido a partir de una señal eléctrica. Es el inverso de un micrófono. En la transducción de esa señal se sigue un doble proceso: eléctrico – mecánico – acústico, ya que en una primera parte convierte una señal eléctrica amplificada en energía mecánica y en la otra parte convierte esta energía mecánica en energía acústica.



**Fig. 13.** Parlante para amplificador de guitarra

Fuente: [17]

- **Respuesta en frecuencia:** Es la respuesta que ofrece cada tipo de parlante a las variaciones de frecuencia en su señal de entrada. Ya que la respuesta de un parlante no es plana, siempre abra una respuesta de frecuencia no uniforme, lo que quiere decir que a distintas frecuencias la potencia acústica varía.
- **Potencia:** Cuando se habla de potencia en un parlante, se dice que es la potencia eléctrica que entra al altavoz y es la cantidad de energía, medida en watts, antes de que el parlante empiece a distorsionar o dañarse.
- **Potencia máxima:** Es la potencia eléctrica que es capaz de aguantar un parlante antes de dañarse definitivamente.
- **Potencia acústica:** Es la cantidad de energía emitida en forma de ondas sonoras por el parlante por unidad de tiempo. En pocas palabras es la propia potencia audible, el volumen comúnmente llamado. La cantidad de potencia acústica viene determinada por la amplitud de la onda.

- **Impedancia:** Es la oposición que presenta determinado equipo al paso de pulsos provenientes de una fuente de sonido, como lo es un amplificador. Este valor de impedancia varía respecto a la frecuencia, por lo que nominalmente se habla de la impedancia de un parlante a una frecuencia de 1Khz. Las impedancias más comunes de los parlantes o altavoces vienen dadas en el mercado como: 2, 3.2, 4, 6, 8, 16 y 32 Ohmios. Para la amplificación de guitarra normalmente se utilizan 4 y 8 ohmios.
- **Sensibilidad:** Es la eficiencia que tiene un altavoz en el proceso de la transducción eléctrica, es decir la manera como el parlante convierte esas variaciones de la señal eléctrica de entrada y su presión sonora obtenida. Esta medida se da en dB/W y no es un indicativo de una buena calidad sonora, la sensibilidad.



## 2. INTRODUCCION A LOS TUBOS AL VACIO

Los tubos al vacío, llamados de muchas formas como válvula termoiónica, válvula de vacío, bulbo o simplemente válvula, es un componente o dispositivo electrónico activo generalmente utilizado como amplificador de señal, conmutar o modificar cualquier señal eléctrica mediante el control del desplazamiento de sus electrones en un espacio, que comúnmente es al vacío, o algunos gases adecuados para su trabajo. A partir de la invención del tubo al vacío, la electrónica mostró un avanzado desarrollo durante la primera parte del siglo XX y se evidenció un crecimiento enorme en la comercialización y avance de la televisión, telefonía, radares, audio y las primeras computadoras analógicas.

El declive de esta tecnología comenzó después de la invención del transistor y de los elementos semiconductores, ya que eran mucho más pequeños, económicos y de un gran desempeño más fiable en comparación con la válvula, pero hoy en día esta tecnología es muy utilizada en algunas aplicaciones, por razones electrónicas son más convenientes, como lo son la amplificación y tratamiento de señales de audio y en la radiofrecuencia de alta potencia.

### 2.1 HISTORIA

La válvula funciona bajo el efecto de emisión termoiónica, el cual aparece como reportado hacia 1873 por Frederick Guthrie, pero la investigación que es tomada más adelante para la invención del tubo fue la realizada por Thomas Alva Edison. Los experimentos los hizo sobre una lámpara incandescente que al ver su comportamiento ya que se iba oscureciendo buscó la manera de cómo disminuir este efecto. Para esto ha introducido dentro de la lámpara un electrodo en forma de placa polarizada eléctricamente con el fin de atraer las partículas que desprendía el filamento y para 1884 patentó este fenómeno bajo el nombre de "efecto Edison". Pero Edison desconocía los alcances que podía tener su efecto.

Al agregar dicha placa polarizada con alto voltaje positivo, se logra que los electrones que se desprenden del filamento que está cargado negativamente viajen hasta esta placa positiva, formando un flujo de electrones. Esta nueva invención, la cual consta de dos electrodos a los cuales se les llama ánodo y cátodo, se les da el nombre de diodo de vacío, ya que se encuentran dentro de un recipiente de vidrio al vacío.

Hacia 1904, el físico británico John Ambrose Fleming patentó lo que sería conocido como la **válvula de Fleming**, llamado válvula por su similitud con las válvulas mecánicas ya que permiten la conducción de electricidad en un solo sentido, un

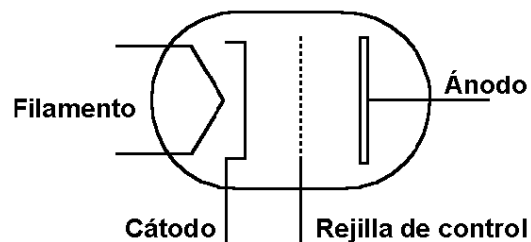
diodo termoiónico formado por dos electrones que funcionan bajo el efecto Edison, dándole una importancia aplicativa a ese flujo de electrones y que Edison desconocía, y que él descubrió al tratar de pasar corriente alterna a corriente continua, dando inicio así a la electrónica del siglo XX.



**Fig. 14** Válvula creada por Fleming

Fuente: [18]

Hacia 1906, el inventor estadounidense Alexander Lee de Forrest, decide trabajar sobre el diodo al vacío creado por Fleming, ya que él deseaba poder amplificar las ondas y hacer un control del volumen, por lo que inserta una pequeña tira de platino doblada en zigzag, llamada rejilla, entre el ánodo y cátodo del diodo al vacío encerrándolo en una bombilla de vidrio y al vacío. Con este proceso Lee de Forrest crearía el primer amplificador llamado por él como **Audion**, llamado posteriormente como **Tríodo**, lo cual es un diodo de Fleming pero adicionándole un electrodo de control o grilla. Dicha invención generó una disputa entre los dos científicos, ya que Fleming aseguraba que el Audion era un diodo modificado. Al final se estableció que el Audio es un diodo con una rejilla de control, diferente a la invención de Fleming.

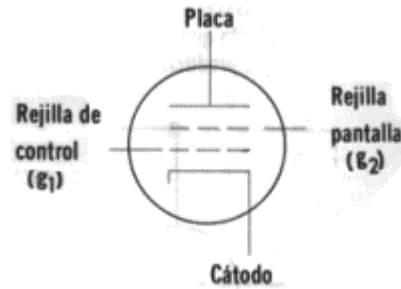


**Fig. 15** Esquema del Tríodo

Fuente: [19]

El Audio, o tríodo de vacío, creado por Lee de Forrest tiene la ventaja de su amplificación de corriente, pero con algunas limitaciones en altas frecuencias dada su capacidad interelectrónica (ánodo-grilla, grilla-cátodo y ánodo-cátodo). Esta capacidad propia del tríodo, disminuye la impedancia de entrada del tubo y la ganancia, al aumentar la frecuencia de trabajo.

Durante la primera guerra mundial, el físico suizo-alemán W.H. Schottky resuelve este problema de los tríodos al adicionar una segunda grilla, el tríodo solo posee una, entre la grilla de control y el ánodo, la cual recibió el nombre de grilla de pantalla. De este modo la capacidad interelectrónica se disminuye, ya que esta adición resulta ser una capacidad equivalente de capacitores en serie. Esta grilla adicionada por Schottky se encuentra polarizada positivamente, con un voltaje ligeramente menor al de ánodo o placa. A esta nueva invención se le llamo como **Tetrodo**.



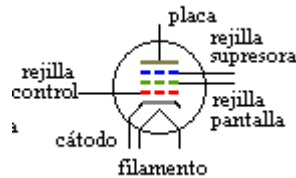
**Fig. 16** Esquema del tetrodo

Fuente: [20]

Este nuevo tubo de vacío, tetrodo, generaría un nuevo problema, la emisión secundaria. Cuando la válvula trabaja normalmente, los electrones chocan a gran velocidad con el ánodo lo que produce el desprendimiento de otros electrones, generando la emisión secundaria, y esta emisión es mayor cuanto mayor es el voltaje en el ánodo. Estos electrones “sueltos” son atrapados por la grilla de pantalla lo que aumenta la corriente de la misma pero disminuye la corriente de placa o ánodo provocando una característica típica del tetrodo y por lo tanto disminuyendo la eficiencia de esta válvula tetrodo. La adición de esta nueva rejilla causaba una mayor amplificación pero introducía una gran distorsión a esta señal amplificada.

Para disminuir el efecto de la emisión secundaria, producido por el tetrodo, en el año de 1926 el ingeniero holandés Bernhard D. H. Tellegen, de la empresa Philips, agregó una tercera rejilla o grilla entre la placa y la grilla de pantalla, llamada grilla supresora, por lo que se daría a la invención de otra válvula de vacío; el **Pentodo**.

Dicha válvula está compuesta ahora por cinco electrodos; una placa, un cátodo y tres rejillas de control.



**Fig. 17** Esquema del Pentodo

Fuente: [21]

La grilla supresora, esta siempre polarizada al mismo voltaje de cátodo, lo que la hace muy negativa respecto al voltaje presente en el ánodo y su función es la repeler estos electrones “suelos” que capta la rejilla de pantalla nuevamente hacia el ánodo. En muchos pentodos, esta rejilla o grilla supresora se encuentra conectada internamente al cátodo. La rejilla de pantalla hace que funcione mejor en frecuencias altas y la rejilla supresora elimina la distorsión por emisión secundaria. Con esto, el Pentodo logro una gran madurez en la electrónica termoiónica, y junto al tríodo cubrieron casi en totalidad las aplicaciones de la electrónica.

## 2.2 ESTRUCTURA INTERNA DE LOS TUBOS AL VACÍO

### 2.2.1 Filamento

Es el componente encargado de la calefacción proporcionando la suficiente energía para que en el cátodo emita una cantidad de electrones hacia el ánodo, ya que uno de los requisitos para el funcionamiento de una válvula es su elevada temperatura, llegando a necesitar más de 100°, inclusive hay válvulas que necesitan de más de 500°. Esta comúnmente fabricado en tungsteno o wolframio.

Existen dos tipos de filamentos en los tubos al vacio:

- **Caldo Directo:** Es cuando el cátodo actúa también como filamento, el mismo se calienta y emite electrones. Cuando se crearon las válvulas eran todas hechas con caldeo o calentamiento directo.
- **Caldeo Indirecto:** Es cuando en la válvula el filamento y el cátodo están separados, en el cual el filamento solo cumple la función de calefacción.

Actualmente las dos presentaciones de calefacción se encuentran vigentes, dependiendo del tipo de válvula a utilizar, ya que en el mercado hay una gran

cantidad de ellas. Es normal encontrar caldeo directo en los diodos de vacío, utilizados para rectificación y las de caldeo indirecto en válvulas como los tríodos, tetrodos y pentodos. El filamento tiene la forma de doble espiral de manera que el campo eléctrico que se produce por el paso de corriente de calefacción se anula mutuamente.

En el filamento ocurre un efecto, llamado como Efecto Microfónico, ya que el filamento es susceptible a vibraciones y transmitiéndolas al cátodo, provocando una alteración en el flujo de electrones. La gran mayoría de las válvulas actuales vienen encerradas en un protector o carcasa metálica para evitar dicho efecto.

Típicamente los filamentos necesitan de  $6.3V_{AC}$  o  $12.6V_{DC}$  para su funcionamiento correcto, en los tríodos y pentodos, y  $5V_{AC}$  en los diodos. Para lograr un funcionamiento adecuado es necesario como primera medida calentar solamente el filamento de un tubo por varios minutos para luego si entrar en funcionamiento el resto de electrodos. Algunos investigadores observaron que al trabajar el filamento en un 20% menos de su valor nominal de voltaje, el tubo al vacío aumentaba su vida útil, ya que el hecho de manejar altas temperaturas causa que con las horas de trabajo su calidad y funcionamiento se vea reducida. Es por esto que es de gran cuidado también precauciones el hecho de trasladar un amplificador o un tubo al vacío en caliente, ya que puede causar un mal funcionamiento o el daño permanente en estos.

### **2.2.2 Cátodo**

Es uno de los electrodos, fabricado en níquel, que forman parte de un tubo al vacío y su función es la de emitir electrones para generar un flujo hacia el ánodo. Esta emisión debe ocurrir durante toda la vida útil de un tubo al vacío, pero a medida de su utilización esta emisión se va agotando debido a la cantidad excesiva de calor necesaria para su funcionamiento por lo que la vida útil se ve determinado por la emisión del cátodo.

Operar el cátodo en frío causa también una reducción de su vida útil. También es muy importante la pureza de los materiales con los que está hecho el cátodo, por lo que un material impuro causa también una reducción de su vida y de su calidad sonora.

### **2.2.3 Ánodo**

Es otro de los electrodos que conforman el tubo al vacío y su función es la de atraer esos electrones “suelos” que libera el cátodo. El ánodo para atraer estos electrones debe tener una polaridad positiva muy alta respecto al cátodo.

En el ánodo ocurre el efecto de emisión secundaria pero se elimina con la adición de rejillas dependiendo el tubo al vacío. Este electrodo esta especialmente diseñado

para refrescarse ya que es susceptible a calentarse debido a su proximidad al filamento irradiando esa energía hacia la envoltura de vidrio de la válvula y está fabricado también en níquel.

#### **2.2.4 Vacío**

Este es un tema importante en la válvula, ya que un tubo fabricado con un grado de vacío menor implicaría la presencia de un número mayor de moléculas de gas lo que causa un mayor número de choques de los electrones y reduciendo el rendimiento de la válvula. Un grado mayor de vacío provoca un desgaste acelerado del filamento.

Los metales y otros materiales poseen unas propiedades de absorción y adsorción de los gases presentes en la atmósfera y cuando estos metales son calentados a baja presión los liberan lentamente y aunque el aire de una válvula es extraído completamente, con el tiempo este vacío interior se reduce. Para evitar este efecto, en las válvulas modernas se utiliza el material **getter** (por ejemplo bario o magnesio), que se evapora una vez se sella el tubo al vacío. Este material que se evapora forma en la parte superior de la válvula un recubrimiento brillante y color grisáceo y su función es la de absorber estos gases que se liberan por el vacío. Por esto es normal observar un color gris brillante en la mayoría de las válvulas en su punta superior y de color blanco cuando entra aire al tubo, ya que este material se convertiría en óxido.

#### **2.2.5 Rejilla o Grilla**

Como ya se explicó anteriormente, la rejilla cumple diferentes funciones dependiendo del tubo. Existen tres rejillas: en los tríodos se encuentra la rejilla de control, en el tetrodo se encuentra la rejilla de control más la rejilla de pantalla y en el pentodo se encuentra la rejilla de control, la de pantalla más la rejilla supresora. Cuando en el voltaje de la rejilla-cátodo es negativo, algunos electrones no llegan al ánodo, ya que son repelidos por la rejilla y regresan al cátodo. Los electrones con mayor energía sí llegan hasta el ánodo. Al aplicar voltajes bajos se pueden obtener valores de corriente altos, cumpliendo su labor de amplificación.

## 2.3 TRIODO



**Fig.18** Tríodo 12AX7 EH

Fuente: [22]

Como ya se ha hablado anteriormente, el tríodo es un dispositivo compuesto de tres electrodos, de ahí su nombre dado por el físico W. Eccles; ánodo, cátodo y una rejilla o grilla de control. Actualmente la gran mayoría de los tríodos vienen dobles, es decir que vienen dos tríodos en un mismo empaque de tubo al vacío. Existen en el mercado gran cantidad de tríodos al vacío, pero los más populares son los famosos 12ax7, que fueron creados en 1946. Estos tríodos son generalmente utilizados como etapa de pre-amplificación. Internamente, la función del cátodo es la de emitir electrones al estar en una temperatura elevada, el ánodo que está con una elevada tensión positiva para atraer esos electrones del cátodo y la función de la rejilla es hacer un control sobre el flujo de electrones entre el cátodo y el ánodo haciendo este flujo mayor o menor según varíe el voltaje en esta rejilla. Esto se encuentra descrito por la ley de Child, que habla sobre:

$$i_k = K \cdot (U_g + D \cdot U_a)^{3/2}$$

$i_k$  = Corriente de Ánodo

$U_g$  = Voltaje aplicado sobre la grilla

$U_a$  = Voltaje aplicado sobre el ánodo

$D$  = Conductancia de la grilla

$K$  = Constante que depende de la geometría del tubo

La conductancia  $D$  de la grilla es muy raramente utilizado, por lo que también se puede hablar de  $\mu = 1/D$ , siendo  $\mu$  el factor de amplificación.

Por lo tanto, podemos observar que, debido a que el voltaje sobre el ánodo, la conductancia de la grilla y la constante  $K$  son valores fijos sobre el tubo, las variaciones sobre el voltaje de grilla influyen la corriente de ánodo y se llama grilla de control. Un tubo al vacío es un dispositivo no-lineal debido a que no todos los electrones que salen del cátodo logran llegar al ánodo formando estos electrones una nube de electrones.

### **Tipos de polarización de un triodo**

Existen muchos tipos de configuraciones de los triodos, como lo son el amplificador triodo de cátodo común (llamado single-end Clase A popularmente), cascodo, seguidor cascodo, seguidor de cátodo, seguidor de cátodo con carga activa, seguidor de cátodo blanco, seguidor  $\mu$ , amplificador Push-Pull, SRPP (Shunt Regulated Push-Pull), seguidor  $\beta$ , par diferencial entre muchos otros. Ya está en el criterio del diseñador del amplificador cual tipo de configuración utilizar y del sonido que quiera logra con esta configuración. El músico es quien al final escoge cual producto llevar dependiendo de sus gustos ya que cada tipo de configuración da un sonido diferente.

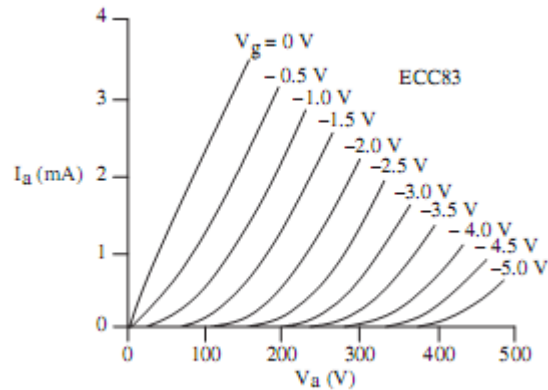
#### **2.3.1 Amplificador Triodo de Cátodo Común**

Este es el tipo de polarización más común y también simple, ya que solo utiliza un solo tubo de vacío para su funcionamiento, pero pueden ser utilizados varios en serie para aumentar su potencia. Es normalmente utilizado en clase A, por lo que todo el tiempo se encontrara encendido y su consumo de energía es alto. Es el tipo de configuración que mayor calidad de sonido ofrece, según la opinión de muchos músicos. Fueron los primeros amplificadores de audio diseñados.

Empezaremos por seleccionar las características del ánodo (Fig. 19), o graficas de Voltaje en ánodo Vs Corriente de ánodo dadas por los fabricantes con el objetivo de hacer una buena selección del punto de operación, ya que debemos buscar como amplificar de una manera lineal y minimizar la distorsión. Primero debemos seleccionar el tipo de triodo a utilizar de acuerdo a sus características, que vienen dadas por el fabricante. Para nuestro estudio utilizaremos las características de ánodo dadas para el triodo 12ax7(o también llamado ECC83). Esta grafica nos



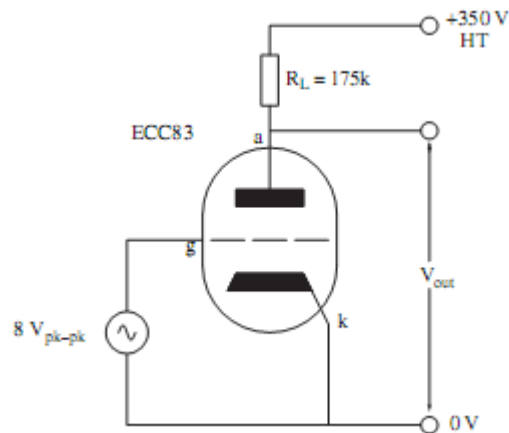
muestra un  $V_a$  (voltaje ánodo) contra una  $I_a$  (corriente ánodo) para diferentes valores de voltaje en la grilla  $V_{gk}$ .



**Fig. 19** Características del ánodo para el tubo 12ax7/ECC83

Fuente: MORGAN Jones [5]

Este tipo de polarización, utiliza en su circuito una resistencia de carga  $R_L$ , conectada entre la fuente de alta tensión HT y el ánodo del triodo. Aplicando un voltaje de entrada entre la rejilla y el cátodo, se puede modular el  $V_{gk}$ , por tanto modificando las condiciones del ánodo. Por eso la grilla es conocida como rejilla o grilla de control.



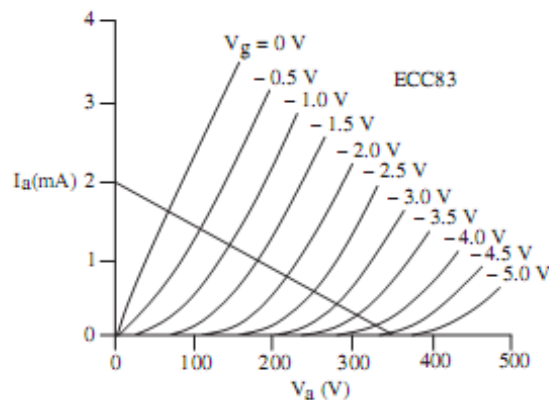
**Fig.19** Amplificador de Cátodo Común

Fuente: MORGAN Jones [5]

Ahora se utilizará una técnica, la cual llamaremos “*Líneas de carga*” para trabajar sobre las características de ánodo del tubo seleccionado, en este caso el 12ax7/ECC83 y poder obtener información para el diseño de este tipo de circuito.

Según la ley de Ohm, sino no hay un flujo de corriente sobre la resistencia  $R_L$  tampoco habrá sobre la válvula y no habrá voltaje sobre el resistor, entonces toda la alta tensión (HT) del circuito estará sobre la válvula, y podemos marcar este punto sobre la grafica de las características de ánodo ( $V_a = HT = 350V$ ,  $I_a = I_R = 0$ ). Se puede argumentar que si no hay voltaje sobre la válvula, entonces todo la HT deberá caer sobre el resistor  $R_L$ : podemos calcular la corriente sobre el resistor, y por consiguiente la válvula ( $R_L=175k$ ,  $HT=350$ ,  $I_a= 2mA$ ). En la grafica esta línea de  $I_a=2mA$  y  $HT=350V$  es conocida como la línea de carga. Esta es la pieza de análisis más sencilla de análisis que puede ser utilizada sobre la etapa valvular. Hemos definido la corriente de ánodo para cualquier valor de voltaje de ánodo, usando de  $HT=350 V$  y una carga de ánodo de  $175k$ . Si se desea cambiar la carga de ánodo o HT debemos recalcular y redibujar esta línea de carga.

Si miramos sobre esta línea de carga, observaremos que hay una intersección de varios puntos con las líneas de  $I_a/V_a$  para diferentes valores de  $V_{gk}$ . Esto significa que para diferentes valores de  $V_{gk}$  se causaran cambios predecibles en voltaje de ánodo y se podrá entonces calcular la ganancia de la etapa.

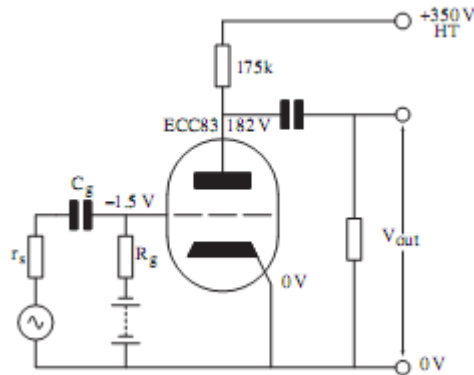


**Fig. 20** Línea de carga sobre las características de ánodo.  
Fuente: MORGAN Jones [5]

Supongamos que se aplica un voltaje senoidal de 4V a la entrada de este circuito. Al empezar por 0V se observa que empieza la línea de voltaje de grilla  $V_{gk}=0V$  y su intersección con la línea de carga, esto ocurre en un  $V_a \approx 72V$ . Ahora con un voltaje de entrada de -4V, y vemos su intersección con esta línea de carga ocurre en un  $V_a \approx 332V$ , por lo que deducimos que hay un  $\Delta V = 260V$  y podemos decir que el amplificador invierte, ya que se obtiene una ganancia de -65 (este signo menos nos dice que es un amplificador inversor).

Se observa por lo tanto que el circuito anterior no solo distorsionó, sino que superpuso el voltaje DC del ánodo a la señal de salida (ya que el ánodo se

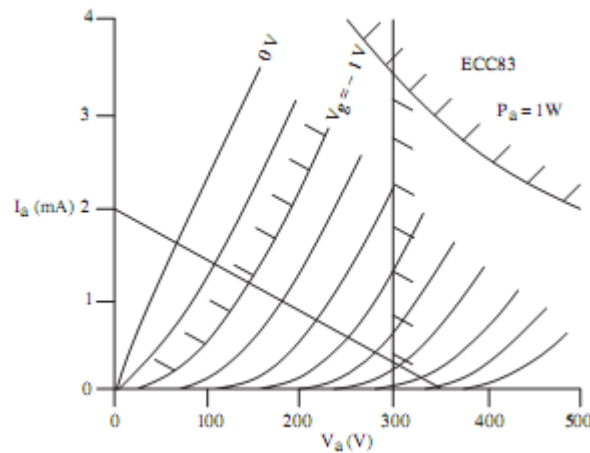
encuentra polarizado a un voltaje DC), entonces se añade un capacitor y un resistor en la salida para bloquear la componente DC de esta señal de salida.



**Fig. 21** Polarización de la rejilla con una fuente adicional DC  
Fuente: MORGAN Jones [5]

La válvula es polarizada sobreponiendo un voltaje de polarización en la rejilla a través de  $R_g$ , la cual evita que la batería ponga en corto al oscilador.  $C_g$  es el capacitor de acoplamiento para evitar que el oscilador ponga en corto a la batería, y  $r_s$  es la resistencia de salida del oscilador.

Se puede analizar de la línea de carga que a medida que el  $V_a$  crece, las curvas de la rejilla empiezan progresivamente a agruparse unas con otras, indicando una no-linealidad, y es una particularidad grave cuando  $V_a$  esta cerca al voltaje HT. Esta región es conocida como Cut-Off o zona de corte, porque el flujo de corriente empieza a cortarse. Trabajar cerca a esta zona no es recomendable si es necesaria una buena linealidad por tal razón seleccionamos un punto medio. Para la válvula 12ax7 (Marca Mullard) su datasheet utiliza como ejemplo un  $V_{gk} = -1V$  como comienzo de su área de operación segura.



**Fig. 22** Área de operación segura  
Fuente: MORGAN Jones [5]

Si ahora analizamos en dirección opuesta de esta zona, notamos que encender la válvula es difícil, hasta que finalmente no habrá voltaje en esta. Como la rejilla se empieza a hacer menos negativa, llega un momento en que los electrones que abandonan el cátodo ya no son repelidos y controlados por la rejilla, sino que son atraídos a ella y fluyen a través suyo hacia tierra. Lo que provoca la resistencia de entrada a la válvula, la que anteriormente podría ser considerada como infinita, es que descienda a un valor suficientemente bajo que empieza del oscilador de la resistencia de salida. Porque esta atenuación solo ocurre en los picos positivos en la grafica de entrada, esto causa distorsión en la señal de entrada, a pesar de que la válvula de precisión amplía la red de tensión.

Para la selección del punto de operación se debe tener en cuenta algunas restricciones importantes como lo es el voltaje ánodo de polarización máximo,  $V_a$ , que la válvula puede soportar y viene especificado en el datasheet. Sobrepasar estos límites nos puede causar la destrucción de la válvula.

### 2.3.2 Condiciones en el punto de operación

En general, hay dos factores principales (y usualmente en conflicto): máximo voltaje de oscilación y linealidad. Si se desea mirar el voltaje máximo de oscilación, entonces se debería establecer un punto de desviación a  $V_a=225V$ , para permitir la oscilación en ánodo hasta  $300V$  y por debajo hasta  $150V$  (ya que la grafica anterior nos muestra un valor máximo de  $300V$  y un mínimo de  $150$  donde encontramos un área de operación segura); esto debe estar establecido por la polarización de rejilla  $V_{gk}$  hasta  $-2.1V$ .

Sin embargo, podría ser que nos interese más la linealidad que en la máxima oscilación. Los tríodos producen principalmente armónicos secundarios de distorsión, que son generados por el amplificador teniendo una ganancia desigual

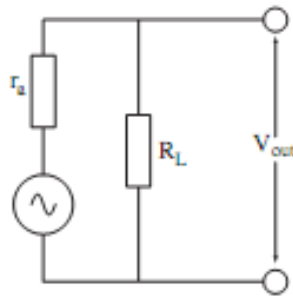
en el semi-ciclo positivo de la onda comparado con el semi-ciclo negativo, y la distorsión es directamente proporcional a la amplitud. Para maximizar la linealidad, deberíamos buscar un punto de funcionamiento donde la distancia hasta la primera línea de la red a ambos lados del punto de funcionamiento sea, lo más posible, iguales. En esto caso deberíamos desviar el voltaje ánodo a 182V aplicando -1.5V a la red o rejilla.

Ahora se determinará la amplificación de voltaje  $A_v$ , o ganancia, de la etapa. Hacemos mirando la misma distancia a ambos lados del punto de funcionamiento a la primera intersección con una línea de la red, tomando nota del voltaje de ánodo:

*Ganancia ( $A_v$ ) = Cambio en voltaje de ánodo / Cambio en voltaje de rejilla*

$$A_v = \frac{\Delta V_a}{\Delta V_g} = \frac{220 - 148}{1 - 2} = -72$$

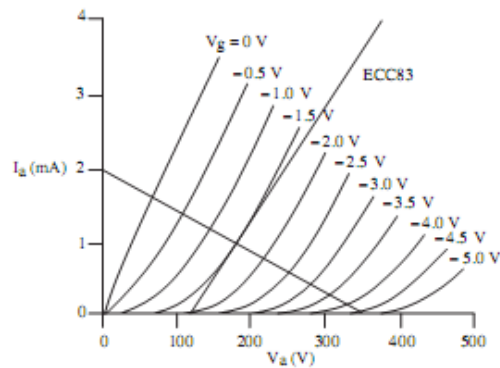
Luego, se determina un parámetro importante. La resistencia de salida, conocida como la resistencia de ánodo,  $r_a$ . Recuerde que como es un parámetro AC, se le da una letra minúscula y es muy distinta a  $R_L$ , la carga de ánodo. Esta resistencia es un paralelo con la resistencia de carga de ánodo que forma la resistencia de salida  $r_{out}$ .



**Fig. 23** Equivalente Thévenin del ánodo del tríodo.

Fuente: MORGAN Jones [5]

Para encontrar  $r_a$ , se observan las características de ánodo y se dibuja una tangente a la curva que toque al punto de operación. Lo que se pretende hacer es medir la pendiente de la curva en este punto y sacar los valores en estos puntos. El propósito es obtener un triangulo resultante a partir de la cual tomamos nuestros valores, lo más grande posible a fin de reducir al mínimo los errores.



**Fig.24** Determinación resistencia interna de ánodo  $r_a$

Fuente: MORGAN Jones [5]

Para esto tomamos el valor de  $V_a$  para el máximo valor  $V_{gk}$  presente en la grafica. En la característica de ánodo notamos que el mayor valor de  $V_{gk}$  es  $-5V$  y en este valor, el  $V_a \approx 382V$  y tomamos el valor de  $V_a$  cuando la línea tangente que dibujamos cruza con este eje, el cual es 121. Para los datos de la, tomamos el valor máximo que nos muestra la grafica o el datasheet y 0 que es el valor mínimo.

La resistencia de ánodo  $r_a$  puede ser calculada ahora por:

$$r_a = \frac{\Delta V_a}{\Delta I_a} = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} = \frac{382 - 121}{4 - 0} = 65 \text{ k}\Omega$$

La Resistencia de salida  $r_{out}$  es simplemente  $r_a$  en paralelo con  $R_L$ , lo que resulta en un valor de  $47k\Omega$ . Este es un gran valor de resistencia de salida, y es consecuencia de que se usa un alto valor de  $\mu$ , ya que tienden también a tener un valor alto de  $r_a$  en operación.

### 2.3.3 Determinación de Parámetros Dinámicos

Anteriormente hemos analizado el comportamiento de la válvula gráficamente, pero este no es el único método. Hay tres parámetros que definen completamente las características de la válvula, siempre que estos sean evaluados en el punto de operación.

Estos parámetros son:

$\mu$ (mu) = factor de amplificación(sin unidades)

gm = Conductancia mutua( usualmente mA/V)

$r_a$  = resistencia de ánodo

**2.3.3.1 El factor de amplificación está definido por:**

El factor de amplificación de una válvula es la proporción de cambio en el voltaje de ánodo  $V_a$  al cambiar la tensión de red o rejilla  $V_g$  con una corriente de ánodo que se mantiene constante

$$\mu = \frac{\Delta V_a}{\Delta V_g}$$

Las válvulas son frecuentemente clasificadas por su factor de ganancia como:

Bajo  $\mu$ : < 8 (Tríodos 6080 = 2, 12B4A = 6.5)

Medio  $\mu$ : 8-30 (Tríodos 76=13.8, ECC82=18, 6SN7=20)

Alto  $\mu$ : > 30 (ECC81=65, 6SL7=70, ECC83=100, ECC807=150, WE416=250)

Estos valores de  $\mu$  están dados en la gran mayoría de datasheet de los tríodos.

Se puede observar el valor del factor de amplificación del tríodo 12ax7EH, de la empresa ElectroHarmonix.

Plate current (Eb= 250V, Ec= -4V)	10 $\mu$ A
Transconductance, not less than (see note below)	1.4 mA/V
Amplification Factor, not less than (see note below)	78
Amplification Factor (nominal)	92
Transconductance (nominal)	1.7 mA/V
Plate Resistance (nominal)	54.1 K OHM
Max Neg. Grid Voltage	55 V

**Fig. 25 Fragmento del datasheet 12ax7 EH**

Fuente: Ver Anexos. Datasheet 12ax7 EH

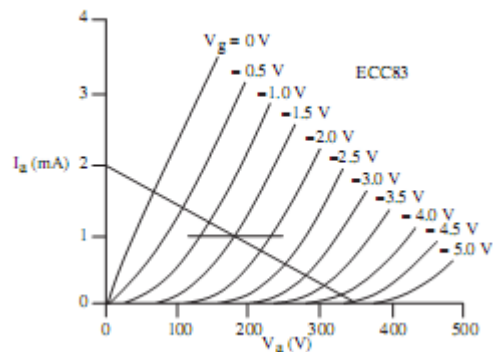
El valor de este factor de amplificación varía un poco dependiendo del fabricante, el cual se puede observar con el siguiente tríodo ECC83 S del fabricante J/J.

En la otra figura se puede observar como varía el factor de amplificación dependiendo del tríodo a utilizar, aun siendo del mismo fabricante. En este caso se observa el tríodo ECC82 del fabricante J/J

<b>ECC83 S</b>	<b>ECC82</b>
<b>R. F. DOUBLE TRIODE</b> <b>Base: NOVAL</b>	<b>R. F. DOUBLE TRIODE</b> <b>Base: NOVAL</b>
$U_f = 6,3/12,6 \text{ V}$ $I_f = \text{ca.}300/150 \text{ mA}$	$U_f = 6,3/12,6 \text{ V}$ $I_f = \text{ca.}300/150 \text{ mA}$
<b>Typical characteristic:</b>	<b>Typical characteristic:</b>
$U_a = 250 \text{ V}$ $U_g = -2 \text{ V}$ $I_a = 1,2 \text{ mA}$ $S = 1,6 \text{ mA/V}$ $R_i = 62,5 \text{ k}\Omega$ $\mu = 100$	$U_a = 250 \text{ V}$ $U_g = -8,5 \text{ V}$ $I_a = 10,5 \text{ mA}$ $S = 2,2 \text{ mA/V}$ $R_i = 7,7 \text{ k}\Omega$ $\mu = 17$

**Fig. 26 Fragmento del datasheet ECC83S marca J/J**  
**Fuente: Datasheet ECC82 marca J/J [23]**

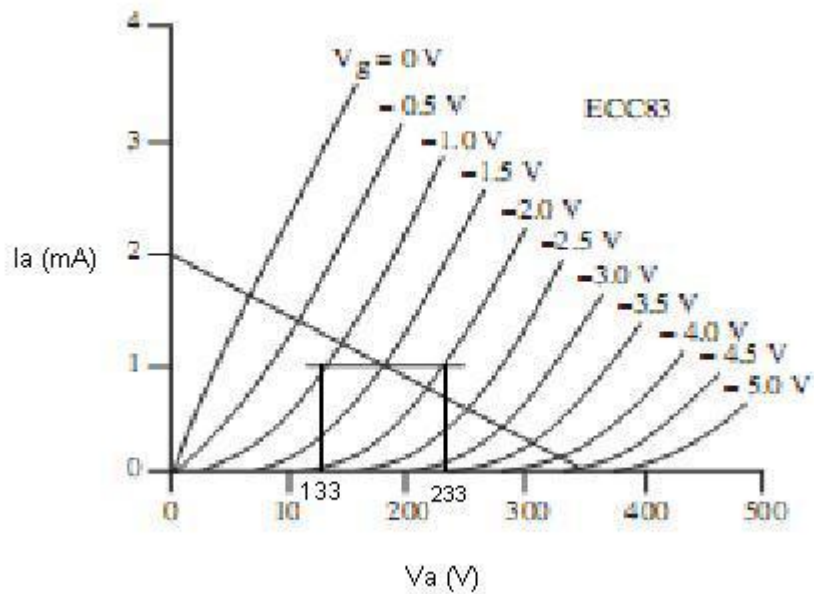
Ahora para poder medir  $\mu$  en el punto de operación lo que se hace es dibujar una línea horizontal a través de este punto de operación, lo que equivale a  $R_L = \infty$ , y se calcula la ganancia como antes, observando las intersecciones con la curva de voltaje de grilla  $V_{gk}$ .



**Fig. 27 Determinación de  $\mu$**   
**Fuente: Fuente: MORGAN Jones [5]**



Como el punto de operación está sobre la curva de  $V_{gk} = -1.5V$ , esta línea horizontal que se dibuja debe tocar la siguiente curva  $V_{gk}$  que es  $-2V$  y debe tocar también la curva anterior la cual es  $-1V$ . Una vez hecho esto, estas dos intersecciones nos dan unos valores de  $V_a$  el cual utilizaremos más adelante.



**Fig. 28 Valores de  $V_a$  para determinación de  $\mu$**   
Fuente: MORGAN Jones [5]

Hallando  $\mu$

$$\mu = \frac{233 - 133}{2 - 1} = 100$$

Ahora en lugar de utilizar las líneas de carga “loadlines”, se puede usar una fórmula para determinar la ganancia de voltaje  $A_v$ , de la etapa de amplificación.

$$A_v = \mu \cdot \frac{R_L}{R_L + r_a} = 100 \cdot \frac{175}{175 + 65} = 73$$

Por tanto se puede decir que  $\mu$  es uno de los valores más estables en los parámetros valvulares. Sin embargo, este método no es ideal, ya que la precisión de la respuesta final depende de cuan preciso se pueda dibujar las tangentes. Esto es, sin embargo, completamente recomendado como un control de la exactitud de sus predicciones.

### 2.3.3.2 Conductancia mutua y resistencia de ánodo

La conductancia mutua **gm** de una válvula es la relación entre el cambio en la corriente de ánodo,  $\Delta I_a$ , con el cambio de voltaje  $\Delta V_g$ , con el voltaje de ánodo constante.

$$g_m = \frac{\Delta I_a}{\Delta V_g}$$

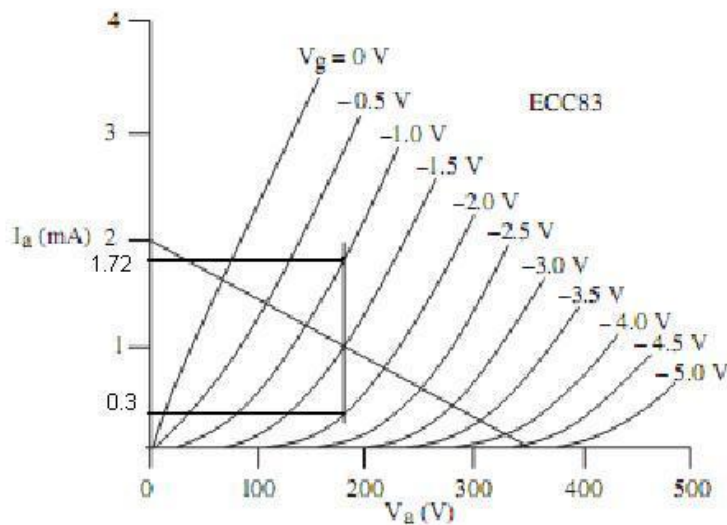
Anteriormente se hablo de la resistencia de ánodo  $r_a$  el cual está dado por la relación de cambio en el voltaje de ánodo  $\Delta V_a$  al cambio de la corriente de ánodo  $\Delta I_a$ , con el voltaje de rejilla constante.

$$r_a = \frac{\Delta V_a}{\Delta I_a}$$

Por lo que teniendo ahora esos tres parámetros, se pueden unir en la siguiente ecuación:

$$g_m = \frac{\mu}{r_a}$$

Normalmente estos parámetros de  $\mu$  y  $r_a$  vienen dados en los datasheet de cada trío, pero se puede calcular de una manera teórica dibujando simplemente una línea vertical a través del punto de operación (quedando  $V_a$  constante), y midiendo el cambio en la corriente de ánodo. Sin embargo, es inmediatamente evidente que el cambio de 1.5V a 1V es considerablemente mayor que el cambio de 1.5V a 2V, y tomando el valor medio a partir de 1V a 2V no da una cifra exacta de **gm** en el punto de operación.



**Fig. 29 Determinación grafica de gm**

Fuente: MORGAN Jones [5]

Por lo que con los datos que se dan en esta grafica se puede determinar el valor de gm como:

$$gm = \frac{172 - 0.3}{1 - 2} = 1.42 mA/V$$

También se puede conocer el valor de gm utilizando los valores determinados anteriormente de  $\mu$  y  $r_a$ .

$$gm = \frac{100}{65} = 1.54 mA/V$$

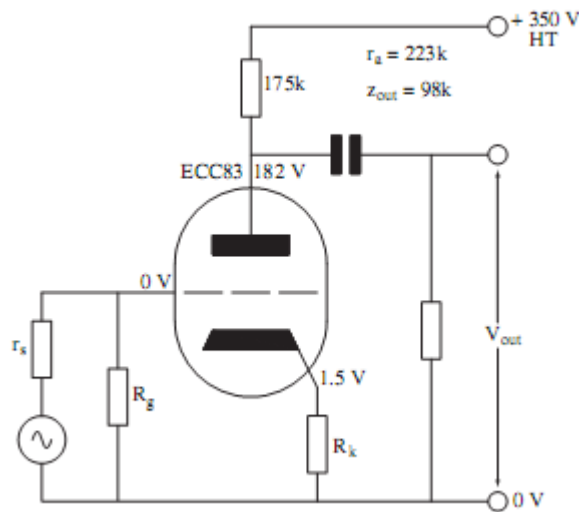
Lo cual observamos una variación entre el método grafico directo sobre las características de ánodo y el método de utilización de los valores de factor de amplificación y resistencia de ánodo hallados anteriormente. También podríamos utilizar los valores que los datasheet nos entreguen.

### 2.3.4 Polarización del Cátodo

Con los procedimientos anteriores se ha seleccionado el punto de operación y se ha evaluado las características dinámicas de la etapa de amplificación, ahora lo que se quiere es implementar de una manera práctica esta etapa. Mientras que podemos polarizar la grilla usando una batería (Ver **Fig. 26**), es inconveniente desmontar el amplificador solo para cambiar la batería. Sin embargo, las baterías de litio con una

vida útil de diez años están ahora disponibles, de este modo el reemplazo de una batería podría ser quizá menos frecuente que un reemplazo de una válvula. Pero al final no es algo muy conveniente y tampoco algo usado comúnmente.

Un método alternativo para solucionar esto es insertar una resistencia de cátodo o resistencia de polarización del cátodo, entre el cátodo y la tierra, y conectar la rejilla o grilla a tierra a través de una red de resistencias de fuga. Convenientemente, la rejilla está ahora en 0V, entonces no necesitaremos un capacitor de acoplamiento.



**Fig. 30 Circuito con resistencia en grilla y cátodo**

Fuente: MORGAN Jones [5]

Ahora para entender la operación de esta etapa de una mejor manera, se asume una válvula perfecta que no pase una corriente de rejilla inclusive si  $V_{gk}=0$ .

Inicialmente allí no hay un flujo de corriente a través de la válvula. En este caso, no habrá caídas de tensión a través de la resistencia de que hemos adicionado anteriormente, resistencia de polarización del cátodo, y el cátodo será 0V. La rejilla está a 0V, entonces  $V_{gk}$  debería ser 0V. Esto hará que la válvula para llevar a cabo en gran medida, pero como lo hace, la corriente de ánodo (la cual en un triodo es igual a la corriente de cátodo) fluya a través de la resistencia de polarización del cátodo, causando una caída de voltaje a través de ella. Esta caída de voltaje causa que el voltaje de cátodo crezca,  $V_{gk}$  cae, y un equilibrio en la corriente de ánodo se alcanza.

Se puede comenzar con el punto de operación hallado anteriormente, por tanto conocemos la corriente de cátodo y ánodo. Sabemos cual valor de  $V_{gk}$  necesitamos. Si la rejilla esta en 0V, entonces el cátodo debería ser  $+V_{gk}$ . Si se

conoce el voltaje a través, y la corriente, una resistencia desconocida, entonces es una simple manera de aplicar la ley de Ohm y encontrar el valor de ese resistor. En el ejemplo se escoge para situar nuestro punto de operación a 182V. Se podría leer la corriente de ánodo directamente, pero es más exacto en esta instancia calcular la corriente usando la ley de Ohm. Esto es porque podemos leer el valor de  $V_a$  con mayor precisión.

$$I_a = \frac{HT - V_a}{R_l} = \frac{350 - 182}{175} = 0.96mA$$

Conocemos que el voltaje cátodo es 1.5V, entonces la resistencia polarización de cátodo es:

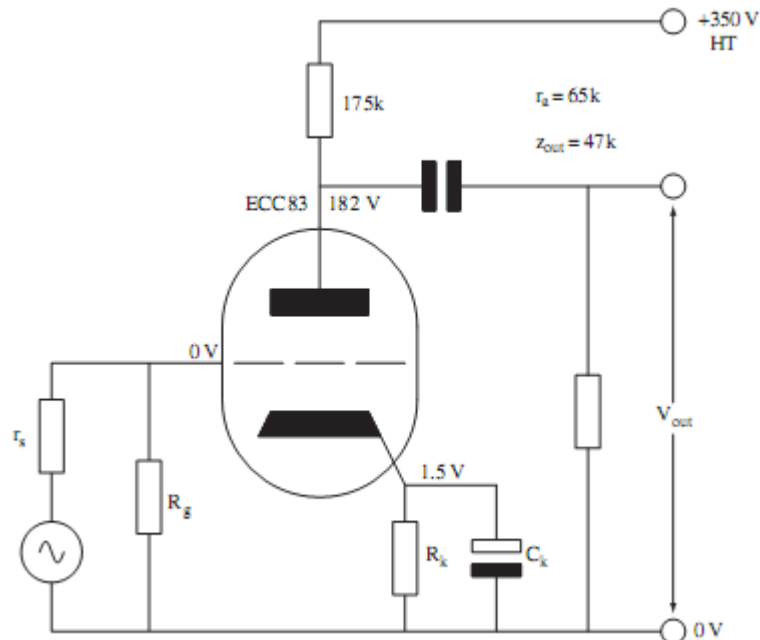
$$R_k = \frac{1.5}{0.96} = 1.56K\Omega$$

### 2.3.5 Condensador de desacople en el cátodo $C_k$

La adición de esta resistencia polarización del cátodo causa una retroalimentación negativa y reduce la ganancia. Esto puede no ser siempre deseable, entonces se considera la manera de cómo prevenir ahora esta retroalimentación.

Ya que la señal de salida es derivada del cambio de  $I_a$  a través de  $R_L$ , e  $I_a$  también fluye a través  $R_k$ , se debe generar una señal de voltaje en  $R_k$ . La señal de voltaje a través de  $R_k$  está en fase con la señal de entrada, pero porque la válvula responde a los cambios en  $V_{gk}$ , el cual es la diferencia entre el  $V_g$  y el  $V_k$ , se tiene una reducción, y ahora se ha logrado reducir el voltaje de conducción disponible para la válvula.

Con el fin de restaurar la ganancia máxima, hay que suprimir la retroalimentación de voltaje producida en el cátodo con un capacitor de desacoplamiento o de polarización. El capacitor debería ser de suficientemente baja reactancia y que trate ser un corto circuito en todas las frecuencias de AC de interés. En relación con la resistencia de salida al cátodo, se forma un filtro pasa-bajo local.



**Fig. 31 Nuevo circuito con capacitor de desacople en cátodo**

Fuente: MORGAN Jones [5]

Ahora se necesita conocer cual resistencia ve el condensador desde su terminal positiva a tierra. Claramente se ve la resistencia  $R_k$ , pero también se ve la resistencia de cátodo de la válvula. La resistencia dentro del cátodo es:

$$r_k = \frac{R_L + r_a}{\mu + 1}$$

Se puede ver la fuente de alta tensión a través de la resistencia serie de  $r_a$  y  $R_L$ , pero esto es dividido por el factor  $(\mu + 1)$  debido a la ganancia de voltaje interno de la etapa. Si ahora colocamos algunos valores en la ecuación, tendremos:

$$r_k = \frac{175 + 65}{100 + 1} = 2.38k\Omega$$

En paralelo con la resistencia cátodo polarización de  $1.56k\Omega$  esta da una total de ( $r'_k$ ) de  $946\Omega$ .

En audio, usualmente se consideran frecuencias debajo de 20Hz, pero eso implicaría trabajar con ruidos “hum” de los 60Hz y ya que una guitarra eléctrica nos dará frecuencias sobre los 70Hz, se podría trabajar con frecuencias mayores a esta. En adición, allí estarán un número de etapas de amplificación, cada una con filtros, por lo tanto el efecto es acumulativo. El filtro estará hecho con capacitores electrolíticos, los cuales son conocidos por su tolerancia inicial o estabilidad de su valor, entonces la frecuencia de filtrado debería ser mucho menor que otra frecuencia de filtrado en el amplificador. También se ha argumentado que una buena respuesta de baja frecuencia es necesaria no solo para mantener la amplitud de la respuesta correcta, pero para garantizar que los efectos en fase y respuesta transitoria (que se extiende en la banda a un factor de diez veces la frecuencia de corte del filtro) son mantenidos en un mínimo. Teniendo todos esos factores en mente, es usual diseñar para una frecuencia de corte de 1KHz:

$$C_K = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot r'_K} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 1 \cdot 946} = 170 \mu F$$

Solo para este ejemplo se toma como frecuencia de corte de 1Khz. Dado este valor del condensador, el valor comercial más cercano es de 220  $\mu F$ . También se puede analizar con este resultado que válvulas con valores bajos de  $r_K$  no son muy comunes ya que demandarían grandes valores de capacitancia no comerciales o no adaptables en precio y tamaño a un amplificador.

Se puede concluir con este capacitor de desacople en cátodo que él en parte sirve como un controlador del grado de la reducción de frecuencias bajas. Generalmente un capacitor de 25  $\mu F$  deja pasar todas las frecuencias. Algunos diseñadores hablan sobre un condensador en paralelo con la placa o ánodo sirve como atenuador de altas frecuencias y que es muy común en amplificadores para bajos eléctricos.

### 2.3.6 Selección de la resistencia de rejilla $R_g$

Aunque hemos mostrado la resistencia de rejilla, también llamada resistencia de fuga de grilla, anteriormente, pero no le hemos asignado un valor. Históricamente, este ha sido generalmente de 1M $\Omega$  para etapas de pequeñas señales, pero algo inferior a la etapa de potencia. Es necesario hacer este valor de resistencia tan alto como sea posible por varias razones.

La resistencia de fuga de la rejilla o  $R_g$  forma un divisor de potencia en conjunto con la resistencia de salida procedente de la etapa anterior, y por lo tanto causa una baja de ganancia. Esta baja de ganancia es generalmente muy pequeña, pero acumulada, a las salidas de amplificadores de cuatro etapas, la ganancia podría ser significativamente menor que la predicha si esta ganancia no se tiene en cuenta. Esta resistencia normalmente establece un acople de impedancias entre las etapas causando lo dicho anteriormente.

La segunda razón es que un valor grande de este resistor permite al capacitor de acoplamiento entre etapas ser pequeño como sea posible para un corte de frecuencias bajas.

En la práctica siempre hay una pequeña corriente de fuga de la rejilla a tierra, en parte porque siempre habrá cierta contaminación de la rejilla con un revestimiento de oxido usado para formar la superficie emisor del cátodo, sino también por el flujo de gas. Se dice que esta resistencia es una fuga de la rejilla debido a que cuando un electrón golpea una molécula de gas puede tener suficiente energía para desplazar un electrón de la molécula del exterior. Los dos electrones resultantes entonces continúan sus caminos hacia al ánodo, pero la molécula de gas esta ahora cargada positivamente (porque ha perdido un electrón) y es repelido por el ánodo, entonces este viaja hacia la rejilla/cátodo. Cuando la molécula cargada, conocida como ION, golpea la rejilla, un electrón inmediatamente fluye a través de la resistencia de fuga para descargarse. A medida que más electrones fluyen del cátodo al ánodo, las colisiones aleatorias entre electrones y moléculas de gas son cada vez más probables, de modo que la corriente de iones dentro de la rejilla aumenta con la corriente de ánodo.

Dicho de otra manera, proporciona un camino de corriente continua para los electrones que a partir del cátodo son recogidos por la rejilla de control. Como la corriente de D.C de rejilla es mucho menor de  $1\mu A$  y  $R_g$  generalmente está comprendida entre 0.5 y  $1M\Omega$ , la caída de tensión de DC en  $R_g$  es mucho menor de 1V y tiene un efecto despreciable en la tensión de reposo entre rejilla y cátodo.

El fabricante de válvulas, Mullard <sup>1</sup>, publica en su libro una manera de cómo determinar el máximo valor permisible para esta resistencia de fuga de rejilla. Para determinar este valor, necesitamos conocer  $R_K$  y  $g_m$  ( $R_K = 1.56k$ ,  $g_m = 1.54 \text{ mA/V}$ ). Primero, la resistencia efectiva DC del circuito es encontrada usando:

$$R_{K(EFFECTIVA)} = R_K + \frac{1}{g_m} = 1.56 + \frac{1}{1.54} = 2.21K\Omega$$

<sup>1</sup> Mullard (1969, Book 2 Part 1: Receveing valves and television picture tubes, General Operational Recommendations, p.17)



### **2.3.7 Selección de la capacitancia de acople en la salida**

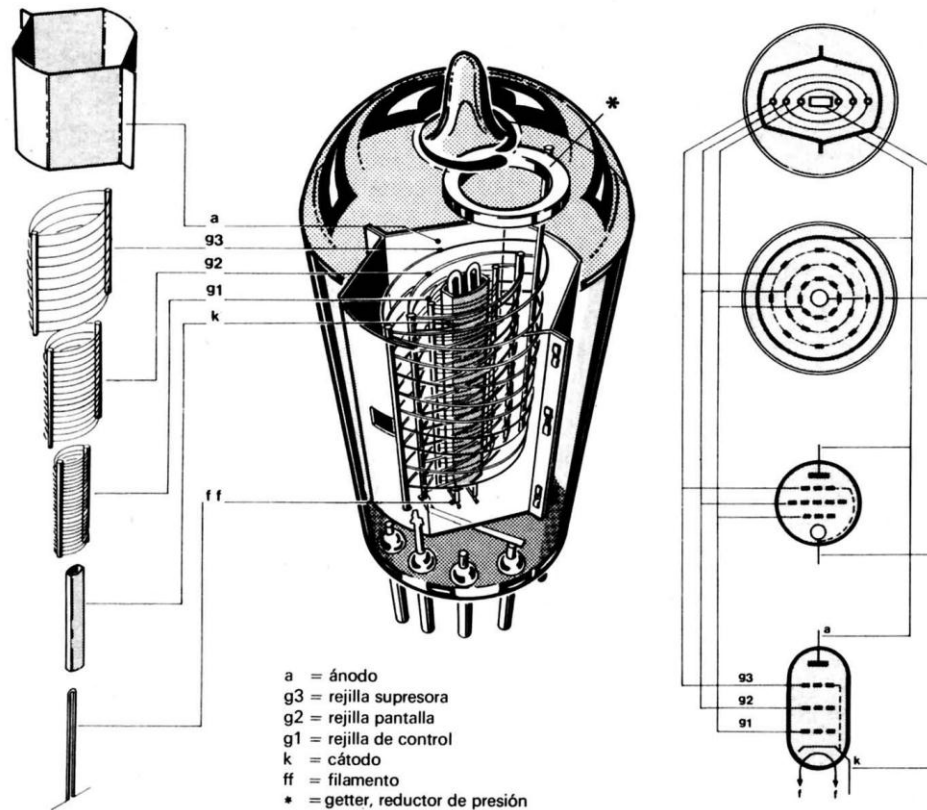
Esto es actualmente algo de un término, ya que es en realidad protección para la entrada de la siguiente etapa del voltaje de ánodo de la primera etapa, sino porque la entrada de una etapa valvular es usualmente un acople DC, el capacitor de acoplamiento empieza a ser con la etapa anterior.

El primer y más obvio punto de observación es que el capacitor debe ser capaz de soportar el voltaje de ánodo que se le aplica. Lo que no es tan obvio es que debe ser capaz de soportar el máximo posible voltaje de la fuente de alimentación. Amplificadores modernos son frecuentemente contruidos usando rectificadores de silicón para la fuente de alimentación. Esto significa que en el instante de encendido, el cátodo de la válvula puede estar frío, causando una corriente de ánodo en cero. Debido a que la fuente de alimentación está descargada, se eleva a su máximo valor posible, y esta tensión aparece directamente a través de los condensadores de acoplamiento. Si ellos fallan catastróficamente, entonces la válvula comienza a calentarse, la gran polarización positiva en la rejilla causa una gran conductividad. La válvula puede ser destruida.

Usar capacitores con voltaje altos puede ser costoso, pero es más económico que tener que reemplazar una válvula costosa o un parlante, pero limitándonos a lo encontrado en el mercado y su precio. El único revés es garantizar que la fuente de alimentación nunca estará presente antes que el calentador este caliente. Usualmente esto significa dejar el calentador siempre encendidos, lo que es práctico y beneficioso para pre-amplificadores, pero no dejarlos encendidos en amplificación de potencia. Un retraso es necesario, y rectificadores de válvulas son la solución tradicional.

## 2.4 PENTODO

Como ya se hablo de él anteriormente, el pentodo es un tubo de vacio el cual evoluciono del tetrodo, con el objetivo de reducir la emisión secundaria que se generaba en el tetrodo y cuanto con cinco electodos y funcionalmente muy parecido al tríodo.



**Fig. 32 Pentodo internamente**

Fuente: [24]

El pentodo trabaja al colocarle una muy gruesa rejilla, la rejilla o malla supresora  $g_3$ , conectada al cátodo, entre  $g_2$  y el ánodo, en seguida de la pantalla  $g_2$  desde el ánodo. El resultado de esto es que la emisión de electrones a alta velocidad desde el cátodo pasa directamente por la rejilla supresora, pero los electrones secundarios de baja velocidad emitidos desde el ánodo son apantallados por  $g_2$  y regresan al ánodo. Porque la emisión secundaria de electrones del ánodo ya no son atraídos por  $g_2$ , el pliegue en las características de ánodo del tetrodo se evita. En algunos

pentodos que se encuentran en el mercado esta rejilla supresora se encuentra conectada internamente al cátodo. El pentodo presenta varias ventajas respecto a otros tubos, ya que tiene mejor linealidad que el tríodo, son de construcción más sencilla, usado como un tubo de potencia es más fácil de manejar ya que su pendiente en su curva característica es más alta, poseen una impedancia de salida menor que un tríodo por lo tanto es de mayor facilidad su acople con los transformadores de salida.

### 2.4.1 Grafica Característica del Pentodo

Analizando las curvas características del pentodo de pequeña-señal EF86 para  $V_{g2} = 100V$ , veremos que las curvas de ánodo son cercanamente horizontales. Se pueden señalar varias conclusiones de este hecho.

Primero, las características propias del pentodo son muy similares a las características de un transistor bipolar, e indican una resistencia de ánodo que es suficientemente alta para la mayoría de los propósitos prácticos. Esta puede ser tomada para ser infinita. La resistencia de salida de la etapa de pentodo es por consiguiente  $R_L$ .

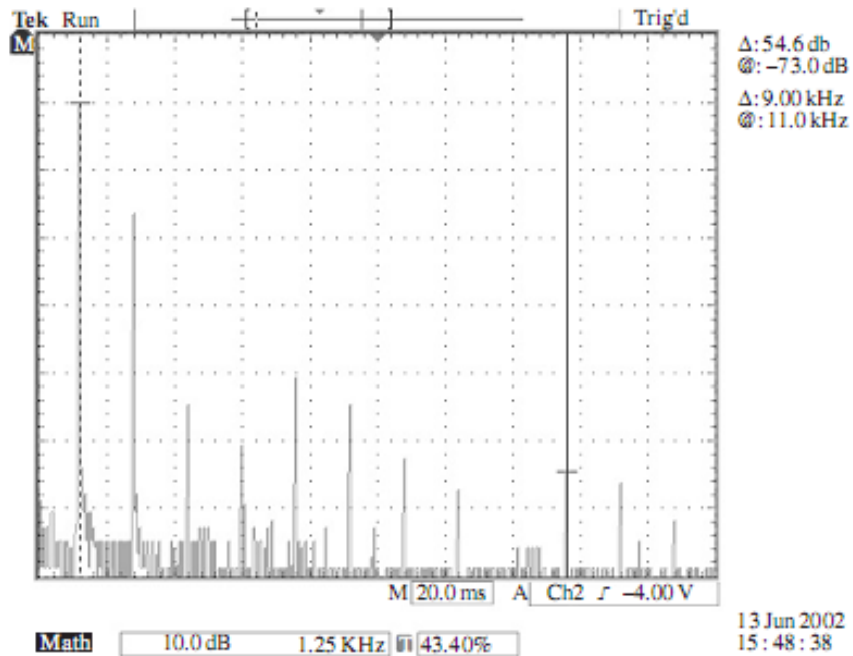
Segundo, el ánodo es capaz de oscilar más cercano a 0V que un tríodo, y se puede obtener un gran voltaje de salida pico-pico. Esto tiene una gran implicación de eficiencia, y hace del pentodo una buena elección para etapas de alto voltaje.

Tercero, la forma de la curva del pentodo (igual al transistor) de  $V_a$ ,  $I_a$ , es exponencial por lo tanto:

$$I_a \propto (1 - e^{-k.V_a})$$

Esta relación no solo traduce en la producción del pentodo de armónicos pares de distorsión, pero los armónicos se extienden mucho más arriba en el espectro que un tríodo.

Por ejemplo, un pentodo E55L fue polarizado a  $I_a = 50mA$  con una resistencia de ánodo de  $4.7k\Omega$  y alimentado con 410V. La etapa recortada a  $\approx 73V_{rms}$ , y se puso a prueba para distorsión a una salida de  $\approx 50V_{rms}$ , lo cual la etapa produjo 1.3% THD, pero se puede notar que el espectro de distorsión muestra hasta 12 armónicos.



**Fig. 33 Espectro del pentodo E55L**

Fuente: MORGAN Jones [5]

En contraste, la forma de la curva de ánodo del tríodo es una ley de potencia:

$$I_a \approx V_a^{3/2}$$

Esta ecuación puede ser aproximada usando series binomiales, y aunque contiene términos impares ( $x^3, x^5, \dots$ ) y pares ( $x^2, x^4, \dots$ ), indicando armónicos impares y pares, los términos mueren rápidamente, por lo que no hay necesidad de analizar más allá del 6º armónico en el testeado de tríodos). Podemos por lo tanto esperar que el tríodo produzca 2º armónicos predominantes de distorsión.

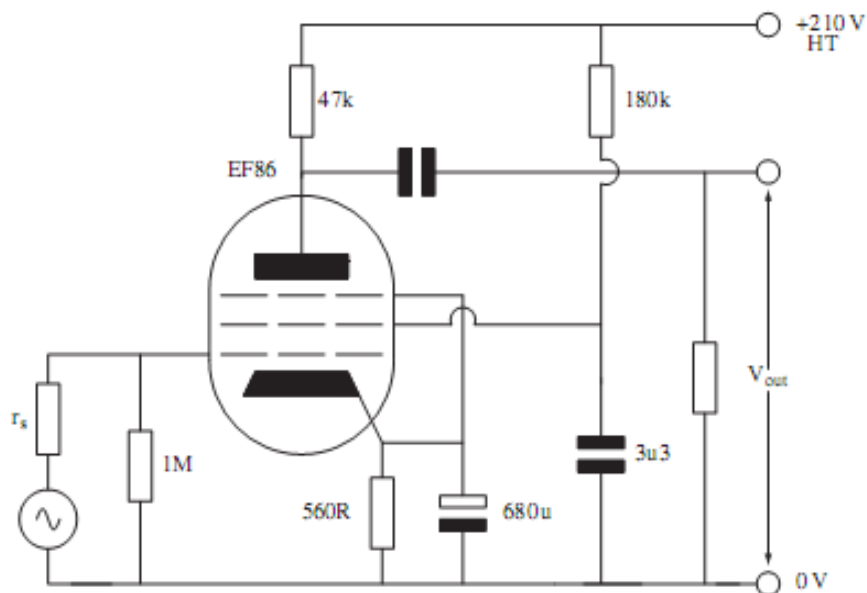
**El tipo de distorsión producida es importante porque el oído es mucho más tolerante a los armónicos pares que los impares, en parte porque el mismo oído produce incluso armónicos de distorsión pares, sino también porque los armónicos impares ya no están relacionados musicalmente con el fundamental sino con el sonido discordante.**<sup>23</sup>

La medida de distorsión de un amplificador pentodo debe ser muy inferior a la medida de distorsión de un tríodo amplificador, ya que el efecto subjetivo es mucho mayor y los amplificadores generalmente usan abundante retroalimentación negativa.

## 2.4.2 EF86, Pentodo de alta calidad en audio y para señales débiles

Esta válvula, EF86, es un pentodo diseñado en 1955 por el fabricante MULLARD en tamaño miniatura (se habla de tamaño miniatura porque los pentodos típicamente son de gran tamaño, pueden ser hasta seis veces más grandes que un triodo) utilizado muy comúnmente para aplicaciones de alta calidad de audio, sobre todo en etapas preamplificadoras, equipos de estudios de grabación, micrófonos dinámicos y funciona con voltajes de polarización como los de un triodo normal, máximo hasta los  $300V_{DC}$  su placa (Normalmente los pentodos están diseñados para voltajes máximos que oscilan entre los  $500V_{DC}$  y  $600V_{DC}$ ).

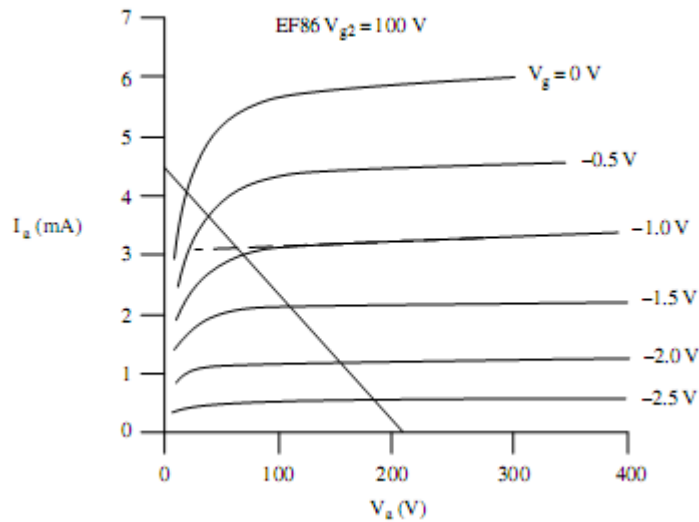
En base a este tubo se va a hacer un pequeño análisis circuital para comprender mejor todas las características del pentodo.  $R_L$  es seleccionado en una manera normal, en conjunto con las líneas de carga y con  $210V$  de alimentación HT; en este ejemplo  $R_L = 47k\Omega$  y el punto de operación es a  $108V$ .



**Fig. 34 Circuito utilizando EF86**

Fuente: MORGAN Jones [5]

Cuando se va a calcular la ganancia, se encuentra que las características de ánodo comienzan aparecer la curva de su intersección con el de la carga, ver figura siguiente. Es perfectamente válido tratar la curva de ánodo como una línea recta, y proyectar esta línea en nuestra línea de carga con el fin de encontrar la ganancia de pequeña-signal, dando así una ganancia en este ejemplo de 90.



**Fig. 35 Características de Ánodo para EF86**

Fuente: MORGAN Jones [5]

$R_{g2}$  es elegido, ya sea por un examen detallado de todo el datasheet, u observando que en general la corriente de ánodo es una proporción fija de la corriente de  $g_2$ . Para el EF86 su relación es de  $\approx 4:1$ .

Se puede suponer que:

$$I_{g2} = 0.4I_a$$

Por tanto, si el voltaje de ánodo y el voltaje  $g_2$  serán lo mismo, la resistencia  $g_2$  debería ser igual a  $4R_L$ , y  $180k\Omega$  es por lo tanto apropiada. Este último método es más rápido, pero para las válvulas de potencia deberíamos recurrir a la hoja de datos. Aunque denominan una rejilla o rejilla,  $g_2$  se comporta como un ánodo en el que recibe los electrones, y por lo tanto debe tener una resistencia de ánodo. Se necesita conocer ahora la resistencia con el fin de calcular el valor del capacitor requerido para mantener  $g_2$  en un potencial AC a tierra. Los datasheets para pentodos no dan siempre  $\mu_{g1-g2}$ ,  $gm_{g2}$  o  $r_{g2}$ , pero estos pueden ser deducidos de los datos del tríodo conectado ( $g_2$  conectado a ánodo):

$$\mu_{g1-g2} \approx \mu_{tríodo}$$

Recordando que  $gm$  describe el efecto de control de  $V_{gk}$  sobre  $I_k$ , una vez que los electrones han salido de la región de control rejilla/cátodo, sus números son fijos, y la densidad de la malla  $g_2$  simplemente determina como la corriente de cátodo se divide entre el ánodo y  $g_2$ , con lo cual.

$$gm_{g2} = \frac{I_{g2}}{I_a} \cdot gm_a$$

$$r_{g2} = \frac{I_a + I_{g2}}{I_{g2}} \cdot r_{a(tri\acute{o}do)}$$

Usando las curvas características del triodo EF86, en  $V_a=108V$ ,  $V_g=1.5V$ ,  $r_a = 14k\Omega$ , entonces  $r_{g2}=70k\Omega$ . Estos  $70k\Omega$  en paralelo con  $R_{g2}$  ( $180k\Omega$ ), nos da una resistencia final de  $\approx 50k\Omega$  y así 1Hz de corte, para  $C_{g2}=3.3\mu F$ .

Para un pentodo,  $I_k \neq I_a$ , y debemos sumar la ( $2.17mA$ ) e  $I_{g2}$  ( $0.54mA$ ), para encontrar  $I_k$  ( $2.71mA$ ), antes podemos calcular  $R_k$ .  $V_{gk} = 1.5V$ , entonces la resistencia de polarización del cátodo debería ser de  $560\Omega$ .

Evaluando  $gm$  de las características de ánodo, manteniendo el voltaje de ánodo constante, y midiendo el cambio en la corriente de ánodo para el voltaje de rejilla, produce un valor alrededor de  $1.95mA/V$ . Para el pentodo, la resistencia de cátodo  $r_k=1/gm$ , y permitiendo  $560\Omega R_k$ , se necesitan  $680\mu F$  de capacitancia de desacople para 1Hz de corte.

Podemos usar también este valor de  $gm$  en un método alternativo de cálculo de ganancia, el cual es dado por la siguiente ecuación:

$$A_V = gm \cdot R_L$$

$$= 1.95 \cdot 47$$

$$= 92$$

Las líneas de carga dan una ganancia de 90, por lo que es bueno. Note que esta ecuación no trabaja bien para triodos porque se asume una  $r_a$  infinita.

Ahora,  $C_{ag}$  para el EF86 es dada como  $<50mpF$ , escrito de una mejor manera es  $50fF$  (Femtofaradios,  $10^{-15}F$ ). Tal vez se desearía considerar como Mullard midió un valor tan pequeño de capacitancia en 1955. No es probable medirlo directamente, así que:

$$C_{Miller} = (90 + 1) \cdot 50 \cdot 10^{-15} = 4.6pF$$

Este es un valor dramáticamente reducido comparado con el triodo, pero porque este es más pequeño, ahora se consideran capacitancias erradas que fueron previamente insignificantes.

Dado que la rejilla de control  $g_1$  es cercana al cátodo, debe tener capacitancia significativa hacia el cátodo, la cual, ya que hemos superado con un condensador, que está en potencial a tierra. En el datasheet, un valor de  $C_{in}$  es dado, el cual es la

capacitancia de rejilla a todos los otros electrodos **excepto** el ánodo, y es por lo tanto el valor de capacitancias erradas dentro de la válvula. Para EF86,  $C_{in}$  es 3.8pF, el cual da una capacitancia de entrada total (debido a la válvula) de 8.4pF. Pero se tienen que añadir unos pocos pF por la capacitancia del cableado, entonces un valor de 11.5pF podría ser razonable.

El tríodo ECC83 da un valor de 115pF, en este sentido, el pentodo es 10 veces mejor. En resumen, el pentodo tiene una mayor ganancia, mayor oscilación del voltaje de salida, y una drástica reducción de capacitancia de entrada comparada con el tríodo, pero como ya hemos visto la indeseable distribución de armónicos en la distorsión del pentodo, pero el verdadero asesino para pentodos de pequeña-señal es el ruido.

El EF86 es descrito como un pentodo de bajo ruido, en un sentido estricto esto es cierto, porque es bajo ruido por las normas o estándares del pentodo.

Este es el ruido adicional, comparado con el tríodo, que es generado por el flujo de electrones en la división ya sea para pasar al ánodo o a  $g_2$ . Este ruido adicional está relacionado a la relación de ánodo a la corriente de rejilla de pantalla y a la conductancia mutua de la rejilla de pantalla; típicamente esto hace un pentodo de 6dB a 14dB más ruidoso que un pentodo conectado como tríodo. (Conectado como un tríodo, el EF86 es en realidad un buen tríodo). Aun peor, la partición del ruido tiene una distribución de frecuencia de  $1/f$ , la cual significa su amplitud crece como la frecuencia baja, lo cual puede ser considerado como una irritación al oído

<sup>2</sup> MORGAN JONES (2003, Valve Amplifiers, Pagina 91)

<sup>3</sup> Tomado de página de internet Mayo 25 2010:

<http://amplya.blogspot.com/> (Sección *Notas Técnicas, Diferencias entre transistores y válvulas*)



## 3. Criterios para el desarrollo del Amplificador

### 3.1 INTRODUCCION

El objetivo de este proyecto es la investigación, el diseño y la construcción de un amplificador utilizando este gran elemento de amplificación, el tubo al vacío. Como ya se ha investigado y explicado anteriormente sobre todo lo que conlleva la utilización de los tubos y el porqué de su utilización.

Actualmente en el mercado se encuentra gran variedad de amplificadores, de los cuales encontramos amplificadores hechos con transistores, de cualquier tipo, otros contruidos con tubos al vacío y otros que son llamados como híbridos, ya que utilizan estas dos tecnologías, por lo general utilizan una etapa pre-amplificadora con transistores, o diodos para forzar una saturación de la señal, y una etapa de potencia con válvulas. Cada uno tiene sus distintos tipos de sonidos y ya es decisión del comprador cual adquirir. Los equipos hechos con transistores son livianos, muy económicos y muy comerciales, pero un músico profesional no los prefiere ya que su calidad y como ya se demostró anteriormente, el sonido valvular es el preferido por todos los músicos profesionales. También existen amplificadores hechos con transistores que son de alta calidad, pero aun así los guitarristas hablan sobre una diferencia notable, en los cuales los valvulares poseen características que ellos llaman como calidez y color en el sonido, algo que solamente un guitarrista puede sentir.

Como también se hablo anteriormente, hay gran cantidad de tipos de diseños o construcciones a seguir con los tubos al vacío. Hay clase A, B, AB, AB<sub>1</sub>, A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> y también hay distintas configuraciones como push-pull, cátodo común, seguidor cátodo y demás, por lo que el diseño a escoger simplemente depende de los criterios y gustos al cual el diseñador constructor quiere dirigir su amplificador en el mercado.

Cada tipo de diseño ofrece un sonido distinto el cual es apreciado por los guitarristas. Un amplificador clase A ofrece una excelente calidad de sonido, mayor a las otras clases, pero logra su saturación con el aumento progresivo de volumen, solo lográndolo a valores altos, que en algunos casos puede ser incomodo.

Construir un amplificador es un poco costoso, ya que implica una gran cantidad de componentes, como transformadores especiales y varias válvulas que aumentan su precio en el mercado, aparte de que un buen diseño y una muy buena calidad pueden asegurar una gran venta en el mercado musical. Un muy buen amplificador valvular en el mercado puede llegar a costar hasta los diez mil dólares.

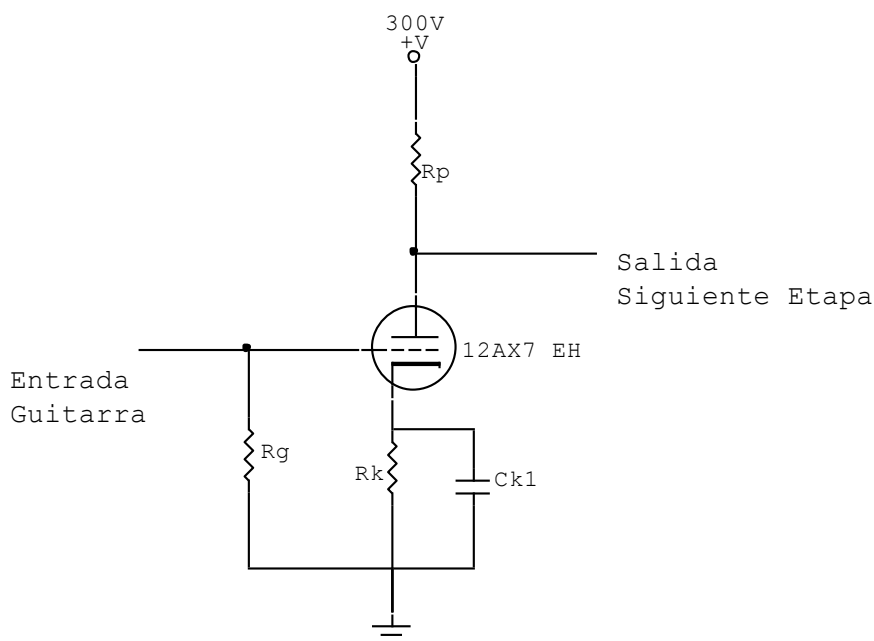
El objetivo final de un buen amplificador consiste en una buena selección de componentes. Seleccionar primero los tipos de válvulas, ya que cada válvula es distinta de la otra y por lo tanto posee una característica de sonido diferente que depende del gusto del músico. Para el presente proyecto se seleccionaron las válvulas más conocidas en el mercado y más asequibles. Para la parte de pre-amplificación se utilizaron los muy conocidos tríodos 12ax7 de la empresa ElectroHarmonix. Estos poseen alta ganancia y una alta calidad de sonido. Para la etapa de potencia se selecciono el pentodo 6L6, el más famoso del mercado en potencia hecho por la empresa Sovtek, empresa rusa que fabrica tubos al vacio con un alto grado de calidad. Para el proyecto se adquirió la válvula 6L6wgc el cual es una pequeña variación del 6L6. El termino W me indica que es una válvula especialmente reforzada para uso militar. Su filamento está construido especialmente para soportar los abusos de operación.

## **3.2 ETAPA PRE-AMPLIFICADORA**

### ***3.2.1 Primera etapa valvular***

Para el diseño de esta etapa lo que se busca es lograr la mayor cantidad de ganancia posible. Para esto se utilizó la configuración más sencilla del tríodo, la autopolarización o configuración de tríodo amplificador de cátodo común. Se seleccionó este tipo de polarización debido a que esta nos ofrece una gran calidad de sonido y nos implica un número no alto de válvulas a utilizar ya que se maneja para el proyecto potencia baja. Al final se obtendrán típicamente 30W de potencia. Si se desea potencias altas, típicas de 70w y mayores, es necesario utilizar otro tipo de configuración de pre-amplificación si se desea economizar respecto a la cantidad de válvulas a utilizar. Para este proyecto se utilizaron dos etapas, o dos configuraciones tríodo amplificador de cátodo común, en serie para incrementar la ganancia progresivamente en un gran valor y entregar esa potencia a la etapa amplificadora que se encarga de hacer un acople de impedancias entre circuito y transformador de salida para al final entregar la potencia acústica requerida.

Ahora se mostraran los respectivos diseños, cálculos y análisis para lograr un amplificador con una gran calidad sonora y la potencia exigida. Se empezara con la primera configuración.



**Grafica 2** Primera etapa del previo

Fuente: Autor

### 3.2.1.1 Punto de Funcionamiento

Para poder obtener un punto de funcionamiento adecuado para la primera etapa del previo seguiremos los pasos que se explicaron anteriormente por lo tanto es necesario la utilización de las características de ánodo del triodo 12AX7EH.

Para calcular el valor de la resistencia de placa o ánodo, se utiliza lo que se ha dicho.

$$R_p = \frac{V \text{ de Polarizacion}}{I_p} = \frac{300V}{3mA} = 100k\Omega$$

Se ha establecido como el voltaje de polarización del triodo en 300V, ya que es el valor máximo permitido en el fabricante de este triodo. Valores establecidos mayores a 250V, para este triodo, nos indican valores altos de ganancia por lo que manejar un rango como este da un buen resultado. Para esta parte se ha elegido un valor de  $V_{gk}$  igual a -0.5V, ya que es un valor que se encuentra aproximadamente en la mitad de la grafica y se observa una buena linealidad. Algunos autores recomiendan trabajar en la mitad del valor máximo de  $V_{gk}$  para cada tubo. En

nuestro caso eso no sería muy adecuado, ya que nuestro valor medio es de  $-2.5V$  y observando sobre la grafica nos estaríamos acercando sobre una zona de no-linealidad. El valor de  $I_p$  se toma como un valor arbitrario, el cual según se analice no supere los valores máximos dados por el fabricante. Podemos variar este punto como queramos dentro de un rango admisible, no superar lo permitido y tampoco estar cerca de una zona de no-linealidad. Estos valores pueden variar según los criterios del diseñador y el mercado al cual queremos llevar este amplificador, por lo que se pueden elegir otros voltajes de polarización, pueden ser 200, 150, 300V según lo deseado, o podemos seleccionar otro valor de corriente o resistencia de placa. Estos puntos se tratan de seleccionar en una zona central de la grafica o una zona de trabajo que sea segura para la vida útil de la válvula. Por lo tanto ya hemos calculado la primera resistencia de esta configuración.



**Fig. 36 Grafica 12ax7EH con punto de trabajo**

Fuente: Ver Anexos Datasheet 12AX7 EH

### 3.2.1.2 Polarización del Cátodo

Como se vio antes, esta resistencia nos fija el valor de  $V_{gk}$  y puede ser logrado colocando una batería fija sobre la rejilla, pero como ya se explico no es conveniente. Por eso se añade en el circuito esta resistencia  $R_k$  con el objetivo de lograr un equilibrio en la corriente anódica.

Para lograr estos valores se utilizan los pasos hablados anteriormente.

$$I_a = \frac{HT - V_a}{R_l} = \frac{300 - 125}{100} = 1.75mA$$

Ya teniendo este valor deseado de corriente anódica y seleccionando un punto deseado de  $V_{gk}$ , se puede calcular el valor de esta resistencia de polarización:

$$R_k = \frac{0.5V}{1.75mA} = 285 \Omega$$

Por lo que debemos seleccionar un valor comercial que se encuentre aproximado a dicho resultado, ya sea un valor de resistencia mayor o menor.

Como se ha dicho antes, variar un poco este punto o valor, implica un cambio en la corriente por lo tanto la amplificación se puede ver cambiada. Todo depende de los criterios a utilizar por parte del diseñador. En el presente proyecto este valor de resistencia de polarización del cátodo se tomo con el valor comercial de  $220\Omega$  (Con un valor de potencia de  $\frac{1}{4}$  de W) y se observó que no hubo ninguna alteración en la calidad sonora del amplificador, por lo que este valor no afecta el resultado óptimo.

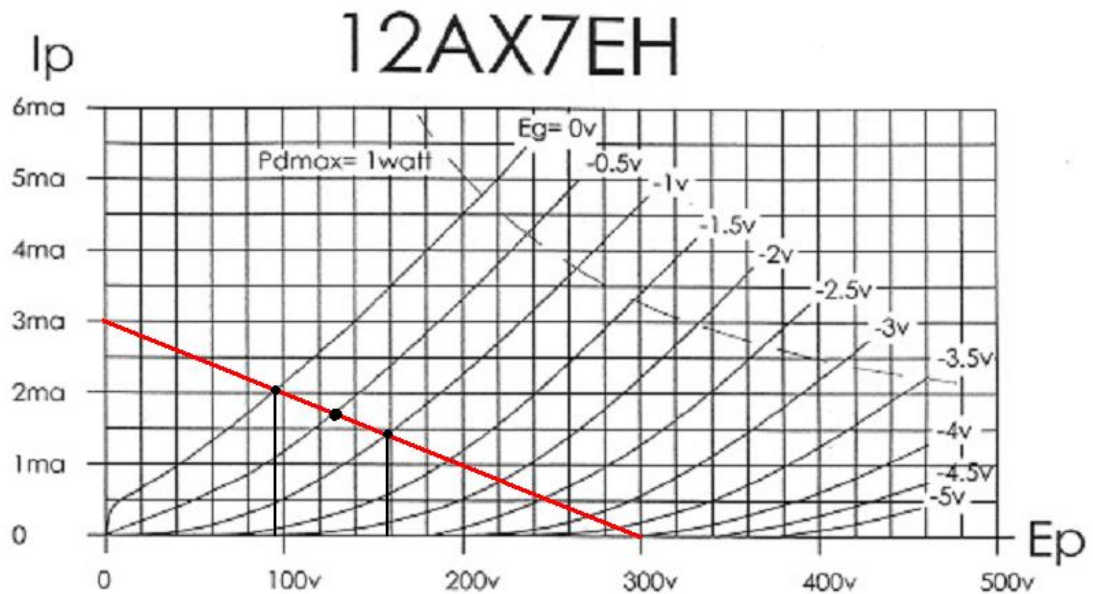
### 3.2.1.3 Resistencia de Grilla

El valor de esta resistencia está comprendido según los autores entre  $0.5M\Omega$  y  $1M\Omega$ . El fabricante Mullard habla sobre una resistencia de  $2.2k\Omega$  para su válvula, la cual ya se hablo en este libro. Para el presente proyecto, se utilizó para esta primera parte un valor de resistencia de  $100k\Omega$  ya que se quiere hacer un buen acople de impedancias entre la impedancia de salida de la guitarra, que oscila alrededor de los  $10k\Omega$  y la impedancia de entrada del amplificador. Por ser esta la primera entrada este valor de resistencia de grilla se hace un poco bajo de lo sugerido por algunos investigadores. El fabricante ElectroHarmonix limita este valor a  $1M\Omega$ , por lo que se debe sugerir valores menores a este término. El fabricante de válvulas General Electric propone para el 12ax7 valores oscilantes a  $100K\Omega$ , según se puede observar en su datasheet. Colocar valores muy bajos de esta resistencia implica que una reducción de la vida útil de una válvula, por razones que fueron ya explicadas anteriormente.

### 3.2.1.4 Cálculo de la ganancia de la primera etapa

Para esto utilizamos la manera ya hablada, en la cual seleccionamos el corte con el eje de voltajes de las curvas superior e inferior a nuestro valor de  $V_{gk} = -0.5V$ .

$$A_v = \frac{\Delta V_s}{\Delta V_g} :$$



**Fig. 37** Punto de Funcionamiento

Fuente: Ver Anexos Datasheet 12AX7 EH

Se trazan dos rectas que corten en el eje del voltaje de polarización el cual es la intersección con los valores inmediatamente superior e inferior a nuestro punto de trabajo.

$$A_v = \frac{160 - 95}{0 - 1} = -65$$

Por lo que obtenemos una amplificación de 65 e inversora, dado su signo negativo.

Por lo anterior podemos decir que a mayores valores de  $V_{gk}$ , la ganancia se va a ver incrementada, pero no podemos seleccionar valores que no se encuentren en zonas no seguras de trabajo.

### 3.2.1.5 Parámetros Dinámicos

#### 3.2.1.5.1 Calculo de la Resistencia Interna de Ánodo, $r_a$

Este es un valor que todos los fabricantes incluyen en los datasheet de cada tubo, pero para este ejemplo se va a calcular.

El fabricante ElectroHarmonix, en su datasheet incluye el valor de resistencia de ánodo de 54.1k  $\Omega$ .

Para esto, se debe trazar una línea tangente al punto que tenemos como de trabajo. En este caso el punto se encuentra en el valor de  $V_{gk} = -0.5V$ . Sobre este valor pasamos la recta tangente y con ellos determinar el valor con el que corta sobre el eje de voltaje de ánodo. El otro valor es el voltaje de polarización sobre el valor máximo de  $V_{gk}$  que para este tubo es de  $V_{gk} = -5V$ .

$$r_a = \frac{\Delta V_a}{\Delta I_a}$$



**Fig. 38** Selección  $r_a$

Fuente: Ver Anexos Datasheet 12AX7 EH

Según se observa sobre la grafica tenemos un valor de aproximadamente 50V y un valor máximo de 380V, el cual es el máximo  $V_{gk}$ . Para los valores de corriente utilizamos los máximos mostrados en la grafica, en este caso se trabaja con un valor de corriente de 5mA. Por lo que se obtiene:

$$r_a = \frac{\Delta V_a}{\Delta I_a} = \frac{380 - 50}{5 - 0} = 66k\Omega$$

Con esto se puede decir que el valor varía en una pequeña proporción al valor dado por el fabricante.

### 3.2.1.5.2 Cálculo del factor de amplificación $\mu$

Para calcular este factor, se debe plantear la ecuación hablada en el capítulo sobre el triodo y análisis en AC.

El factor de amplificación  $\mu$  está dado por:

$$\mu = \frac{\Delta V_a}{\Delta V_g}$$

Para esto se debe trazar una línea horizontal a través del punto de operación y que toque el valor de  $V_{gk}$  anterior y siguiente a la curva de  $V_{gk}$  seleccionada, por lo que se dice que hay una  $R_L = \text{Infinita}$

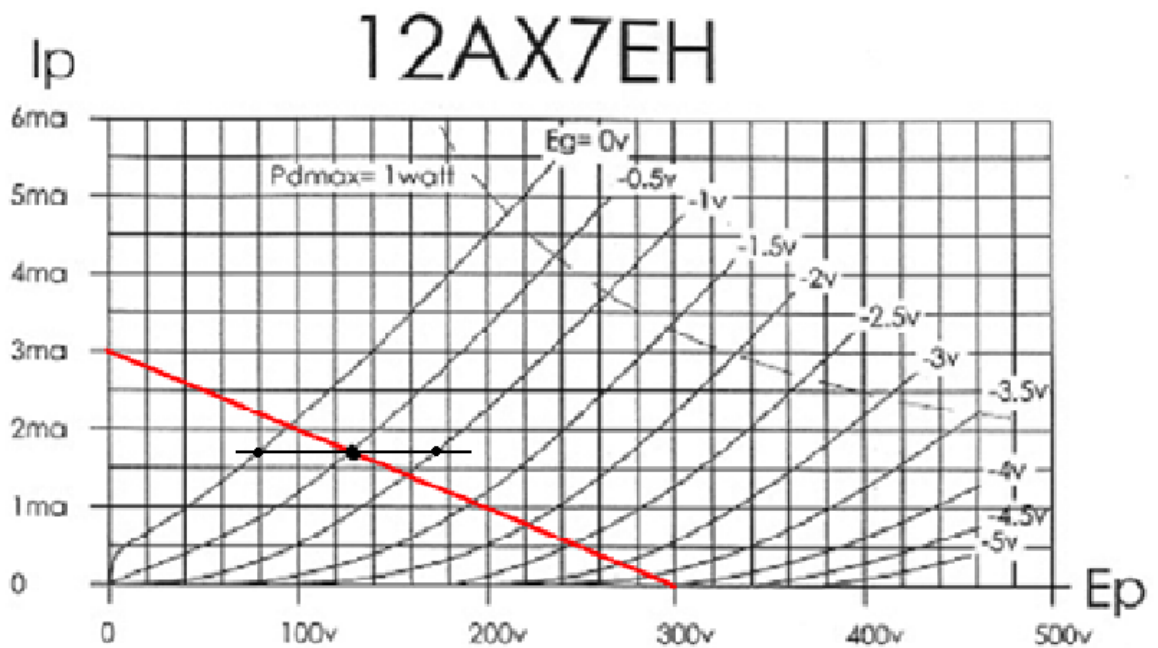


Fig. 39 Selección  $\mu$

Fuente: Ver Anexos Datasheet 12AX7 EH



Luego de trazar esta recta horizontal encontramos los valores de voltaje de ánodo con las curvas de  $V_{gk}$  siguiente y anterior a la que se ha seleccionado.

$$\mu = \frac{175 - 80}{1 - 0} = 95$$

Encontrado este valor se puede utilizar para de otra manera calcular el valor de la ganancia de la etapa, como se explico antes puede ser calculado como:

$$A_V = \mu \cdot \frac{R_L}{R_L + r_a} = 95 \cdot \frac{100}{100 + 66} = 57$$

Por el anterior resultado se puede decir que es un buen acercamiento al cálculo hecho anteriormente con las líneas de carga del triodo.

### 3.2.1.5.3 Calculo de la Conductancia Mutua

Como ya se explico antes, el valor de la conductancia mutua se calcular de la siguiente manera:

$$gm = \frac{\mu}{r_a} = \frac{95}{66} = 1.43mA/V$$

Aunque también puede ser hallado con el método explicado trazando una recta vertical o también con los valores dados en el datasheet y reemplazándolos en esta fórmula o simplemente tomando el valor que el fabricante nos ofrece.

### 3.2.1.6 Calculo del capacitor de desacople en el Cátodo

La manera como se calcula este valor de condensador se hace utilizando la formula dicha anteriormente. Para ello se necesita saber cual resistencia ve el capacitor desde su terminal más positivo. Aparte de la resistencia de cátodo el también ve la resistencia interna del cátodo, calculándose así:

$$r'_K = \frac{R_L + r_a}{\mu + 1} = \frac{100 + 66}{95 + 1} = 1.72K\Omega$$

Este valor de 1.72kΩ en paralelo al valor de la resistencia de cátodo calculada anteriormente, 220 Ω, nos da un valor de resistencia 195 Ω

Ahora para poder calcular el valor del condensador de desacople se utiliza la formula y dándole un valor a la frecuencia de corte que se vaya a utilizar.

$$C_K = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot r_K} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 195} = 10.20\mu F$$

Para este caso se selecciono un valor de frecuencia de 60Hz, ya que la guitarra da frecuencias mayores pero se podría trabajar con frecuencias menores según sean los criterios del diseñador. Seleccionando este valor, se evita trabajar con frecuencias sobre los 50/60Hz que puede inducir ruidos sobre el amplificador.

### **3.2.1.7 Capacitor de acople de entrada**

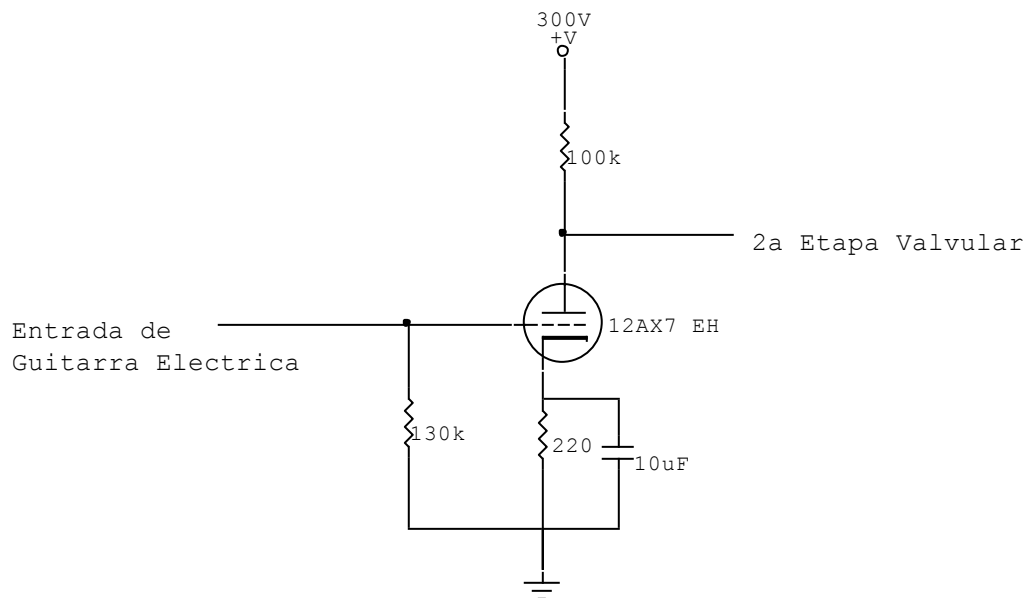
Como ya se hablo anteriormente, este capacitor cumple con la función de proteger la etapa siguiente de los voltajes de ánodo de una etapa anterior y debe ser capaz de soportar estos voltajes de ánodo e incluso los voltajes de la fuente de alimentación HT cuando el tubo no se encuentra suficientemente caliente para comenzar un flujo de corriente. En esta primera etapa este condensador se encuentra en la entrada de dicha etapa, ya que no hay una etapa anterior valvular. Este capacitor me sirve de acople para la entrada del amplificador de la señal proveniente de la guitarra eléctrica, pero en este proyecto se hace omisión de este capacitor ya que una guitarra eléctrica no posee un nivel de corriente continua y en la práctica este condensador actuaría como un filtro y en este proyecto agrego un ruido no deseable. Si se desea introducir este capacitor de entrada se debe calcular al igual que todos los capacitores, con la diferencia de que en esta etapa hay dos impedancias; la impedancia de salida de la guitarra más la resistencia de grilla.

### **3.2.1.8 Impedancia de Salida de la etapa**

Para esto se retoma lo que se hablo anteriormente, en el cual un tríodo puede ser modelado como una fuente de voltaje acoplada a través de una resistencia en serie conocida como resistencia interna de ánodo, ya calculada o dada por el fabricante. La impedancia viene dada como el paralelo entre esta resistencia de ánodo y la resistencia de placa. Se tomará el valor dado por el datasheet de  $54.1k \Omega$  en paralelo al valor de la resistencia de placa  $100k \Omega$  dándonos una impedancia de salida de  $35.1K \Omega$ , valor el cual se debe tener en cuenta para hacer un acople de impedancia apropiado con la siguiente etapa valvular.

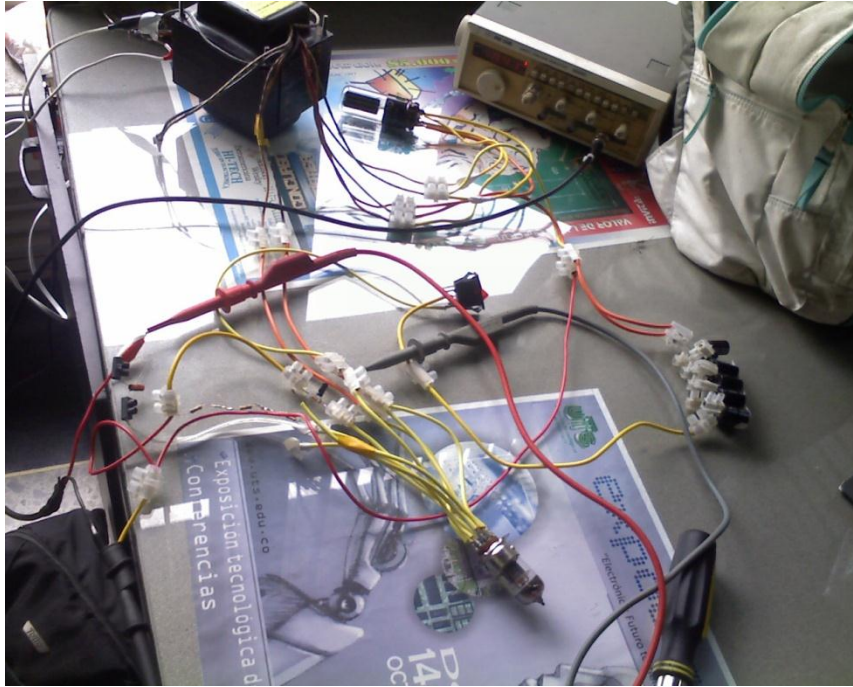
### 3.2.1.9 Diseño Final de la primera etapa valvular

Ya con todos los valores calculados para esta etapa se puede realizar dicho montaje y observar el comportamiento del triodo con este diseño ya calculado.



**Grafica 3.** Diseño Final Primera Etapa

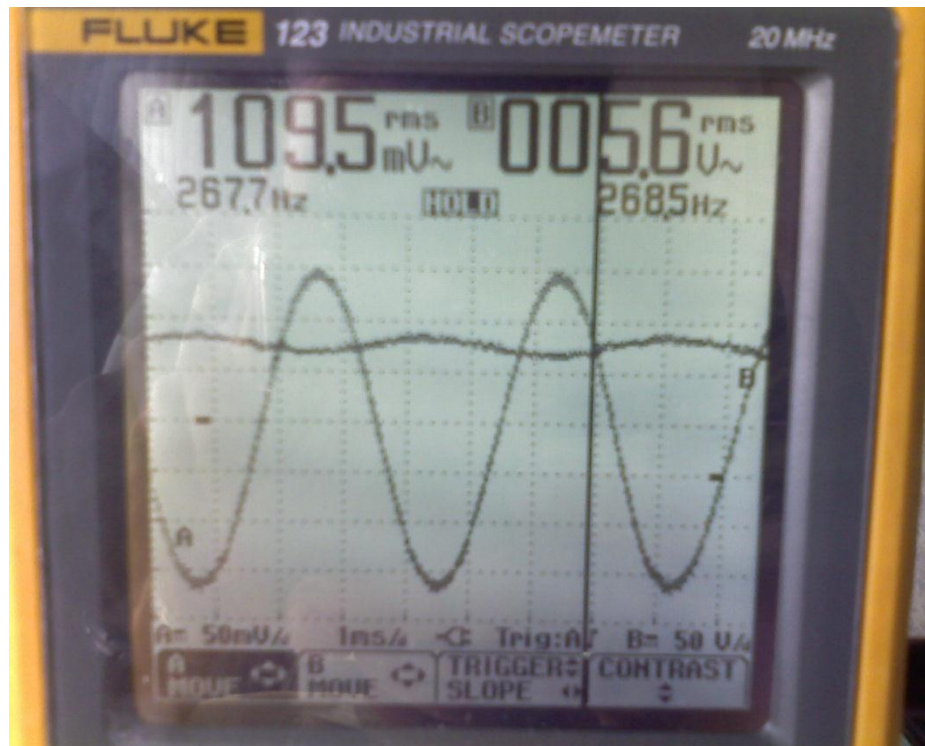
Fuente: Autor



**Fig. 40** Pruebas primera etapa

Fuente: Autor

En la grafica se puede observar el montaje que fue hecho con los respectivos valores calculados para observar el comportamiento de este tríodo. Se le introdujo una señal senoidal producida por el generador de señales con una frecuencia alrededor de los 200Hz y con un voltaje alrededor de los 100mV, el cual es una señal producida por una guitarra eléctrica.



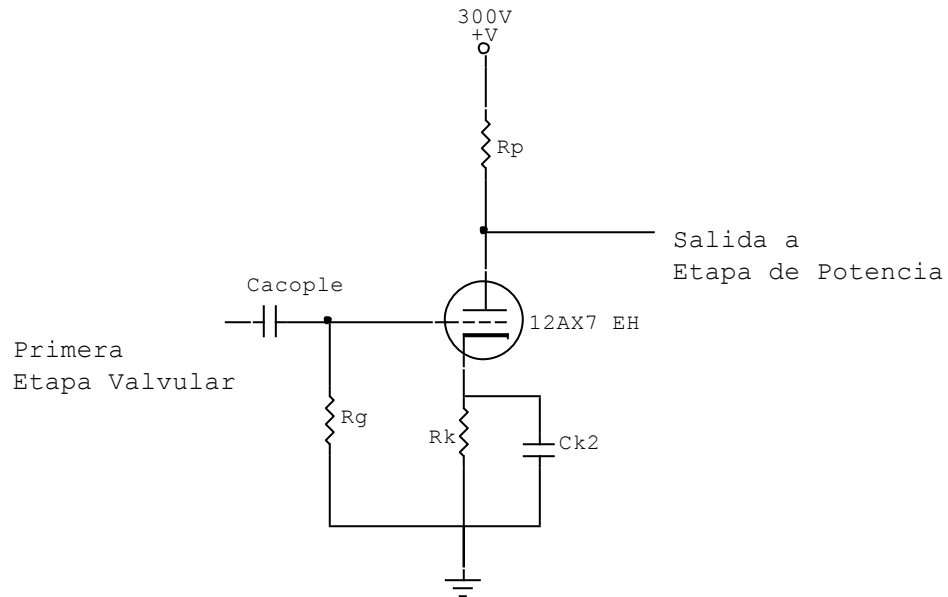
**Fig. 41** Pruebas primera etapa

Fuente: Autor

Se puede observar la señal de entrada junto a la señal de salida de la primera etapa valvular. Con esto se puede decir que hay una ganancia en la etapa de 52, lo que se aproxima a los valores calculados anteriormente.

### **3.2.2 Segunda Etapa Valvular**

Para esta etapa se busca el mismo objetivo de la etapa anterior; lograr un máximo de ganancia. Como el objetivo de este proyecto es conseguir 20w o valores mayores. Para lograr esto se debe adicionar otra etapa de pre-amplificación y luego entregar esta señal a la etapa de potencia, ya que se quiere poder lograr una saturación pequeña con la etapa de pre-amplificación y con este tipo de configuración autopolarización obtener una distorsión suave y cálida, llamada en el mercado overdrive. En esta etapa se trabajó igual que la etapa anterior solo con unos pequeños cambios que se explicaran detalladamente. Para esta etapa se trabajará el mismo diseño anterior, autopolarización de un triodo.



**Grafica 4.** Diseño Final Primera Etapa

Fuente: Autor

### 3.2.2.1 Punto de Funcionamiento

Al igual que la etapa anterior, para esta segunda etapa se utilizara el mismo método para calcular el punto de funcionamiento de este tríodo con los mismos valores anteriores. Por lo que:

$$R_{P2} = \frac{V \text{ de Polarizacion}}{I_{P2}} = \frac{300V}{3mA} = 100k\Omega$$

Por lo tanto nos da un punto de las características de ánodo y con un valor de  $V_{gk} = -0.5V$  se obtiene sobre la grafica:



**Fig. 42** Punto de Funcionamiento

Fuente: Ver Anexos Datasheet 12AX7 EH

### 3.2.2.2 Polarización del Cátodo

Como se pudo calcular en la etapa anterior, el valor de esta resistencia establece el valor de  $V_{gk}$ . Para lograr estos valores se utilizan los pasos calculados anteriormente.

$$I_a = \frac{HT - V_a}{R_l} = \frac{300 - 125}{100} = 1.75mA$$

Ya teniendo este valor deseado de corriente anódica y seleccionando un punto deseado de  $V_{gk}$ , se puede calcular el valor de esta resistencia de polarización:

$$R_k = \frac{0.5V}{1.75mA} = 285 \Omega$$

Pero como ya se explico anteriormente se seleccionó para este proyecto un valor de  $220 \Omega$  para esta resistencia.

### 3.2.2.3 Resistencia de Grilla del tríodo de la segunda etapa

Como ya se habló sobre esta resistencia, el cual los investigadores recomiendan el valores entre  $0.5M\Omega$  y  $1M\Omega$  pero algunos fabricantes, como Mullard habla sobre una resistencia de  $2.2k\Omega$  para su válvula, la cual ya se hablo en este libro, y

fabricante de válvulas General Electric propone para el 12ax7 valores oscilantes a  $100K \Omega$ , según se puede observar en su datasheet. Además de tener en cuenta el valor de la impedancia de salida de la etapa anterior de  $35k \Omega$ , se decide colocar en esta segunda etapa un valor de  $330k \Omega$  de resistencia de fuga de grilla, o simplemente resistencia de rejilla  $R_g$ . Colocar valores muy bajos de esta resistencia implica que una reducción de la vida útil de una válvula, por razones que fueron ya explicadas anteriormente.

### 3.2.2.4 Capacitor de acople de Entrada (Capacitor de Acople entre las dos etapas)

La función de este capacitor es la de proteger la etapa, en este proyecto es la segunda etapa pre-amplificadora, de los voltajes de ánodo que pueden perjudicar la siguiente etapa valvular. Se podría tener en cuenta la impedancia de salida de la válvula junto con la resistencia de grilla, o también solo podríamos utilizar la resistencia de grilla ya que solo variará la frecuencia de corte inferior en una proporción muy pequeña. Para este caso, utilizaremos como frecuencia la dada por los autores de 1Hz y con ello obtener el valor de ese condensador.

$$C_K = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_g} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 330k} = 0.48\mu F$$

Para esta etapa se selección un condensador comercial de  $0.33\mu F$  ya que el corte de frecuencia no se ve afectado.

### 3.2.2.5 Calculo de la Ganancia de la segunda etapa

Se seguirá utilizando el mismo método ya explicado y se buscará una ganancia alta y que se encuentre en una zona de trabajo aceptable, para la cual nuevamente se selecciona el valor de  $V_{gk} = -0.5V$ .

$$A_v = \frac{\Delta V_a}{\Delta V_g} :$$





**Fig. 43** Cálculo de ganancia

Fuente: Ver Anexos Datasheet 12AX7 EH

Como ya se explicó este método, se trazan dos rectas que corten en el eje del voltaje de polarización el cual es la intersección con los valores inmediatamente superior e inferior a nuestro punto de trabajo.

$$A_v = \frac{160 - 95}{0 - 1} = 65$$

Por lo anterior se puede decir entonces que a mayores valores de  $V_{gk}$ , la ganancia se va a ver incrementada, pero no podemos seleccionar valores que no se encuentren en zonas no seguras de trabajo.

Ya se tienen dos etapas valvulares con los mismos valores de ganancia, pero si se desea este valor se puede modificar según la necesidad del diseñador.

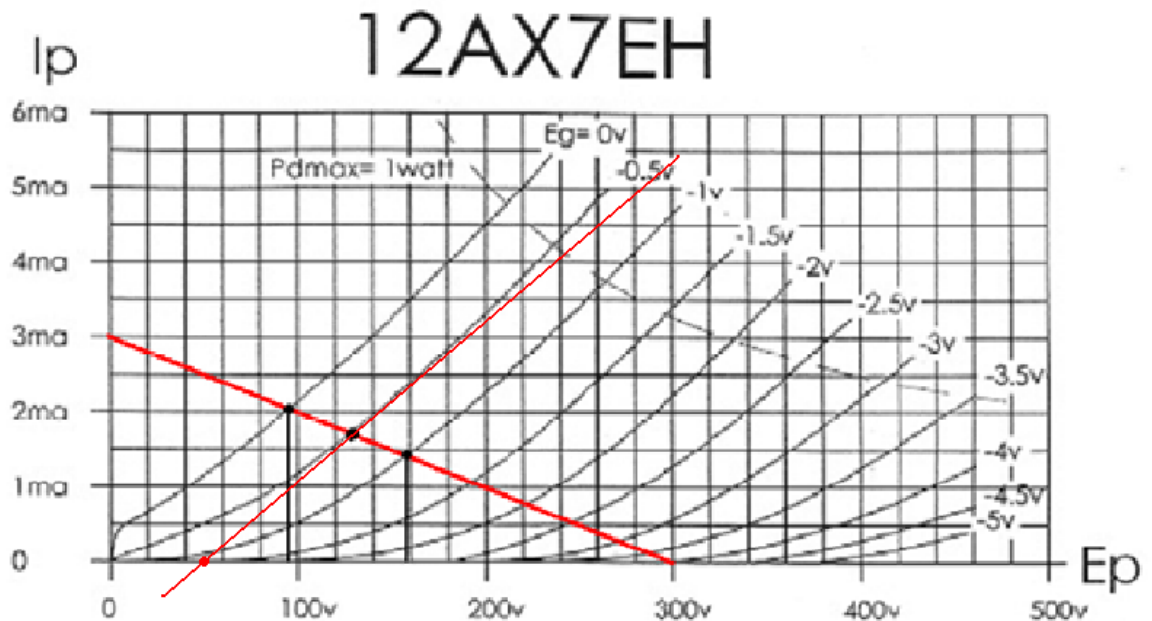
### 3.2.2.6 Parámetros Dinámicos

#### 3.2.2.6.1 Cálculo de la Resistencia Interna de Ánodo, $r_a$ , para el tríodo de la segunda etapa

Dado que este es un valor que todos los fabricantes incluyen en los datasheet de cada tubo, pero para esta etapa nuevamente se va a calcular. La casa ElectroHarmonix, fabricante del triodo que se utiliza en este proyecto 12ax7EH, en su datasheet incluye el valor de resistencia de ánodo de 54.1k  $\Omega$ .

Para calcular este valor seguimos el mismo método, en el cual se debe trazar una línea tangente al punto que se tiene como de trabajo. En este caso el punto se encuentra en el valor de  $V_{gk} = -0.5V$ . Sobre este valor pasamos la recta tangente y con ellos determinar el valor con el que corta sobre el eje de voltaje de ánodo. El otro valor es el voltaje de polarización sobre el valor máximo de  $V_{gk}$  que para este tubo es de  $V_{gk} = -5V$ .

$$r_a = \frac{\Delta V_a}{\Delta I_a}$$



**Fig. 44** Selección  $r_a$

Fuente: Ver Anexos Datasheet 12AX7 EH

Según se observa sobre la grafica se tiene un valor de aproximadamente 50V y un valor máximo de 380V, el cual es el máximo  $V_{gk}$ . Para los valores de corriente se utilizan los máximos mostrados en la grafica, en este caso se trabaja con un valor de corriente de 5mA mostrado por esta grafica. Por lo que se obtiene:

$$r_a = \frac{\Delta V_a}{\Delta I_a} = \frac{380 - 50}{5 - 0} = 66k\Omega$$

Con esto se puede decir que el valor varía en una pequeña proporción al valor dado por el fabricante, como ya se explico en la primera etapa.

### 3.2.2.6.2 Calculo del factor de amplificación $\mu$ para el tríodo de la segunda etapa

Como ya se explico, esta etapa se va a diseñar con la misma ganancia de la anterior, por lo que para calcular este factor, se debe plantear la ecuación hablada en el capítulo sobre el tríodo y análisis en AC, nuevamente.

El factor de amplificación  $\mu$  esta dado por:

$$\mu = \frac{\Delta V_a}{\Delta V_g}$$

Para esto se trazará una línea horizontal a través del punto de operación que se ha seleccionado y que toque el valor de  $V_{gk}$  anterior y siguiente a la curva de  $V_{gk}$  seleccionada, por lo que se dice que hay una  $R_L = \text{Infinita}$



Fig. 45 Selección  $\mu$

Fuente: Ver Anexos Datasheet 12AX7 EH

Luego de trazar esta recta horizontal encontramos los valores de voltaje de ánodo con las curvas de  $V_{gk}$  siguiente y anterior a la que se ha seleccionado.

$$\mu = \frac{175 - 80}{1 - 0} = 95$$

### 3.2.2.6.3 Calculo de la Conductancia Mutua

Como ya se explico antes, el valor de la conductancia mutua se calcular de la siguiente manera:

$$gm = \frac{\mu}{r_a} = \frac{95}{66} = 1.43mA/V$$

Aunque también puede ser hallado con el método explicado trazando una recta vertical o también con los valores dados en el datasheet y reemplazándolos en esta fórmula o simplemente tomando el valor que el fabricante nos ofrece.

### 3.2.2.7 Calculo del capacitor de desacople en el Cátodo

Para ello se va a utilizar la forma hablada anteriormente, dando un resultado de  $r'_K$  :

$$r'_K = \frac{R_L + r_a}{\mu + 1} = \frac{100 + 66}{95 + 1} = 1.72K\Omega$$

Este valor de  $1.72k\Omega$  en paralelo a la resistencia de cátodo  $220\Omega$ , nos da un valor de resistencia  $195\Omega$

Ahora para poder calcular el valor del condensador de desacople se utiliza la formula y dándole un valor a la frecuencia de corte que se vaya a utilizar.

$$C_K = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot r_K} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 20 \cdot 195} = 41\mu F$$

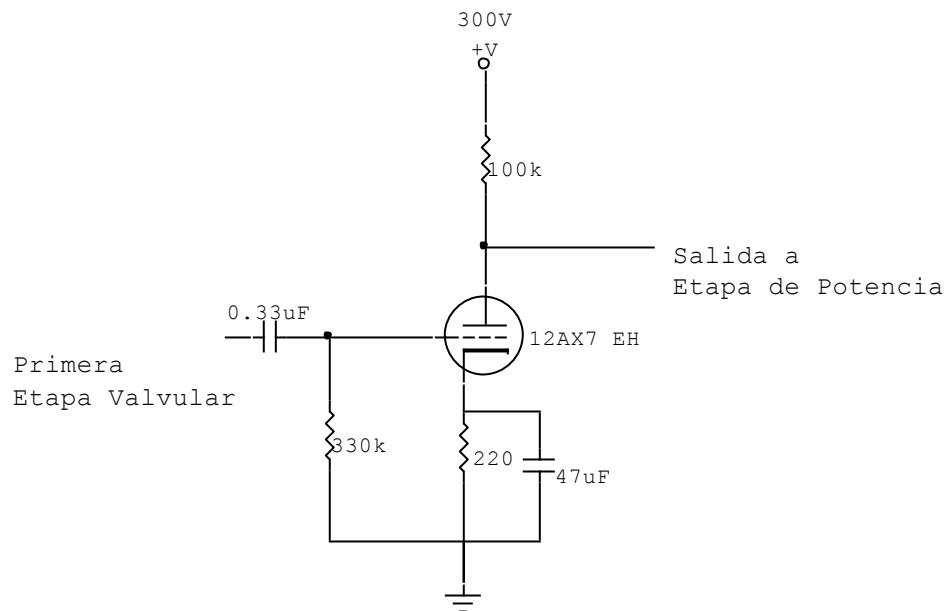
Se utilizara un condensador de valor comercial más próximo, el cual es de  $47\mu F$

Para este caso se selecciono un valor de frecuencia de  $20Hz$ , ya que en la etapa anterior se selección una frecuencia de  $60Hz$  y pues no se desea un filtro total en el amplificador que haga recortes de la señales de baja frecuencia.

### 3.2.2.8 Impedancia de Salida de la etapa

Se calcula igual como se hablo anteriormente. Se supone que un tríodo puede ser simplificado como una fuente de voltaje que esta acoplada a través de una resistencia en serie conocida como resistencia interna de ánodo, la cual ya ha sido calculada o siempre viene dada por el fabricante. La impedancia viene dada como el paralelo entre esta resistencia de ánodo y la resistencia de placa. Se tomará el valor dado por el datasheet de  $54.1k \Omega$  en paralelo al valor de la resistencia de placa  $100k \Omega$  dándonos una impedancia de salida de  $35.1K \Omega$ , valor el cual se debe tener en cuenta para hacer un acople de impedancia apropiado con la siguiente etapa valvular. En esta segunda etapa ya se tiene una potencia suficiente para alimentar un altavoz, pero como se observa con esta impedancia de entrada es alta. Para acoplar un circuito valvular con un altavoz se necesita un transformador de salida o de acople, en cual acopla la impedancia de un altavoz, que oscila entre los  $4 \Omega$  y  $8 \Omega$  junto a una impedancia dada por un circuito. Según los cálculos que se explicaran luego, esta impedancia de  $35.1k \Omega$  es muy alta para un transformador, para ello se necesita reducirla con un pentodo, el cual ofrece impedancias que oscilan entre los  $5k \Omega$ , aceptables para la entrada de un transformador de salida.

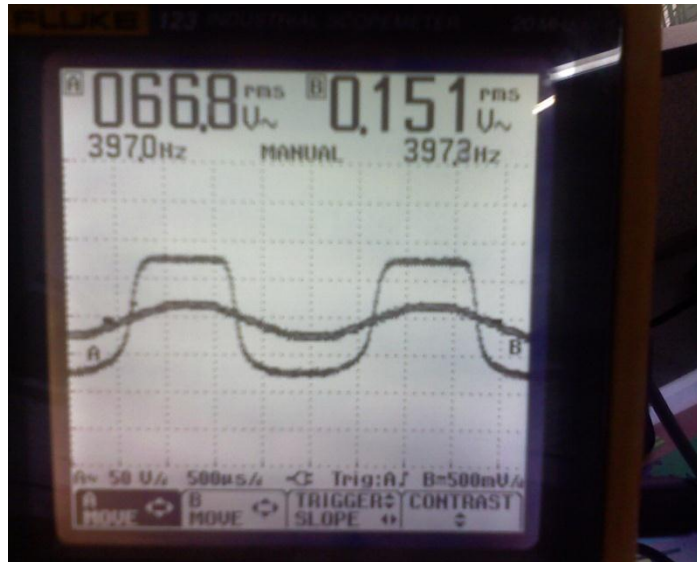
### 3.2.2.9 Diseño final de la segunda etapa valvular



**Grafica 5** Diseño Final Segunda Etapa

Fuente: Autor

Se puede observar el aumento en gran valor de la ganancia después de dos etapas valvulares y se puede observar también el comienzo de la saturación generada por el tríodo. Es una saturación diferente a la producida por un transistor, ya que un tríodo hace un recorte de la señal más suavizado sobre las puntas, como se puede observar.



**Fig. 46** Amplificación segunda etapa

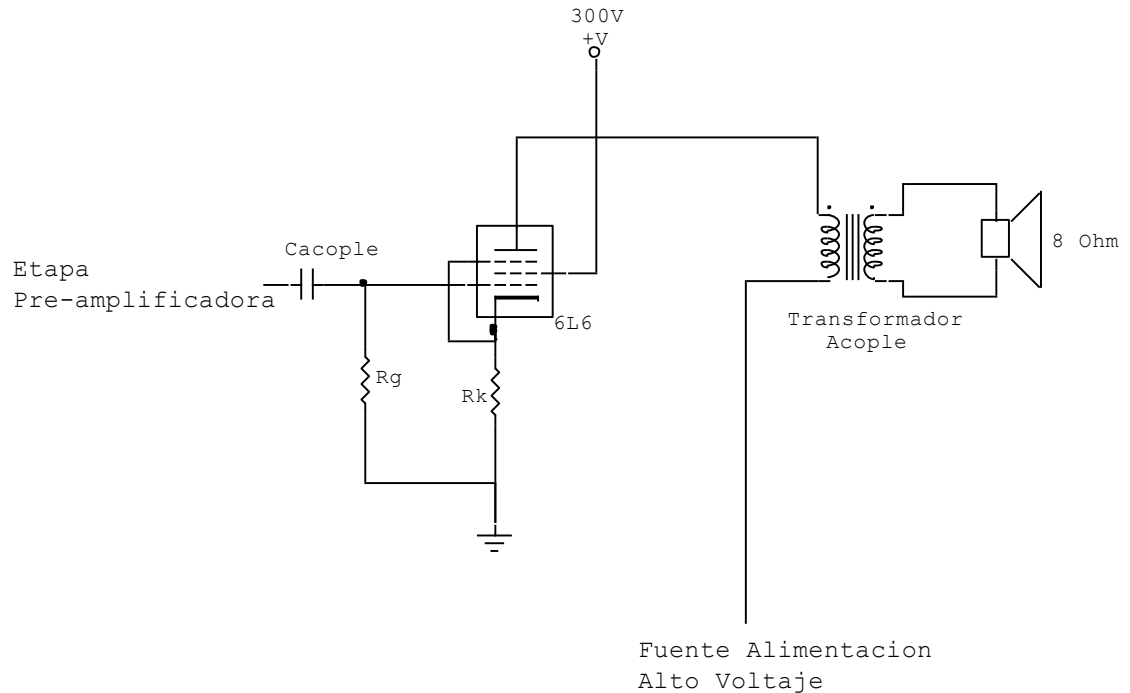
Fuente: Autor

### 3.3 ETAPA AMPLIFICADORA

Con esta etapa lo que se busca es terminar de darle un poco más de ganancia a la señal, lo suficiente para que de una potencia de 20W o un poco mayor y también para que la señal pueda ser correctamente acoplada al transformador de salida y así al altavoz. Para esta etapa se diseñó una etapa de potencia en clase A, llamada por su configuración Single-End y que va conectada a las etapas anteriores en serie. Para esto se utilizó un tubo de vacío, del cual ya se habló anteriormente, llamado Pentodo. Para este amplificador se buscó un pentodo de buena calidad y de fácil adquisición, encontrándose el famoso 6L6 de la fábrica Sovtek.

Es muy común encontrar en la gran mayoría de amplificadores pentodos como etapas de potencia, ya que estos poseen una gran ganancia y otras cualidades de las cuales ya se habló. Este tipo de pentodo es el más utilizado junto a otros como el KT88 y el EL34.

### 3.3.1 Diseño Etapa de Potencia



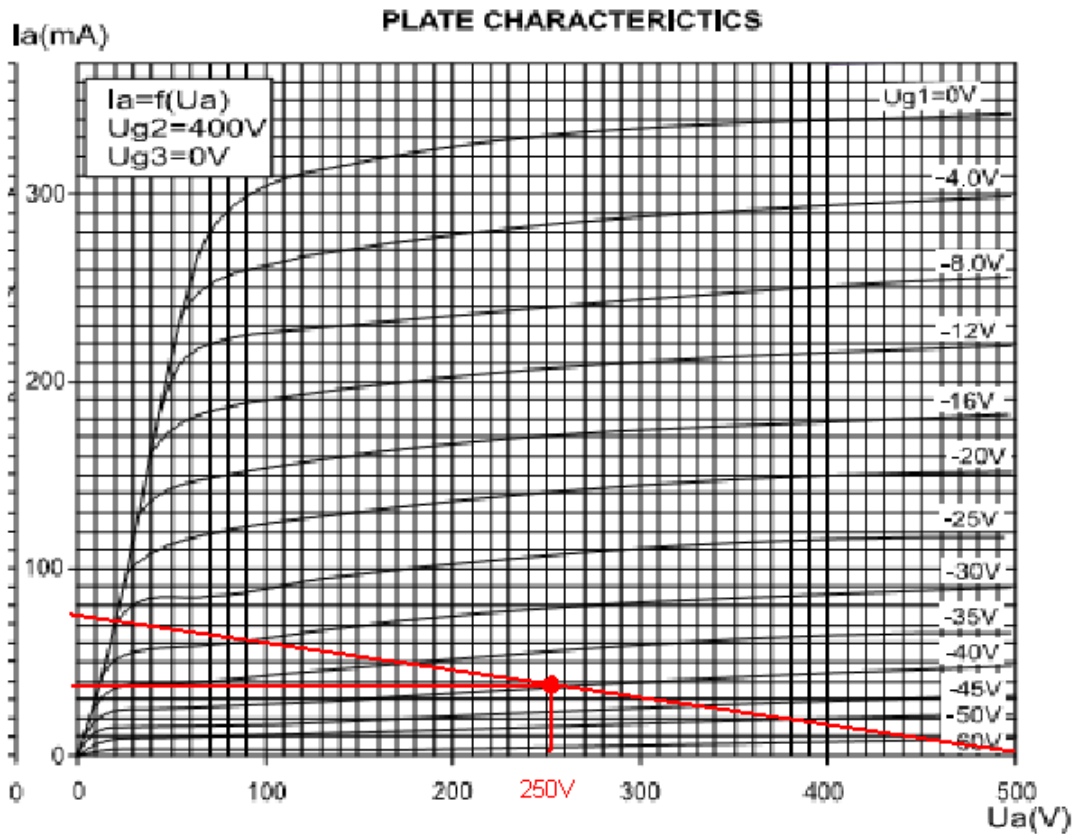
**Grafica 6** Diseño Etapa de potencia

Fuente: Autor

Al final de esta etapa se obtendrá una potencia eléctrica y acústica, la cual fue la prevista para este proyecto.

### 3.3.2 Punto de Funcionamiento

Para esta parte, el pentodo según se ve tiene una diferencia del triodo en su forma de grafica. Los fabricantes de los pentodos ofrecen en su datasheet todos los valores que se necesitan para realizar el diseño y por lo tanto se va a trabajar con dichos valores.



**Fig. 47** Selección  $\mu$

Fuente: Ver Anexos Datasheet 6L6

Para trabajar sobre esta grafica se toma el mayor valor de voltaje que puede soportar un pentodo. Para este caso se trabajo con 500V de ánodo y una corriente de ánodo de alrededor de 70mA que es la aconsejada por el fabricante, en este caso JJ Tubes. Por lo que este punto de operación se sitúa en un voltaje de 250V de placa y una corriente de ánodo aproximadamente 38mA. Algunos fabricantes recomiendan valores de impedancia de carga no mayores a 5k $\Omega$ , por esto se dice que la impedancia de salida de un pentodo es baja comparada al triodo, que en este proyecto, el triodo daba una impedancia alrededor de los 30k $\Omega$ . Este valor de impedancia se acomoda a los valores necesarios para el transformador de acople de impedancia que es necesario para adaptar el altavoz a este circuito.



### 3.3.3 Cálculo de la resistencia de cátodo, $r_K$

Para determinar este valor de resistencia se es necesaria la utilización de otra grafica que los fabricantes dan en sus datasheet.

En la grafica anterior se observa que el punto de operación quedo situado entre valores de voltaje de grilla de -40V y -45V. Con la nueva grafica, se ubican el valor de 250V junto al voltaje de grilla que se puede decir que es de -43V.

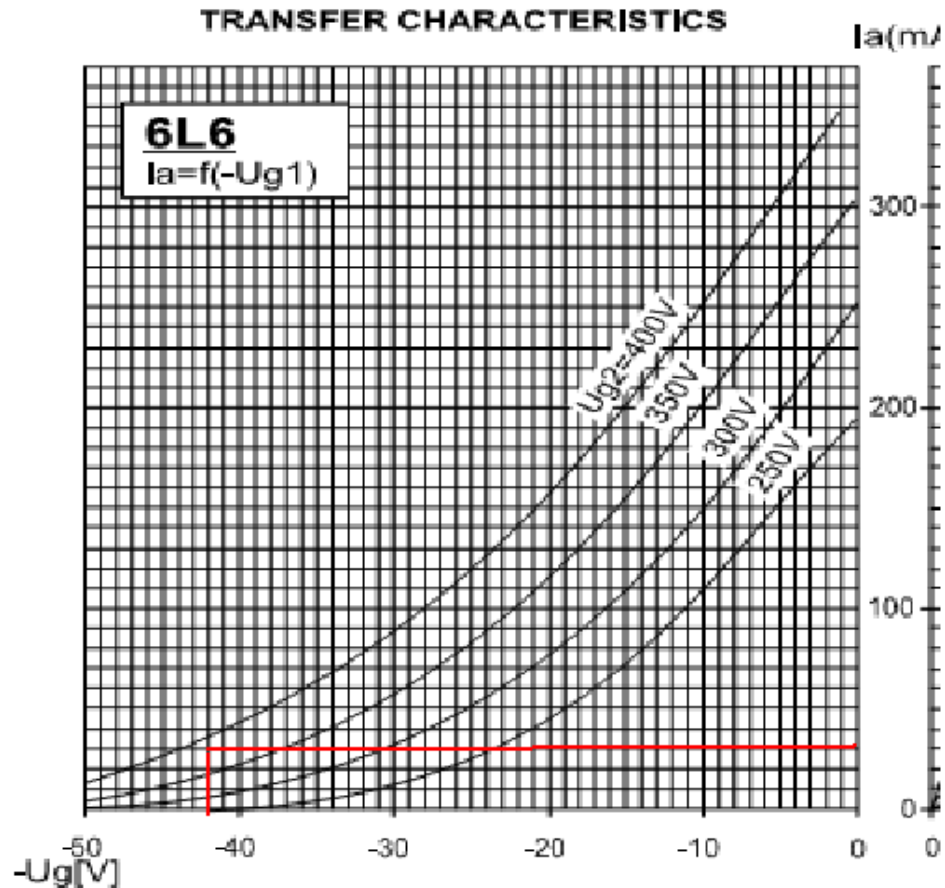


Fig. 48 Resistencia de cátodo

Fuente: Ver Anexos Datasheet 6L6

Para dicho valor se tiene que:

$$I_K = I_a + I_{g2}$$

$$-V_g = I_K \cdot R_K$$

$$R_K = \frac{-V_g}{I_a + I_{g2}}$$

Como se puede observar en la grafica característica de pentodo corriente contra voltaje de ánodo, esta se encuentra hecha para voltajes de reja de pantalla  $V_{g2} = 400V$ . En este proyecto ese voltaje es menor, por lo que se debe variar los valores para poder encontrar un punto medio. El datasheet de este tubo muestra un rango de  $R_K$  entre  $365\Omega$  y  $490\Omega$ . Este pentodo seleccionado permite una corriente de ánodo típica de  $134mA$  y  $5mA$  en la grilla de pantalla, por lo que se podría trabajar con esos valores. Este valor de corriente en la rejilla de pantalla se puede obtener con la ayuda de la grafica características del pentodo, grafica anterior, pero el fabricante de este tubo no muestra la curva de corriente, por lo que se decide tomar el valor dado en el datasheet. Reemplazando en la formula anterior, ahora se obtiene:

$$R_K = \frac{-(-43)}{134mA + 5mA} = 309.53\Omega$$

Se ha seleccionado para este proyecto, una resistencia comercial de  $330\Omega$ . Para conocer el valor de la potencia disipada por dicha resistencia se puede calcular como:

$$P_{RK} = I_K^2 \cdot R_K$$

$$P_{RK} = (139mA)^2 \cdot 330\Omega = 6.37W$$

Para asegurar se ha decidido seleccionar  $10W$  de potencia en esta resistencia de cátodo en el pentodo.

### 3.3.4 Polarización de la grilla de pantalla, $g_2$

Como ya se explico anteriormente, esta rejilla fue adicionada para evitar los problemas que el tríodo posee. Esta rejilla de pantalla debe estar en un voltaje menor al del voltaje de placa del pentodo. Si esta rejilla posee el mismo voltaje de la placa, el pentodo comienza a funcionar como un tríodo. En este proyecto, esta rejilla de pantalla fue polarizada al mismo voltaje de placa de los tríodos. Si queremos

utilizar la misma fuente de alimentación de la placa del pentodo, debemos reducir el voltaje para que esta funciones con una resistencia de pantalla.

### 3.3.5 Rejilla o grilla supresora, $g_3$

El pentodo que se ha seleccionado para trabajar en este amplificador, el 6L6wgc, posee esta rejilla supresora conectada internamente al cátodo. Este pentodo 6L6 es también conocido como un tetrodo power-beam. Dicho esto, no es necesario realizar ninguna conexión de rejilla supresora con este tubo de vacío.

### 3.3.6 Resistencia de grilla de control, $g_1$

Este valor al igual que los valores de resistencia de grilla para los tríodos, se establece según los criterios de los cuales ya se ha hablado anteriormente. Para esta etapa de potencia, en la cual se trabaja con un pentodo, dicho valor de resistencia en la rejilla de control se establece del mismo valor del tríodo anterior; 330k $\Omega$ .

### 3.3.7 Capacitor de acople de Entrada (Capacitor de Acople entre segunda etapa y potencia)

Como ya se dijo, la función de este capacitor es la de proteger la etapa, en este caso se habla de la etapa amplificadora o de potencia, de los voltajes de ánodo provenientes de la etapa anterior que pueden perjudicar esta válvula. Para este caso, utilizaremos como frecuencia 2Hz y con ello obtener el valor de ese condensador.

$$C_K = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_g} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 2Hz \cdot 330k} = 0.241\mu F$$

Para esta etapa se selección un condensador comercial de 0.22 $\mu F$ .

### 3.3.8 Calculo de la potencia del PENTODO

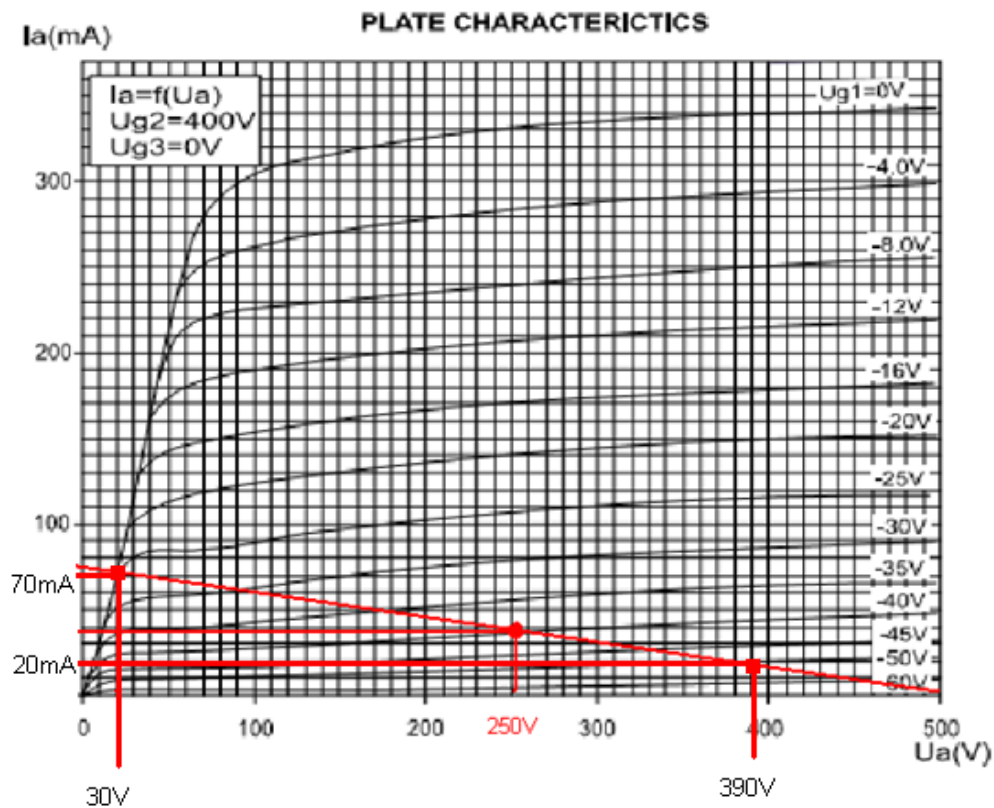
Para calcular la potencia de este pentodo se utiliza:

$$P_{RMS} = V_{RMS} \cdot I_{RMS}$$

Para ello volvemos a la gráfica de características de ánodo del pentodo para calcular primero el voltaje, luego la corriente de ánodo.

Primero para el voltaje se toman los valores de voltaje de grilla de control máximo y mínimo cuando cruzan la recta de carga, tomando los valores de voltaje de ánodo en estos cruces.

Para la corriente se toman estas intersecciones de voltaje de grilla de control máximo y mínimo con la recta de carga en la corriente ánodo.



**Fig. 49** Potencia en el pentodo

Fuente: Ver Anexos Datasheet 6L6

Se puede observar sobre la grafica que para un voltaje de grilla igual a 0V, en la intersección con la recta de carga se obtiene un voltaje de ánodo de 30V con una corriente de ánodo de 70mA y para un voltaje de grilla de -50V se obtiene un voltaje de ánodo de 390V y una corriente de ánodo de 20mA. Estos valores no son exactos, ya que dependen de la recta de carga que se seleccione y de la exactitud con la que se tracen las líneas. Para este pentodo es un poco difícil trazar líneas perfectas, ya que como se puede observar la grafica no es muy clara. Ya con estos valores se puede decir que hay un incremento en voltaje de 360V (390V – 30V) y un incremento en la corriente de 50mA (70mA – 20mA).

Entonces se puede decir que:

$$V_{RMS} = \frac{V_{PP}}{2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{360V}{2 \cdot \sqrt{2}} = 127V$$

Y para la corriente:

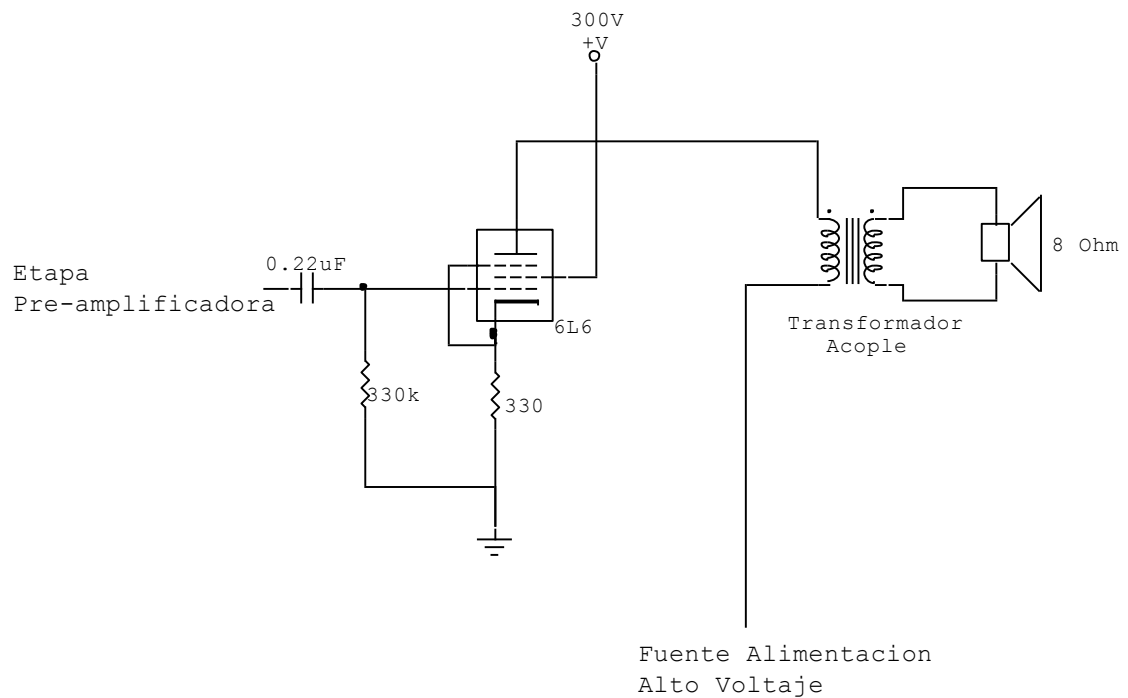
$$I_{RMS} = \frac{I_{PP}}{2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{50mA}{2 \cdot \sqrt{2}} = 17.6mA$$

Por lo que la potencia que entrega este pentodo es igual a:

$$P_{RMS} = 127V \cdot 17.6mA = 2.25W$$

Con este resultado se puede decir que la potencia que entrega este pentodo no es grande, pero como se ha dicho anteriormente, un amplificador clase A no entrega mucha potencia por lo que para lograr gran cantidad de potencia se requeriría un número mayor de válvulas incrementando el tamaño y costo. Para lograr altos valores de potencia se necesita otro tipo de amplificador, recomendándose un clase AB. También otro tipo de pentodos ofrecen mayor cantidad de potencia por lo que si se requiere es gran cantidad de volumen se deberían mirar otros, por el ejemplo los famosos EL34 o KT66.

### 3.3.9 Diseño final de la etapa amplificadora



**Gráfica 7** Diseño final amplificación

Fuente: Autor

### 3.4 FUENTE DE ALIMENTACION

Esta es una etapa muy importante en el diseño de un amplificador. Lo que se quiere hacer con esta etapa es la de convertir el voltaje de red de 120Vac a los voltajes necesarios para la correcta polarización de las válvulas. Para ello se necesita una fuente de alto voltaje en DC, con distintos tipos de voltaje, y otra fuente de bajo voltaje en AC para los filamentos de cada válvula. Para realizar esto se necesita de uno o varios transformadores que eleven el voltaje de 120Vac a unos 500Vac, según sea lo deseado, y otra parte que me reduzca los 120Vac de la red eléctrica a 6.3V<sub>ac</sub> o 12.6V<sub>ac</sub>.

En este proyecto se adquirió un solo transformador, el cual me eleva el voltaje de la red eléctrica y me reduce el voltaje para polarizar los filamentos de las válvulas. Aparte de los voltajes necesitados también debemos tener en cuenta la capacidad de corriente que es capaz de entregar el transformador de acuerdo a las exigencias de cada elemento y del circuito total. Los filamentos de cada válvula es una de las partes que más exige corriente. Cada válvula demanda de alrededor de 0.9 A por filamento. En este proyecto son tres las válvulas, por lo que el promedio de corriente dedicada solo al filamento es de 2.7A. Los filamentos de las válvulas pueden polarizarse en DC o AC según se desee, pero para este caso se polarizo en AC, para evitar implementar una rectificación y un filtrado, aumentando los gastos. En la parte de placa, las corrientes son menores, en comparación con los filamentos, ya que el transformador que se trabajo en este proyecto nos proporciona hasta 260mA, lo suficiente para poder alimentar las tres válvulas utilizadas.

Luego del transformador, se encuentra la etapa de rectificación y filtrado. Para la rectificación se trabajó con un rectificador de media onda, compuesto por 3 diodos 1N5407, los cuales pueden soportar voltajes de hasta 800V y corrientes de hasta 3A, lo suficiente para evitar daños en esta parte.

También existe la posibilidad de trabajar con una válvula rectificadora, o diodo de vacío. Este tiene sus ventajas y desventajas comparado con la utilización de diodos semiconductores. Las válvulas agregan una calidad de sonido, ya que proporcionan un poco mas de calidez a la señal. Una de las desventajas es su tiempo de respuesta. Los músicos hablan que el utilizar válvulas disminuye el ataque de la mano a la cuerda, en otras palabras los cambios de volumen hechos por el guitarrista no se siente como en cambio si en una rectificación con semiconductores. Al comienzo del presente proyecto se hicieron pruebas con la válvula 5y3, la cual mostro unos resultados excelentes, pero debido a dichas pruebas la vida útil de esta válvula se fue disminuyendo, por tanto disminuyendo su calidad y al final se tuvo que reemplazar por una rectificación con diodos semiconductores.

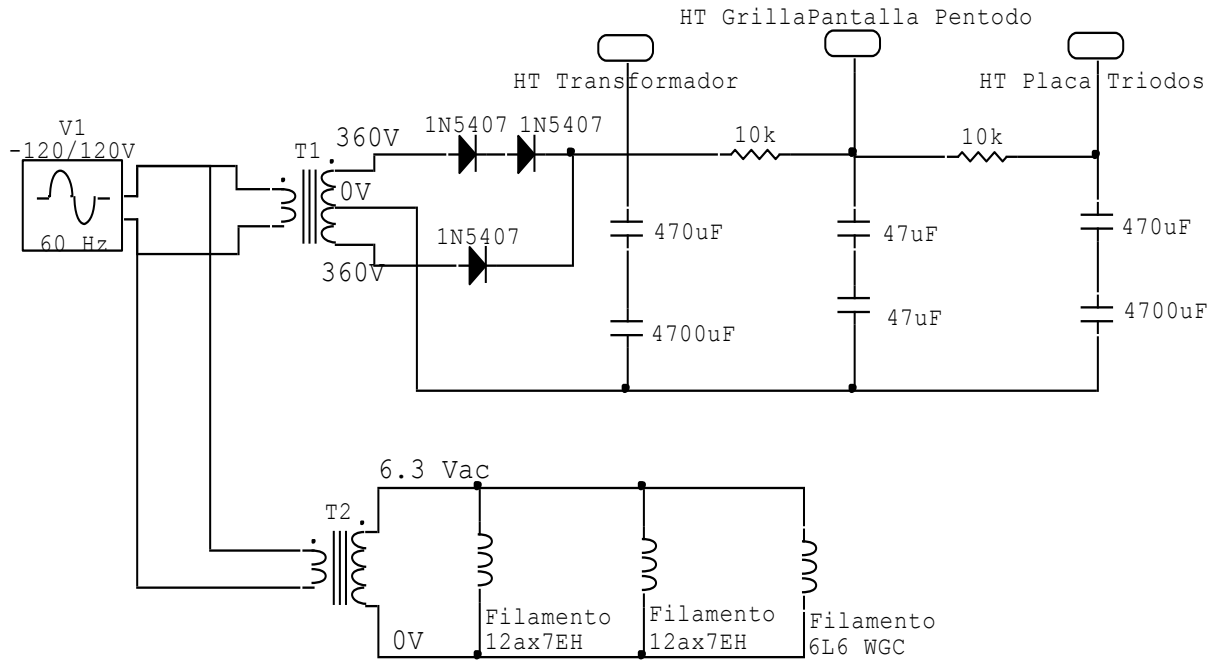
El transformador elevador/reductor adquirido para este proyecto:



**Fig. 50** Transformador de potencia

Fuente: Autor

Para cumplir las necesidades del circuito se planteó el siguiente diseño:



**Grafica 8** Diseño fuente de alimentacion

Fuente: Autor

Para el valor de la capacitancia de esta fuente de alimentacion, algunos autores hablan de utilizar unos  $2000\mu\text{F}$  por cada amperio de salida de la fuente. En este caso la salida es de maximo  $260\text{mA}$ , limitada por el transformador, por lo que en este circuito se obtiene una capacitancia de salida de  $880\mu\text{F}$  lo que según las pruebas realizadas fue suficiente para realizar un buen trabajo. Lo importante para esta fuente es el voltaje que deben soportar los condensadores, el cual fue una tarea dificil ya que es complicado conseguir condensadores de alta capacitancia y de muy alto voltaje(tipicos de los  $450\text{V}$ ) en el mercado.

Esta es la parte que mas presento problemas durante el desarrollo del proyecto, ya que hubo necesidad de rediseñar y cambiar la fuente de alimetancion varias veces. Esto pudo haber ocurrido por varias razones. Primero, el banco de condensadores



utilizado no soporto las corrientes exigidas por el circuito y por ello hubo un daño en ellos. Segundo, talvez debido a lo ajustado que se encuentra el voltaje que sopotan los condensadores con el voltaje demandado (debido a los valores encontrados en el mercado se logró 400Vmax) alguna fluctuacion ocurrida en el circuito o tensiones parasitas ocasionaron daños en el banco de condensadores, ya que no hay un rango de seguridad para este voltaje en los condensadores.

### 3.5 Transformador de Salida

Como se hablo en partes anteriores, la impedancia de salida de los triodos es muy alta (tipicas de 30kΩ) y altos voltajes. Para ello es necesario acoplar esta señal amplificada con un altavoz de 8Ω. Es por esta razon que se necesita hacer un acople de la impedancia de salida del circuito con un alto voltaje con una impedancia y voltaje que el altavoz pueda manejar. La impedancia de salida de un pentodo es relativamente baja (no mayores a 5kΩ) pero aun asi es necesario poder hacer un perfecto acople entre este pentodo y un altavoz, por lo que se utiliza un transformador de salida.

Para garantizar una buena calidad de sonido, sin que el transformador distorsione la señal se necesita de una buena construccion de este transformador. En el mercado local y nacional es una tarea un poco dificil de conseguir, pero se trata de escoger la mejor opcion para el proyecto. El objetivo de un buen transformador es que el no agregue ruidos hum, oscilaciones o distorsiones audibles y ademas el debe soportar los abusos a los que podria estar sometido como cortos circuitos.

Las valvulas pueden manejar centenas de voltios, pero entregar decenas de corriente en la salida. Un altavoz tipico de 4Ω u 8Ω requiere decenas de voltaje y corriente para su funcionamiento.

Para poder cumplir con esto se debe construir un transformador con ciertas características, las cuales se van a explicar a continuacion.

El pentodo utilizado en este proyecto en su datasheet habla sobre una resistencia de carga maxima de 4.2kΩ y otras fabricas del mismo 6L6 hablan sobre esta impedancia que oscilan entre los 1.5kΩ y los 5kΩ. Para este diseño se va a seleccionar una carga de 4kΩ y un altavoz de 8Ω

$$Z_1 = 4K\Omega$$

$$Z_2 = 8\Omega$$

siguiendo los calculos para transformadores se tiene que:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{1}{a^2} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2$$

Por lo que:

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{4000}{8}} = 22$$

Según la potencia del amplificador se necesita que:

$$P = V_1 \cdot I_2 = 20W$$

$$\frac{V_2^2}{Z_2} = 20W$$

Y se establece un altavoz de  $8\Omega$ , por lo que  $Z_2 = 8\Omega$

$$V_2 = \sqrt{20 \cdot 8} = 12.64 V$$

Y reemplazando en la formula anterior se obtiene:

$$V_1 = V_2 \cdot \sqrt{\frac{4000}{8}}$$

$$V_1 = 12.64 \cdot \sqrt{\frac{4000}{8}} = 283 V$$

Ya con estos valores se puede conseguir un transformador para cumplir la potencia necesitada, pero para asegurar un funcionamiento correcto es necesario elevar un poco estos valores, para esto se puede calcular para una potencia de 30W.

$$V_2 = \sqrt{30 \cdot 8} = 15 V$$

Reemplazando:

$$V_1 = 15 \cdot \sqrt{\frac{4000}{8}} = 335 \text{ V}$$

Las especificaciones del transformador necesitado serian:

$$V_1 = 335$$

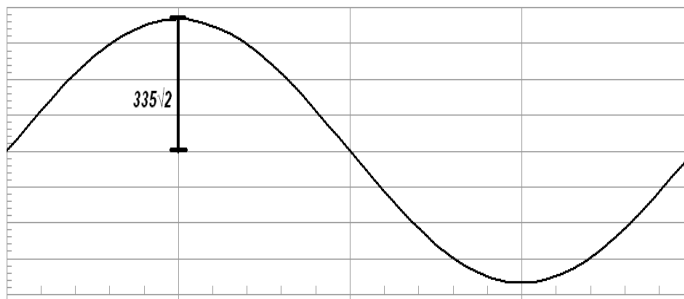
$$V_2 = 15 \text{ V}$$

$$Z_1 = 4000\Omega$$

$$Z_2 = 8\Omega$$

$$\text{Potencia} = 30 \text{ W}$$

Se podria diseñar un transformador de salida que tenga la posibilidad de conectar altavoces de otras impedancias (es comun los altavoces de  $2\Omega$   $4\Omega$  y  $8\Omega$ ) por lo que solo abria que hacer calculos de los voltajes necesarios para dichas impedancias.



$$2 \times 335\sqrt{2} = 947 \text{ V}$$

**Grafica 9** Señal senoidal

Fuente: Autor

Este resultado es imposible de obtener, ya que el maximo voltaje esta limitado por la fuente de alimentacion del pentodo.

$$V_{RMS} = \frac{250 V}{2} / \sqrt{2}$$

$$V_{RMS \text{ máx}} = 88 V$$

Por lo que para una potencia de 20W a la salida se tendrán:

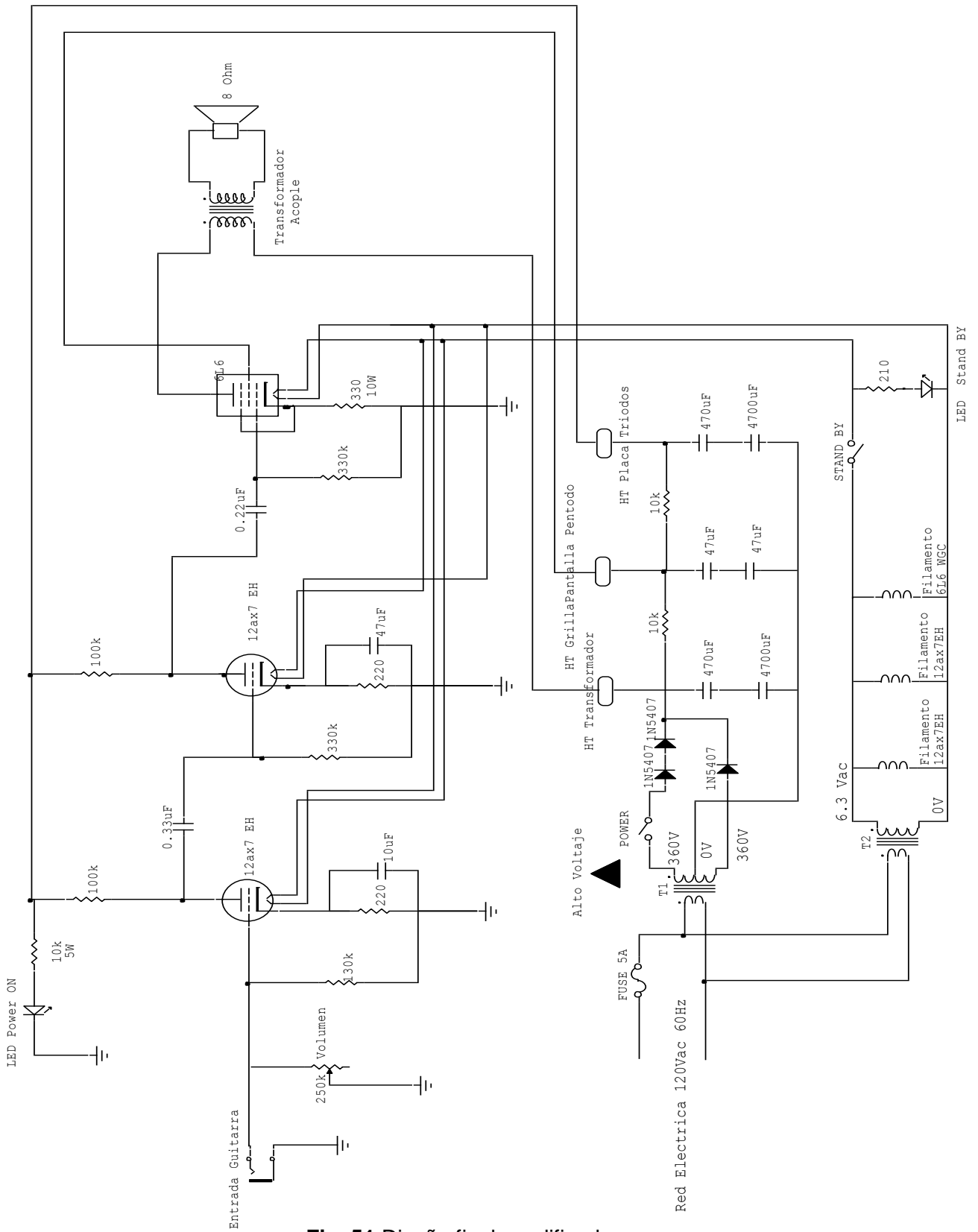
$$V_{out} = \sqrt{20 \cdot 8} = 12.64 V$$

$$V_{IN \text{ máx}} = V_{RMS \text{ máx}} = 88 V$$

Durante la fase de pruebas del equipo se probaron distintos transformadores adquiridos en el mercado, buscando el de mejor calidad sonora y al final se decidió por implementar el transformador que fue fabricado en la ciudad, ya que los otros contruidos fuera del país no se encontraban en buen estado y no proporcionaban una buena calidad sonora induciendo en la señal una cantidad de ruido no deseable.

### **3.6 Diseño Final del Amplificador**

Después de realizar todos los cálculos con cada una de las etapas del amplificador, se puede ahora reunir estas etapas en un solo circuito y proceder a su respectivo montaje final.



**Fig. 51** Diseño final amplificador  
Fuente: Autor

### 3.7 Construcción del Amplificador

El objetivo de esta parte del proyecto es la de realizar un puente entre la parte teórica explicada anteriormente con el montaje de dicho amplificador con la más importante conclusión; la mejor calidad de sonido posible.

Todo esto se logra de muchas formas, primero empezando con una buena selección de materiales, pero esto se encuentra limitado a lo que se pueda encontrar en el mercado y a un precio razonable. Si se desea un muy buen amplificador, se podría pensar en comprar los mejores componentes electrónicos pero eso incrementaría enormemente su precio, por lo que ya es decisión del diseñador de hacerlo o no.

Después de tener una buena selección de componentes electrónicos ajustados a nuestras necesidades, entre los cuales encontramos como una buena selección de condensadores y resistencias. Algunos autores hablan sobre una diferencia sonora existente entre los condensadores electrolíticos y los condensadores cerámicos y que cada uno de estos aporta un sonido característico al amplificador final. Para este proyecto se adquirieron solo condensadores electrolíticos. Con la selección de las resistencias no hay ningún problema, solo la precaución de seleccionar la potencia adecuada para evitar daños en el amplificador.

Otra parte a tener en cuenta es la buena calidad de los transformadores escogidos. Se adquirió un transformador elevador/reductor de muy buena calidad y a un buen precio de fabricación americana hecho para exclusivamente para los amplificadores a tubos de vacío. Con este transformador se evitó la adquisición de dos transformadores, uno elevador y otro reductor, aumentando su precio. El transformador de salida es un tema muy clave como ya se habló antes, pero este no fue posible de adquirir, con buena calidad, en el mercado americano por lo que se optó por la fabricación local dando resultados sonoros aceptables.

El cable a utilizar es un punto muy importante en la construcción de un amplificador, ya que no se utilizaran baquelitas en este proyecto, porque con una buena selección de este cable se evitan problemas con ruidos inducidos en la calidad sonora final. Es importante utilizar cable de buena calidad, en algunas partes es necesario utilizar cable especial para manejo de pequeñas señales de audio y es muy importante, ya que fue comprobado durante el proceso de montaje, la utilización de cable blindado entre el jack de entrada del amplificador, donde se conecta la guitarra, y la entrada a la primera etapa del amplificador, ya que es una señal muy débil y la no utilización de este cable blindado adiciona una gran cantidad de ruido al amplificador final. En ciertas partes del amplificador es necesario tener este cable de corta longitud.

En cuanto a la caja en la cual va encerrado todo el circuito se decidió por fabricarla en madera, con el objetivo de dar un aspecto antiguo y clásico al amplificador puesto que la utilización de tubos al vacío data de mitad del siglo pasado.

Para el control de volumen simplemente se utilizo un potenciómetro logarítmico encontrado en el mercado local. No es la mejor opción, ya que sufren desgastes con el tiempo, no son muy precisos y pueden introducir ruidos, pero al implementarse en el proyecto funciono sin problemas, además de su bajo costo.

Adicional a lo dicho anteriormente se adquirieron otros elementos que complementan el desarrollo del proyecto. Elementos como adaptadores para el cable de red, porta-fusibles, perilla de volumen, switches, de Stand BY y Power, y un terminal para conectar el altavoz.

Para la conexión de los tubos de vacío con el circuito, se es necesario de “sockets” con el objetivo de poder hacer cambios en un futuro de los tubos cuando sea deseado. Estos fueron comprados junto a los tubos.



**Fig. 52** Construcción del amplificador

Fuente: Autor

Primero empezar fijando el transformador de la fuente de alimentación en la caja del amplificador. Luego de realizar el proceso se procede a soldar los terminales del transformador a sus respectivas partes del circuito. Los cables del transformador que hacen parte del primario de este, van soldados a la clavija de red eléctrica y el porta-fusible. Luego se procede a montar la fuente de alimentación del amplificador con mucho cuidado, ya que se manejan altos voltajes y no se desean malas conexiones. De la fuente se enviaron cables de alimentación a cada parte de los tríodos y luego se colocaron los switches de encendido; Stand By y POWER.

Con el objetivo de darle una mejor apariencia y no quitar espacio al interior, se colocaron los dos condensadores de mayor tamaño comprados para el proyecto en la parte exterior de la caja junto al transformador y los tubos de vacío. Para el circuito del amplificador se utilizaron regletas de potencia para conectar cada componente uno con otro y otros fueron soldados.

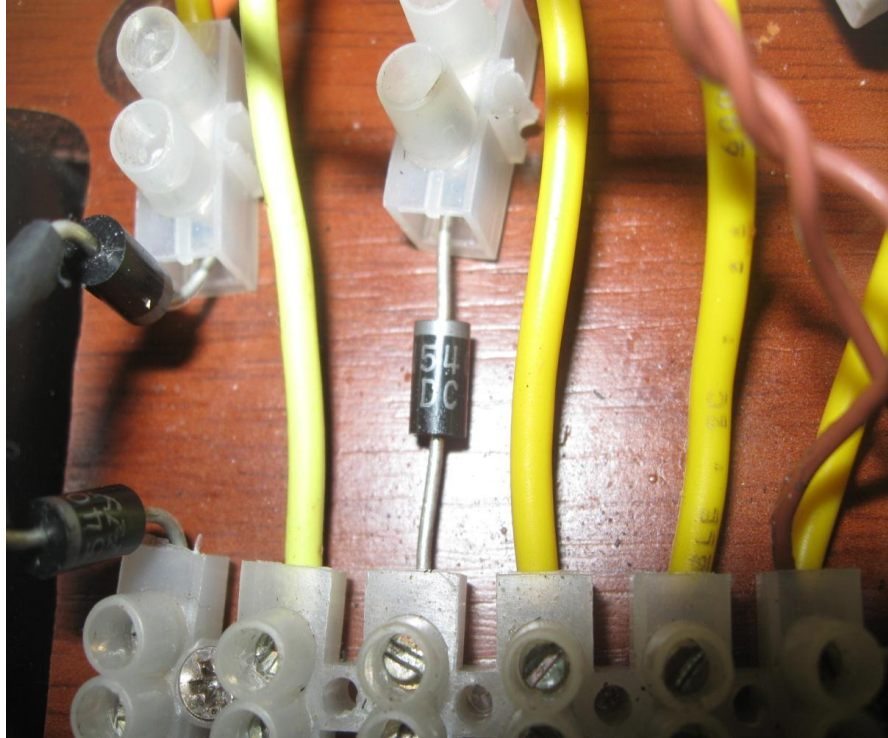


**Fig. 53** Construcción del amplificador

Fuente: Autor



Una vez terminadas las conexiones de la fuente de alimentación se continúa con la implementación de los diodos rectificadores. Para esto se establece una regleta sobre la madera con el objetivo de facilitar las conexiones y fijar los elementos.



**Fig. 54** Construcción del amplificador

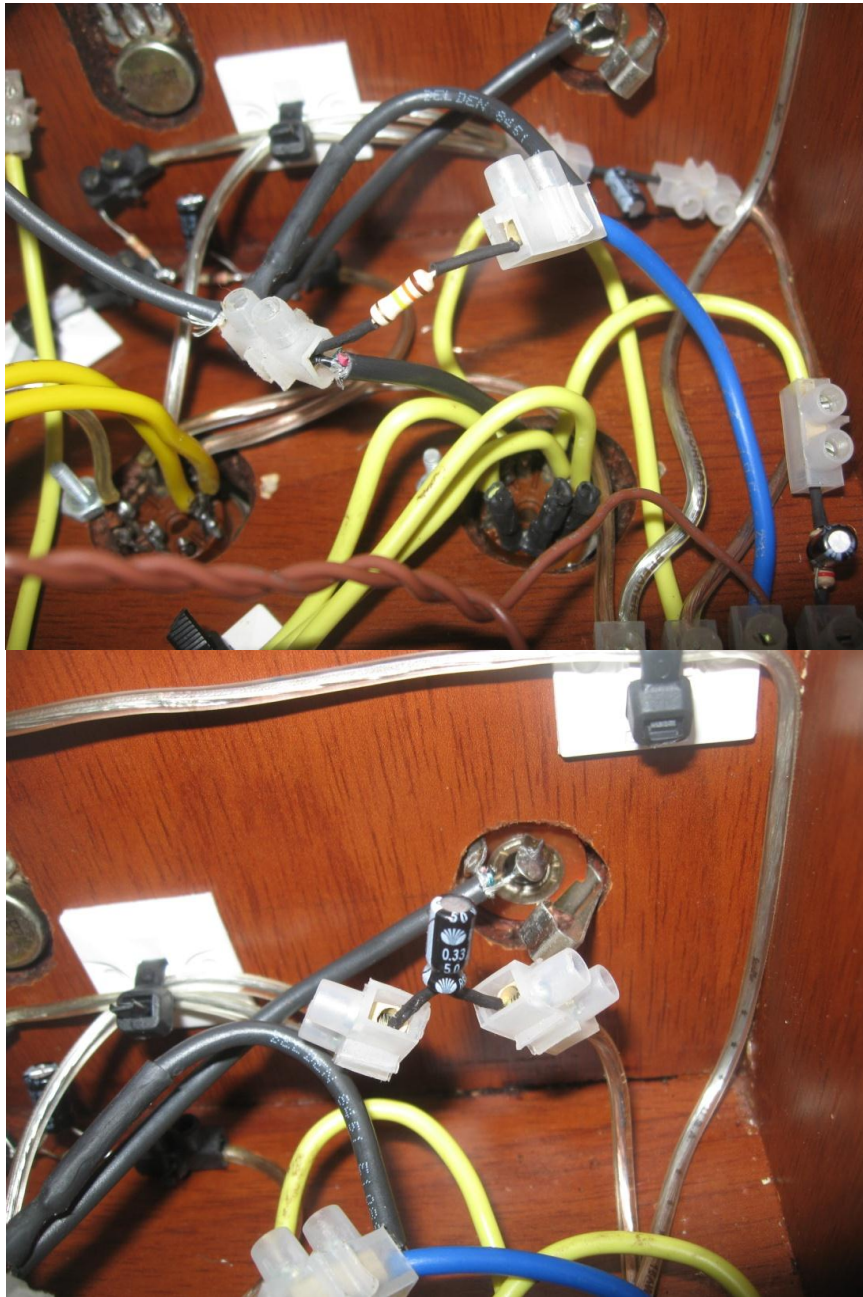
Fuente: Autor

Como se puede observar en la grafica los dos diodos fueron soldados directamente entre sus terminales y se utilizo una manguera termo-encogible en estos.

Terminada esta parte de la fuente de alimentación se prosiguió con la primera etapa del amplificador. Se soldaron los cables al socket del primer tríodo y se ajusto esta base del tubo sobre la caja de madera. Luego se fijo otra regleta de potencia para asegurar allí las resistencias de placa de cada válvula.

Como se puede observar en la grafica se ajusta las resistencias de placa entre dos regletas de potencia y sus derivaciones hacia la placa de cada tríodo y la fuente de alimentación, a la cual llega por medio de un cable de alta tensión extendido dentro del interior de la caja. A la regleta de los tríodos también se ajustaron

Como se puede observar tambien se fijo un cable que va hacia el led indicador de encendido o POWER. Luego de realizado este proceso se procede a fijar los otros componentes que conforman la primera etapa. Tambien se colocar sobre la caja el jack de entrada y el potenciometro de volumen utilizando entre estos y la entrada a la rejilla de control del primer triodo cable blindado y corto.



**Fig. 55** Construcción del amplificador  
Fuente: Autor

Hecho este procedimiento se continúa con la segunda etapa valvular siguiendo el mismo procedimiento que en la primera etapa.

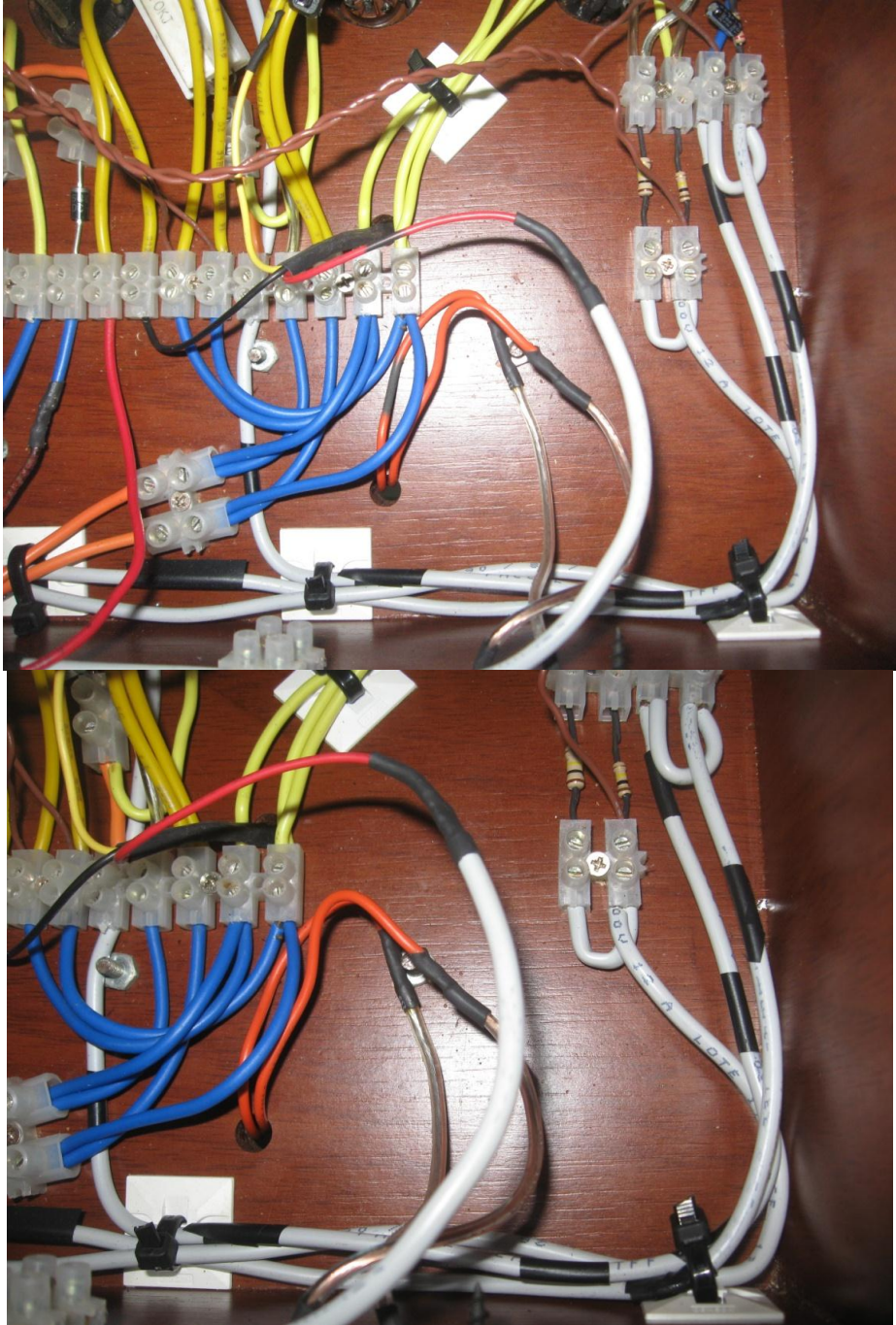
En esta parte se conectan los componentes de la segunda etapa, se interconecta la salida del primer tríodo con la entrada del segundo tríodo. Se conectan también su alimentación para los filamentos. Se puede observar los cables para reducir espacio se utilizan amarres plásticos y fijadores pegados sobre la madera.



**Fig. 56** Construcción del amplificador  
Fuente: Autor

Terminado esta segunda etapa valvular, se continúa con la última etapa; la amplificación. En ella se siguen los mismos procedimientos anteriores. Se fija el socket del pentodo, de mayor tamaño al de los tríodos, sobre la madera y se procede a soldar los cables.

Como se puede observar, al pentodo se conectan todos los terminales. La resistencia de potencia, el voltaje de grilla, filamentos, entrada proveniente de la segunda etapa pre-amplificadora y salida hacia el transformador de salida.



**Fig. 57** Construcción del amplificador  
Fuente: Autor

Luego de conectar la última etapa, se procede a fijar sobre la caja de madera el transformador de salida y conectarlo al circuito. Y se termina con la conexión de la salida de este transformador a la clavija de conexión del altavoz.



**Fig. 58** Construcción del amplificador  
Fuente: Autor



**Fig. 59** Construcción del amplificador  
Fuente: Autor

## 4. PRUEBAS EN EL AMPLIFICADOR

### 4.1 Respuesta en frecuencia

En esta etapa se hicieron varias pruebas sobre el amplificador ya terminado. Se hicieron pruebas de respuesta en frecuencia del amplificador, obteniendo varios resultados variantes. En esta respuesta en frecuencia un factor importante es la calidad del altavoz, ya que cada altavoz tiene una respuesta en frecuencia diferente. Para estas pruebas se utilizaron dos altavoces, uno de marca GEMINI de una calidad aceptable y otro de marca ALESIS, construido para amplificadores de guitarra, dando como resultado una mejor calidad sonora. También se realizó una prueba con una carga de  $8\Omega$  a 30W, por lo que se simuló con un arreglo de resistencias de potencia la carga de un altavoz, obteniendo resultados que serán mostrados a continuación.

Se hizo un barrido de frecuencias, empezando con una frecuencia de 60Hz y tomando su valor en potencia de salida y aumentando este valor de frecuencia para determinar su potencia máxima en ciertas frecuencias. Una guitarra eléctrica produce frecuencias entre los 82Hz y los 1300Hz, y armónicos hasta los 3500Hz.

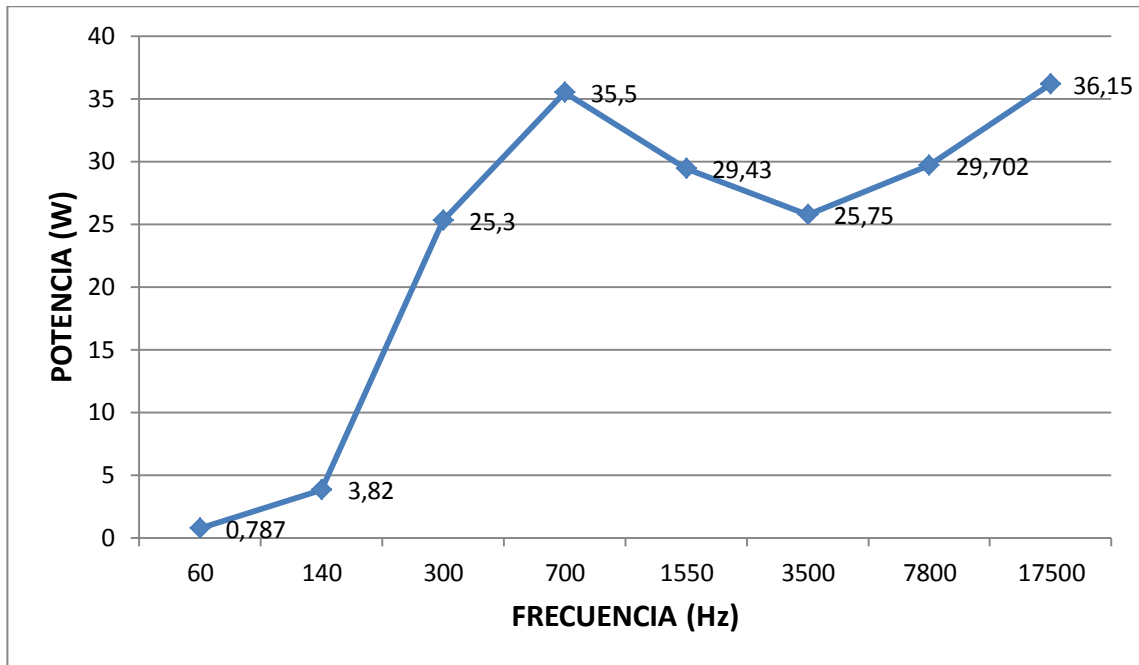
#### Prueba #1

En esta primera prueba se utilizó el parlante marca GEMINI y una señal de entrada al amplificador senoidal de 180mVpk, dando los siguientes resultados:

Frecuencia (Hz)	Amplitud ( $V_{pk-pk}$ )	Potencia (W)
60	7.1	0,787
140	17,5	3.82
300	40,3	25,3
700	47,7	35,5
1550	43.4	29.43
3500	40.6	25,75
7800	43.6	29,702
17500	48.1	36,15

Tabla 1 Respuesta en frecuencia Prueba 1

Fuente: Autor



**Grafica 10** Respuesta en frecuencia Prueba 1

Fuente: Autor

Se puede observar el crecimiento de la potencia con la frecuencia. Es un resultado esperado ya que las frecuencias bajas producen una potencia baja debido a varios factores. También se observó en la toma de datos que entre un rango de 400Hz a 1000Hz el amplificador dio grandes valores de potencia al igual que sobre las frecuencias superiores a los 15000Hz.

### Prueba #2

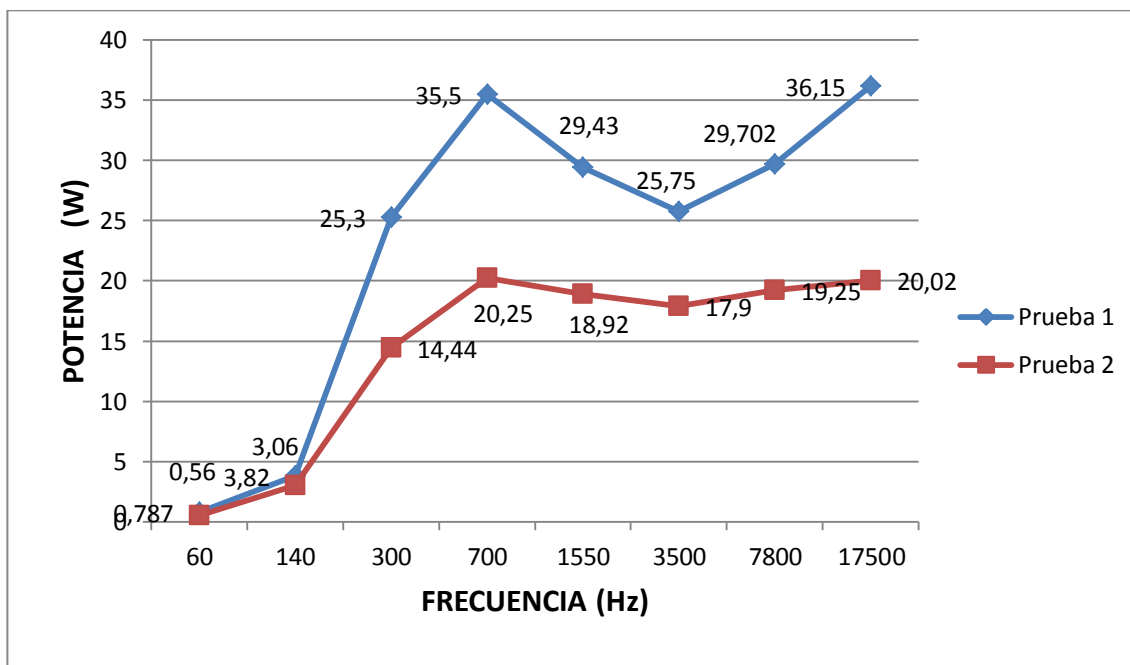
En esta prueba se utilizó en vez de un parlante una carga de  $8\Omega$  a 30W formado por un arreglo de resistencias de potencia. Acá se pretende medir la potencia eléctrica del amplificador que es diferente a la potencia acústica que se produce al conectar un altavoz como carga. Se utilizó la misma señal de entrada senoidal de 180mVpk y se hizo un barrido de frecuencia arrojando los siguientes resultados:



Frecuencia (Hz)	Amplitud ( $V_{pk-pk}$ )	Potencia (W)
60	6	0,56
140	14	3,06
300	30,4	14,44
700	36	20,25
1550	34,8	18,92
3500	33,8	17,9
7800	35,1	19,25
17500	35,8	20,02

**Tabla 2** Respuesta en frecuencia Prueba 2

Fuente: Autor



**Grafica 11** Respuesta en frecuencia Prueba 2

Fuente: Autor

Se puede observar una disminución en la potencia, que según en los datos de la prueba dos muestra una potencia máxima de alrededor de los 20W mientras que en la primera prueba alcanzo los 35W. También se puede observar un poco de estabilidad en potencia, en frecuencias desde los 1500Hz hasta los 17500Hz. Estos datos también muestran una potencia mayor a los 15W sobre las frecuencias de los 300Hz hacia arriba.

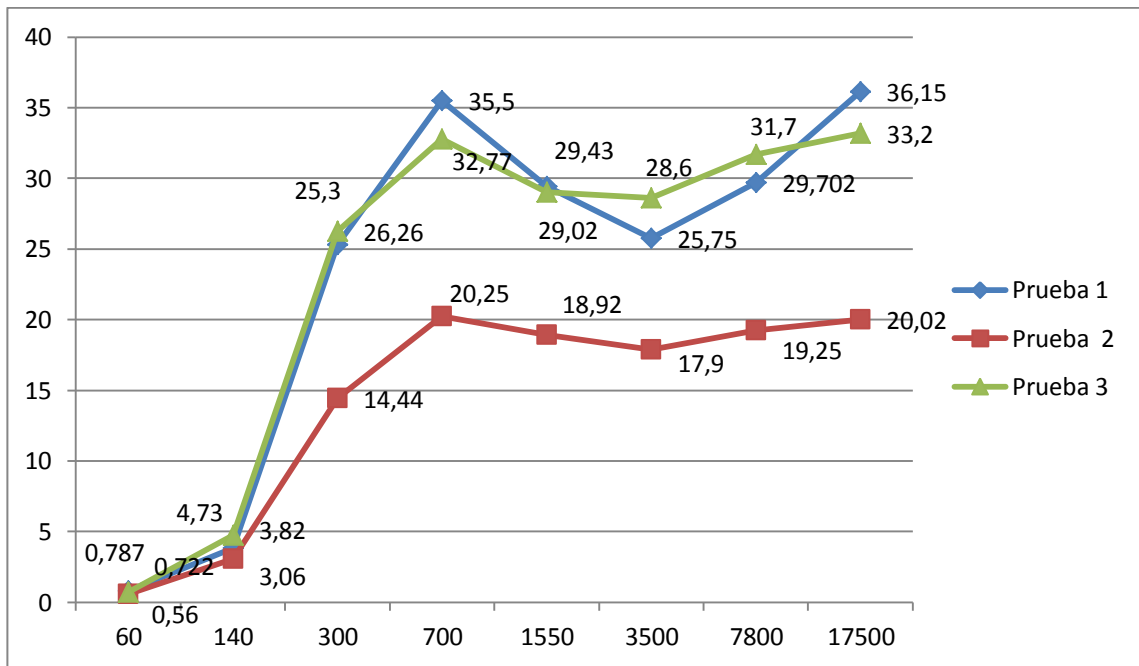
### Prueba #3

Para esta prueba se utilizó el parlante construido especialmente para amplificadores de guitarra y de buena fabricación marca ALESIS. Es un parlante de 50W a 8Ω utilizando la misma señal senoidal a la entrada del amplificador como en las pruebas anteriores arrojando los siguientes resultados:

Frecuencia (Hz)	Amplitud ( $V_{pk-pk}$ )	Potencia (W)
60	6,8	0,722
140	17,4	4,73
300	41	26,26
700	45.8	32,77
1550	43,1	29,02
3500	42.8	28,6
7800	45,1	31,7
17500	46,1	33,2

**Tabla 3** Respuesta en frecuencia Prueba 3

Fuente: Autor



**Grafica 12** Respuesta en frecuencia Prueba 3  
Fuente: Autor

En esta grafica se puede observar el comportamiento del amplificador con un altavoz diseñado especialmente para amplificadores de guitarra eléctrica. Se observa una potencia un poco menor al parlante GEMINI, pero hay una estabilidad en cuanto a ella sobre la gran parte del barrido de frecuencia hecho.

Frecuencias muy altas ya no son audibles, puede ser debido a que este parlante se encuentra diseñado para trabajar entre las frecuencias de la guitarra eléctrica, no mayores a 3000Hz aproximadamente. Sobre los 10000Hz estas frecuencias dejaron de ser audibles en este parlante.

## 4.2 Ruidos

Los amplificadores a tubos están sometidos a diversos ruidos parásitos. Existen varios tipos de ruido, entre los cuales encontramos la “microfonia”, el ruido “souffle”, el “ronflement” o ronquidos y otros ruidos diversos.

### 4.2.1 Microfonia

Si se da un golpe en la entrada o un impulso en la primera etapa de un amplificador o sobre el primer tubo al vacio, es probable de escuchar un ruido sobre los altavoces y será un sonido hueco y un poco metálico

Este fenómeno de microfonia en los tubos es debido a las vibraciones en las grillas o rejillas. Si los filamentos de la grilla vibran la corriente de cátodo varía un poco, pero algunas veces es bien audible, debido a que se altera la distancia entre esta y el ánodo. Los tríodos son más susceptibles a estos efectos y este efecto es directamente proporcional a la tensión en el ánodo, por lo que no se aconseja trabajar los tríodos a excesivas tensiones. Para mejorar esto se recomienda conseguir tubos de buena calidad ya que son construidos con el objetivo de eliminar este efecto.

#### 4.2.2 Ruido Térmico

Este tipo de ruido se encuentra presente en todas partes. En un conductor, una resistencia y nace en la nube de electrones. Este ruido se mueve de una manera desordenada, ya que su energía cinética depende de la temperatura del conductor. El movimiento de electrones producen unas minúsculas tensiones alternas sobre los extremos de un resistor.

Estas pequeñas tensiones alternas cubren un largo espectro de frecuencia, las cuales constituyen todas juntas, el ruido blanco. Este ruido blanco es independiente de la frecuencia.

Según Nyquist, la tensión de ruido está dada por:

$$V_{eff} = \sqrt{R \cdot 4kT \cdot \Delta f}$$

La constante de Boltzmann, constante **k**, está dada como  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \left(\frac{\text{Joules}}{\text{kelvin}}\right)$ .

El intervalo de frecuencia de ruido está designado por  $\Delta f$  que en este proyecto será hasta la frecuencia más alta, aproximadamente 20kHz. Si introducimos una temperatura ambiente con una resistencia de grilla de  $1M\Omega$ , se encontrará una tensión de  $18\mu V$ .

Hay otros tipos de ruidos suplementarios que se pueden sumar debido a la imperfección de los materiales utilizados.

Este tipo de ruido es diferente al ruido térmico general. Es posible de reducirlo con la utilización de materiales de buena calidad, más puros, y de modos de fabricación más finos. El ruido térmico, al contrario, es un fenómeno natural universalmente presente, contra el que no se puede hacer mucho.

#### 4.2.3 Ruidos en los tubos

Existen tres tipos de ruidos que afectan los tubos. El primer tipo es una forma de ruido térmico, llamado como ruido de disparo (shot noise en inglés o bruit de grenaille en francés). Este nace en el espacio de carga, donde se encuentran una

gran cantidad de electrones. La mayoría de estos se alojan a los lados del cátodo y una pequeña parte atraviesa hasta el ánodo. Estos pocos que se encuentran alojados provocan las fluctuaciones detectables en la corriente de cátodo.

La segunda forma de ruido en un tubo es llamado como ruido de distribución. Este se produce en los tubos con múltiples rejillas ya que la corriente de cátodo se reparte entre el ánodo y, por ejemplo, la rejilla de pantalla. Este ruido es varias veces más puro que el ruido de disparo hablado anteriormente y por lo tanto los pentodos son más ruidosos que los tríodos.

La tercera forma de ruido es conocido como ruido de centelleo y es provocado por la irregularidad de la emisión de electrones por el cátodo. Es un ruido presente en las bajas frecuencias, menores a 10Khz.

#### **4.2.4 Snoring Noise (Ruidos o ronquidos)**

Los tubos se encuentran más sometidos a este tipo de ruido, los ronquidos. Este ruido proviene de la corriente de los filamentos de calentamiento. Existen siempre unas capacitancias parasitas entre el filamento y los otros electrodos. Si el cátodo es puesto a masa junto a un capacitor de desacople, no se hará presente este efecto. Este efecto está más presente en los tubos con calentamiento directo alimentado con corriente alterna.

Los campos magnéticos pueden también ser fuentes de este efecto, ya que los tubos internamente captan en sus devanados y transforman estos campos en tensiones de “ronquido”.

### 4.3 Distorsión y Armónicos

Para hacer este tipo de medición se utilizó la señal proveniente de la guitarra. Para poder realizar este tipo de medición se es necesario de observar los armónicos producidos por el amplificador, y para ello se necesita de un analizador de distorsión, el cual es un equipo de difícil obtención. Para este proyecto se maneja el software matlab, ya que con este se le puede introducir una pequeña porción de señal de audio y al aplicarle Fourier, se obtiene una gráfica con sus respectivos armónicos y con estos poder dar unas conclusiones respecto al proyecto.

Para ello, el proyecto se desplazó hacia un estudio de grabación con una calidad de grabación aceptable, ya que no se desea introducir recortes no deseados en la señal, pero aun así las mediciones pueden variar un poco. Se realizó una grabación con la señal de la guitarra eléctrica en la entrada del amplificador y conectado a un altavoz marca "alesis". Frente al altavoz, separado una distancia de 20cm, se posicionó un micrófono marca "Shure" modelo SM58, un micrófono de una calidad aceptable para la grabación. Esta señal producida por la guitarra, el amplificador y recogida por el micrófono fue grabada por la excelente herramienta de grabación llamada ProTools. Este es un sistema de grabación ultramoderno, consistente de hardware y software especializado para la grabación de audio. Con todo esto se espera de que todo este conjunto de equipos no adjunte al sonido saturaciones no deseadas, las cuales pueden provenir de muchas fuentes; transformadores, altavoz, y la más importante el micrófono, el cual podría adicionar una saturación a la grabación.

Ya con todo el sistema acondicionado se procedió a hacer una pequeña grabación de señales producidas por la guitarra eléctrica. Se tocó en esta guitarra la nota Do, el cual posee una frecuencia fundamental de 130,81Hz en su tercera octava. Luego de registrar unos pocos sonidos se procedió a hacer otra grabación con un amplificador construido en su totalidad con transistores y DSP, esto con el objetivo de hacer una comparación entre sus dos señales, ya sea señales gráficas hechas por matlab y la señal auditiva. Ya con estos dos sonidos producidos por dos amplificadores se continuó con el siguiente proceso; trabajar el software matlab y transformada de Fourier.

Antes de continuar con este procesamiento, se realizó una edición de esta grabación de las dos señales, con el objetivo de obtener una sola muestra de señal de guitarra de 2 segundos. Para ello se utilizó el software Audacity, el cual permite recortar una señal de audio. Esta nueva señal corta de las grabaciones muestra solo un golpe sobre la cuerda produciendo la nota Do en frecuencia 130,81Hz.

Teniendo estas grabaciones, una del presente proyecto y otra con un amplificador construido con transistores, se introdujo a matlab para aplicarle FFT (Trasformada Rápida de Fourier) y obteniendo una grafica al final.

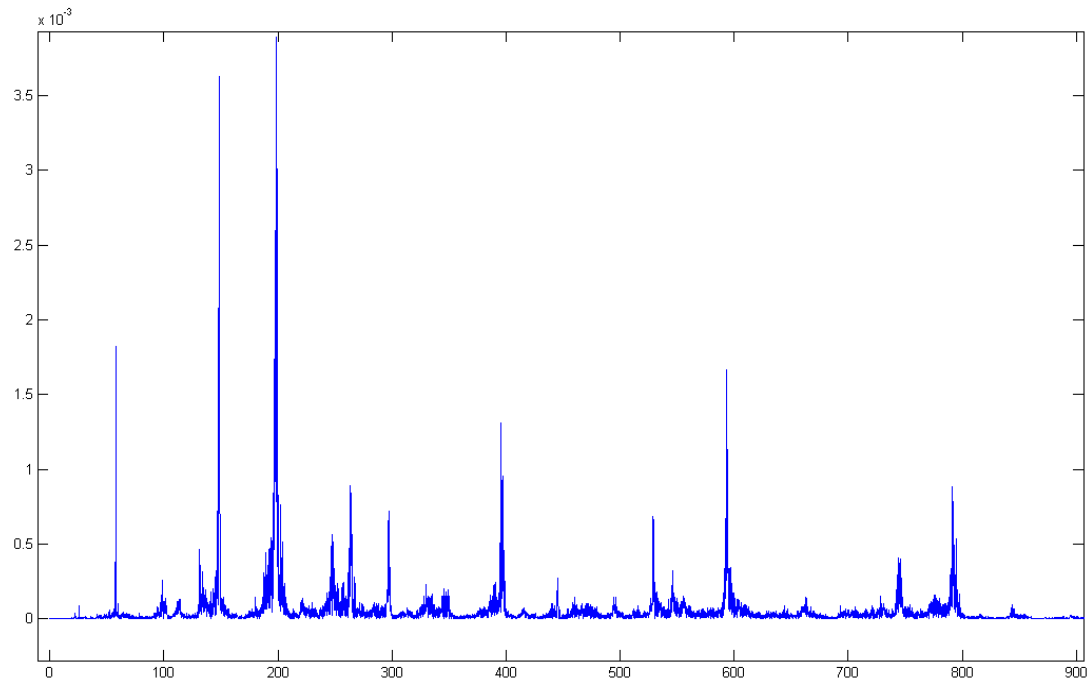
#### 4.3.1 Amplificador a transistores

Primero, se hizo un análisis con la señal producida por el amplificador construido con transistores. Se utilizo el siguiente código matlab:

```
[x1, Fs, bits]=wavread('saturDSP.wav'); % find out sampling rate, etc  
y=x1(:,1);  
% Fs = sample rate  
% bits = number of bits per sample  
  
N=length(y);  
% N = number of samples  
  
% Now generate a general plot of the frequency spectrum  
  
f=(Fs/N).*(0:N-1);  
% calculate each frequency component  
  
Y=fft(y,N);  
Y=abs(Y(1:N))./(N/2);  
plot(f,Y)
```

En la primera parte del código se puede observar la forma como se debe cargar el archivo de audio, el cual debe estar en extensión .wav el cual fue llamado "saturDSP". Este archivo se recorto con el software Audacity para evitar varios golpes o tocadas de notas y también para disminuir el tiempo de procesamiento de matlab, el cual entre más largo sea el archivo, más tiempo puede tomar en procesarlo.

Matlab nos muestra con este método la siguiente grafica:



**Grafica 13 Prueba #1**  
Fuente: Autor

Se puede observar la generación de armónicos producidos por el amplificador a base de transistores. Se observa el armónico fundamental en 130Hz aproximadamente, pero también se puede observar otros componentes en otras frecuencias. Por ejemplo una señal de gran potencia sobre los 200Hz, el cual correspondería a la nota Sol, el cual se encuentra sobre los 196Hz. Antes del armónico fundamental hay un armónico sobre los 60Hz aproximadamente, el cual corresponde a la nota Do en la segunda octava, el cual tiene una frecuencia de 65,41Hz. También hay un armónico, el cual es un armónico par (ya que es dos veces el armónico fundamental), sobre los 260Hz aproximadamente, pero con baja energía. Este corresponde a la nota Do (261,63Hz) en su cuarta octava. Después de estos se observan otras componentes los cuales corresponden a armónicos pares e impares. Sobre los 390Hz aproximadamente aparece un armónico impar (impar ya que es tres veces la frecuencia fundamental de 130Hz) y con una potencia que podría ser audible. Sobre los 523Hz nos muestra lo que es otro armónico par (ya que es cuatro veces el armónico fundamental) con muy poca potencia. Sobre los 590Hz se observa una componente, el cual corresponde a la nota Re en su quinta octava el cual tiene una frecuencia de 587,33. No es necesario mirar mas allá, ya que se puede concluir que este amplificador produce armónicos pares e impares y también componentes sobre otras frecuencias que como se observa algunas son de poca energía pero podrían llegar a ser audibles.



La siguiente tabla muestra las frecuencias de las notas musicales que nos sirvió de guía para determinar la nota armónicas que produjo esta grabación.

<b>Frecuencias (en hertzios) de las notas musicales</b>									
	Oc. 0	Oc. 1	Oc. 2	Oc. 3	Oc. 4	Oc. 5	Oc. 6	Oc. 7	Oc. 8
<b>Do</b>		32,70	65,41	130,81	261,63	523,25	1046,50	2093,00	4186,01
<b>Do#</b>		34,65	69,30	138,59	277,18	554,37	1108,73	2217,46	
<b>Re</b>		36,71	73,42	146,83	293,66	587,33	1174,66	2349,32	
<b>Re#</b>		38,89	77,78	155,56	311,13	622,25	1244,51	2489,02	
<b>Mi</b>		41,20	82,41	164,81	329,63	659,26	1318,51	2637,02	
<b>Fa</b>		43,65	87,31	174,61	349,23	698,46	1396,91	2793,83	
<b>Fa#</b>		46,25	92,50	185,00	369,99	739,99	1479,98	2959,96	
<b>Sol</b>		49,00	98,00	196,00	392,00	783,99	1567,98	3135,96	
<b>Sol#</b>		51,91	103,83	207,65	415,30	830,61	1661,22	3322,44	
<b>La</b>	27,50	55,00	110,00	220,00	440,00	880,00	1760,00	3520,00	
<b>La#</b>	29,14	58,27	116,54	233,08	466,16	932,33	1864,66	3729,31	
<b>Si</b>	30,87	61,74	123,47	246,94	493,88	987,77	1975,53	3951,07	

<b>Afinación estándar de la guitarra</b>			
Cuerda	Nota	Octava	Frecuencia
6º	Mi	2º	82,41
5º	La	2º	110,00
4º	Re	3º	146,83
3º	Sol	3º	196,00
2º	Si	3º	246,94
1º	Mi	4º	329,63

**Fig. 60** Tabla de frecuencias de las nota musicales  
Fuente: [25]

### 4.3.2 Proyecto Amplificador a tubos de vacio

El segundo análisis de hizo sobre la grabación obtenida del amplificador de tubos al vacio, siguiendo los pasos hablados anteriormente. Para ello, esta pequeña muestra de audio (nota Do en frecuencia 130,81Hz) se introdujo en el software Matlab para poder aplicarle Transformada de Fourier. Se utilizo el mismo código explicado anteriormente:

```
[x1, Fs, bits]=wavread('tuboenc.wav'); % find out sampling rate, etc
y=x1(:,1);
% Fs = sample rate
% bits = number of bits per sample

N=length(y);
% N = number of samples
```

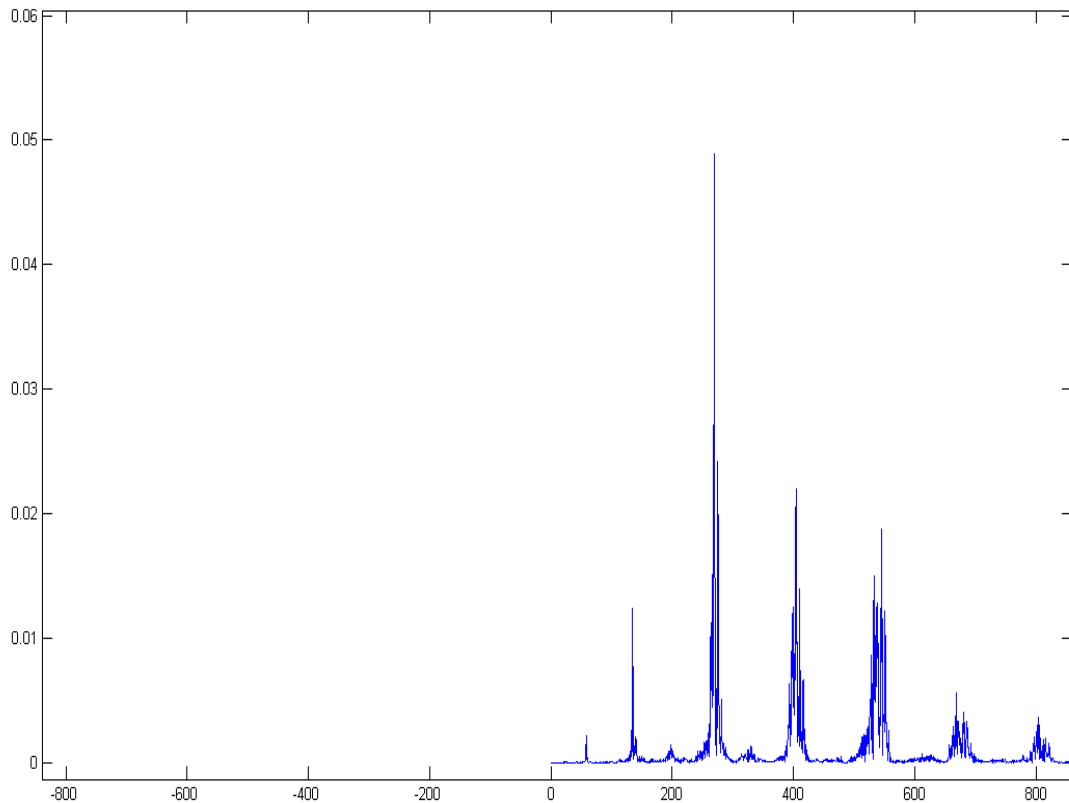
```
% Now generate a general plot of the frequency spectrum
```

```
f=(Fs/N).*(0:N-1);  
% calculate each frequency component
```

```
Y=fft(y,N);  
Y=abs(Y(1:N))./(N/2);  
plot(f,Y)
```

Se hizo una edición de esta señal grabada con el objetivo de obtener una pequeña muestra y poder obtener un resultado del amplificador con tubos al vacío.

El resultado arrojado por matlab fue el siguiente:



**Grafica 14** Respuesta en frecuencia Prueba 2  
Fuente: Autor

Se puede observar la frecuencia de 261Hz con la mayor potencia, el cual corresponde a un segundo armónico, el cual es par (ya que es el doble de la frecuencia fundamental). Sobre los 390Hz se encuentra un armónico, el cual sería un impar (ya que es tres veces el armónico fundamental de 130Hz). Sobre los

523Hz se observa un cuarto armónico el cual es par, ya que es cuatro veces la frecuencia fundamental de 130Hz y con una potencia considerable. Después de este cuarto armónico se puede observar otros armónicos pero de una potencia muy pequeña los cuales pueden ser despreciables.

Los investigadores hablan sobre el tríodo y como este produce armónicos pares, en especial el segundo armónico y con una potencia superior al 25% de la fundamental, y de acuerdo a lo que se puede observar en la grafica, este amplificador genera un segundo armónico, el cual es par, con una potencia superior a la fundamental.

Los investigadores también hablan sobre los armónicos impares, en especial el tercer armónico, producido por los pentodos con una potencia inferior al del segundo armónico. En la grafica se observa ese tercer armónico que se encuentra sobre los 390 Hz, el cual es impar.

## CONCLUSIONES

El presente documento muestra todos los temas que relacionan los principios básicos de la utilización de los tubos al vacío y en él se documenta todo el proceso que involucra el diseño y construcción de un amplificador con tubos al vacío.

En el presente documento se están especificando todos los elementos que involucran los diseños y la construcción de un amplificador de audio.

De acuerdo a las pruebas hechas sobre el proyecto se puede concluir respecto a este análisis hecho con matlab y de acuerdo a lo dicho por los autores, donde hablan sobre la producción de armónicos, que el presente proyecto genera un segundo armónico de orden par y de una gran potencia producido por los tríodos y un tercer armónico, de orden impar, producido por el pentodo. Como se vio en la grafica producida sobre el amplificador de transistores, dicho amplificador genera señales con elevada potencia en frecuencias que no pertenecen a una nota musical y no corresponden a ni a un orden par ni a un orden impar demostrando de manera científica el porqué de la preferencia de los músicos sobre estos equipos de audio y no a los equipos transistorizados.

La respuesta en frecuencia muestra el comportamiento del amplificador a la utilización de diferentes altavoces, y se puede concluir que el amplificador posee una respuesta esperada, ya que es normal que en ciertas frecuencias la amplitud varíe respecto a la señal que entra. Hay ciertos rangos de frecuencia donde su amplitud crece o disminuye.

También se hablan sobre las desventajas que posee dicho amplificador, como lo es la difícil obtención de los tubos al vacío, peso elevado, manejo de altos voltajes, etc. Pero el cual aun después de dichas desventajas, los músicos siguen prefiriendo hoy en día dichos equipos de audio por las cualidades que fueron explicadas.

## BIBLIOGRAFIA

- [1]Théorie & Pratique des amplificateurs audio à tubes. DIELEMAN Peter. Elektor. Francia 2005
- [2] Tubes Audio, anciens & récents. IBRE Francis. Elektor. Francia 2007.
- [3] Traité moderne des amplificateurs haute-fidélité à tubes. FIDERSPIL Gérard. Elektor Publitrone. Francia 2007.
- [4] Valves Amplifiers. JONES Morgan. Elsevier Newnes. Estados Unidos 2006
- [5] Building Valves Amplifiers. JONES Morgan. Elsevier Newnes. Estados Unidos 2006
- [6][http://img.alibaba.com/photo/212084907/Diodes\\_schottky\\_diodes\\_smd\\_diodes\\_.jpg](http://img.alibaba.com/photo/212084907/Diodes_schottky_diodes_smd_diodes_.jpg)
- [7] <http://www.robotk.galeon.com/graficas/transistor.gif>
- [8] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bf/Replica-of-first-transistor.jpg>
- [9] <http://www.robotk.galeon.com/graficas/transistor.gif>
- [10] <http://www.sciencelobby.com/field-effect-transistor/images/nfet.gif>
- [11] [http://www.unedcervera.com/c3900038/estrategias/transistores\\_2.gif](http://www.unedcervera.com/c3900038/estrategias/transistores_2.gif)
- [12]<http://www.ilbauledifranco.com/RIMPICCIOLITE/strumenti%20beatles%20foto/FENDER%20TELECASTER%20RED%20CLAPTON%2011.JPG>
- [13] [http://guitarfixation.com/images/pic/single\\_coil\\_with\\_labels.jpg](http://guitarfixation.com/images/pic/single_coil_with_labels.jpg)
- [14] [http://www.wizardpickups.co.uk/images/humbucker4\\_large.jpg](http://www.wizardpickups.co.uk/images/humbucker4_large.jpg)
- [15]<http://www.rocknrollvintage.com/prodimages/Vintage%20Marshall%20Group%20Photo2.jpg>
- [16]<http://www.electronicafacil.net/tutoriales/Fuentes-alimentacion.php>
- [17][http://www.parts-express.com/images/item\\_large/290-495\\_L.jpg](http://www.parts-express.com/images/item_large/290-495_L.jpg)
- [18][http://2.bp.blogspot.com/\\_OSvqsfmAJg0/SLRQBawqdbI/AAAAAAAAAT4/G50pAoplIsU/s400/tubo\\_flemming.jpg](http://2.bp.blogspot.com/_OSvqsfmAJg0/SLRQBawqdbI/AAAAAAAAAT4/G50pAoplIsU/s400/tubo_flemming.jpg)
- [19]<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/42/TRIOSYM.PNG>

- [20]<http://www.ilustrados.com/publicaciones/multimedia/hu-die56.gif>
- [21]<http://www.monografias.com/trabajos34/diodos/diodos.shtml>
- [22]<http://reflexion-arts.com/productos/fabricantes/valvulas/electro-harmonix/electro-harmonix-12ax7/logo>
- [23]<http://www.drtube.com/datasheets/ecc83s-jj2003.pdf>  
<http://www.drtube.com/datasheets/ecc82-jj2003.pdf>
- [24]<http://radiohobby.bravehost.com/CURSO/VALV-02.jpg>
- [25][http://www.cancionero.net/articulos/articulo.asp?t=frecuencias\\_de\\_las\\_notas\\_musicales&n=310](http://www.cancionero.net/articulos/articulo.asp?t=frecuencias_de_las_notas_musicales&n=310)
- [27]<http://es.wikipedia.org/wiki/Transistor>
- [28]<http://enciclopedia.us.es/index.php/Transistor>
- [29]<http://es.wikipedia.org/wiki/Diodo>
- [30][www.profesormolina.com.ar/tutoriales/diodo.htm](http://www.profesormolina.com.ar/tutoriales/diodo.htm)
- [31][http://fr.wikipedia.org/wiki/Transistor\\_bipolaire](http://fr.wikipedia.org/wiki/Transistor_bipolaire)
- [32][http://fr.wikipedia.org/wiki/Transistor\\_%C3%A0\\_effet\\_de\\_champ](http://fr.wikipedia.org/wiki/Transistor_%C3%A0_effet_de_champ)
- [33][http://fr.wikipedia.org/wiki/Amplificateur\\_pour\\_guitare\\_%C3%A9lectrique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Amplificateur_pour_guitare_%C3%A9lectrique)
- [34][http://wapedia.mobi/es/Etapa\\_de\\_potencia](http://wapedia.mobi/es/Etapa_de_potencia)
- [35][http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc\\_amplificadores/design/ampdesign.html#intro](http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_amplificadores/design/ampdesign.html#intro)
- [36]<http://fr.wikipedia.org/wiki/Sonorisation>
- [37][http://fr.wikipedia.org/wiki/Amplificateur\\_%C3%A9lectronique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Amplificateur_%C3%A9lectronique)
- [38]<http://www.electronicafacil.net/tutoriales/Fuentes-alimentacion.php>
- [39]<http://es.wikipedia.org/wiki/Altavoz>
- [40]<http://www.guitarristas.info/foro/f84/valvulas-teoria-y-fundamentos-38187/>
- [41][http://ewh.ieee.org/reg/9/etrans/ieee/issues/vol4/vol4issue4June2006/4TLA4\\_03Floriani.pdf](http://ewh.ieee.org/reg/9/etrans/ieee/issues/vol4/vol4issue4June2006/4TLA4_03Floriani.pdf)
- [42][http://es.wikipedia.org/wiki/V%C3%A1lvula\\_termoi%C3%B3nica](http://es.wikipedia.org/wiki/V%C3%A1lvula_termoi%C3%B3nica)

[43]<http://www.monografias.com/trabajos34/diodos/diodos.shtml>

[44]<http://www.taringa.net/posts/info/1696385/amplificadores-a-valvulas.html>

[45]<http://www.diystompboxes.com/pedals/tubedummy.html>

[46]<http://amplya.blogspot.com/>

[47]<http://www.hispavila.com/3ds/lecciones/lecc3.htm>

[48]<http://www.emsia.com.ar/downloads/sonido4.pdf>

## **ANEXOS**



# ELECTRO-HARMONIX

12AX7EH  
NEW SENSOR CORP.  
tested by icm

Driving a  
GT006  
Drawn by  
jcm



The 12AX7EH is a dual high mu triode with a spiral filament and special construction to minimize microphonic behavior. Ideal for replacement use in guitar amps and any place low noise and high gain is important.



Pin #	description
1	plate 2
2	grid 2
3	cathode 2
4,5,9	heater
6	plate 1
7	grid 1
8	cathode 1

Electrical Data	
Heater Voltage, not less than	6.0 or 12.0 V
Heater Voltage, not more than	6.6 or 13.2 V
Plate Voltage, not more than	300 V
Heater to Cathode Voltage:	
positive, V not more than	100 V
negative, V not less than	200 V
Plate Current, not more than	9 mA
Plate Dissipation, each triode, not more than	1.0 watts
Maximum grid circuit resistance:	
fixed bias, not more than	1 Mohm
self bias, not more than	2.2 Mohm
Inter-electrode Capacitances:	
C, grid to plate	1.6 pF [triode 1 and 2]
C, grid to cathode and heater	1.6 pF [triode 1 and 2]
C, plate to cathode and heater	0.44 pF (1) and 0.36 (2)
C, cathode to heater	5.0 nF [nominal]
C, plate to plate	520 pF
Measured Electrical minima:	
Grid reverse current, not more than (see note below)	0.2 uA
Plate current, not less than (see note below)	0.75 mA
Plate current (Eb= 250V, Ec= -4V)	10 uA
Transconductance, not less than (see note below)	1.4 mA/V
Amplification Factor, not less than (see note below)	78
Amplification Factor (nominal)	92
Transconductance (nominal)	1.7 mA/V
Plate Resistance (nominal)	54.1 K OHM
Max Neg. Grid Voltage	55 V
Max Pos. Grid Voltage	0 V
Max Cold Voltage	600 V

# 6L6 GC

## A. F. BEAM PENTODE

Base: OCTAL

$U_f = 6,3 \text{ V}$   
 $I_f = 0,9 \text{ A}$

### Typical characteristic: Class A1

Single tube Push-Pull

$U_k = 250 \text{ V}$  270 V  
 $U_{g2} = 250 \text{ V}$  270 V  
 $U_{g1} = -14 \text{ V}$  -17,5 V  
 $I_k = 72 \text{ mA}$  134 mA  
 $I_{g2} = 5 \text{ mA}$  11 mA  
 $R_k = 22,5 \text{ k}\Omega$  ·  
 $R_{k2} = \cdot$  5 k $\Omega$   
 $N = 6,5 \text{ W}$  17,5 W

### Limiting values:

Triode

$U_k = 450 \text{ V}$   
 $U_{g2} = 450 \text{ V}$   
 $W_k = 30 \text{ W}$

Pentode

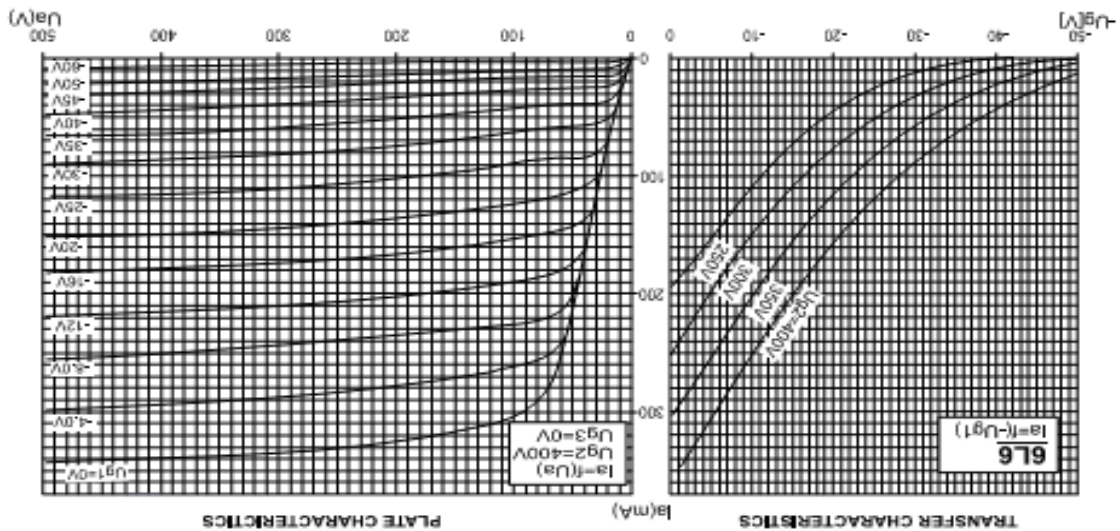
$U_k = 500 \text{ V}$   
 $U_{g2} = 450 \text{ V}$   
 $W_k = 30 \text{ W}$

### Grid No 1 Circuit Resistance

Fixed Bias 0,1 M $\Omega$  0,1 M $\Omega$   
 Self Bias 0,5 M $\Omega$  0,5 M $\Omega$

### Capacitances:

$C_{g1} = 12,5 \text{ pF}$   
 $C_k = 10 \text{ pF}$   
 $C_{v/g1} = 1,5 \text{ pF}$



### Dimension and connections:

