

Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y
Mecatrónica

Diseño e implementación de preamplificador
valvular a baja tensión para guitarra eléctrica

Autor: Fernando Fernández Sánchez

Tutor: José Luis Mora Jiménez

Dpto. de Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Diseño e implementación de preamplificador valvular a baja tensión para guitarra eléctrica

Autor:

Fernando Fernández Sánchez

Tutor:

José Luis Mora Jiménez

Dpto. de Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Grado: Diseño e implementación de preamplificador valvular a baja tensión para guitarra eléctrica

Autor: Fernando Fernández Sánchez

Tutor: José Luis Mora Jiménez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Ante todo, agradecer a mi tutor, José Luis, por su disposición desde el primer momento que le propuse la idea. Ha sido un placer realizar con él este proyecto, dado por sus conocimientos en esta área y por su interés en el mundo de los amplificadores de guitarra.

También mencionar al profesor D. Francisco Pérez Ridao, por su ayuda desinteresada en las sesiones de laboratorio además de ofrecer sus instrumentos de medida y materiales.

Por supuesto, a mi familia. Gracias a ellos he podido cursar mis estudios y que, sin su constante apoyo, habría sido una tarea muy complicada de terminar.

Resumen

Las válvulas de vacío son actualmente un dispositivo cuyo uso ha quedado prácticamente limitado al audio. Desde los comienzos de la electrónica, las válvulas han dado la solución a los problemas de amplificación, siendo de gran ayuda para los diseñadores de amplificadores e instrumentos y obviamente para los músicos.

El estudio de estos dispositivos apenas se ve en cualquiera de las asignaturas del grado. Es por ello por lo que se han seleccionado, aprendiendo nuevas técnicas de amplificación.

Se va a implementar un preamplificador para guitarra eléctrica, partiendo del diseño de un amplificador comercial. A lo largo del proyecto, aparecerán varios problemas que se solucionarán con cambios en el diseño, consiguiendo los objetivos deseados.

Abstract

Nowadays, vacuum tubes are a device whose use has been practically limited to audio purposes. From the beginning of electronics, valves have given the solution to amplification problems, being a great help for amplifiers and instruments designers, and obviously, for musicians.

The study of these devices is barely seen in any of the subjects of the degree. That is why they have been chosen, learning new amplification techniques.

An electric guitar preamp is going to be implemented, starting with a commercial design. Along the project, different problems will appear that will be solved by changing the design, getting the desired objectives.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Figuras	xvii
Notación	xix
1 Motivación y objetivos	1
2 Amplificadores de guitarra eléctrica	3
2.1. <i>Historia</i>	3
2.2. <i>Electrónica</i>	5
3 ¿Qué es una válvula?	9
3.1. <i>Descripción</i>	9
3.2. <i>Válvulas diodo</i>	9
3.3. <i>Triodos</i>	10
3.3.1. Parámetros del triodo	11
3.3.2. Modelos más utilizados y sus diferencias	11
3.4. <i>Pentodos</i>	13
4 Diseño del circuito	15
4.1. <i>El preamplificador</i>	15
4.2. <i>Diseño inicial</i>	16
4.2.1. Simulación	18
4.2.2. Implementación física	19
4.2.3. Problemas del diseño	21
4.3. <i>Modificaciones, segundo diseño</i>	23
4.3.1. Problemas del segundo diseño	23
4.4. <i>Modificaciones, tercer diseño</i>	25
4.4.1. Ganancia y Bode experimental	27
5 Alternativas de diseño	31
5.1. <i>Circuitos híbridos</i>	32
5.2. <i>Grid-Leak Biasing junto a transistor de alta ganancia</i>	33
5.3. <i>Valvular</i>	33
6 Conclusiones	35
Bibliografía	37
Anexo A: Instrumentación	39
Anexo B: Datasheets	43
Anexo C: Polarización por cátodo	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Fender Deluxe 1957.	3
Figura 2-2. Marshall JMP50 original 1970. Válvulas.	4
Figura 2-3. Roland Jazz Chorus 120H. Transistores	4
Figura 2-4. Esquema preamplificador Marshall JCM800	5
Figura 2-5. Esquema etapa de potencia Marshall JCM800	5
Figura 2-6. Esquema preamplificador Fender Bassman	6
Figura 2-7. Esquema etapa de potencia Fender Bassman	6
Figura 2-8. Esquema preamplificador Mesa Boogie Dual Rectifier	7
Figura 2-9. Esquema etapa de potencia Mesa Boogie Dual Rectifier	7
Figura 3-1. Símbolo de la válvula diodo	9
Figura 3-2. Característica estática de la válvula diodo	9
Figura 3-3. Símbolo válvula 12AX7 con dos triodos	10
Figura 3-4. Característica estática del triodo. Válvula 12AX7	10
Figura 3-5. Característica válvula 12AX7	12
Figura 3-6. Característica válvula 12AU7	12
Figura 3-7. Símbolo pentodo EL803	13
Figura 3-8. Característica pentodo EL803	13
Figura 4-1. Cadena de sonido	16
Figura 4-2. Entrada canales Fender Bassman	16
Figura 4-3. Circuito preamplificador Fender Bassman	17
Figura 4-4. Recta de carga para $R_a = 56k\Omega$	17
Figura 4-5. Circuito simulado	18
Figura 4-6. Resultado simulación	18
Figura 4-7. Diseño de la placa en Eagle	19
Figura 4-8. PCB	20
Figura 4-9. Circuito completo	20
Figura 4-10. Circuito Completo	20
Figura 4-11. Izquierda: Curva real primer triodo. Derecha: Curva real segundo triodo	21
Figura 4-12. Curvas reales de la válvula aportada por D. Francisco Pérez	22
Figura 4-13. Modelo válvula 12AX7 MicroCAP	22
Figura 4-14. Recta de carga sobre la curva real del primer triodo	23
Figura 4-15. Onda en el ánodo 1, segundo diseño. Medida en CA	24
Figura 4-16. Onda en el ánodo 2, segundo diseño. Medida en CA	24
Figura 4-17. Circuito final preamplificador	25

Figura 4-18. Onda en el ánodo 1, diseño final. Medida en CA	26
Figura 4-19. Onda en el ánodo 2, diseño final. Medida en CA	26
Figura 4-20. Onda ánodo 1, resistencia rejilla 68k. Medida en CA	27
Figura 4-21. Onda ánodo 2, resistencia rejilla 68k. Medida en CA	27
Figura 4-22. FFT diseño final	28
Figura 4-23. Respuesta frecuencial en el primer ánodo	29
Figura 4-24. Respuesta frecuencial en el segundo ánodo	29
Figura 5-1. Característica Vgk-Ig	31
Figura 5-2. Circuito híbrido	32
Figura 5-3. Circuito híbrido completo	32
Figura 5-4. Grid-leak biasing y transistor	33
Figura 5-5. Circuito valvular	33
Figura A-1. Fuente de alimentación Twintex TP-2303	39
Figura A-2. Generador de ondas TTI TG315	39
Figura A-3. Osciloscopio Tektronix TBS1102B-EDU	40
Figura A-4. Multímetro TTI 1604	40
Figura A-5. Trazador de curvas Hameg HM6042	41
Figura A-6: Medidor de válvulas (D. Francisco Pérez)	41
Figura C-1: Polarización por cátodo	47

Notación

A/mA/ μ A	Amperios / miliamperios / microamperios
$^{\circ}$ C	Grados centígrados
dB	Decibelios
F/ μ F	Faradios/microFaradios
FFT	Transformada rápida de Fourier
G	Ganancia
Hz	Hercios
I _a	Corriente ánodo
I _o	Corriente de cortocircuito
r _a	Resistencia ánodo
V/mV	Voltios/milivoltios
V _{ak}	Voltaje ánodo
V _g	Tensión rejilla
Ω /k Ω /M Ω	Ohmios / kilohmios / megaohmios

1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

La idea de este proyecto surge del interés por unir dos áreas con las que tengo estrecha relación: la música y la electrónica. Tras años rodeado de instrumentos, amplificadores, pedales de efectos y un largo etcétera, quería entender qué había tras todos ellos, el cómo funcionan y el por qué de sus diseños.

En este trabajo veo la oportunidad de acercar mi carrera a la música, por lo que no he desaprovechado la oportunidad.

Las válvulas conforman una parte muy importante del desarrollo musical en un gran número de estilos, ya que en su momento revolucionaron la amplificación de instrumentos. Sin embargo, actualmente parecen estar obsoletas, y su estudio no se contempla en ninguno de los planes de ninguna asignatura del grado. Su importancia dentro del mundo musical es lo que me ha hecho seleccionarlas para el proyecto, complementando así mi estudio sobre más dispositivos electrónicos.

Dentro de la variedad existente de circuitos con finalidad musical, se ha elegido implementar un preamplificador valvular para guitarra eléctrica. A diferencia de los diseños que se encuentran en la industria, se presenta una limitación de cara a la implementación del proyecto: la tensión de alimentación. Habitualmente, los diseños de válvulas trabajan entorno los 300 y 400 voltios. Este valor de tensión puede llegar a ser mortal en caso de accidente, por lo que su fabricación y testeado queda en manos con experiencia.

Por ello, se ha elegido operar a una tensión de 50 V, en la que no hay riesgo a la hora de hacer pruebas en el laboratorio. Como se verá a lo largo del proyecto, esta alimentación supondrá un pequeño “hándicap” que obligará a rediseñar los circuitos.

Como objetivos, se busca una cierta ganancia y que, ante una señal senoidal a la entrada, la propia amplificación no deforme en gran medida la señal. Conforme se van realizando las pruebas, se verá que la forma de la onda será el principal problema. En un futuro acople con una etapa de potencia se quiere que quede un producto completamente funcional.

Se busca por tanto implementar una unidad independiente y funcional la cual pueda ser sustituida, por ejemplo, por el preamplificador de nuestro sistema de amplificación para guitarra.

2 AMPLIFICADORES DE GUITARRA ELÉCTRICA

“Si algo es fácil de reparar, es fácil de construir.”

-Leo Fender-

Pocas son las personas que no han visto alguna vez una guitarra eléctrica, ya sea en sus manos, en un concierto, o simplemente en el escaparate de una tienda. Ligado directamente al instrumento, se encuentra el amplificador, el cual aporta un papel fundamental en el sonido final de la guitarra.

2.1 Historia

Aunque la guitarra eléctrica comenzó a desarrollarse en la mitad del siglo XX, el amplificador tuvo su aparición alrededor de 1935, cuyos primeros usuarios fueron los músicos de Lap Steel Hawaianos. Los primeros músicos en utilizar los amplificadores con otros fines fueron los guitarristas de Jazz, los cuales no podían destacar su instrumento dentro de grandes agrupaciones. A partir de ahí, fue cuando este método de aumentar el nivel del sonido fue cogiendo popularidad. Numerosos instrumentos fueron creados y modificados para poder ser conectados a este sistema, tales como bajos, teclados o armónicas.

En los comienzos, los amplificadores fueron bastante simples, con pocos controles y aunque ofrecían el volumen que los usuarios requerían, carecían de lo que se llama “carácter”. Los graves y agudos como se conocen en los amplificadores comerciales de hoy en día, eran todavía un mundo por explorar. Fue entonces cuando, a partir de 1950, músicos como Chuck Berry o Dick Dale, comenzaron a llevar sus amplificadores a los límites, saturando las señales con el objetivo de crear y experimentar nuevos sonidos, descubriendo el famoso efecto de “distorsión”.



Leo Fender, el cual fue pionero de los amplificadores de instrumento, comenzó a desarrollar nuevos modelos a principios de los 60, incluyendo el primer amplificador de 100 vatios. Supuso un gran cambio, permitiendo a los músicos ofrecer conciertos de mayor volumen y mejor calidad de sonido.

A él se le unirían compañías como Vox Amplification, o Marshall, que por peticiones de artistas comenzaron a diseñar amplificadores que ofrecieran las calidades y prestaciones adecuadas para grandes conciertos y grabaciones de estudio.

Figura 2-1: Fender Deluxe 1957.



Figura 2-2: Marshall JMP50 original 1970. Válvulas.

Con el desarrollo de la electrónica, los amplificadores también fueron avanzando. Así, en la década de los 70, con la aparición de transistores comerciales, se realizaron nuevos diseños en base a estos semiconductores. Este tipo de amplificador redujo el coste de fabricación, lo que pudo acercar más la guitarra eléctrica a un mercado más amplio. Además, son más fiables y de menor peso. Sin embargo, la mayoría de los músicos profesionales siguen prefiriendo el sonido que ofrecen los amplificadores a válvulas¹.

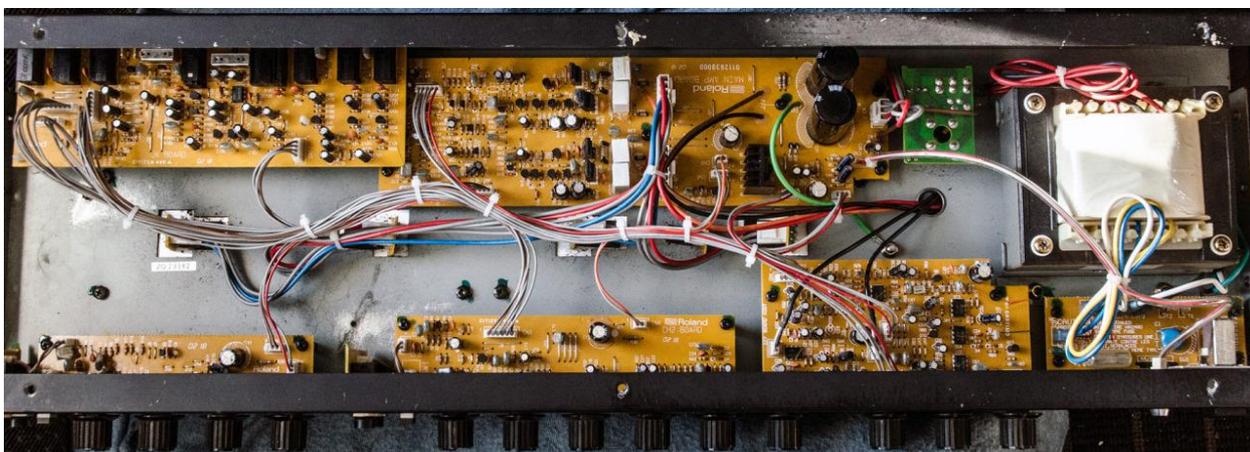


Figura 2-3: Roland Jazz Chorus 120 H. Transistores.

¹ Existe un gran debate entre qué tecnología ofrece el mejor sonido, valvular, transistor o digital.

2.2 Electrónica

En las figuras 2-4 y 2-5 se muestra el esquema completo del amplificador comercial Marshall JCM800, el cual supone un “standard” dentro del diseño de amplificadores a válvulas.

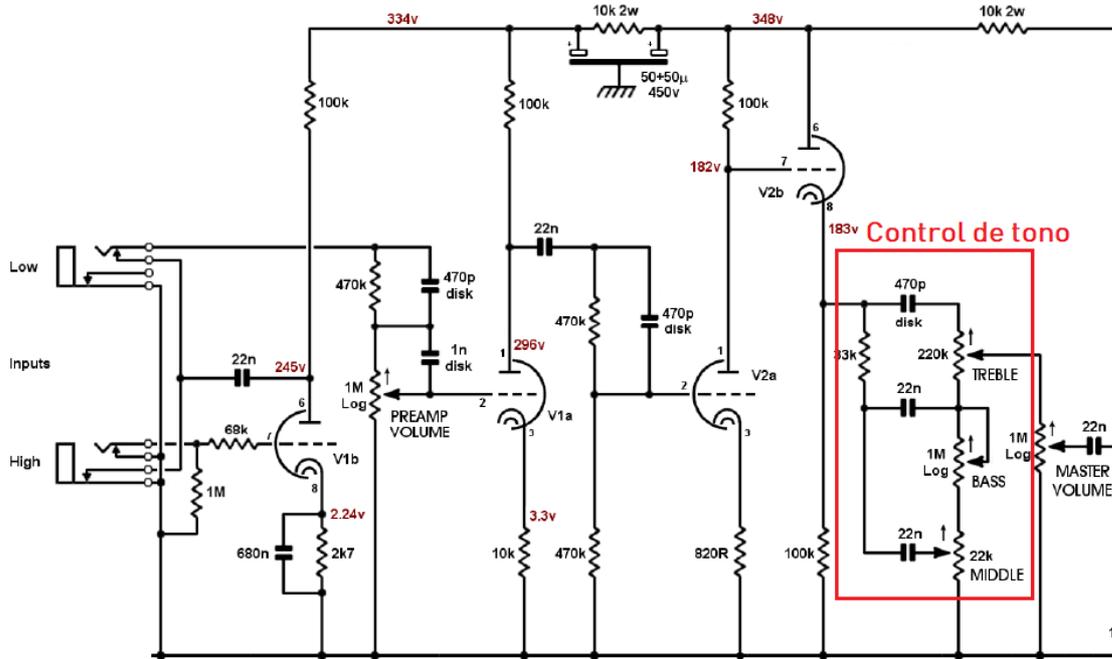


Figura 2-4: Esquema preamplificador Marshall JCM800.

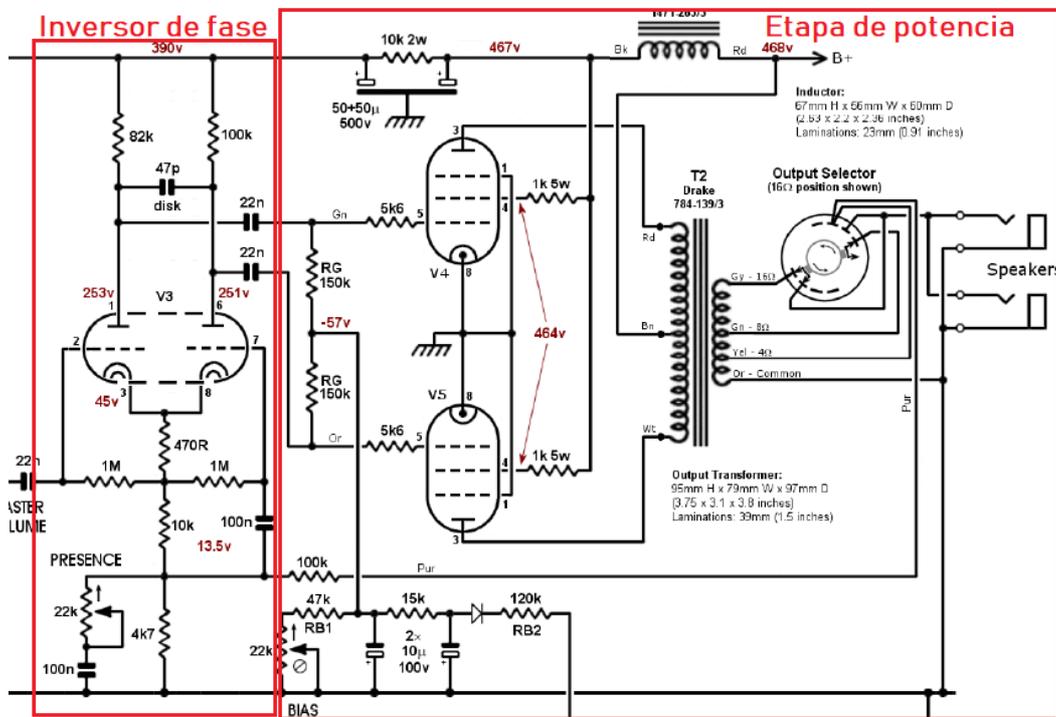


Figura 2-5: Esquema etapa de potencia Marshall JCM800.

Y en las figuras 2-6 y 2-7, se muestra otro amplificador comercial, el Fender Bassman, cuyo preamplificador ha sido utilizado como diseño base del proyecto.

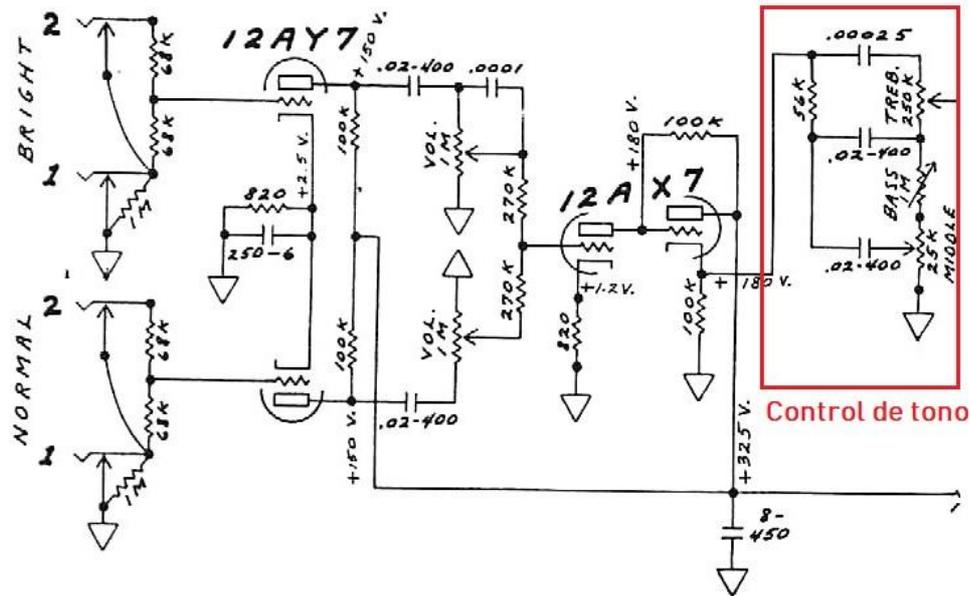


Figura 2-6: Esquema preamplificador Fender Bassman.

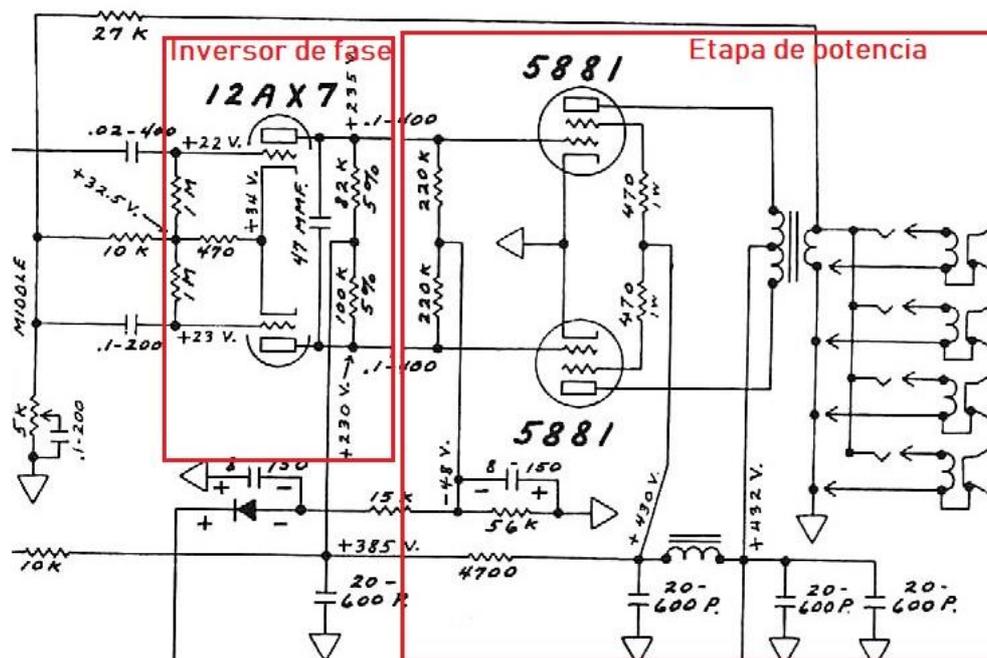


Figura 2-7: Esquema etapa de potencia Fender Bassman.

Como puede observarse, ambos circuitos presentan una topología muy parecida. La señal pasa primero por un par de triodos para preamplificarla, pasando posteriormente por un tercero, el cual tiene la configuración de seguidor de tensión. Tras el preamplificador, ambos circuitos presentan una etapa de control de tono, la cual presenta casi los mismos valores en sus componentes. Esta topología es muy habitual encontrarla en amplificadores de corte clásico. Ahora la señal pasa por el inversor de fase, el cual sirve para atacar posteriormente a la etapa de potencia. Finalmente, en la etapa de potencia, la señal se pasa por el transformador, el cual ajusta la impedancia entre la etapa y los altavoces.

La principal diferencia entre estos circuitos y los amplificadores que usan esta misma topología reside en la configuración de resistencias/condensadores entre etapas. Dependiendo de cómo se conecten estos componentes y de sus valores, la respuesta en frecuencia de los amplificadores será diferente.

De ahí viene, por ejemplo, el nombre de Fender Bassman, un amplificador cuya presencia de graves predomina frente a otras frecuencias. Por otra parte, el JCM800 presenta un sonido con más frecuencias medias/agudas más presentes en el rock clásico.

Obviamente, este tipo de circuito no es el único que existe. Como se comenta en el apartado anterior, a medida del surgimiento de nuevos artistas y nuevos géneros musicales, las exigencias son diferentes. A lo largo de los años, ciertos usuarios de la guitarra eléctrica han pedido más ganancia y más distorsión, desembocando en géneros como el heavy metal. Dentro de este género, es muy común el uso del amplificador Mesa Boogie Dual Rectifier, que se muestra en las figuras 2-8 y 2-9.

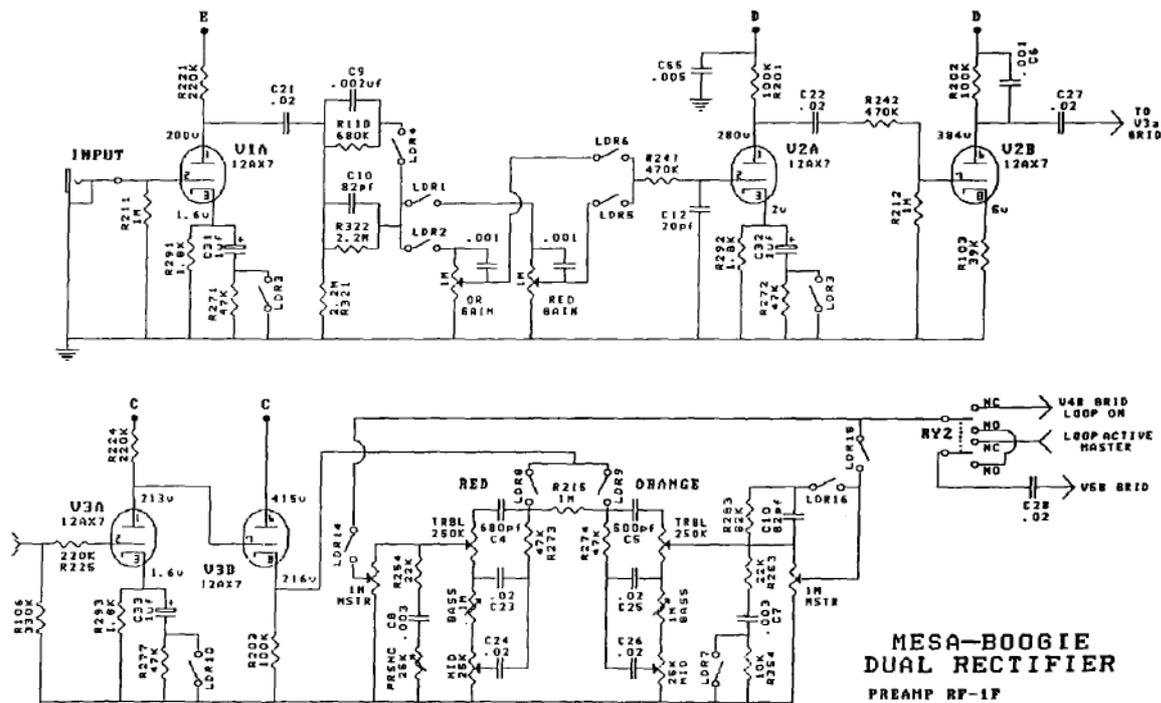
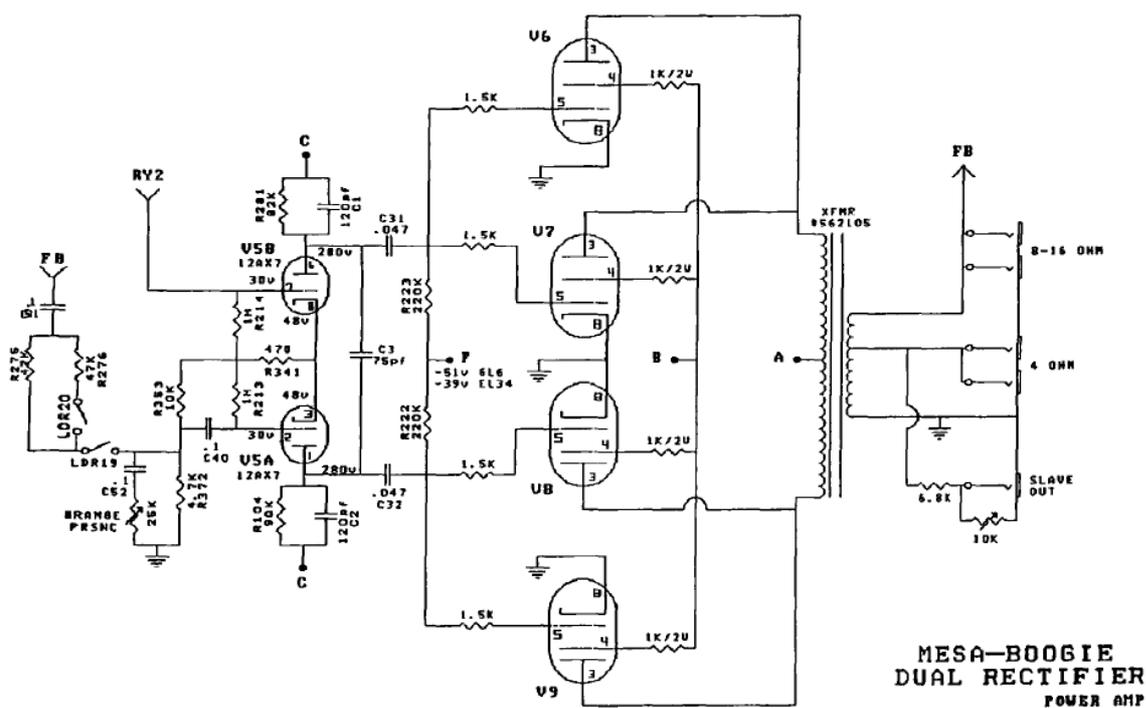


Figura 2-8: Esquema preamplificador Mesa Boogie Dual Rectifier.



Se observa a simple vista que este amplificador presenta un diseño mucho más complejo que los dos anteriores².

La etapa preamplificadora presenta un triodo más, lo cual hace que la señal se amplifique aún más. Además, dentro del mismo canal, presenta un selector que permite un tipo de sonido u otro, disponiendo de un control de tono independiente para cada selección. Así mismo, la etapa de potencia dispone de 4 pentodos, lo que hace que se pueda obtener una señal más alta.

En conclusión, puede haber tantos diseños como estilos y tipos de guitarristas. Cada amplificador se ajusta en mejor o peor manera a ciertos estilos debido a su topología interna. También hay que resaltar la calidad de fabricación y de los componentes utilizados, los cuales tienen un papel muy importante a la hora de un buen sonido. En este tipo de amplificadores es crítica la calidad de las válvulas utilizadas (como se podrá comprobar en el desarrollo del proyecto) y por supuesto, el modelo. Por lo general, los fabricantes de amplificadores reúnen en los manuales los componentes y válvulas ideóneos para usar en sus modelos. Además, es fácil encontrar en las redes hojas oficiales de pruebas, en las que se indica las tensiones que debería tener el circuito en cada punto, facilitando al usuario las reparaciones de los mismos.

² Esto no quiere decir que tenga mejor sonido. Los guitarristas aprecian más el hecho de sonar bien a que el amplificador sea complejo por dentro.

3 ¿QUÉ ES UNA VÁLVULA?

Antes de adentrarse de lleno en el circuito, es necesario tener claro los conceptos fundamentales de las válvulas para entender cómo funcionan y cómo interactúan entre los diferentes componentes.

3.1 Descripción

Una válvula de vacío (referida a partir de ahora como válvula), es un dispositivo el cual tiene dos electrodos o más en su interior. Como su nombre indica, dentro del cristal, solo hay vacío, siendo retirado durante su fabricación todo el aire.

El **cátodo** es el primero de los electrodos a mencionar. Típicamente consiste en un tubo recubierto de níquel. Dentro del tubo está el “heater” (calentador), el cual es un cable de tungsteno. Al pasar una corriente por él, se calienta, calentando (de ahí su nombre) el cátodo el cual emite electrones al entrar en calor. Al alcanzar una temperatura de unos 780 °C, se forma una nube electrónica llamada **zona de carga**.

3.2 Válvulas diodo

Para llegar a estudiar el triodo, es necesario conocer las válvulas diodo. Para que haya flujo de corriente, es necesario añadir otro electrodo, que en este caso es el **ánodo**. Al aplicar una tensión positiva al ánodo, éste atraerá los electrones de la zona de carga. Así, más electrones saldrán del cátodo para mantener la zona de carga completa y se tiene una transferencia de carga desde el cátodo al ánodo. Este flujo de carga se le llama **corriente del ánodo, I_a** . La tensión entre los electrodos es llamada **voltaje del ánodo, V_a** .

Si se aumenta la tensión del ánodo, la corriente aumentará también, por lo que para cada tensión V_a , se corresponde una intensidad I_a . Este comportamiento se refleja en la característica estática de la válvula.

Como se observa en la figura 3-2, si V_a (V_a) se lleva a valores altos, entonces, el ánodo atrae todos los

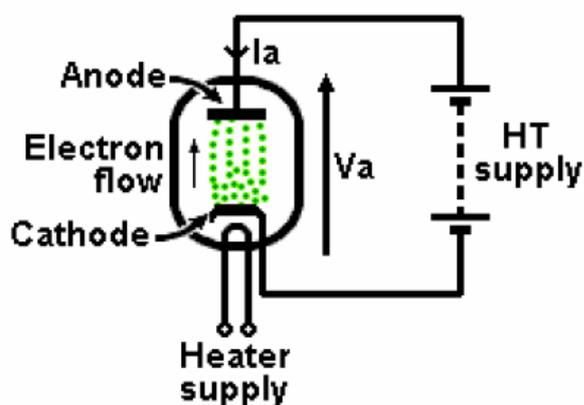


Figura 3-1: Símbolo de la válvula diodo.

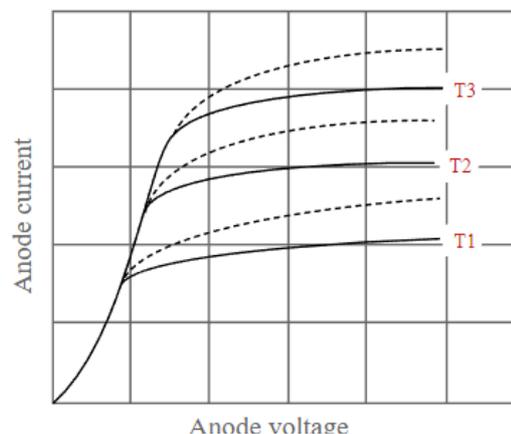


Figura 3-2: Característica estática de la válvula diodo.

electrones que el cátodo es capaz de emitir, por lo que se llega a un punto de saturación.

En circuitos de audio, como es el caso, las válvulas se polarizan de modo que actúen en la zona intermedia de la gráfica, ya que una continua saturación puede llegar a dañar la superficie del cátodo.

3.3 Triodos

En este tipo de válvulas se incluye un nuevo electrodo entre el ánodo y el cátodo, que permite cierto control adicional sobre la corriente del ánodo, llamado **rejilla de control**. Este nuevo electrodo está constituido por una espira de molibdeno que rodea el cátodo. Dependiendo de la tensión aplicada a esta rejilla, los valores de tensión y corriente de la válvula serán diferentes.

En caso de que esta tensión sea positiva, los electrones en la zona de carga serán capturados por el campo eléctrico del ánodo, mientras que, si esta tensión es negativa, repelerá a los electrones los cuales tendrán tendencia a permanecer en la zona de carga, reduciendo la corriente de ánodo. Si esta tensión es muy negativa, puede llegar a entrar en la zona llamada de corte, llegando la corriente del ánodo a los 0 mA.

Ahora se tiene, por tanto, para cada valor de tensión del ánodo, un amplio abanico de valores de corriente dependiendo de la tensión en la rejilla, como se puede ver en la figura 3-4.

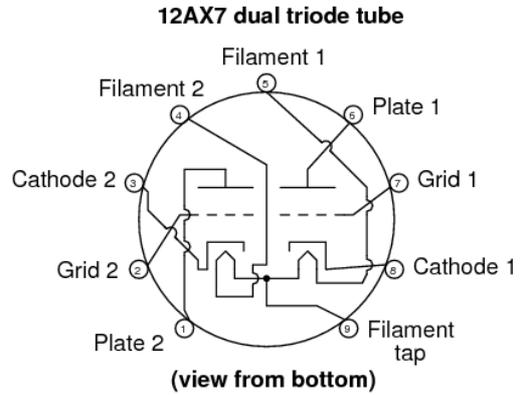


Figura 3-3: Símbolo válvula 12AX7 con dos triodos.

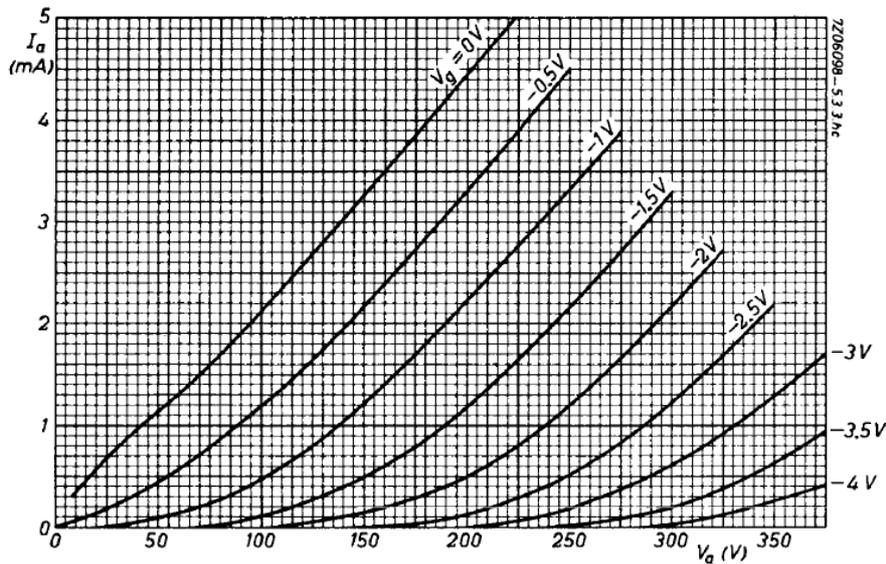


Figura 3-4: Característica estática del triodo. Válvula 12AX7.

3.3.1 Parámetros del triodo

Son tres los parámetros, llamados **constantes de la válvula**, los cuales son de gran ayuda para el diseño y análisis de los circuitos. Todos ellos son extraídos de la característica estática de la válvula. Estos son:

- **Resistencia del ánodo o resistencia interna**, r_a/r_p : corresponde con la inversa de la pendiente de la curva de la rejilla. Se calcula para una tensión de rejilla constante con la expresión:

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

- **Factor de amplificación**, μ : expresa el cambio sufrido en la tensión de ánodo debido al cambio en la tensión de la rejilla. En algunos libros se hace referencia a la efectividad de la rejilla sobre el ánodo para controlar la corriente del ánodo. Para una corriente fijada:

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

- **Transconductancia**, g_m : dada en libros antiguos como conductancia mutua, este parámetro representa el control que tiene la tensión de la rejilla sobre la corriente del ánodo. Fijando la tensión del ánodo, se expresa mediante:

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

Estos tres parámetros se relacionan por la ecuación de Van der Bijl's:

$$\mu = g_m \times r_a$$

Así, calculando dos de ellos, se obtiene el tercero. A lo largo del tiempo y del desgaste de las válvulas, r_a tiende a aumentar y g_m a disminuir, por lo que μ permanece más o menos constante.

3.3.2 Modelos más utilizados y sus diferencias

En los amplificadores de guitarra eléctrica, las válvulas de triodos más típicas son las 12AX7 (equivalente a las ECC83) y la 12AU7 (equivalente a la ECC82). Ambas son buenas opciones a la hora de encarar un diseño, pero hay que tener diferentes aspectos en cuenta a la hora de seleccionar una u otra.

La característica principal que marca la diferencia es el factor de amplificación, el cual se traducirá en la ganancia del circuito. El modelo 12AU7 presenta menor factor que la 12AX7, como puede verse en las figuras 3-5 y 3-6, y en la explicación más abajo de ellas. Como ventaja, la 12AU7 permite un mayor rango de tensiones en la rejilla. Esto ofrece mayor número de opciones al diseñador, aportando también mayor control sobre el diseño. Asimismo, el modelo 12AU7 maneja intensidades mayores para los mismos valores de tensión que en una 12AX7.

Estas válvulas podrían ser reemplazadas entre ellas, simplemente tener en cuenta que, si se utiliza la 12AU7, se obtiene una menor ganancia y también habría que fijarse en la potencia que aguantan las resistencias del ánodo, ya que, al aumentar considerablemente la corriente del ánodo, podrían quemarse si no están correctamente dimensionadas.

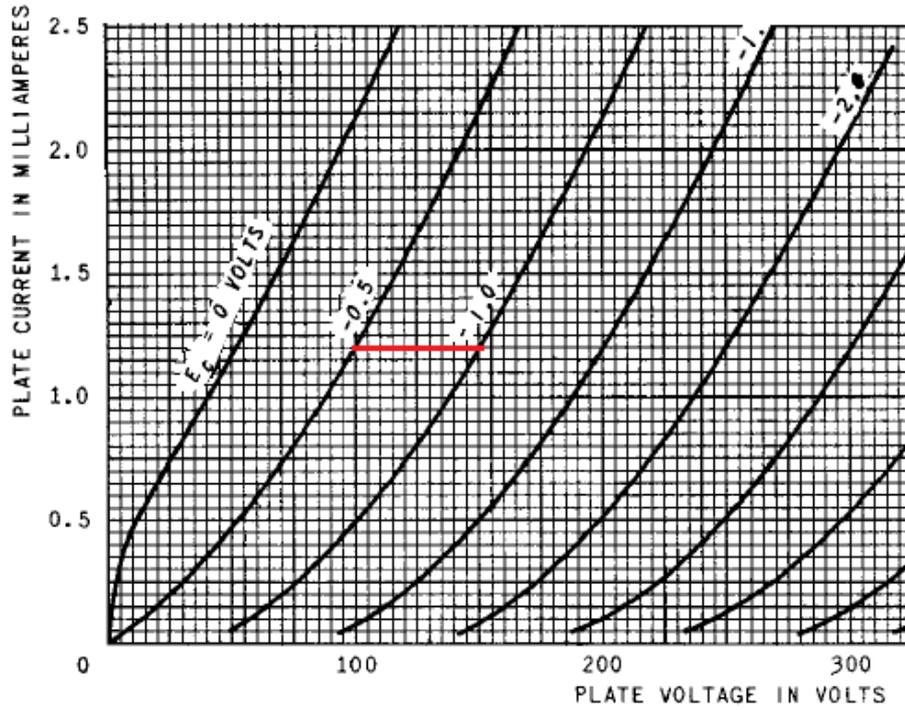


Figura 3-5: Característica válvula 12AX7.

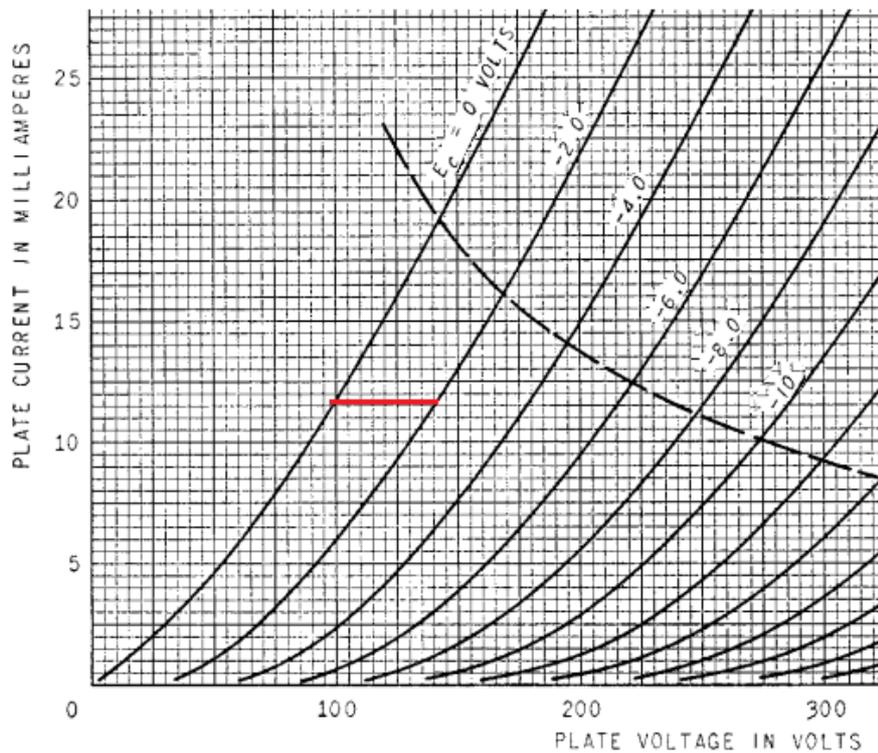


Figura 3-6: Característica válvula 12AU7.

Para el triodo de la válvula 12AX7, el factor de amplificación es, aproximadamente:

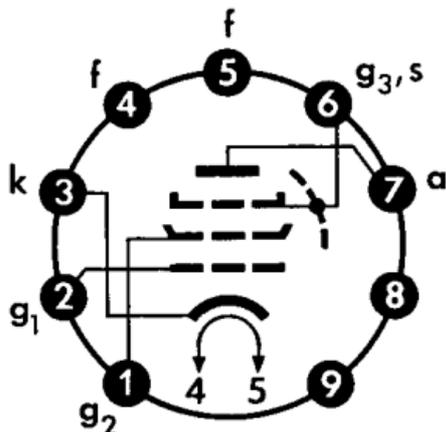
$$- \mu = \frac{\Delta V_a}{\Delta V_g} = \frac{50}{0.5} = 100$$

Y, para el triodo de la válvula 12AU7:

$$- \mu = \frac{\Delta V_a}{\Delta V_g} = \frac{40}{2} = 20$$

3.4 Pentodos

Los triodos, aunque son dispositivos adecuados para la amplificación, presentan problemas al trabajar en alta frecuencia debido a su elevada capacidad rejilla-placa (C_{ga}). Es por ello por lo que se insertó un nuevo electrodo, la **rejilla pantalla** (g_2), situada entre la rejilla de control y el ánodo. Esto supuso la aparición del tetrodo. Sin embargo este nuevo dispositivo presenta una distorsión no lineal, por lo que, para mejorar este comportamiento, se añadió un nuevo electrodo entre el ánodo y la rejilla pantalla: **la rejilla supresora** (g_3). Esta rejilla se encuentra a un potencial positivo respecto cátodo.



La operación de este dispositivo es similar a la de un triodo. Los electrones parten del cátodo con alta energía cinética, atravesando la rejilla supresora. Los electrones emitidos por el ánodo son rechazados por la rejilla supresora, volviendo de nuevo hacia él. Se elimina así la emisión secundaria que origina la distorsión no lineal en los tetrodos, obteniendo unas nuevas características. Se muestra en la figura 3-8 las características del pentodo EL803 de Telefunken para una tensión de la rejilla supresora de 0 V y una tensión de 170 V para la pantalla.

Figura 3-7: Símbolo pentodo EL803.

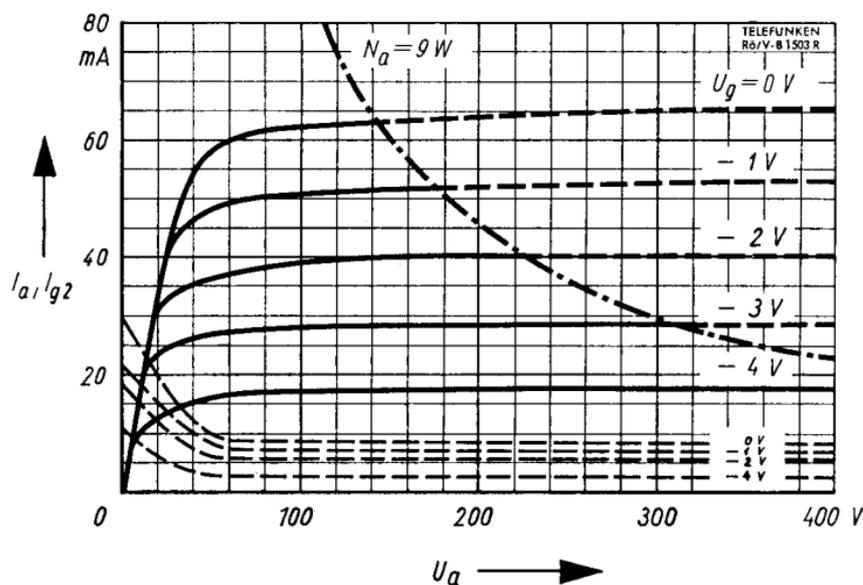


Figura 3-8: Característica pentodo EL803.

Es una característica V-I muy parecida a la de un transistor BJT (Bipolar Junction Transistor). Con el pentodo se consigue un factor de amplificación mucho más grande que con el triodo por lo que se pueden fabricar amplificadores con más potencia.

4 DISEÑO DEL CIRCUITO

A lo largo del proyecto, han ido surgiendo problemas en la implementación física del circuito que han llevado a que se tomen diferentes rumbos e investigaciones. Tras fabricar el primero de los diseños, se sometió a pruebas en el laboratorio, con la esperanza de que brindara resultados aproximados a las simulaciones. Sin embargo, no fue así. En las primeras pruebas el comportamiento del circuito no era en absoluto el esperado, provocando la duda de si la PCB o el diseño eran adecuados o no para esta aplicación.

Tras una exhaustiva comprobación de las pistas y conexiones, se concluyó que la placa no era el foco del problema, por lo que se descartó. En cuanto al diseño, los resultados no podían diferir demasiado de las simulaciones si los componentes funcionaban correctamente, si bien no iban a ser iguales, al menos parecidos.

Posteriormente se propuso la idea de que fueran las propias válvulas las que hacían que el circuito no funcionara bien. Se acudió a los correspondientes datasheets, “asegurando” así que, para la tensión de trabajo (50 V), se obtuvieran los valores indicados. Al realizar las mediciones, no fue así. Generalmente las válvulas son usadas en entornos de mayor tensión (entre 200 y 400 V). Entonces, se pensó que, para la tensión de trabajo, las válvulas podrían presentar ciertos problemas y que sería necesaria otra topología para el diseño.

Así es como el proyecto tomó el rumbo de investigar el diseño para válvulas en “baja” tensión, modificando el circuito inicial hasta encontrar uno que ofreciera las prestaciones deseadas: una forma de onda adecuada (amplificar la señal senoidal sin alterarla demasiado) y ganancia. En las siguientes páginas se mostrarán los diferentes diseños/modificaciones y los problemas que han surgido con cada uno.

4.1 El preamplificador

En la figura 4-1 se puede observar la cadena típica de componentes de un amplificador de guitarra (puede tener más, o incluso menos, dependiendo de los modelos), tomando como origen el instrumento y como actuador final el altavoz por el que se escuchará.

Dentro del preamplificador se tienen a su vez varias etapas.

- Volumen/ganancia: aporta la cantidad de distorsión. En los amplificadores, esta etapa se suele controlar con la perilla de “Gain”.
- Ecuación: por lo general, tres controles (treble, mid, bass), con los que se modificará el tono del sonido. Está estrechamente relacionado con el diagrama de Bode del circuito, siendo modificado al girar los potenciómetros.
- Volumen Máster: esta etapa controla el volumen general del preamplificador. En los amplificadores, se pueden encontrar varios potenciómetros de máster, correspondiendo a los diferentes canales. En este caso, como solo se ha diseñado un canal, se tendrá un único potenciómetro para esta función.

La salida de la guitarra se encuentra en el orden de 100mV. El preamplificador tiene como función amplificar esta señal hasta el orden de 10 Voltios, que sirvan como entrada de la etapa de potencia.

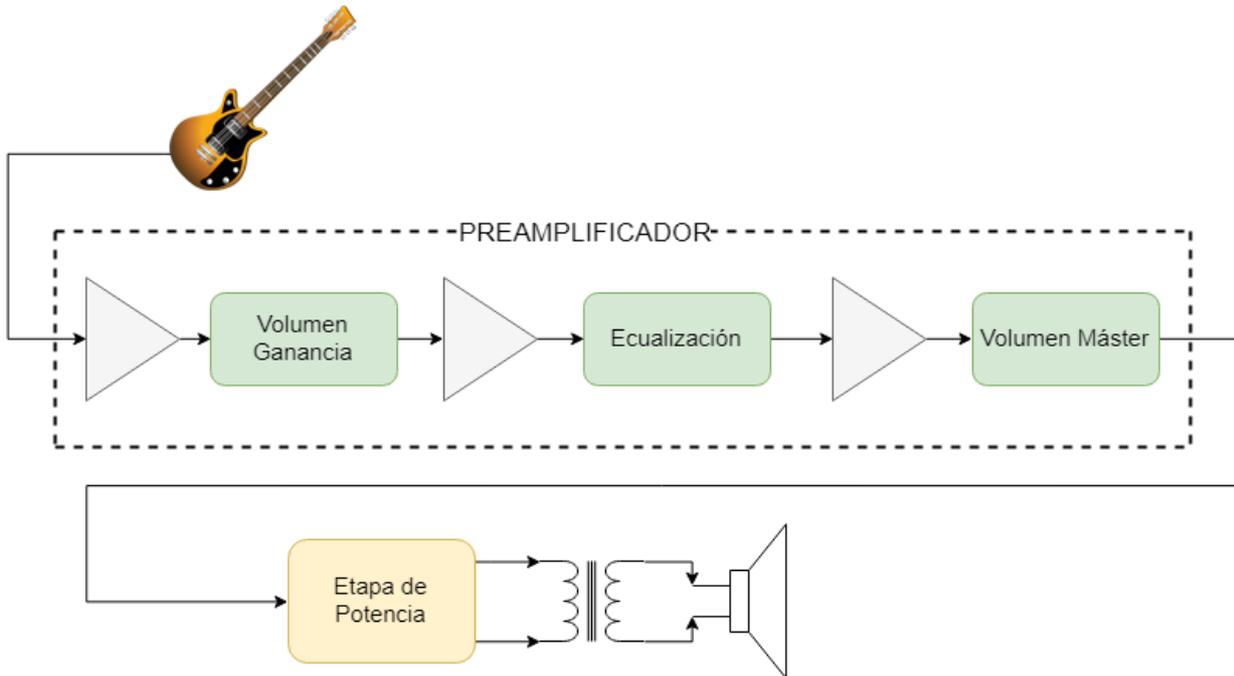


Figura 4-1: Cadena de sonido.

4.2 Diseño inicial

Al ser el objetivo implementar un preamplificador de guitarra eléctrica, es necesaria la investigación de los mismos dentro de la industria musical. Como se comenta en la segunda sección, son numerosas las personas que han investigado este campo durante la segunda mitad del siglo XX, desembocando en un gran número de empresas dedicadas exclusivamente al diseño y fabricación de amplificadores.

Por ello, se realizó una previa selección de circuitos, según el gusto de un servidor. Dentro de esta lista, se encuentran amplificadores ya citados en la sección 2, y otros de corte moderno. Finalmente, se eligió el conocido Fender Bassman, modelo 5F6-7. Por simplicidad, de los 4 canales que posee el amplificador original, se va a implementar uno de ellos. Estos canales son: Alto/Bajo, Brillante/Normal. La diferencia entre ellos es el volumen de salida en el caso del alto/bajo y el tono que tomará el sonido en el caso del brillante/normal. En la figura 4-2 se muestra el panel de canales del Fender Bassman.



Figura 4-2: Entrada canales Fender Bassman.

El circuito original del preamplificador se muestra en la figura.

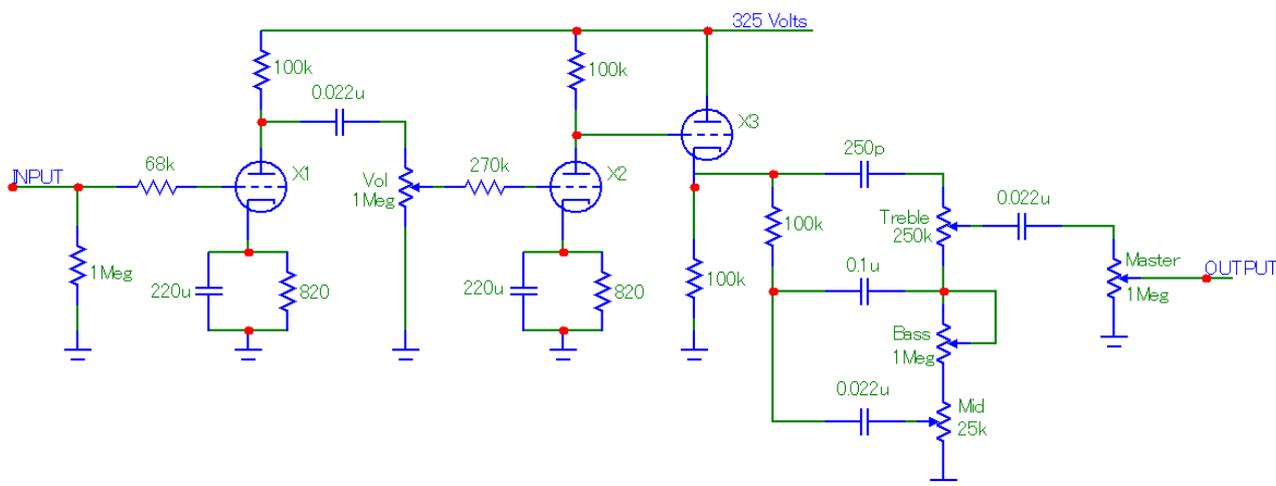


Figura 4-3: Circuito preamplificador Fender Bassman.

Como se viene comentando, la tensión de trabajo elegida no serán 325 voltios, si no que será de 50. La elección de este número viene dada por cuestiones de seguridad, dado que, la alta tensión que requiere el circuito original puede llegar a ser peligrosa para una persona sin la suficiente experiencia.

Por tanto, al cambiar este valor, hay que redimensionar las resistencias del ánodo. Es necesario obtener en este punto unos 25 V, la mitad de la tensión de alimentación. Así, se asegura un amplio rango de trabajo en el que la señal no quede demasiado distorsionada, al menos en la primera etapa. Para este cálculo, se hace uso del datasheet y se dibuja sobre él la recta de carga, para ver cuál es el punto de operación para estas condiciones. Esta recta se dibuja teniendo en cuenta las hipotéticas condiciones de:

- A tensión nula, la corriente sería de $I_0 = \frac{50V}{56k\Omega} = 0.89mA$
- La válvula está en corte total, por lo que V_a sería 50 V directamente.

La recta de carga entonces:

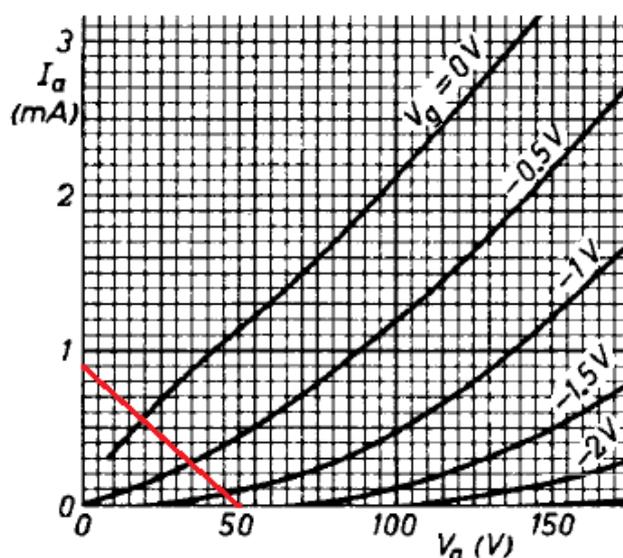


Figura 4-4: Recta de carga para $R_a = 56k\Omega$.

El bias point es para $V_g = 0\text{ V}$, de unos 20 voltios y 0.55 mA. La caída de tensión en la resistencia del ánodo es entonces de $V_r = 56\text{k}\Omega * 0.55\text{mA} \cong 30\text{ V}$.

Se tiene entonces un punto de operación adecuado para ser un diseño inicial.

Además del cambio de esta resistencia, se han sustituido las resistencias de $820\ \Omega$ de los cátodos por potenciómetros de $10\text{k}\Omega$. Esto permitirá variar un poco el punto de operación, pudiendo obtener diferentes formas y recortes de la onda.

Así mismo, como la unidad que se va a implementar es independiente (no está integrada junto a otras etapas como en el amplificador original), se añaden condensadores de $100\mu\text{F}$ y 100nF para estabilizar la alimentación.

4.2.1 Simulación

Antes de la implementación física, se han realizado las correspondientes simulaciones, para comprobar que, aproximadamente el punto de operación es el deseado. Se muestra en la figura 4-5 el circuito simulado, sin representar el control de tono ni la válvula en configuración de seguidor de tensión.

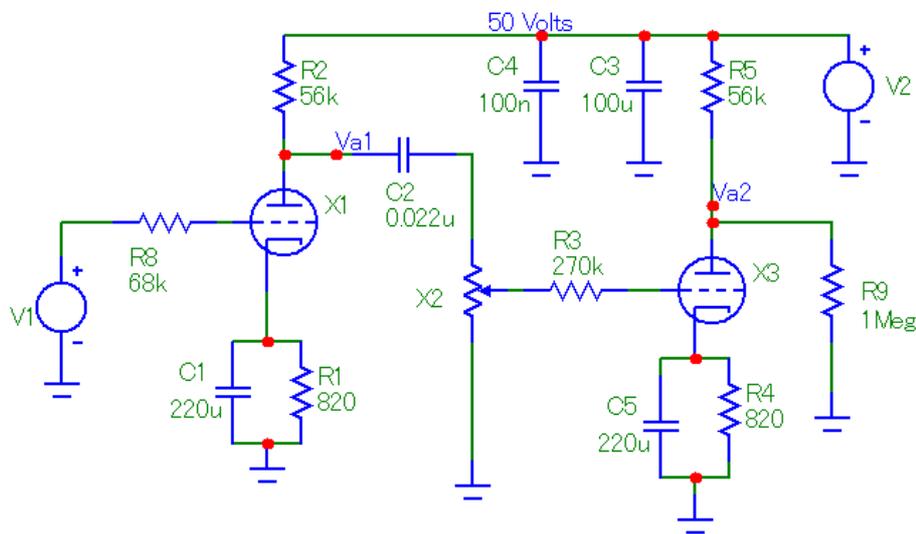


Figura 4-5: Circuito simulado.

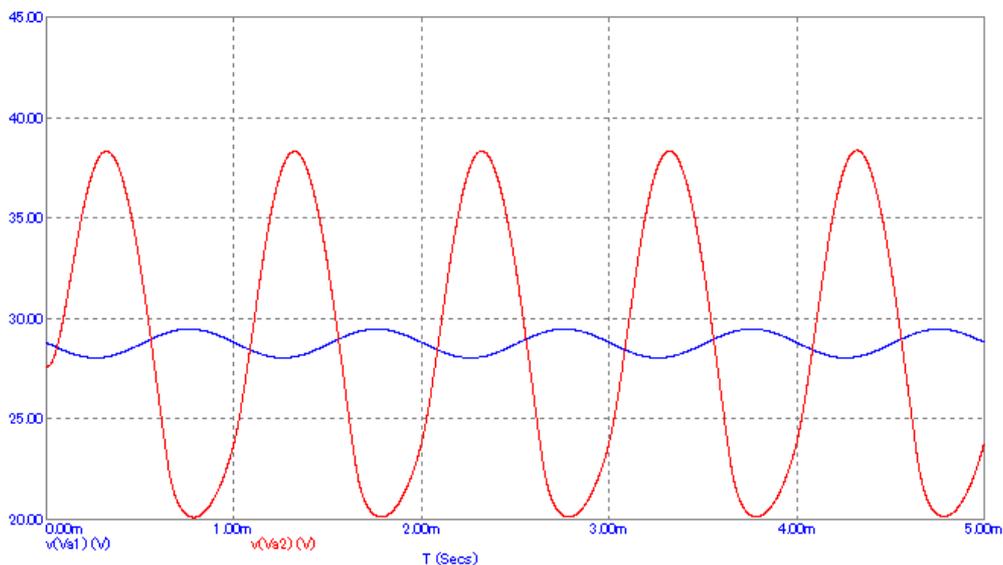


Figura 4-6: Resultado simulación.

En la figura 4-6 se muestra la salida en el ánodo de la primera etapa (V_{a1}) y en el ánodo de la segunda (V_{a2}) para una entrada senoidal de 20mV de amplitud y 1kHz de frecuencia. La tensión media se encuentra entre los 27 y 28 V. Discrepa un poco de los 20 voltios calculados teóricamente, pero sigue siendo una cifra aceptable, y, además, la señal amplificada no se recorta ni sufre grandes deformaciones.

4.2.2 Implementación física

Se ha optado por hacer el conexionado mediante pistas³ con una PCB. El diseño se ha realizado con Eagle 9.3.0, mostrándose el resultado en la figura 4-7 junto con la representación ideal de los componentes.

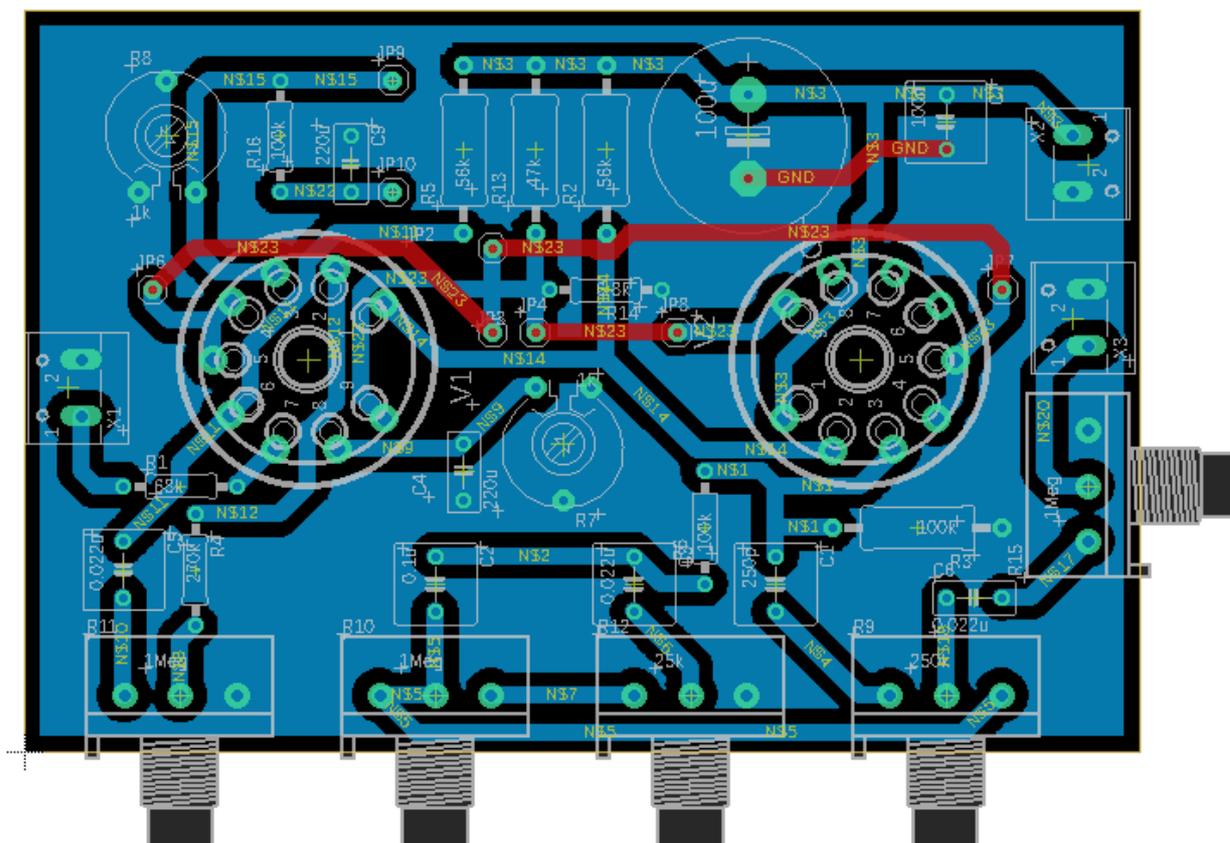


Figura 4-7: Diseño de la placa en Eagle.

Recaltar que, posteriormente se modificó la placa. Originalmente, la alimentación de las válvulas se ajustó mediante un divisor de tensión, para poder aprovechar así la fuente de 50V. Sin embargo, el consumo de corriente en estos pines de las válvulas es bastante elevado, siendo 300 mA. El divisor de tensión no podía aportar tanta corriente, por lo que la alimentación se hizo directamente con 6.3 V en el nodo correspondiente a los pines 4 y 5 de las válvulas.

³ En los amplificadores valvulares es muy típico el conexionado punto a punto, donde los componentes se sueldan directamente uno con otro siguiendo correctamente el esquemático. Ver Figura 2-2.

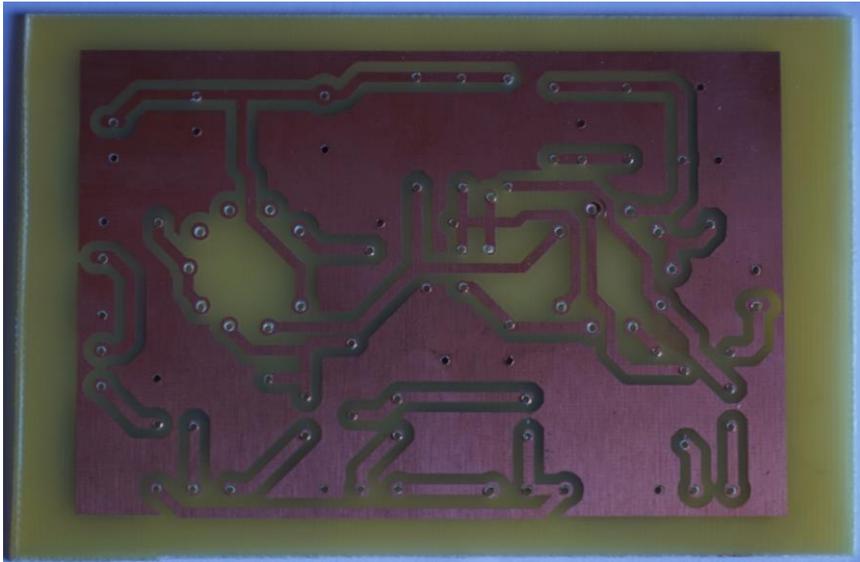


Figura 4-8: PCB.

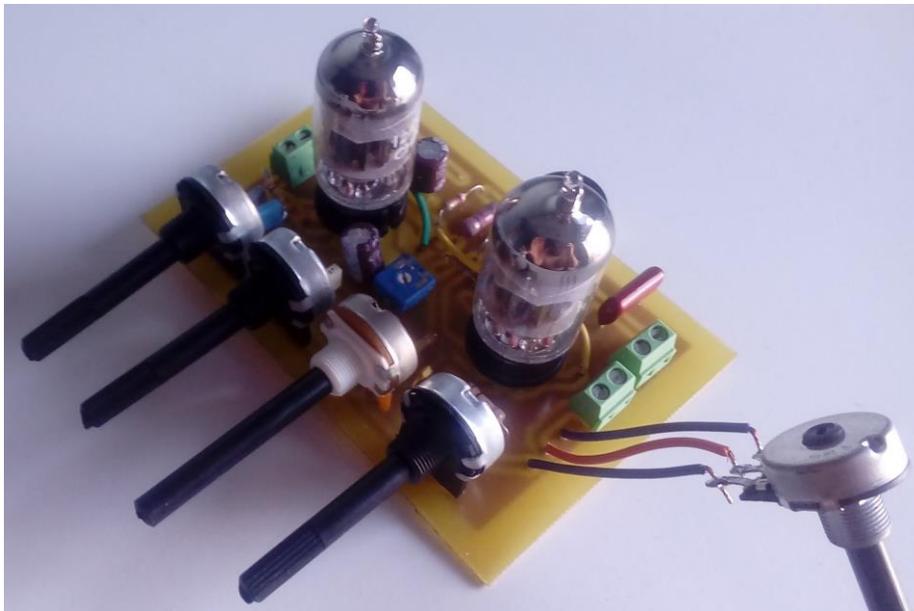


Figura 4-9: Circuito completo.

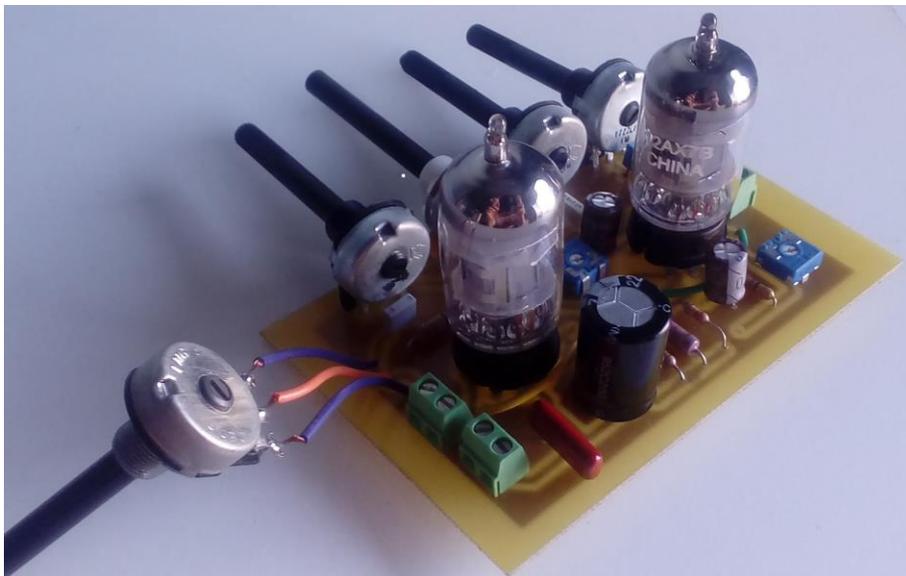


Figura 4-10: Circuito completo.

4.2.3 Problemas del diseño

Tras la fase de fabricación, se trasladó el circuito al laboratorio para medir las diferentes tensiones y comprobar el diseño.

Como entrada se utilizó una señal senoidal de 0.15 V_{pp} y 440 Hz (Frecuencia de la nota La).

La tensión medida en el primer ánodo fue de 49.5 V, lo cual hace obviamente que la señal se recorte casi por completo. Este hecho fue el desencadenante de que, a la vista de los resultados teóricos, el comportamiento no fuera en absoluto el mostrado en los datasheets. Tras comprobar todas las conexiones, componentes y pistas, no se encontró ninguna falla.

De igual manera se procedió con la segunda etapa, obteniendo también una tensión media de unos 49.5 V. De estos valores se intuye que la caída en la resistencia del ánodo es de 0.5 V.

Así, la intensidad del ánodo es de entorno $I_a = \frac{0.5 V}{56 k\Omega} \cong 8.9 \mu A$, que para nada coincide con lo calculado teóricamente.

Para tener certeza del comportamiento de las válvulas utilizadas, se miden sus curvas experimentalmente, haciendo uso del Hameg Curve Tracer, y del instrumento fabricado por el profesor D. Francisco Pérez.

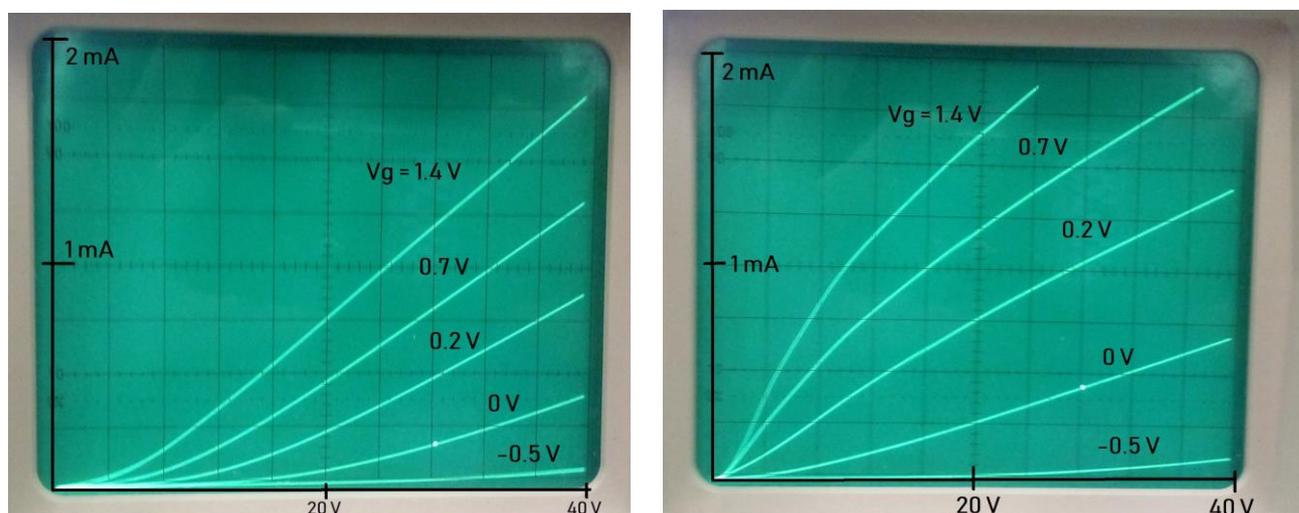


Figura 4-11: Izquierda: Curva real primer triodo. Derecha: Curva real segundo triodo.

En estas curvas se aprecia como la corriente es realmente menor a la que indica el datasheet, encontrándose incluso por debajo de los 100 μA en el primer triodo.

A la vista queda también que, incluso siendo la misma válvula, los triodos no son iguales, por lo que hay una gran dispersión en la fabricación de estos componentes. Con intención de hacer una breve comparativa, el profesor D. Francisco Pérez hizo de nuevo su aportación, cediendo un par de válvulas de su colección.

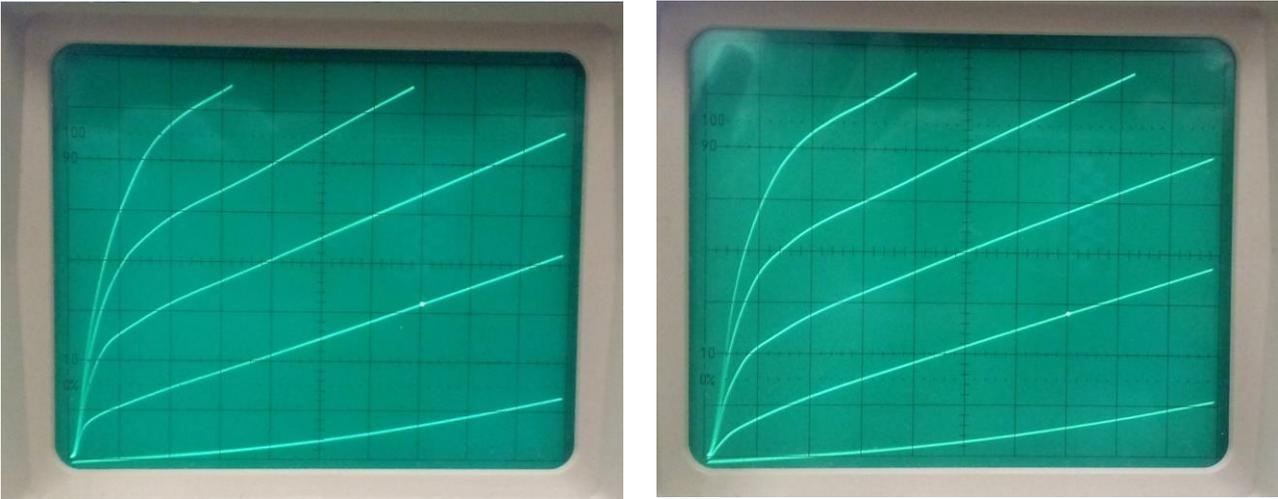


Figura 4-12: Curvas reales de la válvula aportada por D. Francisco Pérez.

Siendo la figura 4-12 representada con el mismo fondo de escala que la figura 4-11, queda a la vista la gran dispersión que puede haber en estos componentes. Las válvulas del profesor se ajustan más, aunque no exactamente, a las que puede dar un fabricante en su datasheet. Esto podría dar lugar a diseños que podrían funcionar de manera muy diferente (o incluso no funcionar) para válvulas diferentes, por lo que es un aspecto a tener muy presente a la hora de la implementación.

Cabe además preguntarse: ¿Qué ocurre con la simulación? Como se vió en el apartado 4.2.1, según las simulaciones en MicroCAP, el circuito debería funcionar correctamente, con un punto de operación adecuado y una amplificación sin apenas deformación de la señal. El problema reside en el modelo de las válvulas que utiliza el programa para las simulaciones.

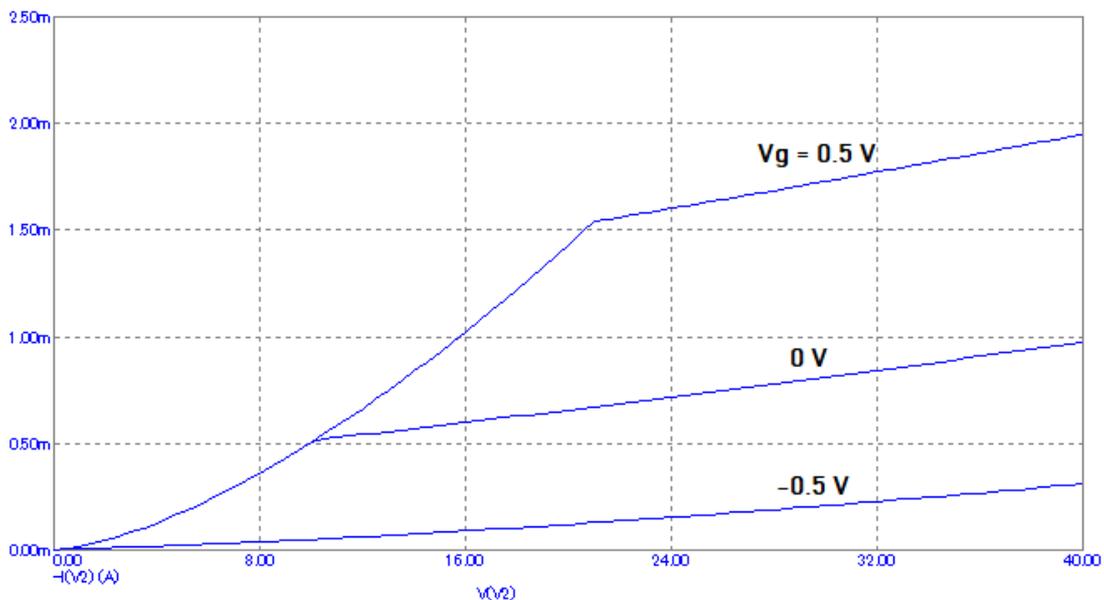


Figura 4-13: Modelo válvula 12AX7 MicroCAP.

A simple vista, comparando con las mediciones de la figura 4-11, el modelo de MicroCAP para la válvula 12AX7 no se parece al comportamiento real de la válvula. Siendo un poco optimistas se puede notar cierta similitud entre el modelo del programa con la válvula del profesor D. Francisco, aunque tampoco valdría a la hora de hacer el diseño.

4.3 Modificaciones, Segundo diseño

Tras comprobar que en la práctica, la intensidad del ánodo es muy pequeña, se opta por aumentar la carga de dicho electrodo hasta $220\text{ k}\Omega$, cambiando así el punto de operación y consiguiendo una mayor caída de tensión en esta resistencia. Ahora, la I_a en una supuesta tensión $V_a = 0\text{ V}$, sería $I_a = \frac{50\text{V}}{220\text{k}\Omega} = 227\mu\text{A}$.

Al bajar esta intensidad, también será más baja la del punto de operación, y aunque esta bajada sea bastante grande, la resistencia es ahora mucho mayor, por lo que la caída de tensión en la resistencia será mayor, adecuando el punto de operación. Atendiendo ahora a las curvas reales de las válvulas (figura 4-14), el punto de operación se encuentra entorno a $V_a = 24\text{ V}$ e $I_a = 100\mu\text{A}$. En estas condiciones, la caída en la resistencia del ánodo es de aproximadamente $V_{ra} = 220\text{k}\Omega * 100\mu\text{A} = 23\text{ V}$.

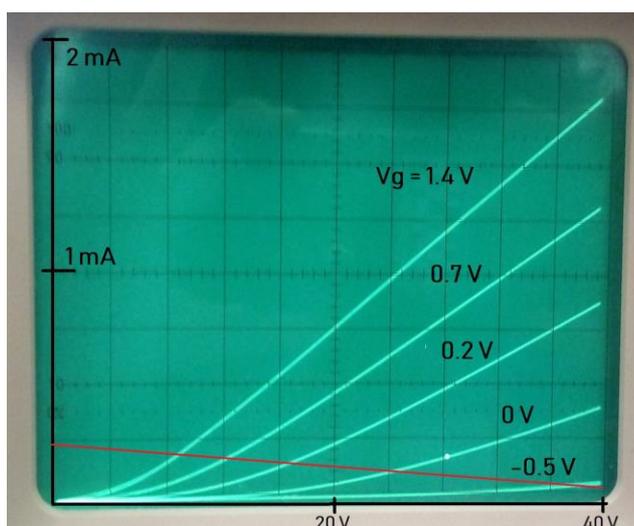


Figura 4-14: Recta de carga sobre la curva real del primer triodo.

Al orientar el proyecto al estudio de las válvulas a baja tensión, se dejó de lado la etapa seguidora de tensión y el control de tono para simplificar. Estas partes no aportaban nada a dicho estudio y tampoco suponían tal problema como las dos primeras etapas.

4.3.1 Problemas del segundo diseño

Tras las nuevas modificaciones, el comportamiento mejora considerablemente. Se miden las tensiones de los ánodos y ahora sí presentan unos valores más cercanos a los calculados teóricamente.

El primer ánodo presenta una tensión media de unos 28 V y el ánodo de la segunda etapa entorno a 32 V. La señal ahora se amplifica sin sufrir un gran recorte en la primera etapa, aunque en la segunda sí.

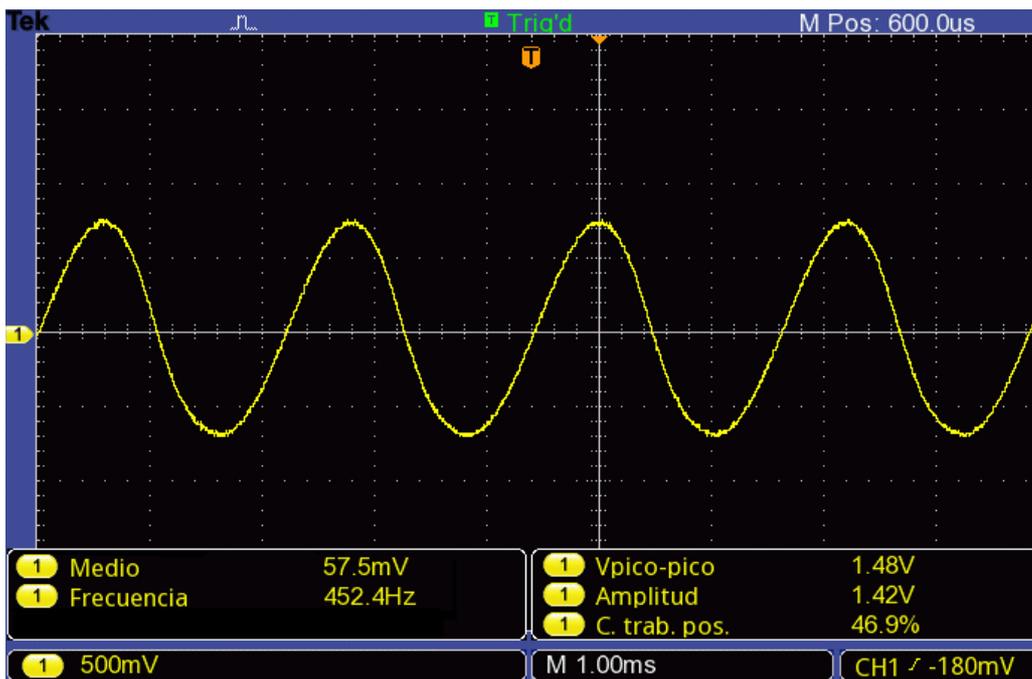


Figura 4-15: Onda en el ánodo 1, segundo diseño. Medida en CA.

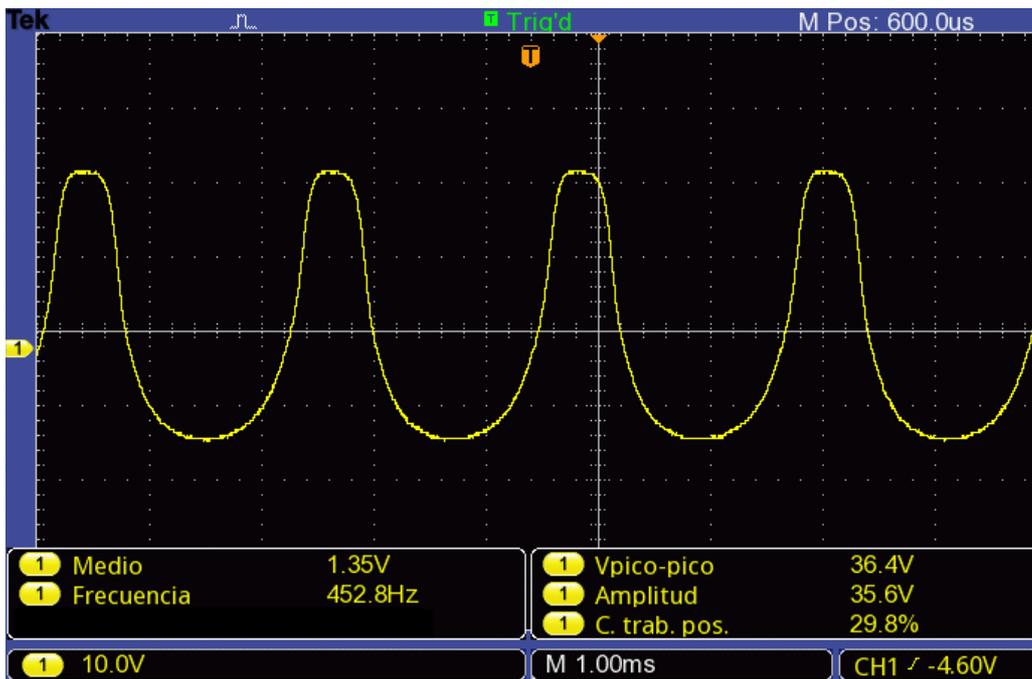


Figura 4-16: Onda en el ánodo 2, segundo diseño. Medida en CA.

Obviamente, la señal en el segundo ánodo puede mejorarse aún más, y es por ello por lo que se intenta que la tensión media en este punto se ajuste más al valor teórico.

Midiendo la tensión en las rejillas, aparece un valor de -0.45 V , el cual debería de ser 0 V . Esta es una de las razones por las cuales la tensión media de los ánodos es mayor (al disminuir V_{gk} aumenta la caída en el ánodo, empeorando el punto de funcionamiento en este caso). Este valor de tensión es debido a la aparición de corrientes parásitas en este pin de la válvula, por lo que, al haber una resistencia, existe caída de tensión.

Para evitar este problema, se elimina la resistencia del primer ánodo y la segunda se ajusta de tal manera que se ajuste con la impedancia del primer triodo. Además, se incluye un condensador entre ambas etapas para evitar que el uso del potenciómetro de volumen pueda causar cambios en el punto de polarización.

Con estos razonamientos, se va al siguiente apartado, comentando las modificaciones realizadas.

4.4 Modificaciones, tercer diseño

El circuito final se muestra en la figura 4-17.

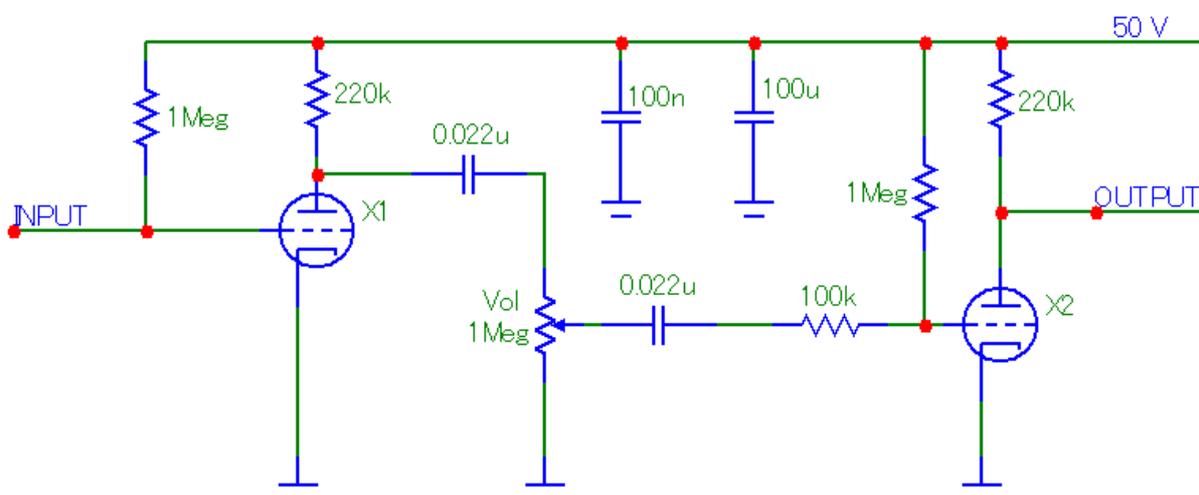


Figura 4-17: Circuito final preamplificador.

Ahora, las tensiones en las rejillas quedan fijadas, quedando ambas a 0 V y por tanto operando en el punto previamente calculado.

Obviamente, la simulación de este circuito es inútil, por lo comentado en el apartado 4.2.3 sobre el modelo de válvulas de MicroCAP.

Sometiendo nuevamente a pruebas el circuito, se miden tensiones de 20.2 V para el primero y de 28.5 V el segundo. Por las razones comentadas de dispersión, estas tensiones no son iguales, y si se observa con detalle las gráficas de los triodos (figura 4-11), se ve que el punto de operación queda diferente en ambos.

Así, se ha conseguido que las señales una vez amplificadas tengan un aspecto apropiado.

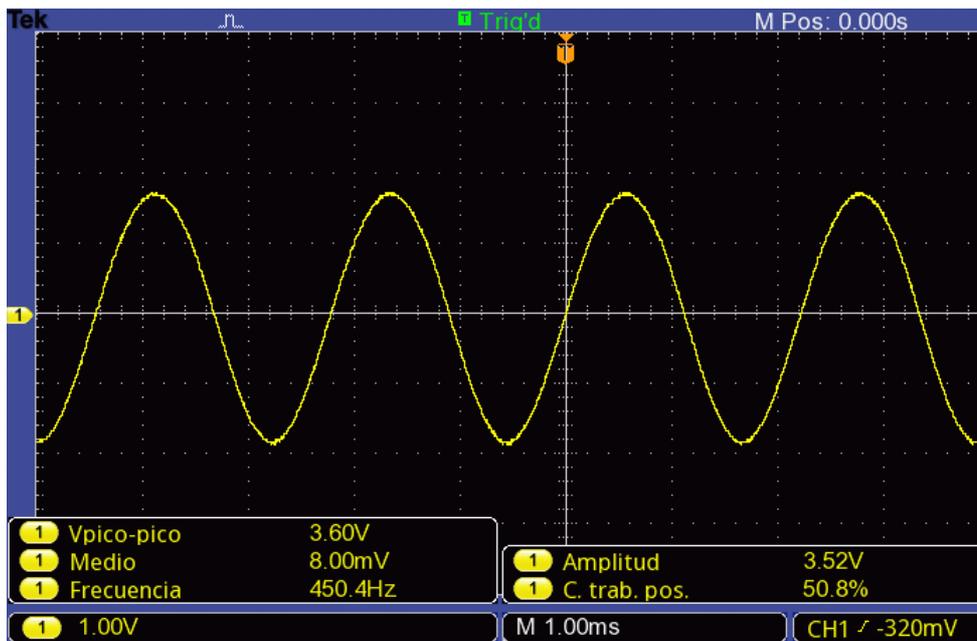


Figura 4-18: Onda en el ánodo 1, diseño final. Medida en CA.

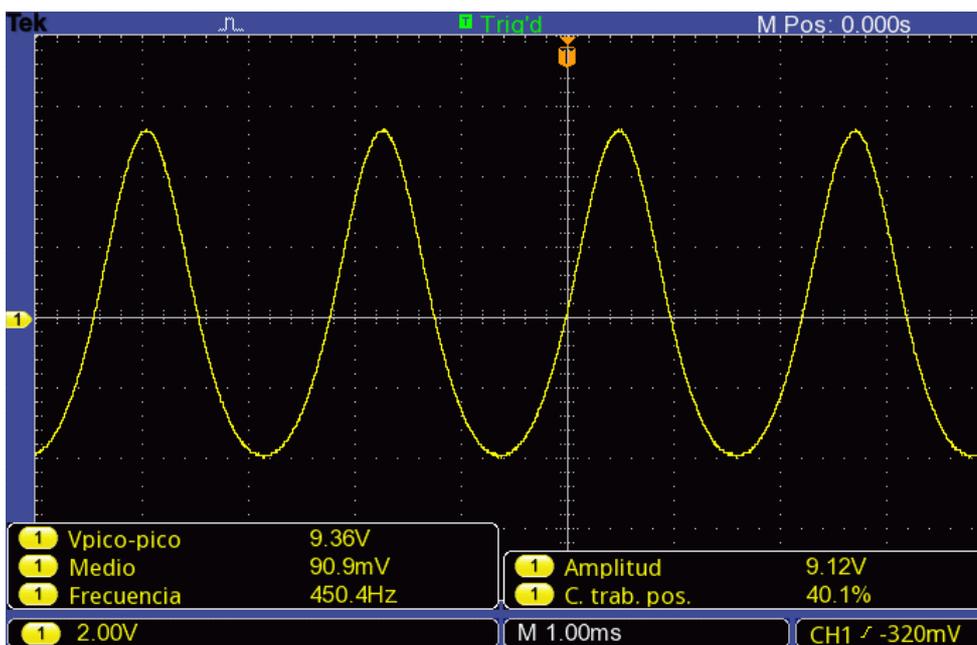


Figura 4-19: Onda en el ánodo 2, diseño final. Medida en CA.

En ambos ánodos se tiene ahora una forma prácticamente sinusoidal.

4.4.1 Ganancia y Bode experimental

Antes de mostrar las gráficas obtenidas en el laboratorio de los ensayos de frecuencia, conviene comentar un aspecto de este tercer diseño. Para la selección de la resistencia de la segunda rejilla, se han probado previamente numerosos valores, de los cuales algunos presentaban ciertas ventajas con el valor final, pero que también aportaban desventajas.

Como la resistencia inicial de $270\text{k}\Omega$ no era una buena opción, se optó primero por reducirla hasta los $68\text{k}\Omega$. Con este valor, la forma de la onda iba mejorando, tomando mayor forma sinusoidal. Como contrapartida, el circuito pierde ganancia.

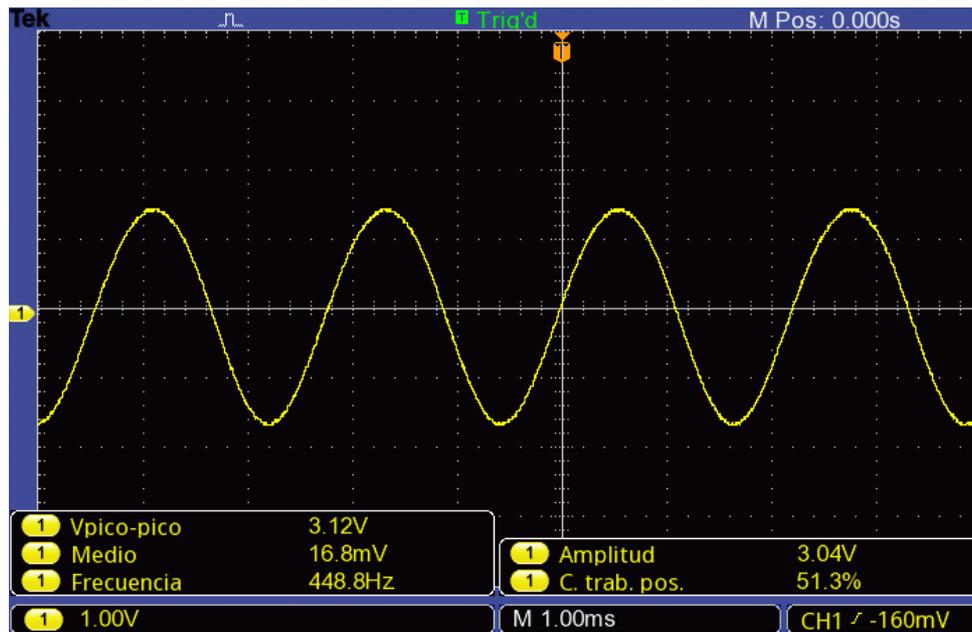


Figura 4-20: Onda ánodo 1, resistencia rejilla 68k. Medida en CA.

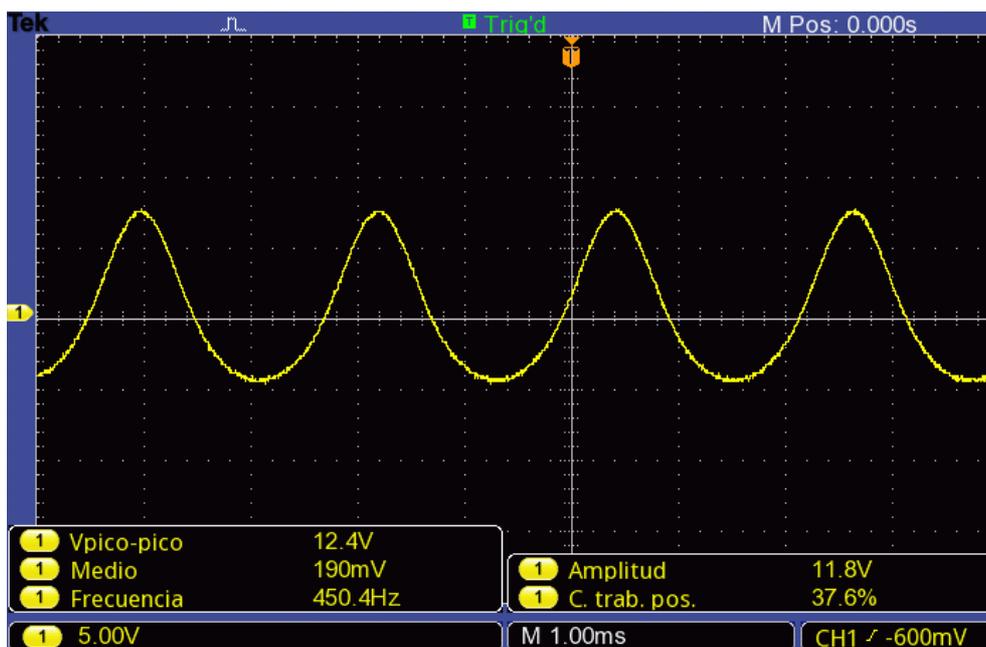


Figura 4-21: Onda ánodo 2, resistencia rejilla 68k. Medida en CA.

En este caso, la ganancia obtenida es de $G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{12.4}{0.15} = 82.67$

Observando las figuras 4-20 y 4-21, como ya se ha comentado, aunque mejoran considerablemente las formas de onda respecto a los diseños anteriores, se busca que sea más senoidal.

Cuando se probó para el valor de 100k, se consiguió la forma de onda deseada. Como inconveniente, se obtiene la menor de las ganancias de todos los diseños. Atendiendo a las figuras 4-18 y 4-19:

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{9.36}{0.15} = 62.4$$

Con ayuda del osciloscopio, se realiza la correspondiente FFT para el análisis de distorsión, con una señal de entrada de 0.15 Vpp y 440 Hz.

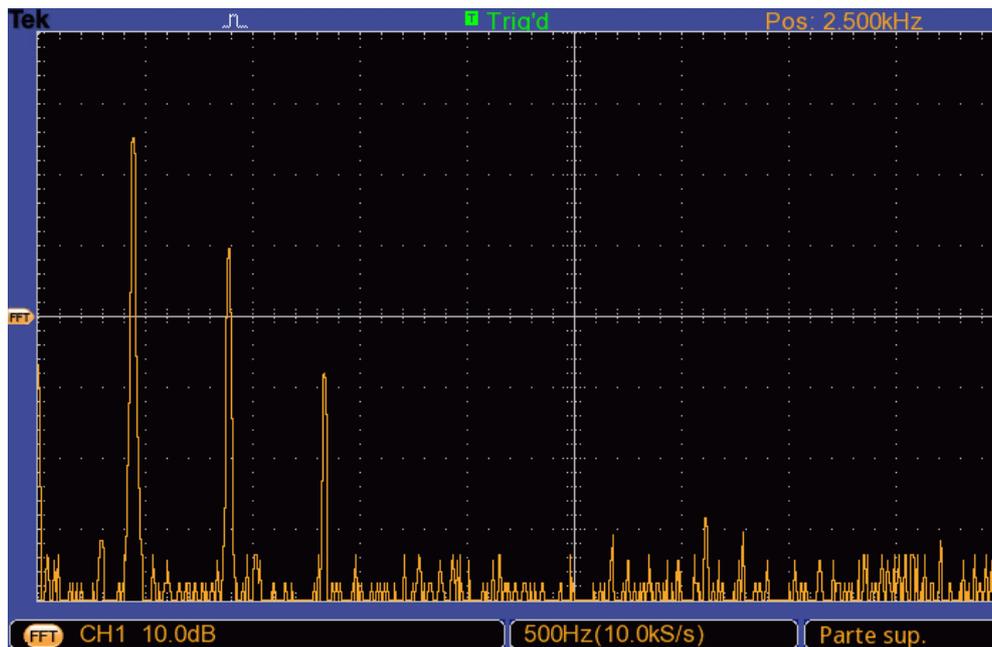


Figura 4-22: FFT diseño final.

Hay que destacar la gran presencia del segundo y tercer armónico. En definitiva, estos es lo que se buscaba con esta topología. La guitarra eléctrica es un instrumento que produce una gran cantidad de armónicos, y que todos ellos provocan la musicalidad del instrumento.

Por esta razón, gran parte de los músicos prefieren los amplificadores a válvulas, ya que realzan en gran medida los armónicos. Por lo que, en lo que al proyecto se refiere, se ha cumplido uno de los objetivos, que es su correcta adaptación a la guitarra eléctrica.

Para terminar con las pruebas de laboratorio, se ha realizado un bode experimental, haciendo uso del generador de señales y tomando las frecuencias más representativas. Se muestran en las figuras 4-23 y 4-24 los diagramas para ambos ánodos con una entrada de 0.15 Vpp.

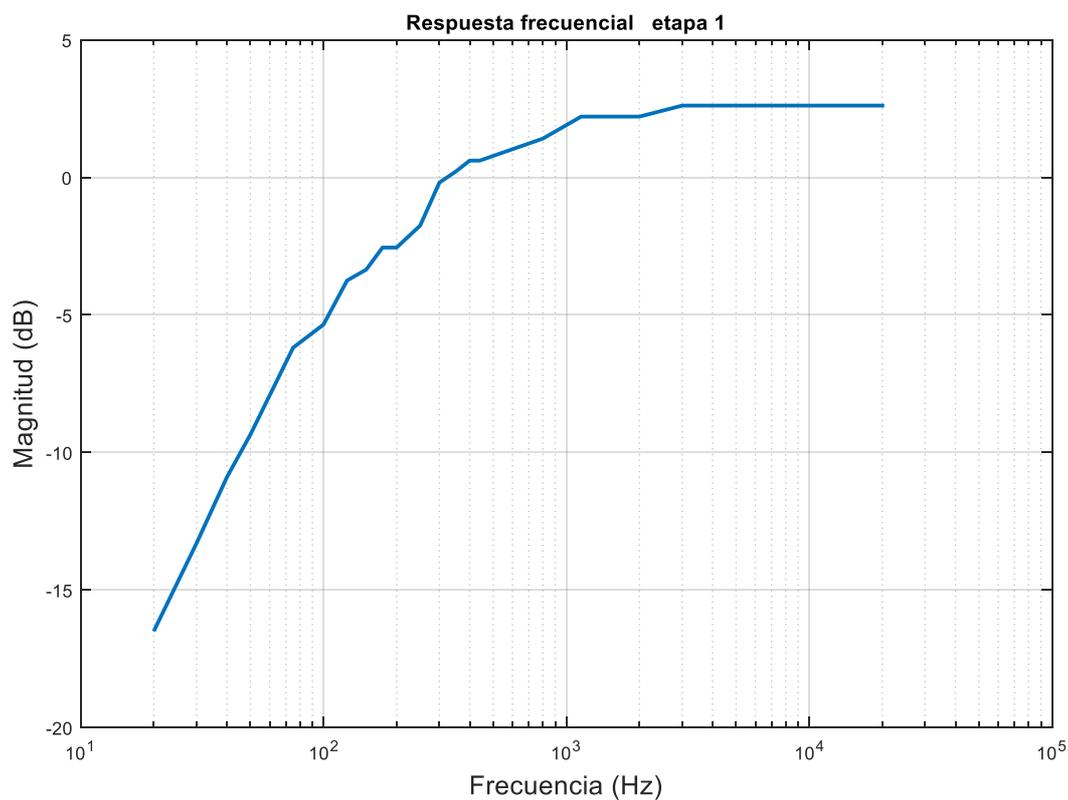


Figura 4-23: Respuesta frecuencial en el primer ánodo.

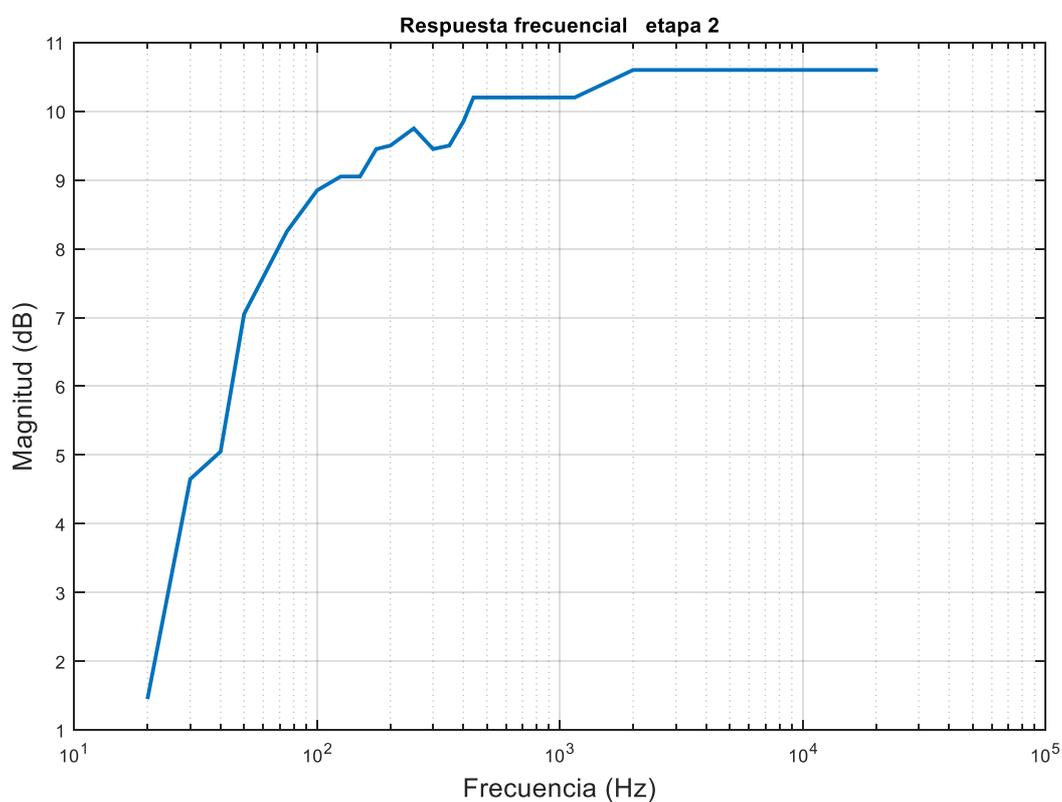


Figura 4-24: Respuesta frecuencial en el segundo ánodo.

El rango de frecuencias de la guitarra eléctrica va generalmente desde 80 Hz hasta los 1300 Hz aproximadamente. En ambos diagramas, las frecuencias más graves tienen menor magnitud, siendo ésta creciente hasta los 1100 Hz y siendo constante hasta los 20 kHz.

Esto se traduciría en una mayor presencia de las frecuencias medias/agudas del instrumento. En términos de jerga musical se podría decir que el sonido no tendría demasiado cuerpo, ya que no está respaldado por unos graves fuertes, y sería estridente, al primar los agudos.

5 ALTERNATIVAS DE DISEÑO

En este capítulo se va a tomar como referencia el artículo de Merlin Blencowe de triodos a baja tensión.

Aunque en el artículo el autor trabaja con una tensión de 12 V, es completamente apto para los 50 V utilizados en el proyecto.

Si bien estos métodos no se van a implementar físicamente, es recomendable tenerlos de referencia y por supuesto, son alternativas que cumplen su función correctamente y es una buena base de circuitos para futuros proyectos.

Se comienza haciendo un estudio de la importancia de la rejilla en esta tensión. Como se ha visto en el capítulo 4, este electrodo ha sido fuente de problemas a lo largo del proyecto, por lo que es interesante conocer las técnicas que pueden ayudar a mitigar o controlar sus efectos. A tensión elevada, la resistencia de entrada de la rejilla se considera infinita, por lo que la corriente en este nodo no supone un problema, sin embargo, a bajas tensiones hay que tener mayor cuidado con el diseño, ya que la resistencia no se desprecia y la corriente, si no se trata de la manera adecuada, puede provocar problemas de funcionamiento.

A medida que se disminuye la tensión en el ánodo, aumenta la corriente en la rejilla, ya que el ánodo no atrae tanto a los electrones. En la figura 5-1 se muestra una medida experimental del autor, en la cual se representa la corriente I_g en función de la tensión de la rejilla, para una tensión V_a fija.

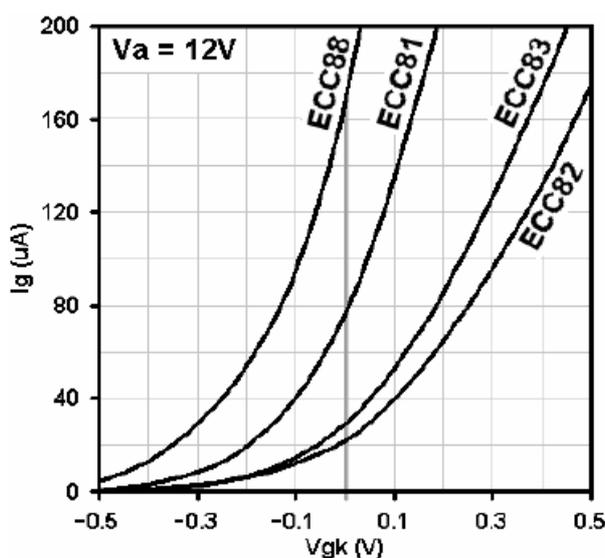


Figura 5-1: Característica V_{gk} - I_g .

En el caso del proyecto, la válvula que interesa es la ECC83, que sería la equivalente a la 12AX7. Técnicas clásicas como el polarizado de cátodo (Anexo C) no son válidas para baja tensión, por lo que son necesarias las técnicas que se explican a continuación.

5.1 Circuitos híbridos

Como primera instancia, se propone un circuito en el que conviven válvulas y amplificadores operacionales. En este caso se usa un amplificador operación para controlar la rejilla.

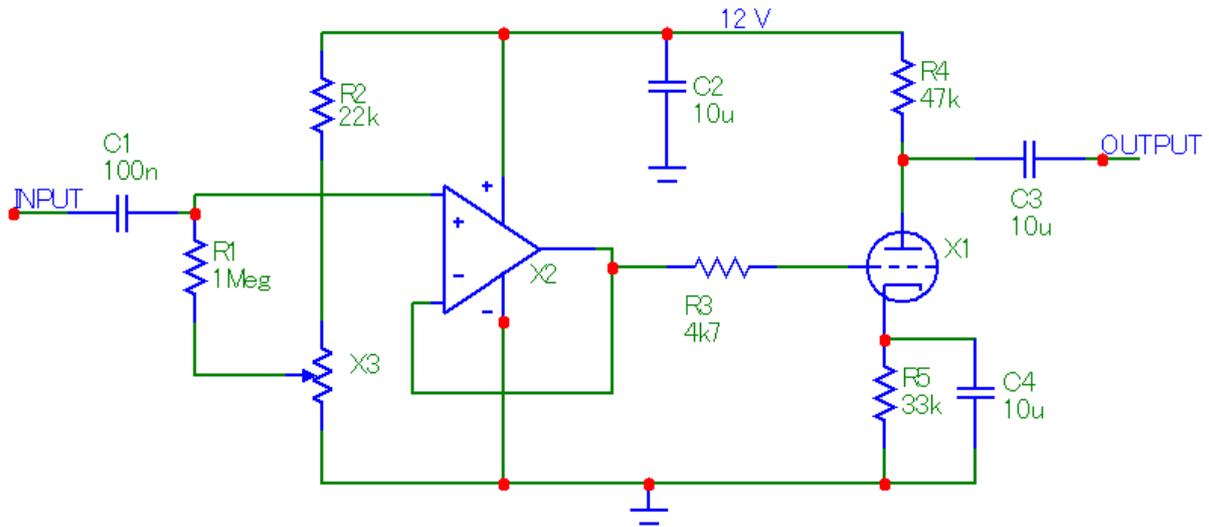


Figura 5-2: Circuito híbrido.

Gracias al potenciómetro X3, se ajusta el bias del OPAMP, haciendo el circuito adaptable para las diferentes válvulas. La resistencia R3 hace en este caso que circule corriente (no lineal) por la rejilla, produciendo una distorsión que puede ser del gusto de músicos.

Para completar el circuito anterior, se usa otro amplificador operacional para ofrecer una impedancia de salida pequeña, quedando el circuito de la figura.

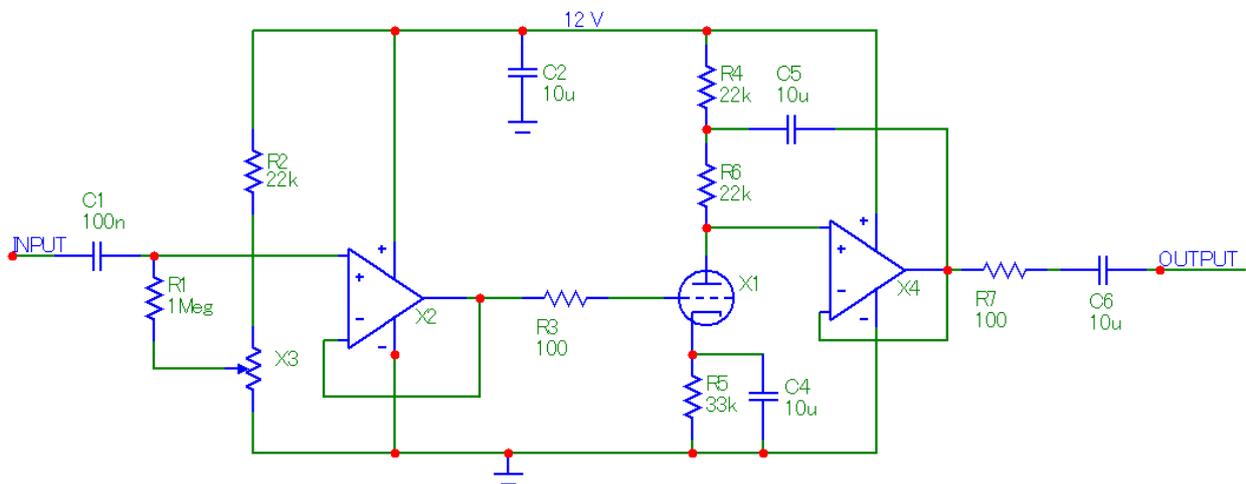


Figura 5-3: Circuito híbrido completo.

Este nuevo circuito proporciona interés para el diseño enfocado a instrumentos ya que aporta una gran impedancia de entrada y una impedancia de salida pequeña. Además puede proporcionar ganancia adicional, lo que hace que la válvula se sature más.

5.2 Grid-Leak Biasing junto a transistor de alta ganancia

Al igual que antes, la impedancia de salida de la válvula es muy grande, por lo que se coloca el transistor de alta ganancia para ajustar la salida.

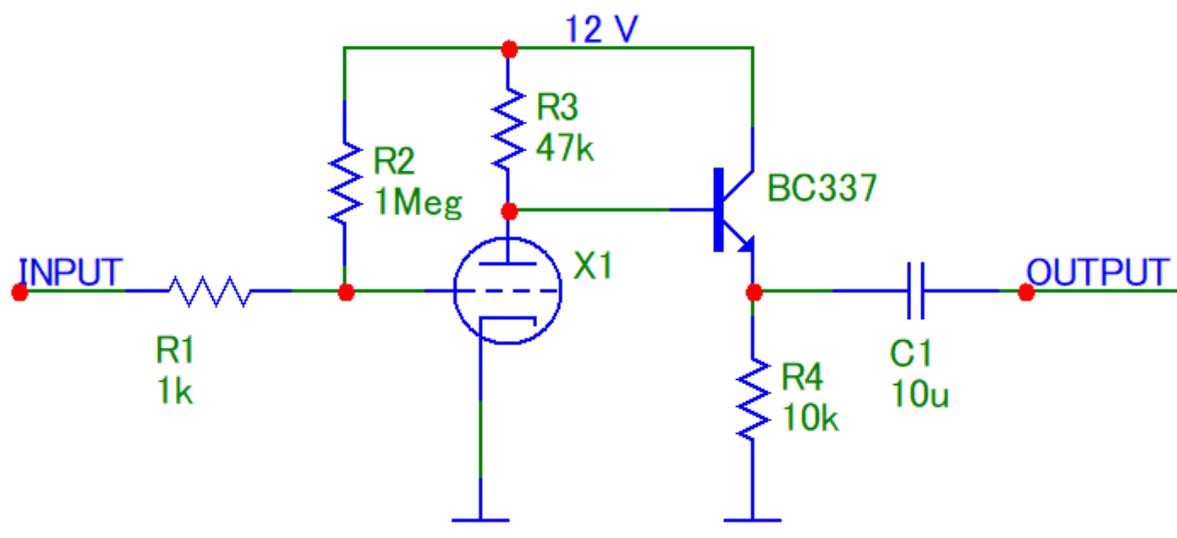


Figura 5-4: Grid-leak biasing y transistor.

La polarización de la válvula se ha hecho fijando la tensión de la rejilla. Si se quiere por ejemplo -0.2 V , en la resistencia tienen que caer 12.2 V . Midiendo la intensidad de la rejilla en las gráficas se ajusta la resistencia que se ha de colocar. A la salida, se coloca un transistor de alta ganancia, ajustando la impedancia de salida, haciéndola muy pequeña.

5.3 Valvular

Si se quiere evitar la opción de utilizar circuitos híbridos, basta con sustituir el transistor añadido en el apartado 5.2 por un seguidor de tensión.

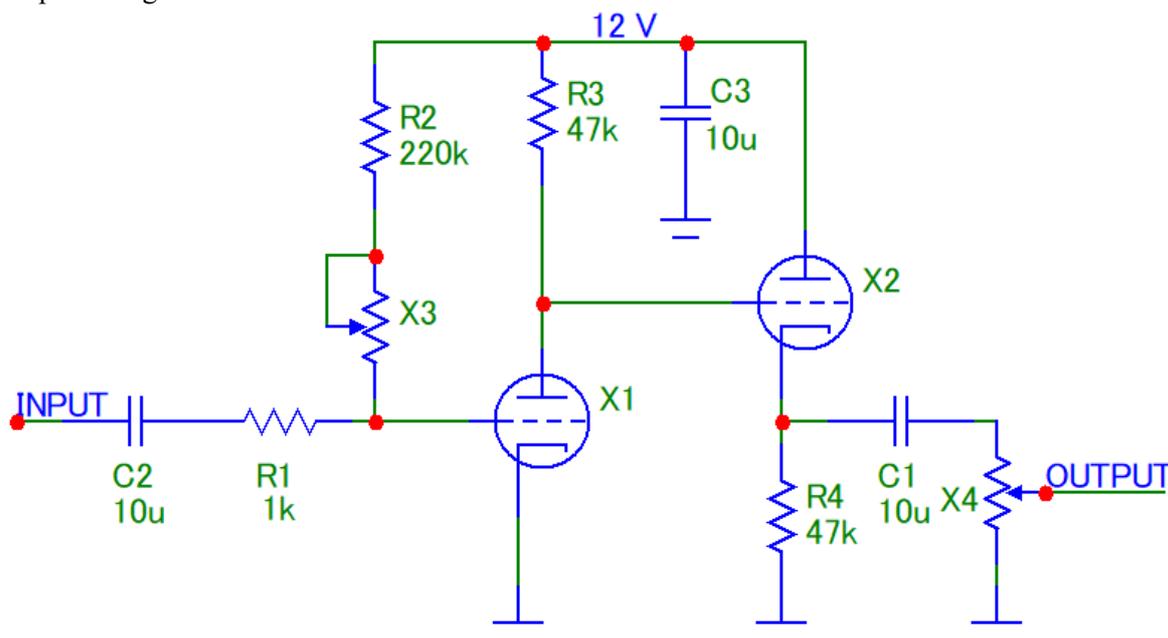


Figura 5-5: Circuito valvular.

En este caso, al igual que en el circuito del apartado 5.1, se dispone de un potenciómetro (X3) para poder ajustar el circuito para cualquier válvula.

Ahora se tiene por tanto un circuito plenamente valvular en el que, las tensiones en las rejillas no suponen problemas al estar fijadas. En este último circuito sería necesario ajustar la impedancia de salida ya que tras el potenciómetro X4, ésta es muy alta.

6 CONCLUSIONES

De este proyecto se extrae la importancia de diferenciar la práctica y la teoría. En la electrónica, es de sobra conocido que, un circuito se va a comportar diferente a toda simulación y análisis que se haga. Con los experimentos realizados durante el proyecto, se ha comprobado que, en el caso de las válvulas, este hecho se refleja en mayor manera. Es increíble la diferencia entre el comportamiento en la primera simulación que se hizo y el del primer ensayo. Esto hace al ingeniero ver que, no sólo puede nutrirse de programas y softwares, hay que sentarse en el laboratorio, encender toda la instrumentación, y comenzar a probar.

Además, se ha visto que, al trabajar con válvulas, es de vital importancia conocer cómo es la válvula con la que se va a trabajar, y, en cierta medida, no “confiar” en lo que el fabricante facilita, si no, en la medida de lo posible, medir el dispositivo experimentalmente y ver su comportamiento real, y no el esperado.

Como conclusión principal, podría decirse que el diseño de circuitos a válvulas en baja tensión puede resultar bastante tedioso y que, en cierto modo, no renta el trabajo realizado con el resultado final. Sin embargo, supone todo lo contrario. El hecho de ser capaces de trabajar con las válvulas a la tensión que se ha hecho, amplía muchísimo el uso de este dispositivo. En el ámbito musical, este tipo de diseños podría implementarse en pedales de efectos, pequeños preamplificadores, ecualizadores, compresores... Unidades las cuales son independientes y que pueden no disponer de una alta tensión, por lo que la realización de este proyecto abre nuevas puertas al diseño de circuitos con restricciones como la baja tensión.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Merlin Blencowe, Designing Tube Preamps for Guitar and Bass [Libro].
- [2] Merlin Blencowe, Triodes at low voltage [Artículo].
- [3] Eric Nolan Sporer, Low Voltage Vacuum Tube Pre-amplifier for Guitar [Tesis].
- [4] Sergio Búrdalo Hernández, Design and construction of vacuum tubes amplifier for electric guitar [TFM].
- [5] <http://www.valvewizard.co.uk/>
- [6] https://es.wikipedia.org/wiki/Amplificador_de_guitarra

ANEXO A: INSTRUMENTACIÓN

A.1 Fuente de alimentación

Se ha requerido de dos fuentes de alimentación para el Proyecto: la general de 50 V para el circuito y otra de 6.3 V para calentar las válvulas. El modelo utilizado para ambas fuentes es el TP-2303 de la marca Twintex.



Figura A-1. Fuente de alimentación Twintex TP-2303.

En la configuración independiente, la fuente está limitada a 30 V, por lo que se configura en serie para poder alcanzar los 50 V. La fuente de tensión para las válvulas se deja de manera independiente, girando la perilla de “voltage” hasta que alcanzar los 6.3 V.

A.2 Generador de ondas

Para el testeo del circuito, se ha utilizado una señal senoidal. Para generarla, se ha utilizado uno de los generadores disponibles en los laboratorios del departamento, el TTI TG315. Ofrece un rango de hasta 3 Megahercios. Las botoneritas para la selección de frecuencias resultan útiles para la elaboración de los diagramas de Bode, pudiendo variar la frecuencia de manera rápida.



Figura A-2: Generador de ondas TTI TG315.

A.3 Osciloscopio

Se ha utilizado el modelo **TBS1102B-EDU** de la marca **Tektronix**. Ofrece medición en dos canales y con un amplio rango de tensión y tiempo, el cual se ha ajustado perfectamente a las condiciones del proyecto. Su opción de FFT ha permitido calcular muy rápidamente la respuesta en frecuencia y ver de manera gráfica la presencia de los armónicos del circuito.



Figura A-3: Osciloscopio Tektronix TBS1102B-EDU.

Además, su puerto USB ha facilitado la captura de imágenes. Ha permitido obtener mucha mayor calidad y limpieza de los datos y gráficas.

A.4 Multímetro digital

Las medidas del tipo tensión DC y resistencias se han hecho con el multímetro digital **TTI 1604**.



Figura A-4: Multímetro TTI 1604.

A.5 Trazador de curvas

El conocer las curvas reales de las válvulas utilizadas ha sido un factor crucial en el desarrollo del proyecto. El hecho de haber podido conocer el comportamiento a baja tensión ha sido el que ha permitido que se pudiera mejorar el diseño inicial hasta conseguir que funcionara correctamente.

Esta labor se ha llevado a cabo mediante el **Hameg Curve Tracer HM6042**.

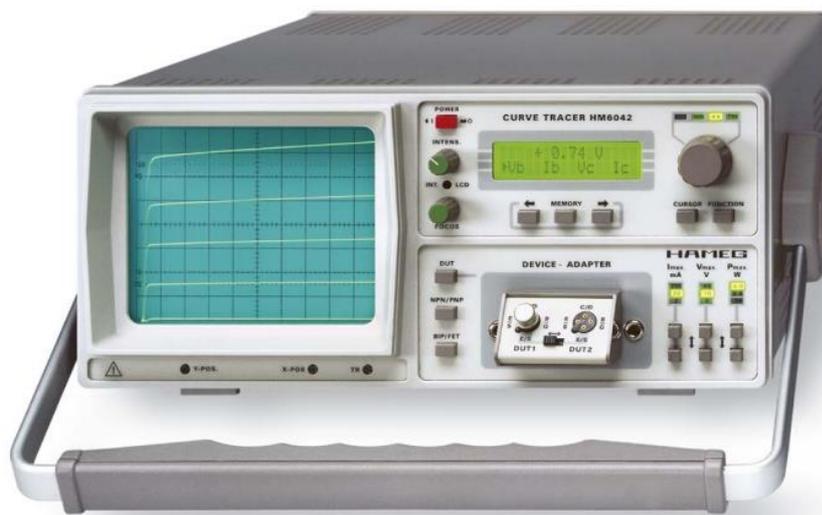


Figura A-5: Trazador de curvas Hameg HM6042.

Sin embargo, este utensilio está principalmente pensado para transistores, por lo que ha sido necesario otro aparato externo para poder acoplar las válvulas. Esto se ha hecho gracias al profesor D. Francisco Pérez Ridao, aportando un instrumento fabricado por él, el cual permite colocar las válvulas (pentodos y/o triodos) en unos zócalos. Mediante conmutadores se puede elegir si medir los pentodos o las válvulas de triodos (en este caso solo se ha utilizado la segunda opción) y además seleccionar entre los dos triodos de la válvula. Este sistema, está hecho de tal manera que, conectando debidamente sus salidas a las entradas del trazador de curvas, se puede utilizar el trazador con las válvulas de igual manera que si fueran transistores.



Figura A-6: Medidor de válvulas (D. Francisco Pérez).

ANEXO B: DATASHEETS

Por lo general, las válvulas 12AX7 (utilizadas en este proyecto), independientemente del fabricante, tienen el mismo comportamiento, por lo que se ha utilizado un datasheet genérico.



12AX7 TWIN TRIODE

12AX7
ET-T509B
Page 1
6-53

DESCRIPTION AND RATING

The 12AX7 is a miniature high-mu twin triode each section of which has an individual cathode connection. The 12AX7 is especially suited for use in resistance-coupled voltage amplifiers, phase inverters, multivibrators, and numerous industrial-control circuits where high voltage gain is desired. A center-tapped heater permits operation of the tube from either a 6.3-volt or a 12.6-volt heater supply.

GENERAL

Cathode—Coated Unipotential

	Series	Parallel
Heater Voltage, AC or DC.....	12.6	6.3 Volts
Heater Current.....	0.15	0.3 Amperes
Envelope—T-6½, Glass		
Base—E9-1, Small Button 9-Pin		
Mounting Position—Any		

Direct Interelectrode Capacitances

	With Shield*	Without Shield
Grid to Plate, Each Section.....	1.7	1.7 μmf
Input, Each Section.....	1.8	1.6 μmf
Output, Section 1.....	1.9	0.46 μmf
Output, Section 2.....	1.9	0.34 μmf

MAXIMUM RATINGS

DESIGN-CENTER VALUES, EACH SECTION

Plate Voltage.....	300 Volts
Positive DC Grid Voltage.....	0 Volts
Negative DC Grid Voltage.....	50 Volts
Plate Dissipation.....	1.0 Watts
Heater-Cathode Voltage	
Heater Positive with Respect to Cathode.....	180 Volts
Heater Negative with Respect to Cathode.....	180 Volts

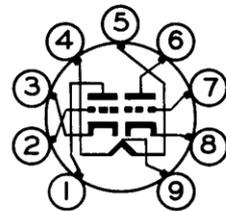
CHARACTERISTICS AND TYPICAL OPERATION

CLASS A₁ AMPLIFIER, EACH SECTION

Plate Voltage.....	100	250 Volts
Grid Voltage.....	-1	-2 Volts
Amplification Factor.....	100	100
Plate Resistance, approximate.....	80000	62500 Ohms
Transconductance.....	1250	1600 Micromhos
Plate Current.....	0.5	1.2 Milliamperes

* With external shield (RETMA 315) connected to cathode of section under test.

BASING DIAGRAM

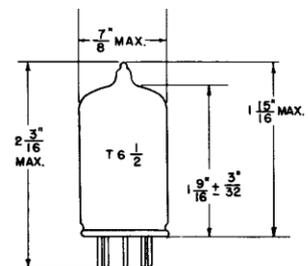


RETMA 9A
BOTTOM VIEW

TERMINAL CONNECTIONS

- Pin 1—Plate (Section 2)
- Pin 2—Grid (Section 2)
- Pin 3—Cathode (Section 2)
- Pin 4—Heater
- Pin 5—Heater
- Pin 6—Plate (Section 1)
- Pin 7—Grid (Section 1)
- Pin 8—Cathode (Section 1)
- Pin 9—Heater Center-Tap

PHYSICAL DIMENSIONS



RETMA 6-2



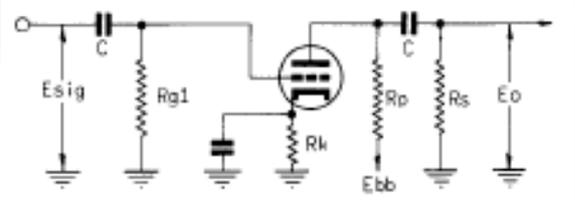
Supersedes ET-T509A dated 2-51

12AX7
ET-T509B
 Page 2
 6-53

CLASS A RESISTANCE-COUPLED AMPLIFIER

EACH SECTION

Rp Meg.	Rg Meg.	Rg1 Meg.	Ebb = 90 Volts			Ebb = 180 Volts			Ebb = 300 Volts		
			Rk	Gain	Eo	Rk	Gain	Eo	Rk	Gain	Eo
0.10	0.10	0.1	1700	31	5.0	1000	40	15	760	43	30
0.10	0.24	0.1	2000	38	6.9	1100	46	20	900	50	40
0.24	0.24	0.1	3500	43	6.5	2000	54	18	1600	58	37
0.24	0.51	0.1	3900	49	8.6	2300	59	24	1800	64	47
0.51	0.51	0.1	7100	50	7.4	4300	62	19	3100	66	39
0.51	1.0	0.1	7800	53	9.1	4800	64	24	3600	69	46
0.24	0.24	10	0	37	3.9	0	53	15	0	62	32
0.24	0.51	10	0	44	5.4	0	60	19	0	87	41
0.51	0.51	10	0	44	5.0	0	61	17	0	69	35
0.51	1.0	10	0	49	6.4	0	66	21	0	71	41

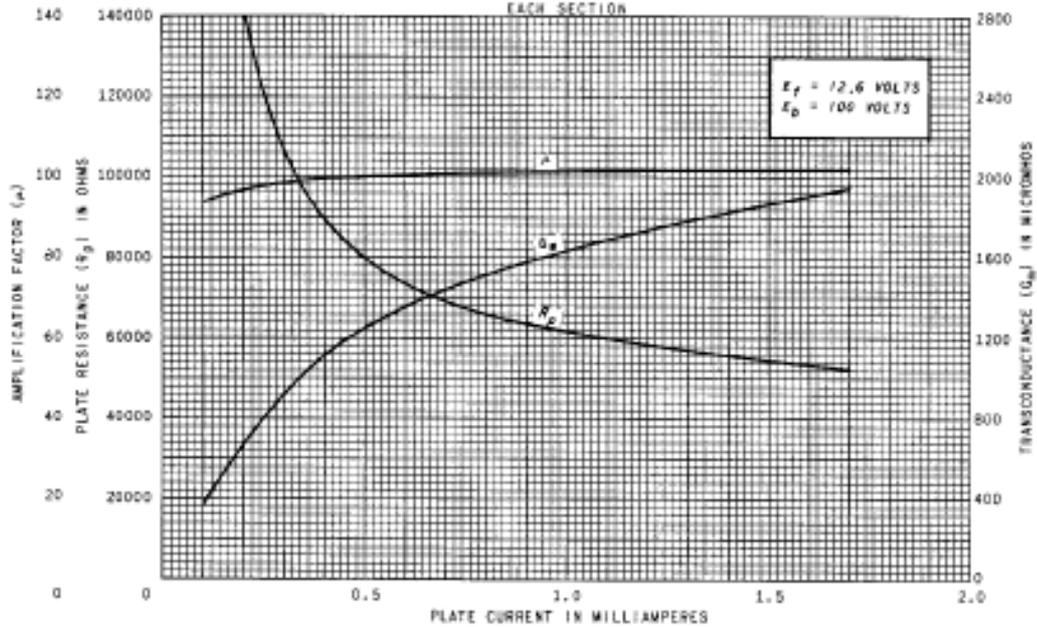


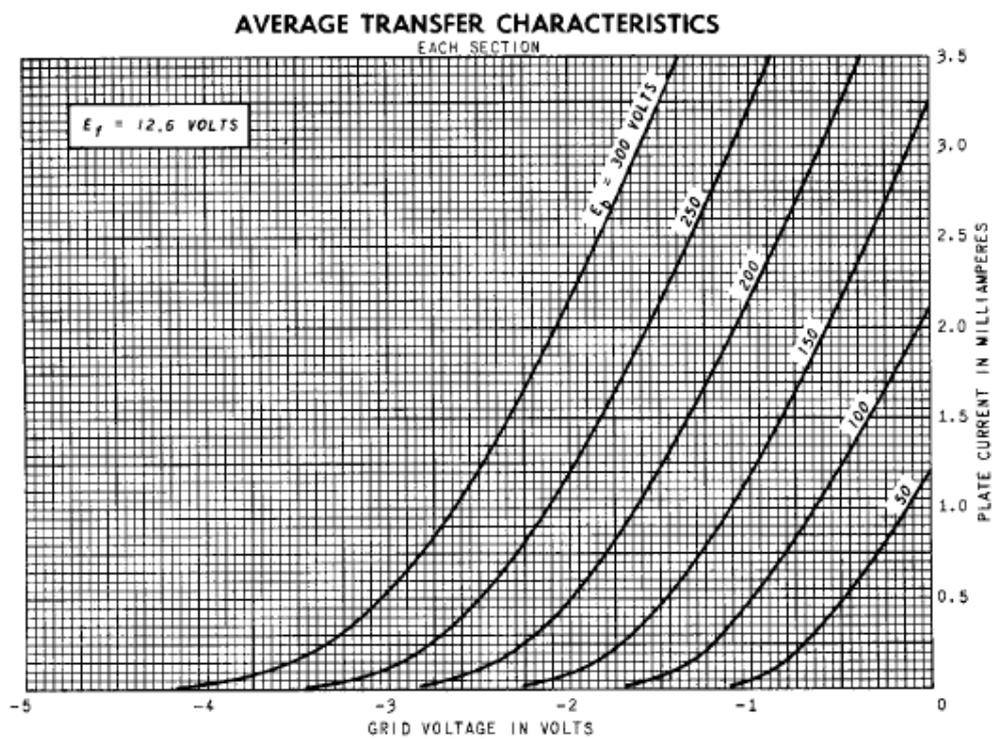
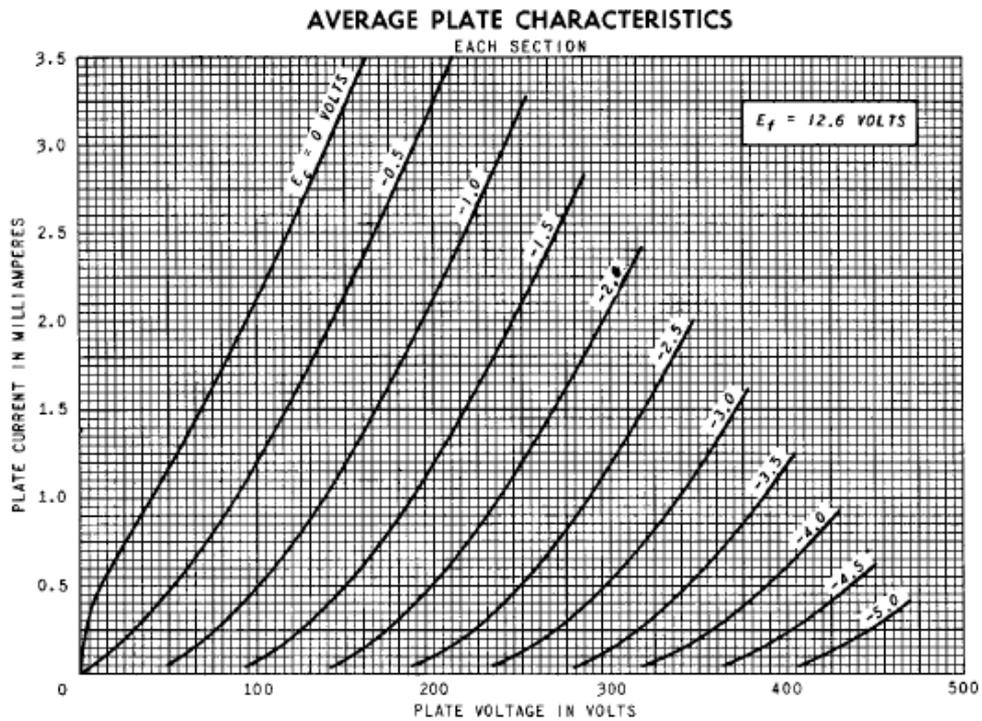
Note: Coupling capacitors (C) should be selected to give desired frequency response. Rk should be adequately by-passed.

Notes: 1. Eo is maximum RMS voltage output for five percent (5%) total harmonic distortion. 2. Gain measured at 2.0 volts RMS output. 3. For zero-bias data, generator impedance is negligible.

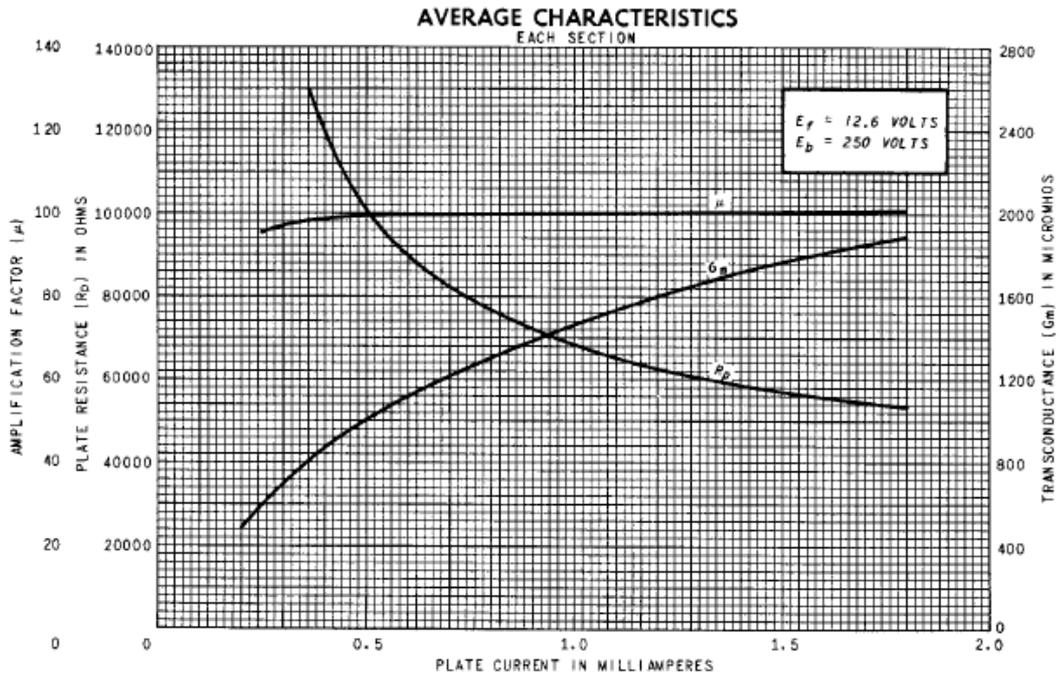
AVERAGE CHARACTERISTICS

EACH SECTION





12AX7
ET-T509B
 Page 4
 6-53



TUBE DEPARTMENT
GENERAL  ELECTRIC
 Schenectady 5, N. Y.

ANEXO C: POLARIZACIÓN POR CÁTODO

El método de polarización por cátodo es uno de los más comunes de encontrar tanto en el mundo del audio de alta fidelidad como en la amplificación de instrumentos. Consiste en hacer la tensión del cátodo positiva, manteniendo la de la rejilla a 0 V. Cuando se habla de V_{gk} , no importa la tensión en estos dos ánodos, lo importante es la diferencia entre ellos.

Al poner una resistencia en serie con el cátodo, hay una caída de tensión debido a la corriente de la válvula. Así aumenta el voltaje del cátodo, haciendo V_{gk} negativo, proporcionando un punto de operación.

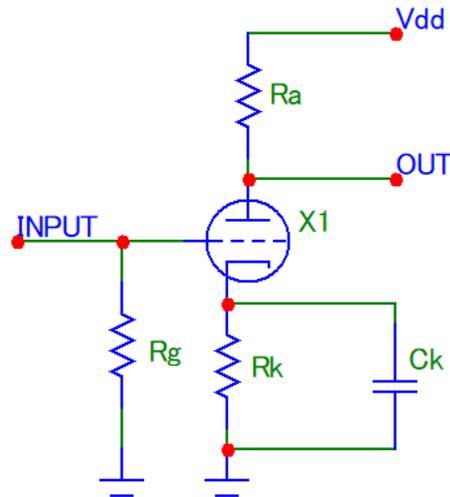


Figura C-1: Polarización por cátodo.

Este tipo de polarización suele llamarse también autobias, ya que, si aumenta la corriente en la válvula, también lo hace la tensión del cátodo, y por tanto también la tensión del punto de operación. Esto contrarresta la subida de corriente. Esto hace también que el diseño sea más inmune al envejecimiento de las válvulas y a los diferentes cambios en el circuito.

Añadiendo un condensador en paralelo se puede controlar la ganancia y la respuesta en frecuencia.

