

ANÁLISIS COMPARATIVO DE VÁLVULAS Y TRANSISTORES EN PREAMPLIFICADORES DE AUDIOFRECUENCIAS

NICOLAS A. MASERA¹, JUAN I. MORALES¹ Y ANA M. MORENO¹

¹Estudiante de Ingeniería Electrónica. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (UTN. FRC.) Maestro López esq. Cruz Roja Argentina, CP X5016ZAA, Córdoba, Argentina
seat_peugeot@hotmail.com, morales.juan.ignacio@gmail.com,
anamariamoreno88@gmail.com

Resumen – Durante muchos años, músicos y personas afines a la música han expresado su preferencia con respecto a preamplificadores realizados con válvulas termoiónicas, argumentando “calidad de sonido” en desmedro de los equipos basados en tecnología de estado sólido. En el presente trabajo se realiza un análisis teórico y una simulación que permita explicar esta predilección. Se elabora una comparación centrada en el comportamiento de los dispositivos semiconductores BJT y las válvulas triodo en un circuito preamplificador clase A, analizando la distorsión armónica presente en la señal de salida y su efecto en el oyente. Finalmente se diseña y simula en un entorno de laboratorio virtual una etapa preamplificadora basada en cada dispositivo y se analizan los resultados según lo expuesto.

1. INTRODUCCIÓN

Las ventajas y desventajas de cada dispositivo dependen de los requerimientos del circuito y las diversas condiciones de operación. Éstas son las que deben regir la elección para una aplicación particular. En el área de audio musical es común escuchar las preferencias sobre un preamplificador valvular en lugar de uno transistorizado. Sin embargo, esta elección pareciera basarse en una cuestión subjetiva por parte de los músicos.

En este trabajo, se realiza un estudio comparativo de ambos dispositivos con motivo de intentar identificar cuáles son las características técnicas u operacionales, es decir, cuales son las particularidades que presentan en los circuitos y llevan a que sean utilizados en preamplificadores de audio. Además se lleva a cabo el diseño de una etapa preamplificadora para cada dispositivo, con el objeto de hacer un análisis del desempeño de los mismos bajo distintas condiciones.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES

Las válvulas fueron los primeros dispositivos electrónicos activos utilizados hasta la aparición de los transistores BJT, debido al menor tamaño (y peso), menor temperatura de funcionamiento y la capacidad de desempeñar las mismas funciones que las primeras. Sin embargo, no han sido reemplazadas en su totalidad en lo que respecta a audio de altas prestaciones, algo que podría suponerse ya que desde el punto de vista de los fabricantes los transistores son la mejor opción.

Haciendo una comparación general de ambos dispositivos, válvula triodo y transistor bipolar, sin tener en cuenta las dimensiones físicas:

- La válvula presenta una menor ganancia con respecto al transistor.

- La impedancia de entrada de la válvula es más alta y presenta una capacidad de entrada menor que la del transistor.
- Los transistores son dispositivos controlados por corriente mientras que las válvulas son controladas por tensión.

3. DISTORSIÓN

No existe una diferencia significativa entre válvulas y transistores cuando hablamos de respuesta en frecuencia y ruidos. Sin embargo, si sobrecargamos la señal de entrada del amplificador la distorsión de la señal de salida es diferente en un caso y en el otro.

La distorsión en una señal consiste en la deformación de la misma a causa de una transferencia no lineal, produciendo efectos que son claramente audibles. En un dispositivo pueden producirse dos tipos de distorsión: la distorsión armónica y la distorsión por intermodulación. Algunas de estas distorsiones suelen ser agradables al oído humano, el cual es interpretado como el agregado de brillo al timbre de la señal de audio, por lo que son muy demandadas [1].

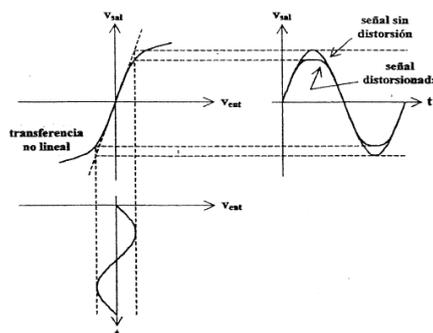


Figura 1: Distorsión en un amplificador [1].

En la Figura 1, se observa que producto de la transferencia no lineal que presentan los amplificadores cuando una entrada senoidal se deforma, causando distorsión a la salida. En la gráfica de salida se compara la señal distorsionada con la señal no distorsionada [1].

Un hecho interesante es que la distorsión que introducen las válvulas es más favorable que la producida por los transistores, razón por la cual existen muchos amplificadores valvulares [1].

3.1. Distorsión por amplitud.

Todos los sistemas reales tienen no linealidades y por ello todos producen distorsión armónica.

Dos factores que pueden producir distorsión armónica en una señal aplicada a una etapa amplificadora valvular son: la tensión de polarización de control de la grilla y la amplitud de la señal de entrada aplicada. En la Figura 2 podemos observar que para evitar deformaciones de la señal de entrada debemos hacer una correcta elección de la tensión de grilla [2].

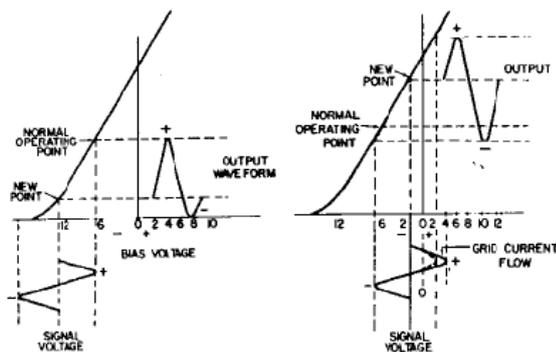


Figura 2: Distorsión debido a la polarización de la tensión de grilla.

Como se indica en la Figura 3, la distorsión armónica también puede producirse aún disponiendo de una correcta polarización, cuando el voltaje de la señal aplicada es lo suficientemente grande como para llevar la tensión de grilla a las áreas de corte y saturación. En la región de saturación, el pico de la señal de salida es aplanada (overdrive). En la región negativa, el flujo de corriente se reduce cerca del valor de corte [2].

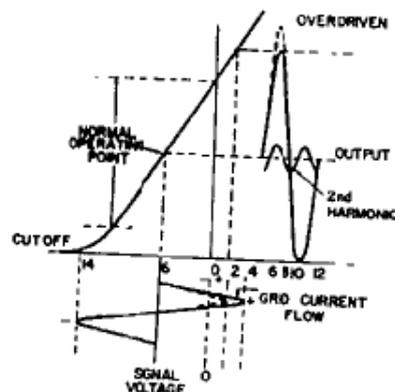


Figura 3: Distorsión debido a la saturación de la entrada.

3.2. Significado de los armónicos en la música

La determinación de cómo están relacionados los armónicos con la audición entra en un paralelismo entre la distorsión electrónica y la coloración del tono musical. Sin duda alguna, el mejor conocedor sobre esta situación en particular sea un artesano de la música. A través de los años, estos artesanos han determinado cómo se relacionan los diferentes armónicos a la coloración, constituyendo la calidad tonal de un instrumento [2].

La característica tonal principal de un instrumento se determina por la intensidad de los primeros armónicos. Cada uno de estos armónicos produce su propio efecto característico cuando es dominante o se puede modificar el mismo cuando otra armónica tiene una amplitud importante. Podemos dividir a los primeros armónicos en dos grupos tonales. Los armónicos pares (segundo, cuarto y sexto) que crean una sensación de mayor vivacidad y el segundo grupo los armónicos impares (tercero y quinto) que tienden a lo contrario. El segundo armónico crea una sensación de mayor sonoridad. El tercero tiende a debilitar el sonido, una combinación del segundo y el tercero tiende a anular los efectos del tercero y refuerza el sonido [2].

La segunda y tercera armónicas son las más importantes desde el punto de vista gráfico de la distorsión electrónica, como se verá más adelante. Musicalmente la segunda armónica se encuentra una octava por encima de la fundamental y es casi inaudible, sin embargo, le da cuerpo al sonido.

3.3. Válvulas vs. Transistores

- Características de la Válvula

En la Figura 4 se muestra la distorsión armónica de un amplificador de dos etapas 12AY7. La principal característica es el predominio de la segunda armónica, seguido muy de cerca por la tercera armónica. La cuarta armónica se eleva 3 o 4 dB más tarde, siguiendo en forma paralela a la tercera armónica. La quinta, sexta y séptima armónica permanecen por debajo del 5% del punto de 12 dB.

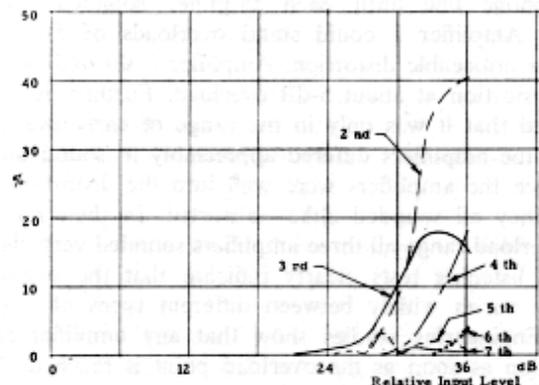


Figura 4: Componentes de la distorsión de un típico amplificador de dos etapas 12AY7

La Figura 5 exhibe la forma de onda de la señal de salida con una sobrecarga de 12 dB. Se observa

que el recorte es asimétrico. Esta es una característica de cualquier tipo de amplificador con válvulas.

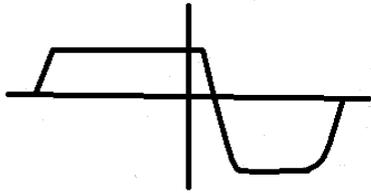


Figura 5: Forma de onda del amplificador valvular con sobrecarga de 12 dB y un tono de 1000 Hz.

- Características del Transistor Bipolar

La Figura 6 presenta la distorsión armónica de un amplificador a transistores. Lo que más sobresale es la componente de tercera armónica. Todas las otras armónicas están presentes, pero con una amplitud mucho menor que la tercera.

Cuando la sobrecarga llega a un determinado punto, las armónicas más altas aumentan de forma simultánea.



Figura 6: Componentes de la distorsión de amplificador a transistores

La forma de onda obtenida a la salida de este amplificador será simétrica y aproximadamente cuadrada, como muestra la Figura 7.

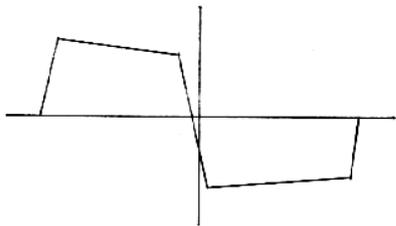


Figura 7: Forma de onda del amplificador a transistores con sobrecarga de 12 dB y un tono de 1000 Hz

4. DISEÑO Y SIMULACIÓN

Para verificar algunas de las características enunciadas a lo largo del texto, se procede a diseñar dos etapas amplificadoras: una cuyo componente activo es una válvula de vacío, y otra realizada en base a un transistor bipolar. Ambas tendrán una ganancia de tensión de 60 veces (35,5dB) en un ancho de banda 15 Hz a 50000 Hz (+/-1dB).

4.1. Etapa preamplificadora valvular

La válvula seleccionada para el diseño de esta etapa fue el doble triodo 12AX7, de General Electric, utilizando una sola sección en cátodo común. De acuerdo a la hoja de datos del fabricante [3], se eligen las siguientes condiciones:

- Tensión de alimentación $E_{bb}=300V$
- Punto de trabajo: $I_b=1.5mA$, $V_p=150V$
- Resistencia de grilla $R_g=100K\Omega$

Se ingresa en la curva característica de ánodo con el punto de funcionamiento estático y se obtiene el potencial de rejilla $V_g = -0.8V$.

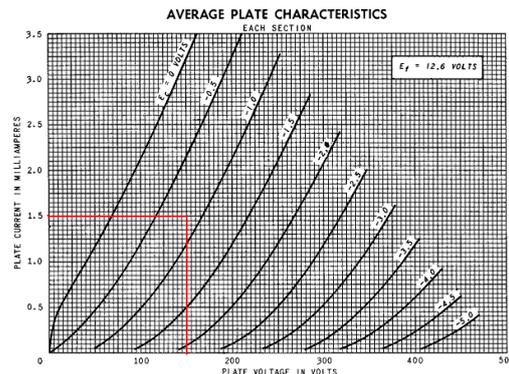


Figura 8: Curva característica de ánodo de la válvula 12AX7 de GE.

Con este valor es posible calcular la resistencia de cátodo R_K :

$$R_K = \frac{-V_g}{I_p} = \frac{0.8V}{1.5mA} = 533.3 \approx 560\Omega \quad (1)$$

Solo resta calcular la resistencia de ánodo R_p para finalizar la polarización del dispositivo. Analizando la malla de salida y despejando:

$$E_{bb} = V_p + I_p(560\Omega + R_p) \quad (2)$$

$$R_p = \frac{E_{bb} - V_p}{I_p} - 560\Omega = 99.44\Omega \approx 100K\Omega \quad (3)$$

Analizando el modelo incremental lineal de una válvula polarizada en cátodo común [4] se puede calcular la resistencia de carga R_L para la ganancia dada.

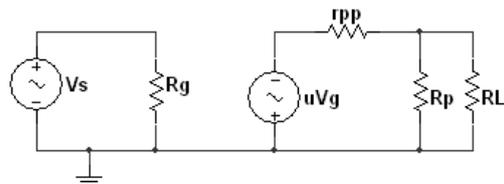


Figura 9. Circuito equivalente en CA del amplificador cátodo común.

La ganancia de tensión de este circuito es:

$$A_V = \frac{e_o}{e_s} = \frac{-\mu}{r_p + R_p // R_L} R_p // R_L \quad (4)$$

Despejando el valor del paralelo $R_p // R_L$:

$$R_p // R_L = \frac{-A_V r_p}{\mu \left(1 - \frac{A_V}{\mu}\right)} \quad (5)$$

Para resolver la ecuación es necesario conocer los parámetros incrementales del triodo para el punto de trabajo dado. Ingresando el mismo en la curva especificada se obtiene una resistencia incremental de placa $r_p=57K\Omega$ y un factor de amplificación $\mu=100$.

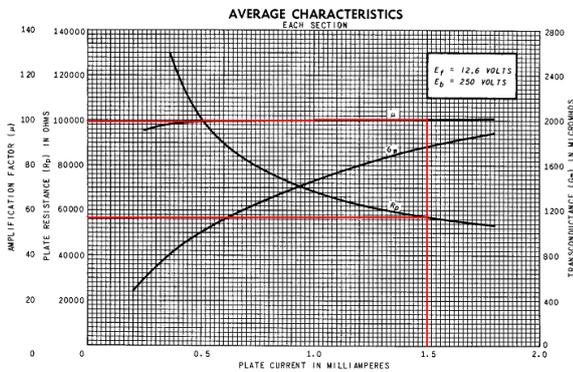


Figura 10: Curva de parámetros incrementales de la válvula 12AX7 de GE.

Reemplazando en (5), el valor del paralelo resulta $R_p // R_L=85.5K\Omega$. Se despeja R_L :

$$R_L = \frac{85.5K\Omega}{1 - \frac{85.5K\Omega}{R_p}} = 589.6K\Omega \approx 560K\Omega \quad (6)$$

La frecuencia de corte inferior está dada por el valor del capacitor de cátodo y la resistencia equivalente a sus extremos [5].

$$\begin{aligned} R_{eq} &= R_E // (r_p + R_p // R_L) \\ R_{eq} &= 560\Omega // (57K\Omega + 100K\Omega // 560K\Omega) \quad (7) \\ R_{eq} &= 558\Omega \end{aligned}$$

$$C_K = \frac{1}{2\pi f_L R_{eq}} = 19\mu F \approx 22\mu F \quad (8)$$

Para los capacitores de acople C_i y C_o se utiliza el mismo razonamiento, con la diferencia que se toma f_L una década menor.

$$C_o = \frac{1}{2\pi f_L R_{eq}} = 177.9nF \approx 180nF \quad (9)$$

$$C_i = \frac{1}{2\pi f_L R_{eq}} = 1\mu F \quad (10)$$

El circuito final se muestra en la Figura 11.

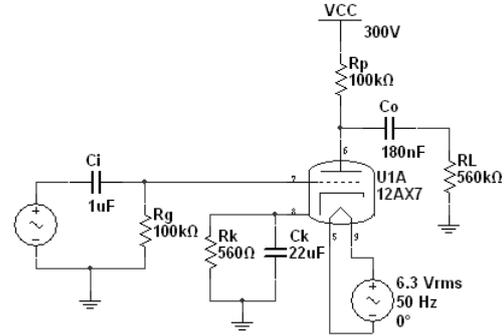


Figura 11: Esquemático preamplificador valvular.

4.2. Etapa preamplificadora transistorizada

Para el diseño de esta etapa fue seleccionado el transistor BC548A, de Motorola, utilizado como amplificador en emisor común. De acuerdo a la hoja de datos del fabricante [6], se eligen las siguientes condiciones:

- Tensión de alimentación $V_{CC}=12V$
- Punto de trabajo: $I_{CQ}=2mA$, $V_{CEQ}=5V$
- Resistencia de emisor $R_E=470\Omega$
- $\beta=hfe=160$

Planteando la ecuación de la malla de salida se obtiene R_C :

$$V_{cc} = V_{ceq} + I_{cq}(R_C + R_E) \quad (11)$$

$$R_C = \frac{V_{cc} - V_{ceq}}{I_{cq}} - R_E = 3030\Omega \approx 3K\Omega \quad (12)$$

Luego se fija R_b y despejan las resistencias de polarización de base:

$$R_b = \frac{\beta R_E}{10} = 7520\Omega \quad (13)$$

$$V_{bb} = I_{cq}\left(\frac{R_b}{\beta} + R_E\right) + 0,65V = 1.68V \quad (14)$$

$$R_1 = \frac{R_b}{1 - \frac{V_{bb}}{V_{cc}}} = 8.74K\Omega \approx 9.1K\Omega \quad (15)$$

$$R_2 = \frac{V_{cc}}{V_{bb}} R_b = 53.6K\Omega \approx 56K\Omega \quad (16)$$

El último paso es establecer el valor de la resistencia de carga R_L para la ganancia dada y seleccionar el valor de los capacitores. Para ello se plantea el circuito equivalente de CA del amplificador emisor común.

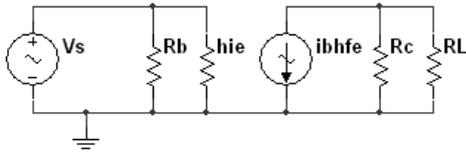


Figura 12. Circuito equivalente en CA del amplificador emisor común.

La ganancia de tensión de este circuito es:

$$A_V = \frac{e_o}{e_s} = -\frac{hfe}{hie} R_C // R_L \quad (17)$$

Despejando el valor del paralelo $R_C // R_L$:

$$R_C // R_L = \frac{A_V hie}{hfe} = \frac{60 * 2000}{160} = 750 \Omega \quad (18)$$

$$R_L = \frac{750 \Omega}{1 - \frac{750 \Omega}{R_C}} = 1 K \Omega \quad (19)$$

El valor del capacitor de desacople de emisor se relaciona con la frecuencia de corte inferior por:

$$C_E = \frac{1}{2\pi f_L R_{eq}} = 373 \mu F \approx 470 \mu F \quad (20)$$

Para los capacitores de acople C_i y C_o se utiliza el mismo razonamiento, con f_L una década menor.

$$C_o = \frac{1}{2\pi f_L R_{eq}} = 26.5 \mu F \approx 33 \mu F \quad (21)$$

$$C_i = \frac{1}{2\pi f_L R_{eq}} = 67 \mu F \approx 100 \mu F \quad (22)$$

El circuito final se muestra en la Figura 13.

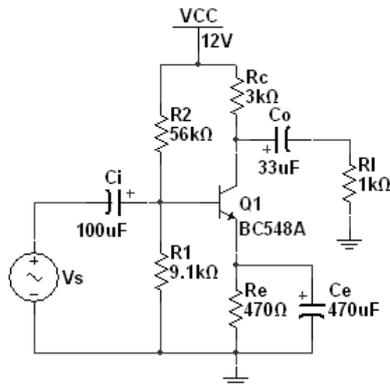


Figura 13: Esquemático preamplificador transistorizado.

5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Las simulaciones fueron realizadas en el laboratorio virtual Multisim 10.0 de la firma National Instruments, utilizando los instrumentos Bode Plotter (medición de respuesta en frecuencia), Distortion Analyzer (medición de THD) y Spectrum Analyzer (medición del espectro).

5.1. Respuesta en frecuencia

Tanto en el preamplificador valvular como en el transistorizado la respuesta en frecuencia es totalmente plana para el ancho de banda propuesto y con la ganancia calculada. En la práctica es posible adicionar un filtro pasa altos para elegir la frecuencia de corte superior, ya que en el diseño propuesto está dada por las capacidades intrínsecas de los elementos activos y se ubica en frecuencias del orden de varios MHz, pudiendo ocasionar problemas como interferencias de RF, etc.

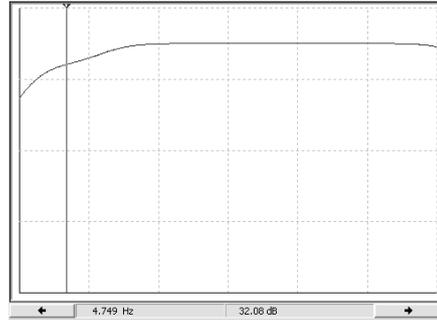


Figura 14: Respuesta en frecuencia preamplificador valvular, $f_L = 4,75$ Hz, $A_V = 35,01$ dB.

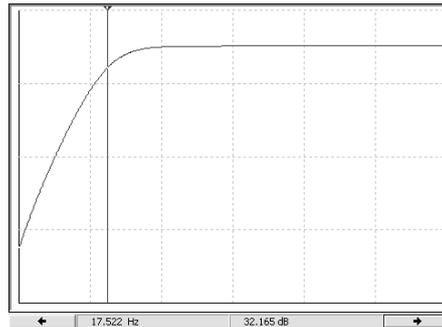


Figura 15: Respuesta en frecuencia preamplificador transistorizado, $f_L = 17,52$ Hz, $A_V = 35,10$ dB.

5.2. Distorsión armónica

Para realizar la comparación entre ambos circuitos se aplicó una señal de 1KHz a la entrada de tal manera que se pueda analizar la distorsión presente a la salida para pequeña señal y para gran señal (-70dBm y -10dBm de nivel de salida, respectivamente).

Para una potencia de salida de -70dBm, ambos preamplificadores se comportan de forma casi ideal con niveles muy bajos de distorsión armónica total.

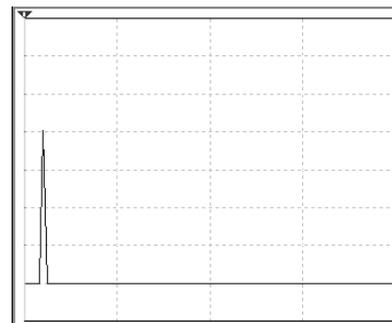


Figura 16: Espectro de frecuencia preamplificador valvular, THD = 0,001 %.

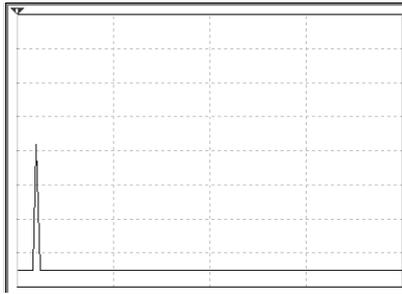


Figura 17: Espectro de frecuencia preamplificador transistorizado, THD = 0,005 %.

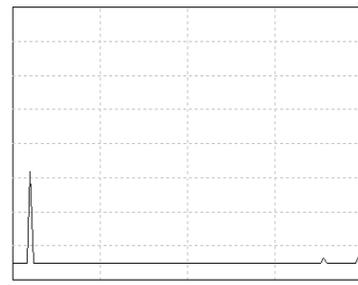


Figura 19: Espectro de frecuencia preamplificador transistorizado.

Para una potencia de salida de -10dBm, la situación es muy distinta. En el circuito valvular, la forma de onda prácticamente no se ha deformado. Sin embargo, el análisis espectral expone las componentes armónicas presentes. La segunda armónica aparece con un nivel 45 dB por debajo de la fundamental, y 45 dB por encima de la tercera armónica.

En el preamplificador valvular, se encontró una amplia gama de productos de intermodulación en el ancho de banda estudiado, aunque sus valores eran relativamente poco importantes. La distorsión medida fue de 0,2%, 19 kHz/20 kHz, 1:1.

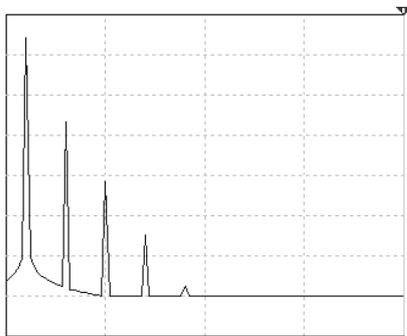


Figura 18: Espectro de frecuencia preamplificador valvular, THD = 0,238 %.

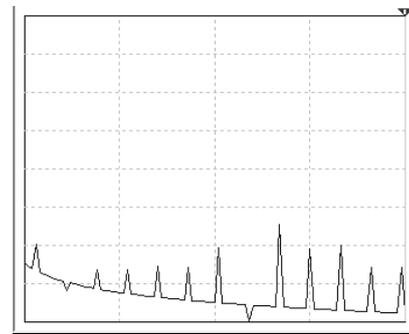


Figura 20: Espectro de frecuencia preamplificador valvular.

Por otro lado, en el circuito a transistor la segunda armónica aparece con un nivel sólo 20dB por debajo de la fundamental, y la tercera y cuarta armónica también están separadas por 20dB.

6. CONCLUSIONES

Todo amplificador produce una distorsión de la señal original cuando es transferida de la entrada hacia la salida. El grado de distorsión que se origina en una etapa preamplificadora compuesta por válvulas es menor que el producido con una etapa a transistores, ambas polarizadas adecuadamente. Sin embargo, este valor no es lo que se juzga cuando los músicos expresan que un equipo tiene “mayor coloración”. Podemos concluir, frente a la ausencia de una fundamentación teórica contundente, que la característica deseada está dada por la combinación de armónicos, y al ser dicha sensación una cuestión subjetiva es difícil establecer algún parámetro al respecto.

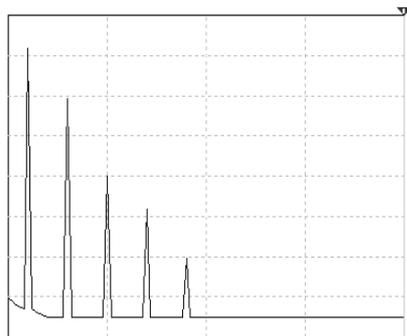


Figura 19: Espectro de frecuencia preamplificador transistorizado, THD = 5,513 %.

La inclinación hacia la tecnología valvular tiene aquí su razón principal producto de la generación de armónicos, pares e impares, con mayor predominio de los pares, y ésta es la característica objetiva sobre dicha preferencia. Psicoacústicamente, es interpretada por cada persona en particular.

5.3. Distorsión por intermodulación

Esta prueba se realizó empleando el método CCIF [7], inyectando como señales de prueba dos tonos sinusoidales de 19 kHz y 20 kHz, cuya amplitud sea tal que la potencia a la salida de la etapa amplificadora sea de -35 dBm.

Es importante agregar que el trabajo fue centrado en las características de etapas preamplificadoras. En los circuitos amplificadores completos estas características se ven alteradas (reforzadas o modificadas) por otros factores, tales como el acoplamiento de etapas en cascada, el efecto de la realimentación entre las mismas, el uso de transformadores adaptadores de impedancias, etc. que necesitarían un informe de mayor extensión para ser analizados.

En el preamplificador transistorizado, se encontró el producto de intermodulación f_2-f_1 . La distorsión medida fue 4,5 %, 19 kHz / 20 kHz, 1:1.

7. REFERENCIAS

- [1] Miyara F. “*Acústica y Sistemas de Sonido*”. UNR Editora. Argentina. 2004.
- [2] Hamm R. “*Tubes versus Transistors – Is There an Audible Difference?*”. Proceeding of 43th Convention of Audio Engineering Society, New York, 14 September 1972.
- [3] Hawkings J. N. A. “*Harmonic and Intermodulation Distortion*”. 1988
- [4] General Electric “*12AX7 Twin Triode, Description and Rating*”
- [5] Angelo E. J. “*Circuitos Electrónicos*”. Ediciones del Castillo. Madrid. 1965.
- [6] Malvino A.P. “*Principios de Electrónica*”. Interamericana de España. Madrid. 2000.
- [7] Motorola. “*Amplifier Transistors BC548, NPN Silicon*”.
- [8] Bohn D. “*Audio Specifications*”, Application Note N° 145. Rane Corporation. 2000.

8. DATOS BIOGRÁFICOS

Nicolas A. Masera, nacido en Villa del Rosario, Provincia de Córdoba, el 20/01/1988. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Argentina. Sus intereses son: microcontroladores, electrónica del automotor y sistemas de audio.

E-mail: 51644@electrónica.frc.utn.edu.ar

Juan I. Morales, nacido en Chacabuco, Buenos Aires, el 12/07/1988. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Argentina. Actualmente es becario de servicios en el Laboratorio de Comunicaciones del Dpto. de Ingeniería Electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Sus intereses son: electroacústica, procesadores de audio y sistemas de sonido.

E-mail: 51836@electrónica.frc.utn.edu.ar

Ana M. Moreno, nacido en V. Ojo de Agua, Santiago del Estero, el 31/08/1988. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Argentina. Sus intereses son: electroacústica, bioelectrónica, electrónica digital.

E-mail: 51718@electrónica.frc.utn.edu.ar