

PRIMERAS JORNADAS REGIONALES DE ACÚSTICA AdAA 2009

19 y 20 de noviembre de 2009, Rosario, Argentina



AdAA2009-A048R

Medición y análisis de ruido eléctrico producido por las fuentes de alimentación en sistemas de Audio

Andrés Darío Piegari^(a)
Nelson Leonel Quinteros Salinas^(a)

(a) Estudiantes de Ingeniería de Sonido, Universidad Nacional de Tres de Febrero, Valentín Gomez 4752, Buenos Aires, Argentina.

Abstract

In the present paper the main sources of electric noise in audio systems are analyzed. They are primarily caused by leak and parasitic currents, found between the power supply and the ground system connections. In the first place a typical audio chain is set up, and an equivalent model of its power supply systems and ground connections is made. Subsequently, measures in the search of parasitic currents and capacities are made. Besides internal noise sources, the incidence of balanced and unbalanced transmission lines is also measured as regards the appearance of ground loops.

Resumen

En el presente trabajo se analizan las principales fuentes de ruido eléctrico en sistemas de audio. Las mismas son ocasionadas primordialmente por las corrientes parásitas y de fuga, presentes entre fuentes de alimentación y sistemas de conexiones a tierra. En primer lugar se configura una cadena típica de audio, y se confecciona un modelo equivalente de sus sistemas de alimentación y puestas a tierra. Posteriormente, se procede a las mediciones en busca de las corrientes y capacidades parásitas. Además de las fuentes internas, también se mide la incidencia de las líneas de transmisiones balanceadas y desbalanceadas en su contribución a la aparición de bucles de tierra.

1 Introducción

El ruido eléctrico puede definirse, en general, como aquella señal eléctrica no deseada presente sobre la señal que deseamos transmitir.

Dichas señales de ruido eléctrico, en ocasiones, suelen ser notorias de maneras muy sencillas, por ejemplo, imágenes borrosas o el efecto de “lluvia” en televisores; escuchar zumbidos en sistemas de audio en cines o inclusive escuchar emisoras de radio mientras se habla por teléfono. Tal vez por costumbre o por desinformación, los fabricantes y técnicos no suelen combatir estos problemas. La identificación del problema podrá ser un camino largo y sinuoso si no logran comprenderse los conceptos físicos de trasfondo.

Los problemas no son sólo producto del entorno, también pueden ser producto de malas instalaciones eléctricas o fallas en los sistemas de protección del propio sistema, que una vez más, son fruto de la desinformación o la mala información que circula alrededor de este tema.

Existen varios estudios realizados por Bill Withlock (Withlock, 2005; Withlock, 2001) enfocados a la inspección detallada de la aparición de ruido eléctrico en sistemas de audio y video. En ellos enfatiza la importancia de la utilización de líneas balanceadas y sistemas de puesta a tierra y desmitifica una gran cantidad de conceptos alrededor de dichos temas.

En el presente trabajo se realiza una revisión teórica de las principales fuentes de ruido eléctrico asociadas a la alimentación eléctrica y se desarrolla una metodología de medición a fin de detectar la aparición de las señales eléctricas generadas por dichas fuentes. Finalmente, se procede a realizar tales mediciones.

1.1 Perturbaciones en la red de suministro eléctrico

En Argentina, las redes eléctricas de baja tensión están formadas por ondas sinusoidales cuya tensión eficaz es de 220 V y su frecuencia, de 50 Hz. Sin embargo, la red de suministro eléctrico presenta una serie de perturbaciones causadas por las fuentes de abastecimiento, por los usuarios o por las cargas de la propia instalación.

Las perturbaciones en la red eléctrica pueden clasificarse en aleatorias o estacionarias. Las primeras de ellas se caracterizan básicamente por caídas de tensión transitorias o microcortes en alguna zona de la red. Las perturbaciones estacionarias son de carácter permanente, desde el punto de vista de los fenómenos aquí analizados. Cualquiera sea la alteración en el dominio temporal implicará una modificación en el dominio de la frecuencia.

1.2 Tierra vs Masa

He aquí un mito: Tierra = Masa = 0 V (Withlock, 2005). La “tierra” debe utilizarse para la protección de posibles zonas electrificadas que se encuentren al alcance de las personas, mientras que los sistemas de “masa” son utilizados por los distintos dispositivos como potencial de referencia. No obstante, es erróneo afirmar que el potencial de ambos conductores sea de 0 V, puesto que la “tierra” y la “masa” no son conductores ideales y dadas las corrientes que circulan por ellos y sus resistencias, se originan potenciales localizados.

Cuando se conecta la masa al sistema de tierra de protección, se dice que el sistema está a tierra. Contrariamente, si no existiese un vínculo eléctrico entre ellos, se lo denominaría sistema flotante.

Todas las conexiones a tierra o masa podrán estar a distintos potenciales, de modo que la posibilidad de que se creen bucles de tierra entre ellas será elevada. Por ello se aconseja la utilización de un único punto de tierra y otro de masa para todo el sistema, como muestra la figura 1. La tensión en el punto de unión no es afectada por el consumo individual de cada

circuito, sino solamente por la corriente e impedancia característica de su línea de masa, como lo demuestra la ecuación 1.

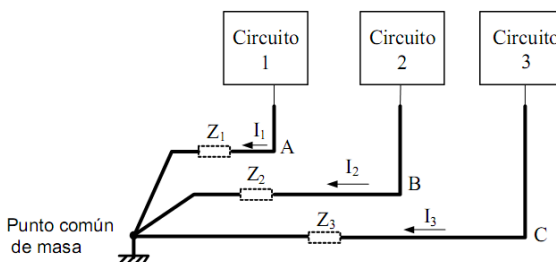


Figura 1. Sistema de masa de único punto de conexión. (Balcells J., 1991)

$$V_A = I_1 \cdot Z_1; V_B = I_2 \cdot Z_2; V_C = I_3 \cdot Z_3 \tag{1}$$

2 Fuentes de ruido en sistemas alimentación de sistemas de audio

2.1 Transformadores

2.1.1 Circuito equivalente

Comúnmente suelen omitirse, en esquemas eléctricos, elementos parásitos que acompañan a cualquier transformador con núcleo de hierro. Uno de dichos elementos es la capacidad parásita (C_w) existente entre los bobinados primarios y secundarios.

En la figura 2 puede apreciarse una aproximación del circuito equivalente a un transformador con núcleo de hierro.

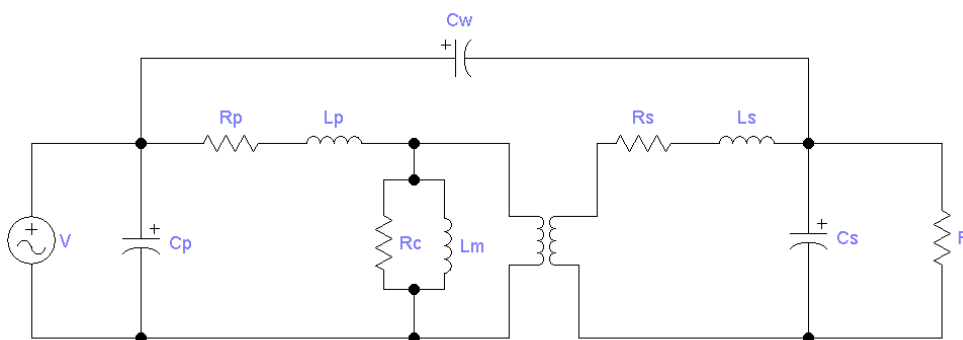


Figura 2. Circuito equivalente a un transformador con núcleo de hierro.

2.1.2 Distorsión armónica

Suponiendo que la fuerza contraelectromotriz inducida es despreciable comparada con la caída resistiva, la corriente de excitación presentará una forma de onda igual al generador de tensión sinusoidal, como se muestra en la figura 3.a.

En la figura 3.b puede observarse que la relación entre la intensidad de corriente y el flujo inducido en un transformador con núcleo de hierro presenta alinealidad. En la figura 3.a puede observarse que dicho efecto podría producir una distorsión en la onda del flujo inducido, y por ende modificaría el espectro de frecuencia de la misma.

Finalmente, como la tensión inducida es proporcional a la velocidad de variación temporal del flujo inducido, se producirá también una distorsión armónica de la misma.

Sea el flujo inducido, por ejemplo, como lo indica la ecuación 2, la tensión inducida resultará como muestra la ecuación 3. Como puede observarse en esta última ecuación, la amplitud de la tensión inducida con sus respectivos armónicos, será relativamente mayor al flujo inducido.

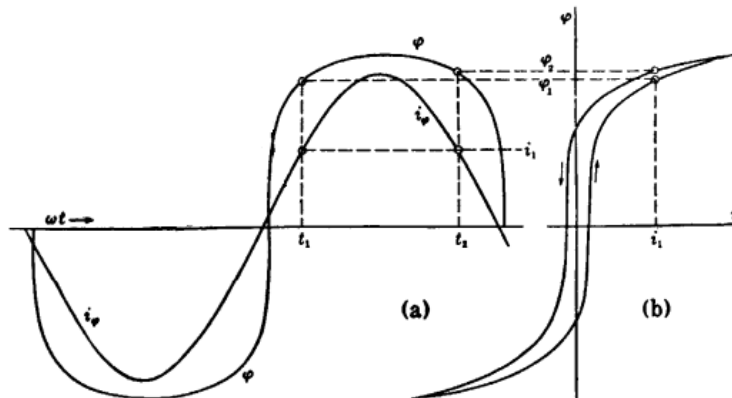


Figura 3. Construcción gráfica para la determinación de las formas de onda del flujo y de la tensión inducida. (M.I.T., 1965) (a) Sinusoide de la corriente de excitación y forma de onda del flujo inducido. (b) Relación entre la intensidad de corriente y el flujo inducido.

$$\phi = \phi_{1MAX} \text{sen}(\omega t) + \phi_{3MAX} \text{sen}(3\omega t) \tag{2}$$

$$e = N \frac{d\phi}{dt} = N(\omega\phi_{1MAX} \text{cos } \omega t + 3\phi_{3MAX} \text{cos } 3\omega t) \tag{3}$$

2.2 Corrientes de fuga y bucles de tierra

Además de las capacidades parásitas, debemos considerar las capacidades que presentan algunos equipos con filtros de ondas de RF (C_f). El comportamiento de ambas capacitancias provoca la circulación de corrientes de fuga entre la red eléctrica y sus gabinetes. De esta manera cada equipo tendrá un potencial particular en su gabinete.

Algunos equipos al ser interconectados con otros, forman un lazo cerrado entre sus gabinetes a través de la línea de transmisión y el sistema de tierra. Ello se debe a que en ocasiones los mallados de los conductores de las líneas de transmisión son conectados al gabinete de los equipos, aún se trate de líneas balanceadas como desbalanceadas. De esta manera se conformará una diferencia de potencial entre los equipos y una circulación de corrientes entre ellos, a través del hilo conductor, dada la impedancia común entre ellos. A esta circulación de corriente entre ambos equipos se la denomina “bucle de tierra”.

En la figura 4 podemos observar un esquema equivalente en que se interconectan dos equipos mediante una línea de transmisión que establece un bucle de tierra. Ambos equipos tienen el conductor del mallado vinculado a sus respectivos chasis.

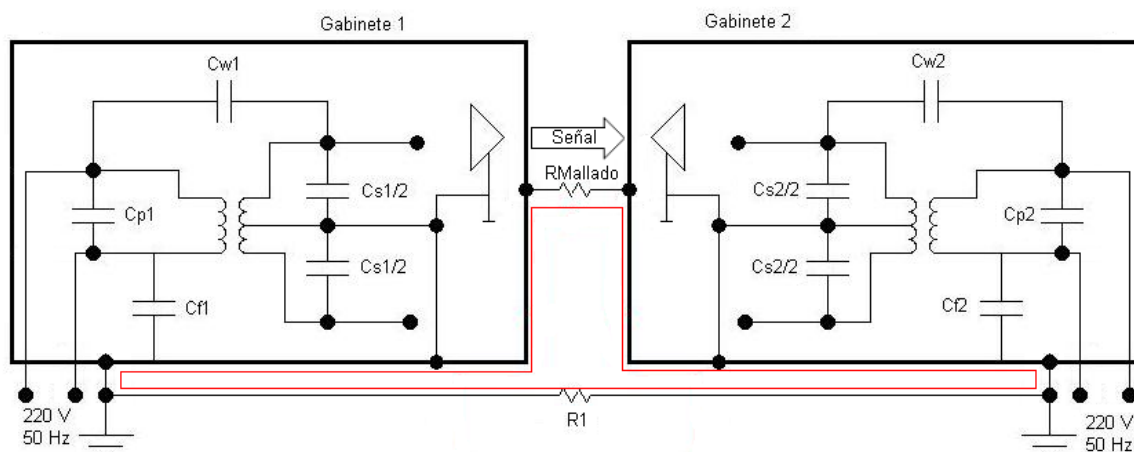


Figura 4. Bucle de tierra establecido entre dos equipos.

3. Instrumental utilizado

3.1 Cadena de audio

Para la confección de la cadena de audio se utilizó una consola marca Mackie modelo 1202VLZ3, un compresor dbx modelo 166 XL, un gabinete acústico tipo monitor de estudio de grabación modelo Mackie HR824.

3.2 Instrumentos de medición y accesorios

Para registrar las mediciones se contó con osciloscopio digital marca Tektronix modelo TDS 2004 de 4 canales, multímetro digital UNIT-T y una pinza miliamperométrica Meterman AC50.

Para inyectar las señales de prueba a nuestra cadena de audio se utilizó un generador de señales marca Electronic Instruments modelo VC2003, además de líneas de transmisión balanceadas y desbalanceadas.

4. Procedimientos de medición

4.1 Sistema de puesta a tierra y corrientes de fuga

Primeramente se verificó la existencia del conductor de puesta a tierra en la instalación. Para tal fin se dispuso de un voltímetro digital y se procedió a medir la diferencia de potencial entre el conductor de vivo y el conductor de tierra.

Posteriormente, se midió la tensión de la red eléctrica. Para realizar la medición se utilizó el osciloscopio digital. A modo de protección del instrumental se desarrolló un divisor resistivo mediante 3 resistencias de 33 k Ω dispuestas en serie y protegidas ante interferencias electromagnéticas mediante la confección de una jaula de Faraday.

A continuación, se despojó a cada equipo de todo vínculo eléctrico entre el chasis y el sistema de puesta a tierra. Mediante el osciloscopio se se midió la tensión de fuga presente en cada gabinete. Las mediciones se realizaron temporalmente y espectralmente, utilizando la operación matemática FFT. Luego, se procedió a poner a tierra todos los equipos cerrando la llave S1 y se realizaron nuevamente todas las mediciones para obtener el comportamiento de cada equipo bajo condiciones de protección. En la figura 5 se observa el esquema eléctrico de la confección de la experiencia mencionada.

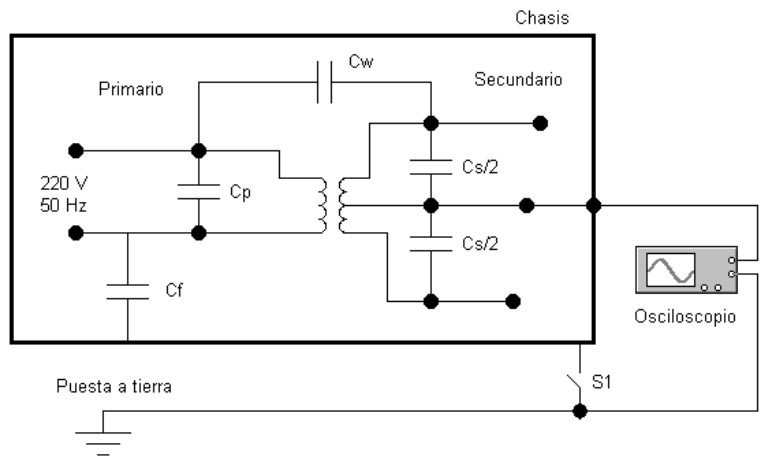


Figura 5. Medición de la diferencia de potencial entre el chasis y el terminal de tierra.

4.2 Distorsión armónica y capacitancias parásitas

Se registró la distorsión armónica del transformador del monitor de audio. Para ello se conectó el osciloscopio entre el bobinado secundario y el sistema de puesta a tierra.

Mediante un capacitómetro se verificaron y registraron los valores de capacitancias parásitas y de fuga. Para las primeras se conectó el instrumental entre primario y secundario, y para las últimas se lo conectó entre el gabinete y la red de alimentación.

Un esquema de lo dicho anteriormente puede apreciarse en la figura 6.

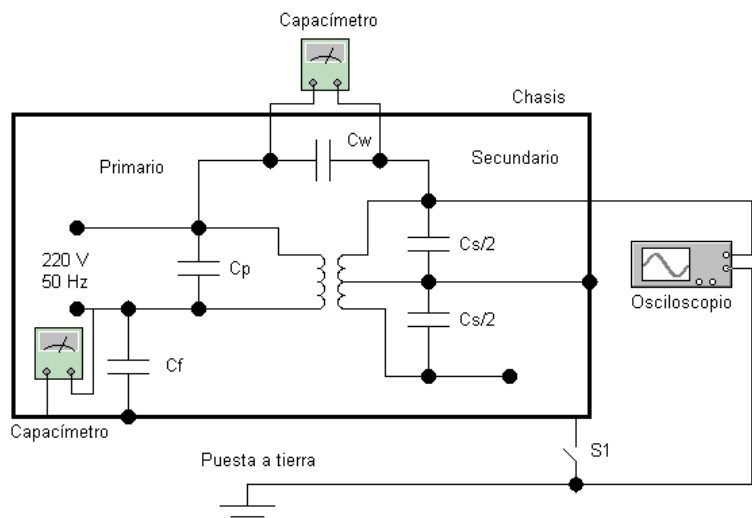


Figura 6. Medición de distorsión armónica y capacidades parásitas y de fuga.

4.3 Bucles de tierra

Efectuadas las mediciones individuales del equipamiento, se procedió a interconectarlos mediante líneas de transmisión balanceadas y desbalanceadas. A la entrada de la consola se inyectó una señal de prueba empleando el generador de señal. Para continuar con la cadena de audio, se conectó un compresor y la salida de éste a los monitores.

Verificamos las condiciones de nuestra instalación, con los equipos conectados en forma flotante y posteriormente con conexión a tierra, inyectando una señal de 1 V de

amplitud pico a pico y de 1 kHz de frecuencia. Con las diferentes disposiciones se midieron las tensiones y corrientes en los mallados de las líneas de transmisión, empleando el osciloscopio y la pinza miliamperométrica.

Por último, para el caso de las líneas balanceadas, se efectuaron idénticas mediciones, en primera instancia bajo condiciones normales y en segunda instancia interrumpiendo el mallado del cable en el extremo del receptor.

En la figura 7 puede observarse el esquema completo de la experiencia antes descrita.

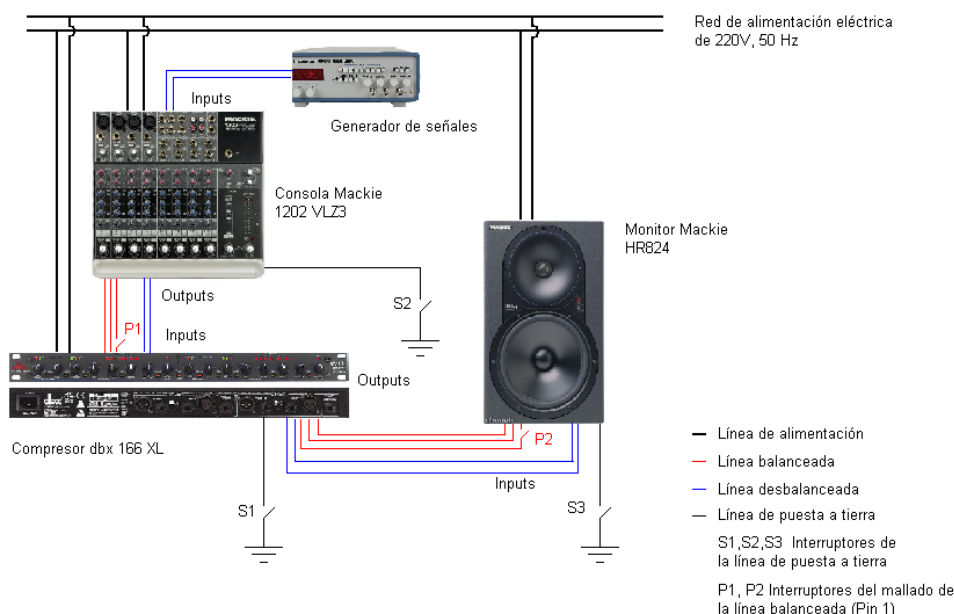


Figura 7. Confección de la cadena de audio.

5. Resultados y discusión

5.1 Sistema de puesta a tierra y corrientes de fuga

En la figura 8 podemos observar la presencia de componentes parciales además de la señal fundamental de línea de 50 Hz. Tal medición se efectuó sobre una de las resistencias del divisor resistivo descrito en la sección 4.1, por ende la tensión de la señal fundamental será de aproximadamente 70 V. La medición se realizó con un osciloscopio empleando la función Transformada Rápida de Fourier (FFT), por lo tanto sólo podrán registrarse perturbaciones de tipo estacionarias.

Cabe aclarar que cada vez que se utilizó la función matemática FFT, mediante el osciloscopio digital, se empleó el eje de ordenadas con escala en dBV. En la ecuación 4 puede apreciarse la expresión del nivel de tensión en dBV.

$$L_{dBV} = 20 \log \frac{V_1}{V_{REF}}, \tag{4}$$

donde: $V_{REF} = 1V$, $V_{1,ef}$ = tensión eficaz.

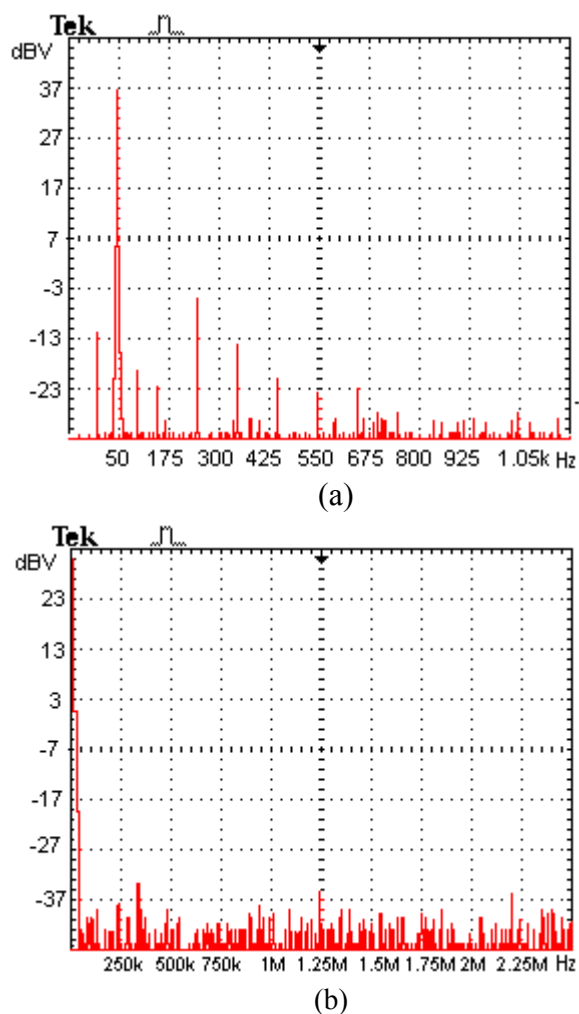


Figura 8. Tensión de la red eléctrica. (a) Medición FFT de línea de alimentación, espectro para bajas frecuencias. (b) Medición FFT de línea de alimentación, espectro para altas frecuencias.

En la figura 9.a puede apreciarse la tensión medida en el chasis de la consola sin sistema de puesta a tierra. La señal presenta un valor de tensión eficaz de 9.17 V. En las figuras 9.b observamos la frecuencia fundamental situada en los 50 Hz y presencia de contenido de armónicos.

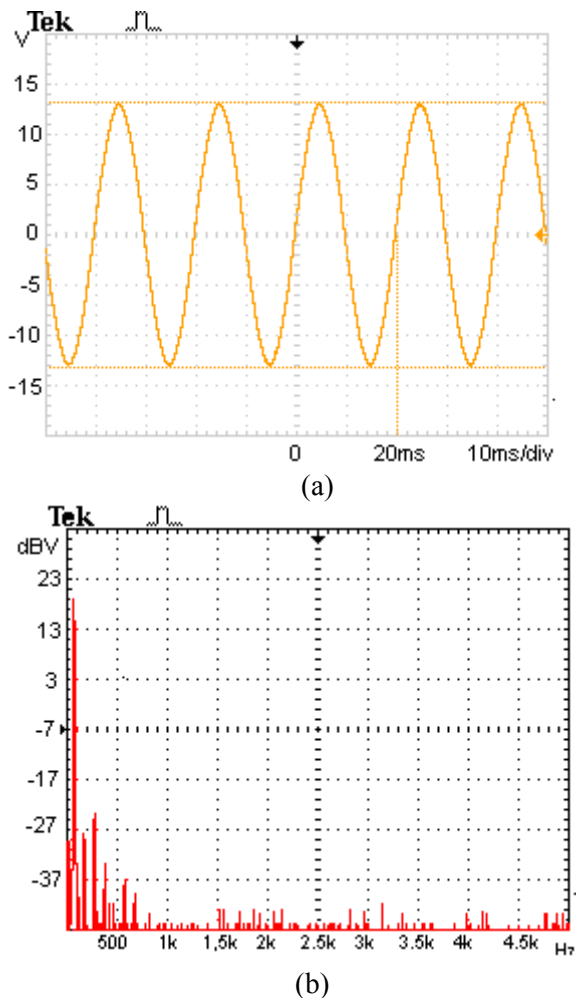


Figura 9. Diferencia de potencial entre el terminal de tierra y el chasis flotante. (a) Función temporal de la tensión. (b) Espectro de frecuencias de la tensión.

A continuación, se midió la tensión en el chasis de la misma consola pero esta vez conectada a tierra. En la figura 10 puede apreciarse su resultado.

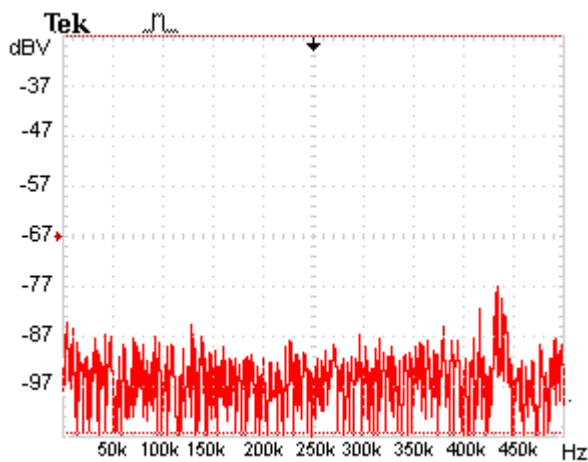


Figura 10. Diferencia de potencial entre el terminal de tierra y el chasis a tierra. Espectro de frecuencias.

En la figura 11.a puede apreciarse la tensión medida en el chasis del compresor sin sistema de puesta a tierra. La señal presenta un valor de tensión eficaz de 12.73 V.

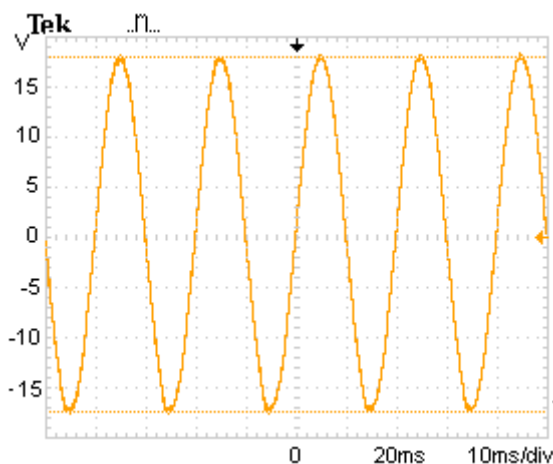


Figura 11. Tensión de chasis con compresor flotante. Función temporal de la tensión.

Posteriormente, se midió la tensión en el chasis del compresor pero puesto a tierra. Dicho resultado puede apreciarse en la figura 12.

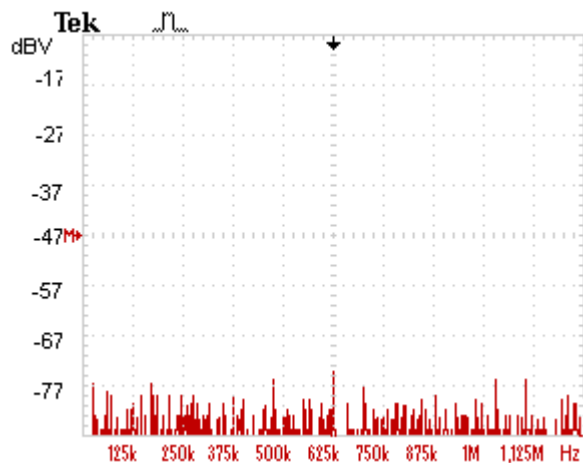


Figura 12. Diferencia de potencial entre el terminal de tierra y el chasis a tierra.

En las figuras 13.a y 13.b puede visualizarse la tensión medida en el chasis del monitor sin sistema de puesta a tierra. La señal presenta un valor de tensión eficaz de 12 V. Finalmente, se procedió a poner a tierra el gabinete del monitor registrando el valor en la figura 14.

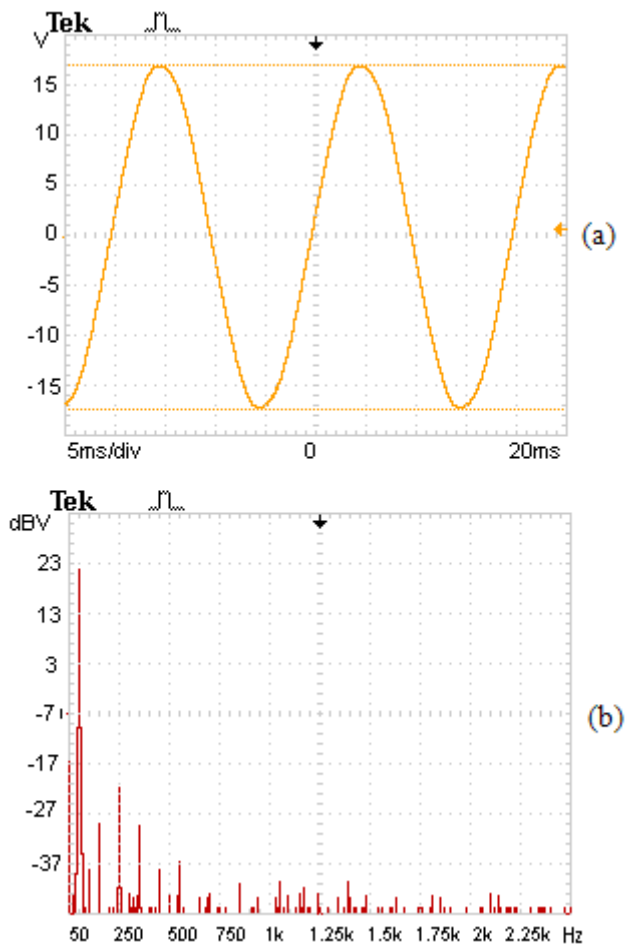


Figura 13. Tensión de chasis con monitor flotante. (a) Función temporal de la tensión. (b) Espectro de frecuencias de la tensión.

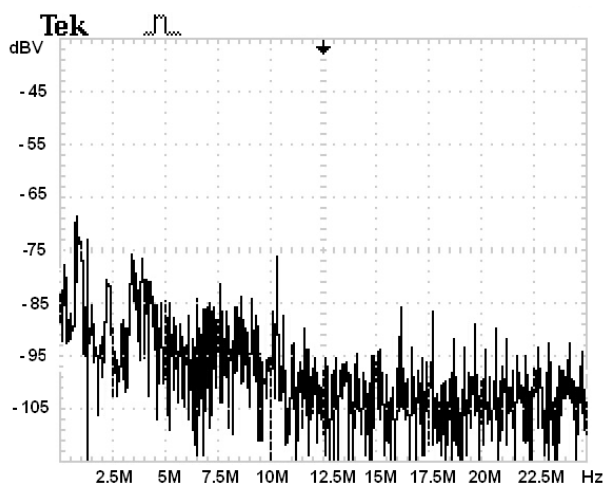


Figura 14. Tensión de chasis con compresor a tierra. Espectro de frecuencia.

Las mediciones observadas desde la figura 9 hasta la 14, evidencian la existencia de potenciales localizados en los gabinetes de los equipos. Dichas tensiones se hacen presente

debido a las capacidades parásitas, que han sido identificadas en las secciones 2.1.1 y 4.2 mediante los modelos equivalentes.

Cada uno de los potenciales medidos es particular a cada equipo analizado y podrá atenuarse si es que éstos son conectados a sistemas de tierra.

5.2 Distorsión armónica y capacitancias parásitas

Cotejando los gráficos 15.a y 15.b puede observarse la distorsión armónica generada por el transformador del monitor de audio. Tal distorsión es producto de la alinealidad, que presenta el núcleo de hierro del transformador, entre la intensidad de corriente y el flujo inducido.

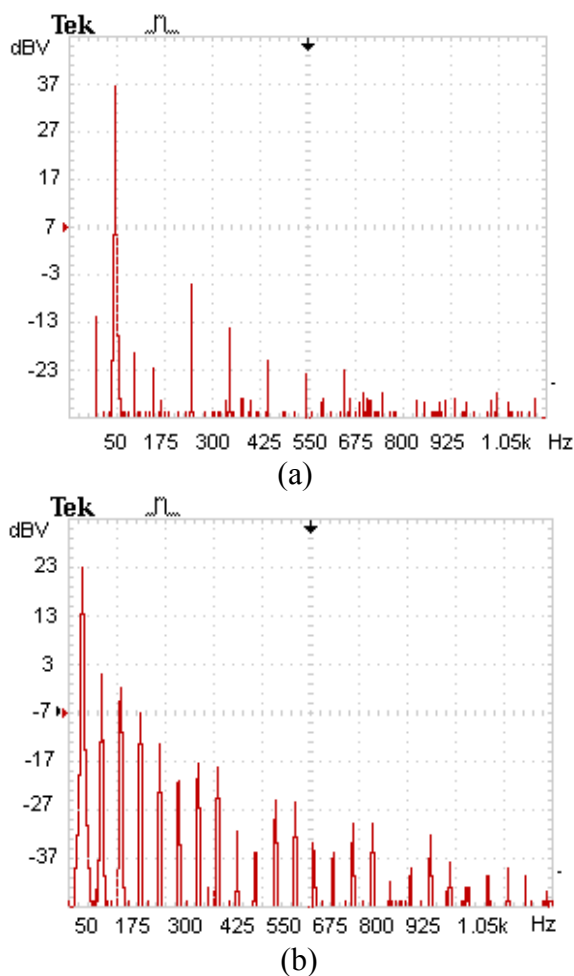


Figura 15. Distorsión armónica. (a) Tensión de la red eléctrica. (b) Tensión de salida del transformador.

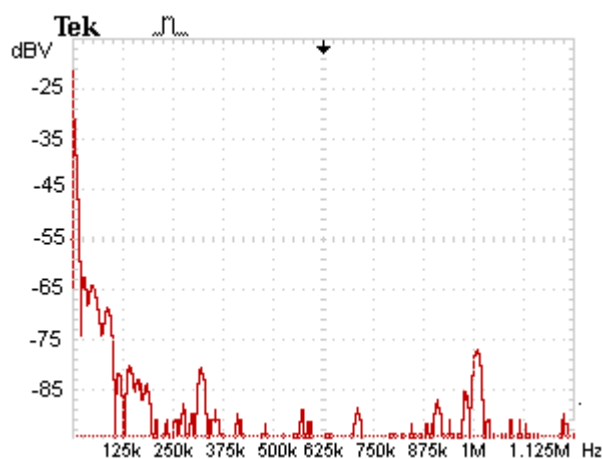
Dispuestos los capacitímetros según lo descrito en la sección 4.2 figura 6, los valores de capacidades obtenidos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Valores de capacidad medidos

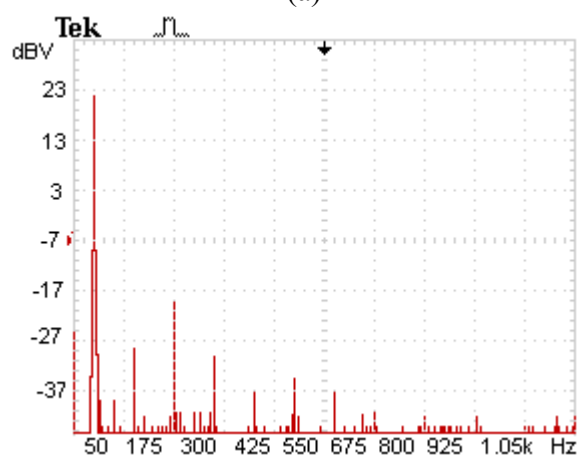
C_w	C_f
587 pF	2300 pF

5.3 Bucles de tierra

Confeccionada la cadena de audio descrita en la figura 7 sección 4.3 y con los equipos desconectados de tierra, se efectuó la medición de la diferencia de potencial entre el mallado de la línea balanceada y el terminal de tierra. Las figuras 16.a y 16.b representan las mediciones efectuadas en la línea que interconecta la consola y el compresor.



(a)



(b)

Figura 16. Diferencias de potencial entre el terminal de tierra y el mallado de la línea balanceada que interconecta la consola y el monitor. (a) Espectro para altas frecuencias. (b) Espectro para bajas frecuencias.

Las figuras 17.a y 17.b representan las mediciones de las diferencias de potencial entre el terminal de tierra y los pines 2 y 3 de la línea balanceada a salida de la consola, respectivamente.

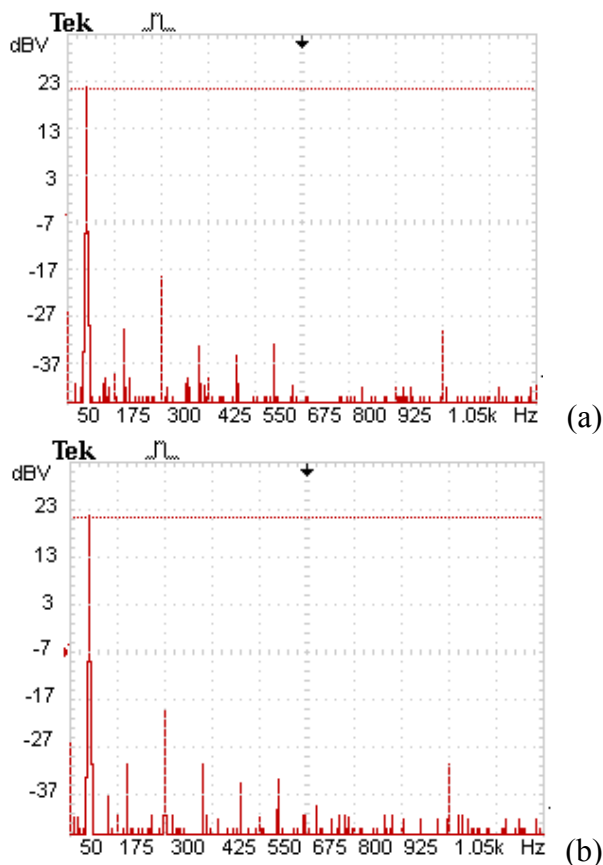


Figura 17. Diferencia de potencial sobre línea balanceada entre el terminal de tierra y el respectivo pin. (a) Pin 2. Espectro de frecuencias. (b) Pin 3. Espectro de frecuencias.

Continuando con la cadena de audio, se efectuaron idénticas mediciones pero ahora con todos los equipos puestos a tierra. La figura 18 representa la medición del mallado de la línea balanceada a la salida de la consola.

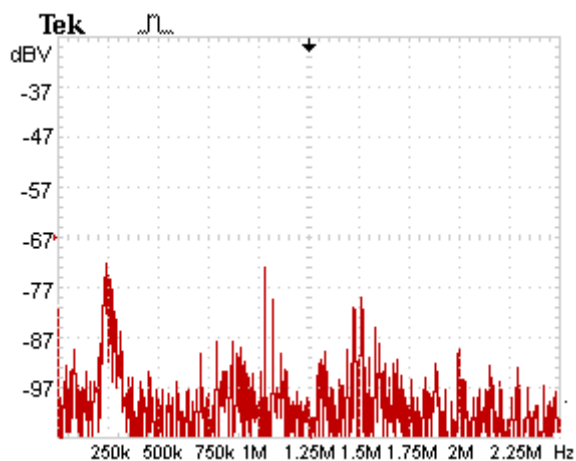


Figura 18. Diferencia de potencial entre el terminal de tierra y el mallado de la línea balanceada.

Utilizando la pinza miliamperométrica se midieron las corrientes en los mallados de las líneas de interconexión, con el fin de comprobar la existencia de los bucles de tierra. Para realizar dicha medición, se abrió cuidadosamente el aislante plástico del cable y se trenzó el mallado a modo de enlazarlo con la pinza. Los resultados de las mediciones pueden apreciarse en la tabla 2.

Tabla 2. Corrientes circulantes en mallados.

	Corriente en mallado [mA]	
Sistema sin conexión a tierra	Consola-Compresor	Compresor-Monitor
	0.8	0.94

	Corriente en mallado [mA]	
Sistema con conexión a tierra	Consola-Compresor	Compresor-Monitor
	0.65	0.85

Se evidencia, en las figuras 16 a 19 y en la tabla 2, la existencia de corrientes circulantes en los mallados de las líneas de transmisión producto de los bucles de tierra. Además, puede apreciarse en la tabla 2 que dichas corrientes no consiguen eliminarse aún cuando los equipos fueron conectados sistemas de puesta a tierra, puesto que ellas son producto de las diferencias de potencial que radican en los chasis de los equipos.

6. Recomendaciones

Realizados los modelos equivalentes y las mediciones correspondientes, se pretenden dar pautas que permitan evitar el ruido eléctrico producto de los sistemas de alimentación:

- Para el caso de líneas balanceadas, se recomienda la interrupción el conductor del Pin1, logrando así atenuar la circulación de corriente producto de los “bucles de tierra”, puesto que de esta manera se despoja de todo vínculo eléctrico existente entre los gabinetes de los equipos. El uso de líneas desbalanceadas imposibilita dicho procedimiento, ya que el conductor mallado es empleado como “retorno” de la señal a transferir, por ende su utilización incrementa la probabilidad de apariciones de “bucles de tierra”.
- Ante una nueva instalación de audio o ante el mantenimiento de las ya existentes, se recomienda verificar los niveles de ruido provocados por el interconexión de los equipos en la cadena de audio, ya que estos malogran la relación S/N del sistema completo. Para ello se recomienda la implementación procedimental desarrollada en la sección 4.3, corroborando la inexistencia de corrientes circulantes en los mallados de las líneas de transmisión y en caso afirmativo su posterior interrupción.

7. Conclusiones

Se comprobó la circulación de corriente entre los gabinetes de los equipos que se encontraban interconectados mediante líneas de transmisión balanceadas o desbalanceadas puesto que ellos presentaban vínculo eléctrico entre el mallado de las líneas y el gabinete de los equipos. Según se describió en la sección 4.3, estas corrientes son producto de la formación de los llamados “bucles de tierra”. La magnitud de la corriente dependerá de la diferencia de potencial que exista entre los gabinetes que a su vez son producto de las capacidades parásitas y de fuga presentes en todo sistema de alimentación.

Se ha verificado que las tensiones presentes en los chasis de los equipos que se encuentren flotantes podrían ser riesgosas ya sea ante posibles electrocuciones de personas o

daños en los sistemas electrónicos. Se recomienda a los fabricantes de equipamientos electrónicos de audio que hagan mención de estas tensiones puesto que es un fenómeno particular de cada equipo.

Futuras líneas de investigación

Se sugiere investigar el desempeño de los transformadores apantallados en la disminución de las capacidades parasitas.

Se podría modificar este trabajo insertando filtros del tipo Pi, previos al sistema propio de alimentación eléctrica, logrando de esta manera una señal empobrecida en armónicos indeseados.

Agradecimientos

Se agradece al coordinador de la carrera Ingeniería de Sonido de la Universidad de Tres de Febrero, Ing. Alejandro Bidondo y al profesor Ing. Alejandro Di Fonzo por el material didáctico aportado para realización del presente trabajo y su constante colaboración, a las autoridades de la Universidad de Tres de Febrero quienes nos permitieron y facilitaron el uso de las instalaciones y del instrumental empleado.

Referencias

Whitlock, Bill (2005). "Understanding, finding & eliminating ground loops in audio & video systems". Generic Seminar Template.

Whitlock, Bill (2001). "Audio Transformers". Generic Seminar Template.

Balcells, Josep; Daura, Francesc; Esparza, Rafael; Pallás, Ramón (1991). "Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos". Marcombo, Barcelona, España.

E. E. Staff del M. I. T (1965), "Circuitos Magnéticos y transformadores", Editorial Reverté S. A. Barcelona, España.