

Cancelación Activa de Ruido

Gonzalo J. Davidov

Facundo D. Farall

Lucas A. Kammann

Rafael N. Trozzo

Abstract—Este trabajo presenta el diseño y la simulación de un sistema adaptativo de control activo de ruido en una aplicación de auriculares, utilizando un esquema feedforward con un algoritmo FX-NLMS. Para el análisis del comportamiento del sistema, se simulan los auriculares Bose QC20 utilizando mediciones de los diferentes caminos acústicos.

Index Terms—Cancelación activa de ruido, sistemas adaptativos, cancelación de ruido en auriculares, FX-NLMS, sistemas feedforward, procesamiento digital de señales

I. INTRODUCCIÓN

El ruido acústico es un problema que según las condiciones de exposición, puede degradar la calidad de vida del ser humano y provocar un daño a su salud física. La gravedad y naturaleza del ruido acústico puede variar según el entorno, ya que por ejemplo, en un ambiente industrial habrá una contaminación sonora alta asociada a la maquinaria en funcionamiento.

Para mitigar estos riesgos se emplean sistemas de cancelación de ruido. La cancelación pasiva de ruido utiliza medios que absorben las ondas mecánicas del sonido para atenuar su intensidad cuando los atraviesen. Este enfoque no funciona adecuadamente para bajas frecuencias, o incluso se vuelve complejo y costoso de implementar. Este problema se puede resolver con el uso de sistemas de cancelación activa de ruido. En la cancelación activa, un sistema reproduce un sonido idéntico y en contrafase al ruido, para provocar una interferencia destructiva que elimine la señal sonora indeseada. Para lograr esto, el cancelador debe poder modelar cómo se comporta el sistema acústico para generar adecuadamente esa señal en contrafase.

Para el caso de auriculares, este sistema se puede ver en la figura 1. En general, un micrófono de referencia permite medir el ruido externo, mientras que un micrófono de error permite medir el ruido dentro del oído. En el esquema feedforward, el cancelador de ruido utiliza la información del micrófono de referencia para producir la señal de control que reproduce el parlante. Por otro lado, la información del micrófono de error permitirá adaptar el cancelador y reducir el ruido.

En el esquema de la figura 1, se denotan tres transferencias. La $P(z)$ es el camino acústico primario, y además, la cancelación pasiva de ruido de los auriculares. La $G(z)$ es el camino acústico secundario, físicamente se asocia a las transformaciones que sufre la señal de control hasta llegar al micrófono de error, y tiene un rol crítico en el funcionamiento del cancelador. Finalmente, $F(z)$ es la realimentación acústica.

II. SIMULACIÓN

El sistema acústico del auricular se puede representar con un sistema digital como en la figura 2 que modele los caminos

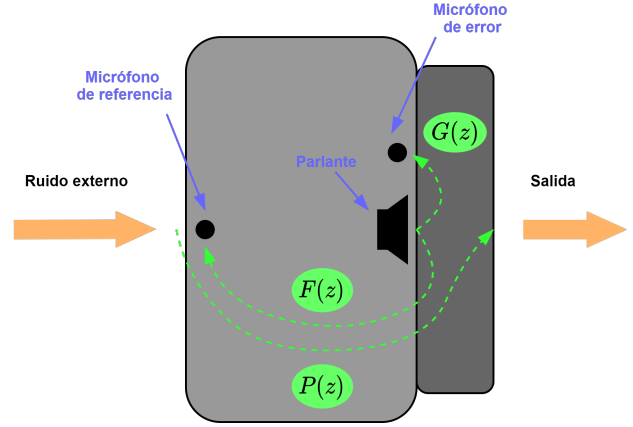


Fig. 1. Esquema de un auricular para ANC

acústicos. Así, conociendo $P(z)$, $G(z)$ y $F(z)$, se puede simular el comportamiento físico del auricular para probar el rendimiento del cancelador activo de ruido.

Para esta simulación, se emplean mediciones de los caminos acústicos del auricular Bose QC20 tomadas por el *Institute of Technical Acoustics* [1]. Se tomaron tanto en una cámara acústica como anecoica, con personas o un *KEMAR*.

No se simula la respuesta acústica del entorno en donde está presente el ruido, y si así fuera, podrían cambiar los modelos como $P(z)$, extendiéndose y aumentando el cálculo necesario. Por esto, a los fines de evaluar el cancelador adaptativo propuesto, se utilizan las mediciones de la cámara anecoica. Salvo escenarios específicos en donde se aclara, para el resto de las simulaciones se tomaron mediciones $P(z)$, $G(z)$ y $F(z)$ arbitrarias dentro de la base de datos, para evaluar el algoritmo en general.

III. PARÁMETROS DE CALIDAD

Para evaluar la implementación se analiza tanto el espectro de potencia del error de salida como la transferencia de error de la entrada a la salida. Se utiliza A-weighting para ponderar en frecuencia tanto el error de salida como la transferencia para que lo observado tenga mayor correspondencia con lo percibido por el oído humano.

Para que el error que se busca evaluar sea representativo, se debe saber primero si la construcción misma del auricular produce atenuación y de que valor es. A esta atenuación se la conoce como atenuación pasiva y se la mide aplicándole al auricular un ruido blanco de entrada

Se obtiene que la atenuación pasiva del auricular es:

$$Atenuacion_{pasiva} = 14.03dB \quad (1)$$

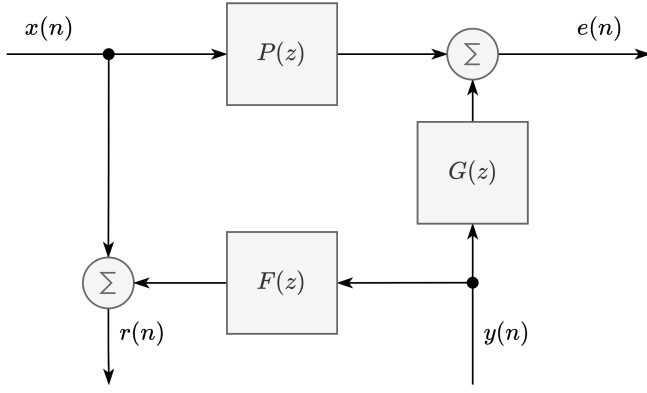


Fig. 2. Modelo del sistema acústico

IV. SISTEMA PROPUESTO

El esquema de cancelación activa de ruido propuesto se observa en la figura 3.

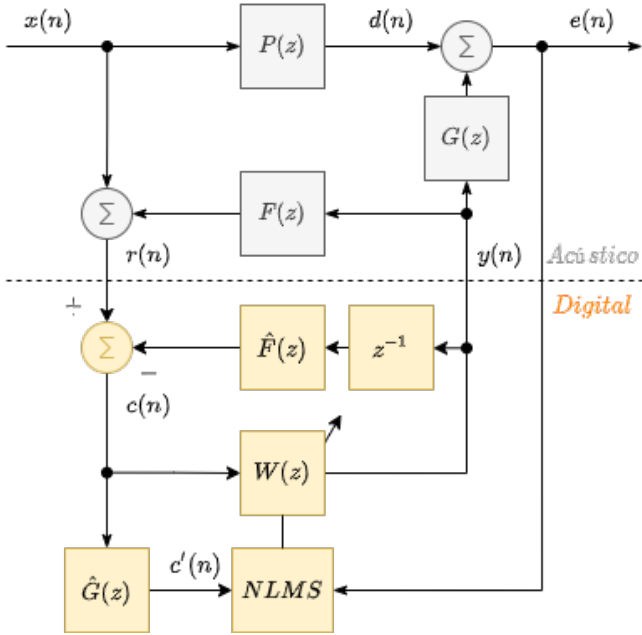


Fig. 3. Sistema propuesto

A. Modelado del camino primario $P(z)$

En condiciones ideales, el auricular tiene una respuesta $P(z)$ que el cancelador debe modelar para cancelar el ruido. Este comportamiento del auricular es variable en el tiempo, para eso se emplea el esquema adaptativo de la figura 4.

Se aplica un algoritmo LMS para adaptar los coeficientes del filtro $W(z)$. Dado que en la práctica se dispone de los auriculares a los cuales se aplica la cancelación, se pueden realizar estimaciones para analizar el orden del sistema. No obstante, la longitud de la respuesta $p(n)$ podrá cambiar con el entorno, por ejemplo, si se encuentra en una sala muy reverberante. Para las simulaciones, el modelo físico tiene una

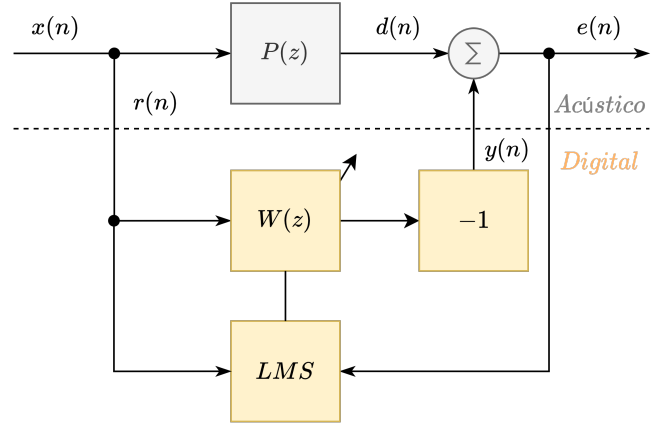


Fig. 4. Esquema básico

longitud $L_P = 2000$. En una aplicación práctica de tiempo real, se debería escoger el orden del filtro adaptativo para que sea suficientemente mayor que lo que se estima que dura la respuesta del auricular en un espacio anecoico, garantizando un margen para las variaciones de longitud en condiciones reverberantes.

Siendo el orden de $W(z)$ suficientemente grande, cuando se encuentra adaptado converge (en la media) a,

$$W(z) = P(z) \quad (2)$$

Entonces, $e(n) = 0$ y el ruido es cancelado. En la figura 5 se puede observar la simulación del cancelador y su contrastación con la atenuación pasiva del auricular. Considerando ruido blanco gaussiano de media nula y desvío unitario, el cancelador alcanza en 1,5s una atenuación de 71,37dB aproximadamente. En esta simulación se está usando un $\mu = 0.0001$. Para la elección del metaparámetro, es importante tener en cuenta que la señal de entrada es un ruido blanco gaussiano, y que por ende, sus autovalores son unitarios. Por otro lado, para garantizar que el sesgo no es apreciable, $\mu \ll 1$ en los algoritmos LMS.

B. Uso de NLMS

Si se pretende extender el uso del sistema a una aplicación real, es necesario contemplar las variaciones en los tipos de ruido que se pueden tener en la entrada a cancelar. Esto implica que, principalmente, la energía de la entrada puede cambiar, afectando la convergencia y la energía del error en régimen estacionario. Para contrarrestar este efecto, se plantea el uso de un algoritmo NLMS para tener un parámetro de paso variable, según la energía de la señal de entrada.

Se plantea un esquema de compensación como el mostrado en la figura 6, en el que ahora la actualización de los coeficientes del filtro adaptado están dados por:

$$\vec{w}(n+1) = \vec{w}(n) + \frac{\vec{\mu}}{\|\vec{r}(n)\|^2} \cdot \vec{r}(n) \cdot e(n) \quad (3)$$

La energía de entrada $\|\vec{r}(n)\|^2$ debe ser estimada, y para ello se propone utilizar la aproximación en 4.

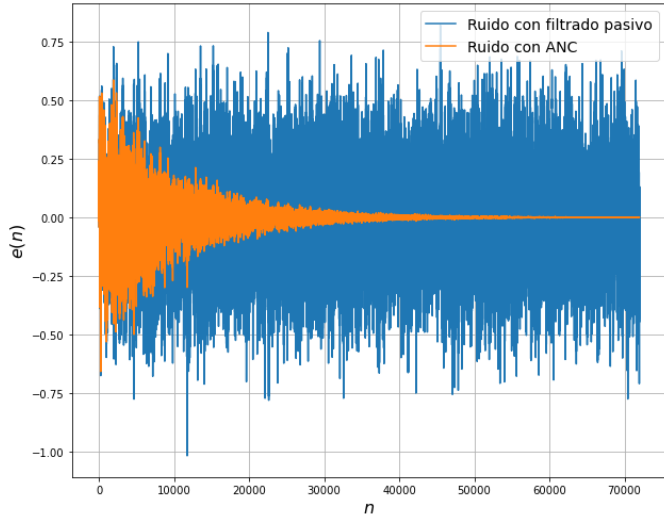


Fig. 5. Ruido $e(n)$

$$\|\vec{r}(n)\|^2 \approx \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} r^2(n-k) \quad (4)$$

Donde N es el orden del filtro adaptativo utilizado, ya que si se asume estacionariedad local para esa cantidad de muestras, también será válido el mismo criterio para la estimación de la energía.

Para protegerse contra problemas numéricos debido a posibles partes de la señal en que la energía sea muy baja (y que esto afecte negativamente al estar dividiendo), se incorpora una constante δ en la actualización del parámetro de paso, y se utiliza en la ecuación 5.

$$\mu = \frac{\tilde{\mu}}{\|\vec{r}(n)\|^2 + \delta} \quad (5)$$

Se elige $\delta = 1 \cdot 10^{-7}$ ya que se observó que ese valor se encuentra un orden de magnitud por debajo de los valores usuales más bajos de energía de entrada. En consecuencia, evita problemas excepcionales por energía de entrada inusualmente baja, y en condiciones normales es un término despreciable.

Para determinar si la solución propuesta es efectiva, se evalúa el funcionamiento del algoritmo ante un ruido de ambiente de subterráneo, como una mejor aproximación a un contexto real; es decir, se reemplaza la entrada de ruido blanco. En este escenario se comparará el funcionamiento del algoritmo planteado hasta la sección anterior, con la nueva incorporación de NLMS, y se prestará especial atención al comportamiento de ambos ante variaciones en la energía de la señal de entrada.

La figura 7 muestra los resultados obtenidos tanto de un sistema con NLMS (verde) como uno sin (naranja), y ambos contrastados con la atenuación pasiva del auricular. La variante con NLMS no solo logra mejores resultados en la convergencia, sino que es además invariante ante la energía de entrada de la señal, cosa que no sucede con la versión

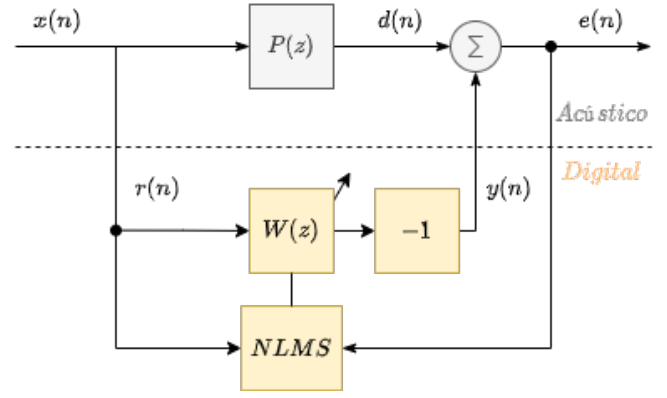


Fig. 6. Comparación NLMS

anterior. Ejemplos de esto pueden observarse en torno a la muestra 70000 y 15000.

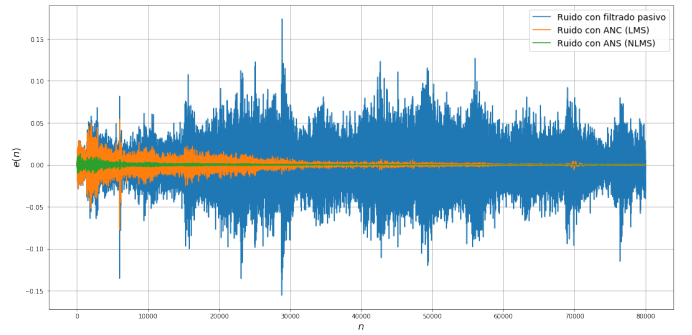


Fig. 7. Esquema con NLMS ante entrada de ruido de subterráneo.

Se suman a la figura 7, las figuras 8 y 9, donde se somete al sistema a otros contextos de ruido del mundo real, obteniéndose también un performance satisfactoria.

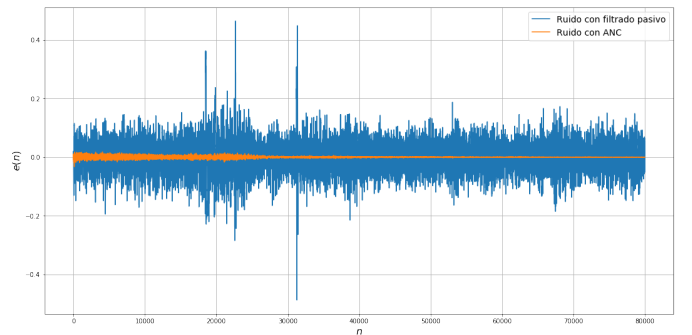


Fig. 8. Esquema con NLMS ante entrada de ruido de auto.

C. Compensación del camino secundario $G(z)$

En la práctica, el camino acústico secundario $G(z)$ entre el parlante y el micrófono de error afecta directamente al rendimiento del cancelador. El sistema adaptativo propuesto busca invertir la transferencia del camino secundario, para

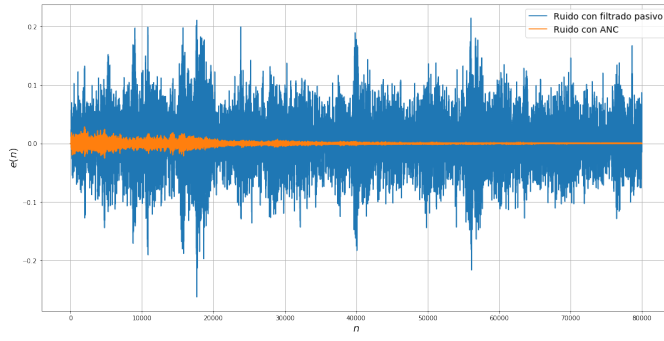


Fig. 9. Esquema con NLMS ante entrada de ruido de restaurante.

ecualizar sus efectos. Es así, que cuando el filtro se encuentra adaptado, converge (en la media) a,

$$W(z) = \frac{P(z)}{G(z)} \quad (6)$$

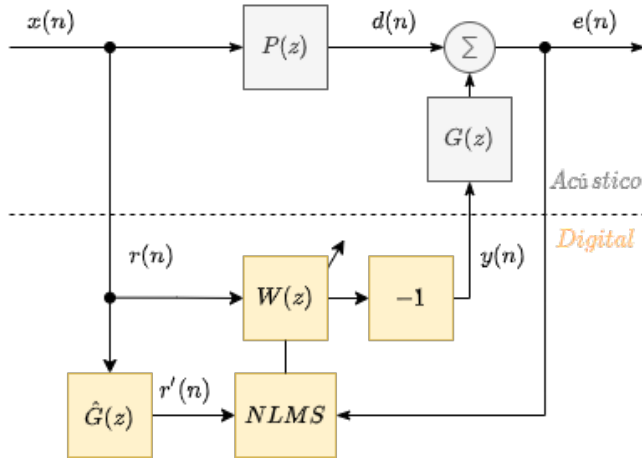


Fig. 10. Esquema con $G(z)$

A partir del esquema de la figura 10 se deduce que la señal de error ahora es,

$$e(n) = d(n) - \vec{g}(n)^T \cdot [\vec{w}(n)^T \cdot \vec{r}(n)] \quad (7)$$

Por lo tanto, para minimizar el error cuadrático medio, es estima la gradiente para el algoritmo,

$$\nabla J = -2 \cdot \vec{g}(n)^T \cdot \vec{r}(n) \cdot e(n) \quad (8)$$

Es decir, la ecuación de actualización de los coeficientes para este nuevo enfoque necesita usar la señal de referencia filtrada por el camino secundario. Esto es lo que se denomina FX-LMS (Filtered-X LMS). Para conseguir esto, es necesario conocer la transferencia del camino secundario. El enfoque propuesto estima $\hat{G}(z)$ fuera de línea.

En la figura 11, se simula con un ruido blanco gaussiano de media nula y desvío estándar unitario, con un orden $M = 2000$ y parámetro de paso $\mu = 0.004$. Se realizan

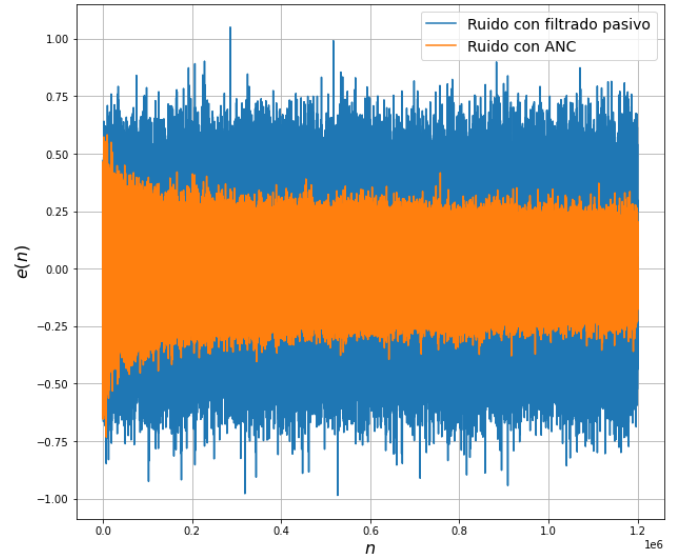


Fig. 11. Ruido $e(n)$

1.200.000 iteraciones, y se puede ver que el ruido sigue siendo considerable, con una atenuación activa de aproximadamente 7,71dB.

El parámetro de paso se ajustó para conseguir la máxima velocidad de convergencia posible, evitando caer en inestabilidades. En FX-LMS, la cota superior está dada por,

$$\mu < \frac{1}{P_{r'} \cdot (L + \Delta)} \quad (9)$$

En donde, $L = 2000$ es el largo del filtro adaptativo y $\Delta = 150$ es el largo de la respuesta del camino secundario.

El empeoramiento del resultado se debe a que el camino acústico secundario $G(z)$ posee una atenuación considerable en varios rangos de frecuencia. Entonces, el algoritmo LMS recibe una señal de entrada para la actualización con mucha menos energía, y disminuye fuertemente la velocidad de convergencia del algoritmo. Desde otro punto de vista, lo que antes era ruido blanco gaussiano a la entrada del bloque LMS, ahora está filtrado por $\hat{G}(z)$, dando como resultado ruido coloreado. Esto trae como desventaja que el ruido de prueba presenta una distribución de autovalores mucho más dispersa, provocando que para algunos modos la convergencia sea mucho más lenta que para otros.

En primer lugar, la figura 12 muestra la atenuación activa en frecuencia donde sólo se atenúa adecuadamente en ciertas frecuencias. En segundo lugar, en la figura 13 se compara la respuesta en frecuencia del filtro adaptativo resultante, con el resultado teórico esperado. Esto se condice con la figura 14, que muestra la respuesta en frecuencia del camino acústico secundario, porque donde más atenúa $\hat{G}(z)$, mayor error hay en el modelado del cancelador activo.

En conclusión, el rendimiento de la cancelación del ruido está sujeta al comportamiento en frecuencia del camino secundario, en este caso en particular, si para ruido que se encuentre en $f < 10kHz$, la convergencia será más rápida

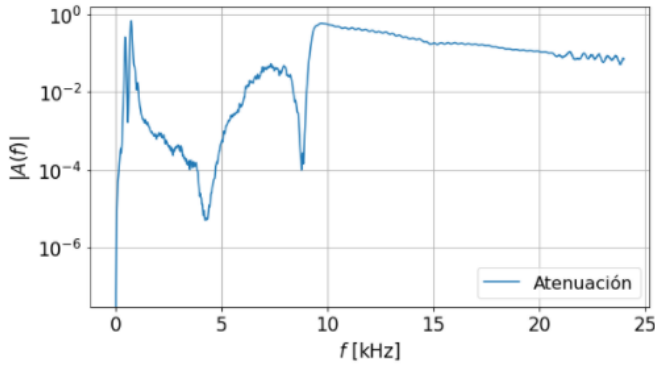


Fig. 12. Atenuación en frecuencia compensando $G(z)$

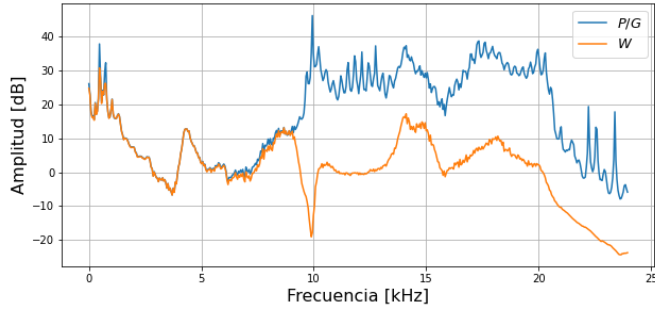


Fig. 13. Comparación $\frac{P(z)}{G(z)}$ con $W(z)$

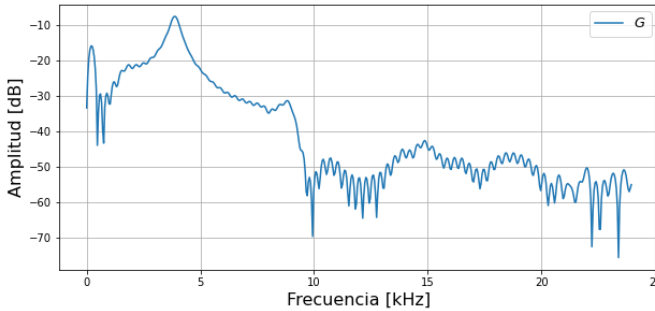


Fig. 14. Respuesta en frecuencia $G(z)$

y podrá atenuar mejor el ruido. La figura 15 muestra la simulación con ruido coloreado con un espectro pasabanda $f \in [2kHz, 5kHz]$, que permite conseguir una atenuación de $35dB$ aproximadamente.

D. Compensación de la realimentación acústica $F(z)$

En la práctica, se presenta también un camino de realimentación acústica $F(z)$ que se produce por la influencia de la salida en el micrófono de referencia como se puede observar en la figura 3. Se lo busca compensar mediante la utilización del enfoque de identificación de sistemas aplicada a la cancelación de eco, se modela el camino acústico de realimentación cuando el sistema se encuentra fuera de línea, para luego compensarlo en la señal de entrada del algoritmo FX-LMS explicado en la Sección IV-C.

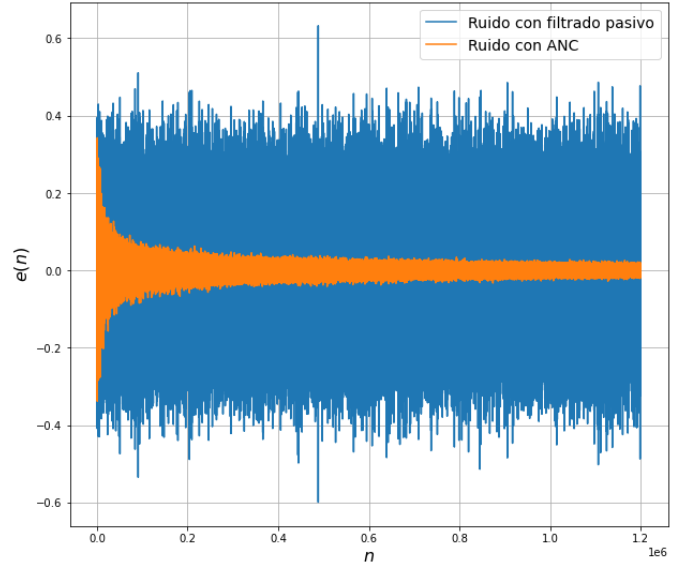


Fig. 15. Ruido coloreado $e(n)$

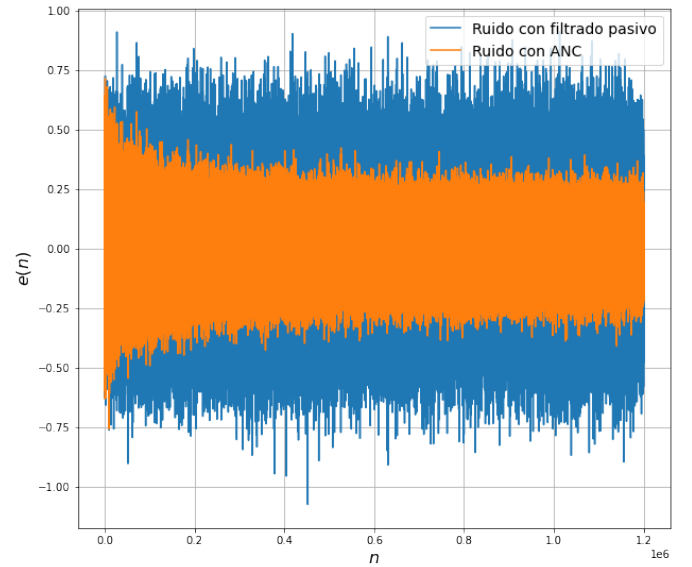


Fig. 16. Ruido $e(n)$

En la figura 16 se simula nuevamente con un ruido blanco gaussiano de media nula y desvío estándar unitario, con un orden $M = 3000$ y parámetro de paso $\mu = 0.002$. Se puede ver que el ruido se mantiene bastante parecido a lo obtenido en la figura 11, con una atenuación activa de aproximadamente $7dB$.

Se observa que los valores de F estimada, \hat{F} , tienen un orden de magnitud de 10^{-3} . Esto se corresponde con lo observado en el gráfico y explica por qué el cambio al agregar la compensación de la realimentación acústica es tan pequeño con lo observado en la compensación del camino secundario.

E. Algoritmo final

Finalmente, se juntan todas las mejoras propuestas, que culminan en el ya mencionado esquema completo de la figura 3. Este sistema es sometido a entradas de ruido blanco y de subterráneo, obteniéndose los resultados ilustrados en 17 y 18, y cuya atenuación total, teniendo en cuenta el *A-weighting* es de 19.83dB y 18.33dB respectivamente. Debe tenerse en cuenta que solo se simuló un segundo de ruido, y que como ya fue mencionado, al incluirse el camino secundario, el tiempo de convergencia aumenta considerablemente.

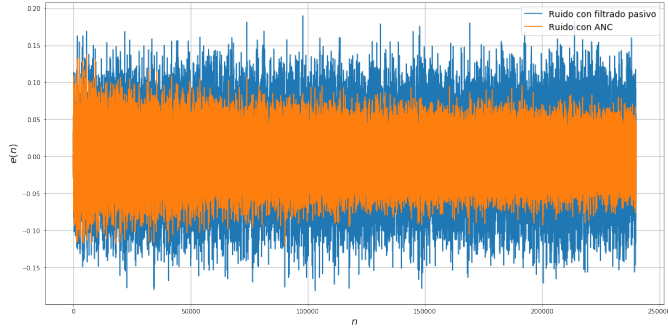


Fig. 17. Respuesta en frecuencia caminos secundarios alternativos

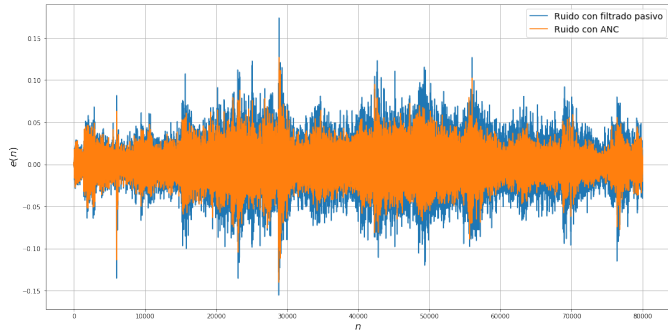


Fig. 18. Respuesta en frecuencia caminos secundarios alternativos

Nuevamente, los resultados no son del todo los esperados, debido a los problemas ya mencionados en la compensación del camino secundario (ver sección IV-C).

V. RESULTADOS

A. Variabilidad temporal de $P(z)$

Para evaluar la capacidad de adaptación del sistema, se simula con las mediciones de la cámara acústica y se modifica el modelo físico $P(z)$ en un instante de tiempo. El resultado se observa en la figura 19, y en la figura 20 se puede ver cómo evoluciona la atenuación.

B. Variabilidad temporal de $G(z)$

El algoritmo que se propone estima el camino secundario $G(z)$ fuera de línea, por ende, no puede seguir sus cambios. Dado que $G(z)$ es crítico para el rendimiento del sistema, se desea evaluar cuál puede ser la consecuencia de no modelarlo

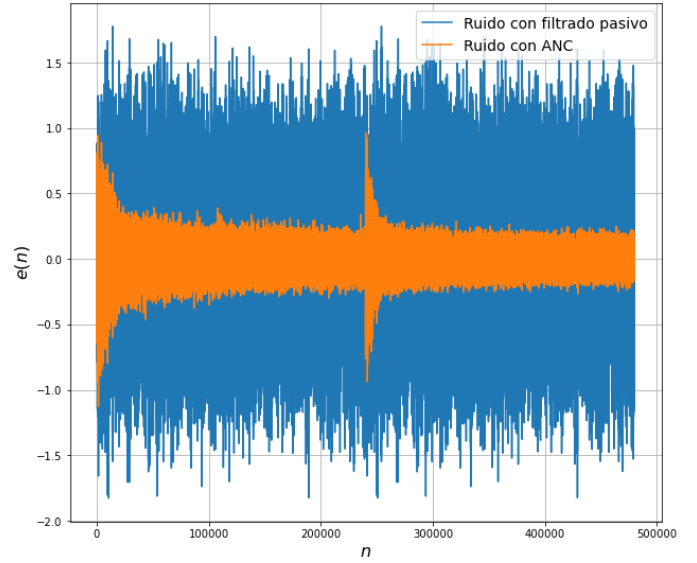


Fig. 19. Ruido $e(n)$

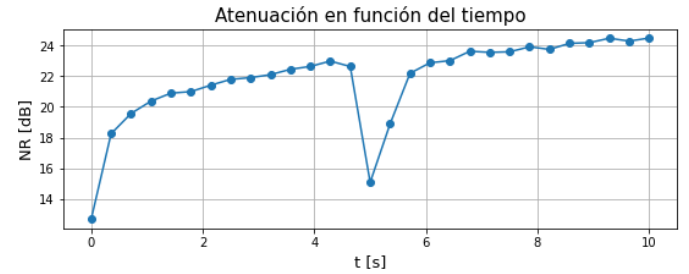


Fig. 20. Atenuación

en tiempo real. Para esto, se cambia el modelo físico en un instante de tiempo.

El resultado se observa en la figura 21, y en la figura 22 se puede ver cómo evoluciona la atenuación.

En conclusión, el sistema sigue operando como es de esperar incluso ante variaciones en el camino acústico.

C. Sensibilidad de $G(z)$

Uno de los aspectos que afectan a la respuesta del camino acústico secundario $G(z)$, es cómo se coloca el auricular en el oído. Si los cambios entre escenarios son significativos, estimar el camino secundario fuera de línea no sería una solución práctica viable, y sería necesario adaptar el sistema a la circunstancia. En la figura 23 se ven diferentes caminos $G(z)$ medidos en diferentes personas.

Dado que para diferentes personas, según cómo se coloquen el auricular, cambia la respuesta $G(z)$, una forma de solucionar esto con el algoritmo que realiza la estimación fuera de línea, es seleccionar aquella transferencia de entre las medidas que dé como resultado un sistema más robusto.

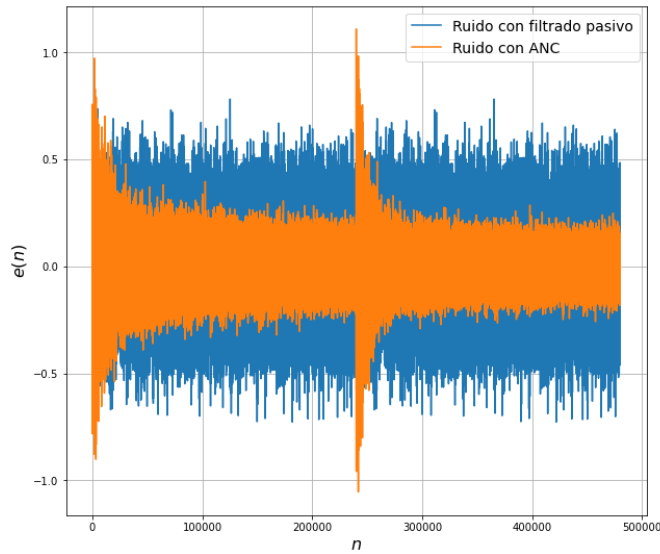


Fig. 21. Ruido $e(n)$

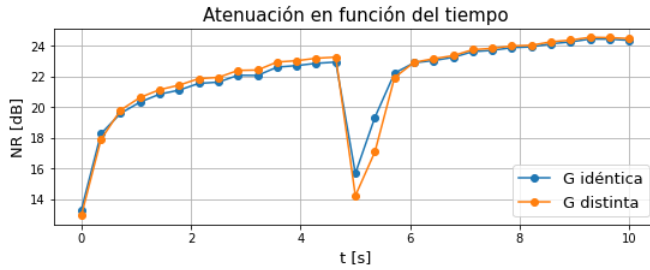


Fig. 22. Atenuación

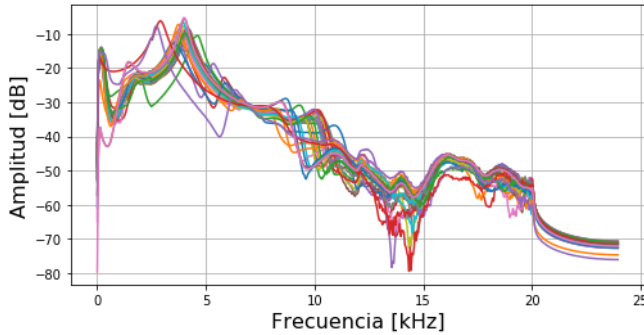


Fig. 23. Respuesta en frecuencia caminos secundarios alternativos

VI. CONCLUSIÓN Y FUTUROS DESAFÍOS

Se concluye el presente trabajo con un balance positivo sobre los resultados obtenidos. Cabe destacar en esta sección final, los propios resultados logrados por la marca de los auriculares Bose QC20, utilizando su propio algoritmo. En [4] se somete a este modelo a distintas pruebas de funcionamiento, y se obtienen resultados que marcan una atenuación promedio de entre 20 y 24dB, en la banda de frecuencia de funcionamiento del auricular (la cual está limitada hasta los 10kHz), y

para las bandas de frecuencia de mejor funcionamiento, se reportan 33dB de atenuación. Estos valores son cercanos a los presentados en este informe.

En lo que respecta a futuros desarrollos, como se mencionó en V-C, se propone la búsqueda de una $G(z)$ más genérica y robusta para contrarrestar el hecho de que la forma en que se coloque el auricular, o la persona que lo esté usando, afecte circunstancialmente a esta transferencia. Siendo $G(z)$ estimada fuera de línea, esto podría mejorar el funcionamiento del algoritmo ante un rango más amplio de escenarios. También se puede investigar la posibilidad de modificar el algoritmo para tener distinto comportamiento según la banda de frecuencia del ruido; ya se mencionó que lo propuesto tiene un buen desempeño para frecuencias entre 2 y 5kHz, pero para el resto de las bandas podría evaluarse la posibilidad de utilizar otro esquema que se comporte mejor, y obtenga mayor atenuación.

REFERENCES

- [1] S. Liebich, J. Fabry, P. Jax and P. Jax, "Acoustic path database for ANC in-ear headphone development", in *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics (ICA)*, DEGA. EAAA, Sep. 2019.
- [2] S. M. Kuo and D. R. Morgan, "Active noise control: a tutorial review", *Proc. IEEE*, vol. 8, no.6, pp. 943-973, Jun. 1999.
- [3] S. J. Elliott and P. A. Nelson, "Active noise control", *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 10, pp. 12-35, Oct. 1993.
- [4] "Bose QC20 Acoustic Noise Cancellation Review", *The Phonograph*.