

Evaluación subjetiva de la cancelación activa de ruido en auriculares

Autor: Maximiliano Malvicino (DNI 38267749)

TUTOR/A: Daniel Ottobre

COTUTOR/A: Mariano Girola

Evaluación subjetiva de la cancelación activa de ruido en auriculares

Malvicino, Maximiliano Raúl

1. Fundamentación e introducción

Los dispositivos portátiles, como smartphones y tablets, son ampliamente utilizados por todos los grupos de edad. Los jóvenes los usan, así como las personas mayores. Sirven para muchas aplicaciones diferentes, como escuchar música o hacer llamadas y conferencias. La contaminación acústica en la vía pública, vehículos de transporte, sitios de construcción, o instalaciones industriales afecta la calidad de la experiencia de escucha de los usuarios (Carlettia & Pedrielli, 2008).

Existen dos formas de reducir el ruido. La reducción pasiva usa materiales porosos para disminuir el ruido por absorción. Pero su implementación en auriculares es voluminosa, costosa e ineficaz en bajas frecuencias. La reducción activa usa el principio de superposición para cancelar las ondas sonoras del ruido. Los sistemas pasivos no son eficientes en bajas frecuencias ya que, debido a su naturaleza constructiva, no es posible fabricar material absorbente para sonidos cuyas longitudes de onda superen el tamaño de los auriculares. La cancelación activa (ANC) ofrece una solución prometedora, ya que según Cui et al. (2003) resulta efectiva para frecuencias menores a 500 Hz complementándose muy bien con los métodos pasivos. Consiste en un sistema que utiliza el principio de superposición para eliminar el ruido no deseado. Detecta el ruido no deseado con un micrófono, genera una señal de “anti-ruido” con la misma amplitud pero en fase opuesta, y combina esta señal con el ruido, lo que resulta en la cancelación de ambos sonidos.

Acorde a Kuo (1999), es importante que el sistema ANC sea digital. Esto implica que las señales se muestreen y procesen en tiempo real utilizando sistemas de procesamiento de señales digitales. Para esto se usa un algoritmo de filtro adaptativo que ajusta las características del anti-ruido generado de manera que se minimice el error entre la señal deseada y la cancelada. El algoritmo adaptativo más comúnmente utilizado en el control activo de ruido es el algoritmo de mínimos cuadrados medios (LMS, por sus siglas en inglés), el cual se realiza mediante un filtro transversal. En un filtro transversal, la señal de entrada se divide en múltiples caminos, cada uno de los cuales está ponderado por un coeficiente. Estos coeficientes son ajustados para lograr la respuesta deseada del filtro (Widrow & Stearns, 1985, pp. 16-18).

Este estudio se centra en la evaluación de la cancelación activa a través de pruebas subjetivas en los oyentes para determinar la efectividad de la ANC, la percepción de la reducción del ruido y la existencia de posibles interferencias destructivas que alteren la señal deseada. Esto nos permitirá comprender mejor cómo los usuarios perciben y utilizan la ANC en su vida cotidiana, así como identificar áreas de mejora en el diseño y desarrollo de esta tecnología.

En la sección 2, se determinan los procedimientos a seguir para lograr el objetivo. La sección 3 pretende establecer una base teórica del funcionamiento de la tecnología en cuestión, y asimismo analizar estudios previos. Luego se detalla el diseño de la investigación, que comienza en la sección 4.1 estableciendo las variables que se van a estar manipulando. Ang et al. (2017) sugiere fuertemente que es necesario considerar entornos con ruido real en estudios futuros para obtener una evaluación más precisa de los auriculares ANC. Por este motivo, en la sección 4.2 se proponen diferentes fuentes de ruido. Para concluir el diseño de la investigación, en la sección 4.3 se describe la metodología para llevar a cabo el test subjetivo. En la sección 5 se realiza la validación de las pruebas para asegurar la confiabilidad de los datos obtenidos. En la sección 6 se presenta un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos. Además, en la sección 7, se presentan las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos. Finalmente, en la sección 8, se discuten las posibles líneas de investigación futuras.

2. Objetivos general y específicos

Como objetivo general, se procura evaluar si la ANC cumple con su función de reducir el ruido ambiental sin producir interferencias que afecten la calidad del sonido.

Objetivos específicos:

- Generar fragmentos de audio que representen las señales deseadas por los usuarios de auriculares y grabaciones de ruido de fondo de posibles situaciones de escucha.
- Seleccionar y preparar el recinto donde se llevarían a cabo las pruebas auditivas, así como el equipamiento a utilizar.
- Determinar el orden y el nivel SPL que tendrán los fragmentos de señales deseadas y el ruido de fondo en el punto de escucha y realizar el test subjetivo.
- Buscar posibles repercusiones de la ANC en la calidad del sonido.
- Determinar rango de nivel de ruido de fondo para el cual el sistema ANC cumple su función de suprimir el ruido de fondo.

3. Marco teórico y estado del arte

Existen sistemas digitales que emplean conversores AD-DA para procesar la señal y generar la cancelación, y sistemas analógicos que utilizan circuitos electrónicos convencionales.

3.1. ANC analógicos

Un micrófono que es colocado fuera del auricular capta el ruido ambiental antes de que llegue al oído del usuario. Esta señal de ruido se interpreta como aquella que debe ser cancelada. Se genera una señal de polaridad invertida. A esta señal se le aplica un retardador para compensar el tiempo que tarda el ruido en llegar desde el punto donde se ubica el micrófono hasta el oído. Finalmente, la señal resultante se añade directamente a la música antes de que llegue al oído del usuario. El esquema de la figura 1 a continuación representa el sistema.

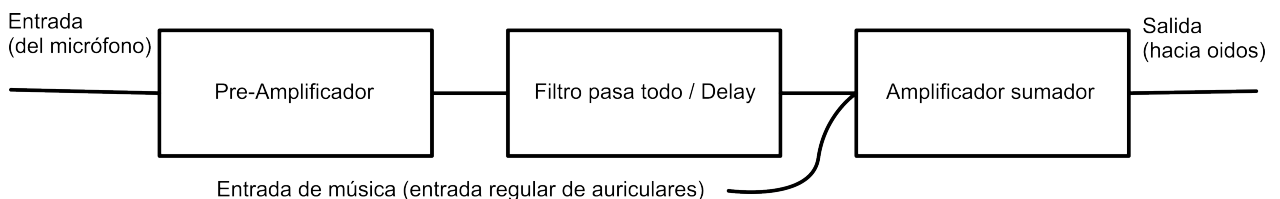


Figura 1: Diagrama de sistema ANC analógico por Kotlicki y McKenna (2016).

3.2. Filtros adaptativos

Un algoritmo LMS (Least Mean Square, por sus siglas en inglés) es un método adaptativo utilizado para ajustar los coeficientes de un filtro digital con el objetivo de minimizar el valor cuadrático medio de una señal de error. Este proceso de minimización se realiza mediante la actualización iterativa de los coeficientes del filtro basándose en el error actual y las entradas del filtro.

Rees y Elliott (2006) mencionan varias variaciones del LMS, incluyendo el “filtered-X LMS” (FXLMS), que es una versión adaptada para aplicaciones de control activo de ruido, y que tiene en cuenta la respuesta del sistema (o planta) a través del cual la señal de control es aplicada. Los siguientes son los algoritmos propuestos.

Command-FXLMS ajusta la señal de error hacia un valor de comando dado, en lugar de cero, para controlar el espectro objetivo a una sola frecuencia. Aunque es robusto a errores de amplitud

en el modelo de la planta, requiere un esfuerzo de control excesivo cuando la señal de comando está desfasada respecto a la señal de perturbación.

Internal Model FXLMS busca reducir el esfuerzo de control al asegurarse de que la señal de comando y la señal de perturbación estén lo más alineadas en fase posible. Aunque mejora en términos de esfuerzo de control, es muy sensible a errores de amplitud en el modelo de la planta cuando la señal de comando es mucho mayor que la de perturbación.

Phase Scheduled Command-FXLMS (PSC-FXLMS) combina las fortalezas de los dos algoritmos anteriores. Ajusta la fase de la señal de comando según la fase de la perturbación modelada, mientras que su amplitud es fijada independientemente, lo que limita la influencia de errores de magnitud en el modelo de la planta. Sin embargo, es susceptible a errores de fase cuando la amplitud del comando es grande comparada con la perturbación.

Chang y Luoh (2007) proponen un algoritmo llamado algoritmo NFXLMS (Neural-based Filtered-X Least Mean Square) que supera al algoritmo FXLMS en la cancelación de ruido no lineal y de banda ancha, y que mejora la convergencia del algoritmo. La figura 2 que sigue muestra un esquema de la red neuronal empleada.

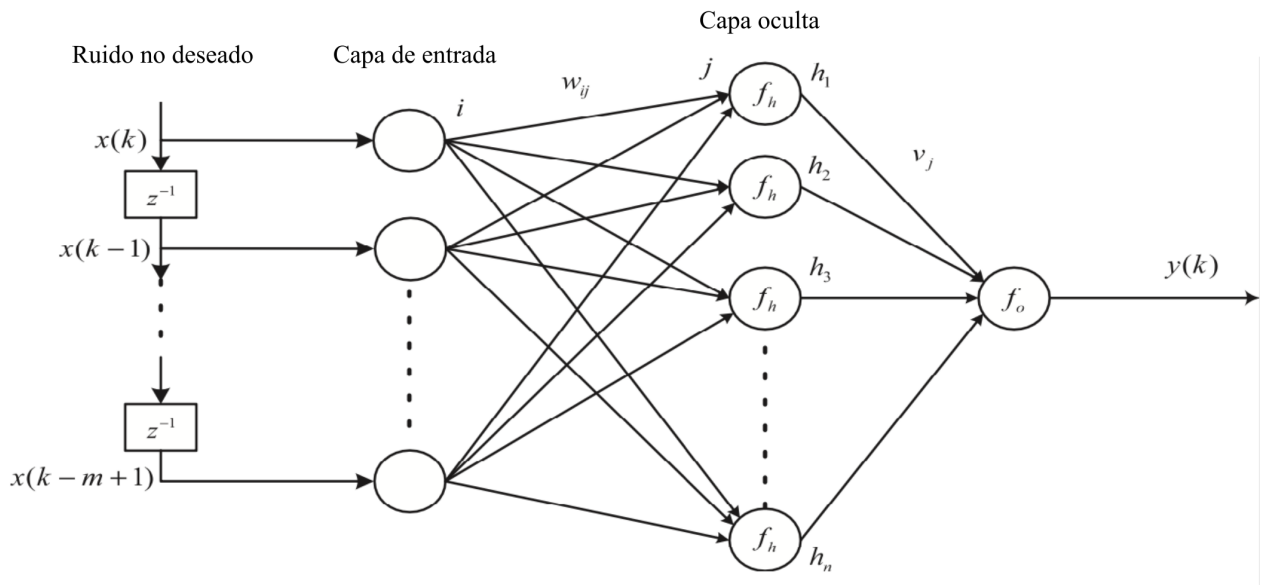


Figura 2: Arquitectura de red neuronal NFXLMS por Chang y Luoh (2007, p. 3).

La capa de entrada está compuesta por nodos que representan las señales de entrada al sistema. Cada nodo en esta capa corresponde a una característica o parámetro del sistema que se utiliza para modelar y controlar el ruido no deseado. En el artículo, mencionan que la red propuesta utiliza 4 nodos de entrada, lo que significa que hay 4 parámetros de entrada que se utilizan para caracterizar el ruido y el entorno. La capa oculta realiza los cálculos y procesamiento intermedios de la red neuronal. Cada nodo en esta capa toma como entrada la combinación lineal de los valores de salida de los nodos en la capa de entrada, multiplicados por los pesos correspondientes, y aplica una función de activación no lineal a esta suma ponderada. En el caso del algoritmo NFXLMS, esta capa oculta consta de 6 nodos, como se menciona en el artículo. En la capa de salida, cada nodo toma como entrada la combinación lineal de los valores de salida de los nodos en la capa oculta, multiplicados por los pesos correspondientes, y aplica una función de activación no lineal. En el algoritmo NFXLMS, esta capa de salida consta de un solo nodo.

Hay dos tipos de sistemas que usan filtros adaptativos: con retroalimentación y de avance. Los sistemas de control de avance detectan una señal de ruido de referencia, mientras que en los sistemas de retroalimentación esta señal de referencia se desconoce (Salmasi et al., 2011).

3.3. ANC con retroalimentación

En un ANC digital de retroalimentación, se utiliza un micrófono colocado dentro del auricular para capturar el sonido combinado de la música y el ruido externo que llega al oído del usuario. Esta señal combinada se compara con la señal de audio deseada, y cualquier diferencia se interpreta como ruido que debe ser cancelado. Se genera una señal de anti-ruido que se agrega a la señal de audio para cancelar el ruido percibido.

El principio básico del ANC adaptativo es estimar el ruido principal que se va a cancelar y usarlo como señal de referencia $x(n)$ para el filtro adaptativo $W(z)$. Como se muestra en la figura 3, la señal secundaria $y(n)$ se calcula a partir de la señal de error $e(n)$ medida por el sensor de error para sintetizar la señal de referencia $x(n)$. Los coeficientes del filtro $W(z)$ se actualizan mediante el algoritmo de mínimos cuadrados filtrados (FXLMS) en el tiempo n .

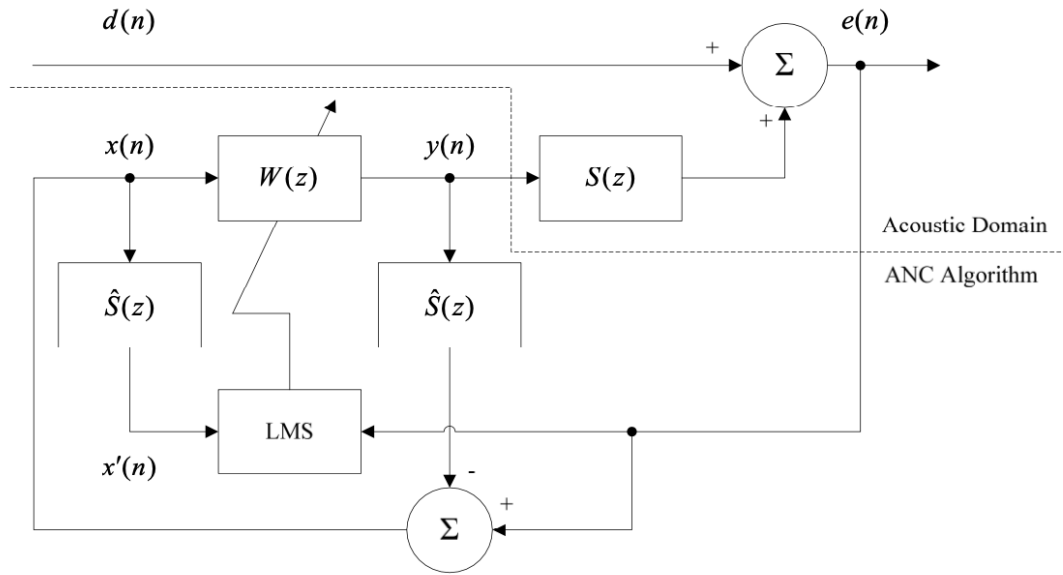


Figura 3: Diagrama de bloques de ANC retroalimentado por Kuo et al. (2018, p. 3).

Los sistemas ANC tienen una latencia inherente entre la adquisición del ruido y la emisión de la señal de cancelación (Liebich et al., 2016).

La señal de ruido ambiental es atenuada pasivamente por los auriculares y percibida como $d'(t)$ dentro del canal auditivo. Para cancelar esta perturbación, el controlador crea una señal de cancelación que interfiere con $d'(t)$ dejando la señal de error acústico $e'(t) = S(s) D(s) - T(s) N(s)$, donde $D(s)$ es la señal de ruido ambiental que se quiere cancelar, $N(s)$ representa el ruido de medición, (es decir, cualquier ruido adicional que puede afectar la detección de la señal de ruido), y $S(s)$ y $T(s)$ son funciones de sensibilidad y de sensibilidad complementaria.

Pero en los sistemas de control reatrolimentados se debe verificar la “ecuación del dilema fundamental” que implica que no es posible minimizar simultáneamente $S(s)$ y $T(s)$, ya que $S(s) + T(s) = 1$. Ante esta situación, estudios como el de Liebich et al. (2016) investigan controladores de retroalimentación fija, proponiendo la síntesis \mathcal{H}_∞ de sensibilidad mixta.

3.4. ANC de avance (o retroalimentación directa)

En un ANC digital con feedforward, el micrófono no se coloca dentro del auricular, sino que se sitúa fuera del mismo, capturando el sonido ambiental antes de que llegue al oído del usuario. Esta señal capturada se compara con la señal de audio deseada y se cancela la diferencia. El objetivo es que la señal de anti-ruido cancele el ruido antes de que llegue al oído, de modo que el usuario solo perciba la señal de audio deseada.

Los algoritmos tradicionales usan modelos complejos del ruido de fondo y grandes estructuras de filtro de control, lo que puede ser lento para adaptarse y computacionalmente intensivo. Pawelczyk (2000) utiliza solo una estimación del retardo discreto del ruido de fondo, lo que acelera significativamente el procesamiento y reduce la sensibilidad a los cambios el ruido de fondo. Su algoritmo utiliza principalmente bancos de Phase Shifter para controlar el ruido de banda estrecha de manera efectiva con menos parámetros en comparación con los filtros tradicionales. En vez de un filtro LMS, utiliza mínimos cuadrados retardados (DLMS). Los resultados demuestran la efectividad del algoritmo propuesto que proporciona una rápida convergencia y un control efectivo del ruido, aunque se base en un modelo simplificado del ruido de fondo.

4. Diseño de la investigación

La cancelación activa en auriculares es una tecnología ampliamente utilizada que pretende mejorar la experiencia auditiva al reducir el ruido ambiental. Sin embargo, la efectividad puede variar significativamente según el diseño del auricular, la calidad del hardware y las preferencias individuales del usuario. Este estudio investiga la percepción de la eficacia de la aplicación a través de un enfoque experimental subjetivo. Se expone a participantes voluntarios a diferentes condiciones de ruido y música mientras usan auriculares. Se les pide que evalúen la calidad del sonido, la reducción de ruido percibida y su nivel de satisfacción con la experiencia auditiva.

En esta investigación se plantea un diseño experimental de alcance correlacional en el cual las siguientes variables se ven involucradas.

4.1. Variables

- Uso o no de ANC (objetiva, categórica, independiente).
- Nivel de ruido de fondo generado (objetiva, continua, independiente).
- Nivel de ruido de fondo percibido por individuo usando auriculares con ANC (subjetiva).
- Calidad del sonido percibida por un individuo usando auriculares con ANC (subjetiva).

4.2. Estímulos de ruido generado

Kuo et al. (2018, p. 3) proponen utilizar sonido natural en lugar de ruido blanco para el modelado de la vía secundaria. Por lo tanto, se consideran como potenciales fuentes de ruido que puedan afectar la experiencia de los usuarios de auriculares aquellas provenientes del tráfico.

El ruido del tráfico suele tener un espectro de frecuencias amplio, predominando en las bajas y medias frecuencias hasta 1000 Hz, debido al ruido de los motores y el contacto de los neumáticos con la carretera. En tráfico terrestre el nivel de potencia (SWL) puede llegar a ser de hasta 100 dB y depende de la velocidad y la aceleración de las fuentes (Can et al., 2010).

Para el caso de aplicación de esta investigación, los sujetos se encuentran inmersos en un área urbana cerca de las fuentes de ruido. Con lo cual, se espera que algunos ruidos percibidos sean impulsivos y que haya ruido de fondo constante, debido a fuentes lejanas.

Para simular una situación de contaminación sonora, se propone grabar con un micrófono de medición señales de 1 minuto de duración en distintos puntos. Luego, se tomarán fragmentos de los 10 segundos que tengan la información sonora más relevante y representativa de cada situación. Se propone realizar grabaciones de ruido de fondo que representen la siguiente situación: sujeto escuchando música en un colectivo que recorre una calle transitada.

Para garantizar una situación de control, es imprescindible que el recinto donde se lleve a cabo el experimento tenga un nivel de ruido de fondo de 15 dB SPL menor que el nivel del ruido emitido por el sistema de monitoreo en el punto de escucha.

4.3. Diseño de prueba subjetiva: Encuesta y muestra

El test subjetivo consiste en una prueba auditiva para evaluar la efectividad de la cancelación activa comparando la percepción de diferentes usuarios de auriculares.

Según la norma BS.1284-2 de International Telecommunication Union (2019), se determina que la muestra deberá contar con al menos 10 individuos expertos ya sea por conocimiento en el campo o por entrenamiento auditivo. Asimismo, la muestra deberá contar con al menos 20 individuos no expertos.

En una primera instancia se le pide al sujeto que brinde sus datos demográficos y se le pregunta si tiene conocimientos en el campo. Luego, se lo hace escuchar por medio de los auriculares una señal de 10 segundos perteneciente a un fragmento musical. De manera simultánea, eventualmente se reproduce por un sistema de monitoreo la señal de ruido correspondiente a la situación dada en la sección 4.2.

Se diseña una encuesta para que el individuo registre las apreciaciones dadas en la tabla 1.

Variable	1	2
Nivel de ruido de fondo	Poco ruido	Mucho ruido
Calidad del sonido	Baja calidad	Alta calidad

Tabla 1: Posibles apreciaciones de cada sujeto.

En el siguiente enlace <https://forms.gle/DxoRxnZtbvwvkUyB9> se puede realizar una encuesta de prueba, idéntica a la que respondería cada sujeto.

El sujeto va a realizar 4 escuchas en un orden aleatorio. En cada una se va a variar el nivel del ruido de fondo generado y se va a activar y desactivar el sistema ANC del auricular. Se pueden identificar entonces los siguientes 4 casos posibles por individuo.

Escucha	Estado de ANC	Ruido generado
Caso 1	Apagado	Sin ruido generado
Caso 2	Apagado	Con ruido generado
Caso 3	Encendido	Sin ruido generado
Caso 4	Encendido	Con ruido generado

Tabla 2: Posibles casos de escucha por sujeto.

5. Validación de las pruebas

Para validar las mediciones, se propone analizar la consistencia de las respuestas de los sujetos. Es posible que haya individuos con audición sensible que perciban que hay “mucho ruido” sin estar en presencia del estímulo de ruido. Pero no es posible que perciban “mucho ruido” sin el estímulo y “poco ruido” cuando se está generando ruido adicionado. En tal caso, serán excluidos por respuesta inconsistente. La tabla 3 a continuación muestra las respuestas de un sujeto que se excluiría según este criterio.

Escucha	Ruido percibido	Descripción
Caso 1	2	Mucho ruido
Caso 2	1	Poco ruido
Caso 3	1	Poco ruido
Caso 4	1	Poco ruido

Tabla 3: Ejemplo de sujeto a descartar por respuesta inconsistente.

Una vez desechados los outliers de la muestra, se procede a buscar una posible asociación entre las variables independientes y dependientes. Para esto, se llevan a cabo tablas de contingencia que relacionen las variables independientes con las dependientes.

Por un lado se relaciona el estado de la ANC (encendido o apagado) con el nivel de ruido percibido. Observar que una respuesta en la que el sujeto indica que hay poco ruido pero el nivel del estímulo es nulo no sería representativa, porque su respuesta no dependería del funcionamiento de la ANC. Para que las respuestas sean representativas, es necesario dejar fija la variable “nivel de ruido generado”. Por lo tanto, solo se consideran las respuestas de los sujetos en las que se está generando un estímulo de ruido de fondo añadido (casos 2 y 4).

Por otro lado, se relaciona estado de la ANC con la calidad de sonido percibida. Nótese que una respuesta en la que haya demasiado ruido de fondo, podría confundir al sujeto en la evaluación de la calidad de sonido. Por lo tanto, solo se consideran las respuestas de los sujetos en las que el nivel del estímulo es nulo (casos 1 y 3).

6. Análisis de los resultados: Aplicaciones estadísticas

Se ha investigado la presencia de diferencia entre las variables independientes y las dependientes usando el test de χ^2 tras preparar las tablas de contingencia. El test χ^2 es usado para determinar si hay alguna variación entre los dos grupos independientes respecto a la característica analizada.

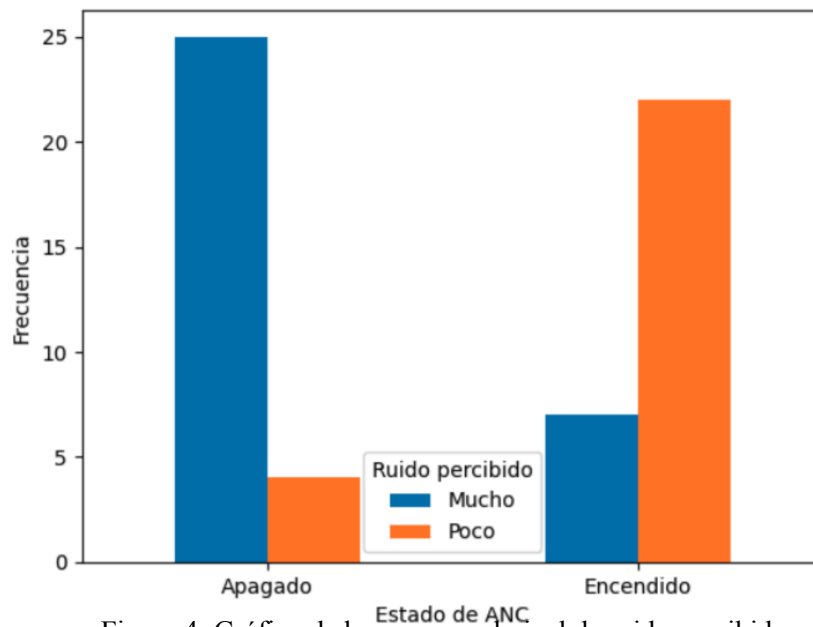


Figura 4: Gráfico de barras para el nivel de ruido percibido.

Ruido percibido / Estado de ANC	Mucho	Poco	Total
Apagado	25 (43.1 %)	4 (6.9 %)	29 (50.0 %)
Encendido	7 (12.07 %)	22 (37.93 %)	29 (50.0 %)
Total	32 (55.17 %)	26 (44.83 %)	58 (100.0 %)

Tabla 4: Tabla de contingencia para el nivel de ruido percibido.

En cuanto a la asociación del ruido de fondo percibido con el estado de la ANC (encendido o apagado), el nivel de ruido resulta menor cuando el sistema está encendido. La diferencia relacionada al estado del sistema ANC resultó significativa ($\chi^2 = 20,147, p < 0,05$).

En cuanto a la asociación de la calidad de sonido percibida con el estado de la ANC (encendido o apagado), la calidad resulta menor cuando el sistema está encendido. La diferencia relacionada al estado del sistema ANC resultó significativa ($\chi^2 = 8,861, p < 0,05$).

7. Conclusiones

En primer lugar, se espera que las pruebas subjetivas permitan determinar la efectividad percibida de la ANC en la reducción del ruido ambiental. Se busca analizar la encuesta para ver si los participantes reportan una mejora significativa en la calidad de la experiencia auditiva al utilizar dispositivos equipados con ANC en entornos ruidosos, como calles transitadas, espacios de trabajo compartidos o transporte público.

Además, se busca evaluar la percepción de los usuarios sobre la interferencia destructiva y posibles artefactos asociados con la ANC. Se espera que los participantes informen sobre la presencia o ausencia de efectos no deseados, como distorsión del sonido, sensación de presión en los oídos o alteración de la calidad de la música reproducida.

8. Líneas futuras de investigación

Una posible línea de investigación a futuro podría incluir la simulación para ejecutar algoritmos de filtrado, con un enfoque particular en el algoritmo de Mínimos Cuadrados Medios (LMS, por sus siglas en inglés). Se podría desarrollar un software que simule la captación del ruido y su cancelación en una señal deseada mediante la implementación del algoritmo LMS. Para ello, se podría crear un script que tome una señal de audio deseada previamente grabada y simule la captación del ruido mediante una señal de ruido también previamente grabada. El algoritmo LMS se aplicaría para adaptar los coeficientes del filtro de manera iterativa, minimizando el error entre la señal deseada y la señal de salida del filtro. De esta forma, se podría predecir cómo el algoritmo LMS podría comportarse en la cancelación del ruido y comparar los resultados con los obtenidos en estudios subjetivos.

Por otro lado se propone realizar una investigación adicional del estudio subjetivo, utilizando estímulos de ruido de fondo que posean diferentes espectros de frecuencia. El rango de frecuencias del habla humana se encuentra entre 500 y 4000 Hz y en lugares concurridos se caracteriza por ser de carácter continuo. En lugares como restaurantes o bares, los niveles de presión sonora pueden variar entre 60 y 75 dB (Scott, 2024). Este podría ser un área de estudio de interés, para verificar la efectividad de la cancelación activa en frecuencias medias.

9. Cronograma

A continuación, se presenta un desglose detallado de las fases del proyecto, las tareas correspondientes y los plazos estimados para su realización.

Actividad/Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Generación de señales primarias	X															
Grabaciones de ruido de fondo	X															
Preparación de recinto y equip.		X	X													
Verificación del test		X	X													
Realización del test		X	X													
Análisis estadístico de resultados				X												
Análisis correlacional de resultados				X												

Figura 5: Cronograma detallado de las etapas y actividades del proyecto de investigación.

10. Referencias

- Ang, L. Y. L., Koh, Y. K., & Lee, H. P. (2017). The performance of active noise-canceling headphones in different noise environments. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X17301378>
- Can, A., Leclercq, L., Lelong, J., & Botteldooren, D. (2010). Traffic noise spectrum analysis: Dynamic modeling vs. experimental observations. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X10000836>
- Carlettia, E., & Pedrielli, F. (2008). Subjective evaluation of a simple active noise control system mounted inside an earth moving machine cab. <https://www.ingentaconnect.com/content/ince/ncej/2009/00000057/00000006/art00005#>
- Chang, C.-Y., & Luoh, F.-B. (2007). Enhancement of active noise control using neural-based filtered-X algorithm. https://www.academia.edu/57137920/Enhancement_of_active_noise_control_using_neural_based_filtered_X_algorithm
- Cui, J., Behar, A., Wong, W., & Kunov, H. (2003). Insertion loss testing of active noise reduction headsets using acoustic fixture. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X03000677?via%3Dihub>
- International Telecommunication Union. (2019). ITU-R BS.1284-2 Métodos generales para la evaluación subjetiva de la calidad del sonido [ITU-R BS.1284-2]. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1284-2-201901-I!!PDF-E.pdf
- Kotlicki, A., & McKenna, J. (2016). *Active Noise-Cancelling Circuit*. Consultado el 27 de abril de 2024, desde https://phys420.phas.ubc.ca/p420_16/bartok1/sound_project.html
- Kuo, S. M. (1999). Active noise control: A tutorial review. https://www.researchgate.net/publication/2985088_Active_noise_control_A_tutorial_review
- Kuo, S. M., Chen, Y.-R., Chang, C.-Y., & Lai, C.-W. (2018). Development and Evaluation of Light-Weight Active Noise Cancellation Earphones. <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/7/1178>
- Liebich, S., Anemüller, C., Vary, P., & Jax, P. (2016). Active noise cancellation in headphones by digital robust feedback control. https://www.researchgate.net/publication/312430622_Active_noise_cancellation_in_headphones_by_digital_robust_feedback_control
- Pawelczyk, M. (2000). Feedforward Algorithms with Simplified Plant Model for Active Noise Control. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.4141>
- Rees, L., & Elliott, S. (2006). Adaptive algorithms for active sound-profiling. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1597273>
- Salmasi, M., Mahdavi-Nasab, H., & Pourghassem, H. (2011). Comparison of Feed-Forward and Recurrent Neural Networks in Active Cancellation of Sound Noise. https://www.researchgate.net/publication/224248357_Comparison_of_Feed-Forward_and_Recurrent_Neural_Networks_in_Active_Cancellation_of_Sound_Noise
- Scott, G. (2024). *Soundprint*. Consultado el 11 de junio de 2024, desde <https://www.soundprint.co/about/research>
- Widrow, B., & Stearns, S. D. (1985). *Adaptive signal processing*. Prentice Hall. <https://abrarhashmi.files.wordpress.com/2016/02/bernard-widrow-peter-n-stearns-adaptive-signal-processing-prentice-hall-1985.pdf>