

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 del 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. Finalmente, en las secciones 5 y 6 se realiza la validación de las pruebas y el análisis de los resultados respectivamente.

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 (canal primario).
- Generar grabaciones de ruido de fondo de posibles situaciones de escucha (canal secundario). Ver sección 4.2.
- Seleccionar y preparar el recinto donde se llevarían a cabo las pruebas auditivas, así como el equipamiento a utilizar.
- Verificación del test: Determinar el orden y el nivel SPL que tendrán los fragmentos de señales deseadas y el ruido de fondo en el punto de escucha.
- Realizar el test subjetivo.
- Análisis estadístico de los resultados: Descartar outliers.
- Análisis correlacional de los resultados: búsqueda de posibles repercusiones de la ANC en la calidad del sonido.
- Análisis correlacional de los resultados: 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

Los sistemas de cancelación activa buscan limpiar la señal de ruido. Se tienen sistemas digitales que emplean conversores AD-DA para procesar la señal y generar la señal “antinoise”, mientras que los sistemas analógicos utilizan circuitos electrónicos convencionales para lograr el mismo objetivo.

3.1. ANC analógicos

Un micrófono externo 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 un sistema de cancelación activa analógico.

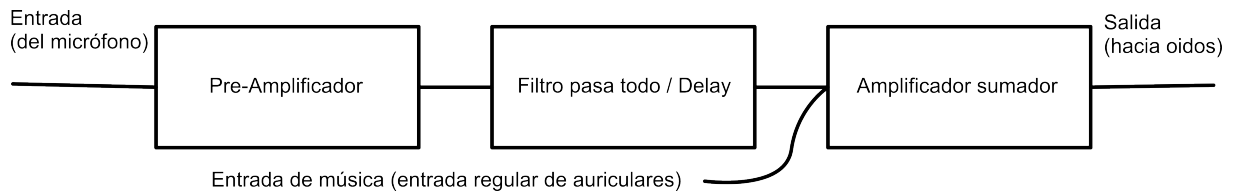


Figura 1: Diagrama de bloques por Kotlicki y McKenna (2016).

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 específica del LMS 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: Este algoritmo 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) para controlar el ruido no lineal en sistemas ANC 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 a continuación muestra un esquema de la arquitectura de la red neuronal empleada.



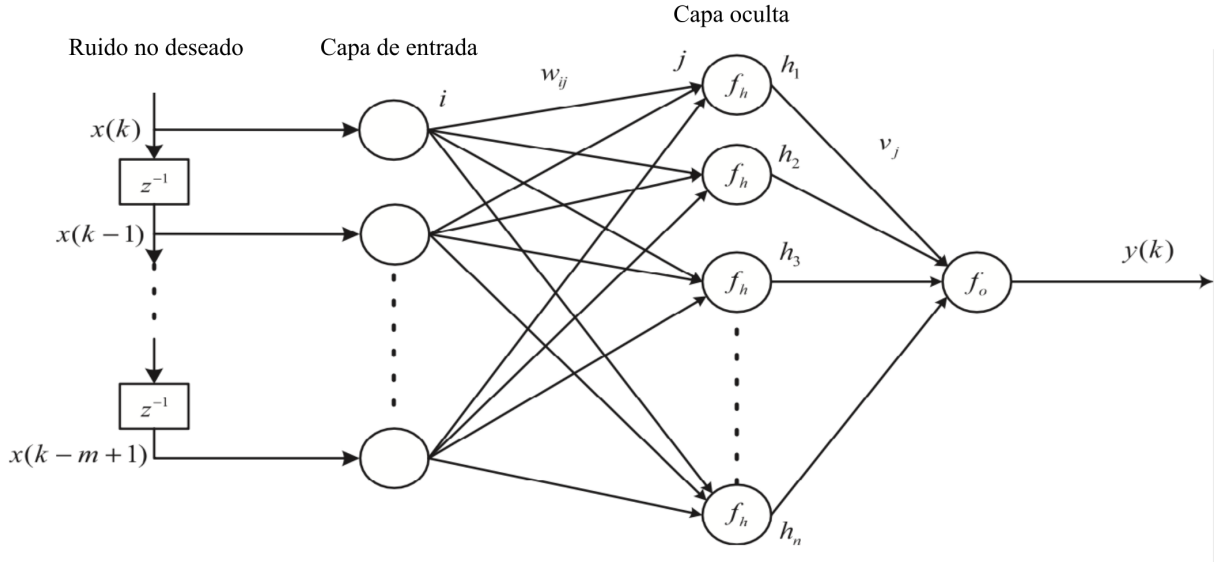


Figura 2: Arquitectura de red neuronal Chang y Luoh (2007, p. 3).

Capa de entrada: Esta capa consiste en nodos que representan las señales de entrada al sistema ANC (Active Noise Control). 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.

Capa oculta: La capa oculta es donde se realizan 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.



Capa de salida: La capa de salida genera la salida final del sistema ANC, que en este caso es la señal de anti-ruido que se combina con el ruido primario para lograr la cancelación de ruido. Cada nodo en esta capa 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 ANC digitales que usan filtros adaptativos: con retroalimentación y de avance. En los sistemas de control de avance, se detecta 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 (Cancelación Activa de Ruido) 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 , y L es la longitud del filtro.

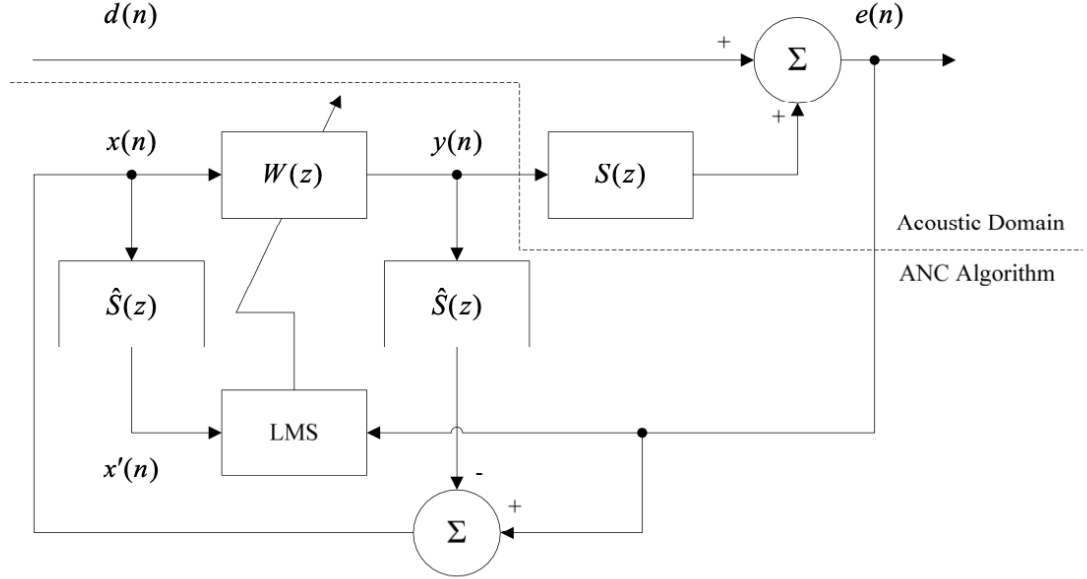


Figura 3: Diagrama de bloques por Kuo et al. (2018, p. 3).

La señal filtrada es

$$x'(n) = \sum_{m=0}^{M-1} \hat{s}_m(n) x(n-m) \quad (1)$$

donde $(m = 0, 1, \dots, M-1)$ son los coeficientes del filtro FIR $S(z)$ (con longitud M) que representan el ruido estimado $d(n)$.

El algoritmo ANC adaptativo de retroalimentación requiere el modelo de la vía secundaria $S(z)$ para actualizar $W(z)$.

El método más popular para estimar la vía secundaria es la identificación del sistema usando ruido blanco como la señal de excitación. Desafortunadamente, el ruido adicional no deseado para productos de electrónica de consumo como los auriculares. Por lo tanto, Kuo et al. (2018, p. 3) proponen utilizar sonido natural en lugar de ruido blanco para el modelado de la vía secundaria.

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 de ANC necesitan 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) según

$$\hat{w}(i+1) = \hat{w}(i) + \mu(i) \hat{r}(i) \hat{y}(i) \quad (2)$$

Donde:

$\hat{w}(i)$ es el vector de pesos del filtro

$\mu(i)$ es la tasa de aprendizaje, que controla la magnitud del ajuste en los pesos

$\hat{r}(i)$ es una señal de referencia

$\hat{y}(i)$ es la señal de error o salida del sistema

Además, este estudio emplea la conversión de frecuencia de muestreo para abordar problemas de control de ruido en rangos de frecuencia más amplios, con limitaciones solo por el procesador de señales disponible y la banda de paso de la fuente secundaria. Los resultados experimentales 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.

3.5. ANC con retroalimentación fija

Los sistemas ANC tienen una latencia inherente entre la adquisición del ruido y la emisión de la señal de cancelación. En la figura 4 a continuación se ilustra cómo los controladores de retroalimentación fija pueden atenuar disturbios con características constantes.

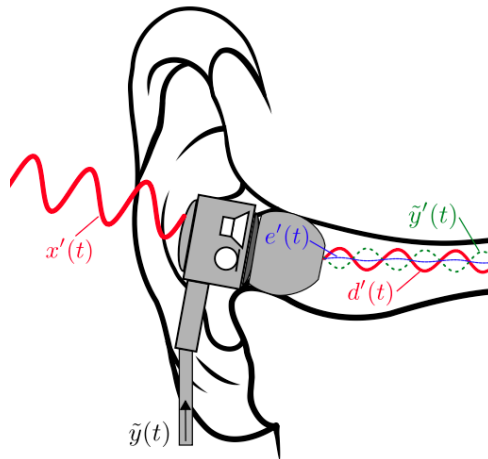


Figura 4: Estructura funcional de los auriculares internos ANC y las señales de sonido correspondientes, por Liebich et al. (2016).

La señal de ruido ambiental $x'(t)$ 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 $\tilde{y}'(t)$, que interfiere con $d'(t)$ y deja la señal de error acústico $e'(t)$ o

$$E(s) = S(s) D(s) - T(s) N(s) \quad (3)$$

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 introducido durante el proceso de medición

que puede afectar la precisión de la detección de la señal de perturbación), y $S(s)$ y $T(s)$ son las funciones de sensibilidad y de sensibilidad complementaria, respectivamente.

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

$$S(s) + T(s) = 1 \quad (4)$$

Liebich et al. (2016) investigaron controladores de retroalimentación fija digitales, proponiendo la síntesis \mathcal{H}_∞ de sensibilidad mixta. Los resultados mostraron una atenuación significativa del ruido en el rango de 70 a 325 Hz, con amplificación distribuida en un rango de frecuencias más amplio en comparación con estudios anteriores.

4. Diseño de la investigación

La cancelación activa de ruido (ANC) en auriculares es una tecnología ampliamente utilizada que pretende mejorar la experiencia auditiva al reducir el ruido ambiental. Sin embargo, la efectividad de la ANC 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 efectividad de la ANC en auriculares a través de un enfoque experimental subjetivo. Se expone a participantes voluntarios a diferentes condiciones de ruido y música mientras usan auriculares con ANC. 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

- $X_1 \equiv$ Uso o no de ANC (variable objetiva categórica dicotómica independiente).
- $X_2 \equiv$ Nivel de ruido de fondo generado (variable objetiva continua independiente).
- $X_3 \equiv$ Espectro del ruido de fondo (variable objetiva continua independiente).
- $Y_1 \equiv$ Nivel de ruido de fondo percibido por un individuo usando auriculares con ANC (variable subjetiva dependiente).
- $Y_2 \equiv$ Calidad del sonido percibida por un individuo usando auriculares con ANC (variable subjetiva eventualmente dependiente).

4.2. Fuentes de ruido

Para emular una situación de contaminación sonora, se propone grabar con un micrófono de medición señales de 1 minuto de duración en distintos puntos estratégicos. 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 las siguientes situaciones:

- Pasajero escuchando música en un tren o colectivo transitando una avenida transitada.
- Joven escuchando música en un parque, plaza o gimnasio.
- Ejecutivo haciendo una videoconferencia en un aeropuerto o un café con música funcional.

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 sujetos. La población está compuesta por los usuarios de auriculares.

Según la norma ITU-R 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.

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.

De esta forma, se procede a realizar la prueba para cada individuo. 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 (que puede ser un fragmento musical o parte de una conversación) que se condiga con cada una de las situaciones de la sección 4.2. De manera simultánea, eventualmente se reproduce por un sistema de monitoreo la señal de ruido correspondiente a la situación.

Se diseña una encuesta para que el individuo registre luego de cada situación las siguientes apreciaciones:

- Nivel de ruido de fondo - escala del 1 (poco ruido) al 5 (mucho ruido)
- Calidad del sonido deseado - escala del 1 (baja calidad) al 5 (alta calidad)

El sujeto va a realizar 8 escuchas de las situaciones propuestas en un orden aleatorio, pudiendo haber situaciones repetidas. De esta forma hacemos variar el espectro del ruido para generar validez de contenido del instrumento de medición.

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

En cada escucha 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, que se van a dar 2 veces cada uno:

1. Sin ANC y con muy poco ruido de fondo generado.
2. Sin ANC y con mucho ruido de fondo generado.
3. Con ANC y con muy poco ruido de fondo generado.
4. Con ANC y con mucho ruido de fondo generado.

De esta forma, es posible detectar outliers si el sujeto percibe baja calidad sonora en los casos 1 o 2, o si percibe mucho ruido en los casos 1 o 3.

Finalmente, con las 4 escuchas de los casos 3 y 4, se usan métodos estadísticos para determinar la eficacia del sistema ANC.

5. Validación de las pruebas

En esta sección, se presentan los resultados del test subjetivo realizado para validar la efectividad de la cancelación activa de ruido en los auriculares y la eventual distorsión de la calidad de sonido generada. Se llevaron a cabo diversas pruebas estadísticas para asegurar la confiabilidad y validez de los resultados obtenidos. En el anexo A se encuentra el código de Python con el que se realizó el análisis estadístico y todos los gráficos obtenidos.

5.1. Dot plot

Inicialmente, se realizó un dot plot que muestra la distribución de las respuestas de los participantes en la encuesta. Este gráfico permite visualizar la dispersión de los datos y destacar posibles anomalías en las respuestas. En la figura 5 a continuación se muestra uno de los dot plots realizados, donde se observan los datos ficticios del nivel de ruido percibido.

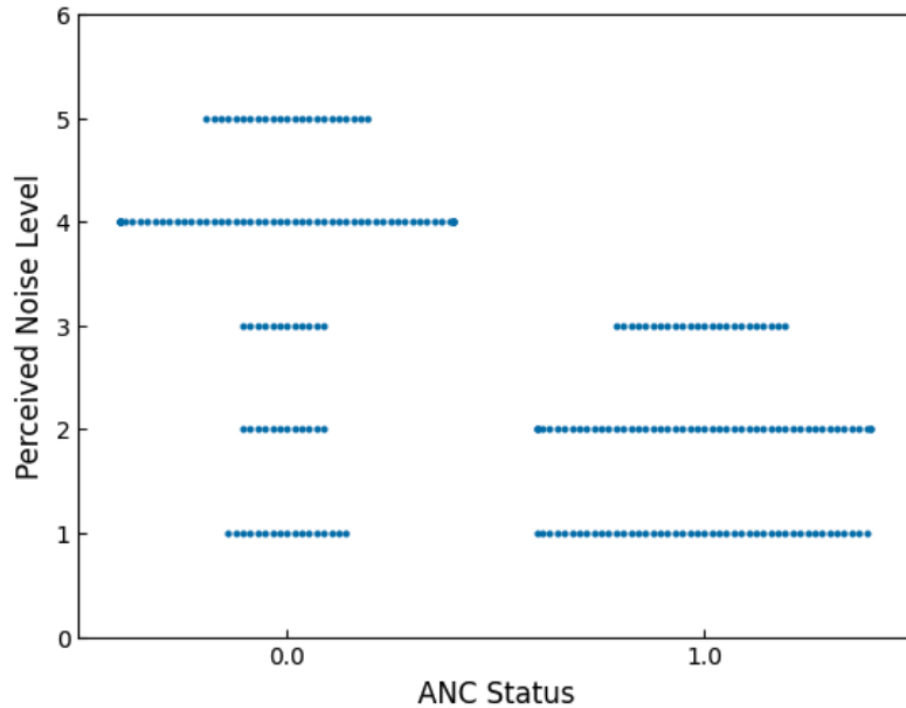


Figura 5: Dot plot del nivel de ruido percibido.

5.2. Box plot

Se realizó un box plot de los resultados del nivel de ruido y la calidad de sonido percibidos con el fin de detectar posibles outliers que pudieran afectar la fiabilidad de los datos. En la figura 6 a continuación, se muestra un box plot que resume la distribución de las respuestas de los participantes de manera visual.

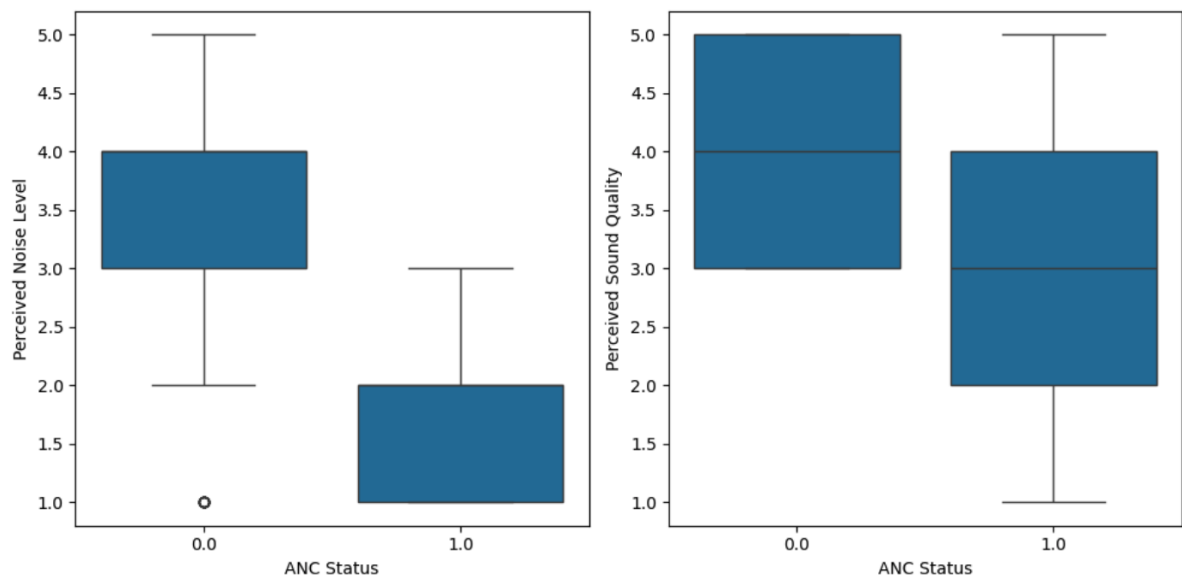


Figura 6: Box plot del nivel de ruido y calidad de sonido percibidos.

Se observa que el modelo matemático con el cuál se definen los rangos detectó un outlier en una respuesta del nivel de ruido percibido cuando la ANC no estaba activa.

5.3. Test de normalidad de Shapiro-Wilk e histograma

Se realizó un análisis de normalidad para los datos utilizando el test de Shapiro-Wilk. Este test se empleó para determinar si las respuestas de los participantes seguían una distribución normal. En la figura 7 que sigue, se presenta un histograma de las respuestas junto con los resultados del test de Shapiro-Wilk para evaluar la normalidad de los datos.

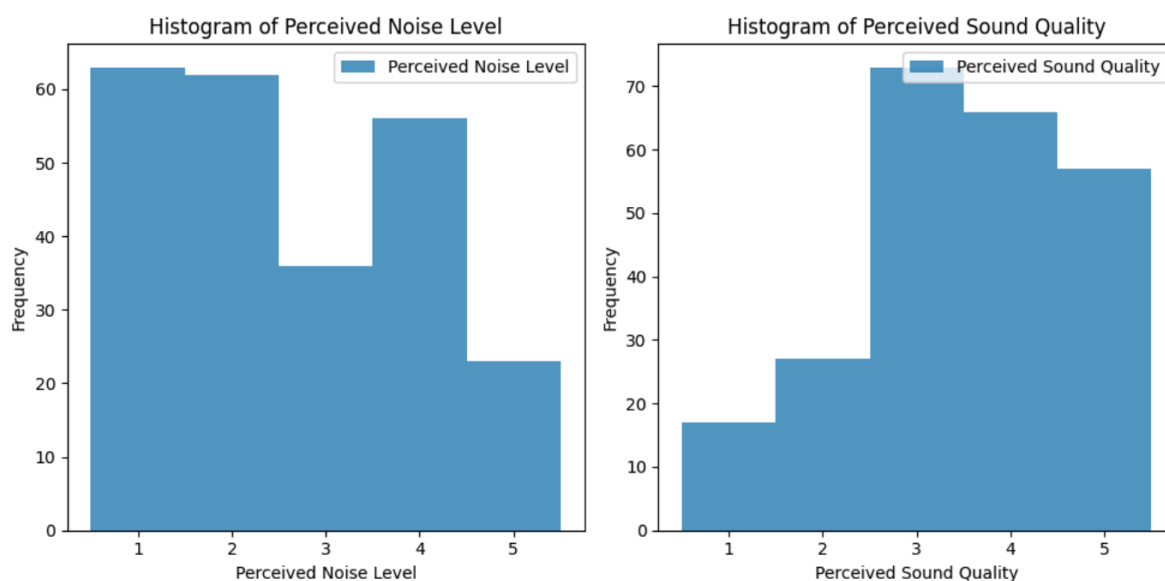


Figura 7: Histograma del nivel de ruido y calidad de sonido percibidos.

A partir de los datos aleatorios generados, se obtuvo un valor p muy cercano a cero. Esto indica que la probabilidad de que los datos sigan una distribución normal es muy baja.

6. Análisis de los resultados: Aplicaciones estadísticas

En esta sección, se analizan los resultados obtenidos de la encuesta realizada para evaluar la efectividad de la cancelación activa de ruido en los auriculares. Se aplican pruebas estadísticas para identificar posibles correlaciones entre las variables de interés y para determinar la significancia de dichas relaciones. En el anexo A se encuentra el código de Python con el que se realizó el análisis estadístico y todos los gráficos obtenidos.

6.1. Coeficiente de Correlación de Pearson

Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson para examinar la relación entre las variables relevantes. Los resultados obtenidos muestran coeficientes de correlación r negativos y p -valores muy cercanos a cero para ambas relaciones.

6.2. Modelos de regresión lineal

En las figuras 8 y 9 a continuación se muestra un scatter plot así como el modelo de regresión lineal generado para las relaciones entre el nivel de ruido y la calidad de sonido percibidos y el uso de la ANC.

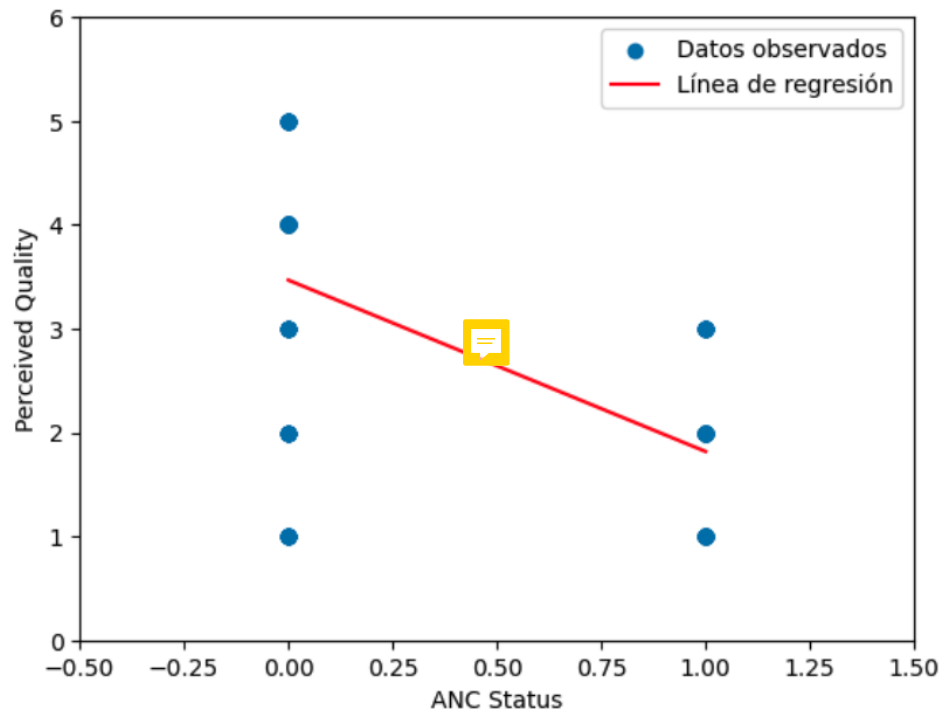


Figura 8: Regresión lineal para la relación entre el nivel de ruido percibido y el uso de la ANC.

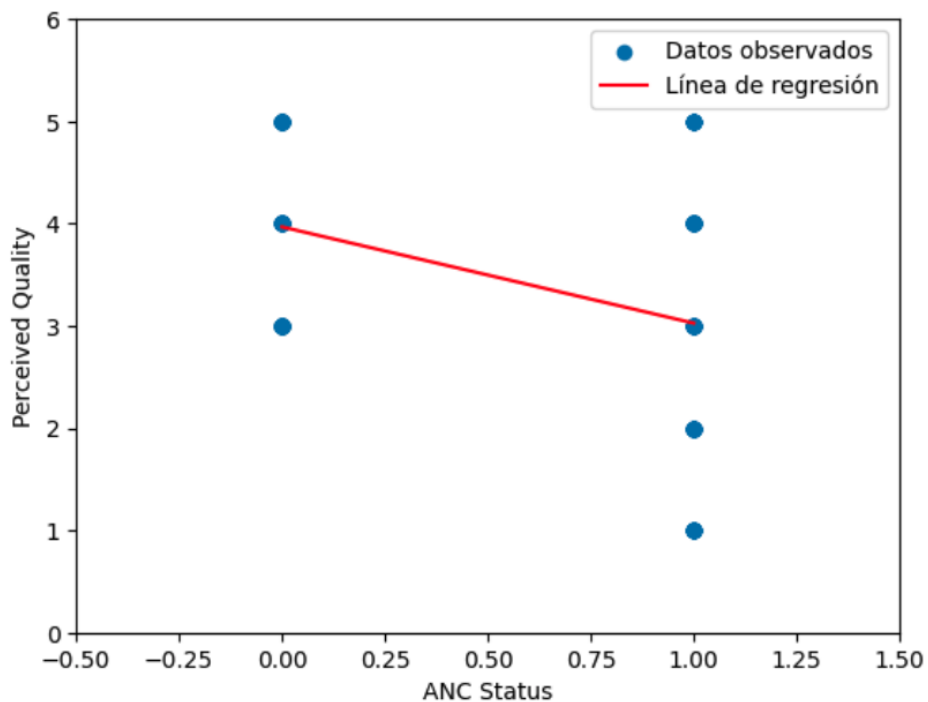


Figura 9: Regresión lineal para la relación entre la calidad de sonido percibida y el uso de la ANC.

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.

El coeficiente de correlación de Pearson negativo para la relación entre el estado de la ANC y el nivel de ruido percibido indica que existe una relación inversa entre estas dos variables. Es decir, cuando la ANC está activada, el nivel de ruido percibido por los usuarios tiende a disminuir.

De manera similar, el coeficiente de correlación de Pearson negativo para la relación entre el estado de la ANC y la calidad de sonido percibida también indica una relación inversa. Esto significa que cuando la ANC está activada, la calidad de sonido percibida por los usuarios podría empeorar producto de interferencias.

Los p -valores obtenidos en los tests de correlación fueron muy cercanos a cero. Esto sugiere que las relaciones no son significativas y pueden ser producto del azar. No obstante, es un comportamiento esperable, ya que los datos ficticios fueron generados de manera aleatoria.

8. Líneas futuras de investigación

Por último, se espera que los resultados obtenidos de estas pruebas subjetivas sirvan como base para futuras investigaciones y desarrollo tecnológico en el campo de la cancelación activa de ruido. La retroalimentación proporcionada por los usuarios permitirá identificar áreas de mejora en términos de diseño de hardware, algoritmos de procesamiento de señales y experiencia de usuario, con el objetivo de optimizar la efectividad y la usabilidad de la ANC en dispositivos portátiles.

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.

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 10: 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>
- 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
- 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>

A. Anexo

Subjective evaluation of active noise cancellation in headphones

```
In [ ]: import numpy as np
```

Dummy Data Generation

```
In [ ]: import random as rnd

samples_quantity = 30
measurements_per_sample = 8
```

$X_1 \equiv$ ANC Status

```
In [ ]: anc_status = np.empty((samples_quantity, measurements_per_sample))

for i in range(samples_quantity):
    for j in range(0, measurements_per_sample, 4):
        anc_status[i][j] = 0 # Sin ANC
        anc_status[i][j+1] = 0 # Sin ANC
        anc_status[i][j+2] = 1 # Con ANC
        anc_status[i][j+3] = 1 # Con ANC
```

$X_2 \equiv$ Measured Noise

```
In [ ]: import math

measured_noise_spl = np.empty((samples_quantity, measurements_per_sample))

noise_mean = 65
noise_deviation = 2
background_noise_spl = rnd.gauss(noise_mean, noise_deviation)
delta_spl = 15
generated_noise_spl = noise_mean + 3 * noise_deviation + delta_spl

for i in range(samples_quantity):
    for j in range(measurements_per_sample):
        background_noise_spl = rnd.gauss(noise_mean, noise_deviation)

        if (j % 2 == 0):
            measured_noise_spl[i][j] = background_noise_spl # Solo ruido
        else:
            measured_noise_spl[i][j] = 10 * math.log10(10 ** (background_
```

$Y_1, Y_2 \equiv$ Perceived Noise Level and Sound Quality

```
In [ ]: perceived_noise = np.empty((samples_quantity, measurements_per_sample))
perceived_quality = np.empty((samples_quantity, measurements_per_sample))
```

```

for i in range(samples_quantity):
    for j in range(0, measurements_per_sample, 4):
        perceived_noise[i][j] = rnd.randint(1, 4) # Sin ANC, poco ruido
        perceived_noise[i][j+1] = rnd.randint(4, 5) # Sin ANC, mucho ruido
        perceived_noise[i][j+2] = rnd.randint(1, 2) # Con ANC, poco ruido
        perceived_noise[i][j+3] = rnd.randint(1, 3) # Con ANC, mucho ruido

        perceived_quality[i][j] = rnd.randint(3, 5) # Sin ANC, poco ruido
        perceived_quality[i][j+1] = rnd.randint(3, 5) # Sin ANC, mucho ruido
        perceived_quality[i][j+2] = rnd.randint(2, 5) # Con ANC, poco ruido
        perceived_quality[i][j+3] = rnd.randint(1, 4) # Con ANC, mucho ruido

```

Results Dot Plots

```

In [ ]: import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt

x_1 = anc_status.ravel()
x_2 = measured_noise_spl.ravel()
y_1 = perceived_noise.ravel()
y_2 = perceived_quality.ravel()

```

$X_2 \equiv$ Measured Noise Level Dot Plot

```

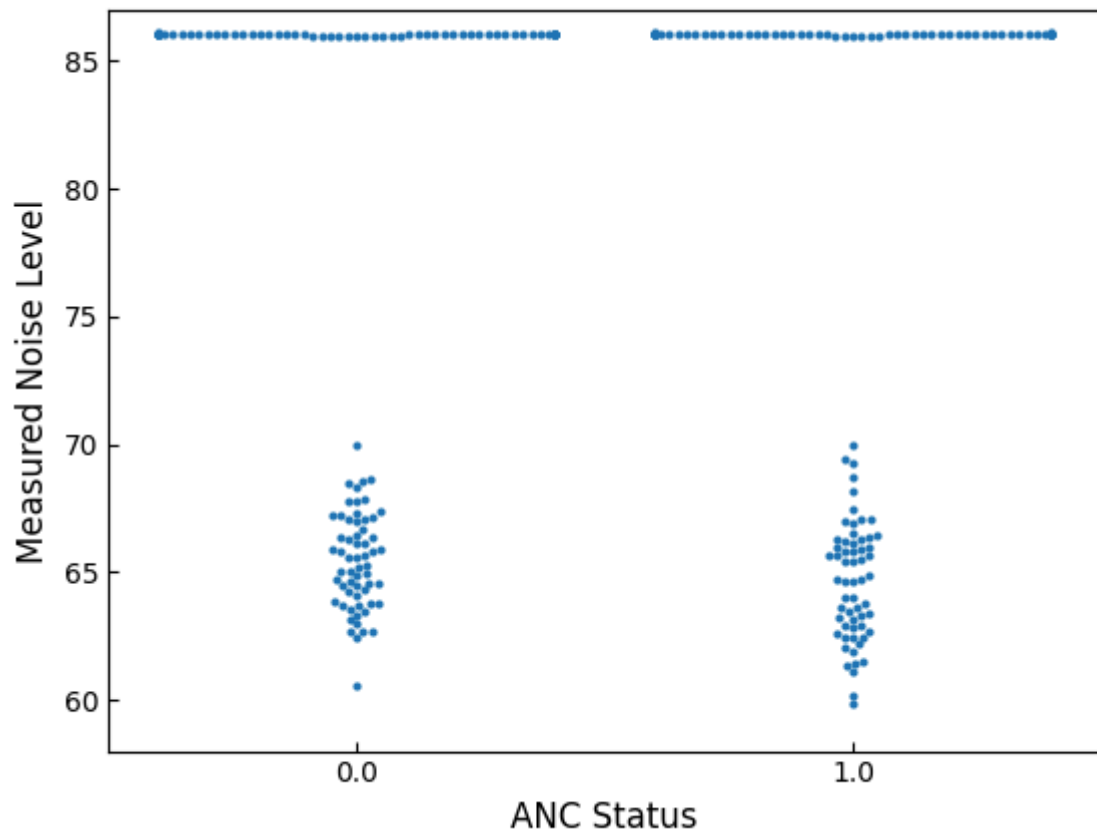
In [ ]: y_min = noise_mean - 3 * noise_deviation - 1
y_max = noise_mean + 3 * noise_deviation + delta_spl + 1

sns.swarmplot(x = x_1, y = x_2, size = 3)
plt.tick_params(axis = 'both', direction = 'in')
plt.ylim(y_min, y_max)
plt.xlabel('ANC Status', fontsize = 12)
plt.ylabel('Measured Noise Level', fontsize = 12)
plt.show()

```

/Users/mrmalvicino/Desktop/GitHub/anc/myenv/lib/python3.12/site-packages/seaborn/categorical.py:3399: UserWarning: 12.5% of the points cannot be placed; you may want to decrease the size of the markers or use stripplot.

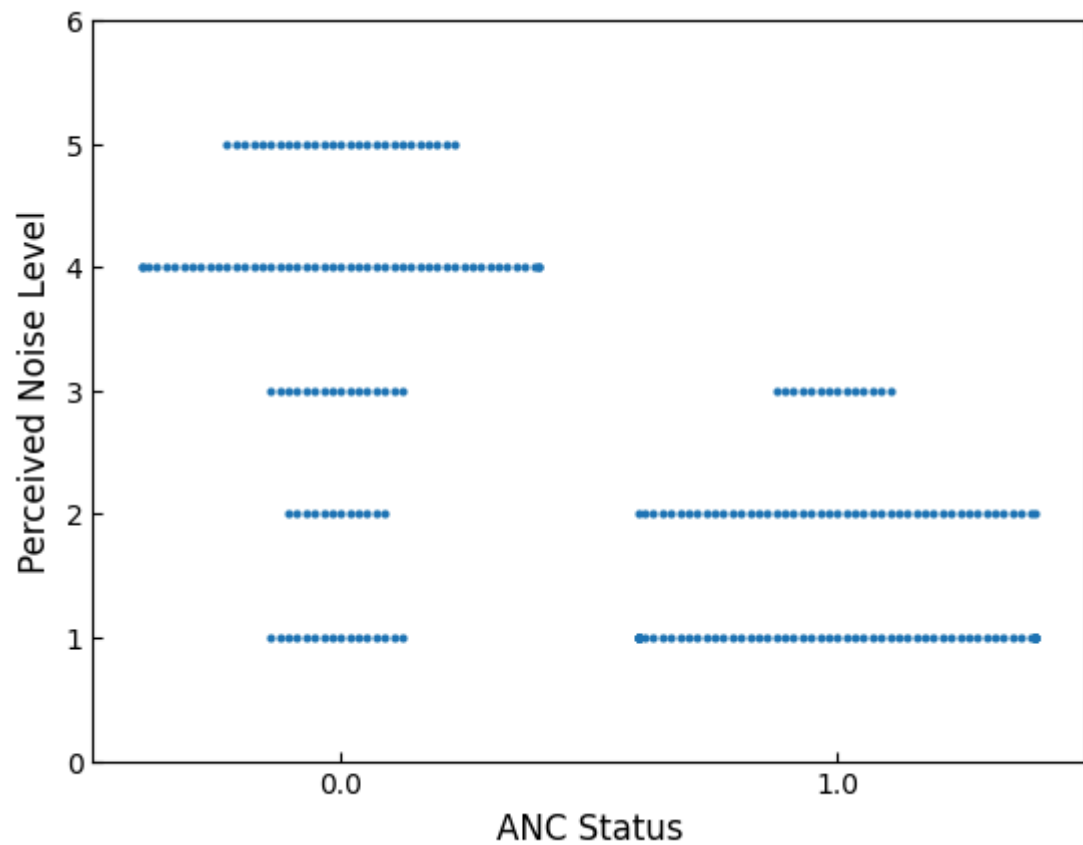
warnings.warn(msg, UserWarning)



$Y_1 \equiv$ Perceived Noise Level Dot Plot

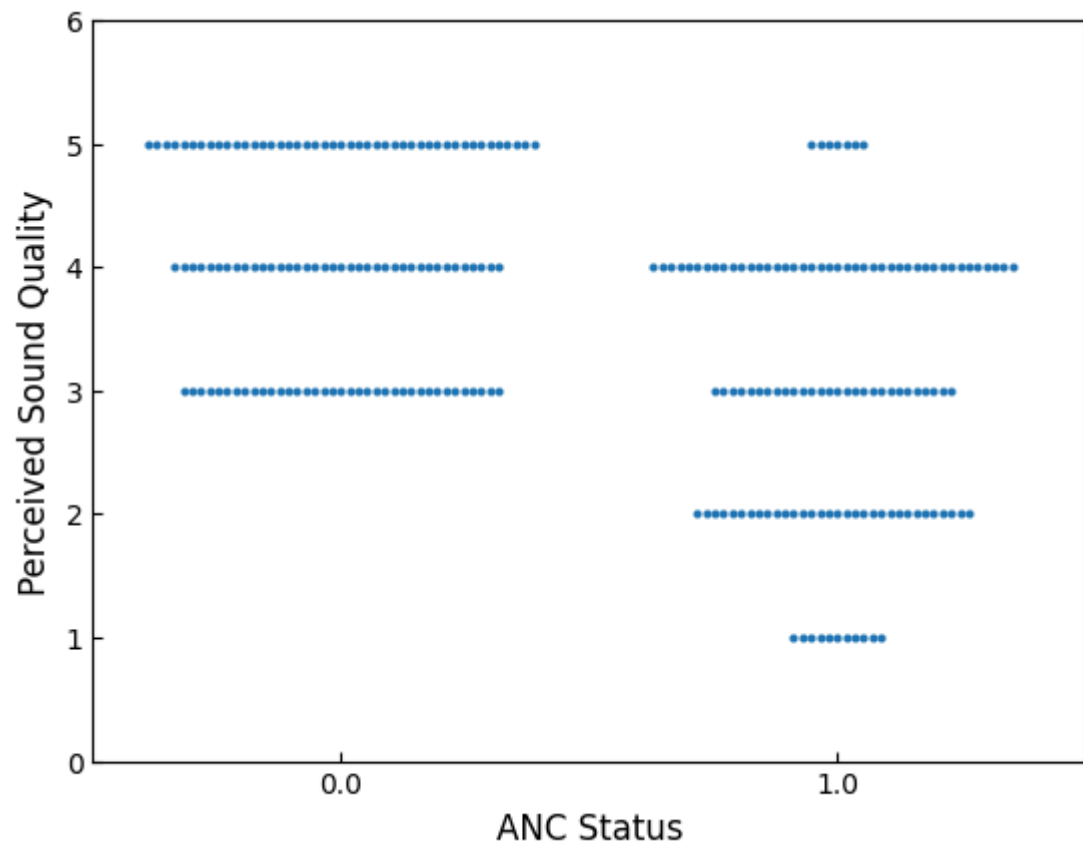
```
In [ ]: sns.swarmplot(x = x_1, y = y_1, size = 3)
plt.tick_params(axis = 'both', direction = 'in')
plt.ylim(0, 6)
plt.xlabel('ANC Status', fontsize = 12)
plt.ylabel('Perceived Noise Level', fontsize = 12)
plt.show()
```

/Users/mrmalvicino/Desktop/GitHub/anc/myenv/lib/python3.12/site-packages/seaborn/categorical.py:3399: UserWarning: 13.3% of the points cannot be placed; you may want to decrease the size of the markers or use stripplot.
warnings.warn(msg, UserWarning)



$Y_2 \equiv$ Perceived Sound Quality Dot Plot

```
In [ ]: sns.swarmplot(x = x_1, y = y_2, size = 3)
plt.tick_params(axis = 'both', direction = 'in')
plt.ylim(0, 6)
plt.xlabel('ANC Status', fontsize = 12)
plt.ylabel('Perceived Sound Quality', fontsize = 12)
plt.show()
```



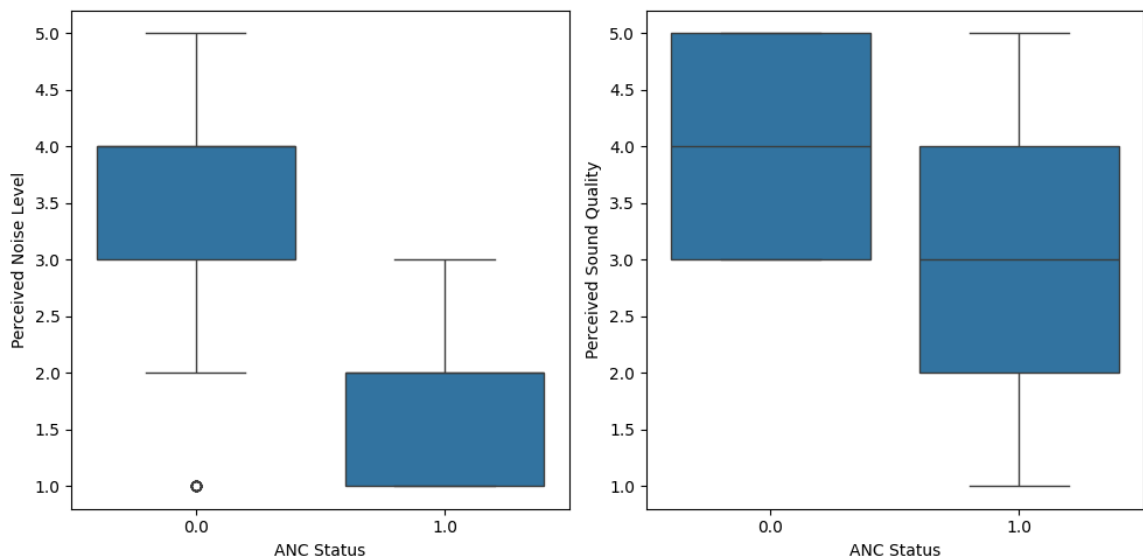
Data Validation

Box Plot

```
In [ ]: plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.subplot(1, 2, 1)
sns.boxplot(x = x_1, y = y_1)
plt.xlabel('ANC Status')
plt.ylabel('Perceived Noise Level')

plt.subplot(1, 2, 2)
sns.boxplot(x = x_1, y = y_2)
plt.xlabel('ANC Status')
plt.ylabel('Perceived Sound Quality')

plt.tight_layout()
plt.show()
```



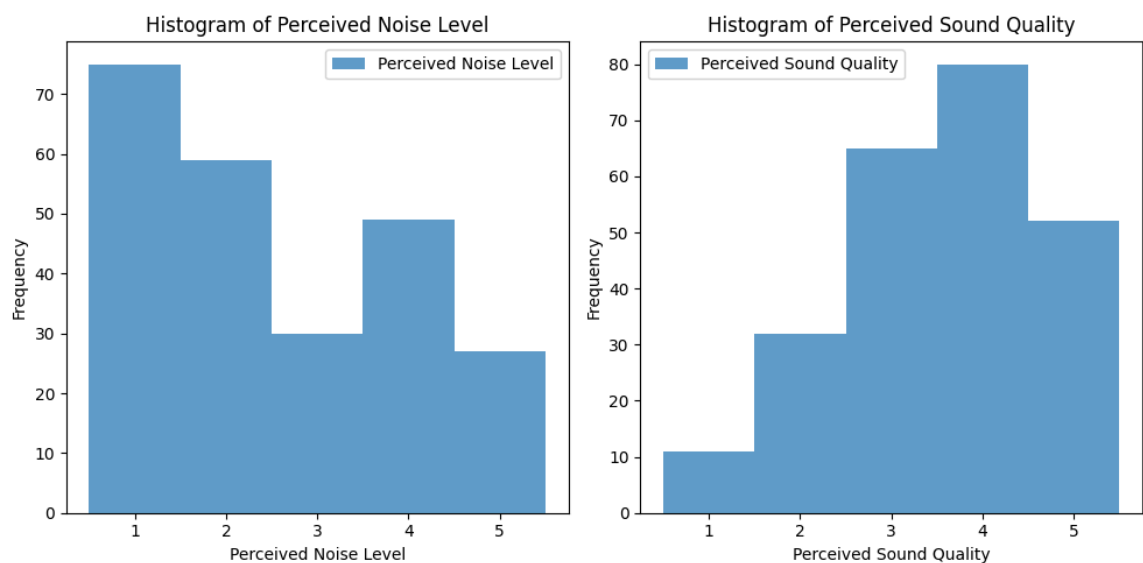
Histogram

```
In [ ]: plt.figure(figsize=(10, 5))

plt.subplot(1, 2, 1)
plt.hist(y_1, bins=np.arange(0.5, 6.5), alpha=0.7, label='Perceived Noise Level')
plt.xlabel('Perceived Noise Level')
plt.ylabel('Frequency')
plt.title('Histogram of Perceived Noise Level')
plt.legend()

plt.subplot(1, 2, 2)
plt.hist(y_2, bins=np.arange(0.5, 6.5), alpha=0.7, label='Perceived Sound Quality')
plt.xlabel('Perceived Sound Quality')
plt.ylabel('Frequency')
plt.title('Histogram of Perceived Sound Quality')
plt.legend()

plt.tight_layout()
plt.show()
```



Shapiro-Wilk Normality test

```
In [ ]: from scipy import stats

statistic, p_value = stats.shapiro(x_2)

print("X2:")
print(f"Statistic: {statistic:.3f}")
print(f"p-value: {p_value:.3f}")

statistic, p_value = stats.shapiro(y_1)

print("\nY1:")
print(f"Statistic: {statistic:.3f}")
print(f"p-value: {p_value:.3f}")

statistic, p_value = stats.shapiro(y_2)

print("\nY2:")
print(f"Statistic: {statistic:.3f}")
print(f"p-value: {p_value:.3f}")
```

X2:
Statistic: 0.720
p-value: 0.000

Y1:
Statistic: 0.859
p-value: 0.000

Y2:
Statistic: 0.896
p-value: 0.000

Correlation and Regression

```
In [ ]: import statsmodels.api as sm
```

Scatter Plot and Pearson Correlation for $Y_1(X_1)$

```
In [ ]: # plt.scatter(x_1, y_1)
# plt.tick_params(axis = 'both', direction = 'in')
# plt.xlim(-1, 2)
# plt.ylim(0, 6)
# plt.xlabel('Variable X1 [ANC Status]', fontsize = 12)
# plt.ylabel('Variable Y1 [Noise score]', fontsize = 12)
# plt.show()

correlation_coefficient, p_value = stats.pearsonr(x_1, y_1)

print(f"r = {correlation_coefficient:.3f}")
print(f"p-value = {p_value:.3f}")

r = -0.668
p-value = 0.000
```

Scatter Plot and Pearson Correlation for $Y_2(X_1)$

```
In [ ]: # plt.scatter(x_1, y_2)
# plt.tick_params(axis = 'both', direction = 'in')
# plt.xlim(-1, 2)
# plt.ylim(0, 6)
# plt.xlabel('Variable X1 [ANC Status]', fontsize = 12)
# plt.ylabel('Variable Y2 [Quality score]', fontsize = 12)
# plt.show()

correlation_coefficient, p_value = stats.pearsonr(x_1, y_2)

print(f"r = {correlation_coefficient:.3f}")
print(f"p-value = {p_value:.3f}")

r = -0.475
p-value = 0.000
```

Linear Regression for $Y_1(X_1)$

```
In [ ]: x_1_c = sm.add_constant(x_1)
model = sm.OLS(y_1, x_1_c).fit()
print(model.summary())
predictions = model.predict(x_1_c)

plt.scatter(x_1, y_1, label='Datos observados')
plt.plot(x_1, predictions, color='red', label='Línea de regresión')
plt.xlim(-0.5, 1.5)
plt.ylim(0, 6)
plt.xlabel('ANC Status')
plt.ylabel('Perceived Quality')
plt.legend()
plt.show()
```

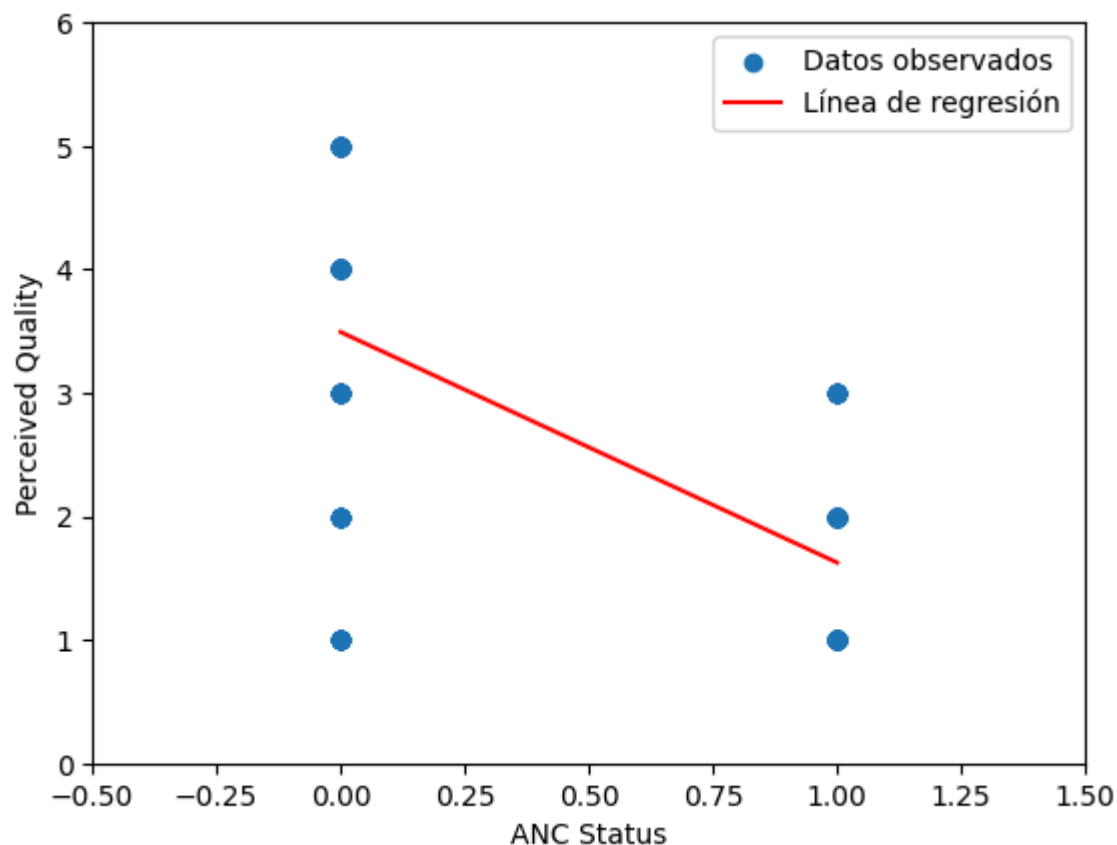

OLS Regression Results

=====					
Dep. Variable: y R-squared: 0.446					
Model: OLS Adj. R-squared: 0.443					
Method: Least Squares F-statistic: 191.3					
Date: Fri, 07 Jun 2024 Prob (F-statistic): 2.52e-32					
Time: 20:09:19 Log-Likelihood: -350.20					
No. Observations: 240 AIC: 704.4					
Df Residuals: 238 BIC: 711.4					
Df Model: 1					
Covariance Type: nonrobust					
=====					
=====					
	coef	std err	t	P> t	[0.025
0.975]					

const	3.4917	0.095	36.587	0.000	3.304
3.680					
x1	-1.8667	0.135	-13.831	0.000	-2.133
-1.601					
=====					
=====					
Omnibus:	14.070	Durbin-Watson:			
2.644					
Prob(Omnibus):	0.001	Jarque-Bera (JB):			
15.121					
Skew:	-0.612	Prob(JB): 0.000521			
000521					
Kurtosis:	3.122	Cond. No.			
2.62					
=====					
=====					

Notes:

[1] Standard Errors assume that the covariance matrix of the errors is correctly specified.



Linear Regression for $Y_2(X_1)$

```
In [ ]: x_1_c = sm.add_constant(x_1)
model = sm.OLS(y_2, x_1_c).fit()
print(model.summary())
predictions = model.predict(x_1_c)

plt.scatter(x_1, y_2, label='Datos observados')
plt.plot(x_1, predictions, color='red', label='Línea de regresión')
plt.xlim(-0.5, 1.5)
plt.ylim(0, 6)
plt.xlabel('ANC Status')
plt.ylabel('Perceived Quality')
plt.legend()
plt.show()
```

OLS Regression Results

=====					
Dep. Variable:		y	R-squared:		
0.225					
Model:		OLS	Adj. R-squared:		
0.222					
Method:		Least Squares	F-statistic:		
69.22					
Date:		Fri, 07 Jun 2024	Prob (F-statistic):		6.
86e-15					
Time:		20:09:19	Log-Likelihood:		-
334.09					
No. Observations:		240	AIC:		
672.2					
Df Residuals:		238	BIC:		
679.1					
Df Model:		1			
Covariance Type:		nonrobust			
=====					
=====					
	coef	std err	t	P> t	[0.025
0.975]					

const	4.0667	0.089	45.571	0.000	3.891
4.242					
x1	-1.0500	0.126	-8.320	0.000	-1.299
-0.801					
=====					
=====					
Omnibus:		32.242	Durbin-Watson:		
2.236					
Prob(Omnibus):		0.000	Jarque-Bera (JB):		
9.837					
Skew:		-0.170	Prob(JB):		
0.00731					
Kurtosis:		2.068	Cond. No.		
2.62					
=====					
=====					

Notes:

[1] Standard Errors assume that the covariance matrix of the errors is correctly specified.

