

UTN – Regional Buenos Aires

Teoría de Control

Curso K4571

TRABAJO PRÁCTICO INTEGRADOR:
SISTEMA DE CANCELACIÓN DE RUIDO

Nombre y Apellido	Legajo
Gliozzo, Tomás Esteban	172.722-9

Fecha Presentación: 11/12/2024

Fecha Devolución:

Calificación:

Firma Profesor:

PAUTAS

1. Objeto de este documento

- Proporcionar una guía de orientación para el desarrollo del **Trabajo de Integración** de Teoría de Control (oportunamente explicitado en sucesivas clases desde el inicio de la cursada).
- Contiene el propósito, objetivos del trabajo, las pautas a seguir y las recomendaciones correspondientes.

2. Propósito

- Aplicar **la totalidad** de los conceptos fundamentales de la Teoría de Control a un sistema controlado elegido por cada equipo de trabajo.

3. Objetivos Generales

- Seleccionar un sistema de control aplicado a una solución tecnológica (**preferentemente, del área de sistemas de la información**).
- Fundamentar el sistema propuesto utilizando, a modo de marco teórico, los conceptos, fundamentos, enfoques y estrategias de la Ingeniería de Control.
- Aplicar diferentes técnicas o herramientas informáticas, en forma creativa, para realizar gráficos, modelos, cuadros comparativos, y, en general para expresar el análisis del problema y la solución propuesta.

4. Pautas

- Desarrollo del trabajo:

- El trabajo de investigación será desarrollado por equipos de no más de dos integrantes.
- **La fecha de entrega del Trabajo Final será informada mediante la plataforma del web campus.** Esta fecha permitirá la corrección del mismo antes de la primera fecha de llamado a final.
- Para el caso de que el TP no sea aprobado y requiera de correcciones y/o mayor desarrollo, o no haya sido presentado hasta la fecha indicada, **se estipulará una nueva fecha tope de entrega mediante el mismo procedimiento.**
- (Preferentemente, y por la condición excluyente de aprobación de la materia se sugiere entregarlo antes de las fechas indicadas).
- Una vez aprobado el TP, y en caso de tener cumplimentadas la totalidad de las actividades obligatorias pautadas, el alumno estará en condiciones de firmar la libreta.
- Para ello, se pautarán fechas a tal efecto.
- La entrega se realizará en formato de archivo PDF por cada alumno en el web campus del curso (en el sitio dedicado a tal efecto).
- En cada trabajo se incluirá en la carátula el listado de integrantes del grupo.
- Pueden realizarse consultas durante el período de desarrollo.

- Composición del Trabajo de Investigación:

El trabajo, desde el punto de vista formal, estará compuesto de las siguientes partes:

- **Carátula:** incluye el tema e integrantes del equipo de trabajo

- Copia del presente documento.
 - **Índice:** contenido del documento elaborado por el equipo.
 - **Introducción:** se referirá al “segmento / mercado” en que se encuadra el trabajo (por ejemplo, “...el control del riego y la fertilización de una plantación...”).
 - **Objetivos:** cuales son los objetivos de control a ser alcanzados y cual es la solución que se plantea u ofrece.
 - **Alcance:** definir la estructura del sistema considerado, describiendo e identificando clara y explícitamente las diferentes funcionalidades correspondientes al mismo (por ejemplo: contexto; puntos de interconexión con el mundo exterior; tipo de transductores; variables que se desea controlar, tipos unidades y rangos de entradas y salidas, amplificador de error; señales de error y realimentación; elementos de medición, características y variables componentes de las transferencias presentes en el sistema ; características de la respuesta; perturbaciones externas e internas a considerar; características y tipo de error; caracterización de la estabilidad; ley de control y tipo de actuación utilizada; relación entre señales analógicas y discretas / digitales; carga/s asociadas al sistema).
 - El trabajo deberá incluir un programa confeccionado en **LOGO** (en lenguaje de bloques), que permita simular y verificar la funcionalidad del sistema.
 - **IMPORTANTE:** Tal lo explicitado en clase, no se solicita la descripción genérica del sistema controlado sino la identificación y descripción de su estructura.
 - En definitiva, **“encontrar” la totalidad de los contenidos y conceptos trabajados y estudiados desde el dominio de la teoría de control.**
-
- **Descripción, desarrollo y fundamentación de la propuesta:** debe ser clara, recomendándose técnicas de escritura conceptual y gráfica.
 - **Conclusión:** A modo de conclusión, establecer la necesidad y ventajas comparativas del sistema de control propuesto. Es importante incluir opiniones del grupo en cuanto a posibles mejoramientos, objeciones, etc., que permitan establecer un cierto **criterio ingenieril** desde la perspectiva del equipo de trabajo.
 - **Consideraciones especiales:** si aplica, indicar.
 - **Bibliografía:** citar libros, documentos de texto y fotográficos, folletos de dispositivos transductores, actuadores, sitios web y papers consultados.

ÍNDICE

PAUTAS	0
INTRODUCCIÓN: PROBLEMÁTICA	5
OBJETIVOS	5
Objetivos de Control:	5
Solución Propuesta:	5
DESCRIPCIÓN, DESARROLLO Y FUNDAMENTACIÓN DE LA PROPUESTA:	6
CONCEPTOS	6
Frecuencia	6
Sistema de aislamiento acústico	6
Control activo de ruido	6
ALCANCE	7
1. CONTEXTO	7
2. PUNTOS DE INTERCONEXIÓN CON EL MUNDO EXTERIOR Y PERTURBACIONES	8
- Punto de Interconexión: Onda antifase	8
- Perturbaciones Externas:	8
- Perturbación de nivel de presión sonora ambiental y elemento de comparación:	8
- Perturbaciones electromagnéticas EMI y RFI:	8
- Ruido Térmico:	9
- Perturbaciones internas:	9
3. TIPO DE TRANSDUCTORES	10
- Micrófono	10
- Altavoz	10
4. VARIABLES QUE SE DESEAN CONTROLAR	11
a. Variables acústicas:	11
i. Nivel de presión sonora residual:	11
ii. Frecuencia y fase del ruido:	11
iii. Amplitud del ruido y la señal antifase:	11
b. Variables del sistema de control:	11
i. Señal de error:	11
ii. Coeficientes del filtro adaptativo:	11
iii. Ganancia del amplificador:	11
iv. Latencia del sistema:	12
v. Relación señal/ruido (SNR):	12
5. TIPOS, UNIDADES Y RANGOS DE ENTRADAS Y SALIDAS	12
- Entrada: Onda de referencia	12
- Salida: Ruido/onda canceladora (altavoz)	12
6. TIPO DE CONTROL	13
7. SEÑALES DE ERROR Y RETROALIMENTACIÓN	13
a. Señal de error:	13

b. Señal de retroalimentación:	13
8. ELEMENTOS DE MEDICIÓN Y TRANSFERENCIAS:	14
- CONTROL: PID + Filtro Adaptativo	14
- Generación de señal antifase (DSP)	14
- Actuador: Altavoz	15
- Perturbación y Elemento de comparación:	15
- Sensor : Micrófono de error	15
- Señal de retroalimentación: Sistema de ajuste adaptativo	15
9. CARACTERÍSTICAS DE LA RESPUESTA	16
Latencia del sistema:	16
Rango de frecuencias afectadas:	16
Amplitud residual y precisión:	17
Análisis del dinamismo de la respuesta:	17
- Transitorio:	17
- Características:	17
- Parámetros:	17
- Tiempo de establecimiento:	17
- Estable:	18
10. CARACTERÍSTICAS Y TIPO DE ERROR:	18
Representación del error:	18
Rango de error admisible:	18
Fallos por error fuera de rango:	18
Tipos de error:	19
Mitigación del error:	19
11. CARACTERIZACIÓN DE LA ESTABILIDAD:	19
Elementos que aseguran la estabilidad:	19
Escenarios de estabilidad:	20
Límites de estabilidad:	20
12. RELACIÓN ENTRE SEÑALES ANALÓGICAS Y DIGITALES	20
Conversión entre señales analógicas y digitales:	20
- Conversión Analógica-Digital (ADC) en micrófono de error:	20
- Conversión Digital-Analógica (DAC) en altavoz:	21
Relación y dependencia entre dominios:	21
Aplicación en el sistema:	21
13. CARGA ASOCIADA AL SISTEMA:	22
SIMULACIÓN:	22
REPOSITORIO:	22
- Contenido	22
PRUEBAS:	23
- Valores principales utilizados:	23
- Ruidos y perturbaciones:	23
Pruebas Válidas:	23

Pruebas de Error:	24
- Aclaración resultados de pruebas:	24
CONCLUSIÓN:	25
BIBLIOGRAFÍA:	25
ANEXO:	26

INTRODUCCIÓN: PROBLEMÁTICA

Los sistemas de control por cancelación de sonido tienen una amplia área de estudio en el campo de la comunicación. La cancelación de ruido tiene distintas aplicaciones, el principio de funcionamiento de esta metodología de control es el fenómeno de interferencia destructiva y superposición lineal de onda. La idea es generar una señal idéntica a la señal de ruido que se propaga en el interior en el entorno acústico.

El ruido está presente en cualquier sociedad moderna: los medios de transporte, las plantas industriales, los transformadores eléctricos, los sistemas de aire acondicionado y de calefacción, entre otros, producen ruido. Para resolver este problema, se han desarrollado diversos esquemas activos de cancelación de ruido basados en filtros adaptables, los cuales generan una réplica de la señal de ruido con fase inversa de manera que el ruido se cancela por superposición de dos ondas acústicas, siendo capaces de seguir las variaciones en las características de las señales de ruido. Estos esquemas llevan a cabo la cancelación en el dominio acústico en lugar de hacerlo en el dominio eléctrico, por lo cual deben operar en un espacio tridimensional.

Controlar y reducir el ruido es un reto tecnológico importante por la complejidad temporal y espacial que presenta. La reducción del ruido implica además un considerable coste económico, por lo que en numerosas ocasiones se prefiere disminuirlo a niveles aceptables para la población que los padece en lugar de cancelarlo completamente.

OBJETIVOS

Objetivos de Control:

- Minimizar el Ruido Ambiental Residual: Reducir las perturbaciones ambientales no deseadas (en dB) cerca del oído del usuario a niveles tolerables o imperceptibles mediante la generación de una señal antifase precisa.
- Adaptabilidad al Entorno: Garantizar que el sistema se ajuste automáticamente a cambios dinámicos en el ruido ambiente, como variaciones en frecuencia, amplitud o patrones temporales.

Solución Propuesta:

- Filtro Adaptativo de Cancelación Activa: Utilizar un algoritmo adaptativo (como LMS o RLS) que optimice en tiempo real la señal antifase generada, minimizando el error medido por el micrófono de retroalimentación.
- Sistema de Lazo Cerrado con Retroalimentación: Incorporar un micrófono de error que mida el ruido residual, retroalimentando al filtro adaptativo para realizar ajustes continuos y precisos a partir de las perturbaciones del ambiente.

DESCRIPCIÓN, DESARROLLO Y FUNDAMENTACIÓN DE LA PROPUESTA:

CONCEPTOS

Frecuencia

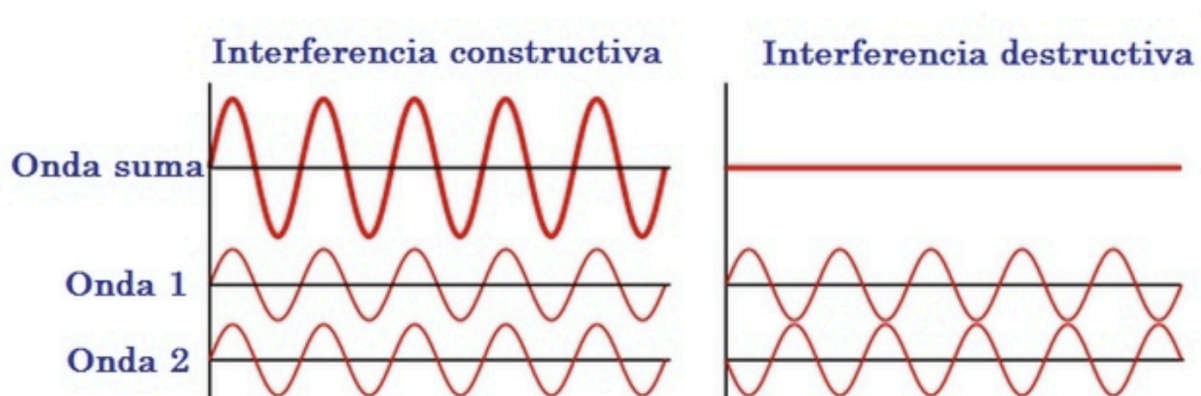
La frecuencia es la medida del número de veces que se repite un fenómeno por unidad de tiempo. La frecuencia en los fenómenos ondulatorios, tales como el sonido, expresa el número de ciclos que se repite la onda por segundo. En unidades del Sistema Internacional (SI), el resultado se mide en Hertzios (Hz), llamados así por el físico alemán, Heinrich Rudolf Hertz. 1 Hz significa un ciclo (u onda) por segundo.

Sistema de aislamiento acústico

Las técnicas pasivas son conocidas habitualmente como sistemas de aislamiento acústico y su misión es evitar que el sonido exterior entre a nuestro sistema auditivo, para lo cual habitualmente se interpone material aislante entre la carcasa o parte externa del auricular y la parte que va a ir pegada a nuestra oreja u oído.

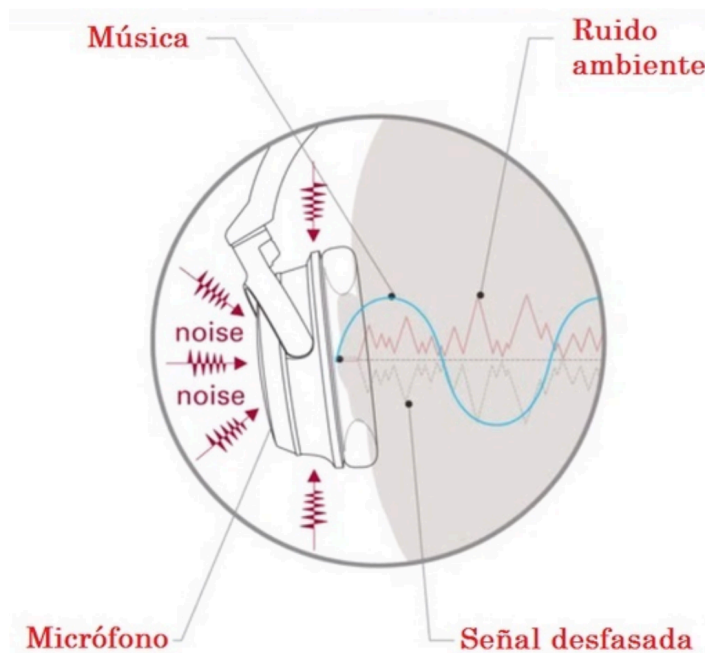
Control activo de ruido

Por control activo de ruido acústico (CAR) o ANC(Active noise control) en sus siglas en inglés, se entiende por aquella técnica capaz de atenuar el ruido ambiental existente en un determinado recinto mediante la emisión de otro ruido acústico; esto es posible cuando las ondas de presión acústica de ambos ruidos están en oposición de fase. Dicho de otra forma, cuando se cumple el principio de superposición de la teoría de ondas, que ocurre cuando dos o más ondas inciden o se encuentran en un mismo punto, obteniendo por suma de vectores incidentes la cancelación total o parcial de la onda. Este fenómeno se conoce como interferencia destructiva de ondas.



Trasladado al contexto de los auriculares, los dispositivos de audio con cancelación de ruido usan uno o más micrófonos incorporados en el cuerpo del auricular que sensan el ruido ambiente y mediante un procesamiento del mismo genera una señal igual pero de fase opuesta. Al reproducir esta señal artificial junto a la señal original dará como resultado la interferencia destructiva y un sonido ambiente teóricamente libre de ruidos, lo que en la práctica se traduce en un sonido atenuado en más de 25 o 30 dB, dado que su performance se ve limitado por la naturaleza de las ondas como su frecuencia, tono y

potencia.



Es habitual que funcione muy bien para los ruidos de baja frecuencia y de tipo constante como el producido por un ventilador. Sin embargo, su efectividad disminuye con sonidos de alta frecuencia, que se ve parcialmente compensada por capas de aislamiento pasivo.

ALCANCE

1. CONTEXTO

El **sistema ANC** de nuestro trabajo se va a limitar a auriculares que permitan reducir el ruido de fondo para mejorar la experiencia auditiva, especialmente en entornos controlados donde el ruido es monótono y repetitivo (ruido de baja frecuencia), como maquinaria industrial, zumbido eléctrico, aviones, subtes o trenes.

La limitación planteada es debida al uso de un único micrófono externo que, a pesar de brindar cancelación adaptativa, anticipativa y simplicidad del sistema, puede provocar que ciertas frecuencias o componentes del ruido no sean cancelados correctamente y que el rendimiento varíe dependiendo de cómo el auricular se ajuste al oído del usuario, de las condiciones ambientales y perturbaciones internas y externas. La limitación mencionada se podría mejorar utilizando un segundo micrófono interno que mida el ruido residual dentro del canal auditivo. Esto aumentaría la precisión, la adaptación a fugas acústicas y permitiría una cancelación más efectiva, con la desventaja de una complejidad considerable por la necesidad de un algoritmo que integre datos de ambos micrófonos y bloques extra, como un comparador de señales de error que combine las señales de error de ambos micrófonos.

El **sistema ANC** analizado está diseñado para operar en entornos con niveles de ruido ambiental comprendidos entre 40 y 100 dB SPL y frecuencias de 20 Hz a 4 kHz. Las limitaciones físicas y técnicas del ANC disminuyen su eficacia en frecuencias altas. Por otro lado, ofrece una cancelación típica de 30-40 dB SPL en bajas frecuencias (20 Hz a 1kHz), con una latencia máxima de 1ms.

El **micrófono de error** MEMS: MP34DT01-M ([ANEXO](#)) presenta desviaciones en su sensibilidad debido a cambios de temperatura, que puede variar en un rango de -40°C a 85°C, lo que puede afectar su precisión en la medición del ruido residual. Permite una diferencia de tensión nominal de 1.8V con una intensidad de corriente nominal de 0.6mA, un mínimo de 1.64V y un máximo de 3.6V. Por otro lado, permite hasta 120 dB SPL con una distorsión <10% a 1 kHz y 100 dB SPL con una distorsión <1% a 1 kHz.

Por su lado, el **altavoz dinámico** Pro-Signal ([ANEXO](#)) enfrenta problemas de saturación cuando se superan los 80 mW. Por otro lado, permite reproducir hasta 100 ± 3 dB SPL a 1 kHz con entrada nominal sin distorsión y con una frecuencia operativa de 20 - 10.000 Hz. Por otro lado, opera a temperaturas de entre -20° y 60°C.

Los **auriculares** JBL Tune 760NC ([ANEXO](#)) que actúan como [carga](#) en el sistema ANC poseen una impedancia de 32 Ω , una sensibilidad de 95-103 dB SPL/mW y un rango de frecuencia de 20 Hz a 20 kHz. Están diseñados para soportar una potencia de entrada de hasta 200 mW sin distorsión significativa. Cuentan con un diseño over-ear que incluye almohadillas acústicas para mejorar el aislamiento pasivo y que complementa el rendimiento del sistema ANC. En caso de operación inalámbrica, la duración de la batería es de hasta 35 horas con Bluetooth + ANC activo con 2h de carga completa.

2. PUNTOS DE INTERCONEXIÓN CON EL MUNDO EXTERIOR Y PERTURBACIONES

- Punto de Interconexión: Onda antifase

- Generación de un sonido/onda antifase a través del actuador (altavoz).
- Es la señal generada para cancelar la onda de referencia y la señal de error proveniente de la retroalimentación.
 - Es crucial que el sistema esté correctamente sincronizado para generar la onda antifase precisa en términos de amplitud, frecuencia y fase.

- Perturbaciones Externas:

- Perturbación de nivel de presión sonora ambiental y elemento de comparación:
 - Representa el punto donde ocurre la interferencia destructiva entre la perturbación (ruido ambiente) y la señal antifase generada por el actuador (altavoz).
 - El **ruido residual** que se obtiene como resultado de la combinación de la perturbación y la señal antifase debe, idealmente, estar cercano a 0 dB SPL, dado que eso implicaría que ambas señales se anularon, cancelando el ruido percibido.
 - **Frecuencia:** El rango operativo es de 20 Hz a 4 kHz, con una mayor eficacia en frecuencias bajas (20 Hz a 1 kHz) correspondientes a zumbidos de motores, ventiladores y otros ruidos periódicos de baja frecuencia.
 - **Amplitud:** El nivel de presión sonora ambiental que soporta el sistema es de 40 a 100 dB SPL. Idealmente, la onda residual tras la cancelación debe mantenerse por debajo de los 30 dB SPL.
- Perturbaciones electromagnéticas EMI y RFI:
 - La **EMI** (interferencia electromagnética), también conocida como RFI (interferencia de radiofrecuencia), es una perturbación que ocurre en cualquier

circuito, componente o sistema electrónico causada por una fuente de radiación electromagnética externa o interna. Casi todos los instrumentos electrónicos funcionan como contaminadores electromagnéticos. Esto se debe a sus emisiones conducidas o radiadas intencionales o no intencionales. Estas emisiones no deseadas provienen de cables de alimentación, alambres, resistencias, capacitores y otros componentes.

- **Frecuencia:** Generalmente de 30 MHz a 1GHz dependiendo de la fuente de interferencia. Las longitudes de onda correspondientes son 10 m y 0.3 m respectivamente.
- **Amplitud:** Puede inducir ruidos de hasta 10 mV RMS en circuitos no protegidos.
- **Efectos:**
 - Puede desestabilizar el controlador PID y afectar la generación precisa de la onda antifase.
 - Puede generar errores de medición en el micrófono de error.
 - Puede causar errores de cálculo y desincronización en los ciclos de procesamiento.
- **Mitigación:**
 - Filtros EMI activos (AEF): similares al principio de un sistema ANC pero aplicado a ruido eléctrico. Utilizan circuitos de control activos para detectar y cancelar perturbaciones EMI.
 - Blindaje Electromagnético: Uso de materiales conductores para bloquear campos radiados hacia y desde el sistema.
 - Diseño PCB: Separación adecuada de trazos sensibles y componentes de alta frecuencia. Además, se pueden utilizar capas de referencia para minimizar el acoplamiento inductivo y capacitivo.

- **Ruido Térmico:**

- El ruido térmico es causado por la agitación de electrones en un conductor debido a la temperatura y se distribuye uniformemente en el espectro de frecuencias, lo que lo clasifica como ruido blanco. Este ruido representa un límite fundamental, ya que no se puede eliminar completamente. La presencia de ruido térmico impone restricciones en la sensibilidad y el rendimiento máximo de cualquier sistema.
- **Micrófono:** La sensibilidad puede variar con la temperatura, alterando la precisión de captura del ruido. Puede aumentar el ruido eléctrico intrínseco.
- **Altavoz:** La resistencia de la bobina (impedancia) puede aumentar con la temperatura, reduciendo la eficiencia del altavoz.
- **Filtro adaptativo:** Las variaciones térmicas pueden desalinearse la relación entre la señal medida y el modelo del sistema.
- **Frecuencia:** Se distribuye de manera uniforme como ruido blanco en todo el espectro de frecuencias.
- **Amplitud:** Proporcional a la temperatura del componente.

- **Perturbaciones internas:**

- Ruido intrínseco del sistema:

- Ruido eléctrico generado por los componentes. Reduce la precisión de la señal medida y limita la capacidad del sistema para detectar ruido de baja intensidad
- PE: ruido térmico en el micrófono o amplificador.

3. TIPO DE TRANSDUCTORES

- Micrófono

- **Micrófono:** (sensor electroacústico): Convierte ondas de presión sonora en una señal eléctrica.
- **Entrada:** db SPL
- **Salida:** V
- **Tipo de micrófono:** Se va a utilizar un micrófono tipo MEMS (Micro Electrical-Mechanical System) por ser muy compacto (favorece un diseño ergonómico), bajo costo económico, facilidad de integración con el resto de los componentes del sistema y de bajo consumo eléctrico, punto ideal para auriculares que no dependen de estar enchufados. Por el último punto mencionado se descartan micrófonos de mayores prestaciones como los tipo condensador.
- **Tipo:** ADC: Analógico - Digital.
 - Conversor de aproximaciones sucesivas: por velocidad requerida.
- **Rango de respuesta:** 20 Hz a 20kHz (*en la simulación se utiliza hasta 4 kHz*)
- **Frecuencia de muestreo:** ≥ 44.1 kHz (*en la simulación se utiliza 7.9 kHz*)
- **Data sheet:** [ANEXO](#)
- **Características deseadas:** Alta relación señal/ruido (SNR), buena respuesta transitoria y linealidad.

- Altavoz

- **Altavoz:** (transductor electroacústico): Convierte señales eléctricas en ondas de presión sonora.
- **Entrada:** V
- **Salida:** db SPL
- **Tipo de altavoz:** Se va a utilizar un altavoz dinámico por su buena eficiencia energética, bajo costo económico, y principalmente su buena respuesta en frecuencias bajas, punto clave para ANC. Si quisiera uno con diseño ergonómico me convendría uno piezoeléctrico, pero al no ser efectivos en frecuencias bajas considero que es preferible que sea más grande el componente y a cambio sea más adecuado para reproducir las onda antifase necesarias en frecuencias bajas.
- **Tipo:** DAC: Digital - Analógico
 - DAC integrado de clase D: [ANEXO](#)
 - Dispositivo que combina la conversión DAC con un amplificador de clase D
 - Eficiente:
 - Elimina la necesidad de componentes adicionales para ejemplificar la señal, reduciendo el espacio y el costo.
 - Capaz de convertir energía eléctrica en salida de audio con mayor eficiencia, lo que se traduce en mayor potencia sin generar tanto calor.
- **Frecuencia de muestreo:** ≥ 44.1 kHz (*en la simulación se utiliza 7.9 kHz*)

- **Data sheet:** [ANEXO](#)
- **Rango de respuesta:** 20 Hz - 4 kHz: Enfocado en frecuencias bajas y medias, donde el ANC es más efectivo.
- **Características deseadas:** Alta fidelidad, capacidad de respuesta rápida y bajo nivel de distorsión.

4. VARIABLES QUE SE DESEAN CONTROLAR

a. Variables acústicas:

i. Nivel de presión sonora residual:

1. **Descripción:** ruido que permanece tras la interacción entre la perturbación y la señal antifase generada.
2. **Valor nominal:** Minimizar lo más posible, idealmente cerca de 0 dB SPL.
3. **Rango deseado:** Entre 25-30 dB de reducción es considerado un sistema efectivo.

ii. Frecuencia y fase del ruido:

1. **Descripción:** determinan entre sí la efectividad de la interferencia destructiva.
2. **Valor nominal frecuencia:** cancelar preferentemente las bajas-medias frecuencias (20 Hz a 4 kHz) donde la ANC es más efectiva.
3. **Objetivo fase:** mantener una diferencia de 180° entre ambas ondas en el punto de interacción.

iii. Amplitud del ruido y la señal antifase:

1. **Descripción:** es necesario que las amplitudes de ambas ondas coincidan para lograr una cancelación efectiva.
2. **Objetivo:** ajustar dinámicamente la ganancia del sistema para igualar las amplitudes.

b. Variables del sistema de control:

i. Señal de error:

1. **Descripción:** Diferencia entre el ruido residual captado por el micrófono y la referencia del sistema (entrada).
2. **Objetivo:** Minimizar

ii. Coeficientes del filtro adaptativo:

1. **Descripción:** Ajustan el comportamiento del filtro que genera la señal antifase.
2. **Objetivo:** Adaptarse dinámicamente a los cambios en el entorno.

iii. Ganancia del amplificador:

1. **Descripción:** Controla la intensidad de la señal eléctrica enviada al actuador (altavoz).

2. **Objetivos:**
 - a. Evitar saturación o distorsión.
 - b. Mantener una señal limpia y proporcional a la señal de error.
- iv. **Latencia del sistema:**
 1. **Descripción:** Tiempo que tarda el sistema en procesar la señal de error y generar la señal antifase.
 2. **Objetivo:** Minimizar ($< 1\text{ms}$) para que la cancelación sea efectiva en tiempo real.
- v. **Relación señal/ruido (SNR):**
 1. **Descripción:** Indicador de la calidad de las señales medidas y generadas por el sistema.
 2. **Objetivo:**
 - a. Maximizar
 - b. Evitar que el ruido interno del sistema afecte su desempeño.

5. TIPOS, UNIDADES Y RANGOS DE ENTRADAS Y SALIDAS

- **Entrada: Onda de referencia**
 - **Tipo:** Señal/Onda de referencia
 - **Unidad:** Voltaje[V]
 - **Rango:**
 - **Frecuencia:** 20 Hz a 4 kHz (rango de baja-media frecuencia)
 - **Voltaje:** 0.1V a 1V
 - Para modelar un rango de señales que van de los 40-100 dB SPL.
 - **Función:** Fuente de ruido de referencia.
 - Señal que representa el ruido que el sistema debe cancelar.
 - Puede ser generada por un modelo matemático (algoritmo).
 - Proporciona la información inicial para que el sistema pueda generar la onda antifase.
- **Salida: Ruido/onda canceladora (altavoz)**
 - **Tipo:** Señal analógica reproducida por el altavoz para cancelar el ruido.
 - **Unidad:** Nivel de presión sonora cancelante [dB SPL]
 - **Rango Entrada:**
 - **Mínimo:** 0.5 V o menos para generar sonidos suaves o señales de prueba.
 - **Nominal:** $\sim 2\text{ V}$
 - **Máximo:** $\sim 2.5\text{-}3\text{ V}$
 -
 - **Rango Salida:**
 - **Frecuencia:** 20 Hz - 4 kHz
 - **Intensidad:** 40 - 100 dB SPL
 - **Función:**
 - Onda canceladora resultante.
 - Crear una interferencia destructiva con el ruido perturbador.
 - **Onda secundaria:**
 - Onda residual producto de la diferencia entre onda de

cancelación y perturbación ambiental. Va a ser aprovechada por el micrófono de error para una posterior corrección, dado que permite al sistema ajustar dinámicamente los parámetros de control. La intensidad debe ser <30 dB SPL si la cancelación es efectiva y se trata de ondas de baja-media frecuencia.

6. TIPO DE CONTROL

Nuestro sistema implementará un control del tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Su objetivo es maximizar la precisión de trazo fino (término integral), la velocidad de respuesta a cambios abruptos o transitorios (término derivativo) y la estabilidad general (proporcional por umbrales). La razón por la cual se utilizará este tipo de controlador es por su versatilidad, dado que permite ajustarse para trabajar en un contexto dinámico; y por otro lado, hacer la respuesta más robusta, dado que permite manejar tanto ondas/señales tanto estacionarias como transitorias y mantener el valor nominal deseado.

Se controlará la señal de error producto de la suma entre la entrada de referencia y la señal/onda residual, ejecutando un ciclo del mismo cada, al menos 1 kHz para abarcar las bajas frecuencias donde el ANC es más efectivo.

Según el Teorema de Nyquist, la tasa de muestreo debe ser al menos dos veces la frecuencia máxima de la señal a cancelar. Dado que $T = 1/f$ y teniendo en cuenta el teorema mencionado, la tasa mínima de muestreo debe ser de 2 kHz, que es lo mismo que 1 ms por ciclo.

Para garantizar una respuesta, funcionamiento más amplio y considerar frecuencias más altas en caso de ser necesario, además de considerar las limitaciones físicas de los transductores para la simulación. Por ende, vamos a establecer una tasa de muestreo de 16 kHz, que se traduce en 0.0625 ms por ciclo.

7. SEÑALES DE ERROR Y RETROALIMENTACIÓN

a. Señal de error:

- La señal de error es la diferencia entre la onda residual medida (f : ruido que queda después de la cancelación) y la señal ideal deseada (θ_i : onda de referencia o nivel acústico objetivo). Esta señal guía al sistema para ajustar su respuesta en tiempo real.
- El controlador recibirá una señal de error en voltios $e(t) = \theta_i - f(t)$, que se corresponderá con la resta entre la onda de referencia y el valor medido por el micrófono de error.
- **Unidades:** Voltios (V)
- **Rango:** -1V a 1V
- **Propósito:** Proporcionar información a la unidad de control (PID + filtro adaptativo) para corregir el comportamiento del sistema y minimizar el error.

b. Señal de retroalimentación:

- La señal de retroalimentación es la salida del actuador (altavoz), medida indirectamente por el micrófono de error, que permite evaluar la efectividad del sistema respecto a la cancelación del ruido.

- La generación de la señal de retroalimentación viene dada por el micrófono de error cuando detecta tanto el ruido no cancelado como la respuesta del sistema (onda antifase generada por el altavoz). Luego, el sistema utiliza esta señal para ajustar dinámicamente los parámetros del filtro, asegurando que la onda antifase sea más precisa.
- **Unidades:** Voltios (V)
- **Rango:** 0.1V a 1V.
- **Propósitos:** Adaptar los coeficientes del filtro y ajustar la señal antifase en tiempo real. Estabilizar el sistema y garantizar una cancelación efectiva.

8. ELEMENTOS DE MEDICIÓN Y TRANSFERENCIAS:

- CONTROL: PID + Filtro Adaptativo

- **Transferencia:** $G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s + H(s)$
 - K_p, K_i, K_d : Constantes proporcional, integral y derivativa.
 - $H_{adaptativo}(s)$: Función del filtro adaptativo ajustable en tiempo real.
 - **Filtro Adaptativo LRS:** Su transferencia puede modelarse como un filtro Wiener: $H_{LRS}(z) = \frac{\phi_{xy}(z)}{\phi_{xx}(z)}$
 - $\phi_{xy}(z)$ es la densidad espectral cruzada
 - Mide la relación entre dos señales en función de la frecuencia donde $\phi_{xy}(z) = X(f)Y^*(f)$
 - $X(f)$ y $Y(f)$ son las transformadas de Fourier de las señales de entrada y salida y $*$ el conjugado complejo.
 - $\phi_{xx}(z)$ es la densidad espectral del ruido de entrada.
 - Evalúa la potencia de la señal en el dominio de la frecuencia.
- **Función:**
 - Optimizar la precisión de la onda antifase
 - Procesa la señal de error para generar una salida que minimice el ruido residual.
 - Filtro LMS (Least Mean Squares), para ajustar la señal en función de la señal de error detectada. Este filtro se encarga de calcular una señal inversa precisa para cancelar el ruido de la señal de retroalimentación.
- **Conversión:** Ajuste de amplitud y fase
- **Entrada:** Voltaje[V]
- **Salida:** Voltaje ajustado [V']

- Generación de señal antifase (DSP)

- **Función:** Procesa la señal generada por el filtro adaptativo y produce una señal

antifase, que se transmite al actuador. Se realiza la transformación de la señal captada, asegurando que *-teóricamente-* sea completamente opuesta en fase al ruido a cancelar.

- **Conversión:** Procesamiento de señal.
- **Entrada:** Voltaje ajustado [V']
- **Salida:** Voltaje ajustado a 180° [V'']

- **Actuador: Altavoz**

- **Transferencia:** $G(s) = \frac{P_{salida}}{V_{entrada}}$
- **Función:** El altavoz o actuador emite la señal antifase producida por el generador de señal. Su función es generar una onda de sonido con la misma amplitud pero fase opuesta al ruido, causando interferencia destructiva.
- **Conversión:** Electrónico a acústico.
- **Entrada:** Voltaje ajustado a 180° [V'']
- **Salida:** Nivel de presión sonora antifase [dB SPL]

- **Perturbación y Elemento de comparación:**

- **Transferencia:** $G(s) = \frac{P_{residual}}{P_{ruido} + P_{antifase}}$
- **Función:** Representa el punto en el que el ruido y la señal antifase se combinan. El resultado ideal es que ambas señales se anulen, cancelando el ruido percibido.
- **Unidad:** Nivel de presión sonora residual [dB SPL]

- **Sensor : Micrófono de error**

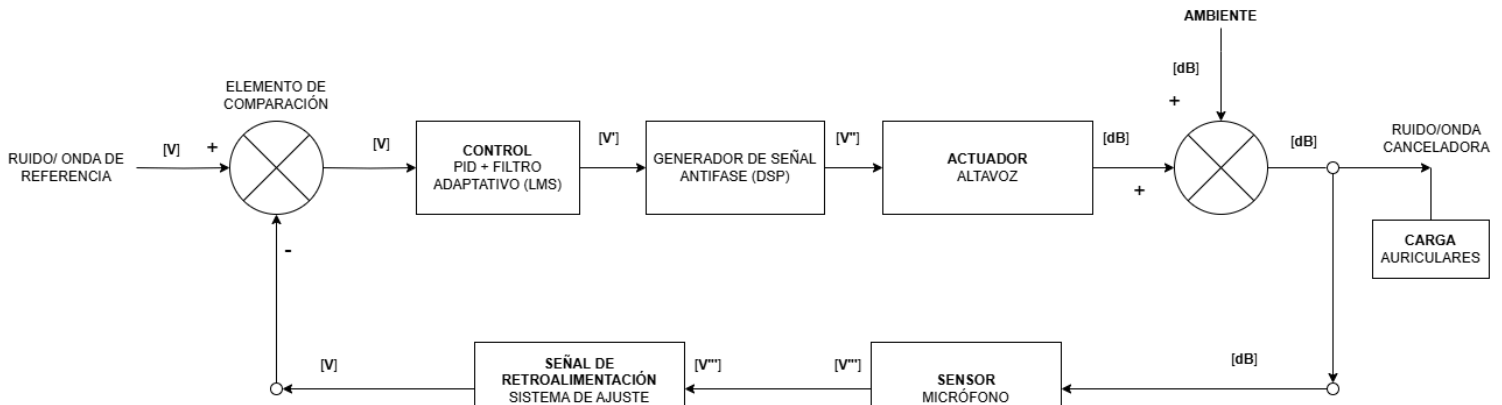
- **Transferencia:** $H(s) = \frac{V_{salida}}{P_{entrada}}$
- **Función:** Este micrófono mide el “residuo” de ruido no cancelado y lo transmite al sistema de retroalimentación. La señal de error es utilizada para ajustar continuamente el sistema y mejorar la precisión de la cancelación. Permite al sistema adaptarse dinámicamente a cambios en el ruido ambiente.
- **Conversión:** Acústico a electrónico
- **Entrada:** Nivel de presión sonora residual [dB SPL]
- **Salida:** Voltaje señal de error [V''']

- **Señal de retroalimentación: Sistema de ajuste adaptativo**

- **Transferencia:** $H(s) = \frac{V_{retroalimentación}}{V_{error}}$
- **Función:** Optimiza los parámetros del filtro adaptativo. Toma el voltaje de error y lo traduce en términos de ajuste de fase y amplitud que el filtro

adaptativo necesita aplicar para reducir el error. Utiliza algoritmos de aprendizaje adaptativo (LMS) para comparar la señal de error con el nivel deseado (idealmente cero o mínimo) y produce una señal de ajuste en términos de fase y amplitud.

- **Entrada:** Voltaje señal de error [V^{'''}]
- **Salida:** Voltaje retroalimentación [V]



[Link al diagrama](#)

9. CARACTERÍSTICAS DE LA RESPUESTA

Describe cómo el sistema interactúa con las perturbaciones ambientales y genera una onda antifase para cancelarlo.

Latencia del sistema:

- Tiempo que tarda el sistema en medir el ruido, procesar la señal y generar la onda antifase.
- Para que la cancelación sea efectiva, la onda antifase debe estar alineada en tiempo (latencia) con la onda de ruido de entrada. Esto se puede analizar mediante la relación:

$$T = \frac{1}{f}$$

- Para una frecuencia de 20Hz (mínimo), el período es de 50ms
- Para una frecuencia de 1KHz, el período es de 1ms
- Para una frecuencia de 4KHz (máximo), el período es de 0.25ms
- Efectos de latencia alta:
 - Desfase, pérdida de cancelación y oscilaciones

Rango de frecuencias afectadas:

- Frecuencias bajas: (20 Hz a 1 KHz):
 - Es donde el ANC es más efectivo.
 - Predominan los ruidos graves con motores o ventiladores
- Frecuencias medias: (1KHz a 4KHz):
 - La cancelación es limitada debido a un mayor esfuerzo del sistema por generar una onda antifase precisa en tiempo real, lo que requiere mejor performance general del sistema y menor latencia.

Amplitud residual y precisión:

- Ruido residual:
 - Luego de la cancelación (respuesta), el ruido residual debe ser lo más bajo posible.
 - Objetivo: Reducción de nivel de presión sonora por debajo de los 30 dB SPL (para frecuencias bajas).
- Interferencia destructiva:
 - La efectividad depende de la coincidencia en amplitud y fase entre la señal antifase y el ruido de entrada (a cancelar). Los problemas más comunes surgen de desalineación de fase y amplitud insuficiente debido a limitaciones del altavoz.

Análisis del dinamismo de la respuesta:

La efectividad del sistema depende de cómo las tres etapas (transitoria -> tiempo de establecimiento -> estable) interactúan. Una rápida respuesta transitoria asegura que los usuarios no noten el ruido inicial. Un establecimiento eficiente permite que el sistema opere bajo condiciones dinámicas. Finalmente, una respuesta estable garantiza (o debe garantizar) una experiencia consistente. Estas etapas deben estar balanceadas, dado que un sistema demasiado rápido puede generar inestabilidad, mientras que uno demasiado lento puede ser ineficaz ante ambientes cambiantes o frecuencias medias-altas.

- **Transitorio:**
 - Describe el comportamiento del sistema en el intervalo inicial de funcionamiento o luego de perturbaciones internas o externas. Un control con bajo amortiguamiento puede generar oscilaciones acústicas perceptibles (picos de ruido de salida).
 - Características:
 - **Sobrealimentación(overshoot):** Cuando el sistema responde con una señal antifase que excede temporalmente el nivel necesario, puede producir oscilaciones no deseadas.
 - **Frecuencia de Oscilación:** Rapidez con que oscilan las señales del sistema, influenciada por las ganancias del control PID.
 - Parámetros:
 - **Amortiguamiento(ζ ; d_{seta}):** Determina cómo disminuyen las oscilaciones en el tiempo. Valores bajos ($\zeta < 1$) generan sobreimpulsos; mientras que valores altos ($\zeta > 1$) generan respuestas lentas.
 - **Frecuencia Natural (ω_n):** Frecuencia a la cual el sistema tiende a oscilar sin amortiguamiento.
- **Tiempo de establecimiento:**
 - Tiempo que tarda el sistema en reducir el error al valor nominal deseado.
 - Fórmula para sistemas con amortiguamiento crítico ($\zeta = 1$): $T_s = \frac{4}{\omega_n}$

- Un filtro adaptativo lento prolongará el tiempo de establecimiento, reduciendo la eficacia en entornos dinámicos donde ocurren muchos transitorios (ruidos inesperados).
- **Estable:**
 - Describe el comportamiento del sistema una vez se ha alcanzado una condición constante después de responder a perturbaciones externas o internas. Frente a una entrada finita la salida también debe ser finita.
 - Características:
 - **Ruido residual:** debe permanecer dentro de un rango aceptable (<30 dB SPL).
 - **Adaptabilidad a cambios menores:** ajustes suaves en el ruido sin generar picos u oscilaciones perceptibles.

10. CARACTERÍSTICAS Y TIPO DE ERROR:

En el sistema de cancelación activa de ruido (ANC), el error representa el desvío entre el nivel de ruido residual medido y el objetivo de cancelación deseado (*idealmente el ruido residual es 0 dB SPL*). Este error afecta la eficacia del sistema y la percepción del usuario, y es crucial para ajustar la respuesta del controlador y los filtros adaptativos.

Representación del error:

- Entrada: Onda de referencia predefinida (V)
- Señal de error: Diferencia entre el error residual medido ($P_{residual}$) y el objetivo deseado ($P_{deseado} = 0$ dB SPL):
$$e(t) = P_{residual} - P_{deseado}$$

Rango de error admisible:

- Errores pequeños (*dentro del rango admisible*) tienen un impacto mínimo en la calidad del sonido. Los errores dentro de este rango pueden ajustarse dinámicamente mediante el filtro adaptativo.
- Debido a la dificultad práctica de obtener una cancelación perfecta, se establecen límites de tolerancia:
 - Límite inferior: Ruido residual entre 0 - 10 dB SPL
 - Límite superior: Ruido residual entre 25 - 30 dB SPL. en situaciones donde el ANC no es completamente efectivo como ruidos transitorios o altas frecuencias.
 - => Rango admisible: $P_{residual} \in [0, 30] \text{ dB SPL}$

Fallos por error fuera de rango:

- Errores grandes (*fuera del rango admisible*) indican una incapacidad del sistema para manejar el ruido ambiental, lo que puede causar molestias al usuario y requerir una intervención manual o recalibración del sistema.
 - Cota inferior: Menos que 0 dB SPL no es físicamente posible a menos que ocurra un error en la medición o inestabilidad en el sistema.

- Cota superior: Más que 30 dB SPL se considera una falla, ya que el ruido residual es concebido como lo suficientemente molesto como para considerarse el correcto funcionamiento del sistema ANC.

Tipos de error:

- Error por desfase: La causa es que la señal antifase no está perfectamente alineada en el tiempo con el ruido a cancelar, lo que causa una cancelación parcial o interferencia constructiva (en vez de destructiva), aumentando aún más el ruido residual.
- Error por amplitud: La causa es que la señal antifase tiene una amplitud menor o mayor que la del ruido original, lo que causa una cancelación incompleta o amplificación del ruido residual.
- Error de alta frecuencia: Causado por la dificultad del sistema de manejar frecuencias mayores a 4 kHz debido a la longitud de onda más corta, lo que provoca ruido residual notable en frecuencias medias y altas.
- Error transitorio: Causado por variaciones bruscas en el ruido ambiental que el sistema no puede seguir en tiempo real, lo que provoca picos temporales de ruido residual.

Mitigación del error:

- Control PID y filtro adaptativo: Se deben ajustar dinámicamente la ganancia (K_p), la corrección integral (K_i) y la tasa de respuesta derivativa (K_d) para minimizar el error.
- Aumento de la frecuencia de muestreo: Frecuencias de muestreos mayores a los 8 kHz (*16 kHz en la práctica*) permiten captar con mayor precisión los cambios en las perturbaciones ambientales y cancelarlas en tiempo real.
-

11. CARACTERIZACIÓN DE LA ESTABILIDAD:

La estabilidad en un sistema de cancelación activa de ruido (ANC) se define como la capacidad del sistema de mantener el nivel de ruido residual dentro de un rango tolerable, adaptándose a perturbaciones externas e internas, y retornando a una condición nominal después de dichas perturbaciones.

- Condición normal: La condición de estabilidad se alcanza cuando el ruido residual medido por el micrófono de error se mantiene dentro de un rango definido entre 0 y 30 dB SPL.
- Respuesta a perturbaciones: Para ser estable, el sistema ANC debe tener la capacidad de regresar al rango admisible después de perturbaciones como transitorios en el ruido ambiental.

Elementos que aseguran la estabilidad:

- PID calibrado correctamente:
 - Término proporcional (K_p) que corrige el error actual rápidamente.
 - Término integral (K_i) que corrige errores acumulados.
 - Término derivativo (K_d) que suaviza la respuesta, evitando oscilaciones bruscas no deseadas.

- Filtro adaptativo: Ajusta dinámicamente los parámetros del sistema en tiempo real, asegurando que el ruido cambiante no saque al sistema de su rango nominal.
- Frecuencia de muestreo y latencia baja: Una frecuencia de muestreo mayor a 8 kHz (*16 kHz en la práctica*) y una latencia < 1 ms aseguran (*mejor esfuerzo*) que las correcciones sean lo suficientemente rápidas para mantener la estabilidad.

Escenarios de estabilidad:

- Sistema Estable: Ruido residual dentro del rango tolerable, con una respuesta que converge rápidamente luego de las perturbaciones ambientales.
- Sistema Marginalmente Estable: Oscilaciones de baja amplitud en el ruido residual que no excedan el rango tolerable, pero entorpecen la cancelación de ruido.
- Sistema Inestable: Perturbaciones que generan oscilaciones grandes o divergentes en el ruido residual. Esto puede ocurrir, por ejemplo, si tengo una ganancia excesiva en el controlador o una latencia demasiado alta.

Límites de estabilidad:

- Saturación del altavoz: El límite de la amplitud de la señal antifase del altavoz es alcanzado. Esto puede ocurrir si el ruido es demasiado intenso, dado que el sistema no va a poder cancelar completamente el ruido.
- Ruidos de alta frecuencia: Las características de los transductores y la longitud de onda más corta de las perturbaciones dificulta su cancelación efectiva.
- Ruido intrínseco y variaciones de temperatura: El ruido térmico y la variación en la sensibilidad de los componentes puede llevar a un comportamiento inestable si no se compensan adecuadamente.

12. RELACIÓN ENTRE SEÑALES ANALÓGICAS Y DIGITALES

La relación entre señales analógicas y digitales se define por los procesos de conversión y procesamiento que transforman las señales entre ambos dominios.

- Señales analógicas: Continuas en el tiempo y representan directamente magnitudes físicas como el sonido o el voltaje.
- Señales digitales: Discretas en el tiempo y representan la información en valores binarios para su posterior procesamiento.

Conversión entre señales analógicas y digitales:

- **Conversión Analógica-Digital (ADC) en micrófono de error:**
 - Convierte la señal analógica captada por el micrófono en una representación digital que pueda ser procesada por el controlador.
 - El proceso de conversión consta de varias etapas:
 - Muestreo: Captura valores de la señal analógica a intervalos regulares definiendo la frecuencia de muestreo. Esta frecuencia debe cumplir el Teorema de Nyquist, dado que la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia máxima del ruido a cancelar.
 - Cuantización: Asigna valores discretos a la amplitud de la señal analógica en cada muestra. La resolución típica es de 16 a 24 bits.

- 16 bits es suficiente para muchas aplicaciones de ANC.
- 24 bits mejora la calidad en entornos exigentes.
- **Serialización:** Consta de una secuencia de impulsos binarios para su transmisión o procesamiento. Cada muestra analógica es convertida en un código binario, que luego se serializa en forma de bits transmitidos secuencialmente. PE: una señal analógica de 16 bits de resolución se representa como una cadena de 16 pulsos binarios.
- **Frecuencia de muestreo: QoS y Ancho de Banda**
 - En relación con la QoS, una frecuencia de muestreo insuficiente genera distorsiones y pérdidas de información; mientras que una frecuencia de muestreo elevada mejora la calidad de la señal, pero aumenta la carga de procesamiento y el consumo energético.
 - En nuestro trabajo la frecuencia de muestreo va a estar ubicada en 8 kHz para garantizar la cancelación de frecuencias bajas y medias menores a 4 kHz.
 - En relación con el ancho de banda efectivo, está limitado por la frecuencia de muestreo sobre 2: $\frac{f_s}{2}$. Un mayor ancho de banda permite trabajar con señales más complejas, pero requiere de hardware más avanzado.
- **Conversión Digital-Analógica (DAC) en altavoz:**
 - Convierte la señal digital procesada por el controlador y filtros adaptativos devuelta al dominio analógico para ser reproducida por el altavoz y cancelar las perturbaciones ambientales.
 - El proceso de conversión consta de varias etapas:
 - Generar continuidad en la señal.
 - Generar forma adecuada a partir de escalones. Genero un escalón que sostenga/retenga el valor/estado inicial.
 - La curva original (senoidal, exponencial, etc) se logra aplicando filtros para “suavizar” la forma, no forma parte de la digitalización.
 - **Frecuencia de salida:** Debe coincidir con el rango de operación del altavoz dinámico (20 Hz a 4 kHz)

Relación y dependencia entre dominios:

- **Sincronización:** La calidad del sistema depende de una conversión precisa y sincronizada entre los dominios analógico y digital. Retardos excesivos en el ADC o DAC pueden introducir latencia, afectando la alineación de las ondas.
- **Procesamiento y precisión:** Mayor resolución y frecuencia de muestreo mejora la precisión, pero aumenta la carga de procesamiento.
- **Interacción:** Las señales analógicas interactúan directamente con el entorno físico, mientras que las digitales permiten ajustes dinámicos y análisis avanzado.

Aplicación en el sistema:

- El micrófono de error recibe una señal analógica que representa el ruido ambiental, lo que el ADC convierte a digital para que el filtro adaptativo ajuste la respuesta.

- El DAC convierte la señal digital procesada por el controlador y filtro adaptativo en analógica para generar la onda antifase en el altavoz.

13. CARGA ASOCIADA AL SISTEMA:

- Teniendo en cuenta que la carga es aquello que utiliza la respuesta y determina sus características, podemos decir que la carga son los auriculares que se aprovechan del ruido cancelado, pues los auriculares utilizan la señal antifase generada para reducir el ruido externo percibido por el usuario. Esto mejora la experiencia auditiva al permitir que los sonidos deseados, como música o llamadas, se escuchen con mayor claridad y sin interferencias.
- Los auriculares funcionan como un sistema acústico cerrado, donde el diseño físico y la calidad de los transductores (altavoz y micrófono de error) influyen en la efectividad del sistema ANC. Un buen diseño acústico cerrado, como en auriculares over-ear o in-ear, mejora la cancelación pasiva y complementa la cancelación activa.
- **Tipos de Auriculares:**
 - Auriculares Over-Ear: Sellan completamente alrededor del oído, maximizando la cancelación pasiva. Proporcionan el mejor rendimiento para ANC en entornos ruidosos.
 - Auriculares In-Ear: Ofrecen un buen equilibrio entre portabilidad y rendimiento. Son eficaces para la cancelación activa gracias al sellado directo dentro del canal auditivo.
 - Auriculares On-Ear: Menos efectivos para la cancelación pasiva debido a un sellado incompleto, pero aún pueden beneficiarse de ANC en bajas frecuencias.

SIMULACIÓN:

REPOSITORIO:

- <https://github.com/TomasGliozzo/ANC-System-TC-2C24>
- **Contenido**
 - **ANC.py**: implementación del sistema
 - Para llevar a cabo la simulación del sistema ANC, se utilizará el lenguaje de programación Python. En el mismo se utilizarán bibliotecas que ayuden a la implementación del mismo. Las bibliotecas usadas serán:
 - **numpy**: biblioteca para realizar operaciones matemáticas de forma eficiente, especialmente para el manejo de matrices. En el trabajo se utilizan para generar señales (ruido y perturbaciones) y realizar cálculos relacionados con la generación de sinusoides y las operaciones del algoritmo LMS.
 - **matplotlib**: biblioteca de visualización que permite generar gráficos. En el trabajo se utilizan para mostrar las señales de entrada y perturbación (su suma), la señal antifase generada por el filtro LMS y la señal residual después de la cancelación.
 - **configparser**: biblioteca utilizada para leer y gestionar archivos de configuración. Permite cargar diferentes configuraciones de parámetros (como frecuencia y amplitud del ruido) desde archivos

.config. Esto hace el código más modular, facilitando el seguimiento, ajuste y modificación de los diferentes casos de uso.

- **Capturas de los gráficos** de cada caso de uso (especificados más adelante) con el número de caso y nombre.
- **Archivos .config** de cada caso de uso.

PRUEBAS:

- Todos los casos de uso están definidos con archivos config que se especifican a la hora de ejecutar el programa ANC. El mismo cubre diversas pruebas válidas y errores. Las pruebas al filtro LMS las considero cubiertas si se cancelan los ruidos a diferentes frecuencias y amplitudes.
- **Valores principales utilizados:**
 - **fs:** frecuencia de muestreo: 16 kHz
 - **t:** tiempo de simulación: 1s (*en algunos casos modificado*)
 - **fc:** frecuencia de corte de altavoz y micrófono: 7.9 kHz para corresponder con la restricción de que debe menos de la mitad de la frecuencia de muestreo (Nyquist) y a su vez poder cancelar efectivamente frecuencias de 4 kHz.
 - **Orden del filtro LMS (f_0):** 32 (estándar) (*en algunos casos modificado*)
 - **Orden del factor de aprendizaje (μ):** 0.01 (estándar) (*en algunos casos modificado*)
 - Valores más altos son más efectivos con frecuencias altas
 - Valores menores son más efectivos con amplitudes altas.
- **Ruidos y perturbaciones:**
 - **Amplitud:** 30 dB SPL a 100 dB SPL (en la simulación se utilizan Pascales)
 - Ecuación de conversión: $P = P_{ref} \cdot 10^{(L_{dB}/20)}$
 - $P_{ref} = 20\mu Pa$
 - L_{dB} : amplitud en dB SPL
 - Valores:
 - 40 dB SPL = 0.002 Pa
 - 80 dB SPL = 0.2 Pa
 - 88 dB SPL = 0.5 Pa
 - 94 dB SPL = 1 Pa.
 - 100 dB SPL = 2 Pa
 - **Frecuencia:** 20 Hz a 4 kHz. Puede funcionar hasta 7.9 kHz con problemas proporcionales a la cercanía a dicha frecuencia. Luego dejó de funcionar la cancelación, deja de comportarse de forma determinística y/o agrega más ruido a la salida.

Pruebas Válidas:

1. Prueba base de encendido:

$$f_{in} = 1000; A_{in} = 1; f_{per} = 0; A_{per} = 0$$

2. Frecuencia mínima con amplitud media:
 $f_{in} = 20; A_{in} = 0.2; f_{per} = 0; A_{per} = 0; \mu = 0.1;$
3. Frecuencia máxima con amplitud media:
 $f_{in} = 4000; A_{in} = 0.2; f_{per} = 0; A_{per} = 0;$
4. Frecuencia media con amplitud mínima:
 $f_{in} = 1000; A_{in} = 0.002; f_{per} = 0; A_{per} = 0; \mu = 1; f_o = 64;$
5. Frecuencia media con amplitud máxima:
 $f_{in} = 1000; A_{in} = 2; f_{per} = 0; A_{per} = 0;$
6. Frecuencia y amplitud medias con perturbación mínima:
 $f_{in} = 1000; A_{in} = 0.2; f_{per} = 20; A_{per} = 0.002;$
7. Frecuencias y amplitud medias con perturbación máxima:
 $f_{in} = 1000; A_{in} = 0.2; f_{per} = 4000; A_{per} = 2;$

Pruebas de Error:

1. **Error de frecuencia máxima:** A partir de 4 kHz empieza a saturar y a verse afectada la cancelación. Al alcanzar 7.5 kHz deja de cancelar, y después de 7900 Hz diverge. La captura corresponde a frecuencia de 8 kHz para visualizar correctamente la divergencia del sistema.
 $f_{in} = 8000; A_{in} = 0.02; f_{per} = 0; A_{per} = 0;$
2. **Error de amplitud máxima:** Para valores de amplitud mayores a 2Pa (100 dB SPL) el sistema deja de funcionar por overflow en los coeficientes del filtro LMS. En el gráfico se ve que no puede generar la señal antifase y en 1 ms se corta la ejecución, marcado en el gráfico como un pico.
 $f_{in} = 20; A_{in} = 3; f_{per} = 0; A_{per} = 0;$
3. **Error por saturación de elemento de medición:** Como el error de frecuencia, la idea es mostrar cómo afecta a la cancelación de sonido en valores cercanos a la frecuencia de corte de los elementos de medición sin que la frecuencia de muestreo juegue un papel preponderante. Por lo tanto, se la fija en 44 kHz y se vé como efectivamente afecta la frecuencia de corte del micrófono y altavoz. En este caso no ocurre la cancelación y la señal residual satura al doble de la amplitud original.
 $f_s = 44000; f_{in} = 7800; A_{in} = 0.2; f_{per} = 0; A_{per} = 0;$
4. **Error por frecuencia de muestreo baja:** El programa falla si la frecuencia de muestreo es menor a 16 (15.8) kHz y avisa del error por consola.
 $f_s = 8000; \dots;$

```
raise ValueError("Digital filter critical frequencies must be 0 < Wn < fs/2 (fs=8000.0 -> fs/2=4000.0)
```

- Aclaración resultados de pruebas:

- Todos los gráficos/resultados se encuentran en el repositorio en la carpeta *src/capturas_gráficos* junto con su número y nombre.

- Algunas pruebas fueron realizadas con tiempos menores a 1s porque para tiempos mayores no se mostraban mayores cambios y/o porque mayores tiempos no mostraban el detalle buscado en las ondas.

CONCLUSIÓN:

El sistema de cancelación activa de ruido (ANC) propuesto representa una solución tecnológica económica y efectiva para mitigar los efectos del ruido ambiental en contextos donde abundan los ruidos de bajas-medias frecuencias. Este trabajo abordó exhaustivamente conceptos fundamentales de la teoría de control, destacando la implementación de un filtro adaptativo LMS, un controlador PID y un sistema de retroalimentación de lazo cerrado, junto con el análisis y caracterización de las diferentes variables que entran en juego. El sistema permite operar principalmente en un rango de frecuencias de 20 - 4000 Hz, con una amplitud de 40 - 100 dB SPL y con una latencia menor a 0.0625 ms, lo cual lo hace funcional en aplicaciones de tiempo real. Los resultados de la simulación demostraron que el sistema puede reducir efectivamente el ruido residual, logrando cancelaciones muy significativas en todos los casos esperados, lo cual se encuentra alineado con los objetivos de control planteados. Además, la frecuencia de muestreo adecuada garantiza un procesamiento preciso, evitando aliasing y preservando la fidelidad de las señales trabajadas.

Entre las ventajas principales de este sistema se encuentran su capacidad para adaptarse dinámicamente a los cambios en el ruido ambiental, gracias al uso de un esquema de lazo cerrado donde se ajusta constantemente la fase y amplitud de la onda antifase *-canceladora-*. Por otro lado, su diseño lo hace adecuado a entornos mayoritariamente controlados o cerrados como transporte público, maquinaria industrial, oficinas ruidosas, bibliotecas, hogares, etc. Sin embargo, enfrenta limitaciones importantes, como la pérdida de eficacia en frecuencias altas debido a las restricciones físicas del altavoz dinámico, cuya respuesta no lineal genera distorsiones y saturaciones que agregan aún más ruido al sistema. Por lo tanto, un punto a mejorar es incrementar la frecuencia de corte de ambos transductores (micrófono y altavoz) para extender el rango operativo a frecuencias mayores. Por otro lado, la dependencia de un único micrófono puede provocar imprecisiones en ciertas condiciones más dinámicas que las abordadas, por lo que hubiera favorecido al sistema la inclusión de un segundo micrófono interno, que permitiría una cancelación más precisa al integrar datos complementarios provenientes del canal auditivo del usuario con los del micrófono de error actual.

En conclusión, este trabajo refleja un diseño integral que combina fundamentos teóricos y herramientas prácticas *-como la simulación realizada en Python-* para resolver un problema complejo y desafiante, con el fin de destacar las potencialidades del sistema ANC para aplicaciones en diversos entornos. Los resultados obtenidos proporcionan una base sólida para mejoras y revisiones en futuros trabajos.

BIBLIOGRAFÍA:

- [*Diseño e implementación de un sistema de control activo de ruido \(CAR\) desarrollado en tecnología FPAA - Jorge E. Mondragón E., Francisco E. Moreno G., Marlon Hernández C., José A. Becerra V.*](#)
- [*Adaptive Feedback Active Noise Control Headset: Implementation, Evaluation and*](#)

Its Extensions

- [Cancelación activa de ruido utilizando el kit TMS320C5515 EZDSP – Daniel Garcia Rubio](#)
- [Vista de Desarrollo de un sistema para cancelación activa de ruido \(uaeh.edu.mx\)](#)
- [How Do Noise Canceling Headphones Work?](#)
- [Efficient Narrowband Noise Cancellation System Using Adaptive Line Enhancer | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore](#)
- [MICRÓFONOS MEMS: ANÁLISIS Y APLICACIONES EN AUDICIÓN BINAURAL](#)
- [Nivel de presión sonora \(SPL\) | Svantek Academy](#)
- [Proceso avanzado, febrero 2014](#)
- [Frequency-Domain Filtered-x LMS Algorithms for Active Noise Control: A Review and New Insights](#)
- [\[https://es.wikipedia.org/wiki/Conversor_de_se%C3%B1al_anal%C3%B3gica_a_digital\]\(https://es.wikipedia.org/wiki/Conversor_de_se%C3%B1al_anal%C3%B3gica_a_digital\)](#)
- [<https://www.cs.cmu.edu/~aarti/pubs/ANC.pdf>](#)
- [\[2110.00531\] A survey on active noise control techniques–Part I: Linear systems](#)
- [Perturbaciones en la Red - Cableado Estructurado, Fibra Óptica, Redes, Consultoría](#)
- [\(PDF\) Active noise control systems with the TMS320 family](#)
- [Técnicas de medición de interferencias electromagnéticas \(EMI\) - LISUN](#)
- [Comprensión de las pruebas de EMI y RFI: una guía completa - Saipwell](#)
- [Electromagnetic Compatibility: Challenges, Solutions, and Best Practices for Mitigating EMI in Electronic Systems | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore](#)
- [Frequency-Domain Filtered-x LMS Algorithms for Active Noise Control: A Review and New Insights](#)
- [Active noise control: Open problems and challenges | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore](#)

ANEXO:

- Micrófono MEMS: MP34DT01-M
[<https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/47/bd/d2/13/8d/fd/48/26/DM00121815.pdf/files/DM00121815.pdf/jcr:content/translations/en.DM00121815.pdf>](#)
- Altavoz dinámico: Dynamic Micro Speaker de Pro-Signal
[<https://www.farnell.com/datasheets/2362847.pdf>](#)
- DAC clase D: TLV320DAC3120
[\[TLV320DAC3120 data sheet, product information and support | TI.com\]\(#\)](#)

[TLV320AIC3262 Ultralow Power Stereo Audio Codec With miniDSP, DirectPath Headphone, and Stereo Class-D Speaker Amplifier datasheet \(Rev. A\)](#)

- Auriculares over-ear JBL Tune 760NC con Bluetooth

[JBL Tune_760NC_SpecSheet_Global_English.pdf](#)