



CONTROL ACTIVO DE RUIDO EN CONDUCTOS DE VENTILACIÓN

Director: Francisco Javier Martínez Gómez

Autor: Alejandro Pérez Zapata

Ingeniería Técnica Industrial en Electrónica Industrial

Convocatoria: Septiembre 2013

1. Objeto y alcance del proyecto.
2. Introducción.
 - 2.1 Definición de ruido y problemática derivada.
 - 2.2 Técnicas de control de ruido.
 - 2.3 Control activo de ruido.
 - 2.3.1 Evolución histórica.
 - 2.3.2 Fundamentos Acústicos.
 - 2.3.3 Estructuras de control y aplicaciones
 - 2.4 Ruido en hospitales
3. Control de ruido en conductos de ventilación.
 - 3.1 Ventiladores y climatizadores.
 - 3.1.1 Tipos de ventiladores.
 - 3.2 Ruido en ventilación
 - 3.2.1 Ruido del motor
 - 3.2.2 Ruido aerodinámico
 - 3.3 Modelado del sistema.
4. Planteamiento técnico.
 - 4.1 Caracterización del sistema
 - 4.2 Algoritmo para sistemas CAR con estructura feedforward
 - 4.3 Consideraciones técnicas de diseño
 - 4.4 Instalación de un sistema CAR experimental en un conducto acústico
5. Aplicaciones del control activo de ruido.
6. Glosario
7. Bibliografía.
 - 7.1 Libros consultados.
 - 7.2 Artículos consultados.
 - 7.3 Patentes consultadas.
 - 7.4 Tesis consultadas.
 - 7.5 Páginas Web consultadas.

Índice de figuras.	Página
Figura nº 1.- Barrera acústica en una autopista.	9
Figura nº 2.- Auriculares con cancelación de ruido.	10
Figura nº 3.- Interferencia destructiva.	11
Figura nº 4.- Figuras de la patente de P.Lueg.	13
Figura nº 5.- Propuesta de aplicación en la patente de Olson.	14
Figura nº 6.- Ejemplo de CAR para habitáculo de un automóvil.	21
Figura nº 7.- Disminución de la potencia total de un dipolo en contrafase.	22
Figura nº 8.- Ejemplo de control feedforward en un conducto.	25
Figura nº 9.- Instalación experimental para el control de ronquidos con CAR.	27
Figura nº 10.- Sala de hospital con suelo de linóleo.	31
Figura nº 11.- Ejemplo de ventilador axial.	35
Figura nº 12.- Ejemplo de ventilador centrífugo.	36
Figura nº 13.- Ejemplo de ventilador de flujo cruzado.	37
Figura nº 14.- Esquema de control activo con estructura Feedforward.	42
Figura nº 15.- Sistema de identificación CAR.	44
Figura nº 16.- Estrategia de identificación de sistemas en CAR feedforward.	45
Figura nº 17.- Diagrama de bloques de sistema CAR modificado con $H(z)$.	46
Figura nº 18.- Diagrama de bloques del algoritmo FXLMS para CAR.	47
Figura nº 19.- Control activo de ruido empleando el logaritmo FXLMS.	49
Figura nº 20.- Tubo con sonda para mejorar la coherencia.	51
Figura nº 21.- Micrófono emplazado en hueco.	52
Figura nº 22.- Instalación de un sistema CAR en un conducto unidimensional.	54
Figura nº 23.- Esquema de un filtro Butterworth de octavo orden.	55
Figura nº 24.- Respuesta en frecuencia del filtro Butterworth.	56
Figura nº 25.- Esquema y respuesta en frecuencia del micrófono.	56
Figura nº 26.- Ejemplo del diseño típico del preamplificador de audio.	57
Figura nº 27.- Ejemplo de circuito de aplicación del amplificador.	58
Figura nº 28.- Auricular con cancelación activa.	60
Figura nº 29.- Protector auditivo activo.	61
Figura nº 30.- Sistema CAR en un automóvil.	63
Figura nº 31.- CAR en una ventana de doble cristal.	66
Figura nº 32.- Silenciador activo de Silentium.	67
Figura nº 33.- Prototipo de CAR en una incubadora.	69

Índice de tablas.

Página

Tabla nº 1.- Intensidad de diferentes ruidos y riesgo asociado.	7
Tabla nº 2.- Comparativa de las técnicas de control de ruido.	10
Tabla nº 3.- Comparativa de control Feedback y Feedforward.	26
Tabla nº 4.- Niveles máximos de ruido recomendados en hospitales por diferentes organizaciones.	29

1.-Objeto y alcance del proyecto

El ruido, y en concreto la contaminación acústica, constituye uno de los principales problemas ambientales de la sociedad moderna. Es la molestia más común a la que debemos enfrentarnos en la vida diaria junto con la contaminación del aire, especialmente en ámbitos urbanos, ya sea en viviendas o en entornos laborales, aunque el entorno rural no escapa al que es uno de los contaminantes más persistente en el ambiente humano.

La revolución industrial propició mejoras sustanciales en la calidad y esperanza de vida de las personas, pero por otro lado trajo consigo la desventaja de la contaminación medioambiental. Prácticamente cualquier actividad industrial y sus productos derivados llevan asociados unos niveles de ruido que pueden ser perjudiciales para la salud y el bienestar.

En este proyecto se pretende plantear una estructura de Control Activo de Ruido en conductos de ventilación. Se estudiará el ruido y los efectos que una exposición prolongada a niveles excesivos puede tener en el organismo. Asimismo, se analizará la contaminación acústica en hospitales y unidades de cuidados intensivos, por ser estos emplazamientos extremadamente sensibles al exceso de ruido, y se considerará este lugar como el posible emplazamiento del sistema de control. Se explicarán los métodos de control de ruido, en especial el Control Activo de Ruido, para después enfocarlo al control en conductos, donde se analizará y modelará el tipo de ruido para poder esbozar la estructura y sistema que mejor se adapten a las premisas planteadas.

2.- Introducción

2.1.- Definición de ruido y problemática derivada

Definición de ruido de la Real Academia Española:

1. “Sonido inarticulado, por lo general desagradable”.
5. “En semiología, interferencia que afecta a un proceso de comunicación”.

El sonido en física es una perturbación que se propaga en forma de ondas a través de un medio material (gas, líquido o sólido). El sonido (el ruido en este caso) que percibimos mediante el oído se propaga a través del aire de forma tridimensional, teniendo por lo general formas complejas y diferentes frecuencias.

Los motores de los coches, autobuses, aviones y en general de cualquier medio de transporte producen niveles considerables de ruido. También los transformadores en las estaciones eléctricas, los sistemas de calefacción y de ventilación en los edificios producen ruido.

El umbral de percepción para el oído humano se encuentra entre los 20 Hertzios y los 20.000 Hertzios. Por encima de este umbral los sonidos se denominan ultrasonidos y por debajo infrasonidos, ambos imperceptibles para las personas, pero no para otros animales, como por ejemplo los perros y los gatos que pueden llegar a oír sonidos de entre 50 y 60 kHz, o los murciélagos que pueden llegar a los 100 kHz.

Otra característica que define al ruido, como a cualquier sonido, es la potencia acústica, que es la cantidad de energía emitida en forma de onda sonora. La potencia acústica viene determinada por la amplitud de la onda, de forma que cuanto mayor sea la amplitud mayor será la cantidad de energía que se genere. La percepción que el oído tiene de esta potencia es lo que entendemos como volumen, expresado en decibelios (dB).

El ruido, aparte de la definición técnica anterior, puede entenderse de forma general como cualquier sonido que resulta molesto para una persona.

Si bien al ser percibido por una persona puede tener un carácter subjetivo: el sonido de un coche de competición o de un concierto puede agradar a alguien mientras que para otro puede resultar insoportable. No obstante, cualquier exposición a niveles altos de ruido, independientemente del origen de los mismos, puede tener consecuencias nocivas para la salud.

La capacidad auditiva se deteriora (temporal o permanentemente) cuando los sonidos percibidos están entre 75 y 125 dB. A partir de los 100 dB el nivel es muy alto y la sensación es molesta, ruidos por encima de 120 dB entran dentro del umbral del dolor y existe riesgo de sordera incluso en exposiciones de corta duración, aunque ruidos de menor intensidad también pueden perjudicar la salud si la exposición a los mismos es de larga duración.

Así, el ruido puede causar efectos sobre:

- El oído: obviamente, niveles altos de ruido pueden ser causantes de hipoacusia (pérdida crónica de audición) alterando el umbral de audición.
- El sistema cardiovascular: alteraciones del ritmo cardíaco, riesgo coronario, hipertensión arterial y excitabilidad vascular.
- Glándulas endocrinas, con alteraciones de la glándula pituitaria y aumento de la secreción de adrenalina.
- Aparato digestivo: incremento de enfermedades gastroduodenales al dificultar el descanso.
- Otras afecciones: incremento de estrés, alteraciones mentales, actitudes agresivas y dificultades para la concentración y el rendimiento.

Todas estas afecciones pueden provocar, tanto en el entorno laboral como en el doméstico, estrés y dificultad de concentración, dificultando el descanso y rompiendo la privacidad, deteriorando las condiciones laborales y dando lugar a una pérdida de productividad.

Según la Organización Mundial de la Salud, en la Unión Europea alrededor de un 40% de la población está expuesta al ruido del tráfico con un nivel equivalente de

presión sonora que excede los 55 dB en el día y el 20 % está expuesta a más de 65 dB. Además, constata que la carga medioambiental de enfermedades asociada al ruido sólo se ve superada por la contaminación del aire, e incluso un estudio coordinado por la OMS calcula que en Europa occidental se pierden anualmente alrededor de un millón de años de vida en global provocados por el ruido del tráfico, ya sea por enfermedad, discapacidad o muerte prematura.

Si se considera la exposición total al ruido del tráfico se puede calcular que aproximadamente la mitad de los europeos vive en zonas de gran contaminación acústica. Más del 30% de la población está expuesta durante la noche a niveles de presión sonora por encima de 55dB, lo que conlleva a trastornos del sueño.

TIPO DE RUIDO	INTENSIDAD	RIESGO
Biblioteca	30 dB	Leve: Hasta 85-90 dB se recomiendan exposiciones menores de 8 horas diarias.
Oficina	40 dB	
Conversación	60-65 dB	
Tono del teléfono	80 dB	
Ruido de tráfico (dentro del coche)	85 dB	
Cortacésped	95 dB	Moderado: niveles mayores de 90 dB de forma continua pueden producir pérdida de audición. (1 hora para 95dB)
Tren de metro	95 dB	
Taladro	100 dB	
Motocicleta	100 dB	
Auriculares de mp3	110 dB	Alto: una exposición corta puede producir daños permanentes. Umbral de dolor en 120dB.
Martillo neumático	130 dB	
Motor de avión (a 150 m)	140 dB	
Disparo de escopeta	140 dB	

Tabla nº 1: Intensidad de diferentes ruidos y riesgo asociado.

Los niños, como cabe esperar, son uno de los grupos más vulnerables, como se ve en estadísticas y estudios que reflejan que una exposición continua y prolongada al ruido puede tener efectos permanentes; desde problemas cardíacos y hormonales ya comentados, hasta dificultar el rendimiento intelectual y el aprendizaje.

A parte del trastorno que puede causar a las personas, también puede influir en el resto de seres vivos de la naturaleza, alterando por ejemplo el hábitat de animales y aves y modificando así sus ecosistemas.

Por todas estas razones resulta necesario controlar o mitigar de alguna forma el ruido que produce una contaminación acústica en entornos laborales o domésticos. Al

conjunto de medidas encaminadas a eliminar total o parcialmente la contaminación acústica se denomina Control del Ruido. El control del ruido y su reducción es un problema técnico de cierta complejidad debido a las restricciones asociadas al mismo: temporales, frecuenciales y espaciales. Debido a estas limitaciones a veces es preferible, en vez de cancelar por completo el ruido, reducirlo a niveles aceptables y no dañinos para la salud, conforme a normativas europeas o estatales. Así, el control de ruido alcanza un equilibrio entre niveles aceptables y el coste económico asociado.

2.2.- Técnicas de control de ruido

Una primera clasificación que puede hacerse de la forma de controlar el ruido sería dependiendo del tipo de control:

- Técnicas pasivas
- Técnicas activas
- Técnicas híbridas pasivas-activas.

Este proyecto va a centrarse en el control activo, pero es necesario explicar brevemente también las técnicas pasivas, ya que generalmente el control de ruido se hace de forma conjunta con los dos tipos, es decir una técnica híbrida pasiva-activa.

Los sistemas de control pasivo se basan en las propiedades absorbentes de determinados materiales, tratando de interrumpir o impedir de alguna manera la propagación del campo sonoro o de variar la impedancia del medio para dificultarla. Hay que destacar que esta técnica pasiva no adiciona energía al sistema, al contrario que la activa. Las dimensiones físicas del dispositivo en cuanto a tamaño y peso son proporcionales a la longitud de onda de la frecuencia del espectro del ruido.

Un ejemplo de técnica pasiva son las barreras acústicas. Son uno de los dispositivos pasivos más utilizados para reducir el ruido del tráfico en zonas urbanas. Se empezaron a diseñar cuando el tráfico rodado en autopistas urbanas (sobre todo en EE.UU.) supuso un problema medioambiental en torno a los años 60 y 70. Son el medio más eficaz para mitigar el ruido del tráfico y para su diseño se tienen en cuenta el ruido producido por el tren de potencia de los vehículos (ruido del motor, sistema

de refrigeración, transmisión) y el rodamiento (ruido aerodinámico, interacción de los neumáticos con la calzada y frenadas).



Figura nº 1: Barrera acústica en una autopista.

Los materiales empleados para construir las barrera van desde acero, hormigón o madera hasta materiales plásticos y compuestos.

Otro ejemplo muy extendido de técnica pasiva son las cámaras de expansión que se emplean como filtros acústicos, el más común es el silenciador de los coches, además de los usados en todo tipo de conductos de ventilación, calefacción y aire acondicionado.

La capacidad atenuadora de estos filtros se determina mediante su longitud y el diámetro de su cámara. En el interior del silenciador hay una serie de tubos diseñados para que reflejen las ondas de sonido de forma que se cancelen unas a otras.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, los dispositivos de control pasivos pierden efectividad a bajas frecuencias. En realidad el rendimiento no se ve afectado, pero para una frecuencia baja se requieren materiales con dimensiones y pesos excesivos y con densidades altas así que son métodos poco rentables. De esta forma los sistemas pasivos quedan recomendados para el rango de frecuencias medias y altas, pero si se pretende controlar una amplia banda de frecuencias se ha de disponer de un sistema híbrido, de hecho la mayor parte de los sistemas activos (encargados del ruido de baja frecuencia) utilizan de manera complementaria algún sistema pasivo para cubrir todo el espectro de frecuencias.



Figura nº 2: Auriculares con cancelación de ruido.

Un ejemplo de esta técnica híbrida son los auriculares con cancelación de ruido: por una parte combinan materiales aislantes de plástico o espuma para cancelar ondas de alta frecuencia (pasiva), y por otra parte incorporan un circuito electrónico con alimentación para el control de bajas frecuencias (activa).

TÉCNICA DE CONTROL	FUNDAMENTO FÍSICO	RANGO DE FRECUENCIAS	APLICACIONES
Activa	Generación de contra-ruido en fase opuesta	Bajas	Conductos de ventilación, habitáculos de medios de transporte
Pasiva	Propiedades absorbentes de materiales	Medias y altas	Barreras acústicas, silenciadores
Híbrida	Combinada de activa y pasiva	Espectro completo	Auriculares

Tabla nº2: Comparativa de las técnicas de control de ruido.

2.3.- Control activo de ruido

Como ya se ha comentado anteriormente, el ruido es el causante de una de las contaminaciones más perjudiciales para el ser humano, por lo que su atenuación o control es una tarea clave para la ingeniería.

El ruido de baja frecuencia en particular es muy común en nuestro entorno, y sus efectos, tanto fisiológicos como psicológicos, son sufridos por gran parte de la población debido a la facilidad que tienen para propagarse y a la poca efectividad de los sistemas pasivos para controlarlo.

El ruido generado por el motor de combustión en el interior de los vehículos (coches, autobuses, etc.) es uno de los más molestos que nos podemos encontrar en el día a día.

Este ruido pertenece al rango de frecuencias bajas, dependiendo del tipo de motor y del régimen de funcionamiento suele estar entre 50 y 200 Hz. De esta forma sirve como ejemplo para constatar la imposibilidad de controlar este espectro con técnicas pasivas: dotar al interior del vehículo de un aislamiento acústico significaría aumentar excesivamente su peso e inevitablemente su coste.

Es aquí donde entra en juego el control activo de ruido para solventar los problemas a baja frecuencia. Este tipo de control, a diferencia del pasivo, implica un sistema electromecánico que intenta generar una onda de ruido secundaria de la misma amplitud que el ruido original, de la misma frecuencia y en contrafase (desfasada 180 grados), como puede comprobarse en la siguiente figura:

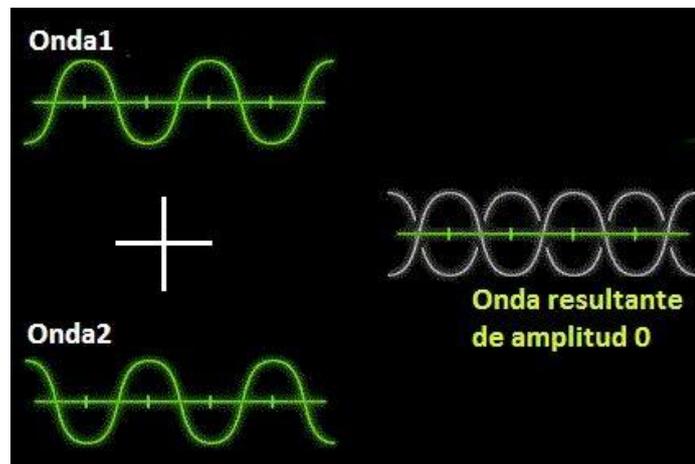


Figura nº 3: Interferencia destructiva.

En condiciones ideales, ambas ondas interfieren entre sí cancelando el ruido. Es fácil intuir que este tipo de control funcionará mejor cuanto más simple y estable sea el sonido, tanto en frecuencia como en amplitud, y cuanto más sencilla y reducida sea la estructura espacial en la que se desee controlar el ruido, aunque como cabe esperar,

debido a que gran parte del ruido proviene de maquinas o motores con partes rotativas, el ruido resultante no suele tener una frecuencia del todo estable y suele estar caracterizado por tonos de múltiples estados estacionarios.

Los sistemas de control activo de ruido suelen estar formados por:

- Uno o varios micrófonos para detectar el campo primario.
- Uno o varios altavoces para generar el campo secundario.
- Un controlador para procesar las señales captadas por los micrófonos y generar las señales de alimentación de los altavoces.

El controlador suele ser un sistema electrónico centrado, generalmente, en un procesador digital de señal. El diseño de esta parte es la más importante del sistema CAR y viene marcada por el tipo de ruido a controlar y por los objetivos acústicos de control. El tipo de control puede ser global o local y estar basado en el principio de interferencia destructiva o en el de absorción activa. El campo secundario puede estar generado por una sola fuente (sistema monocanal) o por varias fuentes (sistema multicanal) dependiendo de la naturaleza de la fuente primaria (compacta o extensa).

La complejidad del controlador dependerá en gran medida de la complejidad del ruido y del medio de propagación: siempre será más sencillo controlar un ruido periódico en un conducto que un ruido aleatorio en un recinto. La estructura del controlador, como se explica más adelante, se diseña en función de si existe o no información a priori del ruido.

2.3.1.-Evolución histórica

El primer diseño CAR fue patentado por primera vez por el científico alemán Paul Lueg en 1934. En su diseño, a parte de la idea de cancelar el ruido con una onda similar desfasada, estableció la estructura de control que serviría de base para todos los futuros proyectos: se emplea un micrófono para captar el ruido y un altavoz controlado electrónicamente para emitir la onda desfasada que cancelará el ruido. El micrófono hace el papel de sensor y el altavoz el de actuador.

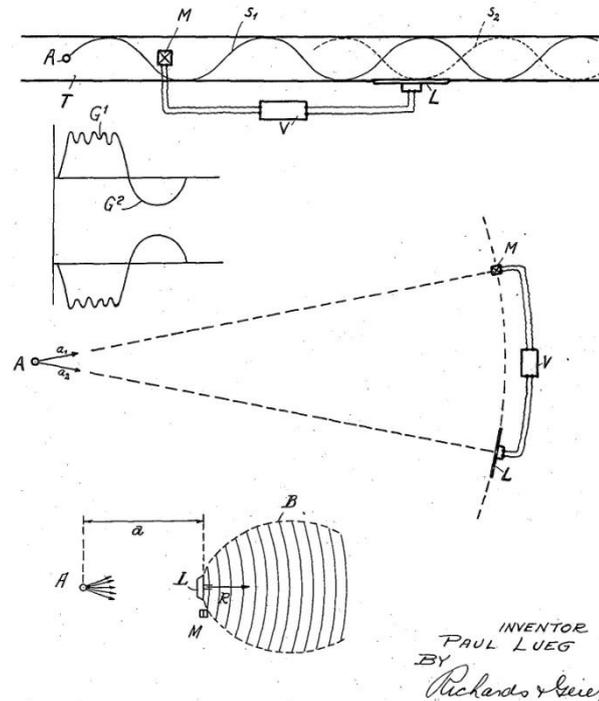


Figura nº 4: Figuras de la patente de P. Lueg.

Como se puede observar en la primera figura del dibujo anterior, perteneciente a la patente de Paul Lueg, se diseñó un método de control activo de ruido dentro de una tubería y para una onda de sonido con forma sinusoidal. Este caso es el más sencillo que se puede encontrar, ya que la frecuencia es constante y la forma de la onda es ideal, pero sirve como punto de partida: el micrófono M se encarga de registrar la onda de ruido, y ésta es eléctricamente transmitida al altavoz L colocado después del micrófono. El método empleado para que las dos ondas, ruido y señal canceladora del altavoz, se encuentren en contrafase se basa en ajustar la posición en la que se coloca el altavoz, de forma que el altavoz empiece a emitir la onda con la fase opuesta a la onda original de ruido. Esta idea es básica y se intuye que funciona en unas condiciones muy restringidas de frecuencia y forma de onda, y hay que destacar que en aquella época (1934) no era posible digitalizar la onda y tratarla como se haría hoy en día, simplemente era amplificada antes de ser emitida por el altavoz.

Posteriormente, ya en 1953, Olson y May desarrollaron un sistema CAR diferente. Se basó en detectar el ruido con un micrófono y reintroducir la señal, a través de un controlador, mediante un altavoz controlado y localizado cerca del micrófono. Además combinaron esta estrategia con materiales absorbentes (técnicas

pasivas) dentro de un resonador, construyeron el sistema y obtuvieron una reducción aceptable, de hasta 20 dB alrededor del micrófono en un rango de frecuencias de 20 a 300 Hz. Propusieron como posibles aplicaciones para este sistema la reducción de sonido en las cercanías de máquinas y motores, en aviones, automóviles y trenes.

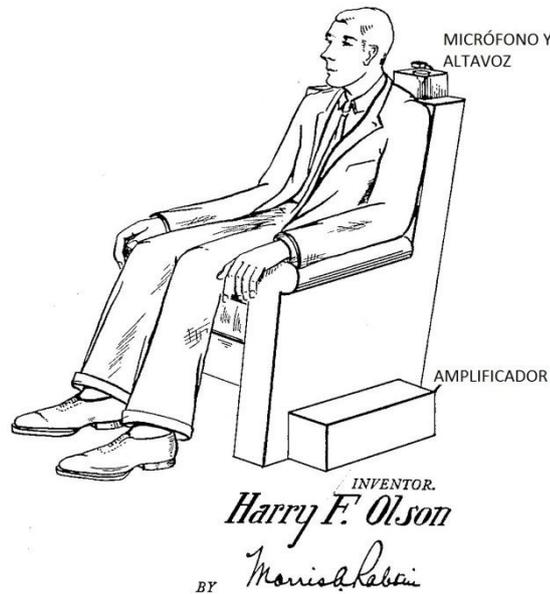


Figura nº 5: Propuesta de aplicación en la patente de Olson.

Como puede verse en la imagen, perteneciente a la patente de Harry Olson de 1953, se consideró una primera aplicación para reducir el ruido de baja frecuencia en medios de transporte. En este caso se particularizaba al caso de un avión, con un asiento que incluye un amplificador y un micrófono y altavoz en el respaldo detrás de la cabeza.

En la misma década William Conover estudió el ruido emitido por los grandes transformadores eléctricos. Estos sonidos están dominados por tonos sinusoidales que son múltiplos pares de la frecuencia de línea ya que están relacionados con la señal eléctrica de línea. Conover propuso una señal de referencia conformada a partir de la señal de línea para ser empleada como la entrada de control en vez de un micrófono. Esta señal de referencia podía ser transmitida a través de un controlador electrónico a los altavoces de control. También introdujo el concepto de sensor de error, monitorizando el campo sonoro del transformador y usándolo para ajustar el controlador y minimizar así el sonido radiado. Estas ideas son la base de los sistemas CAR modernos que emplean una estrategia “feedforward”.

De todas formas, para una atenuación adecuada con esta estrategia se necesita ajustar de manera precisa la señal de control en términos de fase y amplitud. Se demostró que era muy difícil conseguirlo con sistemas analógicos, especialmente cuando el sistema físico cambiaba rápidamente. Además, para un control global, en un espacio amplio, era necesario disponer de múltiples fuentes de control y que éstas interactuasen entre ellas. Con estos requerimientos era complicado construir un controlador analógico que atenuase óptimamente y las implementaciones de CAR estuvieron muy limitadas hasta el desarrollo de tecnologías digitales.

A principios de la década de los 70 tanto Kido como Chaplin empezaron a investigar las aplicaciones de las técnicas y dispositivos de procesamiento digital de señales para el control activo. Chaplin propuso el empleo de un sintetizador de forma de onda en el cual el control de la señal se modificaba generando digitalmente un tren de pulsos sincronizados. En los años siguientes, demostró el uso de su estrategia de control activo en varias aplicaciones, como en silenciar el escape de los coches y barcos.

También en esa década los franceses Jessel y Mangiante introdujeron el concepto de absorción activa para el control en tuberías y conductos, consistente en tres fuentes acústicas: un dipolo y un polo auxiliar localizados en la misma cámara acústica y emplazada ésta fuera del conducto. Asimismo, Widrow en California publica en 1975 un artículo sobre principios y aplicaciones de la cancelación adaptativa de ruido como un método alternativo para valorar señales desvirtuadas por ruido aditivo o interferencias. Este filtro adaptativo constituía una importante novedad ya que hasta entonces ningún otro dispositivo era capaz de seguir las variaciones del ruido. Propuso aplicaciones como la cancelación de los 60 Hz de línea en las electrocardiografías, cancelación de ruido en señales audibles y cancelación de los lóbulos laterales de las antenas.

Aunque el desarrollo de la electrónica digital fue fundamental para el CAR también conllevó algunas desventajas al principio. Los primeros usuarios solían considerar los dispositivos digitales como cajas negras y desconocían la dinámica del sistema, sobre todo cuando el control era adaptativo. Esta estrategia daba buen resultado con sistemas acústicos simples, pero cuando el sistema era más complejo,

aunque el ruido era atenuado en las proximidades del micrófono de error era sin embargo amplificado en otras áreas con un resultado global pobre.

La aparición de las primeras placas DSP (procesamiento digital de señal) supuso una revolución para el control activo ya que permitió que el CAR se aplicase de manera más eficaz a problemas reales como reducción del ruido en tubos de escape de coches y en sistemas de ventilación y aire acondicionado, así como los primeros protectores auditivos activos.

A partir de los años noventa hasta la actualidad comienza el periodo más fructífero del control activo, sobretodo en aspectos prácticos y aplicaciones. Nelson y Elliot de la Universidad de Southampton publican un artículo en el que estudian y sientan las bases del estudio de los principios físicos del CAR recopilan y proponen aplicaciones con eficacia contrastada, tales como auriculares con reducción de ruido, reducción de ruido en escáneres de cuerpo completo, control en conductos y habitáculos y control del ruido de los motores de los vehículos.

2.3.2.-Fundamentos acústicos

La idea general y simplificada del control activo de ruido es eliminar ruido con ruido como se ha explicado con anterioridad: las emisiones de ruido se pueden reducir de manera más o menos efectiva situando dos fuentes emisoras con las fases invertidas a una distancia cercana la una de la otra.

Concretamente se basa en el principio de superposición lineal. De acuerdo a este principio, si en una región del espacio existe un campo acústico primario $P_p(x,y,z,t)$ y se genera un campo acústico secundario $P_s(x,y,z,t)$ de forma que

$$P_p(x,y,z,t) + P_s(x,y,z,t) = 0$$

siempre y cuando P_p y P_s tengan la misma amplitud y fases opuestas, los dos campos interferirán destructivamente cancelándose mutuamente.

El campo acústico primario P_p suele ser un ruido inevitable proveniente de motores, ventiladores, etc. Mientras que el campo secundario P_s se genera mediante algún tipo de convertidor electro-acústico para reducir el campo primario. Se obtiene

así un sistema CAR por interferencia destructiva, pero, en determinados sistemas, se puede conseguir que el diafragma del altavoz vibre en oposición de fase al campo primario, obteniéndose un sistema CAR por absorción activa, con una diferencia sustancial con el anterior sistema. Se considera el problema desde el punto de vista de la potencia acústica radiada por el par de fuentes acopladas, la primaria y la secundaria. Si se ajustan la amplitud y la fase de la fuente secundaria para minimizar la potencia acústica radiada por el conjunto, la fuerza acústica de la fuente secundaria es muy próxima a la de la primaria en fase opuesta, para pequeñas separaciones y tiende a cero a medida que se incrementa dicha separación. En estas condiciones la potencia acústica radiada por la fuente secundaria es cero, y su acción fundamental consiste en reducir la impedancia de radiación vista por la fuente primaria, disminuyendo así la presión acústica en fase con la velocidad volúmica en la posición de la fuente primaria.

Por el contrario, si se ajustan la amplitud y la fase de la fuente secundaria para absorber la máxima potencia sonora, la fuerza acústica de la fuente secundaria, para separaciones pequeñas entre las dos fuentes, es mucho mayor que la de la fuente primaria. Este efecto da lugar a un incremento sustancial de la resistencia de radiación neta experimentada por la fuente primaria y a un incremento considerable de la potencia acústica radiada. El inconveniente de este método es que aproximadamente la mitad de esa potencia radiada por la fuente primaria es absorbida por la fuente secundaria, y el resto es radiada al medio, por lo que no parece una estrategia muy eficiente.

La situación es diferente cuando la fuente secundaria se acopla para el control local de ruido en la zona cercana al sensor de error. Se sitúa un micrófono en el campo próximo de la fuente secundaria con realimentación a través de un filtro H. La atenuación del campo primario se consigue mediante el diseño correcto de la función HG, siendo H la función de transferencia electrónica entre el micrófono y el altavoz, y G la función de transferencia acústica. Nelson demostró que la atenuación conseguida era directamente proporcional al factor de ganancia (A), y con tal de que fuese elevado es relativamente independiente del factor de fase (β). Esta configuración genera una zona de silencio en forma de concha alrededor del sensor de error, cuyo tamaño depende de la separación entre la fuente secundaria y el sensor, con un límite de $0,1\lambda$.

Este control local es especialmente útil en situaciones en las que el control global es inviable.

Control global o local: para diferenciar entre control local o global hay que analizar el patrón de interferencias entre dos fuentes puntuales: sea P la fuente primaria y S la fuente secundaria, con funciones de fuente $S_p(t)$ y $S_s(t)$ respectivamente. La función de fuente engloba a la fuerza acústica de fuente, o velocidad de volumen q . En un punto del plano a distancia r_p de la fuente primaria y r_s de la fuente secundaria el campo acústico $p(r,t)$ es:

$$p(r, t) = \frac{S_p(t - \frac{r_p}{c})}{4\pi r_p} + \frac{S_s(t - \frac{r_s}{c})}{4\pi r_s}$$

Donde c es la velocidad de propagación. Para que en un punto exista cancelación es necesario que:

$$S_s(t) = -\frac{r_{s,c}}{r_{p,c}} S_p[t - (\frac{r_{p,c}}{c} - \frac{r_{s,c}}{c})]$$

Por consiguiente, para que se produzca la cancelación en un punto se han de dar las siguientes condiciones:

- Causalidad: si no existe información a priori de la fuente primaria se requiere que $r_{p,c} \geq r_{s,c}$, de forma que el punto de cancelación esté más próximo a la fuente secundaria.
- Condición de fase: todos los puntos donde ocurra la cancelación activa ha de tener el mismo retardo de fase: $r_p - r_s = r_{p,c} - r_{s,c} = m$, que es la ecuación de una hipérbola:

$$y = \pm \frac{b}{a} \sqrt{(x - x_0)^2 + a^2}$$

- Condición de amplitud: los puntos de cancelación activa ha de satisfacer la condición (ecuación de una circunferencia):

$$\frac{r_s}{r_p} = \frac{r_{s,c}}{r_{p,c}} = \alpha$$

$$(x - x_1)^2 + y^2 = R^2$$

Con centro en $x_1 = x_s / (1 - \alpha^2)$ y radio $R = x_s \alpha / (1 - \alpha^2)$

Así pues, los puntos de cancelación serán la intersección de una hipérbola con una circunferencia. Para el caso del espacio en vez de un plano, la hipérbola es un hiperboloide y la circunferencia es una esfera, y los puntos de cancelación se convierten en una circunferencia perpendicular al eje z.

Ahora supongamos que la fuente primaria es periódica con periodo T (con n entero):

$$S_p(t) = S_p(t + nT)$$

En este caso no es necesaria la condición de causalidad y habrá más hipérbolas que cumplan la condición de fase

$$r_p - r_s = m + ncT = m + n\lambda$$

Las zonas de silencio en este caso serán las intersecciones de la circunferencia de amplitud con las hipérbolas de fase. El número de cortes de las hipérbolas con la circunferencia dependerá de la relación de λ a m.

De lo anterior se deduce que no es posible el control global de una fuente puntual con otra fuente puntual. Aunque el patrón de interferencias muestra las zonas de cancelación pueden existir también zonas de refuerzo en las que el campo acústico se vea reforzado.

Nelson y Elliot analizaron el patrón de interferencias de dos mono-polos desde el punto de vista de la potencia neta radiada:

$$\begin{pmatrix} P_p \\ P_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{pp} & Z_{ps} \\ Z_{sp} & Z_{ss} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_p \\ q_s \end{pmatrix}$$

La ecuación matricial anterior que relaciona las presiones radiadas por los mono-polos primario y secundario, en función de sus velocidades de volumen complejas, q (en el dominio de frecuencias, la función de fuente y la velocidad de volumen de una fuente simple están relacionadas por $S=j\omega q$), Z_{pp} y Z_{ss} son las impedancias acústicas de entrada vistas desde las fuentes primaria y secundaria, respectivamente, y $Z_{ps} = Z_{sp}$ es la impedancia acústica de transferencia entre las

fuentes primaria y secundaria. Las potencias acústicas radiadas por cada una de las fuentes son:

$$W_p = 0.5 \operatorname{Re}\{q_p p_p\} \quad , \quad W_s = 0.5 \operatorname{Re}\{q_s p_s\}$$

Y la potencia total radiada es:

$$W_t = 0.5 [|q_s|^2 R_{ss} + q_s R_{sp} q_p + q_p R_{sp} q_s + |q_p|^2 R_{pp}]$$

Donde $R_{ss} = \operatorname{Re}\{Z_{ss}\}$, $R_{pp} = \operatorname{Re}\{Z_{pp}\}$, y $R_{sp} = \operatorname{Re}\{Z_{sp}\}$

Como puede observarse, la potencia total consta de dos tipos de términos: la potencia radiada por cada uno de los mono-polos aisladamente, y unos términos cruzados que contienen la influencia de la fuente secundaria en la primaria. Supongamos que $q_s = -q_p$. En este caso, teniendo en cuenta que en campo libre $R_{pp} = R_{ss} = (\omega^2 \rho) / (4\pi c)$ y $R_{sp} = (\omega^2 \rho) / (4\pi c) \operatorname{sinc}(kr)$, encontramos finalmente que:

$$W_{TD} = 2W_{pp} [1 - \operatorname{sinc}(kr)]$$

Donde el subíndice TD hace referencia al carácter dipolar de esta estrategia. Elliot y Nelson demostraron que la velocidad de fuente de la fuente secundaria que minimiza la potencia global es $q_{s,o} = -q_p \operatorname{sinc}(kr)$, siendo esta potencia óptima (mínima):

$$W_{TO} = W_{pp} [1 - \operatorname{sinc}^2(kr)]$$

De toda esta explicación puede entenderse con carácter general para el control de ruido que:

- Las fuentes secundarias son más efectivas para controlar un campo primario cuanto más próximas se encuentren a la fuente primaria.
- La efectividad de un sistema CAR es mayor a frecuencias más bajas.
- La cancelación es tanto mayor cuantas más fuentes secundarias existan.

En realidad el número mínimo requerido de fuentes secundarias puede deducirse del principio de Nyquist. La señal temporal continua puede reproducirse

fielmente con un número discreto de muestras temporales con tal de que el intervalo de muestreo sea menor que el doble de la frecuencia más alta de su espectro ($\Delta t \leq 1/2f_{\max}$). Con ese muestreo se evita el problema de aliasing temporal. De nuevo a frecuencias más bajas las longitudes de onda son más largas, por lo que se puede reproducir el campo primario con un menor número de fuentes.

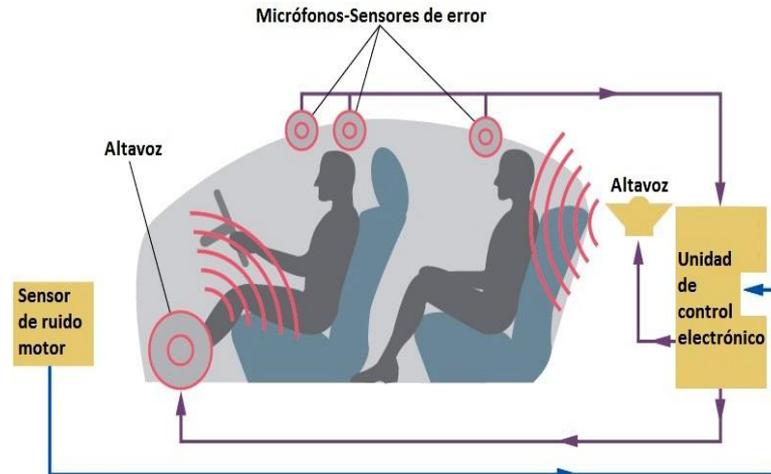


Figura nº 6: Ejemplo de CAR para habitáculo de un automóvil.

En la figura anterior se ilustra el esquema para un control activo en el habitáculo de un automóvil. El sensor de referencia del motor envía una señal proporcional al ruido que se está generando, el controlador electrónico procesa esta señal proveniente de la fuente primaria y genera una señal que es enviada a las fuentes secundarias, los altavoces del interior del coche. A la vez, los micrófonos del habitáculo actúan como sensores de error: captan el ruido en el interior del coche (punto de cancelación) y envían esta señal a la unidad de control, que la analiza y manda una señal correctora a los altavoces en caso necesario. Es un sistema multi-canal (varias fuentes secundarias) y complejo, ya que hay que controlar el campo en un habitáculo.

Uno de los grandes problemas a encarar en un control activo es la modelización de la propagación tanto del campo primario, con la señal de referencia y la de error, como del secundario con la señal de los altavoces y la de error.

Por otra parte la separación entre los sensores de referencia y de error ha de ser suficiente para que el controlador tenga tiempo de procesar las señales medidas y generar el campo secundario. Si tenemos en cuenta la longitud de onda, la cancelación

de ruido es mayor cuanto más próximas se encuentran las fuentes primaria y secundaria. Ésta es la razón por la que el control activo se emplea para frecuencias bajas y pierde efectividad conforme aumentamos la frecuencia, además, como cabe esperar, también aumenta la eficacia si aumentamos el número de fuentes secundarias.

En la siguiente gráfica se indica cual es la reducción de potencia acústica de un dipolo (dos fuentes en oposición de fase) en función de la separación entre ambas fuentes.

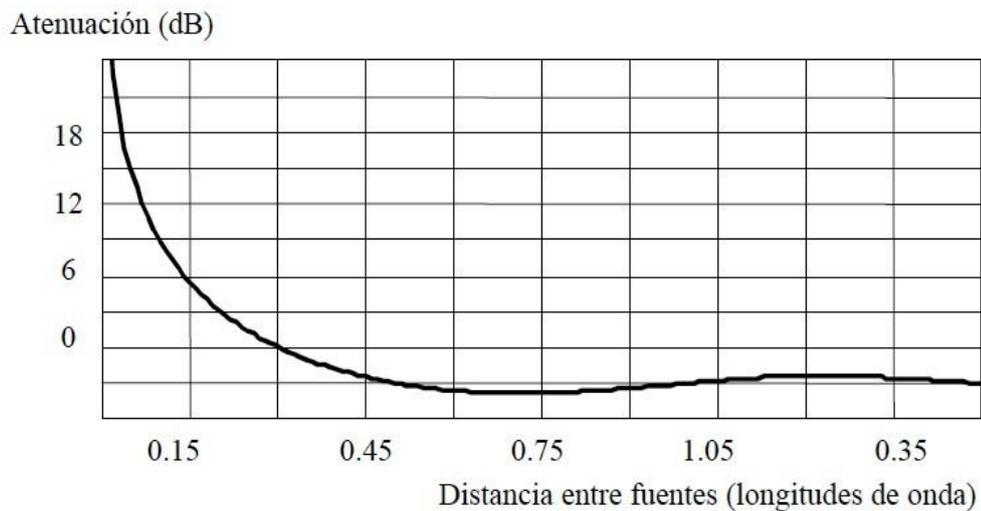


Figura nº 7: Disminución de la potencia total de un dipolo en contrafase.

Hay que resaltar que la potencia acústica radiada disminuye significativamente cuando la separación entre las fuentes inferior a una décima parte aproximadamente de la longitud de onda radiada. Para una frecuencia de 100 Hz la longitud de onda es de 3,4 m., y correspondería una separación de 34 cm., asequible para ser diseñado. Pero para una frecuencia de 5 kHz esta separación se reduce a tan solo 0,68 cm., ilustrando la imposibilidad de trabajar a frecuencias elevadas. El margen de frecuencias de trabajo del control activo va a ser bajo, llegando normalmente hasta unos 500 Hz.

De aquí se deduce una vez más, que si se necesita controlar un espectro amplio de frecuencias es necesaria una técnica híbrida, combinando técnicas pasivas y activas. El diseño del controlador necesario va a depender del problema acústico a resolver, y de las metas marcadas. Tanto las características espectrales (ruido de banda ancha o

estrecha) como el medio de propagación (habitáculos, tubos, etc.) influyen en la elección del número y posición de los sensores y de las fuentes secundarias.

2.3.3.-Estructuras de control y aplicaciones.

Para implementar la técnica de control activo es necesario un sistema de control con una estructura definida, que adapte su respuesta ante las eventuales variaciones del ruido y del entorno de actuación. Este sistema suele estar formado por:

- **Sensores:** Micrófonos o cualquier dispositivo, del tipo convertidor electro-acústico, que permitan obtener referencias de los niveles de presión acústica a cancelar tanto para generar un campo secundario como para obtener información del error.
- **Actuadores:** Dispositivos electro-acústicos a través de los cuales se modifica el campo acústico para obtener una disminución de la presión acústica. En general se emplean altavoces.
- **Controlador:** Sistema electrónico que procesa las señales de los sensores y gracias a algún conocimiento previo del sistema a controlar, genera una señal que se envía a los actuadores para que la transformen en una onda sonora y así conseguir la atenuación del ruido.
- **Sistema o planta:** Campo acústico a controlar: Habitáculo de un medio de transporte, conducto de ventilación, entorno del oído, etc.

El controlador se encarga de minimizar la señal del error. Procesa la información que le llega y ajusta la señal de control hasta optimizar la atenuación en el sensor de error. Una parte importante del controlador es el filtro, que se encarga de determinar la señal secundaria a partir de las estimaciones que se obtienen de la función de transferencia del sistema. Es necesario, además, un algoritmo adaptativo que varíe los coeficientes del filtro para que la señal de control optimice la atenuación de la señal del error. Los sistemas CAR emplean un algoritmo de mínimos cuadrados conocido como LMS.

La forma en que el controlador recibe la información acústica sobre el campo primario determina la estructura de control que caracteriza al sistema; si recibe esta

información de antemano se habla de estrategia feedforward o anticipativa, mientras que en el caso contrario, si la información procedente del sensor de error sirve directamente para generar el campo secundario la estrategia se denomina feedback o realimentada:

- Control feedforward o en lazo abierto: cuando se dispone de una señal que nos proporciona una referencia del ruido que se desea cancelar, la configuración del sistema es en lazo abierto o feedforward. A partir de una referencia del ruido a cancelar, el controlador genera una señal que se envía al actuador encargado de generar el campo secundario. Es necesario informar al controlador de la señal del micrófono de error para que modifique su respuesta ante posibles variaciones o desviaciones. Así el controlador está en todo momento intentando hacer nula la señal que capta el micrófono de error. Este sistema fue propuesto por primera vez por Paul Lueg en 1936.

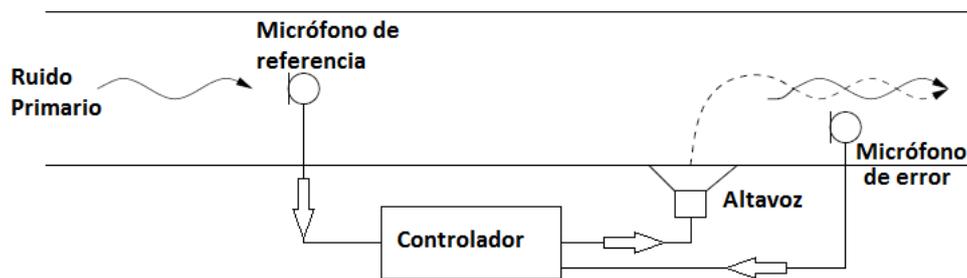


Figura nº 8: Ejemplo de control feedforward en un conducto.

La señal de referencia se puede obtener mediante un micrófono o, si es posible, mediante un sensor no acústico como un tacómetro o un sensor óptico. Esta sustitución se suele dar en cuando el ruido primario proviene de una máquina rotatoria como puede ser el motor de un vehículo. El sensor debe funcionar de forma síncrona con la fuente primaria y se emplea como la señal de entrada al sistema conteniendo la frecuencia fundamental y los armónicos. Una de las ventajas que tiene este sistema es que elimina el problema de retorno acústico que se da cuando el sensor primario es un micrófono, y además el sensor no se ve afectado por el campo secundario.

Este es un problema corriente en controladores feedforward: el micrófono de referencia detecta, además del campo primario, el campo secundario. Hay variadas soluciones a este problema dependiendo de la aplicación del control: por ejemplo para control en conductos se ha propuesto un micrófono unidireccional antes del altavoz secundario. Este tipo de estrategia de control se estudiará más en profundidad en el capítulo dedicado a control en conductos.

- Control Feedback o en lazo cerrado: en esta estrategia de control, la señal que recoge el micrófono de error, e , es realimentada al altavoz secundario, a través de un filtro eléctrico, para generar el campo secundario, y . Este campo es extrapolado hasta la posición del sensor, como un campo secundario x , que interacciona con el campo primario, d . En esta configuración $e = x + d$. Pero $x = y * c = e * h * c$, donde $*$ significa convolución, h es la respuesta impulsiva del filtro eléctrico y c es el operador extrapolación desde la fuente secundaria hasta el micrófono de error. Así pues, $e = (e * h * c) + d$, y en términos de la transformada de Laplace, $E(s) [1 - C(s)H(s)] = D(s)$. La función de transferencia entre el campo primario y el campo total es entonces:

$$\frac{E(s)}{D(s)} = \frac{1}{1 - C(s)H(s)}$$

Si la función de transferencia entre el altavoz secundario y el micrófono fuera relativamente constante y libre de cambios de fase, entonces $E(s)$ tendería a cero (cancelación absoluta) cuando $H(s)$ tendiera a $-\infty$. Es decir, el controlador ideal sería un simple amplificador inverso.

Desafortunadamente la función de transferencia $C(s)$ no es completamente plana en amplitud ni está exenta de cambios de fase. La propia propagación entre el altavoz y el micrófono ya supone un retardo de fase. Si a alguna frecuencia, este cambio de fase se hace 180° , la función HC cambia de signo, el filtro puede inestabilizarse y el campo sonoro sería reforzado en lugar de atenuado. Para evitar este retardo de fase, el altavoz y el micrófono suelen estar muy próximos en un controlador feedback. El retardo de fase crece con la frecuencia limitando su funcionamiento.

Esta estructura fue propuesta por primera vez por Olson en 1956.

	FEEDFORWARD	FEEDBACK
Ventajas	Estabilidad Información del ruido Robustez	Menor nº de componentes No hace falta referencia Simplicidad
Desventajas	Estructura más compleja Obtener correcta referencia	Inestable en algunos casos Atenuación limitada

Tabla nº3: comparativa de control Feedback y Feedforward.

Hoy en día existe un amplio abanico de aplicaciones del control activo. Una de las primeras aplicaciones propuestas fue el control de ruido en conductos de ventilación, calefacción y aire acondicionado (HVAC en sus siglas en inglés). En la actualidad sigue siendo uno de los principales usos del CAR, ya que en cualquier edificio ya sea residencial o en entornos laborales, así como en hospitales, es fácil encontrarnos con este tipo de conductos, que si bien realizan una función esencial también contribuyen a una contaminación acústica que es importante resolver.

Otra de las aplicaciones clásicas del CAR ha sido la atenuación del ruido en habitáculos de medios de transporte. Este tipo de control es complicado debido a que depende de la geometría y de las condiciones del contorno del habitáculo. De esta forma son necesarias normalmente varias fuentes secundarias para obtener un resultado aceptable, y muchas veces el control de ruido se acota a las inmediaciones del oído, por ejemplo en los coches en el reposacabezas.

Una de las primeras aplicaciones exitosas fue la cancelación del ruido generado por un transformador eléctrico. El éxito por entonces de aquel ruido se debió a la sencillez del ruido, cuyo espectro está dominado por la frecuencia fundamental. De aquí se derivan controles como los del ruido de motores.

Una de las aplicaciones que más se ha implementado en los últimos tiempos ha sido el control en auriculares. Son dispositivos de control por realimentación, que integran en el auricular un micrófono, un altavoz y un circuito electrónico. Éste es un ejemplo de técnica híbrida, ya que la mayoría incluye algún tipo de protección pasiva

contra el ruido. Esta aplicación fue pensada en principio para mejorar la calidad del sonido en auriculares y cascos de los pilotos de aviones (Bose), pero con el desarrollo de la electrónica de consumo, muchos auriculares comerciales para dispositivos de música o portátiles incluyen este tipo de control (Sennheiser, Sony, JVC, etc.).

En la actualidad aparte de la electrónica de consumo y medios de transporte, una de los campos en los que más se está implementado el CAR es la medicina. Las aplicaciones van desde algunas un tanto pintorescas, como camas con CAR para el control de ronquidos:



Figura nº 9: Instalación experimental para el control de ronquidos con CAR.

hasta sistemas de resonancia magnética con control de ruido. Los equipos de resonancia generan un intenso ruido cuando están funcionando y pueden provocar estrés tanto en el paciente como en el equipo médico y además dificultar la comunicación entre ambos.

Otro ejemplo de aplicación médica actual es el control en las incubadoras infantiles dentro de las unidades de cuidados intensivos de neonatos. Todo el equipo médico empleado para controlar parámetros de temperatura, humedad, etc. añadido al ruido generado por la actividad del personal sanitario resulta en efectos adversos para la salud como estrés o dificultades para dormir.

2.4.- Ruido en hospitales

Como se ha comentado anteriormente en la introducción, el ruido es una de las principales fuentes de contaminación. Definido como cualquier sonido indeseado, puede afectar a las personas tanto física como fisiológicamente, con efectos tales como:

- Estimulación cardiovascular
- Pérdida auditiva
- Aumento de la secreción gástrica
- Estimulación de la glándula pituitaria y suprarrenal
- Supresión de la respuesta inmune a la infección
- Problemas en la fertilidad femenina
- Estrés

Por estas razones se hace indispensable un control de ruido para su cancelación o atenuación, de forma que sus efectos sobre la salud se vean disminuidos. Esta tarea se hace casi indispensable en los hospitales, puesto que si en personas sanas el ruido puede tener consecuencias perjudiciales, en los pacientes cuya salud está ya perjudicada por otras causas puede ser grave y empeorar su condición. Como este proyecto va a centrarse en el control activo de ruido en hospitales a continuación se detallan las fuentes y niveles de ruido más comunes en hospitales así como las afecciones en pacientes.

La Organización Mundial de la Salud recomienda que el nivel de ruido dentro de las salas de hospitales no supere los 30 dB de noche para evitar alteraciones del sueño. Como cabe esperar, la mayoría de los estudios refleja un nivel de ruido mucho mayor. Desde la década de los sesenta, el nivel medio de ruido dentro de los hospitales se ha ido incrementando a razón de 0.38 dB por año durante el día y 0.42 dB durante la noche.

El nivel de ruido en una unidad de cuidados intensivos (UCI) va desde los 50 a los 75 dB, con picos que rondan los 100 dB. Estos niveles medios, a pesar de ser soportables, son equiparables al ruido de una aglomeración de gente, y por tanto inadmisibles para una sala en la que el descanso y la tranquilidad son vitales. Así el

ruido también produce efectos negativos por estrés también entre el personal del hospital. Entre los pacientes un problema común es la privación o dificultad para dormir y también constituye un factor contributivo al delirio post-operativo.

La dificultad del sueño es un problema muy común en los pacientes. Dormir es un proceso complicado y activo, en contra de lo que pueda parecer. El sueño se divide en dos fases si se mide el movimiento del ojo, fase REM (movimiento ocular rápido) y fase no REM. Cada tipo tiene asociadas funciones psicológicas, fisiológicas y neuronales distintas y complicadas.

	O.M.S. ¹	E.P.A. ²	U.N.E. ³
Día	35 dBA	45 dBA	35-40 dBA
Noche	30 dBA	35dBA	35-40 dBA

Tabla nº 4: Niveles máximos de ruido recomendados en hospitales por diferentes organizaciones.

- 1: Organización mundial de la salud.
- 2: Environmental Protection Agency (Agencia de protección medioambiental EE.UU.)
- 3: Normativa española.

Importancia del ruido en la alteración del sueño: a pesar de que el ruido es considerado en la mayoría de estudios como el principal factor responsable de la alteración del sueño, una parte considerable de los estudios lo consideran simplemente causante de una pequeña porción de agitación y despertar unido al resto de factores. De acuerdo con este concepto, la incomodidad de la cama se considera como un factor clave a la hora de dificultar el sueño, seguido por el dolor, ruido y ansiedad. Se entiende que los pacientes se adaptan rápidamente al ruido en unidades de cuidado intensivo y éste deja de ser un factor significativo a la hora de causar problemas.

De todas formas, observaciones realizadas en pacientes de UCI respiratoria respaldan la idea de que la mayoría de inconvenientes son causados por el ruido. Se ha confirmado una correlación entre picos de ruido por encima de 80 dB y excitaciones en los encefalogramas del sueño de los pacientes, así como una diferencia significativa entre el número de agitaciones entre periodos calmados y periodos ruidosos. Se

consideran los ruidos extraños y fuertes como los que más frecuentemente provocan que se despierten los pacientes.

Impacto de la alteración del sueño en los pacientes: La alteración del sueño es un clave en el desarrollo de delirium y también produce efectos específicos en los sistemas cardiovascular, respiratorio e inmunológico. Los pacientes de las unidades de cuidados intensivos son propensos a sufrir delirium o síndrome confusional agudo y esto ayuda a desarrollar alteraciones en los ciclos de sueño, llevando al paciente a dormir durante el día y encontrar dificultades para hacerlo durante la noche, con reducciones de la fase REM del sueño. Esto puede llevar a alucinaciones y a despertarse durante la fase no REM.

La alteración del sueño también puede afectar a la respuesta inmune. Después de dos días sin dormir la respuesta inmune se ve afectada en términos de producción de linfocitos. Además, en relación con el aparato cardiovascular, se pueden dar episodios de actividad simpática aumentada.

Características acústicas: las fuentes de ruido en un hospital son muy variadas, por ejemplo ruido de ventiladores, alarmas de ventiladores, alarmas de monitores cardiacos, nebulizadores, ruido de teléfonos, aire acondicionado, televisión, radio, papeleras, carros y camillas, intercomunicadores, conversación entre personal y visitas, pacientes, etc. De acuerdo con la mayoría de estudios relacionados la conversación entre el personal médico y las alarmas de los dispositivos son las dos fuentes de ruido que más molestias causan a los pacientes.

El espectro del ruido en las salas de cuidados intensivos va desde alrededor de 1 kHz (e incluso frecuencias menores) hasta 8 kHz, con intensidades mayores a bajas frecuencias: hasta 1kHz suelen tener una intensidad media mientras que frecuencias mayores tienen una intensidad baja. Hay que destacar que las frecuencias muy bajas, de menos de 75 Hz son de intensidad alta, y sus fuentes generalmente son los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado.

El tiempo de reverberación, definido como el tiempo que tarda un sonido en decaer 60 dB después de que la fuente haya dejado de emitir, es otra característica a tener en cuenta. Materiales empleados tradicionalmente en la construcción de los

hospitales como el linóleo para el suelo o determinadas baldosas poseen propiedades de absorción muy malas favoreciendo el reflejo del sonido y aumentando el tiempo de reverberación.



Figura nº 10: Sala de hospital con suelo de linóleo.

Se ha comprobado que sustituyendo estos materiales por otros con mejores características de absorción puede reducirse el tiempo de reverberación en hasta medio segundo.

Estrategias para la reducción de ruido en hospitales: a pesar de los muchos estudios y análisis que se han llevado a cabo sobre el ruido y sus efectos en los pacientes de los hospitales, pocas intervenciones o medidas se ponen en práctica al respecto. Estas medidas, las cuales han dado buenos resultados en cuanto a calidad del sueño de los pacientes, pueden clasificarse en tapones y orejeras, modificación del comportamiento, enmascaramiento del ruido, absorción acústica y control activo.

- **Modificación del comportamiento:** la modificación del comportamiento es una técnica que intenta condicionar positivamente la forma en la que se desenvuelve el personal médico en su entorno de trabajo, para sustituir determinados comportamientos por algunos más deseables. Esta técnica tiene que ser fácil de implementar y por supuesto no debe perjudicar la seguridad de los pacientes. Ensayos realizados en una sala de neonatos incluyeron medidas como apagar la radio, apagar las luces y cubrir las ventanas durante la noche con cortinas gruesas y cambiar en general el comportamiento del personal y

visitas para evitar cualquier ruido innecesario. Los bebés en esta sala durmieron durante periodos más largos y ganaron peso más rápidamente que los que estaban en una sala donde no se tomaron medidas similares.

- **Absorción acústica:** esta técnica trata de aprovechar las propiedades de determinados materiales absorbentes. Por ejemplo, se ha probado a instalar piezas de espuma acústica en incubadoras con resultados satisfactorios, reduciendo la intensidad del ruido en unos 5 dB.
- **Enmascaramiento del ruido:** esta técnica se usa generalmente para minimizar las distracciones de otros sonidos. Por ejemplo se emplea como fondo el sonido del océano para silenciar de alguna manera el ruido que pueda haber. De esta forma se consiguen mejores resultados a la hora de dormir, tanto en calidad como en duración del sueño.
- **Tapones para los oídos y orejeras:** consiste en emplear tapones y orejeras para bloquear el ruido que llega a los oídos. Estudios clínicos aseguran que generalmente su uso tiene un efecto positivo en el descanso de los pacientes. En pruebas realizadas con orejeras para bebés prematuros se comprobó que el nivel de ruido se reducía en hasta 12 dB, y además el nivel de saturación de oxígeno era mayor en aquellos bebés con orejeras.
- **Control activo de ruido:** esta técnica se ha explicado con anterioridad y tiene aplicaciones dentro de los hospitales. El control de ruido en conductos de ventilación, calefacción y aire acondicionado es una de ellas y será detallada en el siguiente capítulo. Otra aplicación de esta técnica es el control de ruido en escáneres y resonancias magnéticas.

3.- Control de ruido en conductos de calefacción, ventilación y aire acondicionado.

Los conductos de calefacción, ventilación y aire acondicionado (conocido como HVAC en sus siglas en inglés: Heating, Ventilating and Air Conditioning) son una fuente de ruido en la mayoría de los edificios. Estos sistemas emplean la tecnología para regular unas condiciones confortables de temperatura, humedad y limpieza del aire dentro de espacios habitados.

De forma genérica, se puede definir la climatización como: dotar a un espacio cerrado de las condiciones de temperatura, humedad relativa, calidad del aire y, en ocasiones, también de presión, necesarias para el bienestar de las personas. El desarrollo de los métodos y sistemas de ventilación empezó con la revolución industrial y continúa evolucionando en relación a sistemas de control y eficiencia energética.

Los sistemas HVAC son bastante complejos por lo que se suelen diseñar a la vez que el edificio y se instalan durante la construcción. Constan de elementos como motores, ventiladores, conductos, aparatos de medida, aparatos de control y sensores y actuadores.

3.1.- Ventiladores y climatizadores.

Los climatizadores son aparatos empleados para tratar el aire en los aspectos necesarios para climatizar un ambiente en cuanto a ventilación, limpieza, temperatura y humedad.

Por sí mismos no producen calor o frío, ya que les llega de fuentes externas y constan de una entrada de aire exterior, un filtro, un ventilador, un intercambiador de frío/calor, un humidificador y un separador de gotas.

Los ventiladores mecánicos son máquinas empleadas para crear un flujo dentro de un fluido, normalmente un gas. De forma análoga a las bombas empleadas en otros

fluidos, los ventiladores también actúan como tales sobre el fluido que las rodea, el aire.

Los modelos más empleados de ventiladores suelen ser eléctricos y consisten en un rodete con aspas, llamado rotor o impulsor, que giran produciendo una diferencia de presión. Generalmente están protegidos o recubiertos por algún tipo de carcasa o recubrimiento, ya sea por motivos de seguridad o para dirigir adecuadamente el flujo de aire. Aunque la mayoría de los motores de los ventiladores son eléctricos también los hay hidráulicos y de combustión interna.

Para explicar el funcionamiento de un ventilador, se puede hablar de los ventiladores como extractores, dependiendo de la función que cumpla, esto es descargar una cierta cantidad de gas de forma que provoque el movimiento o circulación dentro de un recinto o bien extraer o succionar el gas para renovarlo.

El flujo de aire se consigue variando la presión del medio, el aire, así que el movimiento del fluido será siempre de la zona de alta presión a la zona de baja.

Los ventiladores producen flujos de aire de gran volumen y baja presión, de forma opuesta a los compresores, que producen en comparación altas presiones y volúmenes bajos. En el caso de los ventiladores, el aumento de presión suele ser insignificante comparado con la presión absoluta del gas, de forma que la densidad de éste puede considerarse inalterada durante el proceso de operación, así que se considera el gas como un fluido incompresible, como un líquido.

Mientras el gas (el aire) se comporte como un fluido incompresible, el ventilador actúa como tal, para esto, el incremento de presión (la diferencia entre la presión total a la salida y la presión total en la entrada del ventilador) debe ser pequeño, menor a 1000 mm de H₂O, generalmente se llegan a presiones de 380 mm, en definitiva presiones inferiores al 4% de la presión atmosférica (10332 mm de H₂O).

3.1.1.- Tipos de ventiladores

Los ventiladores pueden clasificarse principalmente según dos criterios: dependiendo del incremento de presión total desarrollada por el ventilador y por otro lado según la dirección que aporta al flujo.

Dependiendo de la presión total desarrollada pueden ser

- De baja presión: hasta 100 mm de H₂O
- De media presión: de 100 a 300 mm de H₂O
- De alta presión: mayor de 300 mm de H₂O

Atendiendo a la dirección del flujo se pueden clasificar en:

-Ventiladores axiales: los ventiladores de flujo axial tienen aspas que fuerzan al aire a moverse de forma paralela al hueco en el que giran las mismas, es decir, en el sentido del eje de rotación de las aspas. La presión que genera estos ventiladores suele ser baja por lo que son emplazados en instalaciones de conductos de pocos metros o bien sin conductos. Tienen diámetros de 300 hasta 2000 mm. Existen diferentes tipos de hélice, dependiendo del tamaño, la forma, la inclinación y número de álabes, adaptando todas estas características al volumen de aire que se desee desplazar y a la presión a la que se desee trabajar.



Figura nº 11: Ejemplo de ventilador axial.

Son ventiladores capaces de manejar grandes caudales de aire con buen rendimiento, generan ruido de baja frecuencia, que se estudiará posteriormente y son empleados en multitud de situaciones.

Existe una gran variedad de aplicaciones para este tipo de ventiladores, algunos ejemplos son:

- Ventiladores de techo: empleados en viviendas y recintos para crear corrientes de aire.
- En automóviles: se emplean para refrigerar el motor de los coches y evitar que se sobrecaliente.
- Ventiladores de mesa: son ventiladores pequeños con un soporte para crear corrientes de aire en el interior de las viviendas. Son de motor eléctrico y suelen llevar un oscilador.
- Ventiladores de ordenador: son pequeños y suelen estar ensamblados en la carcasa del ordenador, ya sea portátil o de sobremesa. Sirven para refrigerar el interior del ordenador y sus componentes al sacar el aire caliente que se acumula en el interior del mismo.
- Túneles de viento: suelen ser ventiladores grandes y se emplean para el estudio de los efectos del movimiento de aire alrededor de objetos sólidos como medios de transporte o edificios.

-Ventiladores centrífugos: también se los conoce como ventilador de caja de ardilla.

En este tipo de ventiladores el aire entra en la dirección del eje y sale en la dirección de los radios o palas. Los ventiladores centrífugos aceleran así el aire de forma radial, cambiando su dirección normalmente en 90 grados.

Suelen estar formados por una carcasa, un rodete con álabes, conductos de entrada y de salida y un sistema de transmisión.

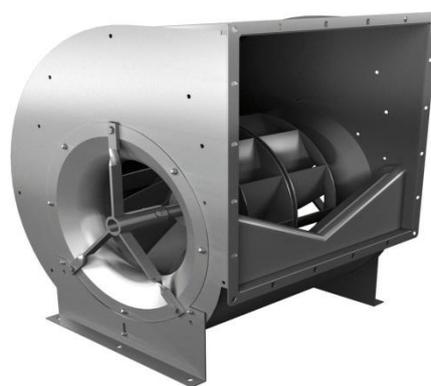


Figura nº 12: Ejemplo de ventilador centrífugo.

Pueden tener distintos tipos de transmisión y los álabes pueden estar curvados hacia adelante, hacia atrás o ser rectos sin curvatura. La curvatura de los álabes

determina la cantidad de flujo que puede manejar el ventilador, así como la diferencia de presión que puede crear.

Los ventiladores centrífugos emplean la fuerza centrífuga generada con la rotación de las palas para incrementar la presión del aire. Cuando giran las palas el aire en las inmediaciones es expulsado a la carcasa o caja del ventilador. De esta forma la presión en la caja del ventilador aumenta y el aire es guiado al exterior por el conducto de salida. Como resultado de la expulsión de aire la presión en la región media de las aspas decrece y el aire en el orificio de entrada normaliza esta deficiencia de presión entrando dentro del ventilador. Este ciclo se repite constantemente para crear un flujo de aire.

Este tipo de ventiladores son ampliamente usados en la actualidad. En particular son los que más se emplean en sistemas HVAC de ventilación y climatización en industria y viviendas. Suelen ser más baratos que los axiales y más simples en su construcción.

-Ventiladores de flujo cruzado: también llamados tubulares o tangenciales se usan extensivamente en la industria HVAC de climatización. Suelen tener un aspecto alargado en comparación con su diámetro.

Este tipo de ventilador emplea un rodete con álabes curvados hacia adelante montado en una carcasa con una pared trasera y una pared en forma de vórtice. A diferencia de las máquinas radiales, el flujo de aire se mueve de manera transversal a través del rodete.

El flujo dentro de un ventilador tubular se puede desgranar en tres partes distintas:

- Una región de vórtice o remolino cerca de la descarga del ventilador llamada vórtice no concéntrico.
- La región de paso del flujo.
- Una zona de aleteo directamente opuesta.



Figura nº 13: Ejemplo de ventilador de flujo cruzado.

La popularidad de este tipo de ventiladores en la industria HVAC deriva de su constitución compacta, forma, operación silenciosa y posibilidad de proveer un coeficiente de presión alto.

3.2.- Ruido en ventilación.

A pesar de que los ventiladores y los sistemas de climatización crean unas condiciones agradables y saludables dentro de las viviendas y recintos, tienen la desventaja de añadir un ruido al ambiente, que si bien no suele ser de una intensidad elevada, si que puede ser molesto o perjudicial a la hora de concentrarse para trabajar o para descansar. En multitud ocasiones se priorizan factores económicos y de efectividad sin profundizar o analizar en los problemas que puede conllevar el ruido.

El ruido generado por los sistemas HVAC viene determinado por los elementos constitutivos de éste y por la forma en que interactúan con el medio que los rodea. Así los dos grupos de ruido generados son:

- Ruido provocado por el motor del ventilador.
- Ruido aerodinámico.

3.2.1.- Ruido del motor

El ruido del motor es de tres tipos:

- Ruido magnético: como la mayoría de los motores son eléctricos se crean campos magnéticos entre el estator y el rotor se genera ruido cuando hay cambios bruscos en el campo magnético.
- Ruido mecánico: es la principal fuente de ruido del motor, proviene de fricciones de las escobillas o entre los componentes del estator y el rotor, de rodamientos o de algún desbalance del motor.
- Ruido aerodinámico: producido por el rozamiento con el aire de las aspas del ventilador de refrigeración del motor, produce vórtices y flujo turbulento.

También puede producir ruido el motor si empieza a vibrar por estar mal sujetado o balanceado cuando están enclavados en superficies de gran tamaño.

3.2.2.- Ruido aerodinámico

Este ruido está provocado por el ventilador, en concreto por el movimiento de los álabes, y por el flujo de aire que provoca en el interior de los conductos.

Este tipo de ruido es la principal fuente de problemas e incomodidades en los sistemas HVAC. Es de banda ancha y su intensidad suele ser proporcional a la velocidad del aire en el conducto. A su vez, el ruido aerodinámico puede descomponerse en otras dos categorías:

-Ruido de vórtices: Se genera debido a zonas de flujo turbulento. Las causas de este tipo de flujo son:

Vórtices generados en el álabe: se deben a un gradiente de presión perpendicular al movimiento del álabe en el aire. Si el perfil de los álabes no está correctamente diseñado, el flujo se separa de lado convexo del álabe produciendo torbellinos. Tienen un espectro continuo y son de carácter aleatorio.

Fittings: están ocasionados por cambios en la dirección del flujo del aire, lo cual ocasiona turbulencias en el conducto. Estos cambios de dirección se dan en los empalmes que pueda haber a lo largo del conducto, como codos, juntas en

forma de T, ramificaciones o cambios de sección. El grado de turbulencia, y por lo tanto la intensidad del ruido, dependerá de la forma del fitting y de la velocidad del fluido:

$$\Delta\rho = n \times 0.06v$$

v : Velocidad del flujo

n : Constante dependiente de la geometría del fitting

Flujo producido por elementos fijos: este tipo de flujo se produce cuando el aire ve entorpecido su paso por elementos del conducto como rejillas u otros dispositivos, y se generan ruidos de frecuencia proporcional a la velocidad del fluido así como a las dimensiones del obstáculo:

$$fs = 0.18 \times \frac{v}{d}$$

v : Velocidad del flujo de aire (m/s)

D : dimensión mínima del obstáculo perpendicular al fluido (m)

-Ruido de rotación: este tipo de ruido aerodinámico tiene su origen en el impulso dado por el álabe al aire en un cierto punto del espacio, con cada revolución. Este ruido tiene una frecuencia característica fundamental o de paso (f_p) con sus respectivos armónicos.

La frecuencia de paso está relacionada con la velocidad de rotación, expresada en este caso en revoluciones por minuto (rpm) y con el número de aspas del ventilador:

$$fp = \frac{Na * rpm}{60}$$

Na : Número de aspas

3.3.- Modelado del sistema.

El correcto modelado discreto del sistema es básico para el posterior control del mismo. El modelado de la ecuación lineal de segundo orden del desplazamiento de una partícula en un conducto unidimensional con pared rígida es la siguiente:

$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} = -\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\delta(x)P(t)}{\rho} \right] - \sum_{i=1}^k [\delta(x - x_i)] \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{M_i(t)}{\rho S} \right]$$

Donde $u(x, t)$ es el desplazamiento de la partícula (m), c es la velocidad de la onda (m/s), x es la posición espacial (m), t es el tiempo (s), ρ es la densidad del medio (kg/m^3), $M_i(t)$ es la entrada de flujo de masa en el dominio (kg/s), x_i es la localización de la entrada de flujo de masa (m), S es la sección de la entrada de flujo (m^2), $P(t)$ es la excitación de presión en $x=0$ (N/m^2) y $\delta(x)$ es la función de delta de Dirac. La condición del límite de reflexión parcial en $x=L$ es la relación entre el gradiente espacial y el gradiente temporal del desplazamiento de la partícula y se expresa como:

$$\frac{\partial u}{\partial x}(L, t) = -K \frac{1}{c} \frac{\partial u}{\partial t}(L, t) \quad K \neq 0 + 0i, 1 + 0i, \infty$$

Donde K es la impedancia compleja de la parte final de la terminación (adimensional). La terminación del conducto en $x=0$ se modela como completamente reflexiva. Esta condición de límite es:

$$\frac{\partial u}{\partial x}(0, t) = 0$$

Lo que corresponde a una terminación del conducto abierta. La presión acústica del sistema se relaciona con el gradiente espacial del desplazamiento de la partícula mediante:

$$P(x, t) = -\rho c^2 \frac{\partial u}{\partial x}(x, t)$$

Las cuatro ecuaciones anteriores representan el modelo matemático del conducto. El ruido generado por estos sistemas se encuentra en el rango de baja frecuencia, por lo que los métodos pasivos para el control de ruido son inefectivos en este caso.

Por otra parte, por debajo de la frecuencia de corte del primer modo transversal, $f_c=c/2d$, donde d es el diámetro del conducto, solo se propagan ondas planas en la dirección del conducto. Por tanto, la geometría del problema de control en conductos es de las más sencillas para implementar un sistema de control. Basta con que el micrófono detector del campo primario y el micrófono detector del campo residual

estén separados por una distancia suficiente como para que el controlador active el campo secundario.

4.- Planteamiento técnico.

El control activo de ruido en conductos normalmente consiste en uno o varios altavoces dirigidos por un algoritmo diseñado para cancelar o reducir los niveles de ruido. El conducto suele contener uno o más micrófonos en varios sitios de medición mientras el ruido actúa como excitación desde una terminación del conducto. Aunque generalmente hay asociadas simplificaciones a este tipo de control, se dan ciertos problemas prácticos que se pueden solventar con un aproximamiento en una dimensión. Al contrario que con los problemas del control de ruido en espacios tridimensionales, la propagación de ruido en una dimensión puede ser tratada de una forma relativamente manejable en términos de hardware y complejidad del controlador.

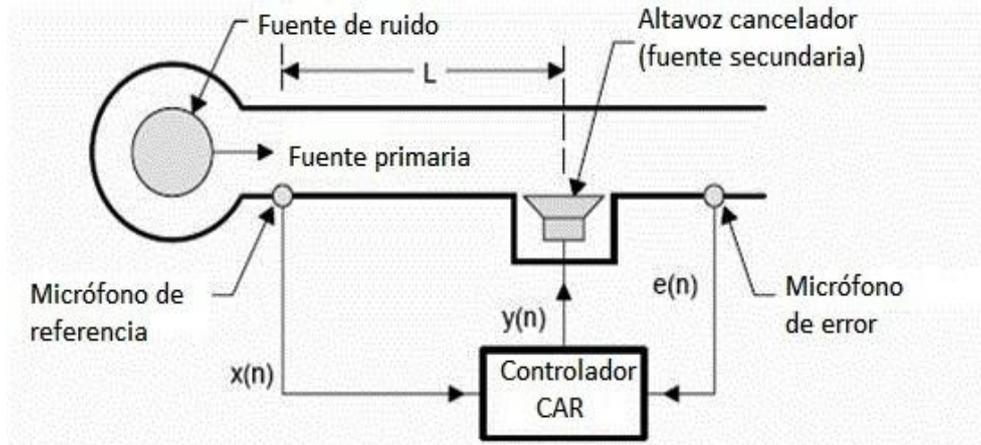


Figura nº 14: Esquema de control activo con estructura Feedforward.

La estructura de control activo feedforward es empleada comúnmente para cancelar el ruido en conductos. Esta elección se debe a que se puede obtener una referencia del ruido fácilmente: se suele colocar un micrófono de referencia en la región *upstream* (región del conducto entre la fuente primaria y el altavoz de cancelación), una fuente secundaria (altavoz) ubicada en la zona de cancelación y un micrófono de error ubicado en la región *downstream* (región del conducto entre el

altavoz de cancelación y el micrófono de error). La señal acústica de ruido, es decir la señal de referencia, es detectada y a partir de ella se genera una señal de control y se inserta dentro del campo acústico a través del sistema de control y del altavoz que actúa como fuente secundaria. La señal captada por el micrófono de error sirve para controlar el proceso adaptativo. El objetivo del sistema es minimizar esta señal de error lo máximo posible, de forma que el error residual de ruido acústico sea muy bajo.

En esta parte del proyecto se intentará dar una respuesta de carácter técnico a cuestiones como el algoritmo adoptado para controlar el sistema, problemas a solventar en el control feedforward en conductos, el número y la localización óptima para los altavoces y los micrófonos, así como características intrínsecas de estos elementos como pueden ser el coste o la durabilidad. Se propondrá un modelo práctico en el que implementar la estructura de control.

4.1. – Caracterización del sistema.

Como se ha comentado, la idea básica del control activo es generar una onda de igual amplitud que el ruido y desfasada 180 grados. Para ello, una de las premisas de la estrategia feedforward de banda ancha es que el tiempo de propagación entre el micrófono de referencia (sensor primario) y el altavoz de cancelación (fuente secundaria) sea suficiente, en términos eléctricos, para que se pueda reintroducir el ruido en la zona del conducto en la que se quiere lograr la cancelación. En otras palabras, la referencia se debe medir lo suficientemente pronto como para que la señal de anti-ruido (secundaria) pueda ser generada en el momento en que la señal primaria de ruido alcance el altavoz.

Por otro lado, la señal de ruido secundaria debe ser muy similar a la señal de ruido medida en la entrada, por lo que el conducto no debe alterar significativamente la onda de ruido.

El procesamiento que realiza el sistema CAR puede considerarse como una identificación de sistemas. Esta identificación tiene como objetivo modelar una función de transferencia que a priori es desconocida. La idea básica consiste en medir las señales producidas por el sistema para poder elaborar un modelo ajustado del mismo.

La función de transferencia será $P(z)$ mientras que $W(z)$ representará al filtro adaptativo. Estos filtros están basados por lo general en algoritmos adaptativos cuyo objetivo es minimizar la señal de error residual $e(n)$ y cuyo caso de cancelación ideal se corresponde con $W(z) = P(z)$.

El procedimiento para identificar el sistema consiste en alimentar al sistema desconocido y al filtro adaptativo la misma señal $x(n)$ para posteriormente medir sus salidas $y(n)$ y $d(n)$, de forma que puedan determinarse las características de $P(z)$ mediante el ajuste de los coeficientes de $W(z)$ minimizando la diferencia entre ambas salidas. En la práctica se considera $W(z) \approx P(z)$ debido al ruido presente a la entrada del filtro adaptativo, y si se da el caso de un sistema variable con el tiempo, el filtro adaptativo tendrá que adecuar su función de transferencia $W(z)$ para seguir estas variaciones.

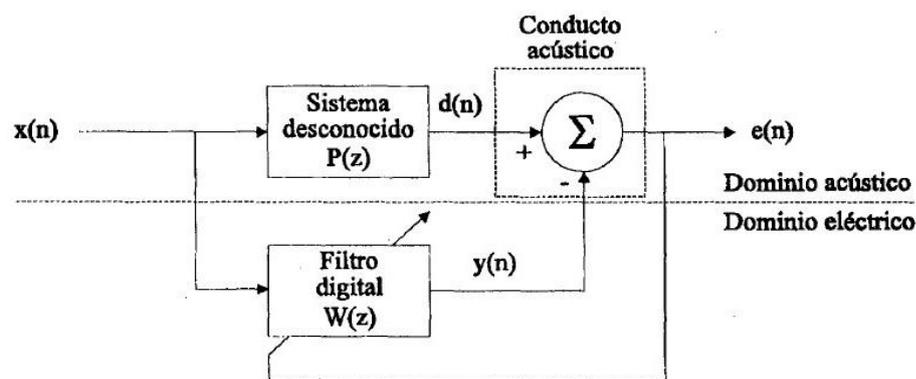


Figura nº 15: Sistema de identificación CAR.

La diferencia entre este sistema de identificación y un sistema CAR radica en que la señal de error $e(n)$ es en el sistema de identificación la diferencia en el dominio eléctrico entre la señal de salida del sistema a identificar y la señal de salida del filtro adaptativo, mientras que en el CAR es el resultado de la suma acústica de la señal de ruido $x(n)$ y la señal de cancelación $y(n)$.

Hay que tener presentes tres puntos en el sistema de identificación: la señal de entrada al sistema a identificar, la estructura del filtro adaptativo y el mecanismo de adaptación. Si la señal $x(n)$ presenta un contenido espectral considerable y además la señal de transferencia del sistema $P(z)$ es estrecha, el filtro puede llegar a converger. A partir de la figura 15 podemos obtener que:

$$E(z) = D(z) - Y(z)$$

$$E(z) = P(z)X(z) - W(z)X(z)$$

Cuando el algoritmo converge $E(z) = 0$, idealmente. De esta forma:

$$W(z) = P(z)$$

Para $X(z) \neq 0$, lo que implica que:

$$y(n) = d(n)$$

Esta última ecuación indica que en el momento que la salida del filtro $y(n)$ es igual a la señal de ruido $d(n)$, la suma acústica de las dos señales se traduce en que la señal de error sea cero, una cancelación de ambas amparándonos en el principio de superposición:

$$e(n) = d(n) - y(n) = 0$$

Si la planta $P(z)$ está bien representada por el modelo $W(z)$ se conseguirá una aproximación capaz de cancelar señales con gran ancho de banda e incluso ruido aleatorio con relativa efectividad.

4.2. – Algoritmo para sistemas CAR con estructura feedforward.

El algoritmo más comúnmente empleado en filtros adaptativos es el algoritmo LMS (del inglés: *least mean-squared*). El control activo de ruido feedforward de banda ancha se puede describir mediante el diagrama de bloques de la figura 16.

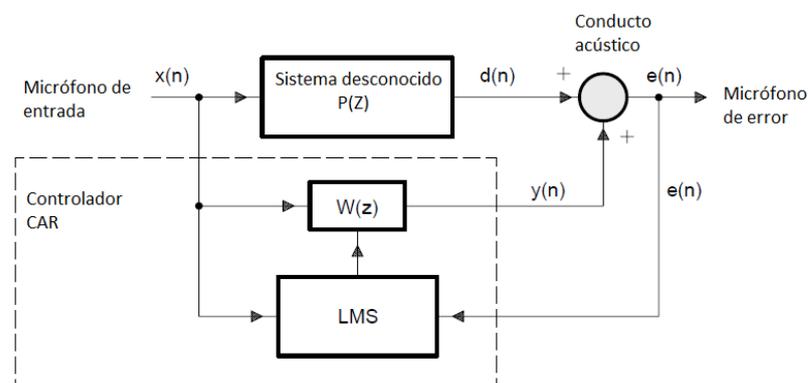


Figura 16: Estrategia de identificación de sistemas en CAR feedforward.

Empleando un representación digital del problema en el dominio frecuencial, el sistema CAR ideal implementa un filtro adaptativo $W(z)$ para estimar la respuesta de una trayectoria acústica en principio desconocida $P(z)$ entre el sensor de referencia y el sensor secundario de error. La transformada z de $e(n)$ se puede entonces expresar como:

$$E(z) = D(z) + Y(z) = X(z) [P(z) + W(z)]$$

Donde $E(z)$ es la señal de error, $X(z)$ es la señal de entrada, e $Y(z)$ es la salida del filtro adaptativo. Después de que el filtro haya convergido, $E(z)=0$, la ecuación anterior se torna en:

$$E(z) = -P(z) \rightarrow y(n)=-d(n)$$

De esta forma, la salida del filtro adaptativo $y(n)$ tiene la misma amplitud pero está 180 grados desfasada con respecto a la onda primaria de ruido $d(n)$. Cuando $d(n)$ e $y(n)$ se combinan acústicamente, el error residual se convierte en cero, resultando en la cancelación de ambos sonidos de acuerdo con el principio de cancelación.

Efectos de trayectorias secundarias

La señal de error $e(n)$ se mide con el micrófono de error más allá de la posición del altavoz cancelador. El sumador de la figura 16 representa el entorno acústico entre el altavoz cancelador y el micrófono de error, donde el ruido primario $d(n)$ se combina con la señal de salida de anti-ruido $y(n)$ del filtro adaptativo. La señal de anti-ruido puede verse modificada por la función de trayectoria secundaria $H(z)$ en el canal acústico de $y(n)$ a $e(n)$, de igual forma que el ruido primario se modifica por la trayectoria primaria $P(z)$ desde la fuente de ruido hasta el sensor de error. De esta forma es necesario compensar $H(z)$.

A continuación se muestra un diagrama de bloques del sistema CAR que incluye la trayectoria secundaria $H(z)$:

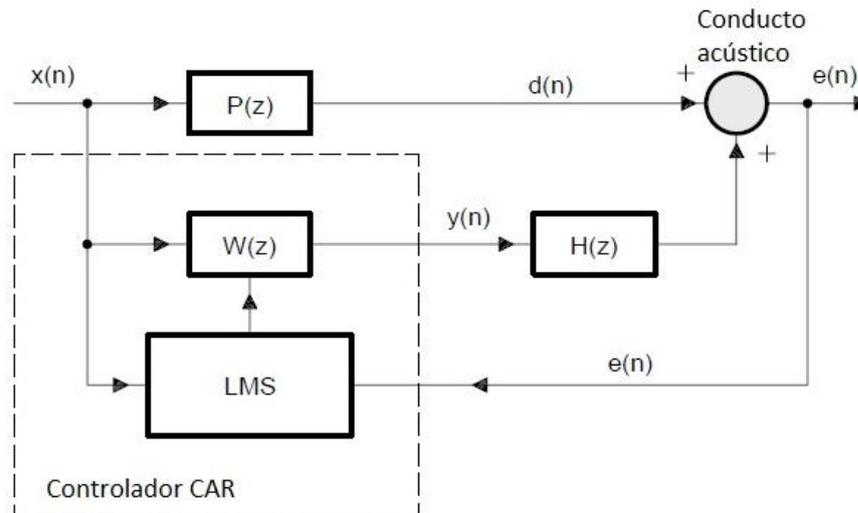


Figura 17: Diagrama de bloques de sistema CAR modificado con $H(z)$

De la figura 16 se extrae que la transformada z de la señal de error $e(n)$ es:

$$E(z) = Z(z) P(z) + X(z) W(z) H(z)$$

Asumiendo que $W(z)$ es del orden suficiente, después de que converja el filtro adaptativo, el error residual es cero ($E(z) = 0$). Este resultado requiere que $W(z)$ sea:

$$W(z) = \frac{-P(z)}{H(z)}$$

de forma que se alcance la función de transferencia óptima.

Así el filtro adaptativo $W(z)$ debe modelar la trayectoria primaria $P(z)$ y modelar inversamente la trayectoria secundaria $H(z)$. De todas formas, resulta imposible invertir el retraso inherente causado por $H(z)$ si la trayectoria primaria $P(z)$ no contiene un retraso de al menos la misma duración. Ésta es la principal limitación en los sistemas de control feedforward de banda ancha.

Algoritmo LMS con filtrado X (FXLMS)

Para tener en cuenta los efectos de la función de transferencia de la trayectoria secundaria $H(z)$, el algoritmo convencional LMS ha de ser modificado. Para asegurar la convergencia del algoritmo, la entrada del comparador del error se filtra por una estimación de la trayectoria secundaria $C(z)$. Así se consigue el algoritmo FXLMS, ilustrado en el diagrama de bloques de la figura 18, donde la salida $y(n)$ es:

$$y(n) = x(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i(n)x(n-i)$$

donde $w^T(n) = [w_0(n) w_1(n) \dots w_{n-1}(n)]^T$ es el vector coeficiente de $W(z)$ y $x(n) = [x(n) x(n-1) \dots x(n-N+1)]^T$ es el vector de la señal de referencia en n .

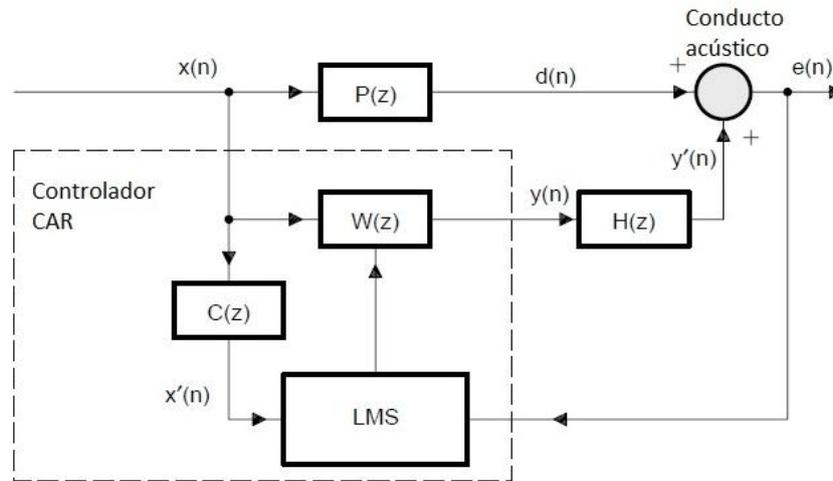


Figura nº 18: Diagrama de bloques del algoritmo FXLMS para CAR.

El filtro se puede implementar en una DSP con la siguiente forma:

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i(n)x(n - i)$$

y puede expresarse también como:

$$w(n+1) = w(n) - \mu e(n) x(n) h(n)$$

donde μ es el tamaño del escalón del algoritmo que determina la estabilidad y convergencia del algoritmo y $h(n)$ es el impulso de respuesta de $H(z)$. De esta forma el vector de entrada $x(n)$ se filtra con $H(z)$ antes de actualizar el vector de carga. De todas formas, en la práctica, $H(z)$ se desconoce y se debe estimar con el filtro $C(z)$. Así:

$$w_i(n+1) = w_i(n) - \mu e(n)x'(n - i) \quad i = 0, 1, \dots, N - 1$$

$$w(n + 1) = w(n) - \mu e(n)x'(n) \quad \text{donde} \quad x'(n) = c^T x(n) = \sum_{i=0}^{M-1} c_i x(n - i)$$

es el vector para la versión filtrada de la entrada de referencia $x'(n)$, que se computa como:

$$x'(n) = [x'(n) x'(n - 1) \dots x'(n - N + 1)]^T \quad \text{y} \quad c = [c_0 c_1 \dots c_{M-1}]^T \text{ que es el vector coeficiente de la estimación de la trayectoria secundaria, } C(z).$$

Cuando se implementa este algoritmo, la convergencia del filtro se puede conseguir mucho más rápidamente que en teoría, y el algoritmo parece ser tolerante con los

errores que se puedan cometer en la estimación de la trayectoria secundaria $H(z)$ por el filtro $C(z)$.

La función de transferencia $H(z)$ es desconocida y variable con el tiempo debido a efectos como el desgaste del altavoz, cambios de temperatura y flujo de aire en la trayectoria secundaria.

A continuación, en la figura 19 se ilustra el algoritmo FXLMS y se resume el procedimiento de control activo.

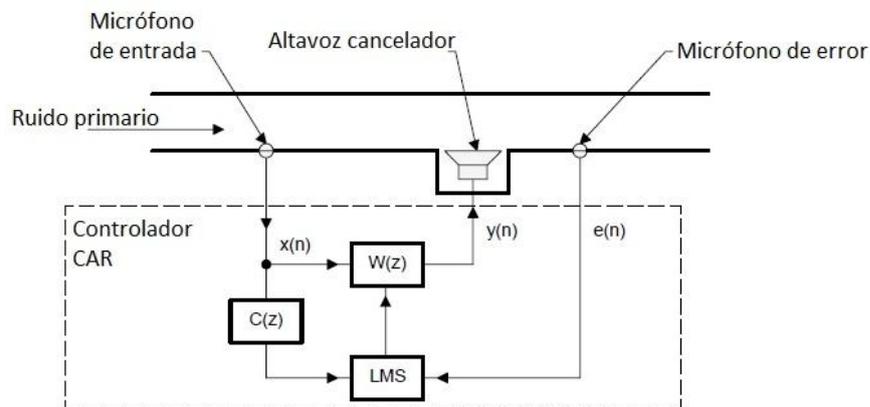


Figura nº 19: Control activo de ruido empleando el algoritmo FXLMS.

1. Entrada de la señal de referencia $x(n)$ (del micrófono de entrada) y de la señal de error $e(n)$ (del micrófono de error) desde los puertos de entrada.

2. Se computa el anti-ruido $y(n)$:

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i(n)x(n-i)$$

donde $w_i(n)$ es el coeficiente i -ésimo del filtro adaptativo $W(z)$ y tiempo n y N es el orden del filtro $w(z)$.

3. Salida del anti-ruido $y(n)$ al puerto de salida para manejar el altavoz cancelador.

4. Computar la versión filtrada en X de $x'(n)$:

$$x'(n) = \sum_{i=0}^M c_i x(n-i)$$

5. Actualizar los coeficientes del filtro adaptativo $W(z)$ sirviéndose del algoritmo FXLMS:

$$w_i(n+1) = w_i(n) - \mu e(n)x'(n-i), \quad i = 0, 1, \dots, N-1$$

6. Repetir el procedimiento para la siguiente iteración. Hay que tener en cuenta que el número de espacios de memoria requeridos para este algoritmo es $2(N+M)$, además de algunos parámetros.

4.3. – Consideraciones técnicas de diseño

El control activo de ruido es una aplicación en tiempo real de filtrado adaptativo que requiere extensas computaciones. El ancho de banda de frecuencia va desde 500 hasta unos 1000 Hz, lo que permite solamente 1 o 2 ms para realizar todos los cálculos. La implementación electrónica de hardware de un sistema CAR requiere concesiones que tienen un impacto sustancial en el rendimiento del sistema. El hardware debe permitir una relativa flexibilidad de software así como una operación automática completa y una auto-calibración y auto-modelado. Los factores físicos que limitan el rendimiento del sistema CAR como las impedancias espaciales, coherencia, longitud del filtro o estabilidad se discutirán a continuación.

Frecuencia de muestreo y longitud del filtro: La función del controlador es estimar con precisión el retraso y cualquier cambio en la amplitud que se pueda dar mientras el ruido indeseado va desde el micrófono de entrada hasta el altavoz. El controlador debe completar la tarea de procesamiento de la señal antes de que el ruido primario llegue al altavoz. El procesamiento digital de señales en tiempo real requiere que el tiempo de procesamiento t sea menor que el periodo de muestreo T :

$$t < T = 1/f_s$$

siendo f_s la frecuencia de muestreo, que debe ser suficientemente alta para cumplir el criterio de Nyquist-Shannon, que establece una frecuencia de muestreo tal que:

$$f_s \geq 2f_M$$

donde f_M es la frecuencia máxima de interés (aproximadamente unos 500 Hz para la mayoría de casos prácticos de CAR).

La frecuencia de muestreo puede expresarse en términos de distancia física y capacidad del sistema de salvar esa distancia contando con la temperatura. De esta forma la resolución de muestreo se expresa como:

$$\Delta_s = \frac{c_0}{f_s}$$

Donde c_0 es la velocidad del sonido en el aire, que es 343 metros por segundo a 25 grados centígrados.

El modelado de la planta primaria se ha hecho en el dominio temporal empleando el algoritmo FXLMS. El número directo de ponderaciones por la resolución de muestreo determinan la longitud del modelo en tiempo o su equivalente en distancia. Así:

$$l = N\Delta_s = \frac{Nc_0}{f_s}$$

donde l es la longitud del conducto desde el micrófono de entrada hasta el altavoz de cancelación. Dicha longitud puede ser modelada por un filtro adaptativo, por ejemplo para $N = 64$ y una frecuencia de muestreo de 2 kHz resulta un modelo de 32 ms, que corresponde a un conducto de longitud de 10,976m.

Función de coherencia: en los modelos de sistemas CAR se ha asumido que el ruido que registra el micrófono de entrada aparecerá con un cierto retraso en el altavoz. En realidad, tanto el micrófono de entrada como el de error detectan el ruido primario y al mismo tiempo el flujo de ruido generado por el aire que pasa por la superficie del micrófono. Éste problema de flujo de ruido y fluctuaciones de presión puede limitar la efectividad de la cancelación. La función de coherencia consiste en una medida ajustada de la cantidad de ruido primario comparada con el flujo de ruido de las dos señales de los micrófonos. La coherencia se puede mejorar aumentando el número de sensores, reduciendo la velocidad del flujo y con un buen diseño mecánico para reducir el flujo turbulento.

En los sistemas HVAC la velocidad del flujo de aire está en torno a los 13 m/s y la coherencia se puede mejorar significativamente mediante dos métodos:

- Empleando tubos con sonda que permiten al sonido alcanzar el micrófono a la vez que se deshacen de las fluctuaciones de presión

turbulentas. El emplazamiento adecuado de los micrófonos será en las zonas alejadas de las partes más turbulentas, aunque este método tiene el inconveniente de añadir, debido al encapsulamiento, una turbulencia extra al flujo en la zona anexa al micrófono.

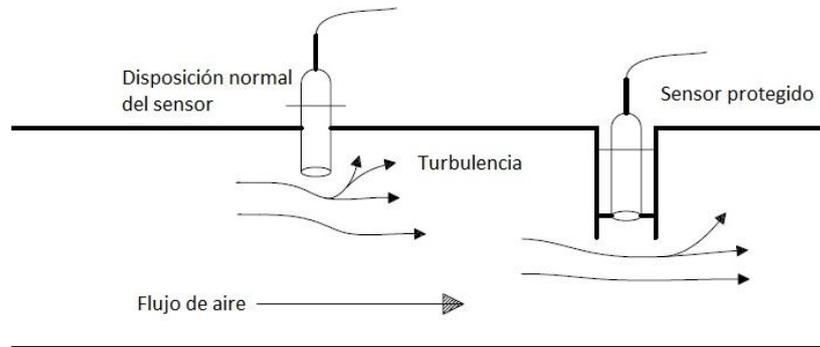


Figura nº 20: Tubo con sonda para mejorar la coherencia.

- Otra técnica que se ha demostrado efectiva es emplazar el micrófono en un tubo de turbulencia exterior conectado al conducto por una pequeña hendidura. Además se tiene la ventaja de protección y mantenimiento del componente.

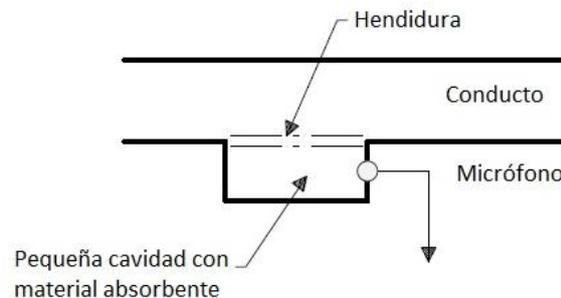


Figura nº 21: Micrófono emplazado en hueco.

Causalidad: El retardo acústico desde el micrófono de entrada hasta el altavoz se puede expresar en segundos como:

$$\delta_A = \frac{L}{C_0}$$

donde L es la distancia desde el micrófono de entrada hasta el altavoz cancelador. El retardo eléctrico se puede expresar como:

$$\delta_E = \delta_W + \delta_t$$

donde δ_w es el retardo total en el filtro antialiasing, el convertidor analógico-digital (ADC), el convertidor digital-analógico (DAC), el filtro reconstructor y el altavoz además del tiempo de procesamiento (un periodo de muestreo T). δ_t es el retardo de grupo de filtro digital $W(z)$. El retardo del altavoz tiene una gran influencia en la causalidad, especialmente a bajas frecuencias y deberá por tanto seleccionarse cuidadosamente.

Para asegurar que el filtro adaptativo tiene una respuesta causal, hay que asegurar que:

$$\delta_A > \delta_E$$

Esta condición se conoce como causalidad y establece la longitud mínima que debe tener el sistema que cancela el ruido por encima de una determinada frecuencia. De esta forma la distancia desde el micrófono de entrada hasta el altavoz de salida es:

$$L_{\min} > c_0 \delta_E$$

Y el retardo total es aproximadamente:

$$\delta_t \approx T \left(1 + \frac{3M}{8} \right)$$

donde M es el número de polos en los filtros antialiasing y reconstructor. Los espectros de ruido típicos en sistemas HVAC son de banda ancha con frecuencias bajas predominantes y unos pocos sinusoides de amplitud media, lo que requiere el principio de causalidad a bajas frecuencias para una correcta cancelación.

Filtro antialiasing y filtro analógico de reconstrucción: si se desea recuperar la forma de onda original en el dominio del tiempo a partir de su forma muestreada, el espectro original de la señal se debe ajustar dentro de un ancho de banda menor de la mitad de la frecuencia de muestreo. Si esta limitación no se cumple, el componente de señal por encima de la mitad de la frecuencia de muestreo se incorpora a la banda de señal. Este fenómeno se conoce como *aliasing* y no puede solucionarse después del muestreo. Incluso si la naturaleza del sistema evita el problema de aliasing es aconsejable incluir un filtro anti-aliasing para reducir problemas de aliasing por ruido de frecuencias de fuera de la banda.

En sistemas CAR, como la frecuencia de muestreo suele ser baja (1 o 2 kHz), se debe emplear un filtro anti-aliasing de orden elevado. El inconveniente de este tipo de filtros de orden elevado es que tienen retardos largos, por lo que pueden presentar problemas a la hora de cumplir el principio de causalidad anteriormente expuesto, especialmente en control en conductos cortos.

4.4. – Instalación de un sistema CAR experimental en un conducto acústico.

La instalación propuesta es una simple instalación de ensayo en un conducto unidimensional, de acuerdo con la representación de la figura 14 en el principio de este capítulo. No obstante, de forma complementaria a los componentes incluidos en esta representación son necesarios otros componentes complementarios de forma que sistema sea completamente funcional. El buen comportamiento de un sistema CAR recae de manera importante en la habilidad para manipular la ganancia de las señales implicadas: es vital hacer pasar las señales detectadas con los micrófonos a través de un preamplificador con ganancia controlada, y también es necesario un amplificador de potencia para controlar la magnitud del anti-ruido emitido a través del altavoz cancelador. Como cabe esperar, las ganancias de estos amplificadores se deben ajustar cuidadosamente para obtener una máxima efectividad.

Toda esta instalación se muestra en la siguiente figura. Las dos señales detectadas por los micrófonos se llevan al preamplificador para después enviarlas al hardware CAR. Dentro de este hardware CAR se produce el filtrado adaptativo que se traduce en la creación de la forma de onda del anti-ruido. Esta señal se saca a través del amplificador de potencia hasta el altavoz para cancelar la señal de ruido primaria. Como se trata de una estación de ensayo la señal de ruido se crea con un generador de funciones y se pasa también a través del amplificador de potencia antes de llevarla al altavoz.

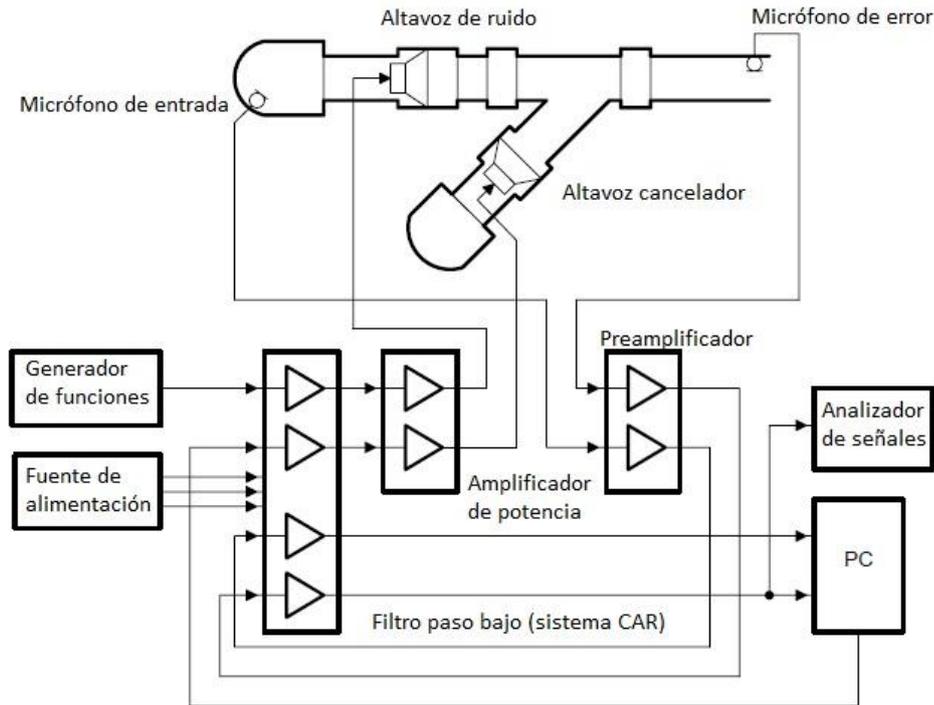


Figura nº22: Instalación de un sistema CAR en un conducto unidimensional.

Para el conducto se ha elegido una tubería de PVC de 15 cm de diámetro interior, con una rama en forma de Y para acomodar dos altavoces, el de cancelación o control y el encargado de simular el campo primario de ruido.

- Para esta disposición se ha elegido como procesador digital de señales el DSP TMS320vc5503 de Texas Instruments, de 16 bit y de coma fija, por su bajo coste y reducido consumo y por ser idóneo para los requerimientos deseados. Esta familia de procesadores consigue un alto rendimiento a baja potencia a través de la computación en paralelo y concentrándose en la reducción de disipación de potencia.
- Los filtros paso bajo son de tipo Butterworth de octavo orden, y tienen un ancho de banda de 500 Hz. Esta frecuencia corresponde a la frecuencia máxima de cancelación que interesa en las aplicaciones CAR. La función de estos filtros es eliminar el problema de aliasing y los armónicos indeseados.

El diagrama esquemático se muestra a continuación:

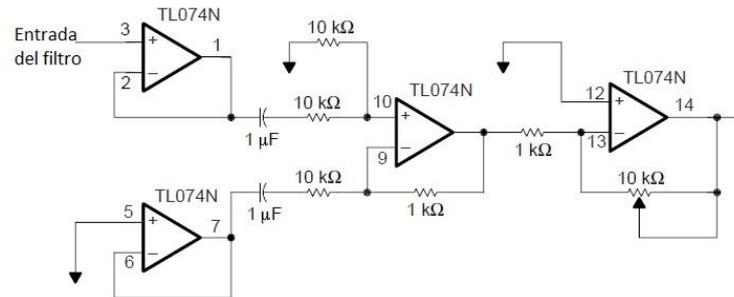
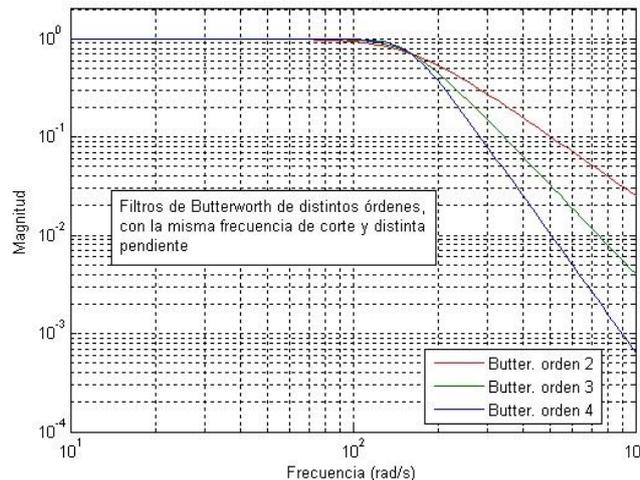


Figura nº23: Esquema de un filtro Butterworth de octavo orden.

Éste es uno de los filtros electrónicos más básicos, diseñado para producir una respuesta lo más plana posible hasta las frecuencia de corte, es decir, la salida se mantiene constante hasta la frecuencia de corte, a partir de la cual disminuye a razón de 20n dB por década, siendo n el número de polos del filtro.



Figuranº24: Respuesta en frecuencia del filtro Butterworth

La respuesta en frecuencia de un filtro Butterworth es muy plana (sin ondulaciones) en la banda pasante, y se aproxima a cero en la banda rechazada.

- Se emplean dos micrófonos Panasonic WM-61A de tipo electret. Éste es un tipo de micrófono de condensador que elimina la necesidad de ser polarizado por una fuente de alimentación ya que emplea un material (policarbonato de flúor) que se encuentra constantemente cargado. Son pequeños micrófonos (6 mm de diámetro) de uso general, con una alta sensibilidad (0dB = 1V/Pa, 1 KHz) y omnidireccionales. Tienen un gran rango de operación, una impedancia de salida de menos de 2,2 kΩ y ofrecen una respuesta plana entre 50 Hz y 16 kHz.

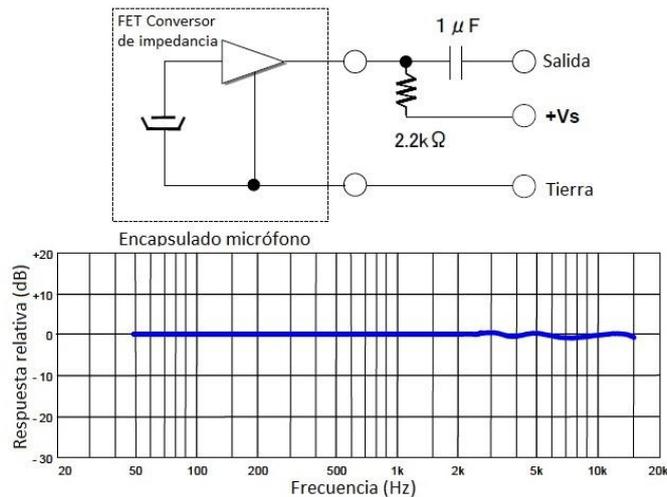


Figura nº 25: Esquema y respuesta en frecuencia del micrófono.

- Para generar el campo primario y el campo secundario se han escogido dos altavoces Panasonic EAS4 de uso general y que pueden funcionar en todo el rango de frecuencias. Tienen un diámetro de 40 mm y una impedancia de 16 Ω .
- Para que el procesador DSP pueda utilizar la señal del micrófono, es necesario proporcionarle un nivel de voltaje adecuado. Para ello se utiliza un circuito integrado LM883 de Texas Instruments que actuará como preamplificador de audio. El LM388 es un amplificador operacional dual para aplicaciones de audio y señales de datos. Este dispositivo opera en un gran rango de voltaje de alimentación (tanto simple como doble), con ruido muy reducido y un amplio ancho de banda.

A continuación se muestra el diseño típico del circuito del preamplificador de audio:

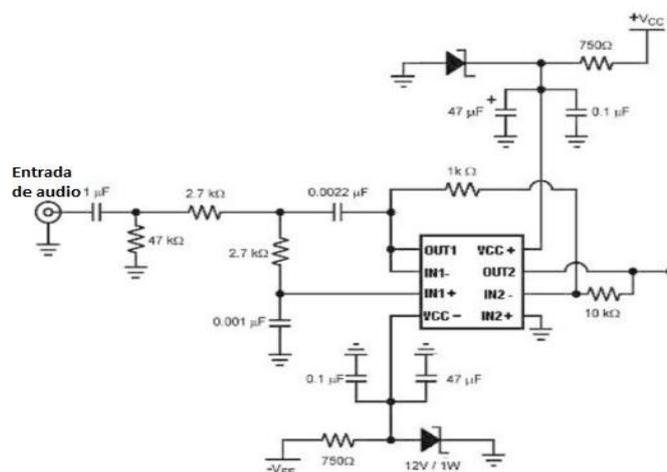


Figura nº 26: Ejemplo del diseño típico del preamplificador de audio.

- Se necesita un amplificador de audio ya que el convertidor digital-analógico conectado al DSP genera una señal de baja potencia que es insuficiente para alimentar al altavoz de control. El amplificador de audio, además de aportar la potencia necesaria debe hacerlo sin distorsionar la forma original de la onda. Para ello se emplea un amplificador LA4445 de Sanyo, un integrado económico y con una configuración sencilla. Tiene una salida doble de 5,5 W de potencia, requiere además pocos componentes externos y tiene un bajo ruido residual. A continuación se muestra un circuito de aplicación de ejemplo:

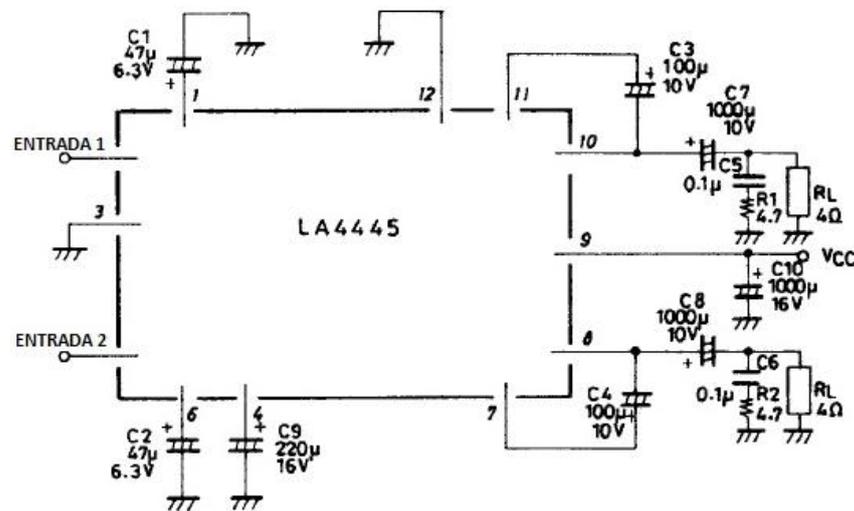


Figura nº 27: Ejemplo de circuito de aplicación del amplificador.

- Para simular la onda primaria de ruido es necesario un generador de funciones que conformará esta señal, que después será llevada al altavoz primario. Se ha elegido el generador de funciones 4001 A del fabricante BK Precision. Es un generador sencillo, con mandos analógicos y capaz de generar ondas sinusoidales, triangulares, rampas, cuadradas y pulsos, por lo que satisface los requerimientos del control activo. Además se puede elegir la frecuencia de la onda entre 0,5 Hz hasta 4 MHz.

5.- Aplicaciones del control activo de ruido.

El control activo de ruido difícilmente podrá constituir una solución definitiva y perfecta para todos y cada uno de los problemas de control de ruido. A pesar de todos los resultados satisfactorios obtenidos y de que el comportamiento de muchos sistemas se puede mejorar aumentando el número de altavoces y micrófonos o con el desarrollo de sistemas de control más rápidos y estables, existen una serie de limitaciones físicas en el rendimiento que no se podrán superar con un mejor procesamiento de la señal. Como se ha señalado con anterioridad, el control activo está limitado a situaciones en las que la separación entre las fuentes primaria y secundaria es, como mucho, del orden de la longitud de onda. En habitáculos cuya dimensión más pequeña es del orden de unos pocos metros, la frecuencia superior está restringida por lo que el CAR es apropiado para el orden de centenas de hertzios.

Las aplicaciones en la que el CAR ha sido más exitoso son en las que las frecuencias bajas son dominantes. En estas aplicaciones el CAR puede ser más efectivo que las técnicas pasivas convencionales de control, ya que estas últimas tienden a ser ineficientes conforme decrece la frecuencia. No obstante el control de ruido debe encararse de forma conjunta entre técnicas pasivas y activas para conseguir resultados que funcionen en un amplio rango frecuencial. A continuación se exponen brevemente una serie de aplicaciones prácticas que han alcanzado el estado de implementación comercial y que por lo tanto se han demostrado efectivas.

>Auriculares con cancelación activa.

Los auriculares con cancelación activa del ruido fueron implementados en el laboratorio hace años y se empezaron a comercializar a finales de la década de los ochenta y a principios de los noventa. La mayoría de estos sistemas emplean una estructura de feedback y están diseñados para reducir cualquier ruido externo. La razón por la que implementan el control feedback es la naturaleza del ruido que se desea atenuar: a diferencia de otras aplicaciones en las que se tiene un buen conocimiento a priori de las características del ruido, en este caso el ruido tiene un carácter aleatorio y por ello no es posible, o es muy complicado, conformar una referencia del mismo. Hay que señalar que una de las principales complicaciones de

control y análisis en este caso es la de cancelar el ruido indeseado sin alterar de forma perceptible la señal de sonido original. De todas formas, gracias al desarrollo de filtros adaptativos se han podido implementar auriculares con control feedforward en los últimos años.

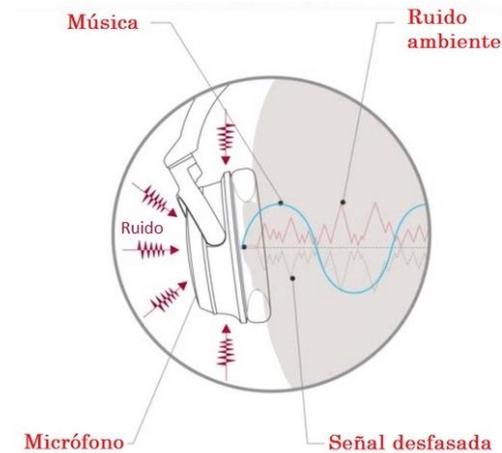


Figura nº28: Auricular con cancelación activa.

Como puede intuirse en la imagen anterior, tanto el micrófono de error como la electrónica de control están incluidos dentro del auricular.

Los fabricantes Bose (EE.UU.) y Sennheiser (Alemania) lanzaron por primera vez a finales de los años ochenta auriculares con cancelación activa de ruido. Estaban pensados para ser utilizados en aviación por los pilotos, por lo que al ser un producto orientado a profesionales y novedoso su precio era elevado. Este tipo de auriculares son circumaurales (rodean por completo la oreja) o supraaurales (rodean parcialmente la oreja) y como muchas otras aplicaciones combinan la cancelación activa con técnicas pasivas.

El desarrollo de la electrónica de consumo, y en especial el de dispositivos de reproducción de música portátiles, a partir del año 2000 ha facilitado que esta tecnología sea mucho más accesible a todo el público. Tanto el tipo de auriculares anteriormente descrito como los pequeños intraauriculares (en el interior de la oreja) son comercializados por una gran cantidad de fabricantes (Bose, Sennheiser, Sony, JVC, AKG, Phiaton, Creative, Logitech) y a precios asequibles, algunos incluyen un pequeño controlador digital. Este último tipo, intraauricular, ya dispone de por sí de una buena atenuación pasiva, por lo que unido a la cancelación activa consigue un rendimiento

más que aceptable. Estos auriculares puede emplearse, además de para fines puramente lúdicos, para enmascarar ambientes ruidosos como el interior de los aviones o determinadas zonas de trabajo.

>Audífonos y protectores auditivos activos.

Este tipo de aplicación está relacionada ampliamente con la anterior. Los protectores auditivos activos funcionan de forma similar a los auriculares con cancelación activa, con la salvedad de que no necesitan reproducir ninguna señal de sonido, por lo que su control es más sencillo que en los auriculares. De forma análoga, suelen ofrecer protección para un amplio rango de frecuencias al combinar técnicas pasivas con el control activo, encargado de cancelar ruido de baja frecuencia.

La estructura de control más común en este caso es también feedback dado el carácter aleatorio que por lo general puede tener el ruido, no obstante para determinados casos en los que el ruido tenga características conocidas se puede implementar un control feedforward adaptativo.

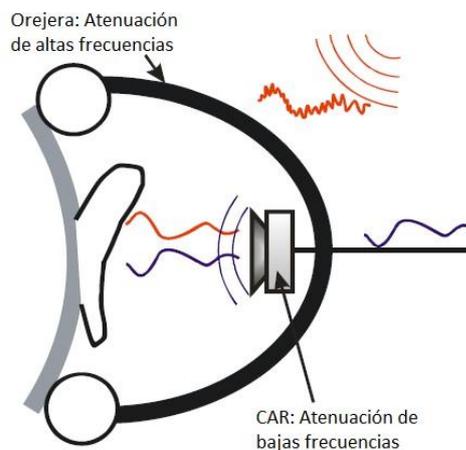


Figura nº29: Protector auditivo activo.

Este tipo de protectores auditivos son empleados en entornos especialmente ruidosos, como puede ser una fábrica, sitios de construcción o medios de transporte como aviones, también para aplicaciones militares. Su desarrollo fue parejo a los auriculares y los comercializan muchas marcas como Sennheiser, Bose, Peltor, Walkers, ProTac, ProEars o Rifleman.

Los audífonos con cancelación de ruido incluyen un sistema CAR para mejorar la calidad de la señal de sonido con ruido de fondo y para aliviar el esfuerzo de audición.

Implementan también una estructura feedback y se diseñaron a partir de los auriculares anteriormente explicados. Por lo general, incluyen toda la circuitería y batería necesaria para, en vez de cancelar todo el ruido de baja frecuencia, aislar y amplificar solamente la frecuencia correspondiente a la voz (desde los 80 Hz) mientras que desecha el sonido ambiente. Ésta es la diferencia principal con los audífonos clásicos que amplifican todo el sonido que captan, haciendo en ocasiones difícil la comprensión de conversaciones. Son productos por lo general más caros que los anteriores dado que son más específicos y algunas empresas que los comercializan son Able Planet, Starkey o Siemens.

>Control activo de ruido en habitáculos.

El campo sonoro en el interior de un recinto depende de su geometría, de las condiciones del contorno de las paredes, de las inhomogeneidades del medio y del número y posición de las fuentes en el mismo. En términos generales, la solución de la ecuación de ondas en el interior de un recinto es extremadamente compleja, por consiguiente este tipo de control es uno de los más enrevesados que existen. Una de las soluciones consiste en buscar las funciones propias del recinto. Cada una de estas funciones propias representa un modo propio del recinto. Desde un punto de vista matemático, los modos propios se obtienen buscando soluciones separables en el recinto. Esta solución, para una geometría un poco complicada también es muy difícil de obtener. Por el contrario, para geometrías más sencillas (recintos rectangulares) y asumiendo condiciones de contorno simplificadas, es posible obtener soluciones que puedan ayudar a comprender la forma del campo acústico en recintos.

Por lo tanto la estrategia de control viene marcada por la complejidad del campo acústico. Si las fuentes sonoras están distribuidas sobre una región grande en comparación con la longitud de onda, existe una correspondencia aproximada de uno a uno entre el número de modos y el número de fuentes secundarias requeridas para el control global. Existe una frecuencia límite a partir de la cual el número de fuentes secundarias requerido es tal que hace inviable la solución. Para estas situaciones tan complicadas, se pueden ensayar alternativas complementarias, como tratar de incrementar la absorción de las paredes del recinto mediante el control activo estructural de los paneles que las componen. Otra solución es tratar de controlar el

campo sonoro en las proximidades de la fuente secundaria, de forma que se produzca una cancelación local.

Las aplicaciones prácticas de este tipo de control en recintos están enfocadas en su mayoría al control de ruido en medios de transporte: aviones, coches, autobuses, etc. Como se ha explicado, el control global es complicado, y queda reducido a habitáculos no muy extensos y de geometría relativamente sencilla. Así, por ejemplo, Ultra Electronics en colaboración con la Universidad de Cambridge implementó un sistema de control activo en un avión Saab 2000 de 50 pasajeros. Para ello tuvo que emplear 37 altavoces y 72 micrófonos de error en el techo del avión. El ruido a cancelar, el de los motores, es tonal y de baja frecuencia, por lo que su cancelación por métodos pasivos aumentaría el peso de la aeronave de forma excesiva. La señal de referencia se sitúa en el exterior del avión cerca de los motores, por lo que emplean sistema feedforward. Con esta estrategia se consiguió una reducción media de 7 dB. En otra prueba en un avión BAE de 50 pasajeros, con 32 micrófonos y 16 altavoces, se consiguieron reducciones de unos 10 dB en 88 Hz, la frecuencia de las aspas.

Otro problema de ruido tonal de baja frecuencia difícilmente controlable es el del motor de los coches, sobre todo a velocidades elevadas del motor. La señal de referencia se toma del circuito de ignición del motor (o de cualquier sensor que relacione la velocidad del motor con su ruido) y se pasa a través de un controlador feedforward para alimentar a los altavoces del habitáculo del coche. De igual forma se emplaza una serie de micrófonos en el interior del coche para proporcionar la señal de error y así adaptar continuamente la señal del controlador, como puede comprobarse en la siguiente figura. Para velocidades del motor entre 1500 y 6000 rpm, el ruido presenta una frecuencia de entre 50 y 200 Hz.

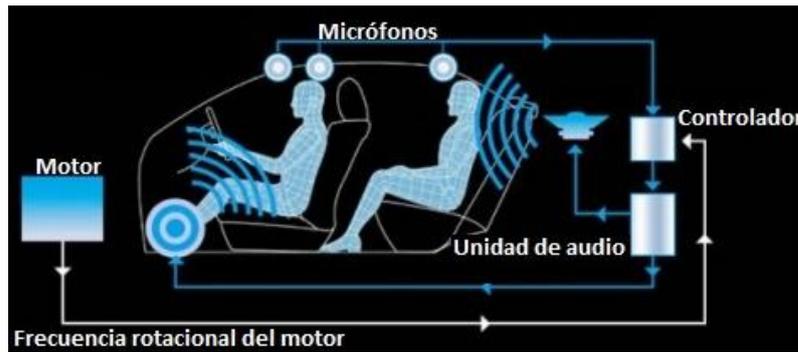


Figura nº2x: Sistema CAR en un automóvil.

Muchos fabricantes de coches implementan actualmente un control activo de ruido en sus coches (Toyota, Lexus, GM, Lotus...), si bien no todos ofrecen una cancelación global debido a la compleja naturaleza del campo acústico, si que consiguen cancelaciones locales alrededor del reposacabezas de unos 10 dB.

>Control de ruido en transformadores eléctricos.

El control de ruido en transformadores eléctricos fue una de las primeras aplicaciones exitosas (Conover) en los años 50. En aquella época no había ningún tipo de procesador digital, por lo que el éxito de esta aplicación se debió en gran medida a la sencillez del ruido emitido por los transformadores eléctricos. Este ruido está caracterizado por tonos discretos correspondientes a los armónicos pares de la frecuencia de red: 120, 240, 360... Hz (en EE.UU. la frecuencia de red son 60 Hz), y se genera debido a que las fuerzas magnetostrictivas provocan que el núcleo del transformador vibre a dos veces la frecuencia eléctrica. Otras fuentes de ruido son los aerorefrigerantes y los ventiladores impulsores del aire caliente y frío. Los ventiladores también producen un ruido periódico cuya frecuencia fundamental es proporcional a la velocidad de giro de las paletas.

Sólo los dos primeros armónicos contribuyen significativamente al ruido global radiado y el fundamental, con diferencia, es el principal responsable de la molestia. El ruido tonal radiado por un transformador puede ser considerado como omnidireccional y continuo.

Esta técnica de control de ruido, como prácticamente todas, es híbrida, ya que incorpora medidas pasivas como apantallamiento acústico. También mediante un diseño silencioso se han conseguido transformadores que radian unos 10-20 dB

menos. Las barreras acústicas suelen estar construidas con bloques de hormigón o planchas de acero, recubiertas interiormente con material absorbente efectivo en ese margen de frecuencias.

Conover y Ringlee diseñaron un sistema activo en 1955 con un simple banco de filtros para separar los armónicos, cada salida era desfasada y amplificada convenientemente. Cada uno de estos canales entraba a un sumador, donde se reconstruía la señal de alimentación a un altavoz que generaba el campo secundario. En puntos concretos se conseguían reducciones de hasta 20 dB y de 6dB en un ángulo de 35° en una dirección determinada, y ya entonces comprobaron que en algunas partes se producían refuerzos del campo acústico.

Posteriormente Hesselmann (1978) planteó la cancelación activa del ruido de transformadores en un ángulo de 180° en frente del mismo, también todavía con filtros analógicos. Los armónicos no se medían a partir de un micrófono, sino que se generaban midiendo la frecuencia de la red (control feedforward). Constató, además, que a distancias próximas al transformador, el sistema de cancelación produce un reforzamiento del campo sonoro. Sin embargo, el campo cancelado decrece rápidamente con la distancia, lo que confirma que las bajas frecuencias no son radiadas al campo lejano.

>Control de ruido para insonorización de ventanas de doble cristal.

Esta aplicación se enmarca dentro de los estudios de métodos para la reducción activa de la transmisión del sonido a través de paneles dobles. El control en paneles fue investigado por Elliot y Gardonio, y posteriormente por Fuller, para llegar a la conclusión de que se obtenían mejores resultados con un control activo acústico estructural, en el que se controla la vibración del panel radiante de forma que se minimiza la radiación de sonido. La mayoría de estos trabajos iniciales estaban enfocados para la aplicación de métodos de control en aviones de pasajeros.

Pero la aplicación que nos concierne en este apartado es el control activo en ventanas de doble cristal. Obviamente, es indispensable que ningún tipo de dispositivo entorpezca la visión o afee estéticamente la ventana. Así, la mejor forma de lograr la cancelación es empotrar los micrófonos y los altavoces en los marcos de las ventanas.

Los diferentes ensayos realizados por Fonseca o Jakob implementan una estructura feedforward, aunque también hay estudios con controles feedback adaptativo monocanal (Möser, 2003) que han resultado en reducciones de 10 dB cuando se expone al ruido del tráfico. Una vez más, estamos ante una técnica híbrida que combina el control activo con técnicas pasivas.

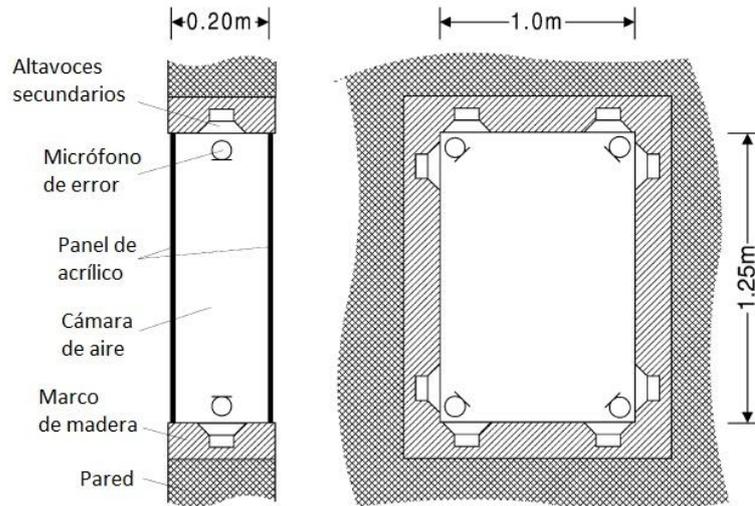


Figura nº31: CAR en una ventana de doble cristal.

En la figura anterior se puede ver un esquema de la propuesta de Möser y Jakob para el control en una ventana de doble cristal con estructura feedforward, para unos cristales de acrílico de 2mm de grosor y separados 20 cm, montados en una estructura de madera. Se colocan un total de ocho altavoces y cuatro micrófonos en las esquinas de la ventana debido a que es en las esquinas donde la presión sonora es máxima.

Con este montaje se hicieron ensayos con varios sensores de error ante diferentes ruidos que se consideran que deben ser atenuados por la ventana, como ruido de autopista, ruido de trenes o de aviones, consiguiéndose reducciones de entre 6 y 7,8 dB. A pesar de estos resultados satisfactorios, es una técnica que se encuentra actualmente en fase de desarrollo por lo que no se ha comercializado todavía.

>Control activo de ruido en ventiladores y conductos de ventilación.

Como se ha comentado a lo largo de este proyecto, el control activo de ruido en conductos es relativamente sencillo si se compara con las demás aplicaciones. Fue una de las primeras aplicaciones exitosas en el control activo, con estudios ya a principio de los años 70. Debido a que el ruido dentro de un conducto es estable y tiene unas

características definidas (por debajo de la frecuencia de corte del primer modo transversal sólo se propagan ondas planas), se pueden conseguir resultados satisfactorios sin demasiadas complicaciones. Prácticamente todos los sistemas CAR de conductos incorporan una estructura feedforward monocanal para ensayos, y varios altavoces y micrófonos en instalaciones. El micrófono se encarga de sensar la señal de ruido, se pasa a través del controlador para generar la señal de anti-ruido que es enviada al altavoz. Como casi todas las aplicaciones combina tanto métodos activos (CAR) como métodos pasivos (materiales absorbentes y silenciadores).

Este tipo de control está enfocado a reducir el ruido provocado por los sistemas de ventilación en edificios, ya sea en entornos laborales, como oficinas o fábricas, así como en hospitales o viviendas.

En la actualidad, empresas como la israelí Silentium comercializan productos para el control de ruido en HVAC, como un silenciador activo para instalar directamente al final de un conducto emisor de ruido, consiguiendo reducciones de hasta 10 dB. También ofrecen un silenciador activo para ser instalado en ventiladores axiales con resultados parecidos.



Figura nº32: Silenciador activo de Silentium.

Otra variante de este tipo de control es el control activo directamente en los ventiladores. Muchos aparatos electrónicos incorporan pequeños ventiladores para refrigeración que generan ruido. La empresa sueca RotoSub AB diseña y comercializa ventiladores con reducción activa de ruido.

>Aplicaciones médicas del control activo de ruido:

Si bien la aplicación comentada en el anterior punto puede ser perfectamente válida y recomendable para un hospital, existen además otras aplicaciones novedosas y recientes relacionadas con la medicina. Una de ellas es la reducción de ruido en el escáner TAC. Estos equipos se emplean para tomar imágenes detalladas de los órganos, pero durante su funcionamiento generan un intenso ruido que puede causar estrés en el equipo médico y por supuesto en el paciente, que de por sí ya puede sentirse angustiado por la prueba misma.

Se han llevado a cabo varias aproximaciones al control de ruido en escáneres, empezando por el control pasivo, el diseño de escáneres más silenciosos y el control activo. El ruido del escáner presenta un alto nivel de presión a bajas frecuencias, por lo que orejeras y tapones para los oídos son en este caso inefectivos.

En ensayos realizados se han conseguido reducciones de entre 15 y 30 dB en el escáner. De todas formas estos estudios se han realizado con simulaciones por ordenador en instalaciones de laboratorio. Además, se basan en un sistema de auriculares que presentan problemas a la hora de comunicarse verbalmente, por lo que el paciente queda aislado del personal médico. Otro de los problemas técnico a los que se tiene que enfrentar esta aplicación es que el ruido del escáner contiene ruido en forma de impulsos (no periódico) difícilmente cancelable. Por otro lado, el sistema CAR no debe alterar el resultado del escáner debe funcionar bajo el intenso campo magnético generado por el escáner. Esta última premisa es determinante ya que cualquier tipo de transductor que contenga material magnético (altavoces) no podrá ser empleado, por lo que se eligen dispositivos piezo-eléctricos.

Otra aplicación novedosa es el control activo de ruido en incubadoras de neonatos y bebés prematuros. Como se ha explicado en el cuarto punto del segundo capítulo de este proyecto, el exceso de ruido puede tener consecuencias negativas en la salud, por lo que en organismos tan frágiles como los de los recién nacidos puede ser especialmente perjudicial. Estas incubadoras están diseñadas para monitorizar sus constantes vitales y asegurar que las condiciones ambientales se mantienen en unos parámetros óptimos, pero no les aísla de la contaminación acústica de su entorno (ventilación, personal, dispositivos...). Debido a esta variedad de fuentes, el ruido es de

banda ancha, por lo que una vez más se combinan técnicas pasivas y activas, si bien ambos métodos están en este caso limitados por el pequeño espacio y por la condición de no interferir en el resto de aparatos electrónicos respectivamente.



Figura nº33: Prototipo de CAR en una incubadora.

En los ensayos realizados por Liu, en la figura anterior, un par de micrófonos se sitúan a ambos lados de la cabeza del bebé y los altavoces se emplazan en el interior de la incubadora. Son por lo tanto un sistema multicanal que implementa el algoritmo FXLMS. Empleando una onda sinusoidal con una frecuencia de 200 Hz generada por un altavoz como fuente primaria de ruido se consiguió una atenuación de más de 20 dB.

Tanto esta aplicación como la anterior se encuentran todavía en fase de desarrollo.

6.- Glosario.

- Algoritmo: en matemáticas y computación es un conjunto de instrucciones o reglas bien definidas, ordenadas y finitas que permite hallar la solución de un problema específico.
- CAR: control activo de ruido (del inglés ANC: Active noise control). Técnica de atenuación del ruido consistente en un sistema electro-mecánico generar una onda de igual amplitud y fase opuesta que el ruido para tratar de cancelarlo.
- Decibelio: unidad de medida utilizada para medir la intensidad del sonido y otras magnitudes físicas. El decibelio del nivel de presión sonora (sB SPL) toma como referencia el menor nivel de presión sonora que el oído humano puede detectar, 0 dB. La escala de decibelios es logarítmica.
- Feedback: tipo de estructura de control realimentada en la que la señal de error se devuelve, una vez analizada y adaptada, al altavoz secundario para generar el campo cancelador.
- Feedforward: tipo de estructura de control en lazo abierto en el que la señal canceladora se conforma a través de una referencia obtenida a partir de un sensor primario.
- HVAC: siglas en inglés de heating, ventilating and air conditioning (calefacción, ventilación y aire acondicionado). Engloba al conjunto de métodos y técnicas que estudian y analizan el tratamiento del aire en cuanto a condiciones de temperatura, humedad, calidad, ventilación, etc. para el confort en edificios.
- TAC: tomografía axial computerizada. Es una técnica de imagen médica que utiliza rayos X para obtener cortes o secciones de objetos anatómicos con fines diagnósticos.

7.- Bibliografía.

7.1 Libros consultados

- M. Moser; *“Engineering Acoustics: An Introduction to Noise Control”*, edit. Springer, Berlín 2009.
- P. A. Nelson & S. J. Elliot; *“Active Control of Sound”*, edit. Academic Press, 1992.
- P. Cobo Parra; *“Control activo del ruido: principios y aplicaciones”*, CSIC, Madrid 1997.
- S. Taherzadeh; *“Noise Control”*, edit. The Open University, 2003.

7.2 Artículos consultados

- A. Freudenthal, M van Stuijvenberg & J. B. van Goudoever; *“A quiet NICU for improved infants’ health, development and well-being: a systems approach to reducing noise and auditory alarms”*, Universidad de tecnología de Delft, Países Bajos, 2012.
- A. Jakob & M. Möser; *“Active control of double-glazed windows: feedback control and feedforward control”*, Universidad Técnica de Berlín, 2002.
- A. J. Hull, C. J. Radcliffe, S. C. Southward; *“Global active noise control of a One-Dimensional acoustic duct using a feedback controller”*, Journal of vibration and acoustics, 1994.
- B. Somek, M. Dadic, M. Maletic; *“Active noise control in ducts”*, Universidad de Zagreb, 2002.
- B. Widrow, J. M. McCool, C. S. Williams, J. R. Zeidler, J. R. Glover, JR., J. Kaunitz, R. H. Hearn, E. Dong, JR. & R. C. Goodlin; *“Adaptive Noise Cancelling: Principles and Applications”*, IEEE, 1975.
- C. Hernández, A. González, A. Albiol; *“Control activo de ruido en conductos”*, Universidad politécnica de Valencia, 1997.
- C. R. Fuller & A. H. von Flotow; *“Control of Sound and Vibration”*, IEEE, 1995
- C. R. Fuller, C. Papenfuss & T. D. Saux; *“Passive Noise Control in Prenatal Incubators”*, Universidad de Virginia Tech, 2007.
- D. F. Juang, C. H. Lee, T. Yang & M. C. Chang; *“Noise pollution and its effects on medical care workers and patients in hospitals”*, Universidad de Meiho, Taiwan, 2010.
- D. Guicking; *“Active Control of Sound and Vibration: History, Fundamentals and State of Art”*, Universität Göttingen, 2007.
- D. Svensek; *“Active Noise Control”*, Universidad de Liubliana, 2010.

- H. Xie, J. Kang & G.H. Mills; *“Clinical review: The impact of noise on patients’ sleep and the effectiveness of noise reduction strategies in intensive care units”*, Universidad de Sheffield, 2009.
- J. A. Tumialán Borja, C. H. Rodríguez Garavito, F. A. Murillo, W. R. Enciso; *“Caracterización e identificación de un sistema acústico para el control activo de ruido en ductos”*, Universidad de La Salle, Colombia, 2010.
- J. B. Evans & M. K. Philbin; *“The acoustic environment of hospital nurseries”*, Journal of Perinatology, 2000.
- J. Boot, R. A. de Callafon; *“Active noise control of an acoustic duct using feedback control”*, Universidad tecnológica de Eindhoven, 2004.
- L. Liu, S. Gujjula, P. Thanigai & S. M. Kuo; *“Still in Womb: Intrauterine Acoustic Embedded Active Noise Control for Infants Incubators”*, Universidad del Norte de Illinois, 2007.
- J. Romeu, X. Salueña, S. Jiménez, R. Capdevila, Ll. Coll; *“Active noise control in ducts in presence of standing waves and its influence on feedback effect”*, Universidad politécnica de Cataluña, 2000.
- M. R. F. Kidner; *“Active Noise Control: A review in the context of the “cube of difficulty””*, University of Adelaide, 2006.
- M. Christensen; *“What knowledge do ICU nurses have with regard to the effects of noise exposure in the Intensive Care Unit?”*, Universidad de Bournemouth, 2005.
- M. Larsson, S. Johansson, L. Hakansson, I. Claesson; *“A feedforward active noise control system for ducts using a passive silencer to reduce acoustic feedback”*, Instituto de Tecnología de Bleckinge, Suecia, 2007.
- M. McJury, R. W. Stewart, D. Crawford & E. Toma; *“The use of active noise control to reduce acoustic noise generated during MRI scanning: some initial results”*, 1998, Universidad de Strathclyde, Glasgow, 1998.
- M. Van Overbeek; *“Active Control of Periodic Noise”*, Universidad Técnica de Delft, 1993.
- P. Cobo, T. Bravo, M. Cuesta, C. Ranz y M. Siguero; *“Control activo de ruido”*, Revista de Acústica. Vol. XXXI.
- R. J. Bernhard; *“Strategies for Active and Passive Noise Control”*, Canadian Acoustics, 2000.
- R. S. Sánchez Peña, M. A. Cugueró, A. Masip, J. Quevedo, V. Puig; *“Robust identification and feedback design: An active noise control case study”*, Universidad Politécnica de Cataluña, 2008.
- S. J. Elliot & P. A. Nelson; *“Active Noise Control: Low-frequency techniques for suppressing acoustic noise leap forward with signal processing”*, IEEE, 1995
- S. M. Kuo & D. R. Morgan; *“Active Noise Control: A Tutorial Review”*, IEEE, 1999.

- S. Priese, C. Bruhnen, D. Voss, J. Peissig & E. Reithmeier; *“Adaptative Feedforward control for active noise cancellation in-ear headphones”*, Universidad de Leibniz, 2012.
- Y. Kajikawa, Woon-Seng Gan & S.M. Kuo; *“Recent advances on active noise control: open issues and innovative applications”*, APSIPA Transactions on Signal and Information Processing, 2012.

7.3 Patentes Consultadas

- P. Lueg; *“Process of Silencing Sound Oscillations”*, Alemania, 1933.
- H. F. Olson; *“Electronic Sound Absorber”*, EE. UU. 1953.
- T. A. Angelini, B. J. P. Nayrole, M. J. Jessel, G. Canévet, G. A. Mangiante, B. Carbone; *“Active Acoustic Sound Absorber Device”*, Francia, 1978.
- G. B. B. Chaplin, A. R. Powell & R. A. Smith; *“Method of reducing the adaptation time in the cancellation of repetitive vibration”*, Reino Unido, 1980.

7.4 Tesis Consultadas

- A. Mínguez Olivares; *“Ingeniería avanzada para sistemas de control de ruido acústico mediante técnicas adaptativas”*, Universidad Politécnica de Madrid, 1998.
- E. Sáez Elgueta; *“Control de ruido aplicado a un sistema de ventilación”*, Universidad Austral de Chile, 2002.
- M. Cuesta Ruiz; *“Control activo del ruido radiado por estructuras bidimensionales”*, Universidad Complutense de Madrid, 2002.
- J. A. Dianicio Ramírez, E. F. Rincón Sedeño; *“Control de ruido de un ventilador industrial”*, Instituto Politécnico Nacional, México D. F., 2010.

7.5 Páginas web consultadas

- Science Direct: www.sciencedirect.com
- Scirus: www.scirus.com
- Google Académico: scholar.google.es
- IEEEXplore: ieeexplore.ieee.org
- Electrical & electronics times: www.eetimes.com
- Grupo de vibroacústica de la Universidad de Zaragoza: www.grupovac.org
- E-A-R Specialty Composites: www.earsc.com
- Gizmag: www.gizmag.com
- School for champions: www.school-for-champions.com

- Vibrations and acoustics laboratories, Virginia Tech: www.val.me.vt.edu
- Silentium: silentium.com
- NOIZ Ingeniería Acústica: www.noizacustica.com
- Audiotec, Ingeniería y Control del Ruido: www.audiotec.es
- Acoustical Society of America: acousticalsociety.org
- Organización Mundial de la Salud: www.euro.who.int
- Rotosub: rotosub.com