

Capítulo 2

Control Activo del Ruido (CAR)

Como ya se menciono anteriormente el *Control Activo del Ruido (CAR)* se logra produciendo una señal 'anti-ruido' de manera que al interactuar con el ruido estas dos ondas se cancelen (figura 1.1), esto se logra a través de sistemas electrónicos que usan un algoritmo de procesamiento de señales muy particular para poder realizar esta cancelación.

Existen dos tipos de ruido acústico en el ambiente. Uno es causado por turbulencias y es totalmente aleatorio. Este tipo de ruido distribuye su energía de manera uniforme a través de varias bandas de frecuencias. Se le conoce como ruido de banda ancha y ejemplos de este tipo de ruidos son los sonidos de bajas frecuencias de los aviones o el sonido de una explosión.

Otro tipo de ruido, llamado ruido de banda angosta, concentra gran parte de su energía en frecuencias específicas; este tipo de ruido se relaciona con maquinas repetitivas o rotatorias, de manera que son periódicas o casi periódicas. Los motores de combustión interna, turbinas, compresores y bombas son un buen ejemplo de este tipo de ruido.

En la actualidad hay dos formas de controlar el ruido acústico: de forma pasiva o activa. La forma tradicional de controlar el ruido es de forma pasiva, usando absorbentes superficiales, silenciadores reactivos, materiales porosos y aisladores, entre otros; absorbiendo la energía y/o modificando la impedancia del medio de manera que se atenúen los sonidos no deseados. Este tipo de técnica es valiosa por su alta atenuación en un rango amplio de frecuencias, especialmente en las frecuencias altas y medias, con un costo no excesivamente elevado. Sin embargo en ruidos de baja frecuencia su efectividad disminuye[15] debido a que el tamaño del dispositivo esta relacionado con la longitud de onda del ruido a cancelar, esto provoca que este tipo de técnica sea poco rentable o inviable, ya que ocupan mucho espacio y son costosos.

Por otro lado, las técnicas activas, han llamado últimamente la atención debido a que su principio de trabajo es usar un sistema electroacústico o electromecánico que cancela el sonido no deseado a través de una *fente secundaria* usando el principio de superposición, generando un anti-ruido de igual amplitud y fase opuesta, de manera que al combinarse con el ruido, ambos se cancelan. La ventaja de CAR es su mayor efectividad al eliminar el ruido

ya que si se usan métodos pasivos estos pueden resultar muy caros y difíciles de controlar.

CAR tiene aplicaciones en una gran cantidad de problemas en operaciones industriales y de manufactura además de productos para consumo general. Esto es debido a que el concepto de CAR puede ser aplicado a la reducción de cualquier clase de ruido, ya sea eléctrico, acústico, vibratorio o en cualquier otro tipo de medio.

El diseño básico de CAR utilizando un micrófono y una bocina controlada electrónicamente para generar el anti-ruido fue propuesto por primera vez en una patente de 1936 por Paul Lueg[10]. En la figura 2.1 se muestra el diagrama original propuesto por Lueg.

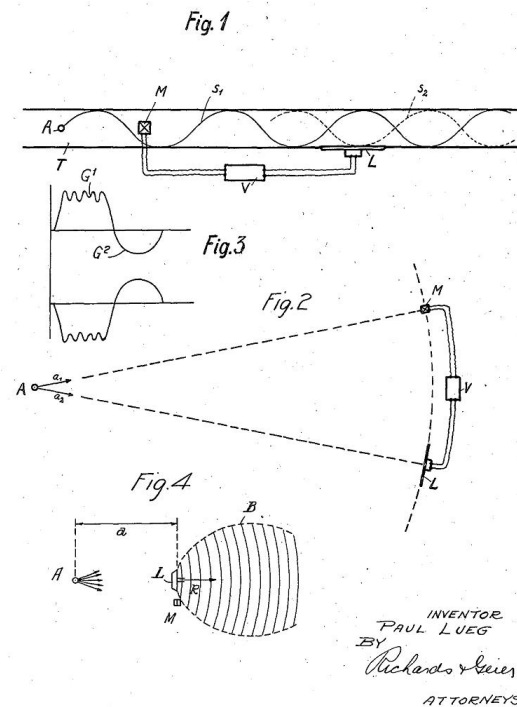


Figura 2.1: Diagrama de la patente de 1936 por el físico alemán Paul Lueg.

Si bien la patente estableció la idea básica de CAR, no fue sino hasta el desarrollo de las técnicas de procesamiento digital de señales que el desarrollo de este tipo de sistemas fue posible. Esto debido a que las características de la señal y el medio en el que esta se propaga varían con el tiempo, el contenido espectral, la amplitud, fase y velocidad de propagación no son estacionarios; de manera que un sistema de Control Activo del Ruido debe de ser *adaptivo*.

Un problema fundamental en CAR y que debe de ser considerado; es el requerimiento de un control de alta precisión, estabilidad temporal y confiabilidad. Para que sea pueda lograr un alto nivel de atenuación del ruido, la amplitud y la fase del ruido primario y secundario deben de coincidir con mucha precisión. De manera que es preferible que el cancelador del ruido sea digital, de manera que las señales provenientes de transductores electroacústicos o electromecánicos sean muestreadas y procesadas con un Procesador Digital de Señales (DSP)

lo suficiente velocidad y preciso de manera que ejecute complejas funciones matemáticas en tiempo real.

2.1. Principios Acústicos

Todas las estrategias de control activo del ruido se basan en el principio de superposición, el cual tiene aplicaciones en cualquier sistema lineal. La propagación de una onda sonora, con amplitud correspondiente a la de un ruido extremadamente intenso, es un proceso relativamente lineal. Los problemas de no-linealidad aparecen cuando la bocina utilizada para generar la interferencia destructiva actúa como fuente secundaria de ruido. Al momento de controlar ruido, por ejemplo, un tono de baja frecuencia debido a la interferencia destructiva muy poco ruido será audible en dicha frecuencia. Sin embargo, las armónicas generadas por la bocina podrían ser notablemente audibles.

El efecto de interferencia destructiva debido a la superposición de ondas acústicas es bastante simple de realizar, si el volumen y frecuencia de un tono puro emitido por una bocina se ajustan de manera relativa al tono emitido por una segunda bocina, entonces la presión acústica en un micrófono de monitoreo, el cual puede ser colocado en cualquier punto del campo resultante, será casi cero.

Desgraciadamente, también es probable que en otros puntos del campo acústico, las dos componentes de la presión acústica estén en fase y ocurra una interferencia constructiva, incrementando el ruido en esos puntos.

2.2. Aplicaciones generales

La decisión de aplicar o no sistemas CAR, será determinada dependiendo de la efectividad del sistema en comparación de técnicas pasivas. Como ya se mencionó anteriormente CAR es un método muy efectivo para atenuar ruidos de baja frecuencia con un dispositivo de pequeño tamaño. El desempeño en altas frecuencias es limitado debido a varios factores, incluyendo la necesidad de una mayor tasa de muestreo y la existencia de modos de alto orden que resultan en cálculos más complicados. En bajas frecuencias, las tasas de muestreo son bajas y las longitudes de onda grandes. Por otro lado, las técnicas pasivas tienden a ser efectivas en altas frecuencias ofreciendo la alternativa de complementar ambas técnicas.

Desde un punto de vista geométrico CAR puede ser clasificado en las siguientes cuatro categorías[16]:

1. Ruido en conductos: Tuberías de una sola dimensión; tales como tubos de ventilación, aire acondicionado, escapes, etc.
2. Ruido interior: Ruido dentro de un espacio cerrado.

3. Ruido en el espacio libre: Ruido que se propaga en un espacio libre.
4. Protección auditiva personal: Un caso de ruido interior en pequeña escala.

Con la alza en atención y estudio que han recibido los sistemas CAR en los últimos 30 años, se han desarrollado aplicaciones específicas, que incluyen atenuación de fuentes de ruido inevitable en los siguientes escenarios:

Automotriz Atenuación de sonidos dentro de la cabina de pasajeros, reducción del sonido del escape, etc.

Electrodomésticos Aires acondicionados, refrigeradores, lavadoras, secadoras, etc.

Industrial Ventiladores, conductos de aire, chimeneas, compresores, bombas, particiones de cubículos en oficinas, protección de oídos, etc.

Transportación Aviones, helicópteros, barcos, motocicletas, etc.

Los algoritmos usados para el Control de Ruido Acústico también pueden ser usados en el Control Activo de Vibraciones; el cual se puede emplear para aislar variaciones de una variedad de máquinas y estabilizar plataformas en presencia de perturbaciones vibratorias. Debido a que el desempeño y fiabilidad de este tipo de sistemas son continuamente mejorados, a la vez que los costos siguen disminuyendo, los sistemas activos se convertirán en la solución preferida para una gran variedad de problemas de control vibratorio.

Existen también dos maneras de implementar el Control Activo del Ruido, la primera usa control a priori (*feedforward control*), que puede ser interpretada como un **Cancelador Activo de Ruido** o un identificador adaptivo de sistemas. La segunda forma consiste en usar control de realimentación (*feedback control*), que se puede realizar como un esquema adaptivo de predicción.

2.3. Cancelación Adaptiva del Ruido

Como se ilustra en la figura 2.2 el concepto básico de la Cancelación Adaptiva del Ruido es procesar dos señales provenientes de dos sensores y reducir el nivel de ruido con técnicas de filtrado adaptivas. El sensor primario es colocado cerca de la señal origen para obtener así la señal deseada; sin embargo el sensor primario también captará ruido. El sensor de referencia es colocado cerca de la señal origen del ruido para sensar esta señal solamente. Esta estructura usa a su favor la correlación entre las señales de ruido captadas por los sensores primario y de referencia.

Un diagrama de bloques de un sistema de cancelación adaptiva del ruido se ilustra en la figura 2.3, donde $P(z)$ representa la función de transferencia entre la fuente de ruido y el sensor primario. El cancelador tiene dos entradas, la entrada primaria $d[n]$ y la señal

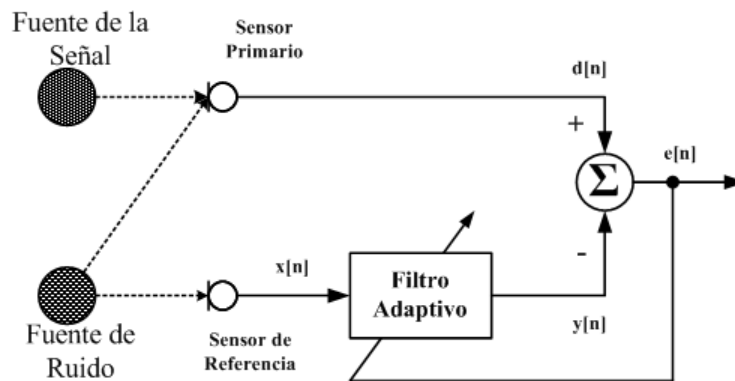


Figura 2.2: Concepto básico de la cancelación adaptativa del ruido.

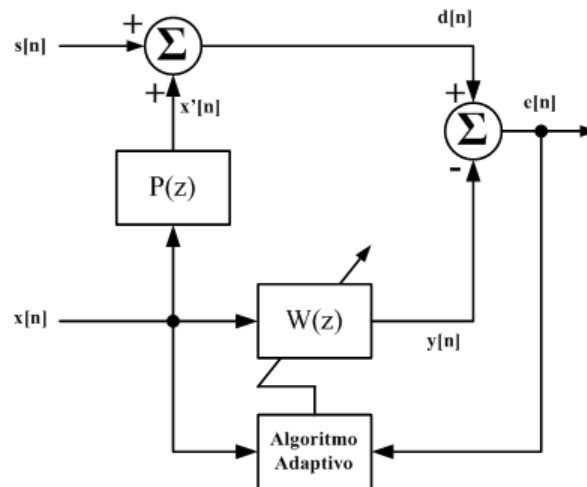


Figura 2.3: Diagrama de bloques de un cancelador adaptativo de ruido.

de referencia $x[n]$. La señal primaria $d[n]$ consiste de la señal original $s[n]$ más ruido $x'[n]$ (resultando $d[n] = s[n] + x'[n]$), la cual tiene un alto grado de correlación a $x[n]$ ya que ambas se originan de la misma fuente de ruido. La señal de referencia $x[n]$ consiste en ruido 'puro'. El objetivo del filtro adaptivo es usar la entrada de referencia $x[n]$ para estimar el ruido $x'[n]$. La salida del filtro $y[n]$ que es un estimado del ruido $x'[n]$, se resta de la señal de canal primario $d[n]$, produciendo la señal $e[n]$, que es la señal deseada con ruido reducido.

Para minimizar el error residual $e[n]$, el filtro adaptivo $W(z)$ generará una salida $y[n]$ que es una aproximación de $x'[n]$. Entonces el filtro adaptivo convergerá al bloque desconocido $P(z)$. Esto es conocido como un esquema de identificación de sistemas que se discutirá a continuación.

2.3.1. Identificación Adaptiva de Sistemas

La identificación de sistemas es un acercamiento experimental de modelado de procesos o sistemas. La idea básica es medir las señales producidas por el sistema y usarlas para construir un modelo.

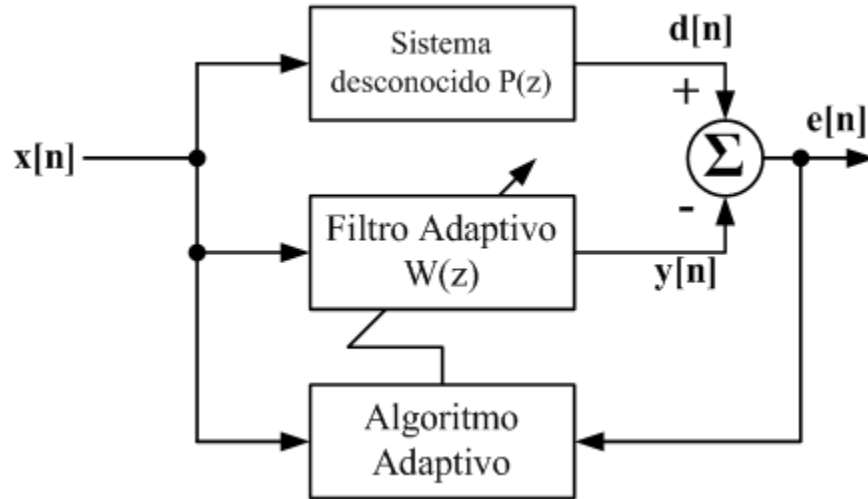


Figura 2.4: Identificación adaptiva de sistemas.

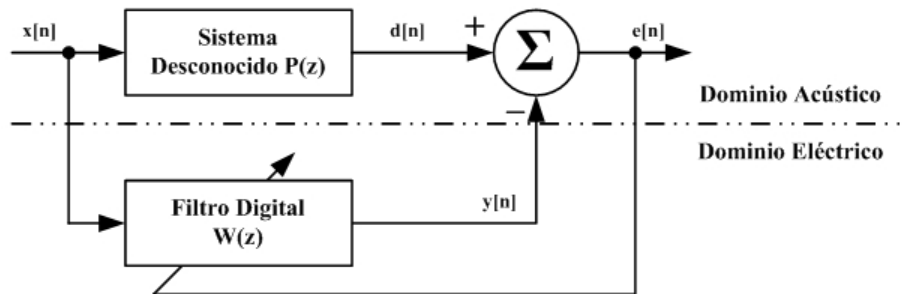


Figura 2.5: Identificación adaptiva de sistemas para CAR

En la figura 2.4, donde el sistema desconocido $P(z)$ y el filtro digital $W(z)$ modelará $P(z)$ basándose en un algoritmo de minimización de errores predeterminado. Al introducir una señal $x[n]$ tanto en el sistema $P(z)$ como en el filtro $W(z)$ y midiendo las señales de salida $y[n]$ y $d[n]$, podremos determinar las características de $P(z)$ ajustando el filtro $W(z)$ para que minimice la diferencia entre ambas salidas.

Con esto en mente se puede llegar a una forma simplificada de un sistema de Control Activo de Ruido, mostrada en la figura 2.5, en donde un filtro adaptivo $W(z)$ se usa para estimar un sistema desconocido $P(z)$. Se asume que el sistema y el filtro reciben la misma entrada $x[n]$, el sistema proporciona la respuesta "deseada" al filtro adaptivo. Si el sistema es dinámico, el modelo será variante en el tiempo. El algoritmo adaptivo tiene entonces la

tarea de mantener el error de modelado al mínimo detectando las variaciones en el tiempo del sistema desconocido. El camino primario $P(z)$ consiste de la respuesta acústica del sensor de referencia al sensor de error donde se lleva a cabo la atenuación del ruido. En aplicaciones actuales, otro número de funciones de transferencias deben de ser incluidas, las cuales serán discutidas en secciones siguientes.

Existen tres puntos que deben de ser considerados en la identificación adaptiva de sistemas: la señal de excitación, la estructura del filtro y el mecanismo de adaptación. Si la señal de excitación $x[n]$ tiene un contenido frecuencial muy amplio y el ruido interno del sistema a identificar es pequeño, el filtro adaptivo convergerá a un modelo muy aproximado del sistema desconocido. El filtro podrá tener una estructura de *solo ceros*, *solo polos* o *polos y ceros*. Una estructura de solo ceros es representada por un filtro **FIR**, mientras que las estructuras de solo polos ó polos y ceros pueden ser representadas por un filtro **IIR**. El mecanismo de adaptación puede ser un algoritmo adaptable como el LMS o RLS y sus variantes.

El objetivo del filtro $W(z)$ será entonces minimizar el error residual $e[n]$. De la figura 2.5 la *transformada* z de $e[n]$ se denota como $E(z)$ y se expresa como:

$$\begin{aligned} E(z) &= D(z) - Y(z) \\ &= P(z)X(z) - W(z)X(z) \end{aligned} \quad (2.1)$$

De manera ideal $E(z) = 0$ después de que el filtro adaptable converge. De la ecuación anterior tenemos:

$$W(z) = P(z) \quad (2.2)$$

Para un $X(z) \neq 0$, lo que significa que

$$y[n] = d[n] \quad (2.3)$$

La ecuación (2.3) nos dice que la salida del filtro adaptivo $y[n]$ es idéntica a la señal primaria $d[n]$. De esta manera cuando $d[n]$ y $y[n]$ son combinadas acústicamente, el error residual es

$$e[n] = d[n] - y[n] = 0 \quad (2.4)$$

Que basándonos en el principio de superposición resulta en la cancelación de ambos sonidos.

De esta manera, si el filtro $W(z)$ converge a un buen modelo del sistema $P(z)$, el acercamiento a priori es capaz de cancelar ruidos de banda ancha (aleatorios) de manera efectiva. Lo anterior supone que se tiene suficiente tiempo para que el sistema complete los cálculos del modelo, determine la inversa de la señal y genere el sonido requerido para cancelar el ruido antes de que este pase a través del sistema. Como las señales pasan a través del sistema y el filtro en paralelo, los cambios en la fuente primaria no afectan el nivel del sonido cancelado si el modelo generado por el filtro representa de manera adecuada al sistema desconocido.

¹En realidad, en el contexto de CAR, la salida del sistema desconocido es una señal **no** deseada, el término 'deseada' es un término genérico usado con filtros adaptivos para denotar una señal piloto o de prueba[22]

2.3.2. Efectos de la Trayectoria Secundaria

La sección anterior describió de forma simplificada el principio de CAR en un ambiente ideal. El uso de un algoritmo adaptable, asume que una señal de error esta disponible y es la diferencia entre la señal proveniente de la fuente primaria y la salida del filtro adaptable.

El uso del filtro adaptivo en la figura 2.5 se complica debido a que la señal eléctrica de referencia se debe de obtener por medio de presión acústica usando un micrófono. De la misma manera, la señal eléctrica de error debe de ser obtenida usando otro micrófono. Finalmente, el sonido cancelador o anti-ruido, debe de ser generado a partir de la señal eléctrica de salida por medio de una bocina. Por lo tanto, existen un número de funciones de transferencia que deben de ser consideradas. La suma de sonidos en la figura 2.5 representa superposición acústica en el espacio de la bocina canceladora al micrófono de error, donde el ruido primario se combina con la salida del filtro adaptivo. Esto deriva la necesidad de compensar por la función de transferencia de la trayectoria secundaria $S(z)$ desde $y[n]$ a $e[n]$, lo cual incluye: el convertidor A/D (analógico a digital), filtro de reconstrucción, amplificadores de potencia, bocina, micrófono de error, preamplificador y convertidor D/A (digital a analógico).

Como se ilustra en la figura 2.6, la función de transferencia de la trayectoria secundaria $S(z)$ puede ser separada en dos funciones de transferencia en cascada:

$$S(z) = R(s)S'(z) \quad (2.5)$$

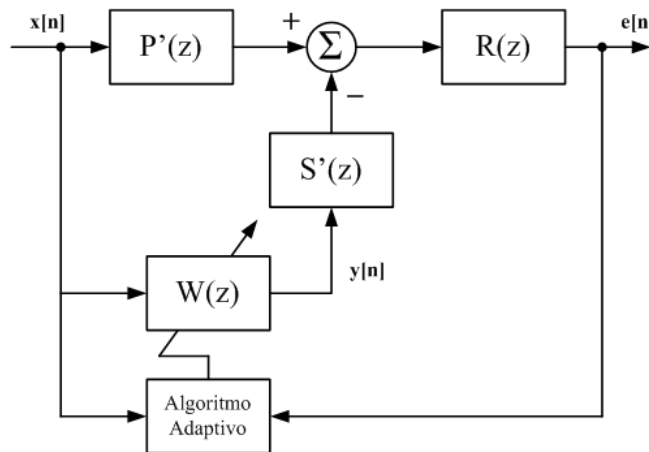


Figura 2.6: Diagrama de bloques de un sistema CAR con trayectoria secundaria.

Donde $S'(z)$ representa la función de transferencia secundaria de la salida del filtro adaptable a la sumatoria de señales y $R(z)$ representa la función de transferencia residual de la sumatoria de señales a la señal de error. De manera similar, la función de transferencia primaria $P(z)$ que va del sensor de entrada a la señal de error puede ser separada como:

$$P(z) = R(z)P'(z) \quad (2.6)$$

Donde $P'(z)$ es la función de transferencia del sistema acústico desconocido desde el micrófono de referencia a la sumatoria de señales. Los coeficientes del filtro adaptivo deben de converger a los valores apropiados para minimizar la señal de error aun con la presencia de las funciones de transferencias de los diferentes transductores y filtros. De la figura 2.6, la función de transferencia de la señal de error es:

$$E(z) = R(z)[P'(z) - S'(z)W(z)]X(z) \quad (2.7)$$

Asumiendo que $W(z)$ tiene un orden mucho mayor a cero. Entonces, después de la convergencia del filtro adaptivo, el error residual resulta ser cero, $E(z) = 0$, lo que significa que $W(z)$ ha llegado a la función de transferencia óptima

$$W^o(z) = \frac{P'(z)}{S'(z)} \quad (2.8)$$

Observamos que el filtro adaptivo tiene que invertir la función de transferencia $S'(z)$; sin embargo, es imposible compensar por el retardo en el canal secundario provocado por $S'(z)$ si el canal primario $P'(z)$ no contiene un retardo de por lo menos igual duración.

En la ecuación (2.7), el sistema de control es inefectivo si existe una frecuencia para la que $R(\omega) = 0$; en otras palabras, un cero en la función de transferencia del sensor de error causa una componente en frecuencia fuera del alcance del sistema. Incluso si se realiza un filtro adaptable estable en estas circunstancias, no es posible obtener una cancelación de ruido significativa a dicha frecuencia: $P'(\omega)S'(\omega)W(\omega)$ puede tomar cualquier valor pero el controlador nunca sabrá si $R(\omega) = 0$. Esto no lleva a que el ruido primario solamente es controlable si el sistema es observable por medio del sensor de error. Un sistema *CAR* será inefectivo para frecuencias fuera de rango e inestable para frecuencias incontrolables sin importar el algoritmo adaptivo o la estructura de control.

Para la ecuación (2.8), el filtro adaptable $W(z)$ realiza un modelado directo de la función acústica primaria $P'(z)$ para generar el ruido cancelador, y un modelado inverso de $S'(\omega)$ para compensar el efecto de la trayectoria secundaria. En términos de procesamiento de señales en tiempo real, la introducción de la función de la trayectoria secundaria en un controlador usando un algoritmo adaptable estándar, causará de manera general inestabilidad. Esto es porque la señal de error no está correctamente alineada en el tiempo con la señal de referencia, debido a la presencia de $S(z)$.

Como las funciones de transferencia primaria y secundaria tienen a $R(z)$ en común, es conveniente introducir este término en el modelo, lo que resulta en el diagrama equivalente de la figura 2.7.

De las ecuaciones (2.5) a la (2.7), la función de estado estable del filtro adaptivo puede ser expresada de manera mas sencilla, quedando la *transformada* z de la señal de error como:

$$E(z) = [P(z) - S(z)W(z)]X(z) \quad (2.9)$$

Después de que el filtro converge, el error residual es cero [$E(z) = 0$], que requiere que $W(z)$

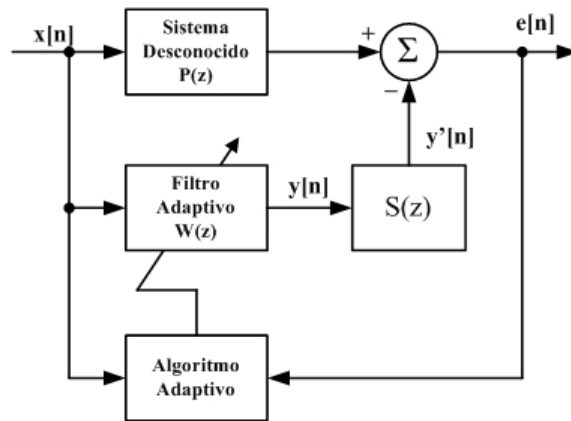


Figura 2.7: Diagrama de bloques simplificado de un sistema *CAR*.

llegue a la función de transferencia óptima:

$$W^o(z) = \frac{P(z)}{S(z)} \quad (2.10)$$

En otras palabras, el filtro adaptivo tiene que modelar $P(z)$ y realizar el modelado inverso de $S(z)$. Una vez conocida las respuestas de las funciones primarias y secundarias se puede calcular los coeficientes óptimos en el filtro adaptable. Debido a factores no previstos en las características del sistema acústico, no es práctico determinar el modelo de la trayectoria secundaria antes de poner en marcha el sistema. Esto es debido a que el filtro $W(z)$ nos provee con los medios necesarios para determinar el modelo del sistema desconocido $P(z)$ y la trayectoria secundaria $S(z)$, siempre y cuando se tenga una fuente de ruido que necesite ser minimizado. Una ventaja clara de esta técnica es que con el correcto modelado del sistema, el filtro puede responder instantáneamente a cambios en la señal de entrada provocados por cambios en la fuente de ruido.

Podemos concluir por consiguiente que el desempeño de un sistema de Control Activo del Ruido depende principalmente de la función de transferencia de la trayectoria secundaria

2.4. Control de Realimentación

Como vimos en la sección anterior los sistemas *Feedforward* de *CAR* utilizan un sensor de error que obtiene la señal residual de error, la cual se utiliza para actualizar los coeficientes del filtro adaptivo. Los sistemas *CAR* de *Feedback* (o control de realimentación) utilizan un solo sensor cuya salida es usada por sistema adaptivo para generar la señal secundaria. Un diagrama de un sistema *CAR* con control de realimentación se muestra en la figura 2.8

Esta técnica se puede considerar como un sistema a priori (feedforward) que sintetiza o regenera su propia señal de referencia, basándose solamente en la señal que recibe del único

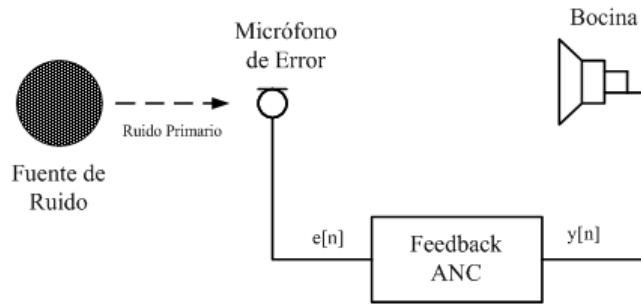


Figura 2.8: Sistema CAR con control de realimentación de un solo canal.

sensor de error y la salida del filtro adaptable[8]. Bajo ciertas condiciones, un sistema CAR con control de realimentación puede ser considerado como un predictor adaptable.

En la figura 2.9 se muestra un diagrama de bloques del sistema de la figura 2.8, donde $d[n]$ es el ruido primario en el sensor de error, $e[n]$ es el ruido residual censado por el micrófono de error, y la señal de control secundaria es denotada como $y[n]$. Como en el caso de CAR a priori, $W(z)$ es la función de transferencia del filtro adaptable y $S(z)$ la función de transferencia de la trayectoria secundaria.

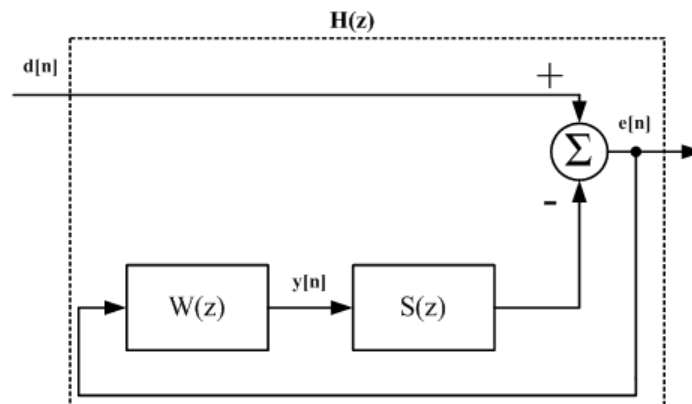


Figura 2.9: Diagrama de bloques del sistema CAR con control de realimentación de un solo canal.

En la aplicación de la figura 2.9, el ruido primario $d[n]$ no está disponible durante la operación de Control Activo del Ruido debido a que debe de ser cancelado por el ruido secundario. Por lo tanto, la idea básica de un esquema de realimentación aplicado a CAR es estimar el ruido primario y usarlo como señal de referencia $x[n]$ para el filtro adaptable $W(z)$. La transformada Z del ruido primario se puede expresar como:

$$D(z) = E(z) + S(z)Y(z) \quad (2.11)$$

Donde $E(z)$ es la señal obtenida por el sensor de error y $Y(z)$ es la señal secundaria

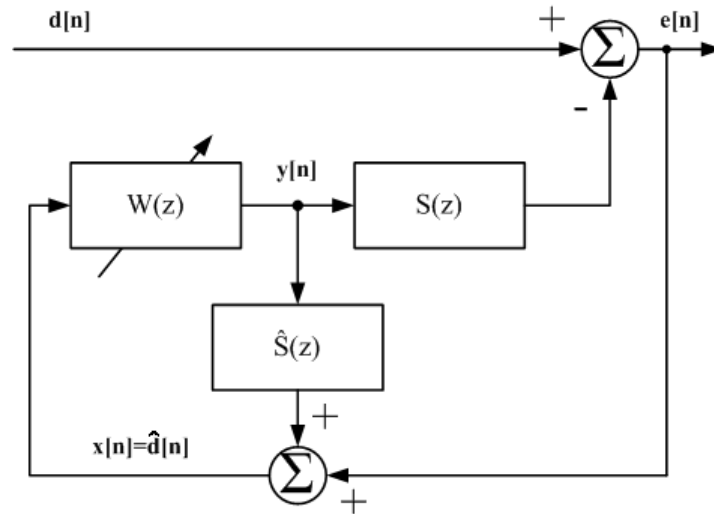


Figura 2.10: Feedback CAR usando la señal de referencia sintetizada de las señales disponibles ($y[n]$ y $e[n]$)

generada por el filtro adaptivo. De esta manera, tanto $E(z)$ como $Y(z)$ están disponibles para el proceso de adaptación. Si la función de transferencia de la trayectoria secundaria es medible y aproximada a $\hat{S}(z)$, de modo que $\hat{S}(z) \approx S(z)$, podemos estimar el ruido primario $d[n]$ y usar este como una señal sintética de referencia $x[n]$:

$$X(z) \equiv \hat{D}(z) = E(z) + \hat{S}(z)Y(z) \quad (2.12)$$

Esta técnica de síntesis (regeneración) de la señal de referencia se ilustra en la figura 2.10, donde la señal $y[n]$ es filtrada por el estimado de la trayectoria secundaria $\hat{S}(z)$ y después sumada a $e[n]$ para regenerar el ruido primario. Al mismo tiempo, se necesita compensar el canal secundario por medio de $\hat{S}(z)$. La señal de referencia $x[n]$ se genera como un estimado de $d[n]$, y se puede expresar como:

$$x[n] \equiv \hat{d}[n] = e[n] + \sum_{m=0}^{M-1} \hat{s}_m y[n-m] \quad (2.13)$$

Donde \hat{s}_m , con $m = 0, 1, \dots, M-1$ son los coeficientes del filtro $\hat{S}(z)$ de orden M , usado para estimar la trayectoria secundaria. La señal secundaria generada es:

$$y[n] = \sum_{l=0}^{L-1} w_l[n] x[n-l] \quad (2.14)$$

Donde w_l , con $l = 0, 1, \dots, L-1$ son los coeficientes de $W(z)$ en el tiempo n y L es el orden del filtro adaptivo. Estos coeficientes serán actualizados por el algoritmo adaptivo y

obtendremos la señal de referencia filtrada que la siguiente:

$$x'[n] \equiv \sum_{m=0}^{M-1} \hat{s}x[n-m] \quad (2.15)$$

2.4.1. Esquema de predicción adaptativa

De la ecuación (2.11) y (2.12) tenemos que $x[n] = \hat{d}[n]$ si $\hat{S}(z) = S(z)$. Cuando estas condiciones se satisfacen, el sistema CAR con control de realimentación (feedback) toma la forma de un sistema CAR con control a priori (feedforward), como se muestra en la figura 2.11. Si además asumimos que la trayectoria secundaria puede ser modelado como un simple retraso ($S(z) = z^{-\Delta}$), entonces el esquema mostrado en la figura 2.12 es idéntico a un esquema de predicción adaptativa.

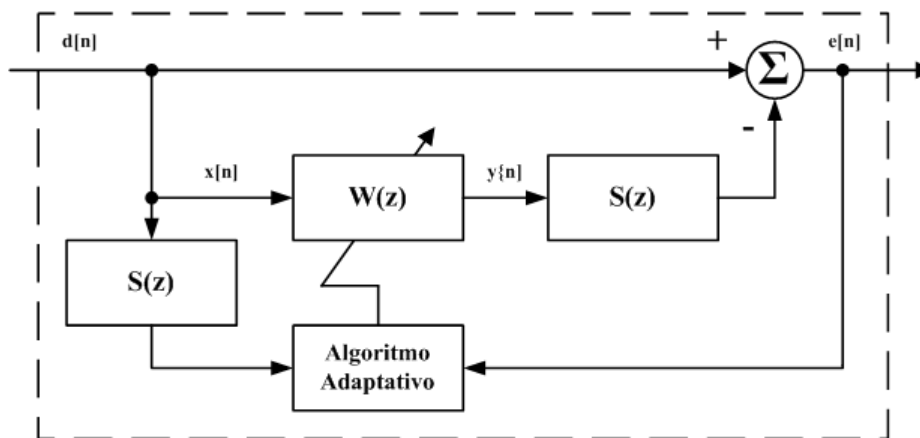


Figura 2.11: Feedback CAR toma la forma de un sistema CAR con control a priori (feedforward)

Aquí, la señal de referencia es $x[n] = d[n - \Delta]$, $y[n]$ es la señal primaria pronosticada y $e[n]$ es el error predictivo (o residual). La respuesta del sistema desde $d[n]$ a $e[n]$ se conoce como **Filtro de Predicción de Errores** (*prediction error filter*). El sistema adaptivo de control de realimentación usa la señal $x[n]$ sintetizada en la ecuación (2.13) y es equivalente a un predictor adaptivo asumiendo que la velocidad de convergencia del algoritmo adaptivo sea muy lenta y $S(z) = \hat{S}(z) = z^{-\Delta}$. El filtro adaptivo $W(z)$ del este tipo de sistema actúa como un predictor adaptivo del ruido primario $d[n]$ para minimizar el ruido residual $e[n]$, de modo que el desempeño de un sistema de control activo del ruido con control de realimentación depende en que tan predecible sea el ruido primario $d[n]$.

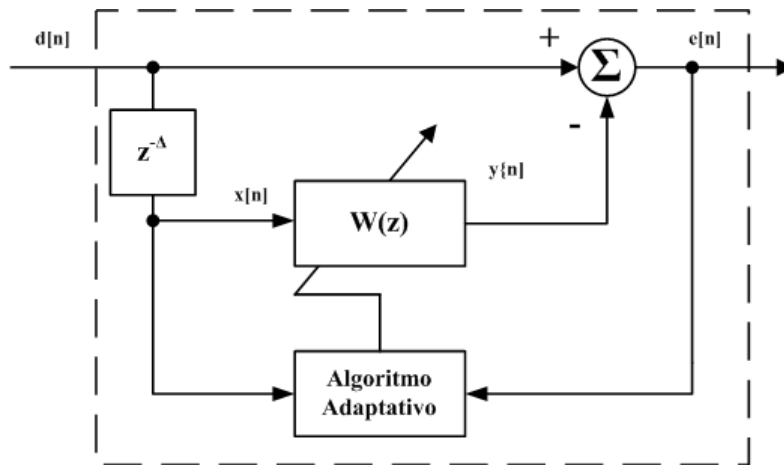


Figura 2.12: Diagrama de Bloques de un Predictor Adaptivo

2.5. Consideraciones Prácticas

El Control Activo del Ruido nunca proveerá una solución universal a **todos** los problemas de ruido[4]. Si bien el desempeño de los sistemas *CAR* pueden ser mejorados aumentando el número de sensores de error (microfonos) y salidas del sistema (bocinas); o incrementando la eficiencia de los algoritmos y del hardware para que sean mas rápidos y estables, existen limitaciones físicas fundamentales que limitan el desempeño y que no pueden ser superadas con mejoras en el procesamiento de la señal. La limitación más importante es que el Control Activo del Ruido está limitado a situaciones en las que la separación entre las fuentes primaria y secundaria es por lo menos del mismo orden que la longitud de onda acústica.

Cuando un sistema *CAR* es implementado en aplicaciones reales, surgen una gran cantidad de problemas que necesitan ser considerados. Es recomendable realizar un análisis de desempeño del sistema, el cual incluye una serie de técnicas; empezando con un problema simplificado e ideal y progresivamente se agregan restricciones prácticas y otras complejidades. Este análisis de desempeño resuelve los siguientes problemas:

1. Las limitaciones fundamentales de desempeño.
2. Las restricciones prácticas que limitan el desempeño.
3. Un balance de desempeño contra complejidad.
4. Como determinar un diseño de arquitectura práctico.

Por otro lado, si se desea usar el sistema *CAR* para uso industrial, se deben de garantizar ciertas propiedades:

1. Máxima eficiencia sobre la mayor banda de frecuencias posible para lograr cancelar una gran variedad de ruidos.

2. Autonomía con respecto a la instalación, de manera que sistema pueda ser construido y calibrado en un area diferente al sitio donde va a operar.
3. Adaptabilidad del sistema para poder operar correctamente al variar varios parámetros ambientales (temperatura)
4. Los componentes deben de ser lo suficientemente robustos y confiables, de manera que se simplifiquen los elementos electrónicos.