

TÉCNICAS AVANZADAS PARA HACER MEDICIONES DE BAJA SEÑAL CON CORRIENTE CONTINUA

4.1 Resumen

Se estudian las fuentes de error que interfieren en una medida de baja señal. Se trata la elección de instrumentación adecuada. Se ven distintas técnicas para medir en el rango de los nanovolts. Se estudian posibles perturbaciones de ambiente.

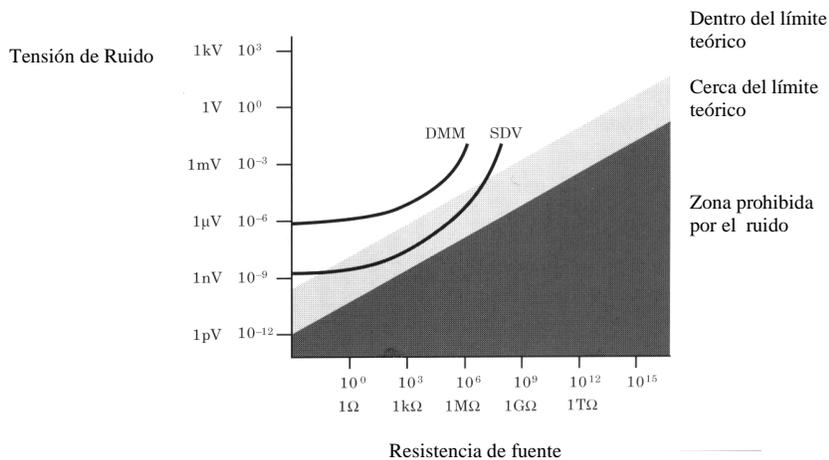
4.2 Introducción

Las tensiones de corriente continua se miden frecuentemente con multímetros digitales, los cuales han sido concebidos para medir adecuadamente tensiones mayores a 1 mV. Sin embargo, en algunos casos es necesario medir tensiones en rangos menores, como el de los μV o menos. Esto ocurre en aplicaciones como criogenia, superconductividad, propiedades térmicas de los materiales, verificación de componentes y estudios de las uniones Josephson. Puede decirse entonces, que para utilizar la instrumentación adecuada deben ser consideradas antes que nada las fuentes de error que interfieren en una medida de baja señal. Los errores más significativos pueden estar generados por fuentes de ruido¹ como ruido Johnson, fuentes electromotrices térmicas (*fems*), campos magnéticos, interferencia de radio frecuencia (*IRF*) y lazos de tierra. Es crucial el estudio de estas fuentes de ruido y de los métodos a utilizar para minimizarlos con el fin de que la medida de baja tensión sea confiable.

¹ Ver Apéndice A

4.3 Instrumentación adecuada

El límite teórico de sensibilidad en cualquier medida eléctrica está determinado por el ruido ideal generado por las resistencias del circuito. En la Figura 1 se representa el error generado por el ruido en función de la resistencia media conocido también como “el universo de las medidas de tensión”. El gráfico muestra tres zonas, una de ellas (gris oscuro) se llama prohibida; allí es donde el ruido hace que tengamos que descartar las técnicas que utilizan corriente continua para medir. Otra zona (gris claro) es la cercana a los límites teóricos, allí es conveniente la utilización de un *Sensitive Digital Voltmeter (SDV)*, o nanovoltímetro, y por último una zona donde la influencia del ruido se puede minimizar con un buen instrumento digital, conocido como DMM (vistos en el párrafo 3.5). Sin embargo el *SDV* es apto para medir mucho más cerca del límite teórico. Analicemos un caso práctico: en particular el Keithley 182 SDV es un nanovoltímetro capaz de medir con 15 nVpp de ruido debido a técnicas especiales de diseño. Está fabricado con circuitos de bajo ruido combinados con técnicas de reducción de ancho de banda. Actualmente se fabrica el modelo 2182 que llega a medir con 6 nVpp de ruido, pero el DMM 2001 en combinación con el nanopreamplificador 1801 llega a medir con 0.6 nVpp.



- Fig. 1 Multímetro Digital típico (DMM), y Voltímetro digital sensible SDV límites de medidas para varias resistencias de fuentes. -

Un nanovoltímetro está especialmente diseñado para medir en el rango de los nanovolts. Se caracteriza por tener muy bajo nivel de ruido y por ofrecer gran estabilidad en la medida. En un nanovoltímetro típico se pueden obtener niveles de ruido aceptables si se utiliza un período extendido de integración de 30 s o más y luego se filtra la respuesta. Cuando se utiliza de esta manera, el Keithley 2182 tiene un mejor desempeño que los DMMs. Este modelo ha sido diseñado para medir resistencias de muy bajo valor con bajo nivel de ruido y en unos pocos segundos utilizando el método de invertir la corriente. Con este diseño se logra un nanovoltímetro con muy bajo nivel de ruido pero minimizando el tiempo de integración, esto es: capaz de realizar medidas rápidas, más rápidas que las variaciones de las constantes térmicas de la muestra.

4.4 Tres técnicas para medir en el rango de los nanovolts

4.4.1 Utilizando nanovoltímetros de corriente continua

Con los nanovoltímetros y los DMMs se puede obtener un bajo nivel de ruido si se utiliza un largo tiempo de integración y se filtra la salida como para minimizar el ancho de banda en la zona cercana a la corriente continua. Esta técnica, desafortunadamente tiene el inconveniente de que las variaciones de las *fems* generadas en la muestra y en las distintas conexiones, no se pueden eliminar por más que se extienda el tiempo de integración.

Utilizando instrumentos como el Keithley, con una especificación de ruido de 6 Vpp (cuyo Modelo 2182 es el Nanovoltímetro Digital que menos ruido tiene, con la excepción del DMM Modelo 2001 en combinación con el Preamplificador Nanovoltímetro 1801 que llega a un orden menos 0.6 Vpp) se puede lograr la exactitud requerida.

4.4.2 Lock-in² o técnicas de CA

La limitación de tener que utilizar largos tiempos de integración y necesidad de la aplicación de filtros a las lecturas ha inducido a que mucha gente se haya inclinado por el uso de la técnica para medir con corriente alterna. En este caso ya no se utiliza un DMM sino un Lock-in con el que se aplica una excitación de corriente CA a la muestra

² Desarrollado en detalle en el Capítulo 5.

y se detecta la tensión generada a una fase óptima y en forma sincronizada con la frecuencia. La ventaja de esta técnica es su gran eficiencia para eliminar *fems*. Sin embargo es necesario tener en cuenta que al trabajar con alta frecuencia es posible que empiecen a ser importantes los corrimientos de fase que se podrían experimentar por el hecho de que se vuelvan significativas las capacidades o las inductancias parásitas que están distribuidas en todo el circuito, así como también las constantes de tiempo de las mismas. A baja frecuencia se minimiza este efecto, pero se incrementa el ruido del amplificador. Esta técnica se analizará en detalles en el próximo capítulo.

4.4.3 Método de la corriente inversa

En esta técnica³ para cada medida se invierte la corriente aplicada a la muestra. Para implementar este método se excita la muestra con la corriente continua en un sentido, se mide y registra la tensión; se invierte el sentido de la corriente para volver a excitar la muestra y medir la tensión con la otra polaridad y por último se hace la diferencia entre las tensiones halladas. Con esta diferencia se elimina el efecto de las *fems*, ya que estas últimas tienen una polaridad determinada para cada tipo de unión de metales y para cada temperatura. Esta conmutación de corriente se hace a una frecuencia de unos pocos hertz, pero lo suficientemente rápida como para que las *fems* térmicas no cambien. La determinación de la frecuencia de conmutación depende de las constantes de tiempo de los materiales en cuestión, puede variar desde unos cientos de milisegundos, a unos pocos segundos.

4.5 Ruido de Johnson

El ruido de Johnson siempre es el límite de la resolución en una medida eléctrica. Debe su nombre en honor a quién fue su descubridor cuando trabajaba en los laboratorios Bell en el año 1928. Los experimentos de Johnson junto con los esfuerzos del matemático H. Nyquist mostraron que un resistor metálico puede ser una fuente espontánea de fluctuación de tensión. Estas fluctuaciones de tensión son debidas a la agitación térmica que puede ser asociada con la resistencia del circuito. El ruido térmico es la tensión asociada con el movimiento de electrones dado su energía térmica a cualquier temperatura que esté sobre el cero absoluto. Como todas las fuentes de tensión

³ Estudiada en la sección 3.10 del Capítulo 3.

tienen resistencia interna, todas las fuentes generan ruido Johnson.

La Figura 2 muestra la tensión de ruido térmico como función de la resistencia y del ancho de banda a una temperatura de 290 K. Esta tensión está relacionada a la temperatura, ancho de banda del ruido y a la resistencia generadora. Nyquist demostró que la tensión de ruido desarrollada por una resistencia metálica puede ser calculada de la siguiente ecuación.

$$V = \sqrt{4kTBR}$$

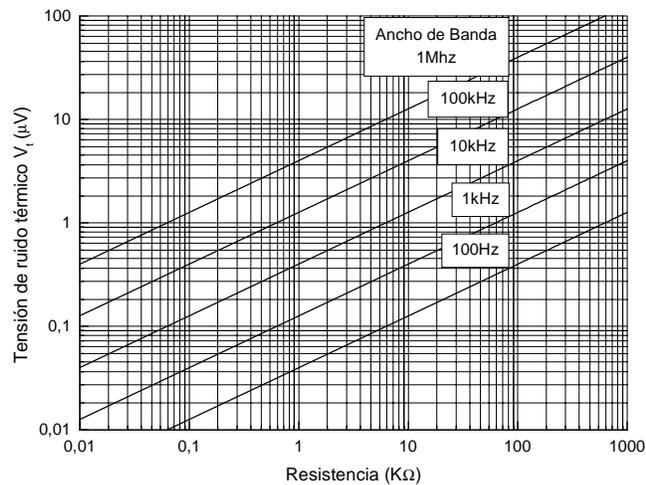
Donde V (rms) es la tensión de ruido desarrollada en la fuente.

k = 1.38×10^{-23} joule/K es la constante de Boltzman

T es la temperatura absoluta de la fuente en Kelvin.

B es el ancho de banda del ruido en hertz.

R es la resistencia de la fuente en ohms.



- Fig. 2 Tensión de ruido térmico en función de la resistencia y el ancho de banda. -

Por ejemplo, a temperatura ambiente (293 K) con una resistencia de 10 kΩ, y con un ancho de banda de 5 kHz tendremos un ruido de al menos 1 μV rms.

El ruido Johnson limita el valor de la medida, observando la ecuación podemos ver que la tensión de ruido puede ser reducida minimizando la resistencia, el ancho de banda o la temperatura de la fuente.

Como muestra la Figura 2 si se reduce la resistencia de la fuente de ruido decrecerá en consecuencia la tensión de ruido. Esto no presenta una solución práctica ya que la “resistencia de ruido”, la que es generadora de ruido en nuestro circuito, está fijada por otras condiciones. Cuando se hace una medida de tensión, el voltímetro se conecta en paralelo con la tensión de la fuente de ruido. Como la impedancia de entrada del voltímetro es usualmente mucho mayor que la resistencia de la fuente, el valor de la resistencia a medir es usualmente el que determina el ruido Johnson.

Entonces una forma más práctica y posible de reducir el ruido Johnson es bajando la temperatura de la fuente. Enfriando la muestra desde temperatura ambiente alrededor de 293 K a la del nitrógeno líquido, 77 K, disminuye aproximadamente a la mitad el factor de ruido.

Otra manera de minimizar el ruido, quizás la más utilizada, es el método de reducir el ancho de banda de la medida. El ancho de banda puede ser reducido promediando el número de medidas ya sea con una computadora o con un instrumento que cuente con filtros digitales. Por ejemplo el nanoamperímetro 182 SDV de Keithley utiliza un filtro digital de 3 polos para promediar las medidas y un filtro analógico con una frecuencia de corte de 8 Hz. Se puede utilizar también un filtro pasabajos antes del elemento de lectura para reducir aún más el ancho de banda.

Decrementar el ancho de banda de una medida es equivalente a incrementar la respuesta en tiempo del instrumento. Sin embargo, si se incrementa la respuesta en tiempo, entonces las *fems* asociadas en el circuito empiezan a ser considerables y aumentan con el gradiente de temperatura.

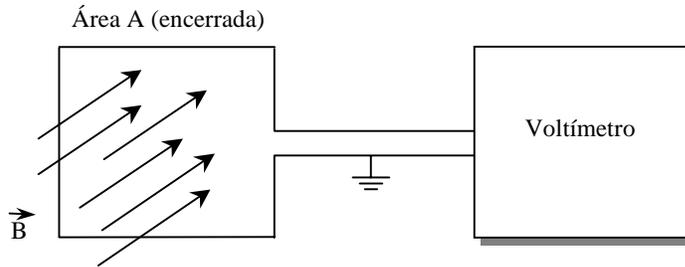
No es posible realizar medidas precisas si las constantes térmicas del circuito son del mismo orden que la respuesta temporal del instrumento. Si esto ocurre es imposible distinguir entre la señal y las fluctuaciones térmicas.

4.6 Campos magnéticos

Las fluctuaciones magnéticas también inducen tensiones espurias. Los cambios en los campos magnéticos son generados por corrientes locales CA o por el movimiento

de un conductor dentro de un campo magnético. Estas tensiones inducidas pueden causar errores significativos cuando se realizan medidas de baja señal.

La ley de Faraday muestra que una tensión desarrollada por un campo magnético es proporcional al área encerrada por el circuito, como se muestra en la Figura 3. También pueden alterar una medida campos magnéticos débiles como el de la tierra.



$$E_B = \int_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A}$$

- Fig. 3 Tensiones débiles generadas por campos magnéticos. -

E_B es la tensión que desarrolla un campo pasante a través del área de un circuito cerrado. El símbolo \int_A representa la integral sobre el área A encerrada por el circuito, \vec{B} es la intensidad de campo magnético y $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ es la variación de \vec{B} con respecto al tiempo.

Entonces el efecto de los campos CA puede ser minimizado reduciendo el área que encierra el circuito. El circuito de medida debe estar diseñado de tal forma que las puntas o electrodos, sigan siempre el mismo camino. Idealmente, los cables deberían estar en una misma vaina (juntos o atados). Una buena elección es utilizar una malla de tierra que sirva como pantalla, siendo los conductores pares trenzados de cobre porque tienen área pequeña y porque las señales inducidas se cancelan.

Puede ser necesario apantallar magnéticamente las puntas para reducir el ruido conocido como *pick-up*. Los mejores materiales son los que tienen alta permeabilidad dentro del escudo (o pantalla) y baja permeabilidad del lado exterior, para prevenir saturación magnética en el interior del escudo. Un material muy utilizado para apantallamientos magnéticos es el *mu-metal*.

Probablemente una de las soluciones más simples sea la de apartar la muestra del instrumental de medida buscando que la misma quede fuera del alcance de los posibles inductores de campos espurios como lo son los cables de alimentación de AC, los transformadores y los grandes inductores.

4.7 Interferencia de radio frecuencia

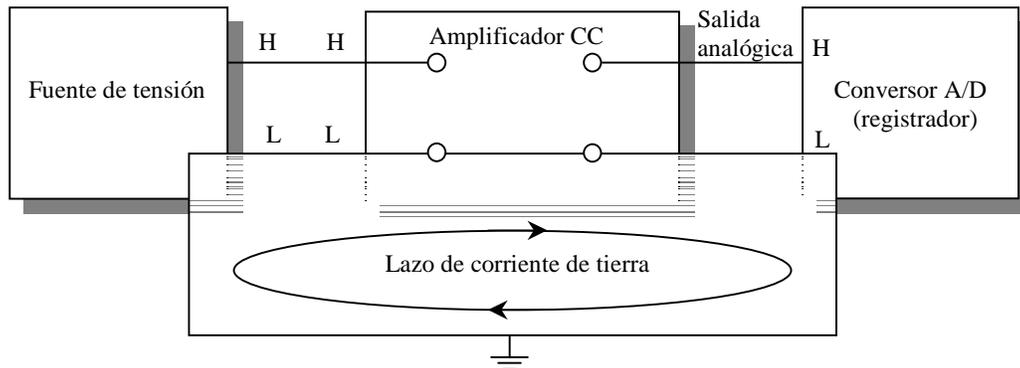
Otra contribución al ruido es la *IRF* (interferencia de radio frecuencia). Puede ser causada por fuentes fijas o estables de ruido como lo son las emisoras de radio o TV o por la cercanía de algún otro circuito electrónico, como por ejemplo una PC.

La manera más obvia de minimizar *IRF* es manteniendo una buena distancia entre el dispositivo de medida y la fuente de *IRF*. Apantallando el voltímetro y los electrodos de las puntas que llevan señal se reduce normalmente la *IRF* a un nivel aceptable.

El multímetro que utilizaremos para medir resistividad, el Keithley 2001 fue diseñado para minimizar los efectos de *IRF*. Además de su gabinete metálico, *chokes* y filtros digitales ayudan a reducir los efectos de interferencia indeseados. La baja conducción y emisión de *IRF* hacen posible utilizar este instrumento incluso con dispositivos tan sensibles como las uniones Josephson donde las señales de alta frecuencia pueden interferir con la operación adecuada del instrumento.

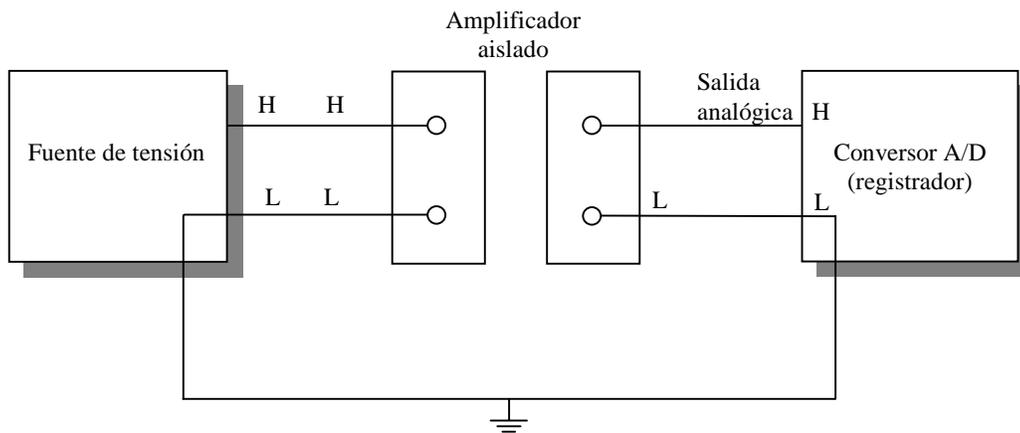
4.8 Lazos de tierra

Cuando se conectan varios instrumentos juntos, es necesario tomar precauciones especiales para evitar los ruidos y tensiones de error producidas por los lazos de tierra. Dichos lazos se forman cuando se conectan varios instrumentos juntos a una sola señal de retorno, como por ejemplo un solo cable a tierra. Una pequeña diferencia de potencial puede existir entre distintos puntos causando así un flujo de corriente como se muestra en la Figura 4. Este flujo de corriente circula desde las puntas del instrumento *LO* (del inglés low), pasando por los electrodos o puntas de señal y luego retorna a través de la línea de tierra. La corriente causa una pequeña, pero indeseable caída de tensión a través de la entrada *LO* de las puntas del instrumento. Esta tensión espuria estará en serie con la fuente de tensión; esto afectará invariablemente la exactitud de la medida.



- Fig. 4 Lazos de tierra generados por tener un solo retorno. -

Como se muestra en la Figura 5, el nanovoltímetro tiene el terminal de entrada *LO* aislado del de salida, un instrumento diseñado sin esa consideración causaría problemas con los lazos de tierra.



- Fig. 5 Amplificador aislado. -

Una forma de solucionar los lazos es tomar la tierra de un solo punto. Para ello todos los cables de alimentación de los instrumentos deben funcionar en modo flotante, esto es, aislados de tierra.

4.9 Conclusión

Cuando se realizan medidas de baja señal en CC deben utilizarse técnicas especiales. Después de determinar los límites de sensibilidad impuestos por la tensión desconocida a medir, le sigue en orden de importancia seleccionar el equipo adecuado para la medida y diseñar el circuito que no afecte ese límite de sensibilidad. Algunos fenómenos físicos como el ruido Johnson, potenciales termoeléctricos y campos magnéticos tienen efectos significativos en señales de bajo nivel. Estos mismos efectos podrían despreciarse en medidas con señales de mejor relación señal-ruido. Debe ser utilizado un solo punto de tierra y conexiones de baja resistencia de contacto. Es crucial minimizar los efectos de fuentes de ruido cuando se realizan medidas debajo de los μVolts .

