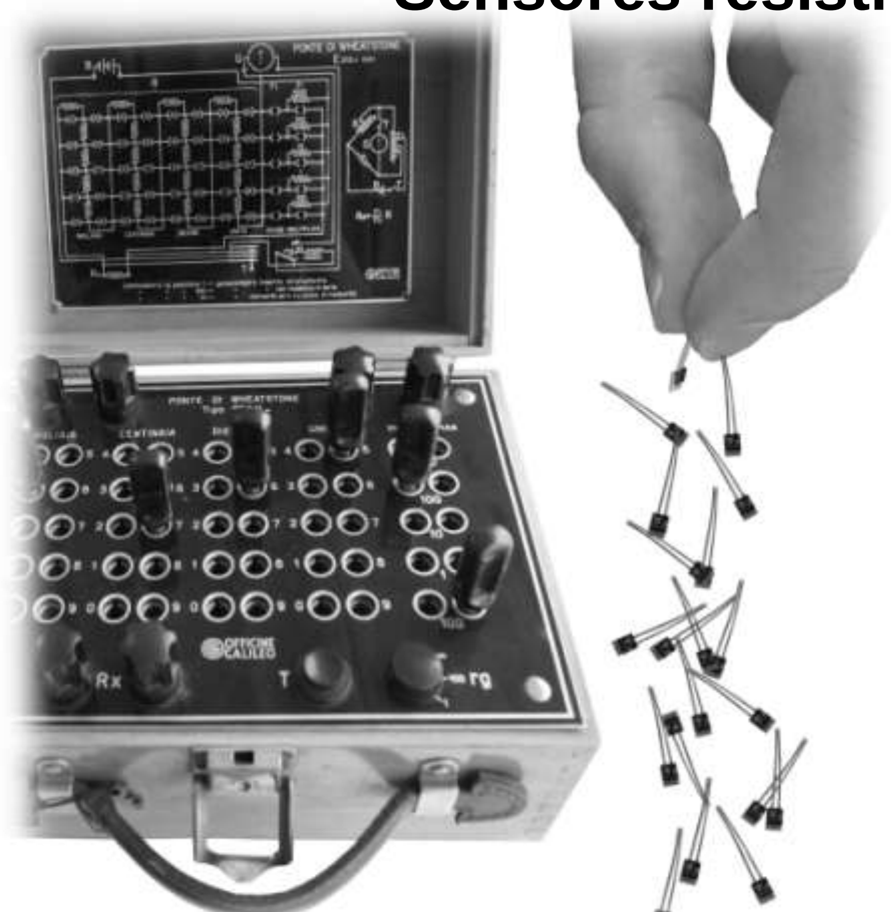
Tema 6

Sensores resistivos



Los sensores resistivos son los dispositivos sensibles más sencillos desde el punto de vista de su uso como componente de circuito: pueden trabajar con señales de continua y las relaciones a que dan lugar están basadas en expresiones sencillas y muy conocidas.

Un dispositivo resistivo se convierte en sensor de una determinada variable porque esa variable afecta al valor de la resistencia mediante algún mecanismo. Y hay muchas variables (temperatura, humedad, campo magnético, tensión, posición, etc.) que son susceptibles de afectar a la resistencia y, por tanto, habrá otros tantos sensores resistivos. En este tema se tratarán algunos de los más importantes sensores resistivos y, sobre todo los circuitos de acondicionamiento y las estrategias de medida que serán válidas no sólo para ellos sino para cualquier otro sensor resistivo presente o futuro

6.1 NOCIONES BÁSICAS DE MEDIDA DE RESISTENCIAS

La **Ley de Ohm** fue presentada por el físico alemán **George Simon Ohm** (1789-1854) en el año 1827 que la obtuvo de forma empírica.

Previamente, la idea fue intuida por Cavendish, pero la falta de instrumentos de medida de corriente impidió su formulación matemática (Cavendish se utilizaba a sí mismo como sensor de corriente). No obstante, la carencia de fundamento matemática de la propuesta de Ohm despertó un buen número de recelos entre los ortodoxos de la época e, incluso fue denostado por el correspondiente ministro de educación.

Pero el señor ministro se equivocaba y no sólo la Ley de Ohm es correcta sino que el principio subyacente se puede encontrar en otros aspectos de la Física.

Medir una resistencia es muy sencillo. Probablemente lo habremos hecho muchas veces; empleamos un polímetro, tocamos con las puntas de prueba en los extremos de las resistencias y, enseguida obtenemos un valor: 1,35 kΩ. ¡Perfecto! Aunque esta medida suele ser buena en líneas generales, lo cierto es que no siempre es así sino que puede darnos algún que otro disgusto en determinados casos. Para ello, vamos a ver cómo se obtiene el valor de la resistencia.

6.1.1. Medidas a dos hilos

La forma más sencilla de medir el valor de una resistencia es la que se conoce como **medida a dos hilos** (2W, 2-*wire*) y que no es más que una aplicación directa de la Ley de Ohm. La idea es que el dispositivo de medida usa una fuente de corriente para que circule una corriente I por la resistencia a medir, R_x y mide la tensión, V que cae en ella (Figura 6.1).

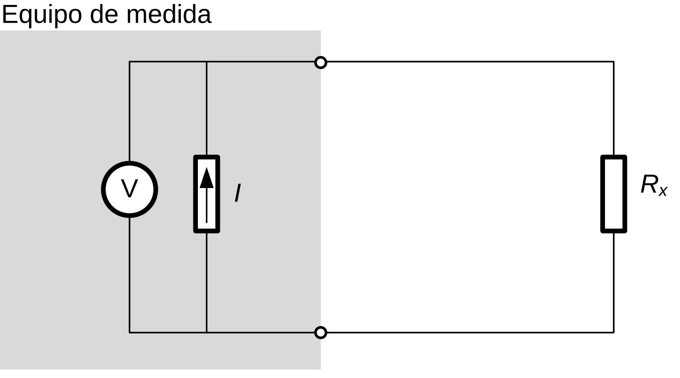


Figura 6.1. Medida a dos hilos: la resistencia a medir se excita con una fuente de corriente y se mide la tensión que cae en ella con un voltímetro.

Como quiera que:

$$V = I \cdot R_x$$

resulta elemental obtener el valor de la resistencia a medir.

Sin embargo, lo cierto es que una medida así no está exenta de errores puesto que hay que tener en cuenta que las puntas de prueba tienen una resistencia (pequeña, pero la tienen) que llamaremos R_w y que cuando tocamos los terminales de la resistencia, habrá una cierta resistencia en el contacto (pequeña, pero ahí está) que llamaremos R_c (Figura 6.2); además, esta última resistencia dependerá de la presión que hagamos y del estado superficial de las puntas de prueba.

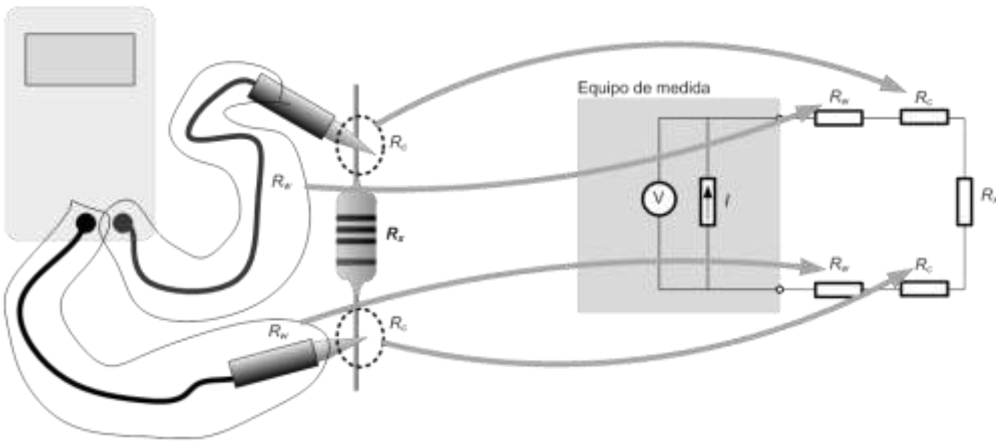


Figura 6.2. Resistencias parásitas en una medida a dos hilos debidas a la resistencia de los cables y de los contactos.

En realidad el valor que medimos es la suma de todas esas pequeñas resistencias y de la resistencia que queremos medir, es decir:

$$V = I \cdot (R_x + 2 \cdot R_w + 2 \cdot R_c)$$

Esto se traduce en un error en la medida: el valor obtenido para la resistencia a medir siempre será superior al valor que realmente tiene. El error absoluto sería de:

$$\varepsilon = 2 \cdot R_w + 2 \cdot R_c$$

Los valores de R_w y R_c no suelen ser muy altos (décimas de ohmio), pero la importancia de este error dependerá del valor de resistencia que tengamos. Con resistencias del orden de kilo ohmios unas décimas arriba supondrán poco error, pero si estamos midiendo una resistencia de *shunt* cuyo valor es muy bajo, el error puede ser inadmisible.

El error producido se debe a la forma en que estamos haciendo la medida, es decir, se trata de un error sistemático, un sesgo permanente que podríamos corregir en parte: si antes de hacer la medida procedemos a efectuar una lectura de cortocircuito uniendo entre sí los extremos de las dos puntas de prueba, podremos estimar cuánto vale la suma de $2 \cdot R_w$ y algo parecido a R_c (el contacto no será exactamente igual...) de tal manera que podemos restar esta medida de la anterior. En la primera medida:

$$V_1 = I \cdot (2 \cdot R_w + R_c)$$

En la segunda:

$$V_2 = I \cdot (R_x + 2 \cdot R_w + 2 \cdot R_c)$$

La diferencia:

$$V_2 - V_1 = I \cdot (R_x + R_c)$$

Y el error se deberá, aproximadamente, a la resistencia del contacto. Pero aun esto puede llegar a no ser suficiente para la precisión que podemos necesitar. En tal caso, hay que modificar el método de medida.

6.1.2. Medidas a cuatro hilos

La **medida de resistencia a cuatro hilos** (4W, 4-*wire*) consiste en utilizar cables diferentes para la excitación con la fuente de corriente y para la medida, de tal modo que las caídas de tensión producidas en contactos y en los propios cables no serán medidas por el dispositivo, tal como se muestra en la Figura 6.3.

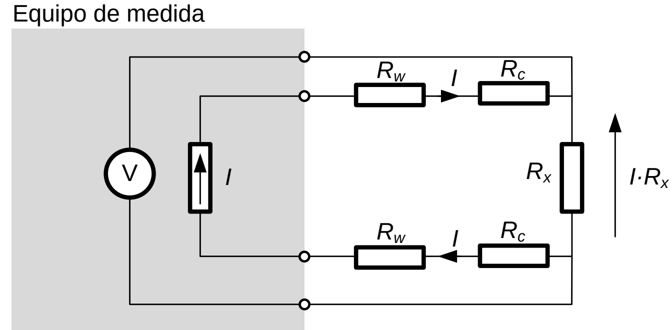


Figura 6.3. Medida a cuatro hilos: las caídas de tensión en las resistencias parásitas de los cables y en los contactos no afectan a la medida puesto que por los cables del voltímetro no circula corriente.

Como quiera que por los cables del dispositivo de medida de tensión no circula corriente por tener una impedancia de entrada muy elevada o la que circule puede considerarse despreciable a todos los efectos, el voltímetro recoge directamente el valor de la tensión caída en la propia resistencia objeto de la medida con lo que no se ve afectada ni por la resistencia de los cables ni por la de los contactos.

La técnica de medida de resistencias a cuatro hilos es habitual en casos en los que se deben medir resistencias de bajo valor o cuando es preciso conseguir precisiones muy elevadas. Algunos polímetros de alta gama disponen de este tipo de medida, pero es común en el caso de dispositivos previstos para medir resistencias muy bajas.

EJEMPLO 6.1

Un óhmetro que puede medir a 2 y 4 hilos dispone de varias escalas de medida y una pantalla con capacidad para cinco cifras significativas. En la escala de 00,000 a 99,999 Ω, indique cuántas cifras significativas son válidas asumiendo que los cables tienen una resistencia máxima de 0,3 Ω y se puede suponer que la peor resistencia del contacto es de 0,1 Ω. Proporcione también el error de medida.

Solución:

En el caso de medir a 2 hilos, el error absoluto que se produce en la medida será de 2·0,3 + 2·0,1 = 0,8 Ω. En estas condiciones, el sistema no puede garantizar los valores más allá de la segunda cifra significativa, es decir, que mediría entre 00 y 99 Ω.

El error de la medida será de 0,8 / 100 = 0,8%.

Si efectuamos la compensación de la resistencia de los cables (y de un contacto) mediante sustraer al valor medido el valor de cortocircuito, el error final del sistema sería sólo el que correspondería a un contacto, es decir, 0,1 Ω, que implica que se podría usar el dispositivo con tres cifras significativas, es decir, desde 00,0 hasta 99,9 Ω.

En este caso, el error de la medida sería de 0,1 / 100 = 0,1%.

Con los datos que da el enunciado no hay forma de conocer el error que se produce en la medida a cuatro hilos aunque, de ser ciertas todas las cifras significativas que promete, el error sería menor de 0,001 Ω, que correspondería a un 0,001%.

6.2 PUENTE DE WHEATSTONE

Las medidas a dos y cuatro hilos permiten obtener lecturas con alcances muy elevados, de hasta varios órdenes de magnitud. La técnica de cuatro hilos es de aplicación general a casos en los que se deba eliminar el efecto de los cables y de las conexiones, pero en muchos de los sensores resistivos el problema no está ahí sino en que la variable produce un efecto limitado sobre el valor de la resistencia, de modo que las variaciones que se obtienen para todo el campo de medida resultan pequeñas.

En este contexto, la mejor solución pasa por emplear circuitos de medida más sensibles a pequeñas variaciones y en casi todas las ocasiones se emplean **puentes de medida** (*measurement bridges*), circuitos que están en equilibrio y que producen cambios apreciables en cuanto cambia alguna de las resistencias que los componen. La aplicación a la medida de resistencias del primero de esos circuitos data de 1843 y es el conocido como **puente de Wheatstone** (*Wheatstone bridge*) en honor a Charles Wheatstone.

La estructura del puente de Wheatstone es la que se puede observar en la Figura 6.4 y está formado por cuatro resistencias, una de las cuales es la que se pretende medir, una fuente de tensión continua y un galvanómetro.

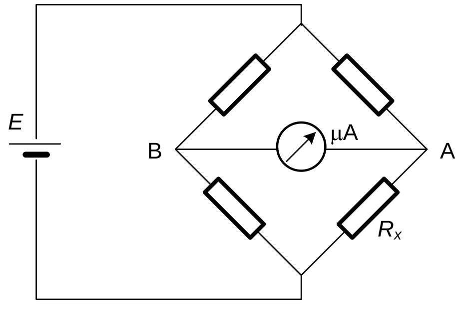


Figura 6.4. Puente de Wheatstone para conocer el valor de la resistencia R_x.

6.2.1 De la medida por compensación a la medida por deflexión

La primera forma de trabajar del puente de Wheatstone es la que se conoce como **medida por compensación** y consiste en garantizar que el puente está en equilibrio y que, por tanto, la rama de la izquierda y la de la derecha tienen resistencias iguales. En tal caso, la tensión en los puntos A y B es la misma y no circulará corriente por el galvanómetro.

El puente de Wheatstone de la Figura 6.5 tiene dos resistencias fijas (las superiores, *R1*), una resistencia variable, R y la resistencia a medir, R_x. Cuando $R = R_x$ el puente está en equilibrio por lo que si la variación de R se hace de una forma totalmente controlada y es posible conocer su valor, habremos encontrado el valor de R_x.

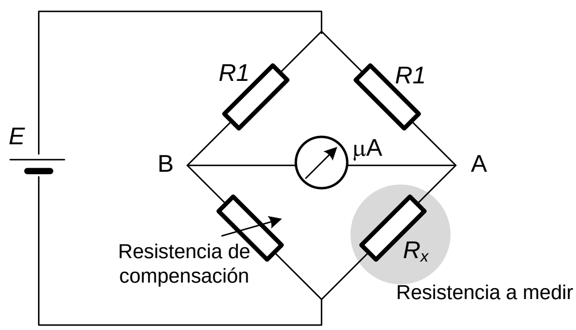


Figura 6.5. Puente de Wheatstone para medida por compensación. La resistencia variable (resistencia de compensación) permitirá equilibrar el puente; cuando se consiga, el valor de esta resistencia (conocido) será el mismo que el de la resistencia a medir.

Lógicamente el problema era disponer de resistencias R conocidas y con suficiente precisión, pero eso se resolvió mediante las **cajas de décadas**, un conjunto de grupos de resistencias de 10 valores por cada década que permitían conectarlas en serie para conseguir un valor final con gran precisión, o los potenciómetros calibrados que disponían de un dial sobre el que leer el valor buscado.

La medida de una resistencia se hacía en un proceso iterativo, subiendo y/o bajando R hasta conseguir la compensación o equilibrio del puente.

Podemos pensar que no era muy sencillo y que cada medida llevaba un tiempo, pero este método puede llegar a ser extraordinariamente preciso y, gracias a él se consiguieron importantes descubrimientos a lo largo de la segunda mitad del siglo XIX y principios del XX. Incluso se desarrolló un sistema de medida que compensaba parcialmente la resistencia de los cables en el caso de que la medida se tuviera que hacer a una distancia más o menos grande, era el método de medida a tres hilos.

Sin embargo, este tipo de medidas no resulta cómodo y queda al margen de lo que es la instrumentación actual que responde a otros esquemas y que trata de prescindir del factor humano en sus procedimientos. Pero el puente de Wheatstone puede utilizarse de otra forma: en lugar de mover la resistencia R hasta conseguir su compensación, se mantendrá fija y, en lugar de usar un galvanómetro para detectar cuando hay desequilibrio,

Existe una cierta controversia sobre quién es el padre del puente de Wheatstone, si el científico británico que le ha dado nombre (Charles Wheatstone, 1802-1875) o su colega, Samuel Hunter Christie (1784-1865).

La primera propuesta fue del segundo y así aparece en un artículo de 1833, pero la primera aplicación en la medida de resistencias y la correspondiente formulación matemática corresponden a Wheatstone, en 1843. No obstante, este nunca quiso robar el mérito de su colega sino que en su presentación citó el puente (el "diamante") como una invención de Christie.

Wheststone fue un científico muy activo que tiene muchas aportaciones más en terrenos diversos, desde la música hasta la espectroscopía pasando por la telegrafía, hasta el punto de que podría ser considerado coinventor del telégrafo junto con Cooke y Morse.

se empelará un voltímetro para cuantificar el desequilibrio (Figura 6.6). Esta medida se denomina medida por deflexión ya que la diferencia entre R y R_x es la causa de la tensión de salida, V_{AB}.

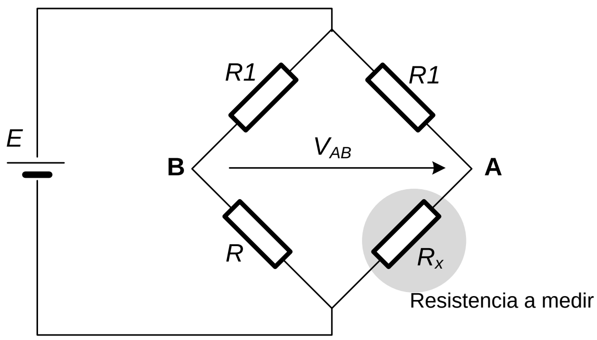


Figura 6.6. Medida por deflexión con el puente de Wheatstone. La tensión de salida V_{AB} es función del valor de la resistencia a medir.

De esta forma, es posible encontrar una relación matemática entre tal tensión y la diferencia de resistencias:

$$V_{AB} = f(R - R_x)$$

de la que se podría extraer el valor de R_x buscado.

El puente de Wheatstone puede ser alimentado tanto con una fuente de tensión como con una fuente de corriente, obteniendo expresiones similares, aunque con algunas ventajas de un caso respecto del otro. Seguidamente analizaremos estas dos formas de trabajo.

6.2.2 Puente de Wheatstone alimentado en tensión

Fue la primera forma de alimentar el puente de Wheatstone. En una medida típica por deflexión la tensión de salida de un puente de Wheatstone alimentado con una fuente de tensión E es:

$$V_{AB} = E \cdot \left(\frac{R_x}{R1 + R_x} - \frac{R}{R1 + R} \right)$$

Operando:

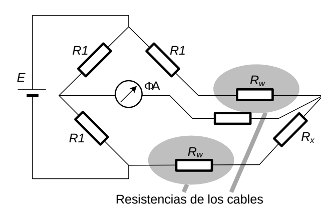
$$V_{AB} = E \cdot \frac{R1}{R1 + R} \cdot \frac{R_x - R}{R1 + R_x}$$

Esta expresión nos indica que cuando el puente de Wheatstone trabaja a deflexión, la tensión de salida crece con el valor de la resistencia a medir y se anula cuando el puente está en equilibrio ($R_x = R$). Como el objeto del puente es medir R_x y el resto de las resistencias forman parte de su diseño, podemos fijar R en el punto en el que queramos que el puente esté en equilibrio y dé tensión nula. Por ejemplo, si tuviésemos que medir valores entre 100 y 200 Ω podemos fijar R = 100 Ω y la tensión de salida iría desde 0 V hasta un valor positivo máximo cuando R_x = 200 Ω (Figura 6.7a); si, por el contrario, optásemos por elegir R = 150 Ω, la tensión de salida tendría una curva característica simétrica pues-

Medida a tres hilos

Cuando se están midiendo resistencias de bajo valor óhmico con un puente de Wheatstone por compensación, la presencia de resistencias parásitas correspondientes a los cables y las conexiones pueden alterar la mediad y proporcionar un excesivo error. Más aún, los cambios de temperatura afectan a la resistencia de los cables lo que se traduce en una incertidumbre muy elevada en la media.

Una forma de compensar parcialmente este problema consiste en emplear un puente modificado que incluye un tercer hilo de conexión sobre el que se mide la compensación del puente.



Los dos cables marcados deben ser iguales (material y longitud) para que los efectos se compensen mientras que la naturaleza del tercero es poco importante.

to que iría desde un valor negativo para R_x = 100 Ω hasta un valor similar positivo cuando R_x = 200 Ω (Figura 6.7b).

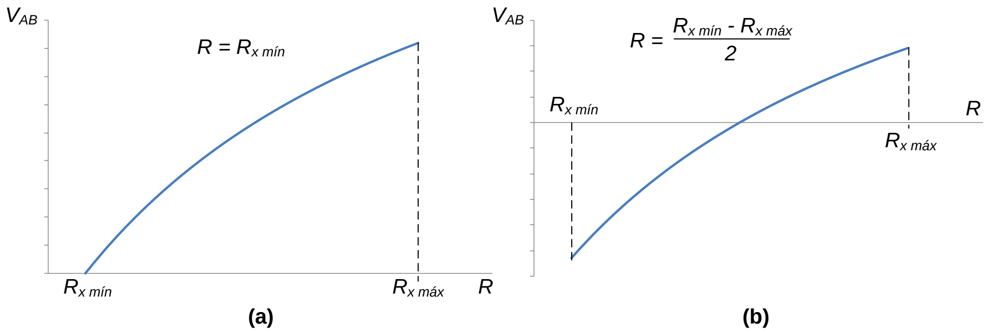


Figura 6.7. Tensión de salida de un puente de Wheatstone en función de la elección de *R*: (a) con *R* igual el valor más bajo del campo, la tensión de salida es siempre positiva; (b) con *R* igual al valor medio del campo de medida, la tensión de salida tiene zona positiva y negativa (en las gráficas se ha exagerado la no-linealidad).

El principal problema es que la expresión de la tensión de salida del puente resulta no lineal (R_x aparece también en el denominador) y su sensibilidad depende fundamentalmente de la tensión de alimentación, *E*, de *R* y de *R1*. No obstante, si se desea una buena linealidad, deberíamos hacer que la resistencia R_x fuese despreciable frente a *R1* para lo que esta debe ser mucho mayor que aquella; entonces, si consideramos $R1 >> R_x$, la expresión anterior se puede aproximar por:

$$V_{AB\,lin} \approx E \cdot \frac{R1}{R1+R} \cdot \frac{R_x - R}{R1} = E \cdot \frac{R_x - R}{R1+R}$$

Con esto la sensibilidad del puente crece con la tensión de alimentación y decrece con el valor de *R1*; esto último obliga a buscar una solución de compromiso entre conseguir que el puente sea más lineal (*R1* muy grande) y que tenga buena sensibilidad (*R1* pequeña). En cualquier caso, tanto error de linealidad como sensibilidad se pueden cuantificar y, de esa forma, el diseñador puede tomar las decisiones que estime oportunas.

Tanto la expresión lineal como la real indican que la tensión de salida depende de los parámetros de diseño *E*, *R* y *R1* con lo que habrá que tener mucha precaución con los valores de estos parámetros y con su tolerancia para evitar que el puente introduzca más errores en la medida. Conseguir fuentes estables de tensión es un problema que se resuelve fácilmente con el uso de circuitos integrados monolíticos específicos denominados **referencias de tensión** (*voltage references*) de las que existen muchos ejemplos en la mayoría de los fabricantes de dispositivos analógicos. En líneas generales, los errores relativos en la tensión de alimentación y en *R1* se suman para determinar el error total, mientras que el error absoluto de *R* se añade al error total. Pero el efecto de que las dos resistencias R1 sean diferentes entre sí en un valor $\Delta R1$ se traduce en que la tensión es:

$$V_{AB} = E \cdot \frac{R1}{R1+R} \cdot \frac{R_x - R - \Delta R1/R1}{R1 + \Delta R1 + R_x}$$

Como se puede observar, se produce un cambio de sensibilidad que puede no ser muy grande y un error de offset que sí que puede ser importante y que crece en la medida en que *R1* es mucho mayor que la resistencia a medir.

La sensibilidad es (suponiendo que *R1* >> *R*):

$$S = \frac{E}{R1}$$

y el error vendrá dado por la diferencia entre la expresión lineal y la real. Puesto en términos relativos a fondo de escala resulta ser (considerando el intervalo de salida entre 0 y el valor máximo de tensión):

$$\varepsilon = \frac{R_x}{R1}$$

En otras palabras, la resistencia *R1* afecta del mismo modo a la sensibilidad que al error luego, una vez más se hace cierto el axioma de la ingeniería de que "*toda ventaja se paga con un inconveniente*." Además, si se tiene en cuenta que la tolerancia de *R1* introduce un desplazamiento en la medida, si *R1* es mucho mayor que R_x podría darse el caso de que esa tolerancia fuese comparable a toda la variación posible de la resistencia a medir y obligaría a efectuar una calibración a un punto del puente antes de poderlo utilizar. Por ejemplo, si queremos medir resistencias del orden de cien ohmios y para bajar el error de linealidad elegimos que *R1* = 10K, habrá que cuidar su tolerancia porque una tolerancia del 1% nos lleva a que $\Delta R1$ = 100 Ω, lo que puede suponer un desplazamiento de la medida de hasta el 100%. Incluso una tolerancia del 0,1% podría introducir un offset del 10%...

Como conclusión adicional, el máximo error se produce para el valor más grande de R_x, es decir, en el fondo de escala. En la Figura 6.8 se representa el comportamiento del puente de Wheatstone desde el punto de vista de su curva de calibración, la linealización y el correspondiente error de linealidad.

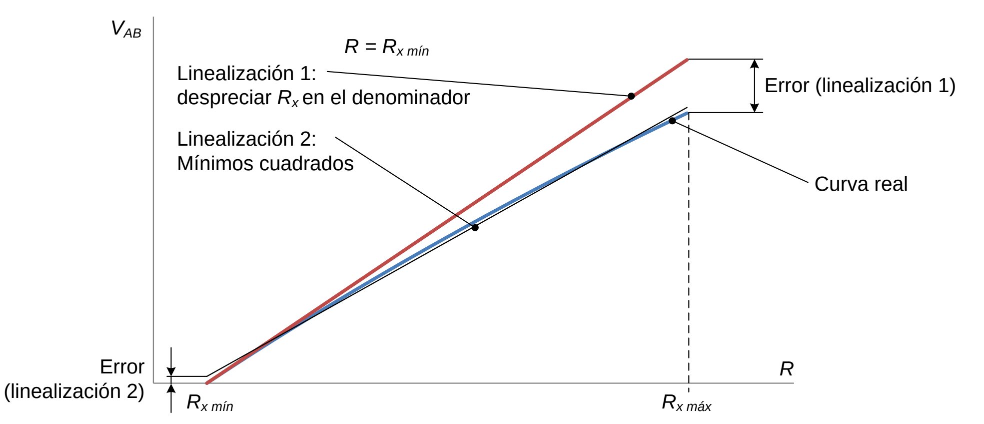


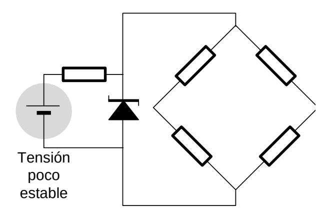
Figura 6.8. Error de linealización cuando se desprecia el término R_x en el denominador (muy grande) frente a la linealización más adecuada por mínimos cuadrados que proporciona un error pequeño.

Sin embargo, la linealización realizada al despreciar R_x frente a *R1* resulta muy sencilla desde el punto de vista matemático y es muy cómoda a la hora de realizar ejercicios académicos, pero no es la mejor opción para reducir el error de linealidad. Dado un determinado campo de medida para R_x, la mejor linealización es, por definición, la que se obtiene por mínimos cuadrados (Figura 6.8). En el siguiente ejemplo se puede

Referencias de tensión

Aunque ya se ha hablado de las referencias estables de tensión en el Tema 5, donde proporcionan los extremos de conversión estables para los convertidores A/D, su uso en la alimentación de los puentes de medida en continua es básico para garantizar que la salida sólo depende de la variable a medir y no de las variaciones de excitación del puente (recordemos que *E* forma parte de todas las expresiones de tensión de salida de los puentes).

En muchos casos, cuando la corriente a suministrar es pequeña, puede no ser necesario más que la propia referencia estable, tal como se presenta en la figura siguiente donde la referencia estable aparece con el símbolo de un zener aunque ni lo es ni se le parece:



En caso de precisar más corriente se puede usar un operacional adicional con un montaje de seguidor de tensión.