CAPITULO IV

MEDICION DE RESISTENCIAS DE BAJO VALOR MEDIANTE EL DOBLE PUENTE DE KELVIN

1. Introducción:

La medida exacta de resistencias de menores a 1 Ω presenta varios problemas que no aparecen con altas resistencias. Una de las dificultades la causan los contactos entre las resistencias y sus cables de conexión. La resistencia de los contactos puede ser del orden 10^{-4} Ω, que puede despreciarse frente a una resistencia de 100 Ω, pero que constituye una fracción significativa de una resistencia muy baja. Por ejemplo, no es tolerable en un shunt de 50 A – 50 mV que tiene una resistencia aproximada de 10^{-3} Ω. Por otra parte , la resistencia de los contactos es una magnitud muy variable y depende de factores tales como la presión mecánica y del estado de las superficies en contacto. Otra dificultad la constituye la resistencia propia de los cables de conexión que no puede despreciarse cuando se opera con resistencias bajas.

Para analizar los problemas planteados se considerará el circuito de la figura Nº 23 donde R_P y R_X son dos resistencias de bajo valor cuyos bornes se destacan mediante dos circunferencias, y R_C un conductor de resistencia muy pequeña, que normalmente se denomina cortocircuito, que une las resistencias a medir. Se comprende que siendo R_C comparable con R_P y R_X el resultado de la medición dependerá del punto al cual se conecta el galvanómetro, indicándose con líneas de trazo dos puntos posibles de conexión. Así, si el galvanómetro se conecta al punto M, el valor computado de la incógnita es mayor que el verdadero valor de R_X, mientras que si el galvanómetro se conecta al borne N se mide un valor de la incógnita menor que el correcto, pues:

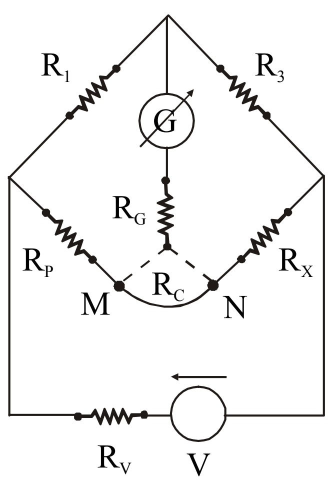


Fig. Nº 23

$$R_x = \frac{R_3}{R_1} \cdot \left(R_p + R_c\right) = \frac{R_3}{R_1} \cdot R_p + \frac{R_3}{R_1} \cdot R_c \qquad (50)$$

mientras que el puente sólo indica el término $(R_3 / R_1) \cdot R_P$ determinado por sus resistencias calibradas. En la expresión (50) se observa que el error es importante cuando R_C es comparable con R_P.

Podría eliminarse el error debido a la resistencia del conductor de conexión R conectando el galvanómetro a un punto intermedio de dicho conductor, como se muestra en la figura Nº 24, y ubicado de tal manera que se verifique la relación:

$$R_1 \cdot R_{C4} = R_3 \cdot R_{C2} \qquad (51)$$

pues en ese caso la ecuación de equilibrio del puente se escribe:

$$R_1 \cdot \left(R_X + R_{C4}\right) = R_3 \cdot \left(R_P + R_{C2}\right)$$

y por la expresión (51):

$$R_X = \frac{R_3}{R_1} \cdot R_P \qquad (52)$$

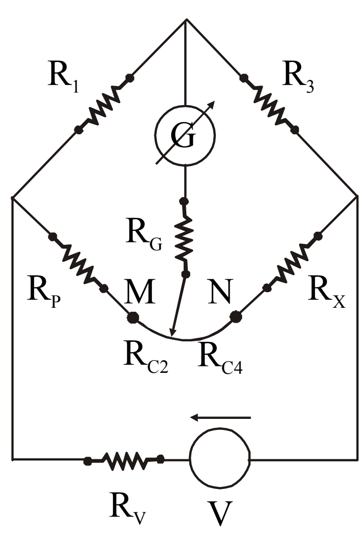


Fig. Nº 24

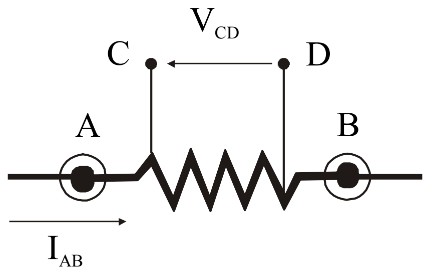
Nótese que la expresión (51) no es más que la ecuación de equilibrio de un puente de Wheatstone constituido por las resistencias R_1, R_{C2}, R_{C4} y R_3 en el orden que aparecen en la figura Nº 24.

Se comprende que el proceso de buscar el punto correcto de conexión del galvanómetro sobre una barra que pretende ser un cortocircuito no es práctico y el método debe desecharse.

La presencia de los inconvenientes arriba mencionados conduce a la conclusión que es imposible definir un patrón concreto de resistencia de bajo valor mediante elementos de dos terminales, por lo que lleva al desarrollo de resistencias de cuatro terminales.

2. Resistencias de cuatro terminales:

Este tipo de construcción, mostrada esquemáticamente en la figura Nº 25, se usa para dispositivos tales como resistencias derivadoras, shunts, para amperímetros y resistencias patrones de bajo valor. Los terminales exteriores, A y B, son los bornes de corriente, mientras que la tensión se mide entre los terminales interiores, C y D. La resistencia se define como el cociente:



$$R = \frac{V_{CD}}{I_{AB}} \qquad (53)$$

Fig. Nº 25

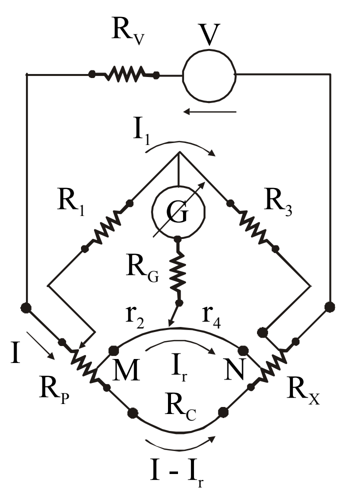
donde I_{AB} es la intensidad de corriente que atraviesa a la resistencia por los bornes de corriente, se debe imaginar un generador de corriente constante conectado a los bornes AB, y V_{CD} la tensión, a circuito abierto, que se mide entre los terminales de tensión.

La resistencia así definida no incluye la resistencia de los conductores de conexión del circuito de corriente y no es afectada por las resistencias de contacto en los bornes AB. Además, en las aplicaciones prácticas, la resistencia del circuito conectado a los terminales de tensión es relativamente alta y no toma corriente apreciable, por lo tanto el efecto de las resistencias de contacto en los bornes de tensión es despreciable, lo mismo que las resistencias de los conductores de conexión.

3. Medición de resistencias de cuatro terminales:

Se entiende que, en general, pueden aplicarse muchas de las técnicas usadas para la medición de resistencias de valores medios:

a) Métodos de deflexión midiendo tensión y corriente.
b) Métodos de comparación conectando dos resistencias en serie, una patrón y otro desconocida, y midiendo las tensiones entre los terminales correspondientes ya sea con un voltímetro o con un potenciómetro.



También es posible utilizar métodos de cero de comparación mediante el uso de puentes. Sin embargo, si se pretende utilizar un esquema similar al puente de Wheatstone, se encuentra que subsisten dificultades análogas a las señaladas anteriormente. En efecto, si se analiza el esquema de la figura Nº 26 en este caso las ramas de relación del puente, R_1 y R_3, de alta resistencia son fijas, R_P es una resistencia patrón de cuatro terminales ajustable y R_X es la resistencia incógnita de cuatro terminales.

Fig. Nº 26

Prácticamente toda la intensidad de corriente de la fuente, que es generalmente del orden de varios amperes para tener una sensibilidad adecuada, pasa a través de R_P y R_X, por lo tanto la conexión R_C debe ser capaz de transportar corrientes elevadas.

Si bien las resistencias de contacto y de los conductores de los terminales de corriente no entran directamente en las ramas del puente, el problema reside en determinar a que punto de la conexión entre R_P y R_X se unirá el galvanómetro. La conexión entre los terminales de tensión M y N, no considerada como un cortocircuito, punto equipotencial, contribuye con resistencias de conductores y contactos que entran en las ramas del puente.

Sea $r = r_2 + r_4$ la resistencia total del cortocircuito que une los bornes de tensión de R_P y R_X y suponiendo que la conexión del galvanómetro puede desplazarse a lo largo de r.

La condición de balance del puente se obtendrá imponiendo $I_G = 0$ lo que implica tensión nula a través de R_G. En el equilibrio las intensidades de corrientes que atraviesan R_1 y R_3 son iguales, llamando I_1 a esa intensidad de corriente se puede escribir:

$$I_1 \cdot R_3 = I \cdot R_X + I_r \cdot r_4$$

donde I es la intensidad de corriente a través de R_X e I_r la que atraviesa r, figura Nº 26.

Similarmente para la otra malla:

$$I_1 \cdot R_1 = I \cdot R_P + I_r \cdot r_2$$

La relación entre estas dos ecuaciones resulta:

$$\frac{R_3}{R_1} = \frac{I \cdot R_X + I_r \cdot r_4}{I \cdot R_P + I_r \cdot r_2}$$

Resolviendo para R_X:

$$I \cdot R_X + I_r \cdot r_4 = \frac{R_3}{R_1} \cdot \left(I \cdot R_P + I_r \cdot r_2\right)$$

$$R_X = \frac{R_3}{R_1} \cdot R_P + \frac{I_r \cdot r_2}{I} \cdot \left(\frac{R_3}{R_1} - \frac{r_4}{r_2}\right) \quad (54)$$

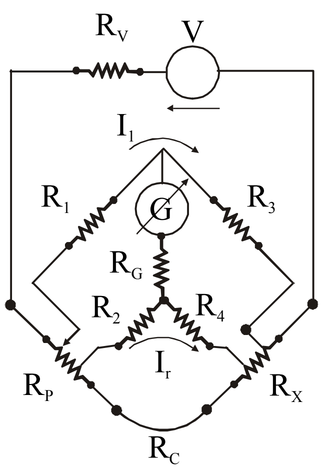
Pese a que r_2 y r_4 son pequeñas y R_1 y R_3 son grandes la diferencia entre sus relaciones no necesariamente es despreciable frente a $\frac{R_3 \cdot R_P}{R_1}$ debido a que R_P es muy pequeña. Además no hay ninguna seguridad que $\frac{I_r \cdot r_2}{I}$ sea pequeño. De este modo se observa que no puede determinarse un valor exacto de R_X conociendo solamente R_1, R_3 y R_P. Sin embargo la expresión (54) da la pista para la obtención de mediciones exactas: la idea es hacer $\frac{r_4}{r_2} = \frac{R_3}{R_1}$ y en ese caso R_X se determinará exactamente por una ecuación similar a la del puente de Wheatstone:

$$R_x = \frac{R_3 \cdot R_p}{R_1}$$

Pero esto no puede conseguirse con la disposición de la figura Nº 26 pues r_2 y r_4 no se conocen ni tampoco su relación r_4 / r_2. Esto conduce al doble puente de Kelvin.

4. Doble puente de Kelvin o Thomson:

El doble puente de Kelvin es una modificación del puente de Wheatstone que reduce el segundo término de la expresión (54) a cero. Para ello el *cortocircuito* que une los bornes M y N se reemplaza por dos resistencias R_2 y R_4 de valores conocidos y grandes frente a r y el galvanómetro se conecta a la unión entre dos resistencias como se muestra en la figura Nº 27. Observando los esquemas de las figuras Nº 26 y 27 se llega a la conclusión de que al análisis de la sección precedente se aplica al puente de Kelvin balanceado reemplazando r_2 y r_4 por R_2 y R_4. Además la intensidad de corriente I_r es ahora mucho menor que antes y está dada por:



$$I_r = \frac{R_C}{R_2 + R_4 + R_C} \cdot I$$

Reemplazando en la expresión (54), que por lo dicho es la ecuación de balance del puente de Kelvin, se obtiene finalmente:

$$R_x = \frac{R_3}{R_1} \cdot R_p + \frac{R_c \cdot R_2}{R_2 + R_4 + R_c} \cdot \left(\frac{R_3}{R_1} - \frac{R_4}{R_2}\right) \quad (55)$$

Fig. Nº 27

Debe remarcarse dos consideraciones importantes:

a) El segundo término de la expresión (55) está bajo control y puede eliminarse, en principio, seleccionando $R_3 / R_1 = R_4 / R_2$.

b) Si esta identidad de relaciones no se satisface exactamente el factor de multiplicación $\frac{R_c \cdot R_2}{R_2 + R_4 + R_c}$ puede hacerse muy pequeño manteniendo R_C pequeño y $R_2 + R_4$ grande, entonces R_X está dada, muy aproximadamente, por la expresión simple del puente de Wheatstone:

$$R_x = \frac{R_3}{R_1} \cdot R_p \quad (56)$$

El término *doble puente* deriva de la existencia de esencialmente dos puentes en el circuito de la figura Nº 27. Uno de ellos ya ha sido analizado. El otro puede examinarse abriendo la conexión R_C. Esto reduce la intensidad de corriente a través de R_X muy marcadamente debido a que $R_2 + R_4$ es varios órdenes de magnitud mayor que $R_X + R_P$. Al interrumpir bruscamente una intensidad de corriente de 10 A o más pueden producirse f.e.m. de autoinducción importantes, por lo cual es buena práctica reducir la intensidad de corriente aumentando R_V antes de abrir R_C. Cuando R_C está abierta la condición de balance está dada simplemente por el producto de las ramas opuestas del puente, debido a que se esta en presencia de la conocida configuración del puente de Wheatstone:

$$R_3 \cdot \left(R_2 + R_p\right) = R_1 \cdot \left(R_4 + R_X\right) \qquad (57)$$

En la práctica $R_2 >> R_P$ y $R_4 >> R_X$ por lo que esta ecuación de equilibrio se reduce a $R_3 \cdot R_2 = R_1 \cdot R_4$, lo cual implica que $R_3 / R_1 = R_4 / R_2$. Este es el mismo requerimiento para que la expresión (56) R_X está dada sólo en términos de R_1, R_3 y R_P. Es interesante notar que si R_P y R_X no son despreciables la expresión (57) resuelta en R_X será:

$$R_x + R_4 = \frac{R_3}{R_1} \cdot R_p + \frac{R_3}{R_1} \cdot R_2 \qquad R_x = \frac{R_3}{R_1} \cdot R_p + R_2 \cdot \left(\frac{R_3}{R_1} - \frac{R_4}{R_2}\right) \qquad (58)$$

En consecuencia si $R_3 / R_1 = R_4 / R_2$, R_X está dada por la misma expresión esté R_C abierto o cerrado. Las expresiones (56) y (58) indican que si el puente esta balanceado con R_C abierto o cerrado se tiene una comprobación directamente experimental que se verifica la relación $R_3 / R_1 = R_4 / R_2$. Este hecho provee una manera rápida de comprobar la doble relación de resistencias. Si no se verifican los dos balances, uno de ellos debe realizarse con R_C abierto ajustando, por ejemplo, R_2 para luego con R_C conectado realizar el segundo balance variando R_P. Algunos modelos comerciales traen una clavija que permite eliminar o conectar R_C para realizar rápidamente los dos balances y la compensación total se logra después de varios ajustes. En otros modelos las resistencias están acopladas mecánicamente de manera de satisfacer automáticamente la relación $R_3 / R_1 = R_4 / R_2$, y en esos casos se requiere una única operación de balance. En cualquier caso es deseable disponer de un conductor de resistencia R_C tan pequeña como sea posible para asegurar que el segundo término de la expresión (55) sea despreciable. Por ello, cuando se usa una resistencia R_P ajustable, el contacto deslizante se coloca en la porción que va en serie con la fuente de alimentación para no contribuir a la resistencia R_C.