

UNIDAD 4: MEDICIÓN DE RESISTENCIAS POR MÉTODOS DE CERO: PUENTES DE WHEATSTONE Y KELVIN

- *Puente de Wheatstone. Ecuación de equilibrio. Sensibilidad del puente. Exactitud del puente. Alcance de un puente de Wheatstone.*
- *Puentes de Wheatstone no balanceados. Aplicaciones de los puentes de CC.*
- *Puente doble de Thompson.*
- *Medición de resistencia de puesta a tierra.*
- *Cuestionario y problemas.*

Al completar esta unidad, Ud. será capaz de hacer lo siguiente:

- Describir el funcionamiento de los puentes de Wheatstone y Kelvin.
- Utilizar un puente de CC para la medición de resistencia.
- Describir el método del puente no balanceado para la medición de magnitudes no eléctricas.
- Indicar cuales son los aspectos mas importantes que influyen en la sensibilidad y la exactitud de los puentes de CC.
- Elegir el método apropiado de acuerdo al orden de la resistencia a medir.

Puente de Wheatstone

El puente de Wheatstone es un cuadripolo compuesto por cuatro resistores **R**, **A**, **B** y **S** (Figura 4-1) de las cuales una es desconocida y cuyo valor se tiene que determinar. Además de las cuatro resistencias, las partes integrantes son: un galvanómetro **G** y una fuente de alimentación **E**. El circuito comprendido entre los puntos **a** y **b** se denomina "circuito de alimentación" y el circuito entre los puntos **c** y **d** "circuito de indicación". Los cuatro puntos de unión (**a**, **b**, **c**, y **d**) son los nudos de la malla.

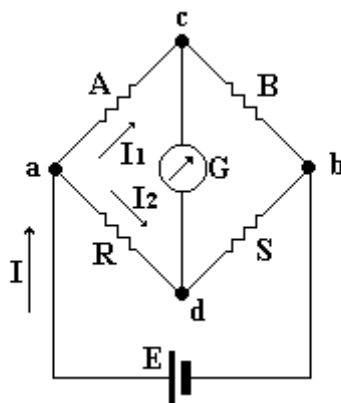


Figura 4-1

Ecuación de equilibrio

El estado de equilibrio se consigue cuando no circula corriente entre los puntos **c** y **d** lo cual se detecta mediante el galvanómetro. Esto sucede cuando la diferencia de potencial entre los nudos **c** y **d** es nula, lo que se da cuando se igualan las respectivas caídas de tensión en cada rama del puente.

$$V_{ac} = V_{ad} \quad \text{y} \quad V_{cb} = V_{db}$$

En el nudo **a** las intensidades de corrientes se distribuyen según la 1ª ley de Kirchhoff (**I = I1 + I2**), y en consecuencia tenemos:

$$V_{ac} = I_1 A ; V_{ad} = I_2 R \quad \text{y} \quad V_{cb} = I_1 B ; V_{db} = I_2 S$$

Substituyendo estas relaciones en las ecuaciones anteriores y operando se obtiene la condición de equilibrio del puente, que pueden ser expresadas de tres formas:

$$\frac{R}{A} = \frac{S}{B} \quad ; \quad \frac{R}{S} = \frac{A}{B} \quad ; \quad R \cdot B = A \cdot S$$

De esta condición de equilibrio se deduce la propiedad de intercambio de diagonales del puente, es decir que si se intercambia de lugar la fuente con el indicador, no se alterara la condición de equilibrio; la ubicación de las respectivas diagonales no interviene en el resultado de la medición en puentes cuadripolares equilibrados. La condición de equilibrio permite determinar el valor de la resistencia medida.

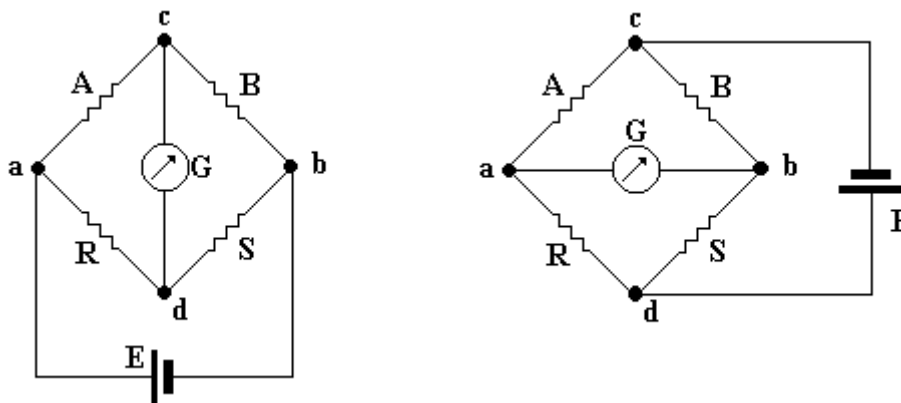


Figura 4-2

Suponiendo por ejemplo que la resistencia desconocida es **R**, se obtiene:

$$R = S \cdot \frac{A}{B}$$

A los brazos **A** y **B** se los denomina brazos de relación y al brazo **S** brazo de comparación. Por lo tanto para la determinación de **R** basta solo conocer la relación **A/B**, y el valor de **S**. El valor de **R** es, por otra parte, independiente de la tensión aplicada al

punto, de la resistencia interna de la fuente y de las características y resistencia del galvanómetro, si bien todos estos factores influyen en la sensibilidad del método como luego se verá.

Al considerar el cuadripolo del puente se aprecian dos valores de la resistencia resultante del mismo. Una es la resistencia **R_{ab}** del circuito de alimentación medida entre los nudos **a** y **b** y la otra es la resistencia **R_{cd}** medida entre los nudos **c** y **d**. Podemos considerar la primera como resistencia de entrada y la segunda como resistencia de salida del cuadripolo. El valor de la resistencia de salida, o sea la resistencia del cuadripolo vista del lado del galvanómetro, tiene gran importancia para la selección del mismo. En el estado de equilibrio, o sea cuando se cumple la condición **R B = A S** y considerando que la resistencia interna de la fuente de alimentación es despreciable, la resistencia de salida se expresará como:

$$R_{cd} = \frac{A \cdot B}{A + B} + \frac{R \cdot S}{R + S}$$

Al elegir un galvanómetro, o cualquier otro tipo de instrumento indicador, para un puente se debe tener en cuenta que el mismo trabaja en forma más apropiada cuando las impedancias están adaptadas. Con esto se busca, entre otras cosas, obtener la máxima sensibilidad del sistema.

Sensibilidad del puente

Para estudiar como y de que depende la sensibilidad de un puente de Wheatstone, vamos a suponer que el mismo sufre un pequeño desequilibrio que hace que aparezca una pequeña diferencia de potencial entre los puntos **c** y **d**. Evidentemente si tenemos dos puentes que utilizamos para medir la misma resistencia, será más sensible aquel que ante la misma variación de resistencia provoque un mayor desequilibrio, es decir una diferencia de potencial más alta entre **c** y **d**.

Suponiendo que **A**, **B**, **S**, y **R** son los valores de las resistencias que equilibran el puente, las tensiones en **c** y en **d** serán respectivamente:

$$V_{cd} = E \cdot \frac{A}{A + B} \quad ; \quad V_d = E \cdot \frac{R}{R + S}$$

Y como ambas tensiones son iguales se tendrá:

$$\frac{A}{A + B} = \frac{R}{R + S} \quad ; \quad A \cdot (R + S) = R \cdot (A + B)$$

Si la resistencia **R** sufre una pequeña variación de su valor **dR**, se determinará el valor de la **V_g** que aparecerá entre los puntos **c** y **d** estando desconectado el galvanómetro.

$$V_c = E \cdot \frac{A}{A + B} \quad ; \quad V_d = E \cdot \frac{(R + dR)}{R + dR + S}$$

Por lo tanto la diferencia de potencial entre **c** y **d** será:

$$V_g = V_d - V_c = E \left[\frac{R + dR}{R + dR + S} - \frac{A}{A + B} \right]$$

$$V_g = E \cdot \left[\frac{R(A + B) + dR(A + B) - A(R + S) - A \cdot dR}{(R + dR + S) \cdot (A + B)} \right]$$

Simplificando:

$$V_g = E \cdot \left[\frac{B \cdot dR}{(R + dR + S) \cdot (A + B)} \right]$$

Y como, por la propiedad de intercambio de las ramas, también:

$$\frac{B}{A + B} = \frac{S}{R + S}$$

Y despreciando el valor de **dR** en el denominador se puede poner:

$$V_g = E \cdot \frac{S \cdot dR}{(R + S)^2}$$

Como puede verse, (y por otra parte es lógico) la tensión entre **c** y **d**, y por consiguiente la sensibilidad, depende directamente de la tensión de alimentación del puente. Sin embargo la misma no puede ser aumentada desmesuradamente pues podría provocar excesivo calentamiento de los componentes del puente.

Se puede demostrar que la mayor sensibilidad del puente se obtiene cuando las resistencias de las cuatro ramas del puente son iguales.

En efecto, si se considera la relación entre la tensión **V_g** y la variación relativa de resistencia (**dR/R**) se puede ver que:

$$\frac{V_g}{dR/R} = E \cdot \frac{S \cdot R}{(R + S)^2} = E \cdot \frac{S \cdot R}{R^2 + 2 \cdot R \cdot S + S^2} = E \cdot \frac{1}{\frac{R}{S} + 2 + \frac{S}{R}}$$

Que será máxima cuando:

$$R/S = 1 \quad ; \text{ o sea: } R = S$$

Lo que puede extenderse a las ramas **A** y **B** por la propiedad de intercambio de las mismas.

Exactitud del puente

La exactitud de la medición efectuada con un puente de Wheatstone depende fundamentalmente de la exactitud de las resistencias patrones utilizadas en los brazos del mismo.

Los errores que aparecen en los resultados de las mediciones efectuadas con el puente de Wheatstone tienen el siguiente origen:

- 1) La inexactitud de las resistencias patrón que componen el puente.
- 2) La insuficiente sensibilidad del galvanómetro.
- 3) Las fuerzas termoeléctricas que se originan en el galvanómetro y en todas las uniones entre metales diferentes.
- 4) Las variaciones de los valores de resistencia patrón y de la resistencia medida, debidas a cambios de temperatura.
- 5) La resistencia de conductores y contactos, que se vuelven importantes a medida que menor es la resistencia a medir, particularmente cuando se trata de valores inferiores a 1 ohm. (Para disminuir este error se utiliza el puente doble de Thompson, que se verá luego).

Alcance de un puente de Wheatstone

La Figura 4-3 muestra un esquema detallado de la posible realización práctica de un puente de Wheatstone de acuerdo al esquema teórico de la Figura 4-1.

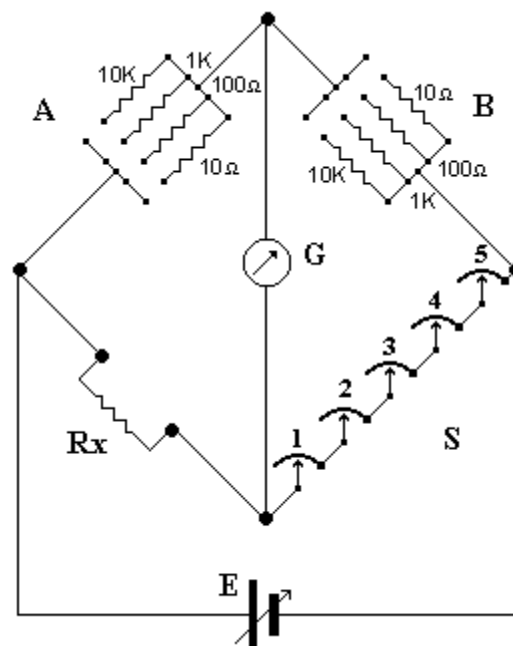


Figura 4-3 . Esquema de un puente de Wheatstone típico.

La resolución de este puente depende de la cantidad de pasos del brazo **S**. El ajuste de la relación **A/B** permite seleccionar el rango de medición, no obstante conviene recordar que la máxima sensibilidad del puente se obtiene cuando $A/B = 1$.

El alcance del puente está determinado por las resistencias patrones que constituyen el cuadripolo. En el ejemplo de la Figura 4-3 las resistencias **A** y **B** pueden variar en valores de

10 Ω , 100 Ω , 1000 Ω y 10000 Ω . La resistencia patrón **S** consiste en un resistor ajustable de 5 décadas. Cada década tiene 10 posiciones que corresponden a los siguientes valores:

- 1) 10 x 0,1 Ω
- 2) 10 x 1 Ω ;
- 3) 10 x 10 Ω .
- 4) 10 x 100 Ω ;
- 5) 10 x 1000 Ω ,

De modo que el total de la resistencia suma 11111 Ω .

El alcance mínimo se obtiene utilizando $A = 10 \Omega$ y $B = 10000 \Omega$. En este caso el valor de la resistencia medida **R_x** será:

$$R_x = R = S \cdot \frac{10}{10000} = 0,001 \cdot S$$

El alcance máximo será cuando **A** = 10000 Ω y **B** = 10 Ω . En este caso el valor de la resistencia medida será:

$$R_x = R = S \cdot \frac{10000}{10} = 1000 \cdot S$$

Sin embargo a pesar de lo dicho y debido a la falta de sensibilidad y la pérdida de exactitud, el rango medición no debe extenderse mas allá de los 10000 Ω ni menos de los 10 Ω .

Puente de Wheatstone no balanceado

Las aplicaciones del circuito del puente ya visto, no terminan en su uso como dispositivo para la medición de resistencias con el puente balanceado. Existen innumerables casos en los cuales se mide con el puente no equilibrado (aunque siempre es para condiciones de pequeño desequilibrio) como se verá seguidamente.

En la actualidad se utiliza mucho el circuito del puente para la medición de otras magnitudes, como por ejemplo: potencia de RF (por el método bolométrico), u otras magnitudes no eléctricas como pueden ser: temperaturas, deformaciones mecánicas etc. Para ello se utiliza un puente donde uno de los brazos es un transductor cuya resistencia varia con la magnitud a medir. Así, se consigue aumentar la sensibilidad del transductor.

Medición de magnitudes no eléctricas usando puentes

Consideremos el ejemplo de la Figura 4-4, en el cual el brazo **R** se ha reemplazado por un transductor para la medición de una cierta magnitud no eléctrica.

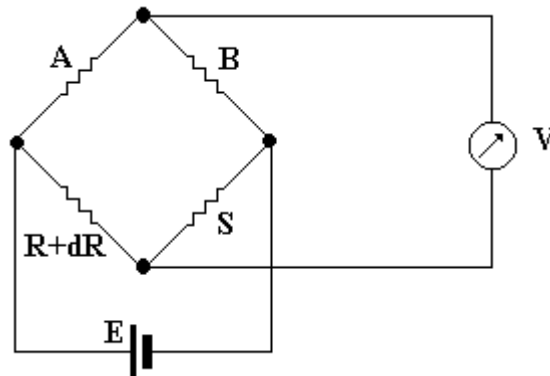


Figura 4-4

Remitiéndonos a las expresiones deducidas al estudiar la sensibilidad del puente, podemos expresar la tensión entre los nudos **c** y **d** como:

$$V_{cd} = E \cdot \frac{S \cdot dR}{(R + S)^2}$$

Si hacemos $R = S$ para máxima sensibilidad, y multiplicando y dividiendo por R , se puede poner:

$$V_{cd} = E \cdot \frac{\frac{dR}{R}}{\frac{R}{S} + 2 + \frac{S}{R}} = \frac{E}{4} \cdot \frac{dR}{R}$$

Es decir que para pequeños valores de **dR** la tensión **Vcd** varía linealmente con **dR/R**. Claro que hay que recordar que esta expresión es válida cuando el galvanómetro está desconectado, es decir cuando la tensión se mide con un instrumento de elevada resistencia de entrada, o sea un voltímetro.

Puente doble de Thompson (también llamado de Kelvin)

El puente doble de Thompson puede ser considerado como una modificación del puente de Wheatstone. De una mayor exactitud en la medición de resistencias pequeñas, ya que elimina los errores ocasionados por las resistencias de contacto y las resistencias de los conductores de conexión.

Se puede efectuar una medición exacta de resistencias de pequeño valor, cuando esta resistencia está provista de 4 terminales de los cuales dos se denominan "terminales de corriente" y los otros dos "terminales de potencial".

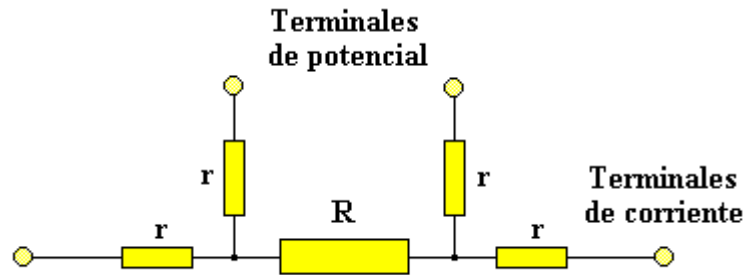


Figura 4-5

Se mide una resistencia de este tipo haciendo circular una intensidad de valor relativamente grande a través de los terminales de corriente midiendo simultáneamente la caída de tensión entre los terminales de potencial con un milivoltímetro de suficiente sensibilidad y alcance. El doble puente de Kelvin está diseñado en base a este principio.

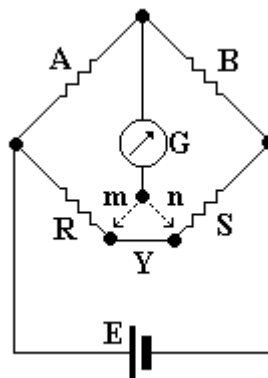


Figura 4-6

Considerando el puente de la Figura 4-6, en el se ha indicado con Y la resistencia del conductor que une a R con S . Hay dos conexiones posibles para el galvanómetro. Cuando se lo conecta según m , la resistencia Y se agrega a R , de manera que el valor que se determine será mayor que el verdadero. Si en cambio se lo conecta según n , el valor de R se calculara basándose solamente en S , y no en el valor $S + Y$ de la resistencia de la rama de comparación, obteniéndose así un valor de R menor que el verdadero.

Suponiendo que se usara como conexión del galvanómetro un punto intermedio de Y , tal que:

$$\frac{Y_1}{Y_2} = \frac{A}{B} \quad ; \quad Y_1 = Y_2 \cdot \frac{A}{B} \quad ; \quad Y_2 = Y_1 \cdot \frac{B}{A}$$

Entonces la presencia de Y no introduce error en el resultado. De acuerdo con la relación fundamental del puente se podrá escribir:

$$R + Y_2 \cdot \frac{A}{B} = \frac{A}{B} \cdot \left(S + Y_1 \cdot \frac{B}{A} \right) \quad ; \quad \text{de donde} \quad R = \frac{A}{B} \cdot S$$

Lo cual indica que la presencia de Y no influye en la medición.

El procedimiento aquí seguido sugiere la modificación a efectuar en el puente de Wheatstone, que es: conectar dos resistores en relación adecuada a los puntos **m** y **n**, y conectar el galvanómetro a su punto común. Así, la corriente que circula por la resistencia a medir, que puede tener un valor desde unos pocos Amper hasta cientos de Amper, con el fin de producir caídas de tensión apreciables en bajos valores de resistencia, no es la misma que circula por el circuito de medición del galvanómetro, con lo cual los efectos de las resistencias de contacto en el circuito de medición se hacen mínimos.

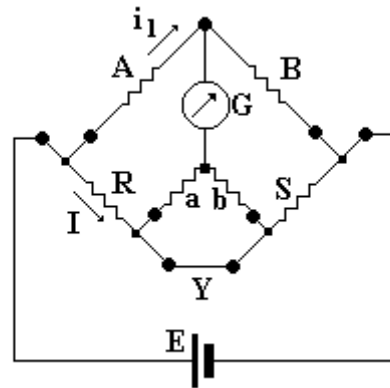


Figura 4-7. Puente doble de Thompson - Kelvin

Como se puede ver en La Figura 4-7, el puente doble de Thompson incorpora en su circuito un segundo par de brazos de relación, y el resistor patrón **S** es del tipo de cuatro terminales. Las resistencias **a** y **b** forman los nuevos brazos de relación.

En equilibrio (cuando no circula corriente por el galvanómetro) la caída de tensión en **A** es igual a la suma de las caídas de tensión en **R** y en **a**. De la misma manera que la caída de tensión en **B** es igual a la suma de las caídas en **S** y en **b**.

$$i_1 A = I R + i_2 a \quad , \quad i_1 B = I S + i_2 b$$

También:

$$(I - i_2) Y = i_2 (a + b)$$

De donde:

$$I Y = i_2 (a + b + Y)$$

Reemplazando:

$$i_1 \cdot A = I \left(R + \frac{a \cdot Y}{a + b + Y} \right) \quad ; \quad i_1 = I \left(S + \frac{b \cdot Y}{a + b + Y} \right)$$

Y dividiendo ambas expresiones:

$$\frac{A}{B} = \frac{R + \frac{a \cdot Y}{a + b + Y}}{S + \frac{b \cdot Y}{a + b + Y}}$$

O sea:

$$R = \frac{A}{B} \cdot S + \frac{b \cdot Y}{a \cdot b + Y} \cdot \left(\frac{A}{B} - \frac{a}{b} \right)$$

Si se hace $A/B = a/b$ se tiene nuevamente la relación fundamental:

$$R = \frac{A}{B} \cdot S$$

En la que no interviene para nada el valor de Y . Sin embargo su valor se debe mantener bajo de manera tal que si ambos brazos de relación no son exactamente iguales, el error que se introduce es mínimo.

En cuanto a los resistores que forman los dos pares de brazos de comparación, las dos relaciones A/B y a/b se mantienen simultáneamente en el mismo valor por medio de un acoplamiento mecánico de los selectores, de manera tal que los brazos de comparación correspondientes se ajusten al mismo tiempo.

La igualdad $A/B = a/b$ puede comprobarse una vez que el galvanómetro ha indicado equilibrio, abriendo la conexión Y ; si las relaciones son iguales, el puente permanecerá en equilibrio, de lo contrario se debe modificar algo el valor de a o b (lo que habitualmente se logra con una pequeña resistencia variable en serie con una de ellas).

Normalmente los puentes comerciales de este tipo permiten medir resistencias desde 10Ω hasta $0,00001\Omega$.

Medición de la resistencia de puesta a tierra.

Un parrafo a parte merece el tema de las mediciones de resistencia de sistemas de puesta a tierra, ya que aunque las mismas se suelen efectuar empleando instrumentos y aparatos de medida que en esencia son puentes resistivos, hay algunas características que los distinguen de los puentes que se han estudiado hasta ahora.

Se entiende como “puesta a tierra” a la conexión que se efectúa mediante un electrodo metálico o “jabalina” que se inserta en el suelo o tierra y que se emplea como punto de retorno en los sistemas que se alimentan a partir de la red eléctrica. El empleo de la “puesta a tierra” también es esencial en otras circunstancias para garantizar el correcto funcionamiento de sistemas tales como equipos de medición, redes de computadoras, antenas, etc.

La resistencia de un sistema de puesta a tierra, consiste en la suma de la resistencia propia del electrodo (la cual es habitualmente de un valor muy bajo) más la resistencia de contacto entre la jabalina y la tierra propiamente dicha, la cual puede considerarse como un material electrolítico. Aunque la resistividad del suelo puede ser elevada (y variable dependiendo del

tipo de terreno), la resistencia entre dos puntos de conexión a tierra cercanos entre si puede resultar de un valor muy bajo debido al gran tamaño de la sección transversal del suelo. Se puede comprobar experimentalmente que, si se hace circular una corriente I entre dos electrodos de puesta a tierra **a** y **b** separados entre si una distancia del orden de la decena de metros, la caída de tensión a lo largo de la línea que une a los mismos, medida con un tercer electrodo que se desplaza sobre la línea, presenta la siguiente distribución.

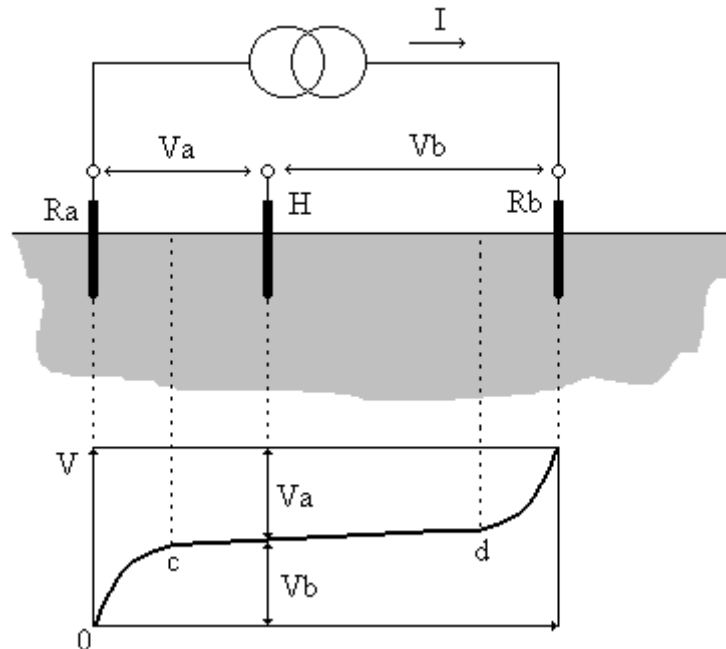


Figura 4-8

La distribución mostrada puede interpretarse así: Existe un valor de resistencia de contacto entre cada uno de los electrodos y el suelo que puede verificarse en las proximidades de los mismos, pero a partir de una cierta distancia c y d la pendiente de la curva es casi nula, lo cual significa que el suelo opera como un conductor de resistencia próxima a cero. De allí que las caídas de tensión, medida con un voltímetro de alta impedancia, entre un punto ubicado entre **c** y **d** y cada uno de los electrodos permanece prácticamente constante.

Métodos para determinar la resistencia de puesta a tierra.

Cualquier método que se utilice para determinar la resistencia puesta en juego no puede utilizar corriente continua por los efectos de polarización que se producirían debido a las reacciones electroquímicas. Por ello se suele emplear corriente alterna de baja frecuencia, que además debe ser diferente de la frecuencia de la red eléctrica para evitar los errores que podrían aparecer por efecto de la influencia de dicha red.

Un tipo de instrumento para medición de resistencia de puesta a tierra que se conoce como Telurímetro o Telurómetro, consiste en un puente de resistencias dotado de una fuente de baja frecuencia, un voltímetro de alta impedancia que se emplea como detector de equilibrio, y un par de electrodos auxiliares (**h1** y **h2**) que deben insertarse en el suelo en línea con el punto de ubicación de la jabalina cuya resistencia (**R_x**) desea determinarse. La distancia

entre la jabalina y **h2** debe ser del orden de los 10m , y **h1** se ubica mas o menos en un punto medio.

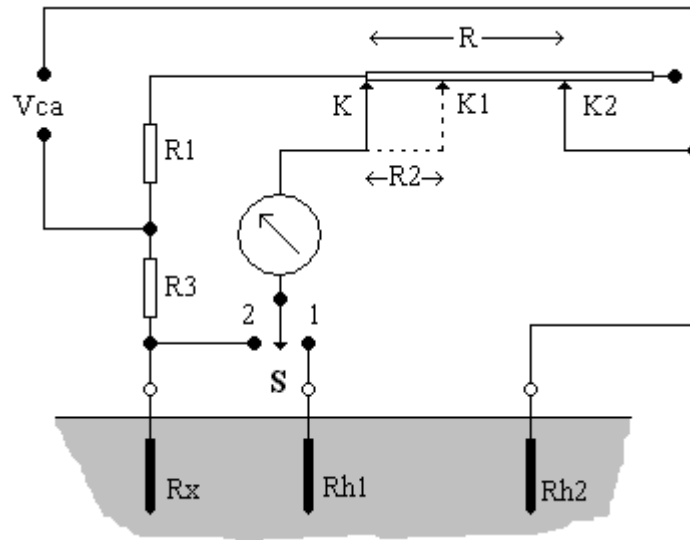


Figura 4-9

Inicialmente, se conecta el detector sobre **R_x** (punto 2 de S) y se procede a ajustar el cursor **K2** hasta que se equilibra el puente. En estas circunstancias, se cumple que:

$$\frac{R1}{R3} = \frac{R}{(Rx + Rh2)}$$

En un segundo paso, se conecta el detector sobre **R_{h1}** (punto 1 de S) y se desplaza el cursor del detector hasta el punto en que se vuelve a equilibrar el puente (**K2**). Ahora se cumple que:

$$\frac{(R1 + R2)}{(R3 + Rx)} = \frac{(R - R2)}{Rh2}$$

Para que el puente permanezca en equilibrio, al llevar el detector al punto 1 debe ocurrir que las caídas de tensión sobre **R_x** y sobre **R2** sean equivalentes, por ende:

$$\frac{R1}{R3} = \frac{R2}{Rx} \quad \therefore \quad Rx = R2 \cdot \frac{R3}{R1}$$

Como ocurre en cualquier puente de resistencias, para una relación conocida entre **R3** y **R1**, el valor de **R_x** se determina leyendo, sobre el cursor del brazo **R**, el valor de **R2**.

Se entiende que la resistencia del electrodo auxiliar Rh1 no afecta a la medición ya que queda en serie con el voltímetro que se usa como detector.

Determinación de las características de resistividad del terreno.

En realidad, como se ha expuesto en párrafos previos, y como se ve en la gráfica de distribución de la caída de tensión de la Figura 4-8, la pendiente entre los puntos **c** y **d**, aunque es muy baja, depende de la conductividad del terreno. Entonces, la determinación de las características de resistividad del suelo pueden efectuarse midiendo la caída de potencial entre dos puntos ubicados entre **c** y **d**.

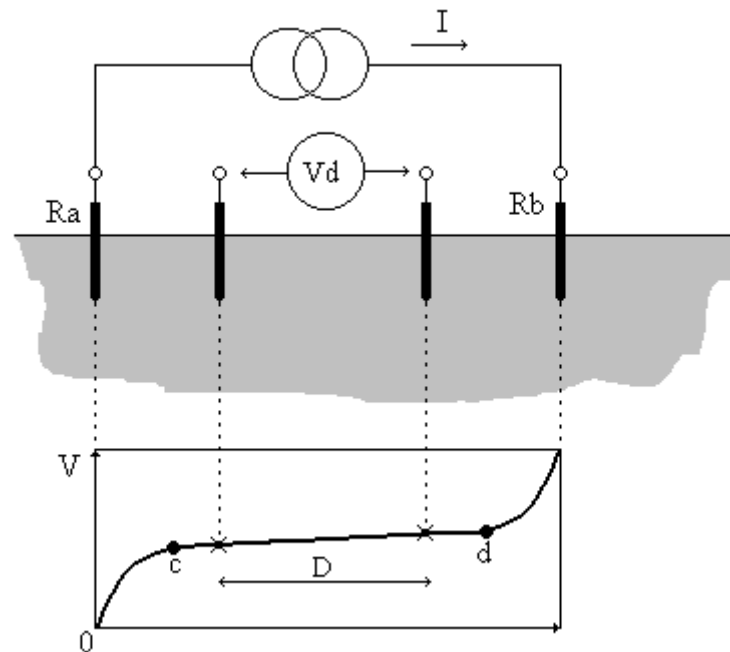


Figura 4-10

Para que la caída de potencial sea apreciable, es conveniente que la distancia entre los electrodos sea lo mayor posible, dentro de ciertos límites prácticos.

Cuestionario.

1. Un puente de Wheatstone, es un circuito que se emplea en medidores de resistencia de laboratorio y que consiste en un arreglo de cuatro ramas resistivas puras que debe ser alimentado con:

- (A) Una fuente de tensión de CC de valor fijo para asegurar la exactitud de la medida..
- (B) Una fuente de tensión CC de valor ajustable para regular sensibilidad.
- (C) Una fuente de corriente de CC de valor fijo para asegurar la exactitud de la medida..
- (D) Una fuente de tensión de CA de frecuencia variable para regular la sensibilidad.

2. La medición de resistencia mediante un puente de Wheatstone de laboratorio requiere que el mismo sea llevado a la condición de:

- (A) Pequeño desequilibrio
- (B) Equilibrio
- (C) Gran desequilibrio

3. La determinación del valor de resistencia medida con un puente de Wheatstone de laboratorio se hace:

- (A) Leyendo el valor en el instrumento conectado entre los nodos de salida del puente.
- (B) Efectuando un cálculo, usando las ecuaciones de equilibrio.
- (C) Leyendo el valor en el cursor (o dial) que ajusta el brazo de comparación.
- (D) leyendo el valor en el cursor (o dial) que ajusta los brazos de relación.

4. Cuando se emplea un puente de Wheatstone ya sea para medir una resistencia, o para cualquier otra aplicación, la condición óptima de uso se da cuando las resistencias de las cuatro ramas son de valores muy próximos entre sí. Esto se debe a que en esas condiciones ocurre que:

- (A) La exactitud es máxima.
- (B) La sensibilidad es máxima
- (C) La resolución es máxima
- (D) La medición es más rápida

5. En un puente de Wheatstone los tres brazos conocidos (el cuarto brazo es la incógnita) están implementados con resistores de baja tolerancia (gran exactitud), lo cual es necesario para garantizar que el resultado de la medición sea:

- (A) Muy exacto.
- (B) Muy preciso.
- (D) De elevada resolución.

6. Para la medición de la resistencia de puesta a tierra se suele emplear un instrumento denominado Telurímetro. El mismo consiste básicamente en un puente resistivo, dotado de unos electrodos especiales que deben insertarse en el terreno. El puente se alimenta con:

- (A) Una fuente de CC de valor fijo.
- (B) Una fuente de CA de baja frecuencia igual a la de la red. (Por ej.: 50 o 60 Hz).
- (C) Una fuente de CA de baja frecuencia distinta a la de la red. (Por ej.: 100 o 120 Hz)
- (D) Una fuente de CA de baja frecuencia distinta a la de la red. (Por ej.: 110 o 140 Hz).
- (E) Una fuente de CA de baja frecuencia (Por ej.: 500 Hz o 1000 Hz).

Problema:

Se necesita implementar un puente de CC para la medición de una magnitud no eléctrica mediante un dispositivo cuya resistencia varía con dicha magnitud. La resistencia de este dispositivo es de $1\text{ K}\Omega$ y su variación porcentual (dentro de los límites de variación de la magnitud medida es de $\pm 1\%$. Si la potencia máxima que puede disipar la resistencia sensora es de $1/4\text{ W}$; a) cuáles serán los valores de resistencia elegida para los brazos del puente? b) que valor elegirá para la fuente de alimentación que debe alimentar el circuito? c) cual es la impedancia de salida del conjunto? d) Cual será la excursión máxima de tensión de la salida?