

Principios eléctricos

Capítulo 5

CHANCE[®]

www.hubbellpowersystems.com
E-mail: hpsliterature@hps.hubbell.com



Teléfono: 573-682-5521

Fax: 573-682-8714

210 North Allen

Centralia, MO 65240, USA

©Copyright 2008 & 2010 Hubbell Incorporated

Principios eléctricos

El capítulo sobre Principios eléctricos de esta publicación se ha añadido para aquellos que no posean conocimientos sólidos sobre los principios eléctricos o la teoría de circuitos. Se trata de una presentación muy básica. Aquellos que posean conocimientos previos pueden omitir este capítulo si lo desean y pasar al siguiente.

Ley de Ohm

La simple utilización de la Ley de Ohm es todo lo que realmente se necesita para comprender la teoría de las puestas a tierra de protección. Podría añadirse complejidad a este estudio teniendo en cuenta la inductancia asociada a la corriente alterna, pero dado que muchos de los valores se basan en suposiciones, no se ha considerado necesario añadir ese mayor grado de complejidad en esta presentación básica.

Una de las primeras leyes que se aprenden al estudiar electricidad es la Ley de Ohm. Dicha ley establece una relación fundamental entre tres magnitudes eléctricas. Estas magnitudes son voltaje o tensión, intensidad de corriente y resistencia. Si se conocen dos de ellas, es posible calcular la tercera. Utilizando álgebra básica, esta relación puede transformarse en tres formas distintas, dependiendo de cuál de las tres magnitudes es la que desconocemos.

$$V = I \times R \text{ o } I = V / R \text{ o } R = V / I \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde: V = tensión, en voltios
I = intensidad de corriente, en amperios
R = resistencia, en ohmios

Una magnitud relacionada es la potencia. La potencia es el producto de la tensión y la intensidad.

$$P = V \times I \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde: P = potencia, en vatios

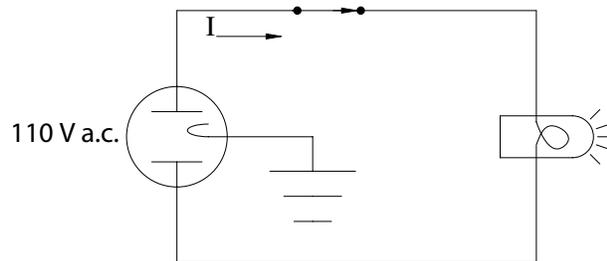
La Ecuación 3 puede transformarse en otras formas de utilidad sustituyendo la V o la I en la Ecuación 3 por la forma adecuada de la Ecuación 2. Así obtenemos las siguientes modificaciones:

$$P = I^2 \times R \quad \text{o} \quad P = E^2 / R \quad (\text{Ec. 4})$$

Los circuitos eléctricos están conectados en serie, en paralelo, o una combinación de ambas configuraciones. La Ley de Ohm puede aplicarse a las tres variaciones de la siguiente manera.

Circuitos en serie

El circuito más sencillo es el circuito en serie, formado por una fuente de tensión, una carga conectada y el cableado de interconexión. A modo de ilustración de un circuito en serie, veamos el siguiente ejemplo. La fuente es un enchufe de 110 V c.a. en la pared. La carga es una única lámpara y el cableado es el cable que hay entre la lámpara y el enchufe en la pared. Cuando enchufamos la lámpara y la encendemos, la corriente fluye de un terminal del enchufe a través de uno de los cables a la lámpara, pasando por el foco y regresando al enchufe a través del otro cable. El circuito se muestra en la Fig. 5-1. En los circuitos completos, si se conocen la tensión y la resistencia, puede calcularse la intensidad de corriente utilizando las Ecuaciones 2, 3 ó 4.



Circuito sencillo de lámpara en serie
Fig. 5-1

Todo elemento portador de corriente de un circuito tiene una cierta resistencia. La corriente que pasa a través de cualquier resistencia crea una caída de tensión repartida a lo largo del componente resistivo. Si sumamos la totalidad de pequeñas y grandes caídas de tensión, el resultado será igual a la fuente de tensión, o en este caso la tensión del enchufe de la pared. En el ejemplo anterior, la resistencia del cable de conexión es lo suficientemente pequeña en comparación con la del foco para que podamos ignorarla (aunque este no es siempre el caso).

Vamos a suponer, en nuestro ejemplo, que la tensión del enchufe es 110 V c.a. y la lámpara tiene un foco de 100 W. Sustituyendo estos valores en las Ecuaciones 2 y 3, es posible hallar la intensidad de corriente y la resistencia.

$$P = I \times V \text{ o } 100 \text{ W} = I \times 110 \text{ V c.a.}$$

Despejando la intensidad (I) obtenemos:

$$I = 100 \text{ vatios} / 110 \text{ voltios} = 0,91 \text{ amperios}$$

Y la resistencia

$$R = (110 \text{ V c.a.})^2 / 100 \text{ vatios} = 121 \text{ ohmios}$$

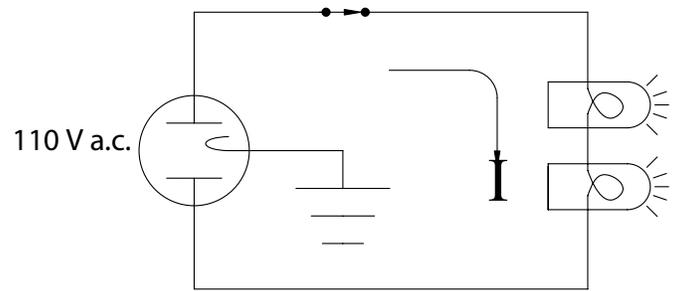
Al conectarse una segunda lámpara en serie con la primera, la resistencia de la carga vista desde el enchufe de la pared ha cambiado. Por tanto, también cambia la intensidad de corriente. Esto se muestra en la Figura 5-2. La tensión de la fuente se mantiene constante a 110 V c.a. Cabría esperar que dos lámparas del mismo tamaño presenten el doble de carga (o resistencia) para la fuente. La Ecuación 2 nos dice que si duplicamos la resistencia, la intensidad será la mitad del valor anterior si el valor de tensión es constante.

$$\text{Ahora } I = V / R \text{ o } I = V / 2R, \text{ que es igual a } 110 \text{ V c.a.} / 242 \text{ ohmios}$$

$$I = 0,454 \text{ amperios.}$$

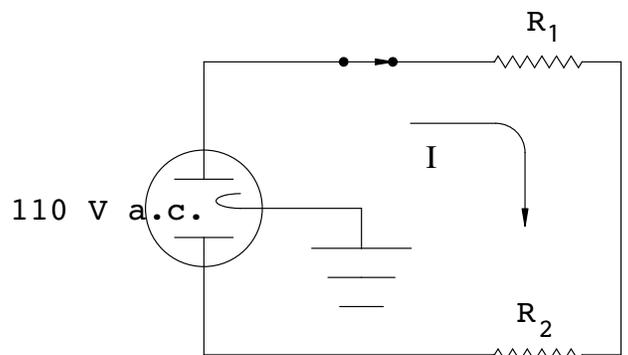
Como era de esperar, la intensidad de corriente es ahora la mitad que antes. Recuerde, la tensión de la fuente se mantuvo a 110 V c.a. pero veamos lo que sucede con la carga. Dado que los dos focos son iguales, la tensión se divide a partes iguales entre ambas. Recuerde que la suma de las caídas

de tensión a lo largo de un circuito deberá ser igual a la fuente. Así pues esperamos que cada foco tenga solo 55 V c.a. entre sus terminales y que la luminosidad de cada una de ellas disminuya.



Dos lámparas en serie
Fig. 5-2

Para simplificar, hemos usado focos como carga eléctrica en nuestros ejemplos. Sin embargo, el mismo principio puede aplicarse a otros tipos de carga eléctrica. Sustituyamos los focos por cualquier otro componente de un circuito con resistencia. Puede tratarse de un tramo de conductor, un transformador, un motor eléctrico o una combinación de cargas. La intensidad de corriente en el circuito y las caídas de corriente variarán en función de los valores de resistencia de cada uno de los componentes en el circuito. En la Figura 5-3 se muestra el mismo circuito con los focos sustituidos por el símbolo eléctrico de resistencia.

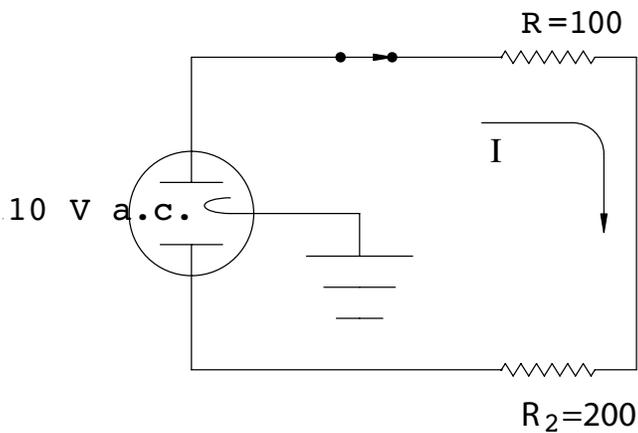


Circuito en serie utilizando símbolos de uso común
Fig. 5-3

Esto nos lleva a un punto clave. Si las resistencias no son iguales, la caída de tensión en cada componente tampoco será la misma. La tensión en cada componente será una fracción de la tensión total aplicada. Esta fracción será igual al porcentaje de la resistencia del componente sobre la resistencia total del circuito.

Haciendo referencia nuevamente a la Ecuación 2, si se conocen tanto la tensión aplicada al circuito en serie como las resistencias de todos los componentes, puede calcularse la caída de tensión en cualquier componente hallando la fracción que representa de la resistencia total multiplicada por la tensión aplicada. Una vez conocidas la tensión y la resistencia de un componente, también puede hallarse la intensidad de corriente que pasa por dicho componente, que es igual a la intensidad de corriente del circuito en el caso de un circuito en serie. Por otra parte, si se conocen la intensidad de corriente que atraviesa un componente y la resistencia de este, puede calcularse la caída de tensión en dicho componente. En capítulos posteriores se muestran aplicaciones de estos cálculos.

En la Figura 5-4 se muestra un circuito con resistencias desiguales. Hay dos resistencias en serie, una de 100 ohmios y otra de 200 ohmios, y están conectadas a una fuente de 110 voltios.



Circuito en serie con resistencias desiguales
Fig. 5-4

La caída de tensión en cada resistencia se calcula mediante la Ecuación 2 de la siguiente manera:

$$R_{\text{total}} = 100 \text{ ohmios} + 200 \text{ ohmios} = 300 \text{ ohmios}$$

$$I_{\text{total}} = 110 \text{ voltios} / 300 \text{ ohmios} = 0,367 \text{ amperios}$$

El cálculo individual sería:

$$\begin{aligned} \text{Caída de tensión a través de los 100 ohmios:} \\ = I \times R = 0,367 \text{ amperios} \times 100 \text{ ohmios} \\ = 36,7 \text{ voltios} \end{aligned}$$

Y

$$\begin{aligned} \text{Caída de tensión a través de los 200 ohmios:} \\ = 0,367 \text{ amperios} \times 200 \text{ ohmios} = 73,3 \text{ voltios} \end{aligned}$$

O la tensión calculada como porcentaje del total:

$$\begin{aligned} \text{Tensión a través de los 100 ohmios:} \\ = (100 \text{ ohmios} / 300 \text{ ohmios}) \times 110 \text{ voltios} \\ = 36,7 \text{ voltios} \end{aligned}$$

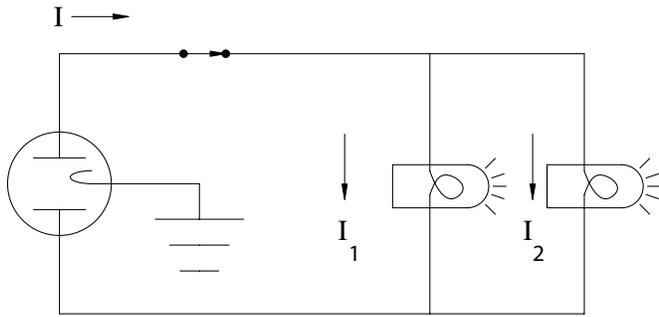
Y

$$\begin{aligned} \text{Tensión a través de los 200 ohmios:} \\ = (200 \text{ ohmios} / 300 \text{ ohmios}) \times 110 \text{ voltios} \\ = 73,3 \text{ voltios} \end{aligned}$$

En ambas ecuaciones, los valores de tensión suman los 110 voltios de la fuente.

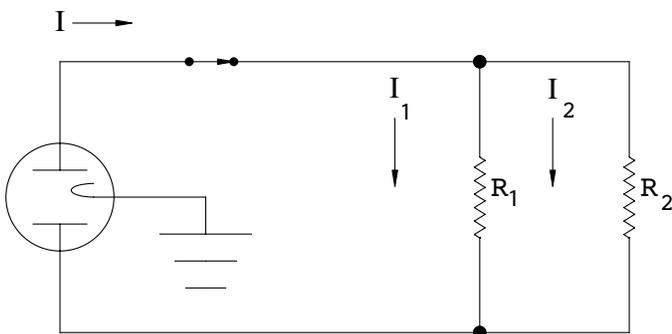
Circuitos en paralelo

No todos los circuitos están conectados en serie tal y como se describe en el apartado anterior. Otra configuración básica es el circuito en paralelo. Vamos a considerar nuestras dos lámparas de 100 W de antes, pero ahora conectadas en paralelo tal y como se muestra en la Fig. 5-5. El enchufe de la pared sigue siendo de 110 V c.a. En este caso por cada una de las lámparas pasa la totalidad de los 0,91 amperios de corriente de antes, ya que la tensión a través de cada lámpara es la totalidad de los 110 V c.a. El enchufe de la pared ahora está suministrando un total de 1,82 amperios, ya que cada una de las lámparas está consumiendo toda la corriente generada por la tensión aplicada. **La suma de las corrientes de los distintos ramales deberá ser igual a la corriente suministrada.**



Circuitos en paralelo
Fig. 5-5

En este caso, nuevamente las lámparas tienen igual resistencia y la corriente se divide igualmente entre los dos caminos. Si hubiera resistencias desiguales, la corriente se divide en proporción inversa a las resistencias. Es decir, cuanto menor sea la resistencia de un camino, mayor será la corriente que pase por ese camino. **Este es el principio fundamental de las puestas a tierra de protección personal, colocar un puente de muy baja resistencia en paralelo con un trabajador con una resistencia mucho más elevada.** En la Figura 5-6 se muestra el circuito en paralelo con las lámparas sustituidas por el símbolo eléctrico de resistencia. La Ecuación 5 muestra los cálculos para este circuito.



Circuito en paralelo
Fig. 5-6

Por ejemplo:

$$I_1 = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} \times I_{TOTAL} \quad \text{Ec. 5}$$

(Recuerde, la corriente se divide en proporción inversa a la resistencia total)

Si R_1 representa a un operario de línea y R_2 al puente de protección personal, la ecuación pasa a ser:

$$I_{HOMBRE} = \frac{(R_{PUENTE})}{(R_{HOMBRE} + R_{PUENTE})} \times I_{DISPONIBLE} \quad \text{Ec. 5a}$$

Las resistencias de los circuitos en paralelo se pueden reducir a un único valor equivalente para utilizarlo en los cálculos. Esto se hace de la siguiente manera:

$$\frac{1}{R_{TOTAL}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \dots \frac{1}{R_{ULTIMA}} \quad \text{Ec. 6a}$$

Transformando algebraicamente la ecuación obtendremos una forma simplificada de la Ecuación 6a. Recuerde que R_1 y/o R_2 podrían ser la suma de una serie de resistencias.

$$R_{TOTAL} = (R_1 \times R_2) / (R_1 + R_2) \quad \text{Ec. 6b}$$

Un aspecto clave de los circuitos en paralelo es que pasará cierta cantidad de corriente por **todos** los caminos posibles. La magnitud de la corriente en cada camino dependerá de la resistencia de este. La única forma de eliminar por completo el paso de corriente es eliminando el camino.

En todo circuito se genera una caída de tensión únicamente si hay paso de corriente por el elemento resistivo. Y cuanto mayor sea la resistencia, mayor será la caída de tensión, tal y como se muestra en la Fig. 5-7.

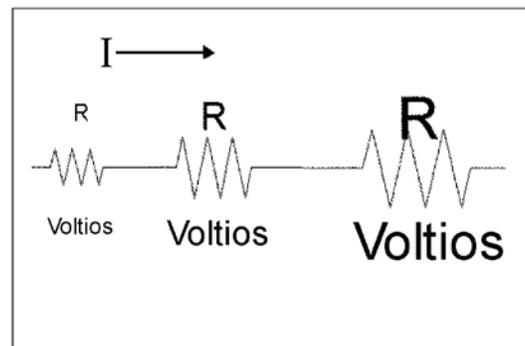


Fig. 5-7

Combinación de circuitos en serie/paralelo

El mundo real está lleno de circuitos. Pocos de ellos son tan sencillos como los circuitos puramente en serie o en paralelo descritos anteriormente. La mayoría son combinaciones de conexiones en serie y en paralelo. El típico lugar de trabajo constituye un ejemplo de esto. Vamos a considerar una fuente monofásica desenergizada conectada al conductor que alimenta la zona de trabajo (en serie). Hay un trabajador subido a un poste, por encima de un soporte para múltiples grapas de tierra, en contacto con el conductor y derivado por un puente (paralelo). El soporte múltiple está conectado tanto a Tierra como al neutro de retorno (paralelo). Además, quizá esté también conectado a un cable de guarda en la parte superior (paralelo adicional).

Por complicado que esto parezca, puede reducirse a un sencillo circuito equivalente para facilitar su análisis. Para ello, es preciso determinar las resistencias del conductor, neutro, puentes de seguridad y el posible cable de guarda. Puede utilizarse una estimación realista, dado que las cargas normales a las que está sujeta la línea no estarán desconectadas y estas afectarán el valor final. La determinación del valor exacto está fuera del alcance de esta presentación. Pueden suponerse los valores de resistencia del trabajador (típicamente 1.000 ohmios) y la tierra y de los caminos de la fuente y de retorno. Cada tramo en paralelo puede reducirse a una resistencia equivalente utilizando las Ecuaciones 5 ó 6. La resistencia total del circuito puede hallarse sumando todas las resistencias en serie más los equivalentes en paralelo. Si se conoce la tensión de la fuente, es posible calcular el valor de la corriente de falla disponible en un determinado lugar de trabajo. Si bien esta es una técnica válida, se incluye aquí principalmente a modo de ilustración del proceso empleado. Para obtener un valor más exacto deberá consultarse al departamento de ingeniería de la compañía eléctrica.

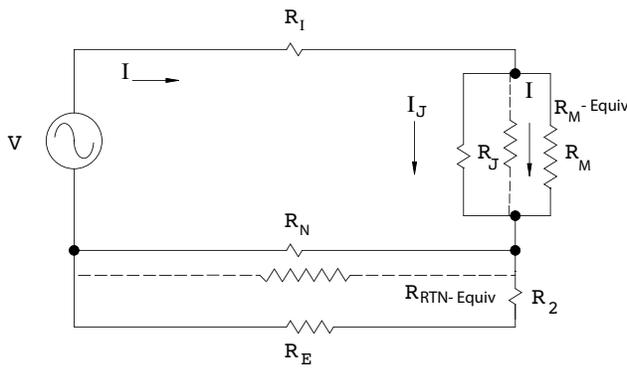
Después de esto solo será preciso analizar las conexiones en el lugar de trabajo. Para facilitar el análisis, en la Tabla 5-1 se presentan los valores de resistencia en c.c. de varios tipos de conductor comúnmente utilizados, expresados en ohmios por 1.000 pies. Si se hace necesario incluir un camino de retorno a través de Tierra, deberá asignarse un valor de resistencia a dicho camino.

Los valores nominales empleados para los cables están expresados según la especificación ASTM B8, presentados en la Tabla 5-1.

Calibre AWG	Resistencia (ohmios/1.000 pies)
#2	0,1590
1/0	0,1000
2/0	0,0795
3/0	0,0630
4/0	0,0500
250 MCM	0,0423
350 MCM	0,0930

Valores de resistencia de cables de cobre
Tabla 5-1

Nota: Pueden existir ligeras variaciones en el valor de resistencia dependiendo del trenzado y la disposición de los haces de los pequeños alambres que forman el cable, es decir, trenzado concéntrico, en haces, retorcido, etc. Tales variaciones no deberían afectar la utilización de estos valores.



Circuito en serie/paralelo
Fig. 5-8

En la Figura 5-8 se ilustra esta situación. A modo de ejemplo de los cálculos a realizar, se han incluido todos los componentes mencionados. Supongamos que la fuente puede alcanzar 12 kV, aunque solo sea de forma momentánea.

- V = Tensión de fuente = 12.000 voltios
- R₁ = 5 millas de conductor 2/0 Cu = 2,10 ohmios
- R₂ = 25 pies de puente 2/0 Cu, soporte múltiple a Tierra = 0,002 ohmios
- R_M = Valor supuesto de resistencia del hombre = 1.000 ohmios
- R_N = 5 millas de neutro 2/0 Cu = 2,10 ohmios
- R_J = Puente de protección personal; 10 pies 2/0 Cu = 0,0008 ohmios
- R_E = Resistencia de Retorno a través de Tierra = 25 ohmios

Primero determinamos la corriente total requerida de la fuente. Hallamos las resistencias equivalentes de cada uno de los tramos en paralelo. Luego, sumamos todas las resistencias en serie. Ahora, conociendo tanto el valor de tensión de la fuente como las resistencias del circuito, puede utilizarse la Ecuación 2 para hallar la intensidad de corriente de la fuente. Así pues:

La resistencia equivalente hombre/puente es:

$$\begin{aligned} 1/R_{M-EQUIV} &= 1/R_M + 1/R_J \\ &= 1/1000 + 1/0,0008 \\ &= 0,001 + 1250 \\ &= 1250,001 \end{aligned}$$

Por tanto:

$$R_{M-EQUIV} = 0,0008 \text{ ohmios}$$

La resistencia equivalente neutro/retorno a través de tierra es:

$$\begin{aligned} 1/R_{RTN-EQUIV} &= 1/R_N + 1/(R_2 + R_E) \\ &= 1/2,10 + 1/(25 + 0,002) \end{aligned}$$

$$\text{y } R_{RTN-EQUIV} = 1,937 \text{ ohmios}$$

La resistencia equivalente total del circuito es:

$$R = R_1 + R_{M-EQUIV} + R_{RTN-EQUIV} = 2,10 + 0,0008 + 1,937 = 4,038 \text{ ohmios}$$

La corriente procedente de la fuente:

$$\begin{aligned} I_{FUENTE} &= V/R = 12.000 / 4,038 \\ &= 2.972 \text{ amperios} \end{aligned}$$

Seguidamente podemos hallar la corriente que pasa por cada uno de los elementos del circuito.

Intensidad de corriente a través del hombre:

$$\begin{aligned} I_{HOMBRE} &= I_{FUENTE} \times (R_J / (R_M + R_J)) = 2.972 \times \\ &[0,0008 / (1000 + 0,0008)] \\ &= 0,0024 \text{ amperios} = 2,4 \text{ miliamperios} \end{aligned}$$

Intensidad de corriente a través del puente:

$$\begin{aligned} I_J &= I_{FUENTE} \times (R_M / (R_M + R_J)) = 2.972 \times \\ &[1000 / (1000 + 0,0008)] \\ &= 2.971,998 \text{ amperios} \\ \text{o } I_J &= 2.972 - 0,0024 = 2.971,998 \text{ amperios} \end{aligned}$$

Intensidad de corriente de retorno a través del neutro:

$$\begin{aligned} I_N &= I_{FUENTE} \times [(R_2 + R_E) / (R_2 + R_E + R_N)] \\ &= 2.972 \times [(0,002 + 25) / (0,002 + 25 + 2,10)] \\ &= 2.742 \text{ amperios} \end{aligned}$$

y el retorno a través de tierra:

$$\begin{aligned} I_E &= I_{FUENTE} \times (R_N / (R_2 + R_E + R_N)) \\ &= 2.972 \times [2,10 / (0,002 + 25 + 2,10)] \\ &= 230 \text{ amperios} \end{aligned}$$

Como puede verse en este ejemplo, la intensidad de corriente que pasa a través de Tierra es mucho menor cuando se incluye un retorno a través del neutro, puesto que el neutro ofrece un camino de mucha menor resistencia.

Se trata de un ejemplo de un análisis muy básico de un circuito desde una fuente hasta el lugar de trabajo. Incluye los conductores de conexión, el neutro, el puente de protección, la Tierra y el trabajador. Sin embargo, es posible determinar el nivel de protección suficiente requerido por el trabajador en el lugar de trabajo sin necesidad de entrar en este nivel de detalle.

Basta con considerar únicamente el tramo en paralelo del circuito mostrado en la Fig. 5-8, que representa al trabajador y al puente de protección. El Departamento de Ingeniería puede facilitar el valor de corriente de falla máxima en la zona de trabajo. De esta forma se reducen los cálculos necesarios para determinar el valor máximo de resistencia permitido del puente para mantener la tensión a través del trabajador, o la intensidad de corriente a través de su cuerpo, por debajo de los niveles preestablecidos. La Ecuación 5a puede transformarse para hallar dicho valor máximo de resistencia.

$$R_{\text{PUENTE}} = \left(\frac{I_{\text{TRABAJADOR}}}{(I_{\text{FALLA}} - I_{\text{HOMBRE PERMITIDA}})} \right) \times R_{\text{HOMBRE}}$$

O bien puede utilizarse la Ecuación 2 si damos por supuesto que la totalidad de la corriente de falla pasa por el puente y conocemos el valor máximo permitido de tensión a través del trabajador. Esto es lo suficientemente exacto, ya que la intensidad de corriente permitida a través del cuerpo del trabajador es insignificante en comparación con la magnitud de una corriente de falla. Por tanto, cualquier error permitirá tener un margen de seguridad. La Ecuación 2 pasa a ser:

$$R_{\text{PUENTE}} = V_{\text{TRABAJADOR}} / I_{\text{FALLA}}$$

Este es el planteamiento utilizado en el Capítulo 9, Métodos Básicos de Protección.