

Fig. 4.15 Circuito empleado para el método del circuito equivalente en T

Recordar que para movernos por el circuito se utilizarán los valores de la tensión y la intensidad de fase. Por su parte, las potencias no cambian.

4.6.3.1 Cálculo de las condiciones eléctricas al principio de línea en régimen de carga

Los datos de partida son los mismos que para el método anterior, es decir:

$$P_2 = S_2 \cdot \cos \Pi_2 = 140 \cdot 0.8 = 112 \text{ MW}$$

$$Q_2 = S_2 \cdot \sin \Pi_2 = 140 \cdot 0.6 = 84 \text{ MVAR}$$

$$\bar{S}_2 = 140 \angle 36.87^\circ \text{ MVA}$$

$$\Pi_2 = 36.87^\circ$$

$$\bar{U}_2 = 220000 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$\bar{I}_2 = 367.4 \angle 36.87^\circ \text{ A}$$

$$\bar{V}_2 = 127017 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$\bar{Z}_L = 34.256 \angle 70.3^\circ \Omega = (R_L + jX_L) = (11.55 + j32.25) \Omega$$

$$\bar{Y}_L = 7.9546 \cdot 10^{-4} \angle 90^\circ \text{ siemens} = (G_L + jB_L) = (0 + j7.9546 \cdot 10^{-4}) \text{ S}$$

Con estos valores y aplicando las fórmulas dadas para este método, obtendremos:

La tensión en el centro de la línea será:

$$\bar{V}_c = \bar{V}_2 + \frac{\bar{Z}_L}{2} \cdot \bar{I}_2 = 132314 \angle 1.5^\circ \text{ V}$$

Con esta tensión ya es posible obtener la intensidad que se derivará por el condensador (como la conductancia es nula, no existirá corriente a través de ella):

$$\bar{I}_c = \bar{B} \cdot \bar{V}_c = 105.25 \angle 91.5^\circ \text{ A}$$

La intensidad total o primaria será:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_C + \bar{I}_2 = 313.13 \quad 21.59^\circ A$$

Siendo la tensión al principio de línea:

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_C + \frac{\bar{Z}_L}{2} \bar{I}_1 = 136015 \quad 3.16^\circ V$$

La intensidad de línea será: $I_{1L} = \bar{I}_{1Fase}$, mientras que la tensión al inicio de línea valdrá:

$$\bar{U}_{1L} = \sqrt{3} \cdot \bar{V}_{1Fase} = 235584 \quad 3.16^\circ V$$

El ángulo total inicial será:

$$\Pi_1 = \Pi_{U1} \quad \Pi_{I1} = 24.75^\circ$$

Comprobamos que los valores coinciden plenamente con los hallados con el método de las constantes auxiliares para el régimen de carga.

4.6.3.2 Cálculo de las condiciones eléctricas al principio de línea en régimen de vacío

Los datos de partida son los mismos que para el método anterior, es decir:

$$P_2 = S_2 = Q_2 = 0$$

$$\Pi_2 = 0^\circ$$

$$\bar{U}_2 = 220000 \quad 0^\circ V$$

$$\bar{I}_2 = 0$$

$$\bar{V}_2 = 127017 \quad 0^\circ V$$

$$\bar{Z}_L = 34.256 \quad 70.3^\circ \Omega = (R_L + jX_L) = (11.55 + j32.25)\Omega$$

$$\bar{Y}_L = 7.9546 \cdot 10^{-4} \quad 90^\circ \text{ siemens} = (G_L + jB_L) = (0 + j7.9546 \cdot 10^{-4})S$$

Con estos valores y aplicando las fórmulas dadas para este método, obtendremos:

La tensión en el centro de la línea será:

$$\bar{V}_C = \bar{V}_2 + \frac{\bar{Z}_L}{2} \bar{I}_2 = 127017 \quad 0^\circ V$$

Con esta tensión ya es posible obtener la intensidad que se derivará por el condensador:

$$\bar{I}_C = \bar{B} \cdot \bar{V}_C = 101 \quad 90^\circ A$$

La intensidad total o primaria será, recordando que $I_2=0A$:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_C + \bar{I}_2 = 101 \quad 90^\circ A$$

Siendo la tensión al principio de línea:

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_C + \frac{\bar{Z}_L}{2} \bar{I}_1 = 125389.7 \ 0.27^\circ V$$

Con los valores de línea: $\bar{I}_{1L} = \bar{I}_{1Fase}$, y de la tensión de línea que valdrá:

$$\bar{U}_{1L} = \sqrt{3} \cdot \bar{V}_{1Fase} = 217181 \ 0.27^\circ V$$

el ángulo inicial total será:

$$\Pi_1 = \Pi_{U1} \ \Pi_{I1} = 89.73^\circ$$

Comprobamos que los valores coinciden plenamente con los hallados con el método de las constantes auxiliares para el régimen de vacío, produciéndose efecto Ferranti.

4.6.4 Cálculo de las magnitudes eléctricas al principio de línea por método en \angle

Vamos a aplicar este método también en los dos regímenes, carga y vacío siendo el circuito equivalente el mostrado en la figura.

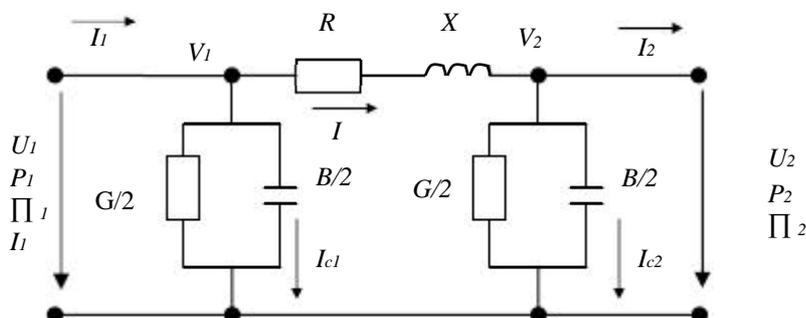


Fig. 4.16 Circuito empleado para el método del circuito equivalente en \angle

Recordar que para movernos por el circuito se utilizarán los valores de la tensión y la intensidad de fase. Por su parte, las potencias no cambian.

4.6.4.1 Cálculo de las condiciones eléctricas al principio de línea en régimen de carga

Partimos, como en los demás casos, de unas condiciones iniciales al final de línea, que son:

$$\begin{aligned}
P_2 &= S_2 \cdot \cos \varphi_2 = 140 \cdot 0.8 = 112 \text{ MW} \\
Q_2 &= S_2 \cdot \sin \varphi_2 = 140 \cdot 0.6 = 84 \text{ MVAR} \\
\bar{S}_2 &= 140 \angle 36.87^\circ \text{ MVA} \\
\varphi_2 &= 36.87^\circ \\
\bar{U}_2 &= 220000 \angle 0^\circ \text{ V} \\
\bar{I}_2 &= 367.4 \angle -36.87^\circ \text{ A} \\
\bar{V}_2 &= 127017 \angle 0^\circ \text{ V} \\
\bar{Z}_L &= 34.256 \angle 70.3^\circ \Omega = (R_L + jX_L) = (11.55 + j32.25) \Omega \\
\bar{Y}_L &= 7.9546 \cdot 10^{-4} \angle -90^\circ \text{ siemens} = (G_L + jB_L) = (0 + j7.9546 \cdot 10^{-4}) \text{ S}
\end{aligned}$$

Con estos datos obtendremos el valor de la intensidad que se deriva por la admitancia transversal (no existirá corriente a través de la conductancia, ya que su valor es nulo):

$$\bar{I}_{C2} = \bar{V}_2 \cdot \frac{\bar{B}}{2} = 50.518 \angle 90^\circ \text{ A}$$

La intensidad que pasa por la resistencia y la reactancia de la línea será:

$$\bar{I} = \bar{I}_C + \bar{I}_2 = 339.56 \angle -30^\circ \text{ A}$$

Con el valor de esta intensidad es posible hallar la tensión en el extremo inicial de la línea, ésta vendrá dada por:

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 + (R_L + jX_L) \cdot \bar{I} = 136098.5 \angle 3.17^\circ \text{ V}$$

Conocido el valor de la tensión en el origen, podemos hallar la intensidad que se deriva por la primera admitancia transversal:

$$\bar{I}_{C1} = \bar{V}_1 \cdot \frac{\bar{B}}{2} = 54.13 \angle 93.17^\circ \text{ A}$$

Conocidas I_{C1} e I , podemos hallar la intensidad en el origen:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{C1} + \bar{I} = 313.23 \angle -21.68^\circ \text{ A}$$

Siendo los valores de la intensidad al inicio de la línea: $\bar{I}_{1L} = \bar{I}_{1Fase}$

Y la tensión de línea al principio de la misma: $\bar{U}_{1L} = \sqrt{3} \cdot \bar{V}_{1Fase} = 235730.3 \angle 3.17^\circ \text{ V}$

Finalmente hallamos el ángulo total inicial: $\varphi_1 = \varphi_{U1} - \varphi_{I1} = 24.85^\circ$

Son valores muy similares a los hallados con los métodos anteriores (método en T, y método de las constantes auxiliares). Las potencias finales y el resto de parámetros ya han sido hallados en el método de las constantes auxiliares.

4.6.4.2 Cálculo de las condiciones eléctricas al principio de línea en régimen de vacío

En este caso los cálculos se simplifican, ya que no es necesario conectar la carga y por tanto la intensidad de final de línea es nula:

Si no existe carga, todas las potencias tendrán valor nulo: $P_2 = Q_2 = S_2 = 0$.

Las restantes expresiones quedarán como sigue:

Ángulo al final de la línea: $\Pi_2 = \Pi_{V2} - \Pi_{I2} = 0$

La intensidad final:

$$\bar{I}_2 = \frac{P_2}{U_2 \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \Pi_2} \left(\hat{v}_2 \quad \Pi_2 = 0 \right)$$

La intensidad que se deriva por la segunda admitancia transversal será:

$$I_{C2} = V_2 \cdot \frac{\bar{B}}{2} = 50.518 \text{ } 90^\circ \text{ A}$$

La intensidad que pasa por la resistencia y la reactancia de la línea es igual a la intensidad anterior, ya que $I_2 = 0$:

$$I = I_C + I_2 = I_C = 51.518 \text{ } 90^\circ \text{ A}$$

Con el valor de esta intensidad, es posible hallar la tensión en el extremo inicial de la línea, que vendrá dada por:

$$V_1 = V_2 + (R_L + jX_L) \cdot I = 125389 \text{ } 0.27^\circ \text{ V}$$

Conocido el valor de la tensión en el origen, podemos hallar la intensidad que se deriva por la primera admitancia transversal:

$$I_{C1} = V_1 \cdot \frac{\bar{B}}{2} = 49.87 \text{ } 90.27^\circ \text{ A}$$

Conocidas I_{C1} e I , podremos hallar la intensidad en el origen:

$$I_1 = I_{C1} + I = 101.4 \text{ } 90.13^\circ \text{ A}$$

Siendo los valores de línea: $I_{1L} = I_{1Fase}$

Y la tensión será al inicio de línea será: $U_{1L} = \sqrt{3} \cdot V_{1Fase} = 217180 \text{ } 0.27^\circ \text{ V}$

Finalmente hallamos el ángulo total inicial: $\Pi_1 = \Pi_{U1} \quad \Pi_{I1} = 89.86^\circ$

Valores que coinciden con los hallados por otros métodos.

Podemos observar que se produce efecto Ferranti, ya que se observa que $U_1 < U_2$. Por lo tanto, cuanto más larga es la línea, más importante será este efecto.

Concluyendo: con los tres métodos se obtienen valores prácticamente idénticos, aconsejándose no obstante la utilización del método de las constantes auxiliares, ya que con los otros métodos, si la línea fuese más larga, cada vez los resultados se desviarían más de los valores reales.

4.7 Cuestiones y problemas

Cuestiones

- 1 ¿Por qué es tan importante mantener la tensión, frecuencia y potencia dentro de unos valores controlados y constantes en un sistema de potencia?
- 2 ¿Cómo se expresa numéricamente una magnitud eléctrica en continua? ¿De cuántas formas puede expresarse una magnitud eléctrica en alterna?
- 3 ¿Qué valor, de entre todos los posibles, es el más utilizado para designar los valores de las magnitudes eléctricas en alterna? ¿Por qué? ¿Qué significado físico representa este valor?
- 4 Expresar los valores de la intensidad (suponiendo un ángulo Π para la tensión), para una carga óhmica, inductiva y capacitiva de una línea corta. Expresar ahora (suponiendo un ángulo Π para la intensidad) los valores de la tensión para tres cargas distintas anteriores (óhmica, inductiva, y capacitiva).
- 5 Dibujar los tres diagramas eléctricos que definen una línea corta conectada sobre una carga óhmica, inductiva, y capacitiva.
- 6 ¿Cuáles son las simplificaciones aceptadas para el cálculo de líneas eléctricas? ¿Qué puede afirmarse (considerando las simplificaciones expuestas), si se conocen todos los parámetros eléctricos en un punto de una línea?
- 7 ¿Cuándo puede considerarse una línea eléctrica como corta? ¿Por qué se adopta precisamente esa longitud? ¿Qué simplificaciones, en los parámetros eléctricos, es posible considerar en una línea de longitud corta? ¿Qué diferencias se producen en la formulación entre líneas cortas en vacío y en carga?
- 8 ¿Cuándo puede considerarse una línea eléctrica como media? ¿Por qué se adopta precisamente esas longitudes? ¿Qué simplificaciones, en los parámetros eléctricos, es posible considerar en una línea de longitud media? ¿Qué métodos pueden aplicarse para calcular una línea de longitud media?
- 9 ¿Qué características definen el método del circuito equivalente en \square ? Dibujar el circuito equivalente con sus parámetros más importantes.
- 10 Realizar la formulación para el cálculo en vacío del circuito equivalente en \square .
- 11 Realizar la formulación para el cálculo en carga del circuito equivalente en \square .
- 12 ¿Qué características definen el método del circuito equivalente en T? Dibujar el circuito equivalente con sus parámetros más importantes.
- 13 Realizar la formulación para el cálculo en vacío del circuito equivalente en T.
- 14 Realizar la formulación para el cálculo en carga del circuito equivalente en T.
- 15 ¿Cuándo se considera que una línea es de longitud larga? ¿Cómo quedan expresados los parámetros eléctricos para el cálculo de las líneas largas? ¿Cuáles son los métodos de cálculo empleados para estas líneas?
- 16 ¿Qué significa la impedancia característica de una línea eléctrica? ¿Puede darse en la realidad, por qué?
- 17 ¿Qué especificaciones son comunes a la impedancia característica? ¿Qué fórmula permite su cálculo?

- 18 ¿Qué significa el ángulo característico de una línea eléctrica? ¿En qué unidades vendrá dado este ángulo? ¿Puede darse en la realidad, por qué?
- 19 ¿Qué especificaciones son comunes al ángulo característico? ¿Qué fórmula permite su cálculo?
- 20 ¿Qué significa la potencia característica de una línea eléctrica? ¿Puede darse en la realidad, por qué?
- 21 ¿Qué especificaciones son comunes a la potencia característica? ¿Qué fórmula permite su cálculo?
- 22 Formulación del método de las funciones hiperbólicas y circulares. ¿Con qué unidades deberá estar expresado el ángulo característico para aplicar estas fórmulas?
- 23 Formulación del método del desarrollo en series de funciones hiperbólicas y circulares. ¿Con qué unidades deberá estar expresado el ángulo característico para aplicar estas fórmulas? ¿Con una línea de 200 km cuántos términos de la fórmula de las constantes sería necesario adoptar para su cálculo?
- 24 ¿Qué condiciones permiten comprobar la autenticidad de las constantes auxiliares? ¿Cuántas de las citadas condiciones son necesarias para considerar correctamente halladas las constantes auxiliares?
- 25 ¿Cuáles son las fórmulas que permiten hallar las magnitudes eléctricas al final de línea o al principio de la misma, una vez son conocidas las constantes auxiliares? ¿Cómo deben considerarse las constantes para la obtención de valores eléctricos intermedios en las líneas?
- 26 Indicar el significado físico de cada una de las constantes auxiliares. (Dar explicación y formulación.)

Problemas

Para la resolución de problemas o la consulta de problemas resueltos, remitimos al lector a la obra *Líneas y redes eléctricas* (de la misma editorial y autor) donde se presenta un capítulo con problemas sobre líneas eléctricas completamente resueltos, así como un capítulo con enunciados de problemas con sus respectivas soluciones.

III Riesgos eléctricos y protección de sistemas de potencia

Presentación

En este tercer módulo, formado por tres capítulos, se describe una de las partes más importantes de la electricidad, ya que como toda fuente de energía presenta problemas de seguridad. En la actualidad se ha avanzado mucho en las protecciones relegando la energía eléctrica a los últimos puestos de siniestralidad, pero cuando el accidente llega a producirse suele tener consecuencias graves.

El capítulo V nos introduce en la problemática de los accidentes eléctricos. Así, desde el desenganche del accidentado o la petición de ayuda hasta la aplicación de los primeros auxilios, serán tratados en los primeros apartados. Seguidamente se repasarán las magnitudes eléctricas que influyen en un accidente eléctrico (intensidad, tensión, frecuencia, tiempo de contacto, presión, estado fisiológico, etc.). También en este capítulo se tratará de la electricidad estática así como la forma de prevenirla aplicando los métodos de protección más acordes en cada caso. Finalmente, se introducirán los dos tipos de contactos eléctricos más importantes: el contacto directo y el contacto indirecto.

El capítulo VI versa de los sistemas de protección más empleados, tanto en baja como en alta tensión. Sobrecargas, cortocircuitos, fugas a tierra, perturbaciones, etc. serán regímenes analizados en profundidad. La comprensión de estos efectos determinará cuál es la protección más adecuada para cada situación en concreto: así los relés térmicos, magnéticos, diferenciales, fusibles, etc. serán analizados en detalle. La coordinación de las protecciones eléctricas será tratada asimismo en este capítulo. Finalmente se realizará un amplio resumen de todos los sistemas eléctricos, divididos por tipos de faltas. Se analizarán los sistemas de prevención y los sistemas de protección, con todos los subsistemas que llevan incorporados (sistemas de protección individual, sistemas de protección contra contactos directos e indirectos, etc.).

Finalmente, en el capítulo VII se expone uno de los sistemas de protección más empleados: la puesta a tierra. Dada la importancia de este sistema, se dedica un capítulo completo al mismo, donde se detallan desde los principios más básicos: conocer los tipos de terreno, los electrodos, o los puntos de puesta a tierra, hasta saber efectuar la instalación exterior de la misma. Asimismo se detallarán los elementos a conectar a tierra, así como la forma de realizar los cálculos de la resistencia de paso a tierra utilizando los métodos más comunes. También se introducirá la forma de efectuar la medida experimental de la puesta a tierra en el propio terreno, para finalizar con las pautas a seguir para efectuar una correcta revisión y mantenimiento de las instalaciones de puesta a tierra.

Con la lectura y comprensión de estos capítulos se intenta acercar al lector a la problemática de los riesgos eléctricos, y sobre todo, a los sistemas de protección. Solamente conociendo las causas y efectos que la energía eléctrica produce sobre el organismo humano seremos capaces de evitarla y prevenirla eficazmente, creando sistemas de protección más acordes y seguros.

Unas cuestiones y ejercicios al final de cada capítulo permiten al lector evaluar su nivel de asimilación de la materia, aparte de resultar una forma rápida de repasar, *a posteriori*, cualquier duda o concepto sobre un capítulo.

Contenidos

- Capítulo V: Riesgos eléctricos
- Capítulo VI: Protección de los sistemas de potencia
- Capítulo VII: Puesta a tierra

Objetivos

Riesgos Eléctricos

- Comprender la peligrosidad de la energía eléctrica
- Diferenciar los tipos de accidentes eléctricos
- Conocer los efectos fisiológicos que produce un accidente eléctrico. *Shock* eléctrico, paro respiratorio, paro circulatorio, quemaduras, etc
- Saber realizar el rescate y desenganche del fluido eléctrico de un accidentado
- Saber aplicar los primeros auxilios y el transporte del afectado delante de un accidente eléctrico
- Conocer los efectos de las diversas magnitudes eléctricas en el cuerpo humano: intensidad, tiempo de contacto, tensión de contacto, superficie y presión de contacto, frecuencia, recorrido de la corriente, etc
- Conocer la electricidad estática
- Conocer qué medidas de protección existen contra la electricidad estática
- Saber aplicar en cada caso las medidas de protección más acordes
- Efectos de la electricidad estática sobre el organismo
- Conocer las medidas de protección individual contra la electricidad estática
- Distinguir entre los dos tipos de accidentes eléctricos más frecuentes: el contacto directo y contacto indirecto

Protección de los sistemas eléctricos

- Comprender la necesidad de protección de los sistemas eléctricos
- Conocer las características que definen una sobrecarga en un sistema eléctrico
- Diferenciar las sobrecargas de los cortocircuitos. Tanto en sus características como en su peligrosidad
- Entender las fugas a tierra
- Saber cómo funciona el relé térmico
- Saber cómo funciona el relé magnético
- Comprender los principios básicos de los relés diferenciales
- Conocer el funcionamiento y los tipos de fusibles existentes
- Saber realizar la coordinación de los sistemas de protección
- Diferenciar entre la coordinación principal y los sistemas de coordinación secundarios
- Conocer los tipos de contactos eléctricos
- Conocer los sistemas de protección de prevención y los sistemas de protección de las instalaciones
- Conocer los equipos de protección individual
- Qué técnicas de seguridad se utilizan para los contactos eléctricos directos
- Saber las técnicas de seguridad que se emplean delante de los contactos eléctricos indirectos

Puesta a tierra

- Comprender el significado y la necesidad de la protección mediante la puesta a tierra
- Conocer la definición de la puesta a tierra
- Saber las partes que forman una puesta a tierra
- Conocer las características más importantes de los terrenos donde se efectúa la puesta a tierra
- Reconocer los electrodos naturales y artificiales
- Saber las características más importantes de los electrodos naturales: mallas
- Saber las características más importantes de los electrodos artificiales: picas, placas y conductores enterrados
- Saber qué es la línea de enlace con tierra
- Conocer el punto de puesta a tierra con las características que lo definen: número de puntos, situación, instalación, etc
- Conocer la instalación exterior de la puesta a tierra: línea principal de tierra, línea secundaria de tierra y conductores de protección
- Conocer la resistencia de paso a tierra, así como la forma de medirla
- Conocer qué elementos deben conectarse a tierra
- Saber qué es la tensión de contacto y la tensión de paso a tierra
- Saber realizar el cálculo de la resistencia de paso a tierra utilizando los métodos más comunes
- Saber efectuar la medición de la puesta a tierra y del terreno
- Conocer las medidas a aplicar para efectuar un correcto mantenimiento y revisión de las instalaciones de puesta a tierra

5 Riesgos eléctricos

5.1 Introducción

La electricidad se ha convertido en una fuente de energía indispensable en cualquier país industrializado, esto es debido tanto a su facilidad de generación, transporte y consumo. Pero como, cualquier otro tipo de energía, encierra unos riesgos que hay que asumir mediante métodos de prevención (medidas encaminadas a evitar el peligro) o de protección (medidas para evitar las consecuencias del accidente).

En los accidentes de tipo eléctrico interviene una cantidad de energía que se transforma. Según se produzca esta transformación, podemos clasificarlos en:

- Accidentes inmediatos: cuando la energía se transforma directamente sobre las personas, causándole lesiones orgánicas y, por tanto, la electricidad es la causa directa del accidente.
- Accidentes mediatos: cuando la electricidad desencadena un proceso energético que da lugar a un accidente de otra naturaleza, siendo por tanto la corriente eléctrica la causa indirecta.

Los accidentes eléctricos no son demasiado frecuentes, pero suelen revestir gran gravedad, es por ello que las medidas de prevención y protección han de extremarse de forma permanente. En este capítulo se detallan primeramente los efectos que se producen en un accidente eléctrico, así como los primeros auxilios a aplicar en cada caso. Seguidamente se exponen como influyen las diversas magnitudes eléctricas en un accidente eléctrico. Posteriormente se realiza un estudio de la electricidad estática, acompañado de las medidas correctoras, para finalmente exponer los dos tipos de accidentes eléctricos más usuales: contacto directo y contacto indirecto.

5.2 Primeros auxilio en un accidente de origen eléctrico

5.2.1 Introducción

Los accidentes de tipo eléctrico no son por fortuna muy numerosos, pero revisten gran gravedad, siendo ésta la causa de las rígidas y numerosas medidas de seguridad para su prevención y eliminación, evitándose de esta forma, situaciones francamente peligrosas y dolorosas.

La electricidad es tanto más peligrosa, por no avisar a nuestros sentidos: no se oye, no se huele y no se ve. Solamente en líneas a tensiones muy elevadas es posible detectar su existencia, ya que en estas circunstancias, sí se percibe un intenso olor a ozono, así como un zumbido similar al de un enjambre de abejas, pero esto no ocurre con tensiones calificadas de medias o bajas, que por otra parte son las más accesibles y próximas a los seres humanos.

En un accidente de origen eléctrico debe actuarse con rapidez, pero en la medida de lo posible, con serenidad, ya que son muchos los factores que influyen en este tipo de accidentes, siendo por tanto muy apreciada una conducta estable, para que ésta sea realmente eficaz.

Los pasos que se deben seguir son bien concretos, formados por tres etapas básicas bien diferenciadas.

- Petición de ayuda
- Rescate o desenganche del accidentado
- Aplicación de los primeros auxilios para mantener a la víctima con vida hasta que llegue la ayuda médica

5.2.2 Petición de ayuda

Como primera medida debe darse la alarma, esperando que alguien acuda para ayudarnos, así como para avisar al servicio médico de urgencia y al electricista, mientras se trata de prestar auxilio al accidentado. Los accidentados de origen eléctrico suelen presentar con frecuencia quemaduras y lesiones internas graves; es importante, por tanto, al realizar la petición de ayuda indicar el origen eléctrico del accidente, ya que una ambulancia provista de una UCI móvil, con desfibrilador cardiaco y posibilidad de alcalinización para las quemaduras, será de gran ayuda.

5.2.3 Rescate o desenganche del accidentado

Al producirse un accidente de origen eléctrico pueden ocurrir dos situaciones opuestas: que la víctima quede pegada al elemento con tensión, o por el contrario, que la víctima sea proyectada violentamente lejos del elemento responsable del accidente.

Si la víctima ha quedado en contacto con un conductor o pieza bajo tensión, deberá ser separada del contacto como primera medida, antes de empezar a aplicarle los primeros auxilios. Para ello:

- 1 Se cortará la corriente accionando el interruptor, disyuntor, seccionador, etc. Si la persona accidentada estaba trabajando en altura, se dispondrá de las medidas necesarias para amortiguar el golpe cuando se produzca el desenganche, estas medidas pasan por la colocación de colchones, ropa, goma, o sujetar entre varias personas una lona o manta.
- 2 Si resultara imposible cortar la corriente o se tardara demasiado, por encontrarse lejos el interruptor, se deberá desenganchar a la persona electrizada mediante cualquier elemento no conductor (palo, tabla, silla, rama seca, etc.) con el que, a distancia, hacer presa en el cable o en el accidentado, o asiéndole de la ropa estando el auxiliador bien aislado.

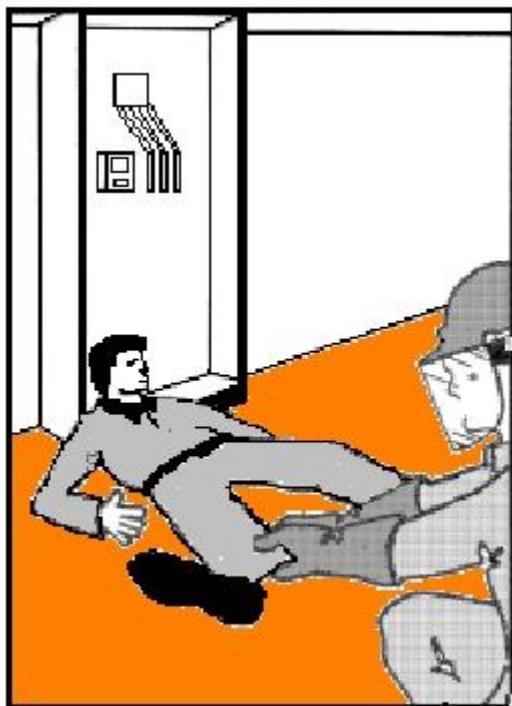


Fig. 5.1 Rescate mediante desenganche del accidentado

5.2.4 Aplicación de los primeros auxilios

En este apartado se dan las indicaciones básicas necesarias para mantener a la persona accidentada con vida hasta la llegada de los servicios médicos; estas medidas pasan por:

5.2.4.1 Reanimación

Después de un accidente eléctrico, es frecuente que se presente un estado de muerte aparente que puede ser debido a causas diferentes: *shock* eléctrico, quemaduras, paro respiratorio, asfixia, paro cardiovascular, fibrilación cardíaca, etc, requiriéndose en cada caso conductas diferentes.

5.2.4.1.1 *Shock* eléctrico

Se trata de una pérdida transitoria del conocimiento, pero sin paro respiratorio, ni circulatorio. Los latidos cardíacos y el pulso son perceptibles, la pupila presenta un tamaño normal y la presión arterial se mantiene en unos valores normales. La forma de actuar delante de un *shock* pasa por colocar al accidentado acostado sobre un lado, en posición de seguridad (decúbito lateral), controlando la respiración y el estado de la circulación sanguínea, mientras se espera la llegada de atención médica.



Fig. 5.2 Posición de seguridad o de decúbito lateral

Resulta imprescindible, después de una pérdida de consciencia, un reconocimiento médico general del accidentado, evitándose de esta forma posibles efectos secundarios que podrían aparecer incluso horas después de producirse el accidente.

5.2.4.1.2 Paro respiratorio

En este caso, además de la pérdida de conciencia se presentan otros síntomas como la falta de respiración, acompañada o no de cianosis (coloración azulada de las zonas corporales más alejadas debido a la falta de oxígeno, como pueden ser dedos, pies, labios, etc.). Por el contrario, el pulso es perceptible y la pupila conserva su tamaño normal.

La forma de actuar pasa por emprender inmediatamente la asistencia respiratoria, de preferencia mediante un método bucal directo. Este método es fácil de aplicar incluso en situaciones difíciles (en lo alto de un poste eléctrico, o en la mitad del mismo, cuando se desciende al accidentado, etc.), no presentando complicaciones secundarias y permitiendo un continuo control de su eficacia. Se debe tener presente la posibilidad de problemas respiratorios posteriores al accidente, siendo necesario un examen médico posterior así como un periodo de vigilancia en centros sanitarios del accidentado. Aunque es un método sin problemas, no debe realizarse directamente, siendo aconsejable interponer una gasa, o incluso ropa, etc., evitándose así el contacto directo.

5.2.4.1.3 Paro circulatorio

Esta es una de las consecuencias más peligrosas debidas a los accidentes eléctricos, siendo necesaria una actuación inmediata y eficaz para evitar males mayores.

A los síntomas anteriormente descritos, se suman en este caso tres signos definitorios:

- Palidez
- Ausencia de pulsos periféricos y latidos cardíacos
- Midriasis (dilatación de la pupila, ésta puede alcanzar tamaños de hasta 4 mm)

La consecuencia inmediata de un paro cardiovascular es la falta de circulación de la sangre por las arterias, esta sangre compuesta por glóbulos blancos (leucocitos, responsables de mantener a la misma en perfecto estado, evitando sus enfermedades), de glóbulos rojos (hematíes, que contienen la hemoglobina responsable del transporte del oxígeno) y plasma (masa líquida que contiene las plaquetas responsables de la coagulación, así como iones de diversas sustancias químicas), al no llegar a los órganos vitales, en especial al cerebro, ocasiona un deterioro rápido del mismo, pudiéndose considerar las lesiones producidas en el mismo como irreversibles al cabo de pocos minutos.

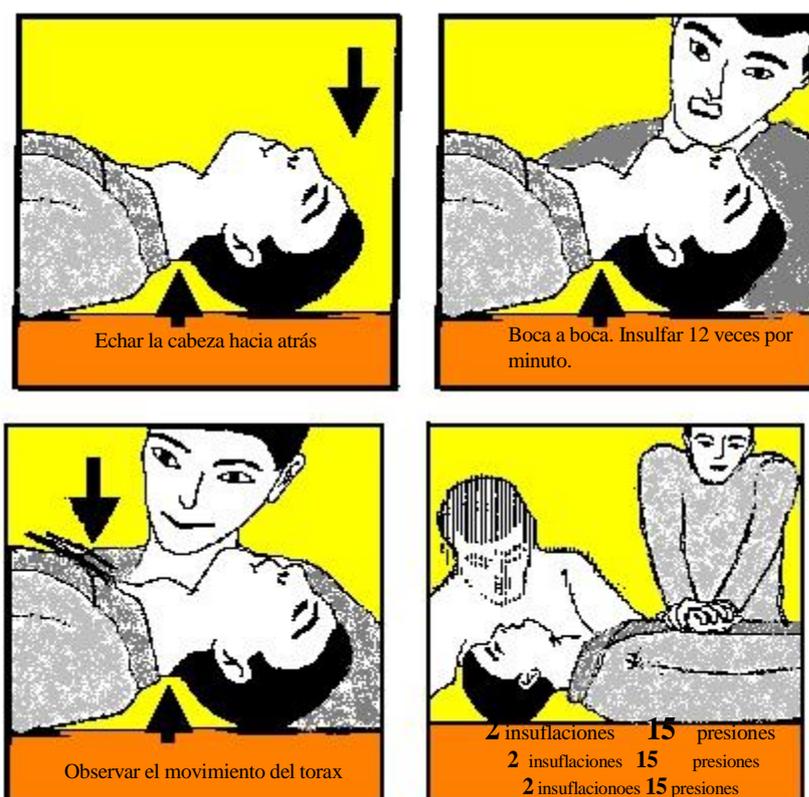


Fig. 5.3 Reanimación cardiorespiratoria

Ante esta situación, se debe proceder de forma inmediata a la aplicación de asistencia cardiorrespiratoria, utilizando la técnica del masaje cardíaco externo, unido al método de la respiración artificial, permitiendo ambos métodos mantener una circulación sanguínea y respiratoria suficiente, a la espera de la llegada de los servicios médicos. Este es un método eficaz, pero de más difícil factura, conllevando peligros asociados si no se realiza de forma correcta, siendo por tanto interesante, que los operarios adquieran unos conocimientos mínimos de socorrismo mediante cursos o charlas que les permitan actuar con seguridad delante de un accidente laboral.

5.2.4.1.4 Quemaduras

En los accidentes de tipo eléctrico es frecuente que se produzcan quemaduras de diversa gravedad, en tal caso existen dos complicaciones que amenazan al accidentado: el *shock* (producido por la pérdida

de agua con el consiguiente riesgo de deshidratación) y la infección (debida a la desaparición de la capa protectora de la piel quedando la parte lesionada expuesta a los agentes externos).

Las quemaduras de primer grado son poco profundas (afectan solo a la epidermis), pero son dolorosas; consisten en un enrojecimiento de la piel que cura transcurridos unos diez días. En estos casos es suficiente con cubrir la parte afectada con una compresa estéril. Si no existe ya riesgo de contacto eléctrico, es conveniente sumergir la parte quemada en agua fría o bien cubrirla con compresas empapadas también con agua fría. No debe ponerse nunca la parte quemada delante de un chorro de agua.

Las quemaduras de segundo grado suelen afectar tanto a la epidermis, como a las capas más superficiales de la dermis, provocando la separación de las mismas. Esta separación deja espacios libres que son ocupados por líquidos en descomposición con su característico color amarillo, formando las ampollas habituales de este tipo de lesiones. Estas ampollas desaparecen al cabo de diez días, curando las lesiones en un periodo de tres semanas. También en este caso es suficiente con cubrir la parte afectada con una compresa estéril y, siempre que no exista ya riesgo de contacto eléctrico, sumergir la parte quemada en agua fría, o bien, cubrirla con compresas empapadas también con agua fría. Tampoco en este caso no debe ponerse la parte quemada delante de un chorro de agua.

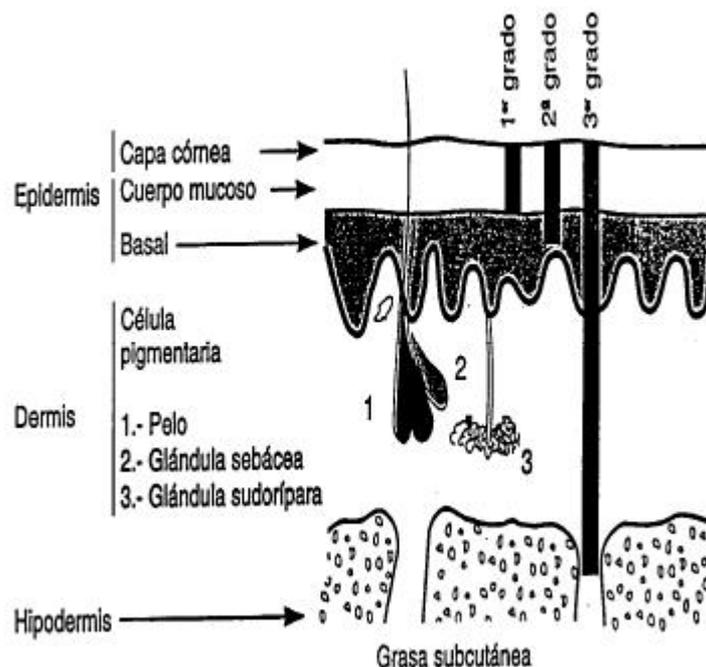


Fig. 5.4 Las diversas capas que forman la piel humana con los tres grados de quemaduras

En las quemaduras de tercer grado (quemaduras que afectan a la epidermis, dermis e incluso a la hipodermis), existe el riesgo de necrosis de la piel (destrucción de la misma con apariencia negruzca). Esta destrucción afecta en ocasiones a las terminaciones nerviosas, perdiéndose el tacto y no produciéndose dolor inicialmente. La destrucción de la piel también ocasiona la pérdida de importantes cantidades de líquido por parte del organismo. Ante estas quemaduras es importante detectar aproximadamente la superficie del cuerpo afectada, ya que los efectos serán muy diferentes:

- Superficie afectada > 15-20 % de la superficie cutánea total: La pérdida de líquido puede producir un *shock*.
- Superficie afectada > 50% de la superficie cutánea total: Las quemaduras pueden considerarse mortales.

Ante la gravedad de las quemaduras es importante el rápido traslado del accidentado a centros sanitarios que dispongan de unidades para grandes quemados. En el traslado, resulta de gran utilidad disponer de ambulancias con sistemas de alcalinización para evitar una pérdida peligrosa de líquido por parte del organismo, aparte de desfibriladores para la reanimación cardiaca.

El arco eléctrico es uno de los principales causantes de las quemaduras. En estos casos la ropa del accidentado suele arder, y el método de ayuda será el siguiente:

1. Apagar las llamas sofocándolas con una manta, arena o cualquier otro material incombustible. Nunca utilizar agua, ya que ésta es conductora.
2. No desvestir nunca al quemado, ya que las ropas pueden hallarse adheridas a la piel, corriéndose el riesgo de arrancarla.
3. Si las ropas son de tejido sintético y siguen ardiendo, deben mojarse con agua frecuentemente, después de haber retirado al accidentado de la zona de peligro y de asegurarnos que no existe riesgo de contacto eléctrico. Un cable eléctrico en tensión cercano al accidentado junto con el agua utilizada por los auxiliares puede representar un peligro importante de electrocución si llegan a entrar en contacto.

5.2.4.1.5 Transporte del accidentado

En todos los casos en que se haya observado un estado de muerte aparente, aunque sea de corta duración, es necesario hospitalizar al accidentado al objeto de que sea sometido a un detenido examen médico.

Asimismo en los casos en que el accidentado haya sufrido quemaduras, exceptuando las insignificantes, debe ser enviado a un centro asistencial especializado en el tratamiento de quemados. Esto implica, como es lógico, que el socorrista sepa apreciar la importancia de las mismas (regla de los nueve).

El transporte del electrocutado hacia un centro hospitalario deberá ser rápido y seguro, por ello, siempre que sea posible, será realizado por personal asistencial especializado. De esta forma se puede seguir con la reanimación durante el viaje, aplicar medios de reanimación más elaborados, o efectuar una desfibrilación después del control electrocardiológico, aparte es posible que sea necesario realizar una rehidratación y alcalinización en caso de trayecto largo, si el accidentado sufre quemaduras.

5.3 Efectos de la corriente eléctrica sobre el organismo humano

5.3.1 Generalidades

La energía eléctrica, en su forma de corriente continua o alterna, al circular por el cuerpo humano, produce diversos efectos sobre el organismo, como consecuencia de los cuales los órganos y sus

mecanismos de funcionamiento se ven seriamente alterados, llegando a su total inhibición. Son también diferentes los efectos que produce la electricidad si se trata de alta tensión o de baja tensión. En alta tensión los órganos quedan totalmente destruidos, mientras que en baja tensión se produce un mal funcionamiento o parada de los mismos, pero normalmente sin llegar a su destrucción.

Los efectos fisiológicos que la corriente eléctrica produce al circular por el organismo dependen de diversos factores, entre los cuales podemos destacar:

- Intensidad de corriente
- Tiempo de contacto
- Tensión y resistencia del organismo
- Presión de contacto
- Superficie de contacto
- Frecuencia de la corriente
- Recorrido de la corriente y naturaleza del accidentado
- Otras condiciones fisiológicas (edad, estado físico, etc)

5.3.2 Influencia de la intensidad de corriente

La intensidad de corriente es el principal efecto eléctrico que se produce sobre el cuerpo humano, es además la causante del mal funcionamiento de los diversos órganos al producirse un accidente.

Considerando el cuerpo humano como una resistencia eléctrica, la intensidad que recibe un accidentado depende de la tensión y de su resistencia, de acuerdo con la ley de Ohm:

$$Intensidad = \frac{Tensión}{Resistencia} \quad [5.1]$$

Por tanto, cuando mayor sea la tensión, mayor será la intensidad, siempre que haya suficiente potencia de alimentación. Voltajes considerados como de baja tensión, 220 V o 380 V, pueden producir intensidades que provocan la electrocución.

La intensidad actúa de diferente forma dependiendo de si nos encontramos con baja tensión, que es la principal causa de los accidentes, o de si nos encontramos con media o alta tensión, donde el voltaje pasa a ocupar el primer lugar entre las magnitudes peligrosas. Es decir, mientras que en baja tensión es la intensidad la que provoca un mal funcionamiento de los órganos vitales, siendo la tensión no suficientemente elevada para destruirlos; en alta tensión también la intensidad es perjudicial, pero como existen tensiones tan elevadas, serán éstas las que provoquen la destrucción de los órganos vitales, considerándose, por tanto, como la causa principal del accidente en alta tensión.

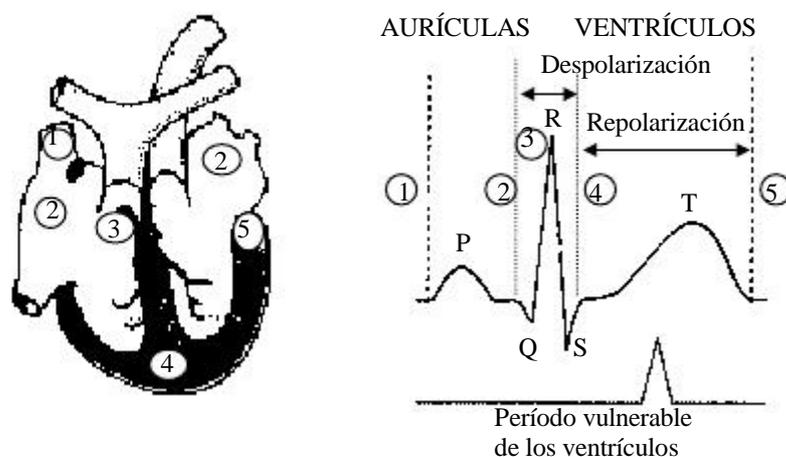


Fig. 5.6 Período vulnerable de los ventrículos del corazón

Se debe evitar que el periodo de exposición a un contacto eléctrico supere los 0.15 s, ya que este es el tiempo que tarda en producirse la repolarización de corazón. Si el tiempo de contacto eléctrico es menor que el tiempo de repolarización, el corazón intentará volver a su estado normal. Por el contrario, si el periodo del contacto supera al de repolarización, el corazón no podrá volver a su estado normal produciéndose arritmias o fibrilación ventricular.

Los efectos fisiológicos producidos por la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano en situaciones normales para personas adultas con un peso mínimo de 50 Kg, suponiendo que la corriente circula de brazo a brazo, o de brazo a pie, y para frecuencias de 50/60 Hz, son los siguientes.

1. Hasta 2 mA:

- La corriente eléctrica prácticamente no llega a notarse, solo una pequeña sensación de dolor nos avisa de su existencia. Mano adormecida.

2. De 2 a 10 mA:

- Movimientos reflejos musculares (calambres). La corriente eléctrica provoca dolor intenso, pero somos capaces de soltarnos sin problemas del elemento en tensión.

3. De 10 a 25 mA.

- Hacia los 15 mA (umbral de tetanización), se inicio la tetanización de las extremidades (manos, brazos y piernas) siendo difícil soltar los objetos que se tienen asidos en tensión. Hacia los 20 mA, la tetanización es más completa afectando al aparato respiratorio, aumentando la presión arterial y sufriendo contracciones de brazos. Se producen quemaduras de primer grado (afectan a la epidermis, enrojecimiento de la piel y son dolorosas).

4. De 25 mA a 40 mA:

- La tetanización es ya prácticamente total.
- Paros respiratorios continuos; a partir de 4 segundos, se produce asfixia y cianosis.
- Inicios de paros cardiacos intermitentes.
- Quemaduras de segundo grado (afectan a la epidermis y dermis, enrojecimiento de la piel, ampollas, son también muy dolorosas).

5. Superior a 40 mA.
 - Todos los síntomas anteriores, más fibrilación ventricular.
 - Quemaduras de tercer grado, (afectan a la epidermis y dermis, más la hipodermis, se produce necrosis de la piel, caída del vello, pérdida de la sensibilidad, etc. no suelen ser dolorosas al estar destruidas las terminaciones nerviosas).

5.3.3 Influencia del tiempo de contacto

La norma CEI 479-2 (Comisión Electrotécnica Internacional) ha establecido unas curvas que delimitan las distintas zonas de peligro de la corriente eléctrica en función del tiempo.

El diagrama corresponde al efecto del paso de la corriente eléctrica alterna de 50 Hz a través de las extremidades del cuerpo humano con un peso superior a los 50 Kg y en el cual se puede apreciar que los riesgos en el interior de cada zona se agravan en función de la intensidad de corriente y del tiempo de circulación de ésta. En este gráfico se pueden observar cuatro zonas bien delimitadas.

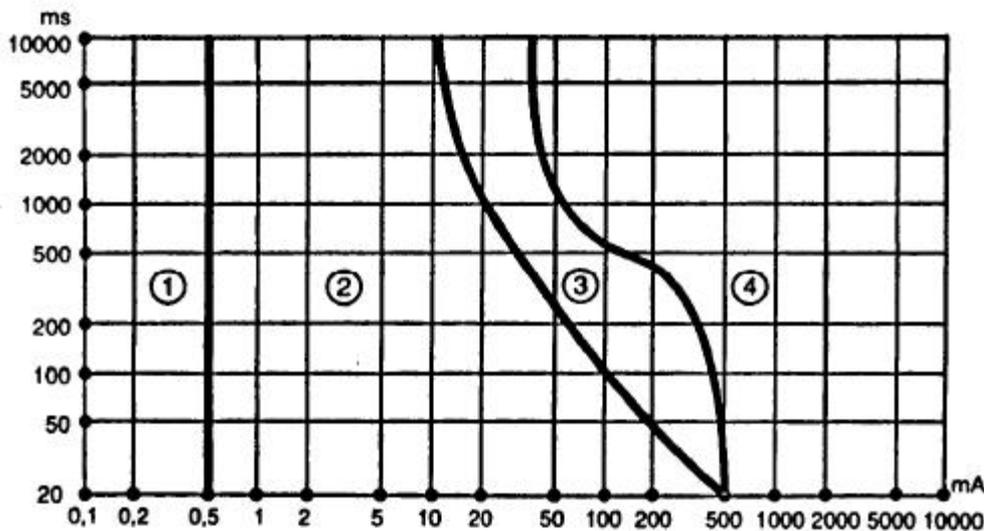


Fig. 5.6 Norma CIE 479-2. Zonas de peligro para la corriente eléctrica

1. Zona 1. No aparece ninguna reacción. Esta curva es independiente del tiempo y está limitada por la intensidad de 0.5mA.
2. Zona 2. La corriente se nota produciendo cosquilleo e incluso dolor, pudiendo el sujeto soltarse del electrodo. Generalmente no es de esperar ningún efecto fisiológico patológico. Esta zona está delimitada por una curva que obedece a la expresión $I_m = 10 + 10/t$, a esta curva se la denomina curva de seguridad.
3. Zona 3. No presenta habitualmente riesgo de fibrilación ventricular, aunque existe la posibilidad de asfixia, tetanización, quemaduras etc. Esta zona está delimitada por una curva como se expresa en el gráfico.
4. Zona 4. En esta zona existe riesgo de fibrilación ventricular, aparte de los riesgos añadidos de las zonas anteriores.

Los riesgos en el interior de cada zona se agravan en función de la intensidad de corriente y del tiempo de circulación de ésta. Es importante destacar que la protección que nos ofrecen los interruptores

diferenciales de alta sensibilidad (30 mA), no es suficiente para prevenir por completo la fibrilación ventricular, siendo necesario delimitar también el tiempo de contacto a 50 ms.

Los efectos de la corriente continua son, generalmente, alrededor de cuatro veces menos peligrosos que los efectos de la corriente alterna a 50 Hz, en igualdad de tensión e intensidad. Es sin embargo importante tener presente los fenómenos electrolíticos que, sobre el cuerpo humano, puede originar la corriente continua debido a que el plasma sanguíneo incorpora iones de potasio, sodio etc., sensibles a las corrientes que no cambian de sentido, produciéndose la descompensación química del organismo.

5.3.4 Influencia de la tensión y resistencia del organismo

La influencia de la tensión se manifiesta por cuando de ella depende la intensidad de la corriente que pasa por el cuerpo, ya que:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{\text{Tensión}}{\text{Resistencia}} \quad [5.2]$$

Por tanto, cuanto mayor sea la tensión, mayor podrá ser el valor de la corriente eléctrica, es decir, con una tensión de 380 V hay más peligro que con una tensión de 220 V, pero pueden producirse efectos desconcertantes. La tensión también actúa haciendo disminuir el valor de la resistencia del cuerpo humano, volviendo a incrementarse el valor de la intensidad.

Para una tensión fija aplicada al cuerpo humano, la corriente que circula depende de la resistencia que presenta el organismo. Sin embargo ésta es muy variable y depende de multitud de circunstancias, tanto internas como externas, tales como:

- Condiciones fisiológicas y estado de la piel
- Tensión de contacto
- Espesor y dureza de la piel
- Presión de contacto
- Superficie de contacto
- Recorrido de la corriente por el cuerpo
- Estado fisiológico del organismo

La piel es el órgano que aísla al cuerpo humano del medio exterior, y en especial de la electricidad, ya que es mala conductora. Así, delante de una corriente continua, la piel opone mayor resistencia que ante una corriente alterna; esto es debido a que la piel (conjunto epidermis-dermis) se comporta como un condensador ante de corrientes continuas, impidiendo y retrasando el paso de la corriente hacia el interior del cuerpo humano. En corriente alterna, al variar la intensidad de forma senoidal, este efecto no se produce, resultando que intensidades totalmente tolerables en corriente continua provocan la electrocución en corriente alterna.

Una piel rugosa y seca puede ofrecer una resistencia cercana a los 50000 Ω , mientras que una piel fina y húmeda por el sudor o por el agua puede presentar una resistencia de 1000 Ω . La resistencia de los tejidos internos es muy pequeña, unos 500 Ω , debido a que están impregnados de líquidos conductores y sustancias químicas, siendo indiferente la longitud del camino recorrido. Estas diferencias tan significativas determinan que tensiones de 220 V sean perfectamente pasables ante de pieles en extremo rugosas, provocando simplemente molestias, y por el contrario esta misma tensión es más que suficiente, con pieles normales, para producir la electrocución.

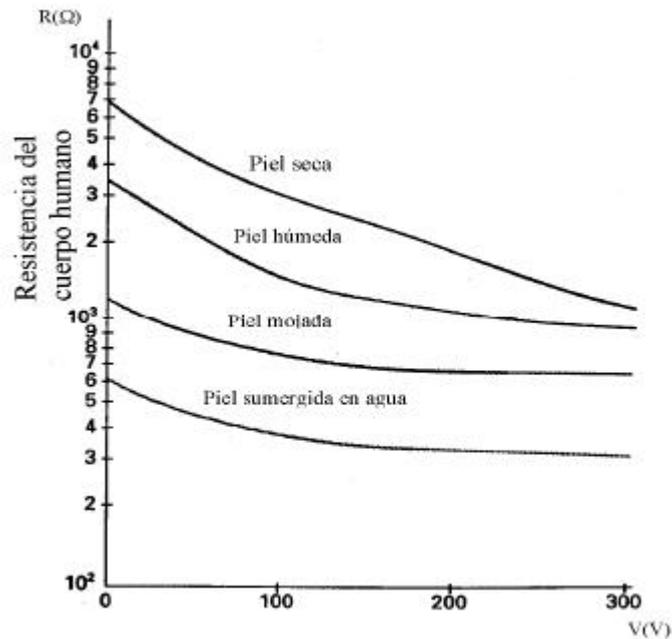


Fig. 5.7 Variación de la resistencia humana en función de la tensión y de la humedad

En cuanto a la presión de contacto, cabe decir que a más presión, mejor paso de la energía eléctrica, por eliminarse los espacios entre la piel y el objeto con tensión, aumentando la gravedad del accidente.

También cabe destacar, en lo referente a la superficie de contacto, que, a más superficie de contacto, menor densidad de corriente y por tanto menos quemaduras y perforación de la piel. Por el contrario, si el contacto es puntiforme, la densidad de corriente aumentará enormemente, produciéndose quemaduras que acabarán por perforar la piel y permitirán el paso de la intensidad hacia los órganos vitales.

El valor de la resistencia del cuerpo varía según la tensión que se aplica al mismo. Este efecto es debido a que, al aumentar la tensión, aumenta la posibilidad de quemaduras, con la consiguiente perforación de la piel. Cada punto perforado representa un camino sencillo para el paso de la corriente, resultando disminuida en cierta medida la resistencia del cuerpo humano

Es difícil precisar de forma concreta la resistencia del cuerpo humano que, como hemos visto, depende de muchas variables, pero considerando largas series de ensayos se pueden adoptar unos valores aproximados que se toman como referencia. Estos valores varían también con la humedad, adoptándose en termino medio los siguientes:

- Resistencia de la piel en ambientes secos: 5000 Ω
- Resistencia de la piel en ambientes húmedos: 2400 Ω
- Resistencia de la piel en ambientes muy húmedos o mojados: 1200 Ω

Considerando como valor de la corriente completamente seguro para no sufrir alteraciones fisiológicas los 10 mA, resultarán unas tensiones de seguridad de valor:

- Ambientes secos: $V_s = R \cdot I = 5000 \cdot 10e^{-3} = 50 \text{ V}$
- Ambientes húmedos: $V_s = R \cdot I = 2400 \cdot 10e^{-3} = 24 \text{ V}$
- Ambientes muy húmedos o mojados: $V_s = R \cdot I = 1200 \cdot 10e^{-3} = 12 \text{ V}$

5.3.5 Influencia de la frecuencia de la corriente

Hemos visto que los efectos de la corriente eléctrica alterna a 50/60 Hz, son como cuatro veces más peligrosos que los producidos por la corriente continua a igualdad de valores. ¿Quiere esto decir que a medida que se aumenta la frecuencia, aumenta la gravedad de los accidentes?. La respuesta es, no, al contrario, a medida que aumentamos la frecuencia, una vez sobrepasados los 50 Hz, disminuye la peligrosidad de la electricidad, de forma que a frecuencias superiores a los 100.000 Hz, con tensiones bajas (220 V o 380 V), sólo se producen quemaduras.

Para entender esta curva de peligrosidad eléctrica en función de la frecuencia, se debe recurrir al efecto pelicular, que se daba en las líneas de transporte de energía eléctrica. Este efecto producía un aumento de la resistencia eléctrica en el interior de los cuerpos con respecto a la que ofrecía la periferia, obligando a que los electrones (intensidad) se situaran en la superficie, impidiendo su circulación por el interior.

Aunque el cuerpo humano no es un buen conductor, también sufre este efecto a frecuencias altas, resultando que la intensidad no penetra hacia el interior del cuerpo, no pudiendo afectar a los órganos vitales internos, con lo que se evita la electrocución con tensiones bajas. Este es el caso de la corriente eléctrica a alta frecuencia (aparatos electroquirúrgicos o electrobisturíes, los cuales funcionan a 450.000 Hz con tensiones que a frecuencias bajas serían mortales, y que trabajando con estas elevadas frecuencias no producen en el organismo más efecto que el calentamiento de los tejidos, por efecto Joule).

En resumen, la frecuencia más peligrosa para los seres vivos está precisamente alrededor de los 50 Hz o 60 Hz, es decir, el rango de frecuencia más utilizada. Si aumentamos la misma, disminuye su peligrosidad, y si la disminuimos (corriente continua), también se disminuyen sus efectos negativos.

5.3.6 Influencia del recorrido de la corriente.

La corriente eléctrica es inversamente proporcional a la resistencia, aumentando ésta con la longitud.

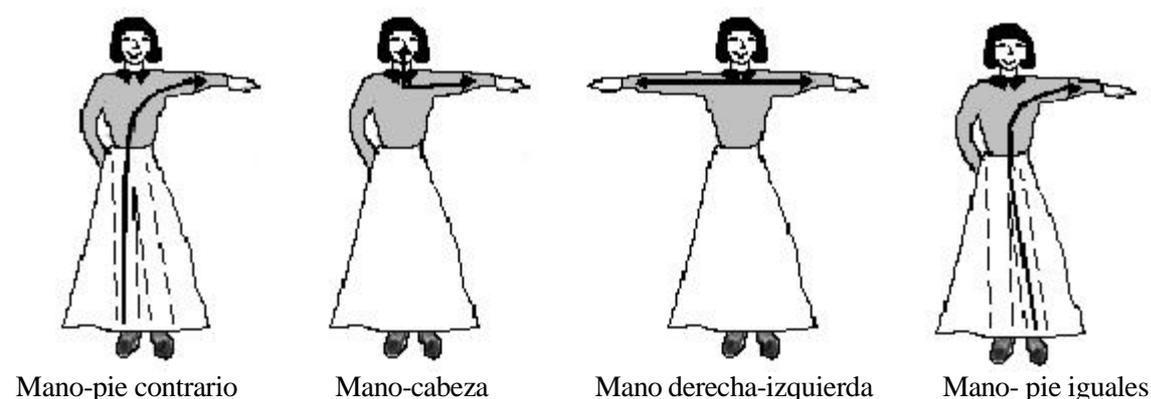


Fig. 5.8 Diversas trayectorias de la corriente eléctrica a través del cuerpo humano

Es por este motivo que la corriente eléctrica siempre seguirá la trayectoria más fácil, es decir, normalmente la más corta entre dos puntos consecutivos de contacto. Se debe también recordar que, la corriente eléctrica es la máxima responsable de la gravedad de los accidentes de origen eléctrico.

Evidentemente, los accidentes serán mucho más graves si en el trayecto de la corriente se encuentran órganos vitales como los pulmones, corazón o cerebro (trayecto normal cuando se produce un contacto mano-mano, o mano-pie) que si el contacto se produce entre los dos dedos de una misma mano, puestos en los contactos de una toma de corriente, por ejemplo. En el primer caso, y si la intensidad y el tiempo son suficientes, se producirá la electrocución, mientras que en el segundo caso, generalmente, todo se reducirá a un calambre y a la quemadura de los dedos.

5.3.7 Capacidad de reacción

Existen, finalmente, otros factores que influyen en la gravedad de los accidentes de origen eléctrico, estos factores dependen en gran medida de las características o condiciones físicas y psíquicas del accidentado. Entre éstas podemos enumerar:

- Estado físico y psicológico
- Nerviosismo o excitación
- Problemas cardiacos
- Edad (la electricidad se soporta mejor entre los 20 y 50 años)
- Grado de alcohol (afecta de forma muy negativa)
- Dormido o despierto (una persona dormida soporta prácticamente el doble de electricidad que una persona despierta)
- Fatiga, sueño, etc. (perjudican la resistencia frente a la electricidad)

En definitiva, las personas sanas disponen de gran resistencia física frente a de los accidentes de origen eléctrico, mientras que las personas de constitución débil suelen resultar mejores conductoras de la corriente eléctrica y por tanto más perjudicadas.

5.3.8 Conclusión

Lo decisivo en baja tensión, para que se produzca la electrocución, con frecuencias de 50/60 Hz, es que desaparezca nuestro escudo protector que es la piel. Esto se pone de manifiesto en accidentados con la piel mojada o con las típicas marcas eléctricas donde la piel ha sido afectada o destruida.



Fig. 5.9 Efectos eléctricos en el pulgar de la mano izquierda

Se comprueba que los efectos fisiológicos dependen de la cantidad de electricidad que puede circular por el organismo, para una tensión fija. En el caso de que la tensión varíe, lo definitivo en el accidente, será la energía que pueda atravesar al accidentado.

5.4 La electricidad estática

5.4.1 Generación y efectos

La electricidad estática es inherente al mundo en el que vivimos, ya que la atmósfera contiene cargas eléctricas. Estas cargas depositadas en según que materiales pueden llegar ha acumularse formando potenciales elevados capaces de producir chispas. La electricidad estática se genera por frotamiento o puesta en contacto y separación de dos sustancias o materiales diferentes, o como consecuencia del movimiento de personas u objetos con respecto al aire. Andar sobre alfombras o moquetas, roces de objetos y otros fenómenos son fuentes de cargas estáticas.



Fig. 5.10 Electricidad estática debida a la acumulación de cargas en el depósito

Estas acumulaciones se pueden producir en la práctica industrial de muchas formas: el transporte de líquidos inflamables en camiones cisterna, el llenado y vaciado de depósitos tanto de sólidos como de líquidos o gases, industrias textiles, rotativas en industrias papeleras, el rodaje de vehículos, el golpear con un martillo una superficie, las correas o poleas en funcionamiento, etc., siendo capaces de generar cargas eléctricas estáticas en las personas y en las instalaciones que pueden alcanzar tensiones de hasta 80.000 voltios.

El efecto de las cargas estáticas sobre las personas no es peligroso, caracterizándose la electricidad estática por sus intensidades de valor despreciable, debido a que prácticamente no existe potencia, aunque la tensión se eleve a miles de voltios. Por este motivo, los accidentes debidos a cargas estáticas son producidos más por efectos indirectos a las mismas (caídas de personas que estaban trabajando en altura, debidas al sobresalto o molestia de un chispazo) que a la peligrosidad que en sí misma éstas

encierran. Los accidentes producidos por cargas estáticas aumentan en número y peligrosidad cuando el sujeto es nervioso o está debilitado.

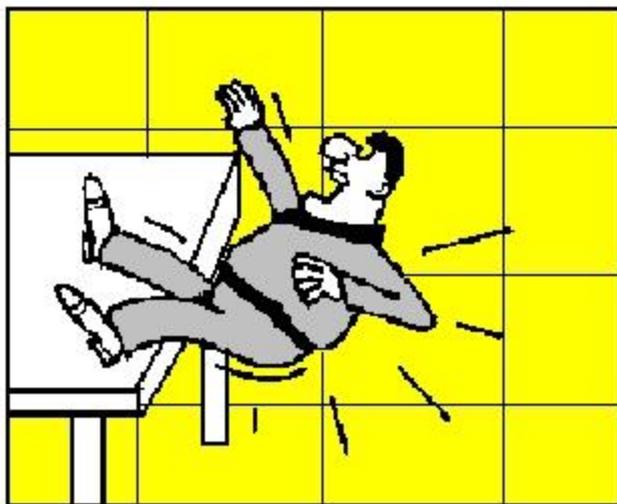


Fig. 5.11 Caída accidental debida al sobresalto provocado por la electricidad estática.

El auténtico riesgo que presentan las carga estáticas es la producción de chispas; así, mientras en ambientes normales pasarán inadvertidas o sólo provocarán ligeras molestias, podrán provocar incendios y explosiones cuando en el ambiente estén presentes polvos, gases, vapores inflamables o explosivos.



Fig. 5.12 Chispa producida por la acumulación de cargas estática.

En principio, es imposible impedir la generación de electricidad estática, pues este fenómeno es inherente al movimiento y contacto de los distintos materiales, aunque pueden evitarse sus efectos peligrosos si impedimos su acumulación. En este principio se basan las medidas de protección y prevención, evitando que los potenciales eléctricos alcanzados por la acumulación de cargas estáticas excedan el valor capaz de producir chispas.

5.4.2 Medidas generales de protección

5.4.2.1 Interconexión y puesta a tierra

Es uno de los métodos más eficaces a la hora de limitar las acumulaciones de cargas eléctricas estáticas, para ello, se deben conectar entre sí y a tierra, todas las superficies de los equipos, conjuntos o procesos, sobre los cuales habitualmente se producen acumulaciones de cargas. Así se consigue que las cargas puedan eliminarse (de las superficies de los objetos), a medida que se van formando, impidiéndose por tanto acumulaciones peligrosas.



Fig. 5.13 Puesta a tierra de las masas metálicas para impedir la acumulación de cargas

5.4.2.2 Control de la humedad ambiental

En los materiales aislantes, las cargas estáticas tienen tendencia a permanecer estacionarias en la vecindad del lugar donde se generaron. Sin embargo, en la mayoría de materiales, las acumulaciones pueden evitarse si existe sobre la superficie una película conductora que descargue la energía a tierra; esta película puede ser la humedad. Cuando ésta es alta, se adhiere a la superficie y el problema de la electricidad estática se reduce notablemente.



Fig. 5.14 En ambientes inflamables se necesita por lo menos un 60% de humedad

El nivel de humedad deseado puede obtenerse mediante humidificadores de ambiente especiales o inyectores de vapor, colocados en calentadores con ventilador de impulsión, siendo recomendable que en ambientes inflamables esta humedad no sea inferior al 60%.

5.4.2.3 Incremento de la conductividad eléctrica de los materiales, las máquinas y los elementos manipulados

Se está desarrollando el empleo de *sprays* con sustancias antiestáticas para aplicar sobre suelos, moquetas, tejidos, muebles, máquinas, etc., de forma que se aumente la conductividad de los materiales y así se impida la acumulación de cargas eléctricas sobre ellos. Este es un campo con gran futuro, pero que aún no está suficientemente desarrollado. El principal inconveniente radica precisamente en la corta duración de las propiedades antiestáticas de los *sprays*, por lo que resulta indispensable su aplicación continuada, repercutiendo negativamente en el coste final del método.



Fig. 5.15 Incremento de la conductividad mediante el empleo de *sprays* antiestáticos

5.4.2.4 Ionización de la atmósfera

En el caso de que no sea posible disipar por otros medios las cargas estáticas acumuladas en los materiales, se puede ionizar la atmósfera que los circunda, ya que el aire no es buen conductor de la electricidad, sobre todo si está seco, pero cuando se ioniza, adquiere la conductividad suficiente para impedir la acumulación de estas cargas.

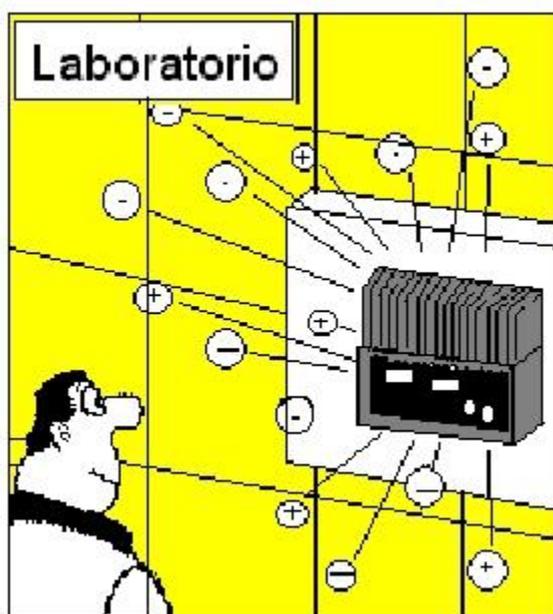


Fig. 5.16 Incremento de la conductividad del aire mediante ionizadores

El proceso empleado se denomina *ionización del aire*, consistente en suministrar una abundante provisión de iones positivos o negativos al aire que se encuentra entre el neutralizador y el material cargado electrostáticamente, adquiriendo así la conductividad suficiente para impedir la acumulación de cargas estáticas y evitar posibles chispas peligrosas en ambientes con riesgo de explosión o incendio.

5.4.3 Cargas electroestáticas de las personas

Las personas pueden, de la misma forma, cargarse electrostáticamente debido al roce de ciertos materiales o bajo la influencia de campos eléctricos o magnéticos. La ropa con una conductividad baja favorece el fenómeno y la proximidad de objetos cargados eléctricamente puede producir cargas estáticas sobre el cuerpo humano. En cualquier caso, para ello es necesario que la persona esté aislada eléctricamente de tierra, ya sea mediante un calzado apropiado no conductor (goma, plástico, etc.), o bien, porque se mueva sobre un suelo aislante.

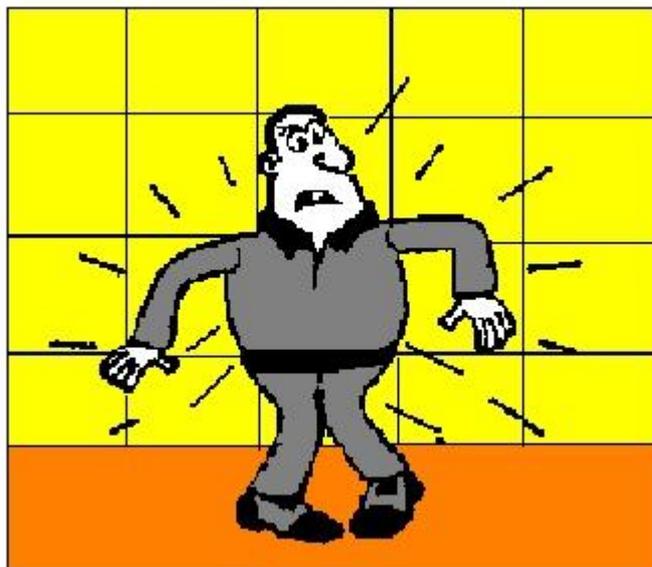


Fig. 5.17 Las personas también pueden cargarse electrostáticamente

La carga acumulada sobre el cuerpo humano puede llegar a ser tan elevada que la proximidad de un objeto conductor (estantería metálica, o cualquier pieza metálica) puede provocar el salto de la chispa entre ésta y la persona. El efecto no tendría más trascendencia que la molestia del chispazo en ambientes normales, pero puede ser muy peligroso en ambientes inflamables o explosivos.

5.4.3.1 Materiales y prendas de protección electrostática para las personas

Estas medidas son necesarias para evitar que las personas sean fuente de chispas electrostáticas en procesos en los que materias o sustancias inflamables o explosivos estén presentes. Nunca debe olvidarse que la protección individual de las personas es una medida complementaria de seguridad, y, por tanto, añadida a todas las medidas técnicas indicadas anteriormente, como son la puesta a tierra e interconexión de elementos metálicos, control de la humedad ambiental, ionización de la atmósfera, utilización de *sprays*, etc.

5.4.3.1.1 Calzado conductor y suelos antiestáticos

El uso de zapatos con suela conductora, combinado con la utilización de suelos asimismo conductores (como, por ejemplo, el cemento antichispas, oxiclورو de magnesio, losetas de asfalto conductor, plaquetas de goma conductora) en las zonas donde se manejan sustancias peligrosas, son los medios más comunes para evitar la acumulación de cargas estáticas sobre las personas que, en un momento dado, podrían generar chispas peligrosas.

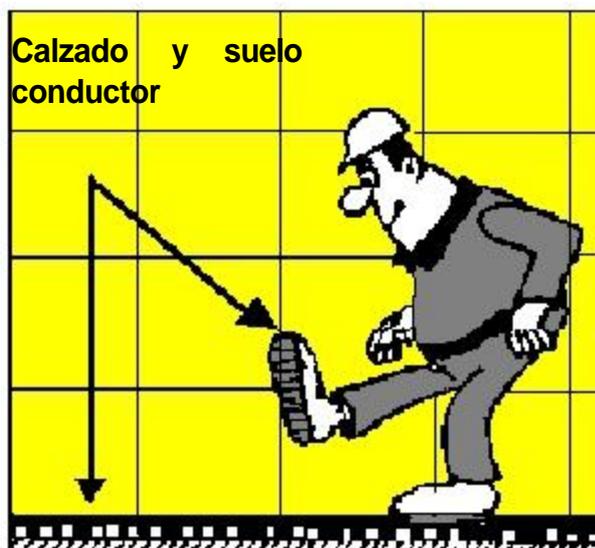


Fig. 5.18 Calzado conductor unido a un suelo conductor

Es importante recordar que un zapato conductor unido a un suelo aislante, o viceversa, no tiene ninguna efectividad, ya que se interrumpe el paso de las cargas a tierra, perdiendo el método toda efectividad, siendo por tanto completamente necesario el concurso de las dos medidas.

5.4.3.1.2 Ropa de trabajo

En el caso de que existan atmósferas muy inflamables o explosivas, es necesario evitar el uso de prendas confeccionadas con ciertas fibras como rayón, lana, seda, nailón, poliésteres, etc., sustituyéndolas por otras de algodón (que aunque no sea buen conductor, absorbe muy bien la humedad), o por otras de algodón con entramados de fibra de carbono (la fibra de carbono es ya un buen conductor), complementándose así las medidas adoptadas anteriormente (zapatos y suelos conductores).

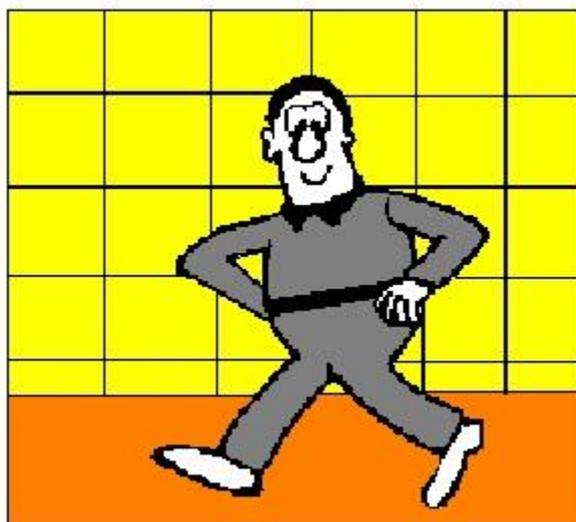


Fig. 5.19 El empleo de prendas de algodón permite disminuir el peligro de cargas

5.4.3.1.3 Guantes conductores

Cuando sea necesario el empleo de guantes en zonas con peligro de ignición, éstos deberán ser conductores para evitar que un objeto conductor (herramienta) que se sujeta con la mano pueda acumular cargas.

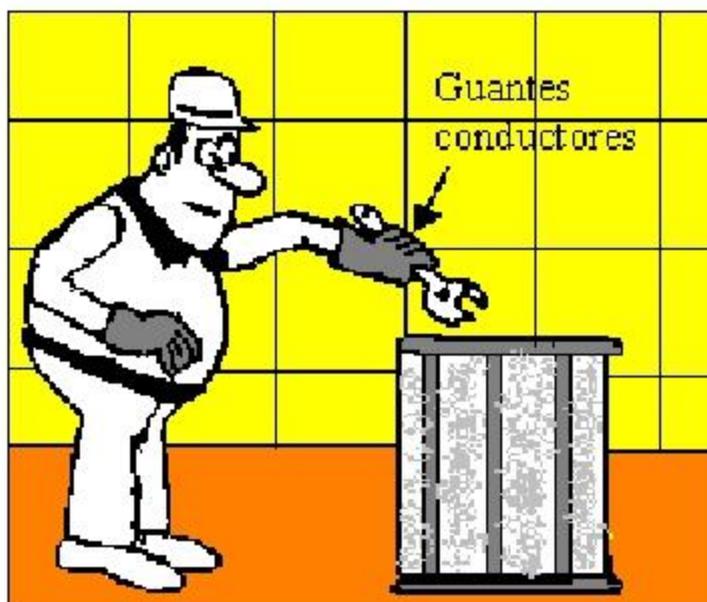


Fig. 5.20 El empleo de guantes conductores, unido a las demás protecciones, asegura una continua descarga de la electricidad estática hacia tierras

Siempre debe existir continuidad hasta tierra (en este caso desde la herramienta sujeta con la mano). Por este motivo, para que los guantes conductores sean realmente efectivos, deberán acompañarse de las ropas, los zapatos y los suelos conductores correspondientes.

5.5 Tipos de accidentes eléctricos

Los accidentes eléctricos son debidos a contactos de personas con partes o máquinas en tensión. Atendiendo a la forma en que se producen estos contactos, podemos dividirlos en dos grandes grupos:

- Contacto directo
- Contacto indirecto

5.5.1 Contacto eléctrico directo

El Reglamento eléctrico para baja tensión (REBT) define al contacto directo como el contacto de personas con partes activas de los materiales y equipos, entendiéndose como partes activas el conjunto de conductores y piezas conductoras bajo tensión en condiciones normales de funcionamiento.

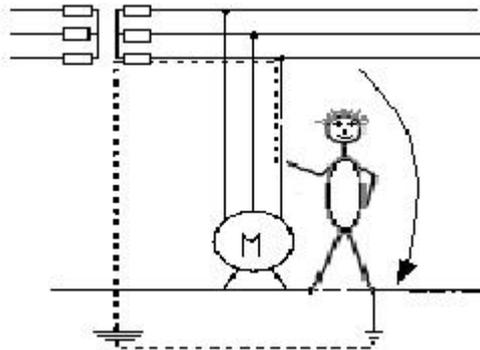


Fig. 5.21 Contacto eléctrico directo con un conductor activo

Siguiendo esta definición, se producirá un contacto eléctrico directo en los siguientes supuestos:

- Contacto directo con dos conductores activos de una línea: este es el más peligroso de todos los accidentes, ya que dos manos (por ejemplo) entran en contacto con sendas líneas en tensión, y por tanto la persona se halla sometida a la tensión existente entre las dos fases. La corriente eléctrica, en estos casos, suele seguir una trayectoria a través del tórax, pudiendo provocar la electrocución del accidentado.
- Contacto directo con un conductor activo de una línea y masa o tierra: es necesario para producirse este accidente que el circuito se cierre a través del neutro de un transformador (por ejemplo). El accidentado queda sometido a la tensión simple, es decir, la tensión de línea dividida por 3, siendo por tanto menos peligroso que el anterior. Si la corriente, en su trayectoria, atraviesa el corazón u otro órgano vital, puede llegar a paralizarlos.
- Contacto directo por descarga inductiva: este es el único caso en el cual se produce un accidente eléctrico sin llegar a existir contacto entre el accidentado y las partes conductoras. Todo ocurre por la proximidad de una línea con tensión elevada a un elemento conductor (una grúa o un camión, por ejemplo); si la distancia es lo suficientemente pequeña, se superará la tensión disruptiva del aire, volviéndose éste conductor y cerrándose el circuito eléctrico.

No se producirá accidente eléctrico si no circula corriente, y ésta no puede circular si no existe un circuito cerrado; por tanto, para que un contacto simple (línea con tierra ó masa) resulte peligroso, es necesario que el neutro del transformador o generador esté puesto a tierra. Otra posibilidad es que, sin estar el neutro del transformador puesto a tierra, por una avería de la instalación alguna parte de la misma tenga otro punto de contacto con tierra.

La fórmula que nos permite obtener la intensidad que circulará por el cuerpo humano en un contacto directo es:

$$I_c = \frac{U_c}{R_c} \quad [5.3]$$

donde:

- I_c = corriente que pasa por el cuerpo en A
- U_c = tensión de contacto en V
- R_c = resistencia del cuerpo humano en Ω

5.5.2 Protección contra contactos directos

Las medidas de protección contra contactos directos más importantes son:

1. Protección completa
 - Protección por aislamiento
 - Protección por barreras o revestimientos
2. Protección parcial
 - Protección por obstáculos
 - Protección por distancias de seguridad
3. Protección adicional
 - Protección por interruptores diferenciales de alta sensibilidad (10 mA o 30 mA) asociados a una puesta a tierra

5.5.3 Contacto indirecto

El Reglamento eléctrico para baja tensión (REBT) define al contacto indirecto como el contacto de personas con masas puestas accidentalmente bajo tensión que en condiciones normales de funcionamiento estarían libres de ella, entendiéndose como masa o tierra el conjunto de conductores y piezas metálicas sin energía eléctrica y por tanto que no presentan tensión en condiciones normales de funcionamiento.

Siguiendo esta definición, se producirá un contacto eléctrico indirecto cuando se entre en contacto con una parte metálica, y por tanto conductora, la cual no debería estar en tensión (carcasa de una máquina eléctrica, tuberías, radiadores, marcos metálicos de puertas ó ventanas, etc.). Estas partes metálicas están de forma accidental bajo tensión por un fallo en el aislamiento de los conductores, debido a una gran sobrecarga o debido a un fallo de fabricación, por ejemplo.

En el contacto indirecto, al contrario que en el contacto directo, el sujeto siempre estará sometido a una tensión inferior a la de la línea. Esta tensión vendrá determinada por las siguientes fórmulas:

$$I_d = \frac{V_{fase}}{(R_{tierras} + R_{aparato})} \quad [5.4]$$

$$U_c = R_{aparato} \cdot I_d \quad [5.5]$$

$$I_c = \frac{U_c}{R_c} \quad [5.6]$$

donde:

- I_d = corriente de defecto en A
- U_c = tensión de contacto en V
- I_c = corriente que pasa por el cuerpo en A
- R_c = resistencia del cuerpo humano en Ω

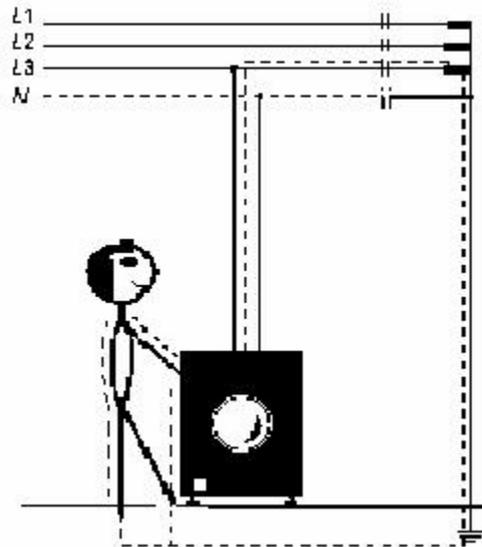


Fig. 5.22 Contacto eléctrico indirecto con una masa puesta accidentalmente en tensión

Las tensiones de contacto indirecto deben eliminarse en un tiempo tanto más corto cuanto más elevado sea su valor.

5.5.4 Protección contra contactos indirectos

Las medidas de protección contra contactos indirectos se basan en:

- 1 Las tensiones máximas admisibles en contactos accidentales son las descritas a continuación:
 - Locales secos; $U_{max} = 50 \text{ V}$
 - Locales húmedos; $U_{max} = 24 \text{ V}$
 - Locales sumergidos; $U_{máx} = 12 \text{ V}$
- 2 Por doble aislamiento
- 3 Por corte interruptor diferencial (ID)
- 4 Por aislamiento de protección
- 5 Por conexión equipotencial (local sin tierra)
- 6 Por separación de circuitos

5.6 Cuestiones y problemas

Cuestiones

- 1 ¿Qué se entiende por accidentes mediatos e inmediatos? ¿Son frecuentes los accidentes eléctricos? ¿Suelen presentar gravedad? ¿Por qué? Razonar las respuestas.
- 2 ¿Qué pasos deben seguirse delante de un accidentado de origen eléctrico? (Dar una breve explicación de cada caso).
- 3 Un *shock* eléctrico es una pérdida del conocimiento ¿Cómo debe actuarse delante de un accidentado que presente estos síntomas? ¿Es necesario un reconocimiento general después de

- una pérdida breve del conocimiento? ¿Cuáles son los mayores peligros que encierra un *shock* eléctrico?
- 4 ¿Cómo se detecta un paro respiratorio, y que medidas se tomarán al respecto? ¿Qué es “la cianosis”? ¿Cuáles son las zonas del cuerpo más sensibles o en las que primeramente aparecerán los efectos de la cianosis? ¿La aplicación de la respiración artificial suele tener efectos secundarios para el accidentado?
 - 5 ¿Cómo debe efectuarse una reanimación respiratoria? ¿Si el accidentado ha de bajarse de lo alto de un poste eléctrico, en qué zona se empezará a aplicar la respiración artificial? ¿La respiración artificial se aplica por igual a los adultos que a los niños? ¿Cuándo se produce la asfixia?
 - 6 Delante de un paro circulatorio, ¿cuáles son los síntomas más habituales? ¿Cómo debe actuarse delante de una situación como la planteada? ¿Por qué es tan peligroso un paro respiratorio? ¿En cuantos minutos, en promedio, las lesiones producidas por un paro circulatorio, pueden considerarse irreversibles, y por qué?
 - 7 ¿Qué es la midriasis, y la miosis? ¿Existe peligro para el accidentado si la aplicación de la reanimación cardiovascular se efectúa de forma incorrecta? ¿Cómo se efectúa esta reanimación en un centro hospitalario?
 - 8 Las quemaduras son uno de los efectos secundarios más peligrosos que afectan a un accidentado de origen eléctrico. ¿Qué tipo de quemaduras pueden producirse? ¿A qué partes de la piel afectan? ¿Cuáles son las características que las definen (síntomas, duración, apariencia, etc.)?
 - 9 ¿Cómo se debe actuar delante de cada tipo de quemadura? ¿Qué se conoce por necrosis de la piel? ¿Puede aplicarse agua directamente en las quemaduras de tercer grado? ¿Se puede dar de beber a un accidentado que sufra quemaduras? ¿Debe quitarse la ropa de la parte afectada por la quemadura, para que así está pueda oxigenarse mejor?
 - 10 Explicar cómo influye la corriente eléctrica en un accidente eléctrico. Indicar asimismo los efectos fisiológicos que la misma puede producir (especifíquese los valores de las intensidades de cada zona de peligro).
 - 11 ¿Cómo influye el tiempo de contacto? ¿Especifíquense las diversas zonas en función del tiempo?
 - 12 ¿Cómo influye la corriente continua en el organismo humano? ¿Reviste igual peligrosidad que la corriente alterna? Razonar las respuestas.
 - 13 ¿Cómo influye la tensión en los accidentes eléctricos? Indíquense las diferencias entre los efectos producidos entre un contacto en alta tensión y un contacto en baja tensión. ¿Variará la resistencia del cuerpo humano si variamos la tensión? Razonar las respuestas.
 - 14 ¿Cómo influye la resistencia del cuerpo humano ante de un accidente eléctrico? ¿Qué valores de tensión pueden considerarse seguros, y por qué? ¿Cuántos ohmios puede llegar a tener la piel humana, y en cambio, cuáles son los valores de la resistencia del organismo, una vez desaparecido el escudo protector de la piel?
 - 15 ¿Cómo influye la frecuencia ante de un accidente de tipo eléctrico? ¿Cuál es el rango de frecuencias más peligrosas para los seres vivos? ¿Qué efecto eléctrico disminuye la peligrosidad de un contacto eléctrico a frecuencias grandes, y por qué?
 - 16 Indicar cómo influye el recorrido de la corriente eléctrica a través del cuerpo humano ¿De qué depende este recorrido? Explicar este razonamiento: si la corriente eléctrica no penetra en el cuerpo humano, no dañará los órganos vitales, pero en cambio aumentará las zonas con quemaduras en la piel, ¿qué es más peligroso?
 - 17 ¿Qué factores hacen disminuir la capacidad de reacción delante de un accidente de origen eléctrico? ¿Qué factores aumentan esta capacidad de reacción? ¿Por qué las mujeres aguantan peor el paso de la electricidad? ¿Por qué los nórdicos soportan mejor los efectos de la corriente eléctrica, comparados con los mediterráneos?
 - 18 ¿Cuál es el origen de la electricidad estática? ¿Es posible suprimirla? ¿Cómo pueden aminorarse sus efectos? Indicar algunos ejemplos típicos de procesos industriales propensos a la generación de electricidad estática.

- 19 ¿Cuántos voltios es posible alcanzar con acumulaciones de electricidad estática? ¿Existe peligro para los seres humanos con estas tensiones tan elevadas? ¿Dónde está el auténtico peligro de la electricidad electrostática?
- 20 Indicar cómo actúan las medidas de protección ante de la electricidad estática, en sus versiones de conexionado a tierra y mediante el control de la humedad ambiental.
- 21 En según que procesos industriales es especialmente peligroso la existencia de cargas eléctricas estáticas. ¿Cómo son las medidas de seguridad, en cuanto a prendas de vestir, para estos casos? Razonar la respuesta.
- 22 ¿Qué ropas nos protegen de la acumulación de cargas, y por qué? ¿Si ya llevamos una correcta vestimenta para evitar la acumulación de las cargas electroestáticas, por qué es necesario que el suelo sea también conductor?
- 23 ¿Qué es un contacto eléctrico directo? ¿Cuándo puede producirse? ¿Qué fórmulas lo definen?
- 24 ¿Cuáles son las medidas de protección ante los contactos directos?
- 25 ¿Qué es un contacto eléctrico indirecto? ¿Cuándo puede producirse? ¿Qué fórmulas que lo definen?
- 26 ¿Cuáles son las medidas de protección delante de los contactos indirectos?

6 Protección de sistemas eléctricos

6.1 Protección de sistemas eléctricos. Sobrecargas, cortocircuitos, defectos a tierra...

6.1.1 Introducción

Todos los circuitos, cables y aparatos deben protegerse inexcusablemente, por imperativo legal, contra los efectos perjudiciales de las sobrecargas y los cortocircuitos. El Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión, en sus instrucciones MI.BT020 y MI.BT021, así lo establece.

Esta protección se realizará mediante dispositivos que sean capaces de producir la desconexión del circuito en un tiempo apropiado, cuando la intensidad supere un valor preestablecido.

Los dispositivos previstos en el Reglamento, capaces de cumplir esta función son:

- Protección contra sobrecargas
 - Interruptores automáticos con *relé térmico*
 - Fusibles de características y calibre apropiados
- Protección contra cortocircuitos
 - Interruptores automáticos con *relé magnético*
 - Fusibles de características y calibre apropiados
- Protección contra contactos a tierra
 - Dispositivos *diferenciales*

6.1.2 Protecciones contra sobrecargas. Relé térmico

Se entiende que un circuito está afectado por una sobrecarga cuando los valores de sus intensidades alcanzan valores más elevados que las correspondientes a su valor nominal, pero sin exceder demasiado de él (de $1.1I_n$ a $3I_n$), aparte, no se producen de forma instantánea, permitiendo al circuito adaptarse a los cambios. No son por tanto demasiado perjudiciales, siempre que su duración no permita que se alcancen temperaturas inadmisibles en los aislantes de los circuitos. Es más, para una correcta utilización de las instalaciones y maquinas es bueno que los dispositivos de seguridad permitan en cierto modo y durante un tiempo determinado, estas sobrecargas, evitándose así desconexiones indebidas que perjudicarían el normal funcionamiento del arranque de los motores, por ejemplo.

Esto implica que el dispositivo de protección contra sobrecargas sea inteligente, es decir, que permita el paso de intensidades bajas durante un cierto tiempo y, en cambio, con intensidades peligrosas actúe con rapidez. A estos dispositivos se les denomina de *tiempo-dependiente* o *característica térmica inversa*, ya que a mayor temperatura (mayor intensidad) el tiempo de disparo decrece. Normalmente, el dispositivo mide el calentamiento *indirectamente* mediante el control de la intensidad que recorre el circuito.

La curva de disparo del relé térmico puede observarse en la figura 1, en ella se aprecia:

- Los ejes se gradúan normalmente en: ordenadas (logaritmo de tiempos) y abscisas (relación entre intensidades).
- El valor inicial de disparo (intensidad de arranque), coincide con un 10% o 15% superior al valor de la intensidad nominal, lo que permite evitar disparos indebidos por pequeñas sobrecargas completamente normales en el funcionamiento habitual de una instalación.
- La curva sigue una trayectoria descendente exponencial, permitiendo a las intensidades superiores en un 20% al valor nominal circular durante media hora, y en cambio, a las intensidades superiores al 50% de su valor nominal fluir sólo durante 2 minutos.
- Existen realmente dos curvas: una en vacío (cuando se produce la primera desconexión y por tanto el bimetálico se encontraba en frío), y una en temperatura (cuando ya ha desconectado en más de una ocasión y por tanto el bimetálico tenía una temperatura adquirida).
- Las curvas de disparo suelen darse para una temperatura ambiente estándar de 20°C.

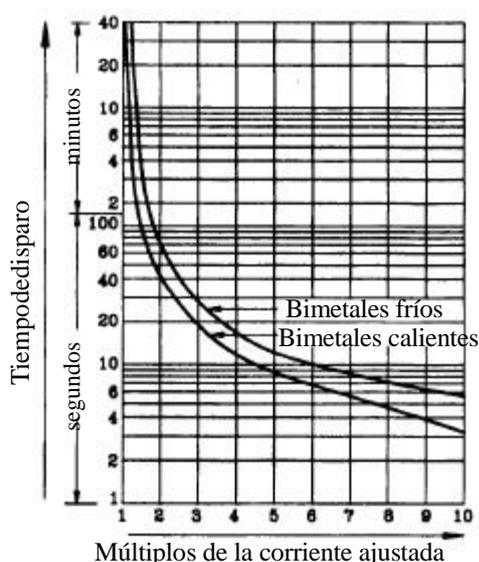


Fig. 6.1 Características tiempo-corriente de un relé térmico

La correcta elección del relé térmico pasa por dos grandes supuestos:

- Si conocemos la imagen térmica del elemento a proteger o curva tiempo-corriente admisible (lo que ocurre en contadas ocasiones, ya que lo normal es que los elementos o máquinas no dispongan de la misma, o por el contrario se proteja con el relé a más de un componente), la elección del relé se efectuará de forma que la curva del mismo siempre esté por debajo de la curva límite del elemento o conductor a proteger.

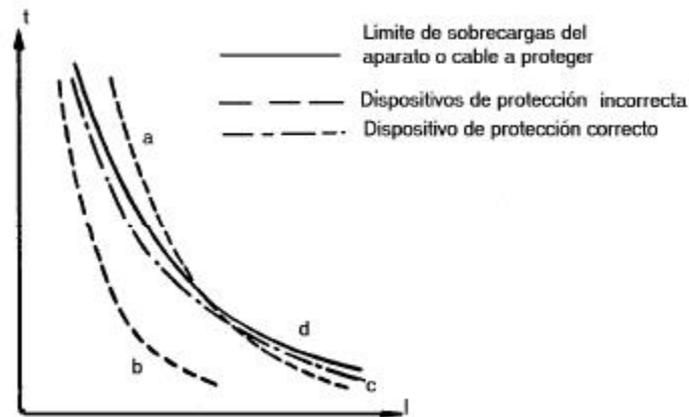


Fig. 6.2 Elección del relé térmico conocida la imagen térmica del elemento a proteger

- Si la imagen térmica del elemento a proteger no es conocida (caso más habitual), se seguirá, en este caso para la elección del relé, lo prescrito por las normas UNE y CEI. Es importante para una correcta elección tener presente, entre otras cosas: las características de arranque de la máquina (corriente, duración y frecuencia), la temperatura ambiente (del relé térmico y del elemento a proteger), las condiciones extremas de funcionamiento (posibles sobrecargas temporales), etc.

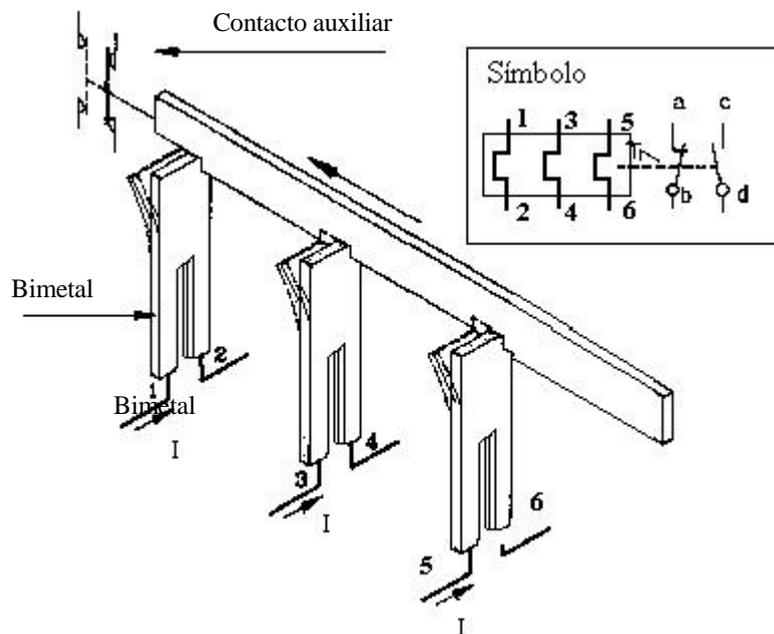


Fig. 6.3 Estructura básica de un relé térmico

Normalmente los relés suelen proporcionar una protección muy conservadora, siendo suficiente, en la mayoría de las ocasiones, con seguir las pautas señaladas para una correcta y segura elección.

El elemento básico de un relé térmico contra sobrecargas es una lámina bimetalica, es decir, una lámina constituida por dos metales de diferente coeficiente de dilatación (el metal superior suele ser

más sensible a los cambios de temperatura) y calentada por la corriente que atraviesa el circuito principal; este calentamiento puede ser:

1. Directo: si por la bilamina pasa toda la corriente del circuito.
2. Indirecto: si la corriente pasa por un arrollamiento calefactor que rodea la bilamina.

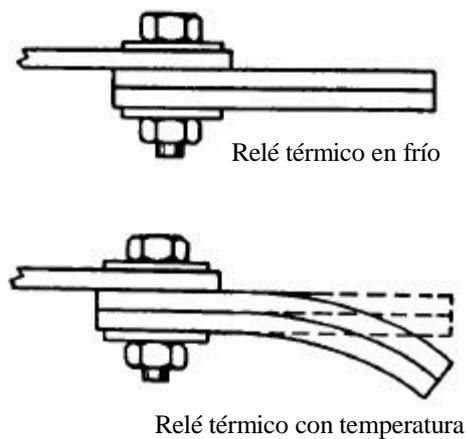


Fig. 6.4 Relé térmico: en frío y después de recibir el paso de una gran intensidad

El funcionamiento del relé es sencillo; cuando una intensidad, dentro de los valores normales, circule por la lámina bimetálica, se producirá un calor que será disipado sin dificultad por el mismo material, mas cuando la intensidad alcance valores mayores a los permitidos, la bilamina ya no podrá disipar tanta energía calorífica y comenzará el proceso de dilatación. Al estar las láminas unidas mecánicamente o por soldadura, resulta imposible su elongación por separado, así el metal cuyo coeficiente de dilatación sea mayor no tendrá más alternativa que curvarse sobre el material con coeficiente de dilatación menor, de forma que: si se fija uno de los extremos de la lámina bimetálica, el otro extremo no tendrá más opción que desplazarse hacia el lugar ocupado por el metal de menor coeficiente de dilatación térmica.

Si esta bilamina, al llegar en su curvatura a un punto determinado, acciona algún mecanismo, abre un contacto o actúa sobre cualquier otro dispositivo solidario como la bobina de un contactor, puede conseguirse la desconexión del circuito por abertura del relé térmico. Aparte, es importante destacar que este sencillo elemento es capaz de dar respuesta a la curva deseada para las sobrecargas (curva a tiempo inverso), ya que si la intensidad es pequeña, la lámina bimetálica tardará mucho en doblarse (desconexión), en cambio si la corriente es grande, también será grande el calor por efecto Joule producido, siendo la desconexión mucho más rápida.

Para las instalaciones de potencia, con intensidades elevadas, los relés serían costosos y de grandes dimensiones. Para evitar ese inconveniente, en estos casos, por los relés no pasa la totalidad de la intensidad, sino una parte proporcional de la misma, que es proporcionada por el secundario de un transformador de intensidad conectado con el circuito principal.

6.1.3 Protecciones contra cortocircuitos. Relé magnético

Los cortocircuitos son defectos que producen intensidades muy elevadas (con 5 veces la I_n , puede considerarse un cortocircuito franco), bruscas (la elevación se produce en un intervalo de tiempo muy pequeño) y destructivas. Los cortocircuitos ocurren cuando en un circuito desaparece toda o parte de su impedancia, manteniéndose la tensión prácticamente constante. Todo ocurre como si de repente un circuito con una cierta impedancia, debido a un fallo de aislamiento o por una operación incorrecta, perdiera parte de esta impedancia elevándose bruscamente la intensidad.

Un ejemplo nos permitirá una mejor comprensión: supongamos una vivienda con 220 V de tensión; esta vivienda, dispone de una toma de corriente a la que se conecta una bombilla de 100 W. La resistencia de la bombilla será:

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{100} = 484 \Omega$$

Con la citada tensión le corresponderá una intensidad de:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{484} = 0.4545 A$$

Intensidad completamente aceptable.

Si por un error de conexión o fallo de aislamiento, los dos terminales de la toma de corriente entran en contacto (circuito corto), la resistencia disminuirá a valores muy bajos (del orden de décimas de Ω), quedando la intensidad con un valor:

$$I = \frac{220}{0.12} = 1833 A$$

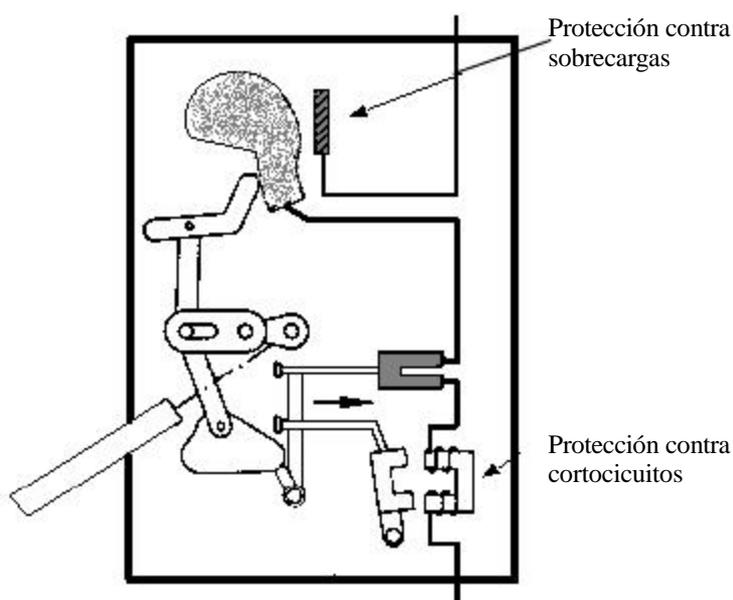


Fig. 6.5 Interruptor magnetotérmico (protección contra sobrecargas y cortocircuitos)

Este valor tan alto de la intensidad producirá de inmediato dos efectos negativos:

- Un efecto térmico: formación de plasma (no son raros valores de 2000°C y aún mayores), con la transformación de la mayor parte de los materiales a este estado.
- Un efecto electrodinámico: grandes esfuerzos magnéticos de atracción o repulsión, que suelen destruir los bobinados de las máquinas eléctricas o proyectar violentamente los elementos bajo su influencia.

La secuencia de daños que pueden producir estas corrientes son, sucesivamente:

- Envejecimiento de los aislamientos
- Carbonización o inflamación de los aislamientos
- Fusión de los conductores
- Disminución de las características mecánicas de las partes conductoras o metálicas adyacentes (resortes, etc..)

El primero de los efectos señalados, envejecimiento de los aislamientos, suele presentarse con intensidades no muy elevadas, siendo suficientes unos 160°C para que, materiales tan frecuentes como el PVC (policloruro de vinilo) comiencen a deteriorarse. Para evitarlo, la temperatura momentánea no debe superar nunca los valores especificados por los fabricantes.

Los cortocircuitos, por tanto, son siempre perjudiciales y deben interrumpirse cuanto antes. Por este motivo, los dispositivos de protección contra ellos deben ser *instantáneos* y han de actuar sobre equipos capaces de abrir el circuito en presencia de estas corrientes elevadas. El medio más utilizado para la protección contra cortocircuitos es el interruptor de potencia.

Con el objetivo de cumplir adecuadamente sus misiones de mando y protección, los interruptores de potencia suelen estar provistos de toda una serie de mecanismos y dispositivos de desenganche o desconexión. A continuación se citan los más importantes:

1. Dispositivos térmicos de desenganche con retardo dependiente de la corriente: se utilizan para la protección contra sobrecargas.
2. Dispositivos de desenganche electromagnéticos de sobreintensidad: son utilizados como desenganches rápidos para la protección contra cortocircuitos. Estos dispositivos actúan por atracción electromagnética no retardada (o sólo brevemente retardada) de una armadura y se ajustan, según los impulsos de carga admisibles, a un múltiplo de la corriente nominal, de forma que no reaccionan a las intensidades de arranque y a las sobrecargas normales de servicio. Los dos dispositivos de desenganche citados son atravesados por la corriente principal. En general, para la protección contra sobreintensidades es válido el criterio de que, las sobrecargas normales de servicio deben ser desconectadas lo más tarde posible, pero siempre, por supuesto, antes de que se alcance un calentamiento peligroso de las partes protegidas de la instalación; por el contrario, los cortocircuitos deben ser desconectados con tanta rapidez como sea posible, considerando la selectividad del conjunto de la red (para proteger todas las partes de la instalación atravesadas por la corriente de cortocircuito) contra los efectos térmicos, y a ser posible, contra los efectos electrodinámicos (éstos crecen proporcionalmente con cuadrado de la intensidad de la corriente).
3. Dispositivos de desenganche magnetotérmicos: constituidos por la combinación, en un sólo bloque, de los dispositivos térmicos contra las sobrecargas y de los electromagnéticos contra cortocircuitos, indicados anteriormente.

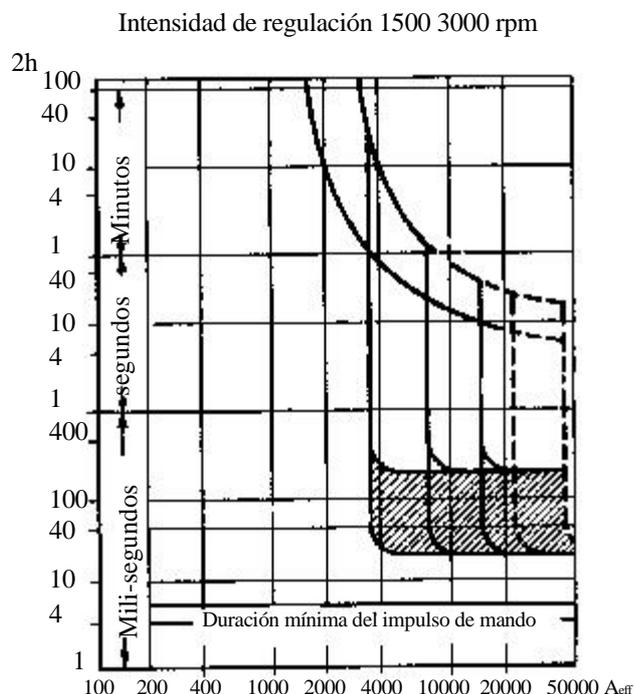


Fig. 6.6 Curva de disparo de un sistema con protección magnetotérmica

4. Dispositivos de desenganche electromagnéticos de mínima tensión: están conectados a la tensión de servicio y disparan al disminuir la tensión hasta un 50% de su valor nominal, aproximadamente, soltando su armadura magnética. De esta forma, impiden el nuevo arranque automático de los motores u otros órganos protegidos, cuando al volver la tensión de servicio a un 70% aproximadamente de la tensión nominal, se produce la conexión de su interruptor. Mediante un dispositivo temporizador con un retardo de 2s, en interruptores de 100 A en adelante, puede impedirse el disparo en el caso de caídas de tensión de corta duración (por ejemplo, a consecuencia de un reenganche rápido en el caso de un cortocircuito). Los interruptores con dispositivo de desenganche de mínima tensión sin retardo pueden emplearse también para desenganche a distancia. Para los que tienen dispositivo de retardo, es necesaria una bobina de desenganche por corriente de trabajo. Para el disparo a distancia se interrumpe el circuito de mínima tensión, o se puentea su bobina a través de una resistencia limitadora.
5. Dispositivos de desenganche electromagnéticos de mínima tensión: están conectados a la tensión de servicio y se disparan al disminuir la tensión hasta un 50% de su valor nominal, aproximadamente, soltando su armadura magnética. De esta forma, impiden el nuevo arranque automático de los motores u otros órganos protegidos, cuando al volver la tensión de servicio a un 70% aproximadamente de la tensión nominal, se produce la conexión de su interruptor. Mediante un dispositivo temporizador con un retardo de 2 s, en interruptores de 100 A en adelante, puede impedirse el disparo en el caso de caídas de tensión de corta duración (por ejemplo, a consecuencia de un reenganche rápido en el caso de un cortocircuito). Los interruptores con dispositivo de desenganche de mínima tensión sin retardo pueden emplearse también para desenganche a distancia. Para los que tienen dispositivo de retardo, es necesaria una bobina de desenganche por corriente de trabajo. Para el disparo a distancia se interrumpe el circuito de mínima tensión, o se puentea su bobina a través de una resistencia limitadora.

6. Dispositivos de desenganche electromagnéticos de corriente de trabajo (emisión de corriente). Se utilizan para el disparo a distancia, por cierre de su circuito de corriente, en interruptores de trinquete. Reaccionan con un 50% de su tensión nominal y se desconectan por medio de un contacto auxiliar del interruptor de potencia.

La unión de los relés térmico y magnético conlleva la protección simultánea contra las sobrecargas y los cortocircuitos, siendo el dispositivo de protección más habitual en instalaciones de baja tensión.

De estos dispositivos destacan dos valores de intensidades que se designan por *poder de corte* y *poder de cierre*:

- Poder de corte: es la intensidad más elevada que un interruptor es capaz de cortar de forma cómoda y segura.
- Poder de cierre: es el valor máximo de la intensidad que un interruptor puede soportar, corriéndose el riesgo, para intensidades mayores, de la destrucción del mismo.

6.1.4 Protecciones de contactos indirectos y fugas a tierra

Las protecciones de los seres vivos y contra incendios es la sección más importante de las protecciones. Los dispositivos que tienen encomendado esta protección deberán cumplir con unos requisitos muy estrictos, ya que de ellos dependerá nuestra propia integridad.

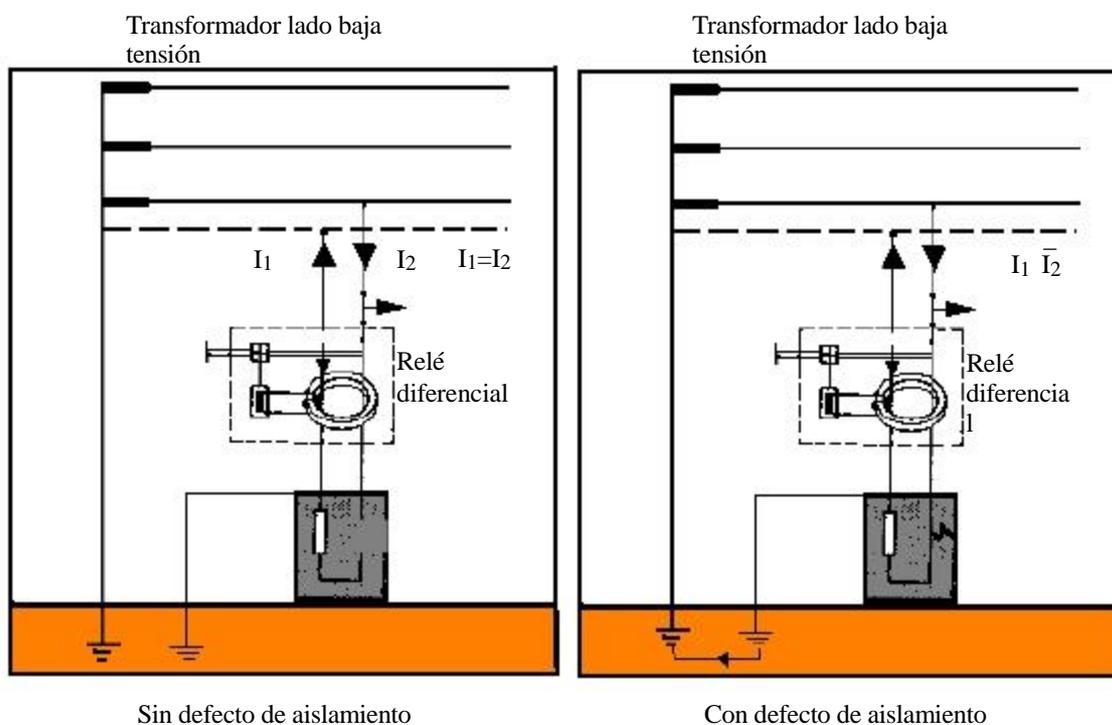


Fig. 6.7 Protección mediante relé diferencial

Hasta ahora hemos descrito las protecciones que salvaguardan a los equipos, maquinaria e instalaciones eléctricas. Existían unas intensidades límite que no debían ser sobrepasadas, ya que de ellas dependía el correcto funcionamiento de las instalaciones. Las partes o materiales que primeramente recibían los efectos negativos de las altas temperaturas generadas por el paso de corrientes eléctricas demasiado elevadas eran los aislantes, pero no obstante, eran necesarios varios amperios para que esto ocurriera.

Cuando nos referimos a protección de seres vivos, el concepto es muy diferente, ya que como se vio en el capítulo VI de esta obra, son suficientes unos pocos miliamperios para provocar la electrocución de un ser humano. Los miliamperios que provocan serios peligros en los seres vivos no son tan siquiera detectados por los relés térmicos, que empiezan a funcionar a partir de valores mucho mayores (10 A por ejemplo), y aun con mucha lentitud.

Nos encontramos, pues, delante de un problema: si creamos dispositivos capaces de interrumpir el fluido eléctrico con valores de intensidad no peligrosos para los seres vivos (mA), la potencia que obtendremos será tan baja que resultarán del todo inservibles. Si por el contrario los elementos de corte permiten pasar varios amperios (para obtener así potencias acordes con el consumo actual), antes de producirse el corte del suministro eléctrico, por detección de los dispositivos de corte térmicos o magnéticos, resultarán intensidades del todo inapropiadas para la protección de los seres vivos.

El problema se solucionó con la incorporación a los sistemas de protección del relé diferencial, el cual permite pasar la intensidad necesaria demandada por las instalaciones actuales de potencia, pero al mismo tiempo permite una alta protección para los seres vivos.

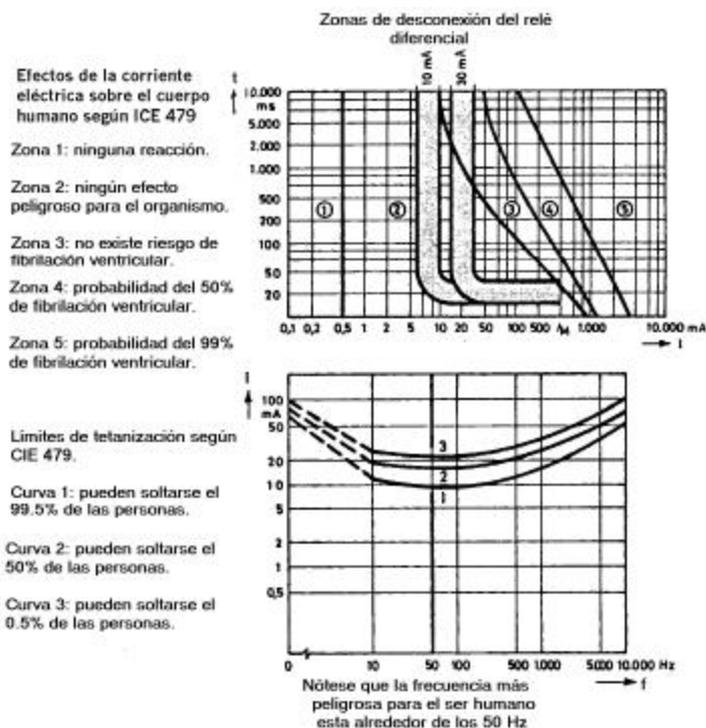


Fig. 6.8 Efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano y zonas de tetanización

El relé diferencial está formado por un núcleo magnético con unas bobinas y dispositivos a él conectadas. A través de este núcleo magnético pasan los conductores activos (fase y neutro en un

suministro monofásico, por ejemplo). Uno de estos conductores es el de la entrada de la energía (primario del núcleo), mientras que el otro corresponde el retorno de la misma (secundario del núcleo). Si no se produce ninguna fuga los amperios que han entrado a través del diferencial, una vez hayan realizado su labor (encender una bombilla, alimentar un aparato eléctrico, etc.), retornarán por el segundo conductor sin haber sufrido disminución alguna, no actuando el dispositivo de protección, ya que está recorrido por dos corrientes del mismo valor pero de sentidos opuestos. Si se produce una fuga en algún punto de la instalación (contacto accidental de una persona, por ejemplo), ya no existirá igualdad entre las intensidades, produciéndose un desequilibrio en los flujos generados en los bobinados del núcleo magnético, que crearán una fuerza magnética capaz de producir la desconexión del diferencial.

A la diferencia de intensidades (la intensidad de ida menos la intensidad de retorno) capaz de producir la desconexión del diferencial se le denomina *sensibilidad* del diferencial, existiendo en el mercado relés diferenciales con baja sensibilidad (actúan con diferencias de intensidad de 500 mA o 300 mA), de mediana sensibilidad (100 mA), o los más eficaces, de alta sensibilidad (30 mA o 10 mA).

Son principios diferentes, por tanto, los que hacen actuar al relé diferencial del resto de relés (térmicos o magnéticos). Mientras que el diferencial actúa por comparación de intensidades, sin importarle demasiado (dentro de los límites permitidos por el componente) las intensidades que por él circulan (siempre que éstas sean iguales); para el resto de relés, lo realmente importante es el valor de la intensidad que circula por ellos, disparándose cuando ésta alcanza unos límites prefijados, e importando poco (mientras no se llegué a éste límite) las variaciones que la intensidad pueda observar.

Es decir, y simplificando; un relé térmico o magnético no disparará si no se sobrepasa su límite de intensidad prefijado, siendo a efectos del relé, indiferente si esta intensidad alimenta un receptor o bien se pierde en una fuga. Si la protección es por relé diferencial, se invierten los términos, no disparará por límite de intensidad (mientras no resulte peligroso para él mismo), sino que sólo actuará cuando se produzca un desequilibrio entre las corrientes que por él circulan, aunque estas corrientes sólo representen unos miliamperios.

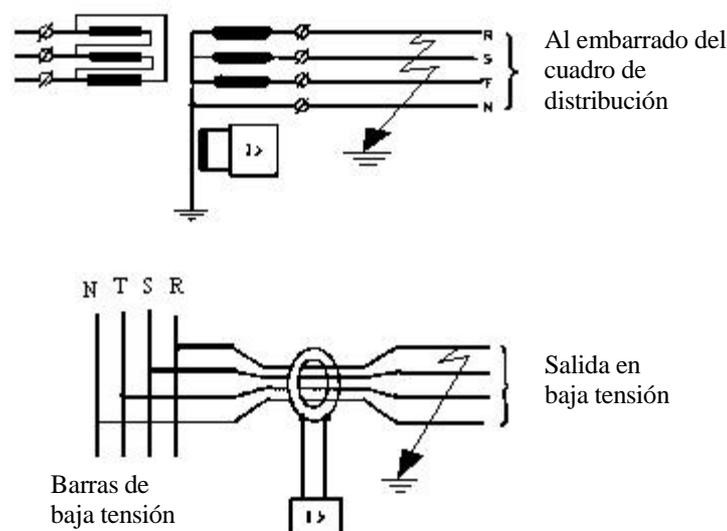


Fig. 6.9 Diversas formas de detección de contactos a tierra. a) Protección en la conexión del neutro del transformador
b) Protección en una salida del cuadro de distribución

Para la detección de cortocircuitos fase-neutro es posible incorporar, en la mayoría de interruptores de baja tensión, un elemento de desconexión magnetotérmico en el conductor neutro, con ajustes inferiores a los de los elementos de fase. Normalmente, los calibres de este elemento son del 50% al 60% de los elementos de fase.

El relé diferencial encuentra su mayor campo de aplicación en la protección personal contra contactos accidentales. Éste puede ser el caso cuando se toca la carcasa de un aparato con un defecto de aislamiento.

La protección diferencial debe ser lo más sensible y rápida posible; los calibres más utilizados son 10 mA, 30 mA y 300 mA. Obviamente, la corriente resultará del cociente entre la tensión en el punto de contacto y la resistencia que presente el individuo. Este último valor depende de múltiples factores, pero es evidente la bondad del elemento de protección.

En algunas aplicaciones es posible equipar el elemento diferencial en el propio interruptor magnetotérmico de protección, con lo que éste cumple con la doble finalidad de protección contra cortocircuitos y contra contactos y fallos de aislamiento a tierra. En otros casos, el relé diferencial debe montarse aparte de los otros dispositivos de protección, siempre *aguas arriba* respecto a los demás dispositivos.

El relé diferencial es también una protección eficaz contra los incendios, al detectar de forma rápida las fugas de intensidad, evitando de esta forma, la formación de calor por efecto Joule.

Eventualmente, y cuando la importancia de la instalación (generalmente industrial) lo requiera, se utilizan relés indirectos en las diferentes modalidades conocidas.

6.1.5 Cortacircuitos fusibles

Los fusibles son el sistema más antiguo de protección contra fallos eléctricos. Estos dispositivos han perdurado a través del tiempo gracias a unas innegables ventajas:

- Son de construcción rápida y sencilla.
- Tienen un bajo coste.
- Son muy rápidos (hasta 5 ms).
- Dispone de valores de ruptura muy altos (hasta 100 kA).

Presentan, no obstante, algún inconveniente:

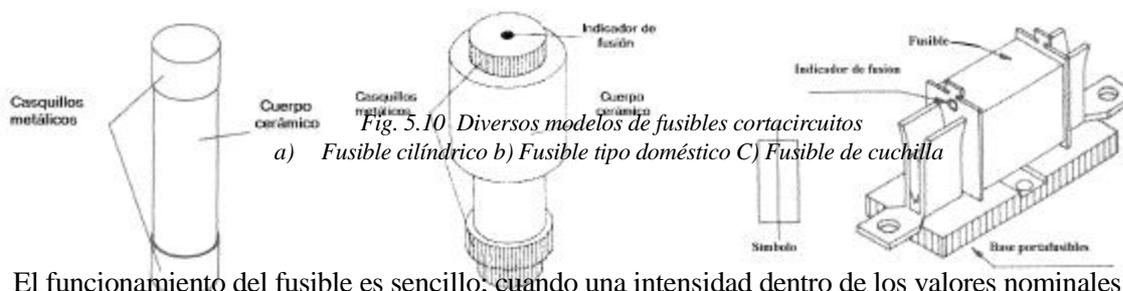
- Cada defecto provoca la ruptura o destrucción del fusible, y por tanto, debe sustituirse el componente.
- Es difícil su calibración temporal, siendo prácticamente imposible obtener respuestas precisas con ellos.

Según la norma UNE un fusible es un aparato de conexión que tiene como misión el abrir el circuito en el que está instalado, por fusión de uno o varios elementos destinados y diseñados para este fin, cortando la corriente cuando excede de un determinado valor preestablecido.

Un fusible convencional consta de:

- Base portafusibles: parte fija provista de bornes destinados a ser conectados a la red y que comprende todos los elementos que aseguran su aislamiento.

- Cartucho fusible: comprende el elemento o elementos fusibles, que es necesario substituir por otro nuevo después del funcionamiento del cortocircuito y antes de que éste sea puesto de nuevo en servicio. Existen de varias tensiones e intensidades.



El funcionamiento del fusible es sencillo; cuando una intensidad dentro de los valores nominales p

Fig. 6.10 Diversos modelos de fusibles conrtacircuitos a) Fusible cilíndrico b) Fusible tipo doméstico c) Fusible de cuchilla

El funcionamiento del fusible es sencillo; cuando una intensidad dentro de lo valores nominales pasa por el filamento del fusible, el hilo del filamento evacuará el exceso de calor producido por el paso de intensidad sin problemas. Mas cuando la intensidad llegue a valores superiores a su valor nominal, no se podrá evacuar este calor, produciéndose la fusión del hilo del fusible (*tiempo de prearco*, que depende de la intensidad del circuito). En este punto el fenómeno es ya irreversible, pero la corriente no cesa de forma inmediata, sino que se prolonga durante un tiempo al que se denomina *tiempo de arco*, este tiempo es directamente proporcional a la tensión del circuito. El tiempo total es la suma de los dos anteriores, siendo el tiempo que tarda en desaparecer completamente la corriente.

Supóngase que un circuito se cierra sobre un defecto. En el instante de la conexión, la tensión tiene cierto valor dado sobre la alternancia. La corriente está relacionada con la tensión por el desfase. La corriente de cortocircuito puede establecerse en un punto tal de la alternancia de la tensión que, teniendo en cuenta el desfase:

- La intensidad pase por cero (simetría)
Si $\cos \Pi = 1$, este momento corresponde al de tensión nula.
- La intensidad pase por su valor máximo (asimetría total)
Si $\cos \Pi = 1$, este valor corresponde al valor máximo de tensión.
- La intensidad tenga un valor cualquiera sobre la alternancia (diversos grados de asimetría).
- El valor eficaz de la corriente de cortocircuito venga dado por las siguientes expresiones:

$$1 \text{ En régimen simétrico: } I_{cc} = \frac{I_p}{\sqrt{2}} \quad [5.1]$$

$$2 \text{ En régimen asimétrico total: } I_{cc} = \frac{I' p}{2 \cdot \sqrt{2}} \quad [5.2]$$

En realidad, en este último caso, el valor real I_p es ligeramente inferior a I_p , por tanto:

$$I_{cc} = \frac{I' p}{2.5} \quad [5.3]$$

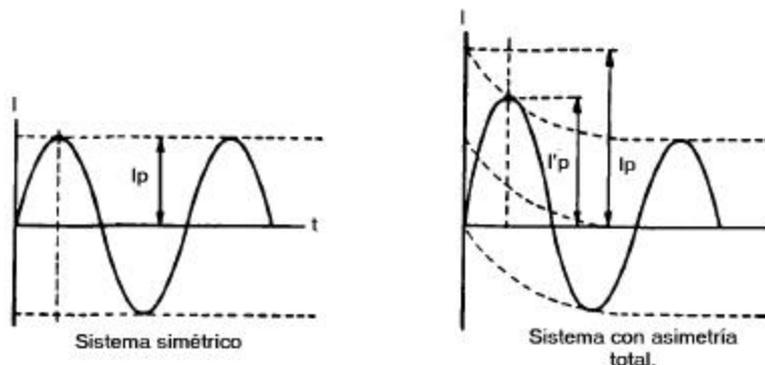


Fig. 6.11 Diversas variantes de cortocircuitos dependiendo de la simetría del sistema

Antes de que la corriente haya alcanzado el valor previsto de cortocircuito I_p , el fusible corta el circuito en un tiempo t . La corriente aumentará de valor durante un tiempo t_1 (tiempo de prearco). Al cabo del tiempo t_1 , el elemento fusible estará en estado de fusión; este fenómeno resulta irreversible, formándose en el interior del fusible un arco que se extinguirá en un tiempo t_2 (tiempo de arco que depende de la tensión), siendo el tiempo total de funcionamiento del fusible:

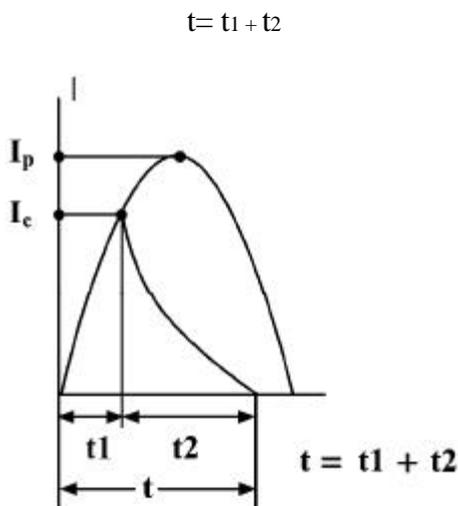


Fig. 6.12 Zona de funcionamiento de un fusible cortocircuitos

En el tiempo t , la intensidad no alcanza el valor de cresta I_p de la corriente de cortocircuito. El valor I_{cc} de la corriente cortada se denomina corriente de limitación.

La zona de funcionamiento de un fusible está pues delimitada por:

- 1 La curva mínima de prearco (tiempo t_1)
- 2 La curva máxima de funcionamiento total (tiempo $t = t_1 + t_2$)

Por debajo de esta zona está asegurada la no fusión del fusible; por encima de esta curva, la fusión es segura. Entre ambas queda una zona de incertidumbre. Como el tiempo de arco t_2 es esencialmente función de la tensión, se deduce que la zona de incertidumbre es tanto más ancha cuanto más elevada sea la tensión de servicio. Por lo general, se dan los valores para la tensión máxima de servicio.

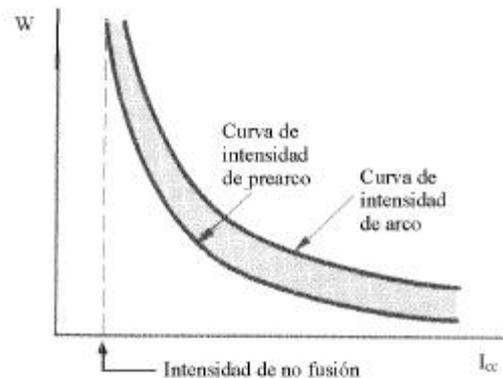


Fig. 6.13 Curva de esfuerzos térmicos de un fusible cortocircuitos en función de la corriente de cortocircuito

Los fusibles pueden ser rápidos o lentos. En los lentos se retrasa notablemente la desconexión recurriendo a artificios especiales (por ejemplo, insertando puntos gruesos de soldadura en el alambre fusible). Un fusible rápido, por ejemplo, desconecta bajo una corriente 5 veces la nominal, aproximadamente en 0,1s, mientras que un fusible lento no lo hace hasta que ha transcurrido 1s.

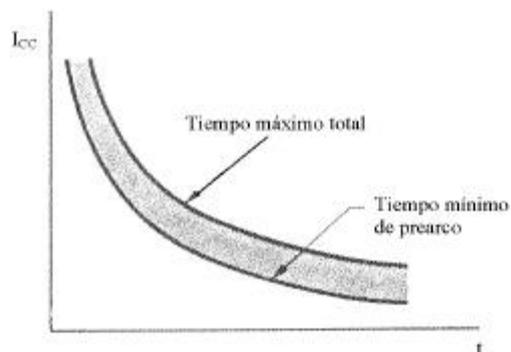


Fig. 6.14 Curva de los tiempos de disparo de un fusible en función de la intensidad

Por otra parte, también pueden clasificarse los fusibles en estos dos grupos:

- Fusible normal o de distribución: conviene para todos los circuitos que no presentan sobrecargas pasajeras importantes. Puede actuar como sistema de protección individual aunque no es aconsejable (fusibles tipo "g").

- Fusible de motor o de acompañamiento: conviene para asegurar la protección contra cortocircuitos en los circuitos que normalmente presentan sobreintensidades temporales importantes, cuando, por otra parte, estos circuitos ya están protegidos contra las sobrecargas por dispositivos apropiados. El caso más frecuente es el de los motores protegidos por relés térmicos (fusibles tipo "M").

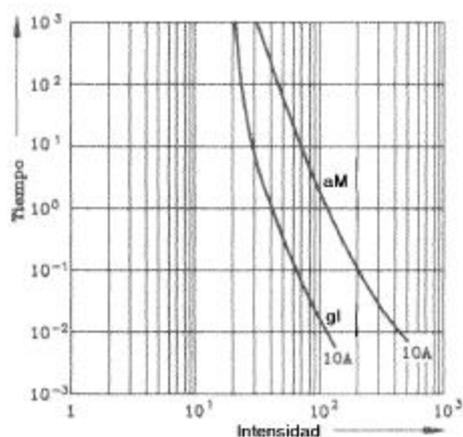


Fig. 6.15 Curvas de tiempo intensidad normalizadas para fusibles gL (de uso general) y gM (para la protección de motores)

6.2 Coordinación de sistemas de protección. Selectividad eléctrica

6.2.1 Introducción

No basta con disponer de las protecciones adecuadas, es interesante realizar con ellas una selectividad efectiva, de forma que se potencien los efectos protectores a ellas asignadas.

La necesaria coordinación de los sistemas de protección se basa, por una parte, en el conocimiento de las características y el comportamiento de los diferentes elementos de una red eléctrica, y por otra parte, en la adecuada elección de las protecciones y ajustes de las mismas.

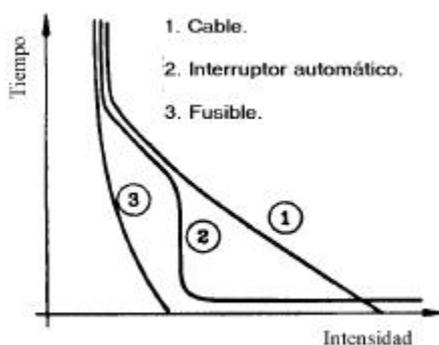


Fig. 6.16 Protección de conductores. Curvas características de los elementos de protección

En el conjunto de sistemas de protección conocidos, se pueden distinguir sin dificultad dos familias de protecciones en función de su cometido.

En una de las familias, se engloban todas aquellas protecciones denominadas de funcionamiento *cerrado* o de selectividad independiente (diferencial, cuba, etc.), cuya característica común, desde el punto de vista de la coordinación, está basada en su propio funcionamiento; por tanto, son independientes de las demás. Esta familia de protecciones, denominadas *principales*, no precisa de un análisis de coordinación propiamente dicho, sino de una comprobación de que sus características propias de funcionamiento sean las adecuadas para la unidad a proteger, aparte de su correcto funcionamiento.

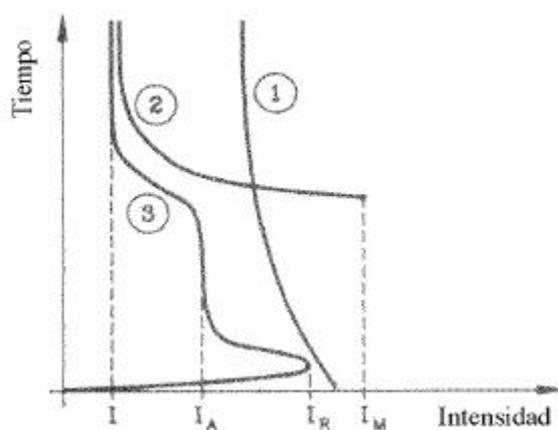


Fig. 6.17 Protección de motores según su curva característica (3) Protección por medio de fusibles (1) Protección por medio de relés térmicos (2)

La segunda familia engloba las denominadas protecciones *abiertas*, de reserva, o de segunda cobertura. La característica común que las distingue es su dependencia, y por tanto, la necesaria selectividad entre sí.

6.2.2 Criterios sobre la selectividad

Existe selectividad entre las protecciones de sobreintensidad de una instalación cuando, al producirse una falta o sobreintensidad, actúa únicamente el dispositivo previsto (el situado inmediatamente *aguas arriba* de la falta o aparato sobrecargado). Esto se consigue, cuando las características *tiempo-corriente* no se cortan, existiendo entre ellas una separación que garantice la no interferencia señalada.

La selectividad en la zona de las corrientes de cortocircuito no puede plantearse basándose en los tiempos de funcionamiento de los elementos magnéticos o fusibles, ya que a tales niveles de corriente, éstos son muy pequeños y se llegaría a conclusiones erróneas.

Para que exista selectividad en condiciones de cortocircuito, debe introducirse un retardo adicional de forma que, cuando se haya extinguido el arco, en el interruptor más cercano a la falta no se haya iniciado la desconexión (antes de iniciarse el tiempo mecánico). Para asegurar la selectividad, es necesario que exista un margen entre el t_a del interruptor *cercano*, y el t_a del interruptor *alejado*.

Con carácter general, y con independencia del nivel de tensión que se considere, la selectividad entre dos niveles de protección debe fijarse con un margen de tiempo situado entre 0.3 s a 0.5 s. Esta conclusión es aplicable a cualquier tipo de protección.

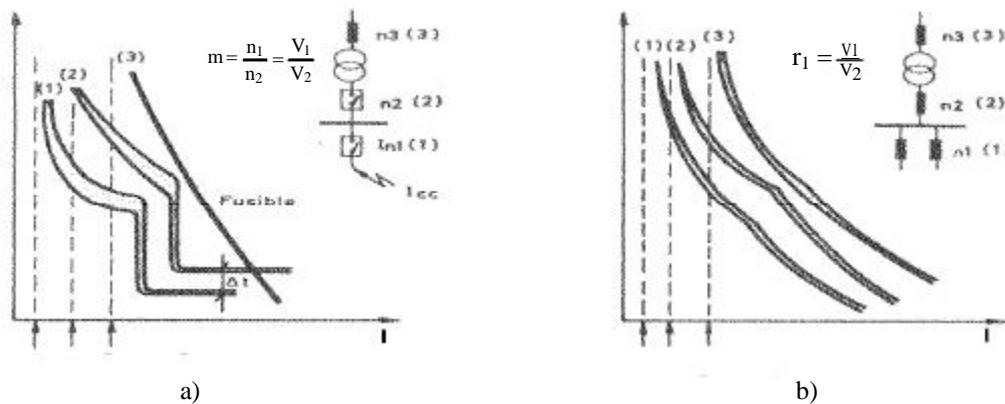


Fig. 6.18 Curvas de selectividad a) Selectividad entre interruptores automáticos en baja tensión y fusibles en media tensión
b) Selectividad entre fusibles en baja tensión y fusibles en media tensión

Para los fusibles la situación es parecida, con la diferencia de que el tiempo de prearco corresponde al tiempo necesario para llevar el elemento fusible a la fusión y vaporización, sucesivamente.

También en este caso debe preverse un margen, para evitar que el fusible lejano quede afectado en sus características, aunque no funda, durante el cortocircuito. Es decir, el tiempo total del primer fusible (tiempo de prearco más el tiempo de arco) deberá ser menor (por lo menos) que el tiempo de prearco del segundo fusible, así se evitará que el segundo fusible quede afectado por el funcionamiento del primero.

Pero no sólo debe tenerse presente los tiempos de disparo, a la hora de realizar una correcta selectividad, sino que además es necesario, para que dos o más fusibles sean selectivos, que sus intensidades nominales sean distintas. Concretamente, la relación I_2 / I_1 que asegura la selectividad varía según el tipo, fabricante y condiciones de empleo de los fusibles (tensión, forma de instalación, etc.).

En general puede afirmarse que cuando esta relación sea igual o superior a 2, existirá siempre selectividad. Con fusibles de tipo cilíndrico y de cuchillas, dicha relación podrá ser 1.6 a 1.8, según las marcas. Para los fusibles del tipo doméstico ($Un < 380 < V$) esta relación podrá descender hasta valores de 1.3 a 1.4.

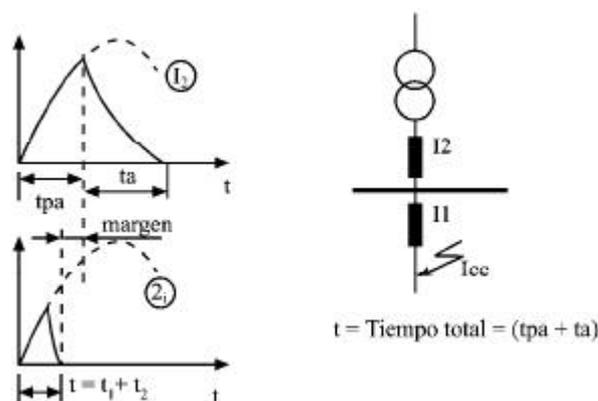


Fig. 6.19 Selectividad entre cortacircuitos fusibles

6.2.3 Consideraciones sobre los valores límite de ajuste

Al plantear los criterios y la metodología para establecer los valores de ajuste de las protecciones que debe guardar una determinada selectividad, conviene tener una respuesta adecuada a la siguiente pregunta ¿Cuáles deben ser los límites para que las magnitudes de ajuste de las protecciones de sobreintensidad o similares sean las adecuadas?

La respuesta a esta pregunta requiere que se comprueben los valores que definitivamente se asignen a los ajustes, bajo tres niveles distintos:

- Valores mínimos
- Valores de carga
- Valores máximos

Los valores mínimos de ajuste son aquellos que sin presencia de falta podrían provocar la operación de protección. Tal sería el caso de una protección diferencial cuya intensidad de arranque fuera inferior a la intensidad capacitiva de la unidad protegida o, a la correspondiente a los errores de T/I en condiciones de cortocircuito. En definitiva, el valor mínimo de ajuste deberá estar por encima de estos límites.

Los valores de carga corresponderán a las magnitudes resultantes en funcionamiento normal de las unidades protegidas. En este caso, deberán tenerse en cuenta los márgenes admisibles de sobrecarga para establecer, en consecuencia, los valores de ajuste a partir de este último nivel.

Los valores máximos de ajuste serán aquellas magnitudes que, salvo excepciones aceptadas, no excederán del límite térmico de la unidad protegida, y aun solamente por unos instantes.

Este límite máximo de ajuste no debe establecerse solamente para la protección primaria de la unidad protegida, sino que debe extenderse, si es posible, a la protección situada *aguas arriba* que ejerce la función de reserva.

Las normas establecen que los transformadores deben soportar 10 veces la I_n , durante 3 s y 25 veces la I_n , durante 1 s, respectivamente.

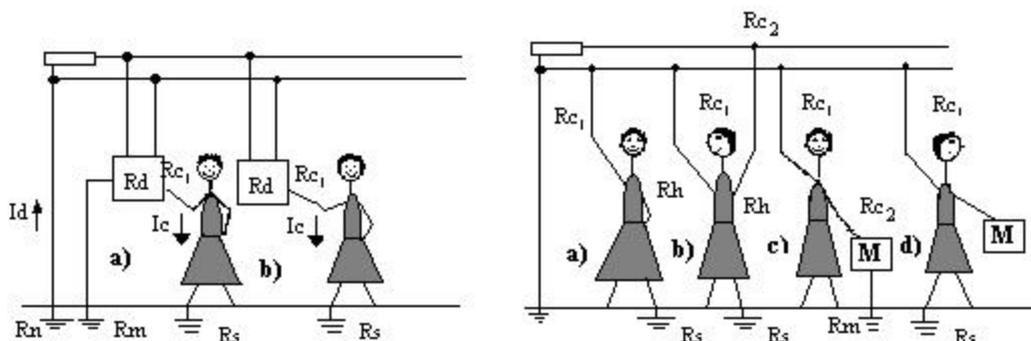
En conclusión, debe insistirse en la necesidad de superponer a las curvas de ajuste de las protecciones de sobreintensidad de fase, las correspondientes de $I^2t = cte$, de la unidad protegida, para comprobar la bondad de los ajustes.

6.3 Tipos de contactos eléctricos

Recordemos brevemente los tipos de contactos accidentales que pueden producirse en las instalaciones eléctricas, es decir, el contacto directo y el contacto indirecto.

- El contacto directo: surge cuando se produce un contacto con una parte activa de la instalación, es decir, con una parte normalmente bajo tensión.
- El contacto indirecto: surge cuando se entra en contacto con ciertas partes que habitualmente no están diseñadas para el paso de la corriente eléctrica, pero que pueden quedar en tensión por algún defecto (las masas).

En el siguiente esquema se indican posibles disposiciones de contactos eléctricos directos e indirectos.



I. CONTACTOS INDIRECTOS

- Máquina en la que aparece una tensión de defecto.
- Máquina en la que aparece una tensión de defecto provocada por un fallo de aislamiento franco (permite el paso de toda la corriente)

II. CONTACTOS DIRECTOS

- Contacto fase-tierra.
- Contacto fase-neutro.
- Contacto fase-máquina con PT.
- Contacto fase-máquina sin PT.

Fig. 6.20 Diversos contactos eléctricos indirectos y directos

En el circuito eléctrico de la figura, cada parámetro indica:

- R_n = resistencia de puesta a tierra del neutro
- R_t = resistencia de puesta a tierra de las masas
- R_{c1} = resistencia de contacto
- R_{c2} = resistencia eléctrica del calzado
- R_h = resistencia eléctrica del cuerpo humano
- R_s = resistencia eléctrica del suelo (sí $R_s > 50000$ & el suelo se considera aislante)
- I_c = corriente que circula por el cuerpo humano
- I_d = corriente total del circuito de defecto
- R_d = resistencia de defecto
- U_e = tensión de la red
- U_d = tensión de defecto
- U_c = tensión de contacto
- U = tensión de servicio

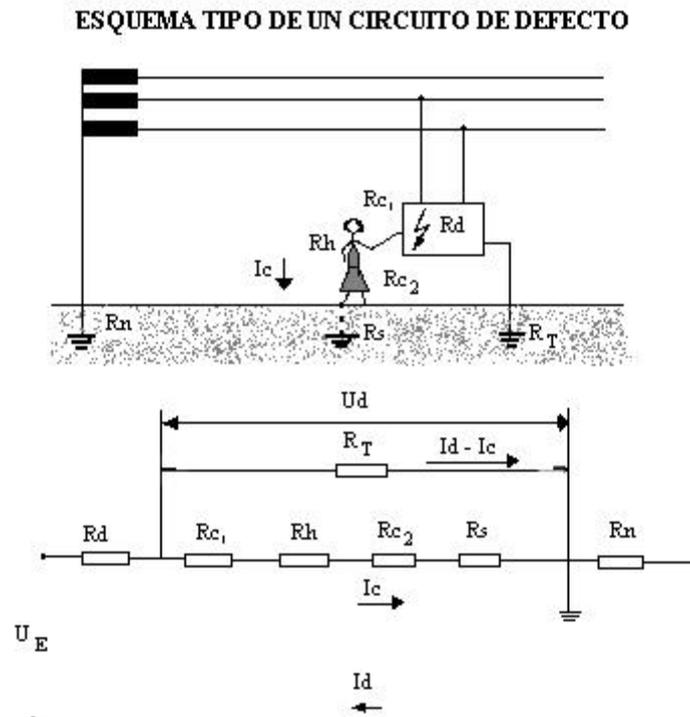


Fig. 6.21 Ejemplo de un circuito formado por un defecto masa-tierra, con la correspondiente expresión de la intensidad para el caso mostrado

En la anterior figura, podemos observar el esquema típico de una red eléctrica en estrella con el neutro conectado a tierra y las masas conectadas también a tierra (sistema TT). Si en un sistema como el descrito se produce un fallo de aislamiento en el aparato receptor, la corriente fluirá a través de accidentado, cerrándose el circuito por el punto neutro de la estrella del secundario del transformador. Dependiendo del circuito resultante, será más o menos peligroso el tipo de contacto que se produzca. No debe olvidarse de comprobar la intensidad que pasará a través del elemento de protección, aparte de comprobar, por supuesto, la corriente y la tensión a las que estará sometido el accidentado.

La fórmula al pie de la figura nos permite obtener la intensidad que circulará por el accidentado en las condiciones indicadas. Nótese que cualquier variación en el tipo de accidente, en el tipo de suministro (en este caso tipo TT) o en el lugar de contacto variaría el circuito resultante; esta variación provocará un cambio en la expresión de la fórmula dada, invalidando los resultados obtenidos con la misma.

6.4 Técnicas de seguridad contra contactos eléctricos

6.4.1 Introducción

Las técnicas de seguridad contra contactos eléctricos pueden establecerse de forma conjunta para los contactos directos e indirectos, o bien, de forma independiente.

No obstante, la protección contra los contactos eléctricos debe quedar garantizada por el propio material eléctrico, por la aplicación de las medidas de protección o por la combinación de ambos sistemas.

Una primera división de estas medidas pasan por controlar el riesgo, y éstas pueden ser de dos tipos: informativas y de protección.

6.4.2 Técnicas de seguridad informativas

Reciben el nombre de medidas informativas aquellas que de algún modo previenen la existencia del riesgo. Con este tipo de medidas lo que se intenta es evitar que las situaciones de riesgo lleguen a producirse. Si no existe situación de riesgo, no existirá accidente. Estas medidas pueden resumirse como:

- Normativas: establecer normas operativas que impliquen tomar unas precauciones delante de cualquier sistema eléctrico encaminadas a evitar el peligro.
- Instructivas: formación de los operarios que trabajan con riesgos eléctricos. Una buena formación nos dará un conocimiento adecuado de la electricidad, y conociéndola mejor, la podremos respetar y evitar con más seguridad.
- De señalización: colocar señales de prohibición, precaución o información. Estas medidas pasan por prohibir el acceso a determinadas zonas a personal no autorizado, evitándose así el riesgo que por negligencia o desconocimiento puedan entrar en contacto con partes activas en tensión. En otros casos (precaución e información), estas medidas son muy útiles, ya que nos señalizan los puntos o espacios donde existe fluido eléctrico y por tanto peligro.
- De identificación y detección: identificación y detección en las instalaciones eléctricas. Estas medidas simplemente nos informan de donde se encuentran las canalizaciones, máquinas o elementos eléctricos, zonas que deberemos evitar y respetar.

6.4.3 Técnicas de seguridad de protección

Al contrario de las anteriores, a las que complementan, estas medidas pasan por la protección del operario, llegado el caso de contacto eléctrico, tanto si es por fallo de las medidas anteriores o por otros conceptos que pudieran producirse.

Se pueden clasificar en individuales y de la instalación.

6.4.3.1 Medidas de protección individuales

Para la aplicación de estas medidas es necesario realizar una clasificación de los sistemas.

- Sistemas eléctricos: aquí el peligro lo supone el entrar en contacto con elementos puestos bajo tensión y, por tanto, será necesario aislarnos de los mismos. Entre otras medidas se incluyen los equipos de protección individual (EPI): guantes aislantes, cascos, ropa o zapatos aislantes, tarimas y alfombras aislantes, pértigas de maniobra y salvamento, etc.
- Por el contrario, en ambientes donde exista peligro de acumulaciones de cargas estáticas, las medidas de protección pasarán por la continuidad eléctrica, para evitar estas acumulaciones. Entre otras, podemos hallar las siguientes medidas protectoras:
 - Conexión de las partes metálicas a tierra
 - Empleo de *sprays* antiestáticos
 - Empleo de humidificadores (60% de humedad como mínimo)
 - Empleo de neutralizadores de partículas (ionización del aire)
 - Uso de ropa conductora (algodón), guantes conductores, zapatos y suelos conductores, etc.

Nótese la diferencia entre las medidas empleadas para la protección de la corriente eléctrica (prendas aislantes), y las de protección contra la electricidad estática (uso de prendas conductoras que evitan la acumulación de cargas, permitiendo a éstas fluir constantemente hacia tierra).

6.4.3.2 Medidas de protección de las instalaciones

Estas medidas se dividen en los dos grandes grupos de contactos: directos e indirectos, pudiéndose aplicar de forma conjunta, o bien, de forma independiente

6.4.3.2.1 Protección contra contactos directos

Salvo raras excepciones, la protección contra contactos directos con partes activas normalmente en tensión es siempre obligatoria, pasando por tres grandes apartados:

- 1 Protección completa: protección por aislamiento y protección por el uso de barreras o recubrimientos.
- 2 Protección parcial: protección por la colocación de obstáculos o por alejamiento de las partes activas.
- 3 Protección adicional: protección por uso de interruptores diferenciales de alta sensibilidad.

La protección completa se aplica en todos los casos, mientras que la aplicación de la protección parcial nos la indicará la normativa que así lo prevea (zonas industriales, fábricas, talleres, etc).

La protección adicional debe considerarse solamente como complemento de alguna de las protecciones anteriores, no permitiéndose su uso de forma individual o independiente. Esta protección se realizará por medio de interruptores diferenciales de alta o muy alta sensibilidad.

□ Protección completa

- Por aislamiento: un ejemplo muy claro de este tipo de protección lo constituye el aislamiento que recubre los cables eléctricos. En este aislamiento se indica el nivel de tensión que el cable es capaz de soportar sin variar sus características físicas (en baja tensión, por ejemplo, para los cables de acometidas o líneas repartidoras, el nivel de aislamiento debe ascender a 1000 V, para las derivaciones individuales será de 750 V y para los cables interiores de 440 V, si estos son flexibles).
- Recubrimientos de partes activas de las instalaciones: se llevará a cabo con aislamientos apropiados capaces de conservar sus propiedades con el paso del tiempo, limitándose la corriente de contacto a un valor no superior a 1 mA. No se consideran aislamientos ni las pinturas, ni los barnices, ni las lacas, etc que no estén debidamente homologados.

□ Protección parcial

- Interposición de obstáculos: en este caso lo importante es que estas barreras impidan todo contacto accidental con las partes activas de la instalación, fijándose éstas de forma segura para resistir los esfuerzos mecánicos que puedan surgir de su función. Los obstáculos pueden ser: tabiques, rejillas, pantallas, puertas, etc.
- Alejamiento de las partes activas de la instalación: consiste en mantener a las personas protegidas a una distancia tal que sea imposible un contacto fortuito. Estas distancias están reflejadas en la siguiente figura, considerándose como zona potencialmente peligrosa, la comprendida dentro de un cubo de 2,5 m de alto por 1 m alrededor del sujeto. Estas distancias de seguridad están dadas para instalaciones en baja tensión, para tensiones mayores se aplicarán otros criterios, como se detallará más adelante.

ZONAS ALCANZABLES CON LA MANO, SEGUN MI BT 02]

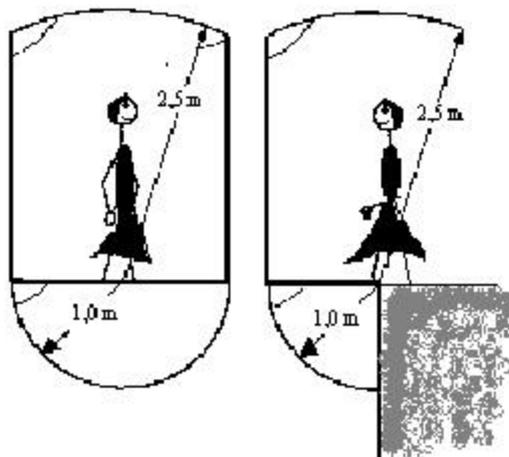


Fig. 6.22 Distancias de seguridad para impedir un contacto directo accidental con las manos

Para instalaciones de alta tensión, en proximidad de edificaciones, se aplicará la siguiente fórmula en metros, con un valor mínimo de 5 m (la tensión esta dada en kV).

$$D = 3.3 + \frac{U}{100} \quad [5.4]$$

□ **Protección adicional**

- Esta protección pasa por el uso de los interruptores diferenciales, siendo uno de los sistemas más característicos y comunes de protección en la actualidad. Este sistema ha sido explicado al principio del capítulo, remitiéndonos al mismo para una mayor comprensión.

6.4.3.2.2 Protección de los contactos indirectos

Para una correcta elección de las medidas de protección contra contactos indirectos, han de conocerse previamente una serie de datos, entre ellos destacamos:

- El grado de importancia de la instalación eléctrica
- Las masas y los elementos conductores existentes en las zonas a electrificar
- La naturaleza de los locales o emplazamientos

En el caso de locales con tensiones reducidas (50 V en locales secos; 24 V en locales húmedos; y 12 V en locales sumergidos), estas tensiones nunca darán lugar a intensidades superiores a 10 mA, no resultando por tanto peligrosas. No es necesario, en estos casos, más sistemas de seguridad que el descrito.

Si las tensiones son superiores a 25 V, pero inferiores a 250 V, es completamente necesario establecer medidas de protección tanto para las instalaciones al aire libre como para todos los locales donde sea posible un contacto eléctrico involuntario.

En instalaciones con voltajes superiores a 250 V respecto a tierra, es necesario disponer de algún sistema de protección del tipo "A" o "B".

6.4.3.2.2.1 Medidas de protección de clase "A"

Con las medidas de protección de clase A se suprime el riesgo haciendo que los contactos no resulten peligrosos o impidiendo contactos simultáneos entre las masas y los elementos conductores:

□ **Utilización de pequeñas tensiones de seguridad**

Las tensiones de seguridad, según el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión, son:

- 50 V: para lugares secos
- 24 V: para lugares húmedos
- 12 V: para lugares mojados

Con estas tensiones, y con unas características dadas por las normas CEI (persona de 50 kg de peso, con una frecuencia de suministro de 50 Hz, y contacto mano-mano, o mano-pie), las intensidades estarán limitadas a 10 mA, no resultando peligrosas para las personas.

Asimismo, se evitará que el circuito de utilización pueda entrar en contacto con otros circuitos de mayor tensión y tampoco podrá estar (este circuito) conectado a tierra, para evitar sobretensiones peligrosas fortuitas.

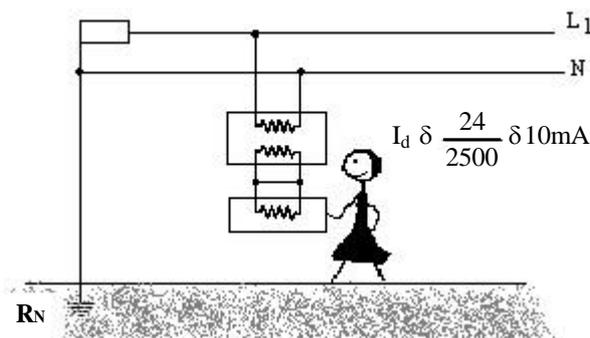


Fig. 6.23 Con la utilización de pequeñas tensiones de seguridad se limitan las corrientes a valores no peligrosos ($I < 10\text{mA}$)

El inconveniente de este sistema es que si deseamos potencias razonables, como la tensión es tan pequeña, son necesarias corrientes muy grandes, lo que repercute en la utilización de conductores de gran sección. Es importante recordar que, por nuestro cuerpo sólo pasarían estos 10 mA (debida a nuestra resistencia), pero esto no quiere decir que las intensidades por las líneas (con resistencias menores que las del cuerpo humano) sean grandes, debidas precisamente a las pequeñas tensiones de que utilizamos.

Los usos más frecuentes de esta medida de protección coinciden con la imposibilidad del empleo de otros métodos. Así, herramientas eléctricas, juguetes eléctricos, lámparas portátiles, etc, son ejemplos de su empleo.

□ Inaccessibilidad de partes activas y elementos conductores de forma simultánea

Consiste esta medida en intercalar obstáculos entre las partes activas y las masas en los emplazamientos a electrificar. Esta medida pasa por un correcto diseño de las canalizaciones, máquinas y otros elementos, de forma que no puedan entrar en contacto de forma involuntaria o accidental con las masas de los elementos metálicos.

Por tanto, para aplicar correctamente esta medida es necesario diseñar los elementos conductores que se van a manipular en el emplazamiento de la instalación. Para conseguir la inaccesibilidad, hay que intercalar obstáculos aislantes entre los conductores y las masas.

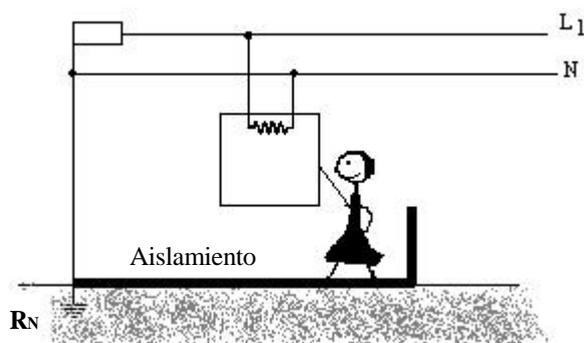


Fig. 6.24 Protección por la incorporación de obstáculos y aislamientos entre las partes activas y las masas de los emplazamientos a electrificar

□ Conexiones equipotenciales

El método consiste en interconectar todas las masas metálicas de la instalación mediante el uso de conductores de protección, de forma que resulte imposible la aparición de diferencias de potenciales grandes entre ellas. En muchas ocasiones estas uniones equipotenciales están unidas directamente a tierra (punto de potencial nulo); en tal caso, la tensión que puede aparecer en las masas metálicas resulta prácticamente nula.

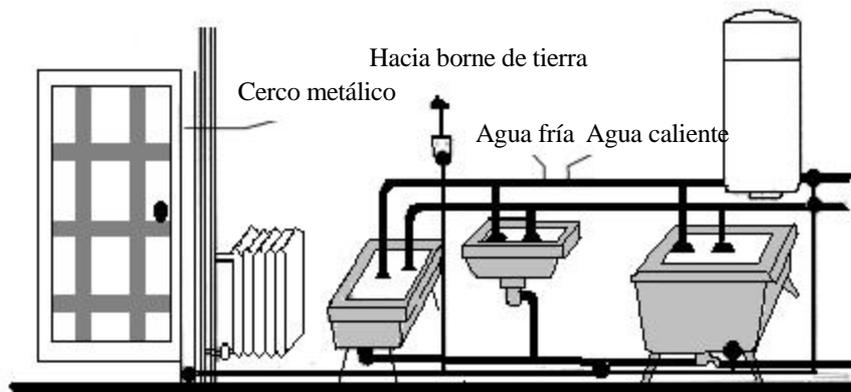


Fig. 6.25 Conexión equipotencial de las masas metálicas de la instalación mediante conductores de protección

Esta medida se recomienda para locales o emplazamientos húmedos, asociándose frecuentemente con medidas de protección del tipo "B".

□ Recubrimiento de las masas con aislamiento de protección

Si las masas metálicas son las partes que en un contacto accidental pueden entrar en tensión, es recomendable aislarlas mediante un recubrimiento especial que impida que ellas lleguen a presentar tensión en caso de fallo del circuito.

No se consideran aislantes ni los barnices, pinturas, lacas, ni los recubrimientos no homologados según nos determinan las normas UNE.

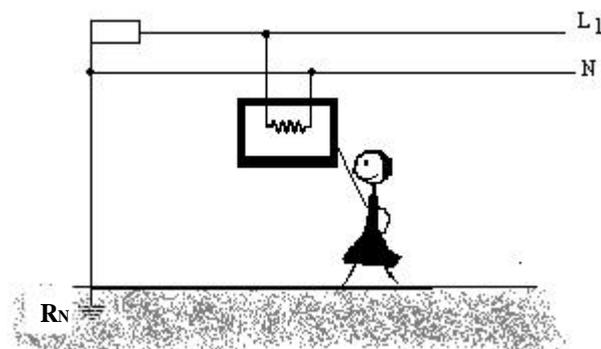


Fig. 6.26 Protección mediante el empleo de recubrimientos especiales de las masas metálicas susceptibles de quedar bajo tensión en un defecto eléctrico

□ Separación de circuitos

Con esta medida de protección se elimina el peligro en sí mismo, ya que consigue que, en caso de un contacto accidental eléctrico, éste no sea peligroso.

El método consiste en separar, por medio de transformadores, el circuito de utilización de las fuentes generadoras de energía, manteniendo aislados de tierra todos los conductores del circuito de utilización, incluido el neutro.

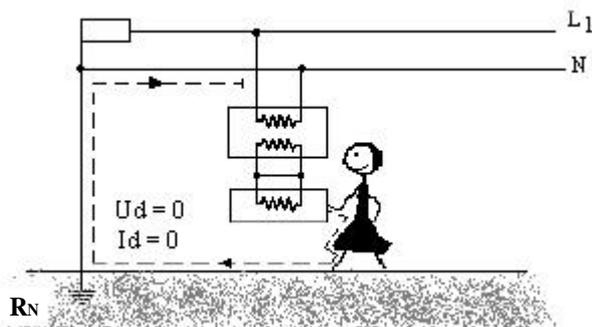


Fig. 6.27 Protección por separación galvánica de circuitos eléctricos

Si no existe ningún punto del circuito de utilización puesto a tierra, en caso de producirse un contacto accidental con una parte activa, el circuito no puede cerrarse a través de tierra, no pasando intensidad por el mismo y no produciendo ningún daño al posible accidentado.

Este sistema se emplea en condiciones de trabajo donde el contacto con masas metálicas es frecuente y bueno, como pueden ser trabajos de calderería, construcción naval, estructuras metálicas, etc.

□ Doble aislamiento

Consiste esta medida en emplear aisladores reforzados para cubrir las masas metálicas susceptibles, en caso de un fallo eléctrico, de quedar en tensión. El nombre de doble aislamiento deriva de que además del aislamiento convencional, común a todos los aparatos eléctricos, debe existir un segundo aislamiento que evite, en caso de fallo del primero, el contacto accidental a la masa en tensión. Es decir, el contacto sólo será posible si, habiendo fallado el primer aislamiento, lo hace también el segundo, caso altamente improbable.

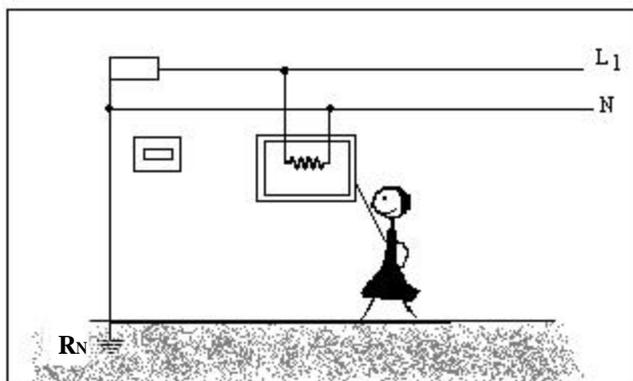


Fig. 6.28 Protección por el empleo de doble aislamiento

Las aplicaciones más frecuentes de esta protección pasan por: aparatos portátiles de alumbrado, herramientas manuales, pequeños electrodomésticos, maquinas de oficina, etc.

6.4.3.2.2 Medidas de protección de clase "B"

Mediante estas medidas de protección se efectúa la puesta a tierra directa o a neutro de las masas, combinándola con un dispositivo de corte automático que permita la desconexión de la instalación eléctrica defectuosa.

Las medidas de protección de clase "B" se dividen en:

- 1 Puesta a tierra de las masas y dispositivos de corte por intensidad de defecto
- 2 Puesta a tierra de las masas y dispositivos de corte por tensión de defecto
- 3 Puesta a neutro de las masas y dispositivos de corte por intensidad de defecto

□ Puesta a tierra de las masas y dispositivos de corte por intensidad de defecto

Esta medida de protección se basa en la puesta a tierra de las masas, asociada con un dispositivo de corte automático sensible a la intensidad de defecto y que realice la desconexión de la instalación defectuosa.

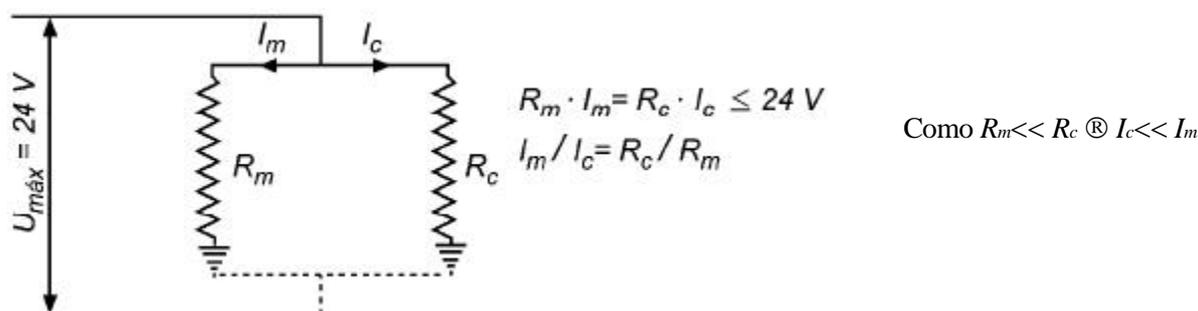


Fig. 6.29 Puesta a tierra de las masas y dispositivos de corte por intensidad de defecto

Por tanto se realizará la unión mediante elementos conductores, sin fusible ni protección alguna, entre determinados elementos o partes de una instalación y un electrodo o grupo de electrodos enterrados en el suelo, a fin de permitir el paso a tierra de las corrientes eléctricas que puedan aparecer por defecto en los citados elementos.

El empleo de dispositivos de corte por intensidad de defecto (interruptor diferencial) complementará este sistema, convirtiéndose el conjunto en uno de los sistemas de protección más habituales en la actualidad, tanto por su eficacia como por sus características de muy alta protección y lucha contra el fuego.

Este sistema interrumpe el paso de la corriente cuando aparece en el circuito una intensidad de defecto a tierra, cerrándose el circuito directamente por tierra. Para comprobar su funcionamiento, el diferencial dispone de un pulsador de prueba como se indica en la figura 5..30.

□ Puesta a neutro de las masas y dispositivos de corte por tensión de defecto

Este sistema de protección consiste en el corte automático de la instalación en un tiempo lo más corto posible, a partir del momento en que aparezca una tensión peligrosa entre la masa y un punto de tierra que está a potencial cero. Este sistema comprende un interruptor de protección con bobina de tensión, un dispositivo de control del sistema de protección y una toma de tierra auxiliar para el interruptor.

La aplicación de este sistema de protección no exige que las masas de una instalación deban estar unidas eléctricamente a tierra, ni que, por el contrario, deban estar aisladas de la misma, pero sí requiere, por ejemplo, que se cumplan las siguientes:

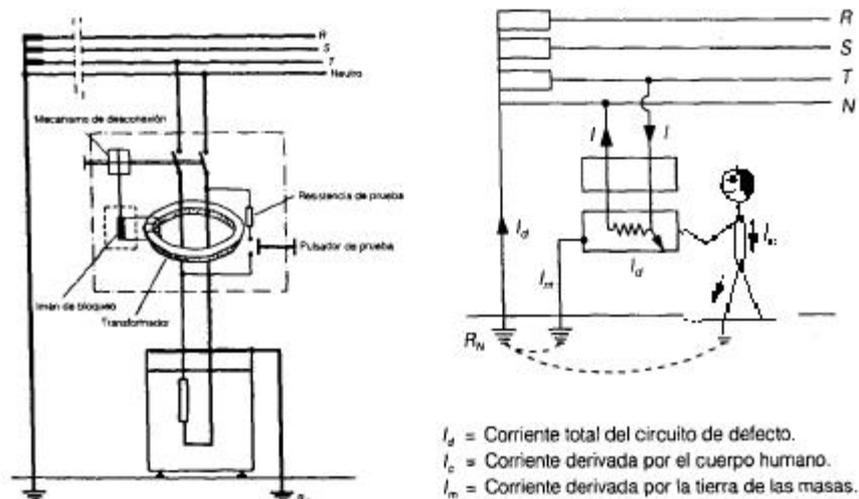


Fig. 6.30 Protección por el empleo de interruptores diferenciales

- El interruptor debe eliminar el defecto en un tiempo no superior a 5 s.
- La bobina del interruptor de protección se conectará entre la masa del aparato a proteger y una tierra auxiliar, con objeto de controlar la tensión que pueda aparecer entre ambas.
- El conductor de protección será un conductor aislado.
- La toma de tierra auxiliar será eléctricamente distinta de cualquier otra toma de tierra.

Para la aplicación de este sistema de protección, se exige el ensayo satisfactorio de su funcionamiento antes de la puesta en servicio de la instalación.

□ Puesta a neutro de las masas con dispositivo de corte por intensidad de defecto

Este sistema de protección consiste en unir todas las masas de la instalación eléctrica que se deben proteger al conductor neutro, de tal forma que los defectos francos del aislamiento del dispositivo de

corte se transforman en cortocircuitos entre fase y neutro, provocando el accionamiento del dispositivo de corte automático y en consecuencia la desconexión de la instalación defectuosa.

Para la aplicación de este método se requiere que se cumplan con las siguientes condiciones (se detallan sólo las más importantes, para mayor detalle consultar el REBT):

- Los dispositivos de corte utilizados serán interruptores automáticos o cortacircuitos fusibles.
- Los dispositivos de protección deberán actuar en un tiempo máximo de 5 s.
- Todas las masas de la instalación deben estar unidas al conductor neutro a través de un conductor de protección.
- El conductor neutro estará alojado junto a los conductores activos en una misma canalización.

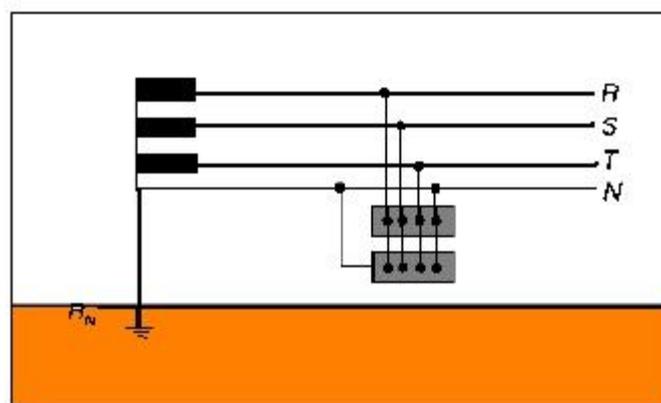


Fig. 6.31 Puesta a neutro de las masas con dispositivos de corte por intensidad de defecto

Se recomienda asociar el sistema de protección por puesta a neutro de las masas con el empleo de interruptores diferenciales de alta sensibilidad, estableciendo la conexión del conductor neutro con el de protección detrás del interruptor diferencial.

La aplicación de la medida de protección por puesta a neutro de las instalaciones alimentadas por una red de distribución pública estará subordinada a la autorización de la empresa distribuidora de la energía eléctrica, ya que la eficacia de esta medida de protección depende esencialmente de las condiciones de funcionamiento de la red de alimentación.

□ Cuadro final resumen de los símbolos de diversas protecciones

En el siguiente cuadro se detallan los símbolos más importantes utilizados para la identificación de los tipos de protección empleados. La tabla es de doble entrada: dependiendo del ambiente de utilización, así como del empleo al que se destina la máquina o componente eléctrico.

No están todos los símbolos representados, pero sí los más importantes. Nótese que los ambientes (seco, húmedo o mojado) influyen decisivamente en la elección del sistema de protección a emplear y en la importancia de los mismos.

Fig. 5.32 Simbología empleada en los sistemas de protección eléctricos

Equipo Lugar	Fijos	Móviles	Portátiles	Alumbrado portátil
SECOS ($U_s \leq 50$ V)				
HUMEDOS ($U_s \leq 24$ V)				
MOJADOS ($U_s \leq 24$ V)				



 TS Tensión de seguridad  Doble aislamiento
 Dispositivo diferencial  Transformador de separación de circuitos

Fig. 6.32 Simbología empleada en los sistemas de protección eléctricos

6.4.4 Tablas resumen de las medidas de protección contra contactos eléctricos

Como conclusión de las medidas de protección más empleadas se detallan seguidamente tres tablas, la primera con las medidas de protección contra contactos directos. La segunda y tercera hacen referencia a la protección contra contactos indirectos, concretamente medidas de protección de la clase "A" y medidas de protección de la clase "B", respectivamente.

En todas las tablas se ha intentado sintetizar las características más importantes que definen cada sistema de protección, sus condiciones de funcionamiento, sus aplicaciones, así como las normas que deben cumplir para su correcta aplicación.

6.4.4.1 Protección de los contactos directos

Salvo raras excepciones, la protección contra contactos directos con partes activas normalmente en tensión es siempre obligatoria. Esta protección pasa por tres grandes apartados: la protección completa, la protección parcial y la protección adicional. En la siguiente tabla se indican las características principales de cada una de estas protecciones, las observaciones que deberemos cumplir para su correcta aplicación y bajo qué circunstancias es posible su funcionamiento.

6.4.4.2 Protección de los contactos indirectos

Para una correcta elección de las medidas de protección contra contactos indirectos, han de tenerse en cuenta, entre otros datos:

- La naturaleza de los locales o emplazamientos
- Las masas y los elementos conductores
- La importancia y la extensión de las instalaciones

Estos aspectos obligan a adoptar la medida más idónea para cada caso, recordándose una segunda división: las instalaciones con tensiones inferiores o superiores a los 250 V, en ambos casos con respecto a tierra.

6.4.4.2.1 Medidas de protección de clase "A"

Con las medidas de protección de clase "A" se suprime el riesgo, haciendo que los contactos no resulten peligrosos o impidiendo contactos simultáneos entre las masas y los elementos conductores.

La siguiente tabla nos resume las características principales de cada una de estas protecciones. En ella se detallan las observaciones que deberemos cumplir para su correcta aplicación, sus ventajas e inconvenientes, sus condiciones de funcionamiento, y finalmente, sus aplicaciones específicas.

6.4.4.2.2 Medidas de protección de clase "B"

Mediante estas medidas de protección se efectúa la puesta a tierra directa o a neutro de las masas, combinándola con un dispositivo de corte automático (de tensión o corriente).

Tabla 6.1 Medidas de protección contra contactos directos

Medidas	Observaciones	Características	Condiciones	Aplicaciones
Protección completa	Protección por aislamientos y protección por el uso de barreras o recubrimientos	Por aislamiento	Un ejemplo muy claro de este tipo de protección es el aislamiento que recubre los cables eléctricos. En este aislamiento se indica el nivel de tensión que el cable es capaz de soportar sin variar sus características físicas. Por ejemplo en BT, para acometidas y líneas repartidoras el nivel de aislamiento asciende a 1000V (MIBT-004 ó MIBT-007), mientras que en la derivación individual e instalaciones interiores es de 750V (MIBT-017).	Se aplica en todos los casos.
		Recubrimiento de partes activas de las instalaciones	Se lleva a cabo con aislamientos apropiados capaces de conservar sus propiedades con el paso del tiempo, limitando la corriente de contacto a valores no superiores a 1mA. No se consideran aislamientos ni las pinturas, ni los barnices, ni las lacas, etc.	
Protección parcial	Protección por la colocación de obstáculos o por alejamiento de las partes activas	Interposición de obstáculos	Colocación de barreras que impidan todo contacto accidental con las partes activas de la instalación, fijándose de forma segura para resistir los esfuerzos mecánicos que pudieran surgir de su función. Los obstáculos pueden ser: tabiques, rejillas, pantallas, cajas, etc.	Se aplica en aquellas ocasiones en los que las normas así lo determinen. (Talleres, fábricas, almacenes, etc.)
		Recubrimiento de las partes activas de las instalaciones	Consiste en mantener a las personas a una distancia tal que sea imposible un contacto fortuito. Se considera zona alcanzable con la mano la que encierra una distancia de 2.5 m hacia arriba, 1m lateralmente y hacia abajo, respecto a la persona referencia. Para instalaciones en AT, en proximidad de edificaciones, se aplicará la siguiente fórmula en (m), con un valor mínimo de 5 m. $D = 3,3 + \frac{U}{100}$	
Protección adicional	Protección por el uso de interruptores diferenciales de alta sensibilidad	Uso de interruptores diferenciales de alta sensibilidad	El uso de interruptores diferenciales, permite una protección eficaz contra contactos directos e indirectos, aparte es una excelente protección contra las fugas a tierra, evitándose así posibles incendios.	Se aplica siempre, y debe considerarse como una protección complemento de algunas de las protecciones anteriores, no permitiéndose su uso de forma individual o independiente.

Tabla 6.2 Medidas de protección contra contactos indirectos. Protección clase "A"

Medidas	Observaciones	Características	Condiciones	Ventajas e inconvenientes	Aplicaciones
<i>Pequeñas tensiones de seguridad</i>	No efectuar transformaciones directas de AT a la tensión de seguridad. Los circuitos de utilización deben cumplir la MIBT-029.	Tensiones de seguridad: Lugares secos: 50V Lugares húmedos: 25V Lugares mojados: 12V	Tensión de seguridad suministrada por las <i>Fuentes de seguridad</i> que cumplan las normas UNE correspondientes.	Por si sólo proporcionan protección. Potencia de utilización limitada. No se detecta el primer fallo. No ofrece protección electrostática.	Pequeños receptores en locales muy conductores
<i>Separación de circuitos</i>	Los circuitos deben cumplir las condiciones que se indican en el punto 2.1 de MIBT-021.	Aislar los circuitos de utilización de la fuente de energía mediante transformadores, etc, y manteniendo aislados de tierra los conductores.	Los transformadores y convertidores pueden ser de clase I o II, según MIBT-0.35. 250 V, 10 kVA, monofásica 400 V, 16 kVA, y en trifásica	Por si sólo proporciona protección. Potencia de utilización limitada. No se detecta el primer fallo. No ofrece protección electrostática. No protege en líneas extensas.	Herramientas y lámparas portátiles. Pequeños receptores. Calderería. Construcción naval.
<i>Inaccesibilidad simultánea de elementos conductores y masas</i>	Se tendrán en cuenta las dimensiones de los objetos que se han de manipular en el local.	Impide el cierre del circuito de defecto imposibilitando el acceso simultáneo a los elementos conductores.	La inaccesibilidad se consigue por alejamiento o por interposición de obstáculos.	Se ha de usar simultáneamente con otros sistemas de protección ya que no anula el fallo.	Está protección sólo sirve para equipos fijos.
<i>Separación entre partes activas y masas por aislamiento de protección (doble aislamiento)</i>	Las partes metálicas accesibles no deben ponerse a tierra. No debe existir ninguna conexión posible a través de los elementos conductores que atraviesen las carcasas.	La separación entre partes activas y masas está garantizada por un aislamiento suplementario o reforzado.	El aislamiento debe corresponder a las características prescritas para los materiales de la clase II, según MIBT-031.	Por si sólo proporciona protección. No sirve para equipos de potencia elevada, ni para aparatos de calefacción.	Aparatos domésticos. Herramientas portátiles. Lámparas portátiles. Cuadros de distribución, etc.
<i>Conexiones equipotenciales</i>	Debe garantizar una buena unión eléctrica entre masas y elementos conductores.	Se unen todas las masas y elementos conductores de modo que se garantice la igualdad de potencia en todo el recinto.	Se tomaran las medidas necesarias para impedir la propagación del fallo a otros recintos.	Se ha de utilizar de forma simultánea con otros sistemas de protección, ya que no anula el fallo.	Muy limitada como sistema independiente, aunque complementa otros sistemas de protección.

Tabla 6.3 Medidas de protección contra contactos indirectos. Protección clase "B"

Medidas	Observaciones	Características	Condiciones	Ventajas e inconvenientes	Aplicaciones
Puestas a tierra de las masas y dispositivos de corte por intensidad de defecto	La tensión de defecto no debe ser superior a 24 V en locales húmedos, ni a 50 V en locales secos.	Un dispositivo sensible a la intensidad máxima asegura el corte automático en un tiempo inferior a los 5 s, en caso de primer defecto franco.	Todas las masas de una misma instalación deben estar unidas a la misma toma de tierra.	La potencia de utilización queda limitada debido a los reducidos valores de la resistencia de puesta a tierra de las masas que es preciso obtener.	Receptores de poca potencia con intensidades inferiores a los $I_n < 6$ A.
Empleo de interruptores diferenciales	Para evitar actuaciones intempestivas se tendrá en cuenta las corrientes de fuga. Los dispositivos se pueden utilizar en instalaciones existentes sin puesta a tierra..	El interruptor asegurará el corte automático en un tiempo inferior a 5 s, si la intensidad de defecto sobrepasa el umbral de sensibilidad.	La resistencia de la puesta a tierra de las masas debe ser: $R_M \delta \frac{U_s}{I_N}$	Tiempo rápido de actuación, que en el caso de AS protege incluso contra contactos directos.	Aptos para cualquier aplicación.
Puestas a tierra de las masas y dispositivos de corte por tensión de defecto.	Los conductores de protección y de tierra auxiliar deben cumplir las condiciones que se indican en el punto 2.9 de MIBT-021.	El interruptor asegurará el corte automático en un tiempo inferior a 5 s, cuando aparezca una tensión peligrosa.	La bobina del relé de tensión debe colocarse entre la masa a proteger y una tierra auxiliar eléctricamente distinta a cualquier otra.	No precisa de toma de tierra para las masas. Tiempo rápido de actuación. Dificultad para evitar que la bobina de tensión sea punteada accidentalmente.	Sistema en desuso.
Puesta a neutro de las masas y dispositivos de corte por intensidad de defecto.	La red de alimentación debe cumplir lo que indica la MIBT-008. Deben cumplirse otras condiciones indicadas en el punto 2.10 de la MIBT-021 en cuanto a secciones e instalación del conductor neutro.	Los defectos francos de aislamiento se transforman en cortocircuitos entre fases y neutro, actuando el dispositivo de corte automático en un tiempo inferior a 5 s.	Todas las masas deben estar unidas al conductor neutro a través de un conductor de protección.	Instalación económica. Dificultad en cumplir todas las condiciones para que sea verdaderamente seguro. En caso que la tensión del neutro con relación a tierra supere los 24 V en locales húmedos, o los 50 V en locales secos, este sistema debe asociarse con un dispositivo de corte de tensión de defecto. En la práctica, se precisa estación transformadora propia.	Instalaciones concebidas para su uso.

6.5 Cuestiones y problemas

Cuestiones

- 1 ¿Contra qué y cómo deben protegerse los sistemas eléctricos? Razonar las respuestas.
- 2 ¿Qué es una sobrecarga y a qué es debida? ¿Son peligrosas las sobrecargas? ¿Qué características básicas debe reunir un relé térmico?
- 3 ¿Cómo funciona un relé térmico? ¿Cómo se seleccionan los relés térmicos a colocar en un circuito eléctrico? ¿De cuántas curvas dispone un relé térmico y qué significan?
- 4 ¿Qué es un cortocircuito y a qué es debido? ¿Qué efectos produce un cortocircuito? ¿Qué características básicas debe reunir un relé magnético?

- 5 ¿Cómo funciona un relé magnético? ¿Qué se entiende por poder de corte y por poder de cierre de un relé?
- 6 ¿Cómo se consigue una protección combinada contra sobrecargas y cortocircuitos? ¿Suponen una protección para las personas estos dispositivos (razonar la respuesta)?
- 7 ¿Qué se entiende por fuga a tierra? ¿Qué peligros entrañan estas fugas? ¿Qué características debe reunir un relé diferencial?
- 8 ¿Cómo funciona un relé diferencial? ¿De qué defectos nos protege? Indicar un caso en el que el relé diferencial no resulte efectivo. ¿Cómo se protege a sí mismo contra las sobrecargas y cortocircuitos el relé diferencial?
- 9 ¿Contra qué defectos protegen los fusibles? ¿Cuál es su principio de funcionamiento? ¿Cómo se retarda su tiempo de corte? ¿Cuáles son sus principales ventajas?
- 10 ¿En qué casos son recomendables los fusibles normales? ¿Y los de acompañamiento? ¿Cuáles son los inconvenientes más importantes de los fusibles?
- 11 ¿Qué magnitud eléctrica es la responsable de la rotura del hilo del fusible? ¿Desaparece la intensidad en el instante que se produce la rotura? ¿De qué magnitud eléctrica depende el tiempo de arco?
- 12 ¿Qué es un fusible de cuchillas? ¿Y un fusible cilíndrico? ¿Y un fusible doméstico? ¿Qué es la base portafusibles y qué es el cartucho?
- 13 ¿Qué es la selectividad o coordinación de los sistemas de protección? ¿Qué clases de coordinación existen?
- 14 Indicar los criterios más importantes que rigen la selectividad de los sistemas de protección eléctricos protegidos por relés. ¿Y la de los sistemas protegidos mediante fusibles?
- 15 Indicar las consideraciones sobre los valores límite de ajuste para los sistemas de coordinación de protecciones.
- 16 ¿Qué tipo de contactos existen? ¿A qué se denomina contacto directo? ¿Y contacto indirecto?
- 17 Indicar las técnicas de seguridad contra contactos eléctricos. ¿Pueden estas técnicas establecerse de forma conjunta? ¿Cómo puede quedar garantizada la protección contra contactos eléctricos?
- 18 ¿En qué se basan las técnicas de seguridad informativas? ¿De qué tipos existen?. Razonar la respuesta.
- 19 ¿Las técnicas de seguridad de protección, en qué se basan? Indicar las medidas de protección individuales.
- 20 ¿Cómo se efectúa una protección contra contactos directos? Tipos de protección.
- 21 ¿Cómo se efectúa una protección completa contra contactos directos? ¿Y una parcial? ¿Y una adicional?
- 22 ¿Cómo se efectúa una protección contra contactos indirectos? ¿Qué datos es necesario conocer para la correcta elección de las medidas de protección contra contactos directos?
- 23 ¿En qué se diferencian las medidas de protección de la clase "A" de las de la clase "B"?
- 24 Indicar cómo se obtienen las pequeñas tensiones de seguridad? ¿A qué locales está destinada cada pequeña tensión de seguridad.
- 25 ¿En qué se basan las medidas de protección de la clase "A"? Enumerar las medidas de protección de la clase "A".
- 26 ¿En qué se basan las medidas de protección de la clase "B"? Enumerar las medidas de protección de la clase "B".
- 27 Explicar cómo funciona el método de seguridad denominado separación de circuitos.
- 28 Explicar cómo funciona el método de seguridad denominado de doble aislamiento.
- 29 Explicar cómo funciona el método de seguridad denominado utilización de pequeñas tensiones de seguridad.
- 30 Explicar cómo funciona el método de seguridad denominado puesta a tierra de las masas y dispositivos de corte por intensidad de defecto. Y el método de puesta a neutro de las masas y dispositivos de corte por intensidad de defecto.

7 Puesta a tierra

7.1 Introducción

La puesta a tierra es una de las medidas de seguridad incluidas en la categoría B. Suele estar acompañada de otras medidas (relés, diferenciales, etc.) que garanticen un alto nivel de seguridad en las instalaciones.

La puesta a tierra se basa en la propiedad de que las cargas eléctricas (electrones) siempre intentarán alcanzar valores energéticos mínimos para estar en equilibrio. La tierra es el punto de potencial cero, masa o energía mínima que mejor se adapta a los requisitos de las instalaciones eléctricas, siendo utilizada como tensión de referencia o tensión neutra. No obstante, el valor de este potencial no es constante en todos los terrenos, viéndose influenciada por corrientes telúricas u otras anomalías del substrato. Tampoco la resistividad del terreno es igual y uniforme para los distintos terrenos, dependiendo de los materiales que lo forman. Ni tan siquiera para un mismo tipo de terreno, los valores de la resistividad se mantendrán constantes a lo largo del año, variando desde valores mínimos en épocas lluviosas y húmedas, a valores máximos durante los periodos secos.

Los materiales a conectar a una puesta a tierra serán las partes metálicas normalmente sin tensión. La conexión a tierra de partes no metálicas y por tanto no conductoras no produciría el menor efecto por la falta de continuidad. La conexión de partes metálicas normalmente en tensión resultaría del todo negativa, ya que las corrientes fluirían hacia tierra directamente (fuga a tierras), sin producir el trabajo al que están encomendadas.

Los principales motivos por los que se realiza una correcta puesta a tierra, unida a un dispositivo de corte por intensidad de defecto, pueden sintetizarse en:

- Limitar las tensiones de las partes metálicas de los equipos o máquinas a valores no peligrosos para las personas.
- Asegurar, en caso de avería del material utilizado, la actuación correcta de las protecciones, de forma que la parte de la red averiada quede separada de las fuentes de alimentación, eliminando los riesgos propios de la avería.
- Impedir la acumulación de cargas electrostáticas o inducidas en los equipos, máquinas o elementos metálicos que se hallen en zonas con riesgo de explosión.
- Constituye un sistema de protección contra incendios, al limitar en tiempo y valor las corrientes de fuga.

La puesta a tierra actúa como único elemento protector en los siguientes casos:

- Contra las descargas atmosféricas o electrostáticas

- En redes con neutro aislado, como elemento de unión de las diferentes masas
- Como unión equipotencial

La normativa sobre puestas a tierra está regida por:

1. Reglamento electrotécnico para baja tensión.
 - Artículo 23
 - Hoja interpretativa nº 4
 - Instrucciones complementarias, 017, 023 y 039
2. Normas tecnológicas de la edificación (NTE o NBE)
 - Instrucciones sobre puesta a tierra. NTE-IEP/1973
 - Instrucciones sobre pararrayos, NTE-IPP/1973
 - Instrucciones sobre antenas. NTE-IAA
3. Recomendaciones UNESA
 - Para alta tensión o baja tensión que lo requieran: 6501C, 6502A y 6503A

7.2 Definición de puesta a tierra

La definición que realiza el reglamento eléctrico de baja tensión (REBT) sobre puesta a tierra es: “la denominación puesta a tierra comprende toda la ligazón metálica directa, sin fusible ni protección alguna, de sección suficiente, entre determinados elementos o partes de una instalación y un electrodo ó grupo de electrodos enterrados en el suelo, con objetivo de conseguir que en el conjunto de instalaciones, edificios y superficie próxima del terreno no existan diferencias de potencial peligrosas y que al mismo tiempo, permita el paso a tierra de las corrientes de falta o de las descargas de origen atmosférico”.

Este sistema de protección se basa en impedir que se produzcan tensiones o diferencias de potencial superiores a los 24 V, mediante la colocación de conductores paralelos a los conductores de fase, capaces de enviar a tierra cualquier corriente de fuga, de derivación, o las debidas a descargas atmosféricas.

7.3 Partes de que consta una puesta a tierra

Todo sistema de puesta a tierra consta de los elementos mostrados en la figura 7.1.

Estos elementos los podemos agrupar de la siguiente forma:

- Terreno o tierra. Encargado de disipar todas las energías que a él accedan.
- Toma de tierra. Parte enterrada en el terreno, formada por:
 - Los electrodos
 - Línea de enlace con tierra
 - Punto de puesta a tierra
- Instalación de puesta a tierra. Parte exterior al terreno, formada por:
 - Línea principal de tierra
 - Derivaciones de la línea principal de tierra
 - Conductores de protección

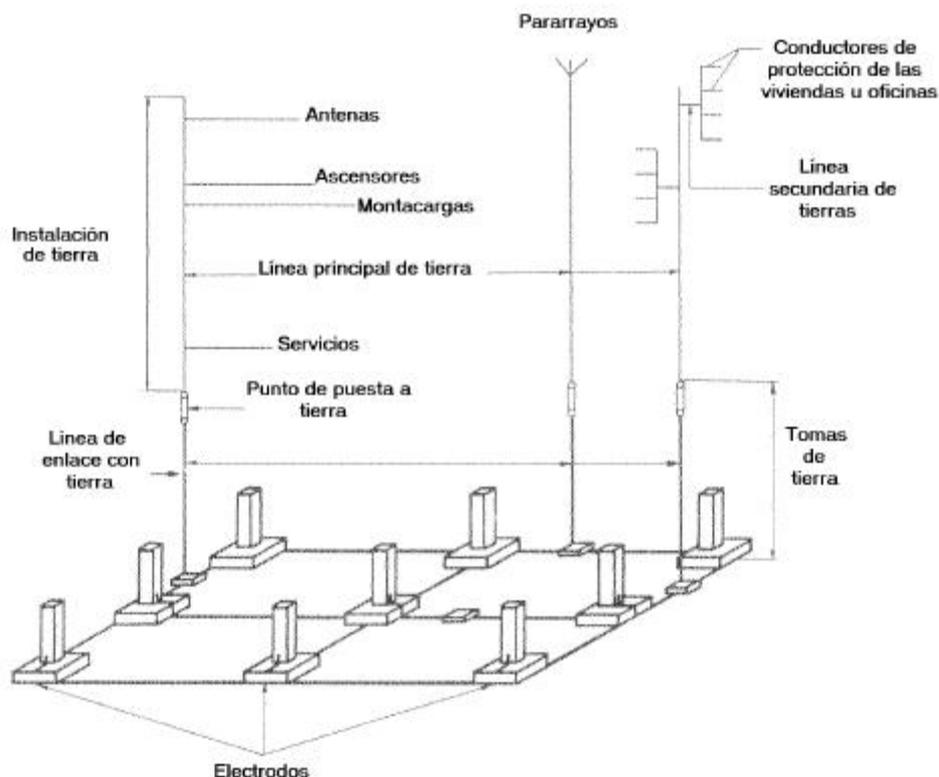


Fig. 7.1 Puesta a tierra con conducción enterrada (conductor o electrodo en anillo)

7.3.1 El terreno

El terreno es el encargado de disipar las corrientes de defecto y las cargas de tipo atmosférico que a él accedan. La elección de un terreno o de una orientación geográfica determinada es de suma importancia para que las puestas a tierra resulten eficaces y correctas.

No todos los terrenos son iguales (existe gran variedad de ellos), ni aun tratándose de un mismo tipo de terreno se puede asegurar una composición homogénea. También la profundidad o las condiciones climáticas de la zona influyen altamente en la composición de los mismos y por tanto en sus propiedades eléctricas. Debido a esto, se hace imprescindible la medida directa de la resistividad eléctrica del terreno, siendo los valores de las tablas o gráficos puramente orientativos o aproximados.

La resistividad de un terreno es, por tanto, el primer dato que hay que conocer para la realización de una puesta a tierra, tanto si se trata de un edificio destinado a viviendas como si la instalación pertenece a una industria.

El terreno se clasifica en función de su resistividad eléctrica ρ [$\Omega \cdot m$]. Esta resistividad representa la resistencia que ofrece un cubo de tierra de un metro de arista, al que se le aplica una diferencia de potencial y por tanto es recorrido por una corriente eléctrica, cuyo cociente nos proporcionará la resistencia del mismo. En la realidad se realizan ensayos en el propio terreno, existiendo diferentes métodos que nos permiten su determinación, como se expondrá al final del capítulo.

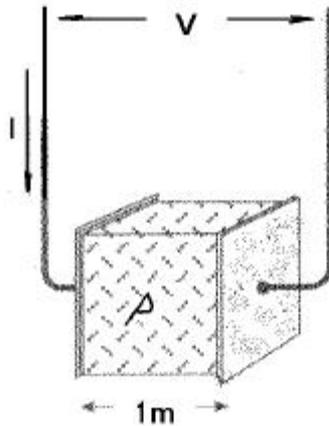


Fig. 7.2 Cubo de terreno de 1m de arista para la medida de la resistividad del terreno

La siguiente tabla proporciona la resistividad de los diferentes tipos de terreno en función de sus características.

Tabla 7.1 Resistividades aproximadas de los diferentes tipos de terreno (MIBT-039)

TIPOS DE TERRENO MÁS UTILIZADOS	RESISTIVIDAD EN OHMS*M
Terrenos pantanosos	de algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceas	200 a 3.000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1.500 a 3.000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1.000 a 5.000
Calizas agrietadas	500 a 1.000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedentes de alteración	1.500 a 10.000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600

Ya se ha indicado que los terrenos son de muy diversa composición y que aun un mismo terreno puede presentar particularidades muy diversas según los condicionantes climáticos a los que esté expuesto. No obstante, es posible resumir los comportamientos básicos de forma que:

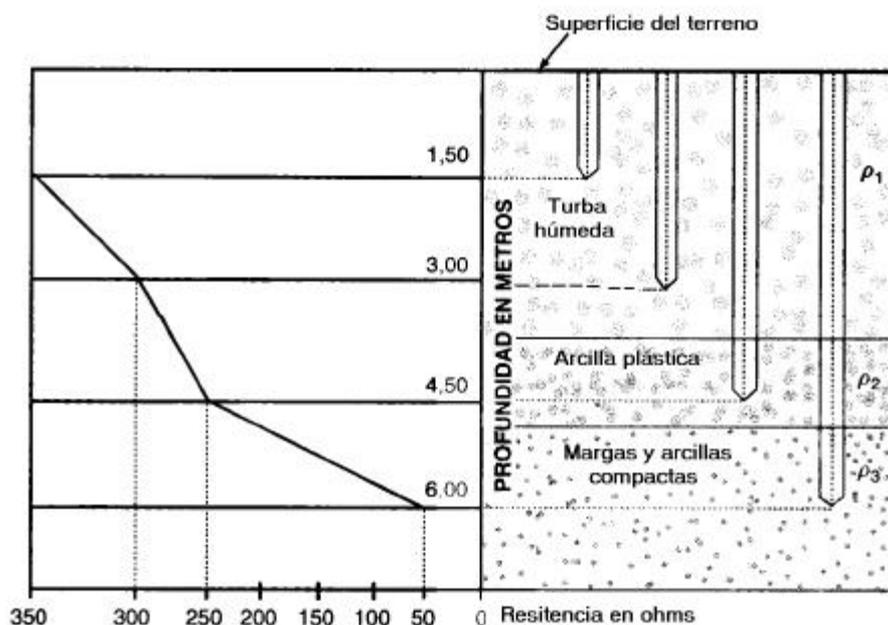


Fig. 7.3 Variación de la resistividad del terreno para distintas profundidades y capas

- Al aumentar la humedad disminuye la resistividad.
- Terrenos con altos índices de salinidad presentan valores de resistividad menores.
- Normalmente la profundidad es inversamente proporcional a la resistividad.
- La temperatura ejerce un papel muy importante. Con temperaturas inferiores a 0°C (formación de hielo), la resistividad de un terreno aumenta de forma muy considerable.
- Suelos oscuros y profundos (turbas, humus, limos, etc) suelen presentar los valores más bajos de resistividad.
- La estratigrafía del terreno influye en el valor de la resistividad final.
- Factores de naturaleza eléctrica.

Podemos extraer de las pautas de comportamiento de un terreno las conclusiones para la correcta realización de la puesta a tierra:

- Al buscar la posible orientación de la toma de tierra, con preferencia se utilizarán las orientaciones norte, ya que conservarán la humedad de forma más constante a lo largo de todas las estaciones del año.
- Se evitarán terrenos pedregosos, zonas de residuos, basureros, etc.
- Para la disipación de la energía es necesario disponer de la suficiente masa de terreno, por tanto, no se realizará la puesta a tierra en zonas donde la proximidad de muros o edificios, cursos de agua, zonas valladas, cercas metálicas, etc. impida la correcta disipación de la energía o ésta pueda ser transmitida a otras zonas de forma peligrosa.
- En zonas con riesgos de heladas, se profundizará lo suficiente para que en la época más desfavorable el electrodo quede libre de hielos.
- Cuando la longitud del electrodo sea tal que atraviese diferentes capas de materiales (diferentes resistividades), el valor medido de resistividad será el valor promedio.

7.3.2 Tomas de tierra

Se denomina toma de tierra al elemento de unión entre el terreno (zona enterrada), y el circuito instalado fuera del mismo. Está constituida por:

- Electrodo
- Línea de enlace con tierra
- Punto de puesta a tierra

7.3.2.1 Electrodo

Es una masa metálica en permanente contacto con el terreno. Su misión es facilitar el paso de las corrientes de defecto o cargas eléctricas al terreno que actuará como descargador. Existen diferentes tipos de electrodos, siendo los más utilizados los conductores de protección, mallas, picas, placas, pilares, armaduras, etc.

Con la puesta a tierra se pretende que el electrodo este a potencial 0V. También es conocida como resistencia de paso a tierra, ya que se considera que no varía el potencial, siendo su valor inalterable.

Todos los electrodos introducidos en terrenos con mayor o menor grado de humedad están sometidos a efectos de corrosión, lo cual puede responder a diferentes causas, entre las que destacamos:

- Ataque de los agentes químicos del terreno
- Corrientes galvánicas
- Corrientes telúricas
- Corrosión del metal por la humedad del terreno

Las corrientes galvánicas se producen por la interacción de las partes metálicas enterradas en el terreno (armaduras, conducciones metálicas, pilares, etc).

Las corrientes telúricas se originan por la propia composición del terreno unido al campo magnético terrestre.

Estos fenómenos pueden llegar a destruir por corrosión las piezas metálicas introducidas en el terreno, por lo que resulta conveniente conocer de antemano qué electrolitos dominan en el terreno, así como su interacción sobre los diversos materiales utilizados para la fabricación de los electrodos, lo que facilitará un mejor funcionamiento de los mismos.

Los materiales más empleados para la fabricación de los electrodos son el cobre y el acero galvanizado. El cobre resiste bien la corrosión, a excepción de suelos alcalinos o medios amoniacales, siendo también atacado por cenizas o escorias. El hierro o acero galvanizado, por el contrario, suele estar más expuesto al ataque de terrenos situados a mayor profundidad (humedad, sales, etc).

Los electrodos pueden dividirse en dos grupos: electrodos naturales y electrodos artificiales, dependiendo de si su cometido es común a otros usos o exclusivo para la puesta a tierra, respectivamente.

7.3.2.1.1 Electrodo naturales

Se denomina electrodos de origen natural a aquellas partes metálicas que por alguna causa, ajena a la puesta a tierra ya están en contacto con el terreno. Dentro de este grupo se encuentran pilares, estructuras, conducciones metálicas, etc.

□ Mallas

Este tipo de electrodo consiste en unir todos los pilares metálicos o de hormigón armado que forman la estructura del edificio, comportándose como electrodos potencialmente disipadores de energía. La unión de los mismos se realiza por un conductor de cobre recocido y desnudo con una sección mínima de 35 mm^2 de cuerda circular con un máximo de 7 alambres y una resistencia de $R=0.514 \text{ } \Omega/\text{km}$ según la MIBT039. Este conductor unirá los distintos pilares metálicos a lo largo de todo el ancho de una cara y, en los de hormigón armado, a dos de las varillas del mismo. Al conductor de unión se le denomina *línea de enlace con tierra*.

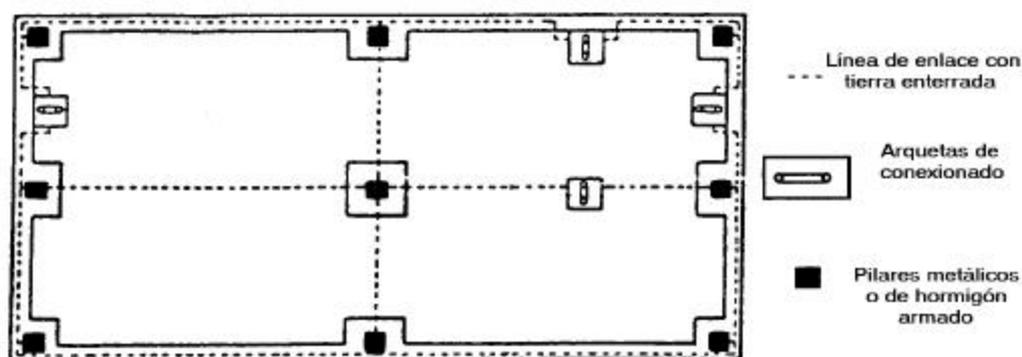


Fig. 7.4 Sección de una planta de un edificio con su correspondiente puesta a tierra

La unión se realizará siempre con soldadura aluminotérmica, o unión de tipo mecánico, que asegure la buena conductividad de la misma, su perdurabilidad con el paso del tiempo y la resistencia al paso de grandes corrientes (alto punto de fusión).

Para proceder a la instalación, se realizará una zanja de 80 cm de profundidad, o como mínimo de 40cm si el terreno es muy buen conductor a esa profundidad; seguidamente se introducirá el conductor desnudo (por lo que realizará funciones de electrodo, además de línea de enlace con tierra) y se rellenará la zanja con buenos materiales conductores (humus, turba, limus); a estos materiales es posible añadir sales y grasas para aumentar su conductividad.

Una vez realizada toda la conexión de la malla, en la correspondiente arqueta de conexión se unirá el conductor de enlace con tierra a un extremo del punto de puesta a tierra, mientras que el otro extremo del punto de puesta a tierra se unirá a la línea principal de tierra, que ya saldrá del interior del terreno.

7.3.2.1.2 Electrodo artificiales

Se denomina electrodos de origen artificial a aquellas partes metálicas que se introducirán en el terreno a efectos exclusivamente de realizar una puesta a tierra, no teniendo ninguna otra función. Dentro de este grupo se encuentran picas, placas, conductores enterrados, etc.

□ Picas

Son electrodos alargados, en forma de lanza, para facilitar su introducción vertical en el terreno. Las picas más comunes están fabricadas con acero recubierto de cobre, siendo sus dimensiones de 2 m de longitud con unos diámetros que van desde 14 mm en cobre, hasta valores de 25 mm, en las de acero galvanizado. Las partes constitutivas de una pica son las mostradas en la figura:

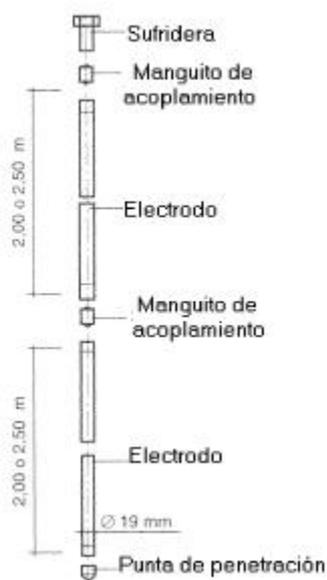


Fig. 7.5 Partes de que consta una pica convencional

Las picas suelen fabricarse con el alma de acero y un recubrimiento de cobre de unos 2 mm. La unión de estos materiales se realiza por medio de un sistema de unión molecular entre el cobre y el acero, aumentando su dureza e impidiendo que se raye la pica al ser introducida en el terreno.

Las picas pueden colocarse en el terreno de dos formas distintas:

- a) En profundidad: se interconectan las picas, una encima de otra, mediante el correspondiente empalme o manguito de acoplamiento, llegándose de esta forma a profundidades considerables. Los pasos a seguir para su correcta instalación son:
 - Realizar un pozo de inspección.
 - Se prepara la primera pica con su sufridera y punta de penetración.
 - Se golpea la pica, por la sufridera, mientras ésta se introduce en el terreno.
 - Se prepara la segunda pica, quitando la sufridera y sustituyéndola por el manguito de acoplamiento.
 - Se comprueba la resistencia de tierra en cada nuevo tramo.
 - Cuando la resistencia es la pedida, se interconectan las picas con la línea de enlace con tierra.

Este método es utilizado en zonas con escasez de terreno, pero en todo caso se debe asegurar un mínimo de terreno que permita la correcta disipación de la energía. Se deben tener presente asimismo las diferentes capas de subsuelo, ya que con resistividades diferentes también disiparan la energía de forma diferente.

- b) En paralelo: esta es la disposición más utilizada, pero que requiere una mayor superficie de terreno disponible. Las picas se colocan de una en una, siempre separadas por una distancia como mínimo del valor de su longitud (normalmente 2 m), aunque es recomendable, para una mejor disipación de la energía, que esta distancia se incremente al doble, es decir 4 m.

Con este método es posible medir la resistividad de la primera pica; conocido el valor, se puede determinar el número de picas que será necesario instalar, ya que la resistencia con dos picas será la mitad, un tercio con tres, etc.

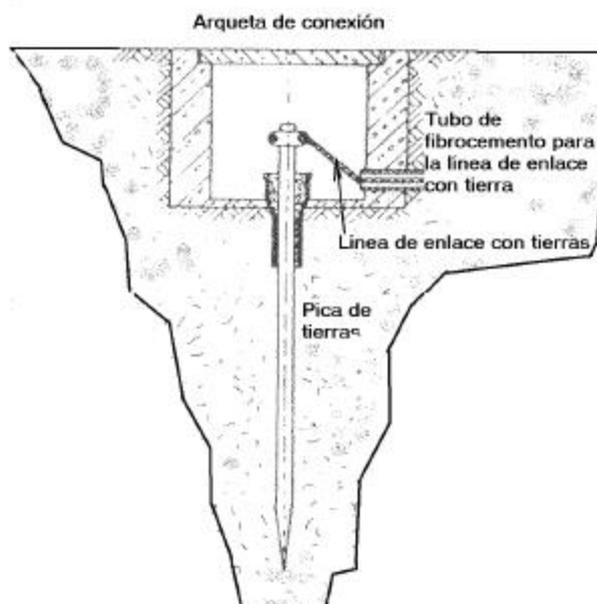


Fig. 7.6 Puesta a tierra con electrodo de pica

Para cada pica (tanto si están colocadas en profundidad o en disposición paralelo) se construirá una arqueta de unión. Esta arqueta tendrá las paredes y tapas fabricados de hormigón armado o muros aparejados con unas dimensiones adecuadas, y contendrá en su interior la parte superior de la pica (a unos 30 cm de profundidad), a ella accederá un tubo de fibrocemento o gres (a 50 cm de profundidad), que contendrá en su interior la línea de enlace con tierra (del mismo tipo de conductor que el requerido para las mallas) que impedirá que las posibles corrientes de falta creen campos magnéticos o gradientes de potencial peligrosos para las personas cercanas a la instalación.

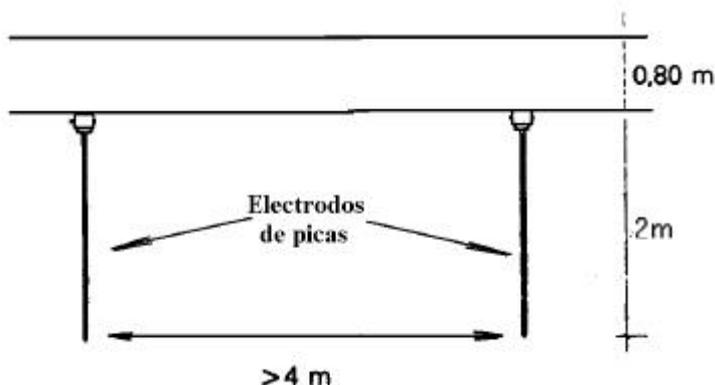


Fig. 7.7 Colocación de picas en disposición paralelo

Para la colocación de las picas, se rellenará el pozo practicado para la colocación de las mismas con buena tierra conductora (igual que en la colocación de las mallas), se puede añadir sales, grasas, electrolitos, aerosoles, etc., que aumenten su conductividad, regándose el terreno.

La unión de la pica con la línea de enlace se realizará por medio soldadura aluminotérmica, o con una unión mecánica que garantice la inalterabilidad con el paso del tiempo. En este caso, la línea de enlace con tierra no puede ser considerada como parte del electrodo, ya que al no estar en contacto directo con el terreno no puede disipar energía, realizando solamente su función de enlace entre el electrodo (pica) y los puntos de puesta a tierra.

La fórmula que nos permite obtener la resistencia de paso a tierra es:

$$R = \frac{\rho}{L} \quad [7.1]$$

Donde:

ρ = Resistividad aparente del terreno ($\Omega \cdot m$)

L = Longitud total de pica enterrada en m

□ Placas

Son electrodos de forma rectangular con una superficie mínima de 0.5 m^2 (0.5 m por 1 m), el espesor varía entre 2 mm (si son de cobre) y unos 2.5 mm (si son de acero galvanizado).

Las placas presentan una gran superficie de contacto con el terreno, en relación con su espesor, siendo muy grande la cantidad de energía que pueden disipar.

Se colocarán siempre en disposición paralelo, con el siguiente proceso:

- Realizar un hoyo que permita colocar la placa de forma vertical, quedando la arista superior a una profundidad como mínimo de 50 cm de la superficie.
- Se coloca la placa rellenándose el pozo con buena tierra conductora (igual que en la colocación de las mallas o picas), se puede añadir sales, grasas, etc., que aumenten su conductividad, regándose el terreno.
- Se construye la arqueta de inspección (de las mismas características que las determinadas para la colocación de las picas).
- En la arqueta de inspección se introducirá accediendo, un tubo de fibrocemento o gres para evitar los gradientes de potencial peligrosos.
- Se realizará la unión de la placa con la línea de enlace con tierra (de las mismas características que las determinadas para las mallas o picas) por medio de unión mecánica o soldadura aluminotérmica inalterable con el paso del tiempo.
- La línea de enlace con tierra, al estar aislada de la tierra, no puede ser considerada como parte del electrodo (como ocurría con las mallas), realizando solamente la función de unión.

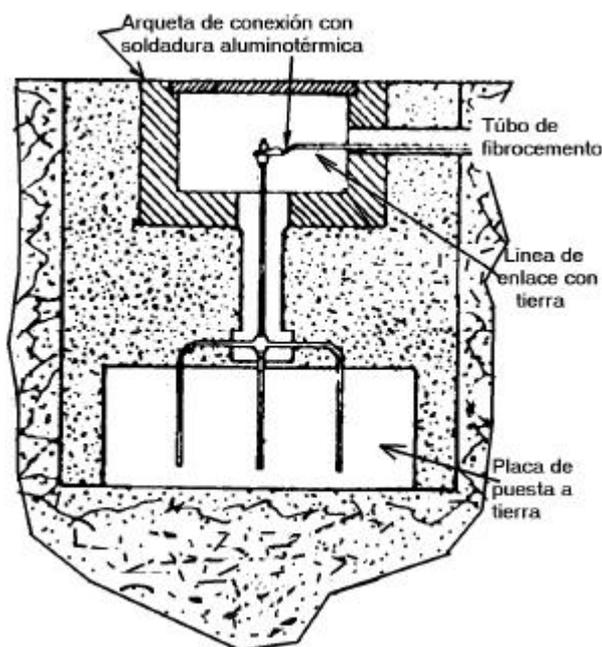


Fig. 7.8 Electrodo de placa enterrada con su arqueta de conexión

La fórmula que nos permite obtener la resistencia de paso a tierra es:

$$R = 0.8 \cdot \frac{\rho}{P} \quad [7.2]$$

Donde:

ρ = Resistividad aparente del terreno ($\Omega \cdot m$)

P = Perímetro de la placa en m

□ Conductores enterrados

Este tipo de electrodos está formado por cables o pletinas desnudas enterradas horizontalmente debajo de las cimentaciones de los edificios.

Los materiales más empleados para este tipo de electrodos son:

- Cable de cobre recocido de 35 mm^2 de sección mínima.
- Pletinas de cobre de igual sección que el conductor de cobre, o bien, si son de acero galvanizado, esta sección aumenta a 95 m^2 como mínimo.
- Aleaciones de otros materiales. La sección estará en concordancia con los mínimos establecidos en los apartados anteriores.

La colocación de estos conductores o pletinas se realiza mediante zanjas abiertas en las cimentaciones del propio edificio. La profundidad, según las normas tecnológicas, será como mínimo de 80 cm, estando ubicados los cables a una distancia, entre ellos, no menor a 5 m.

Como en los restantes electrodos se rellenará la zanja con materiales con baja resistividad (tierras oscuras, grasas, sales, etc), uniéndose a otros electrodos en caso necesario, siempre mediante la utilización de soldadura aluminotérmica.

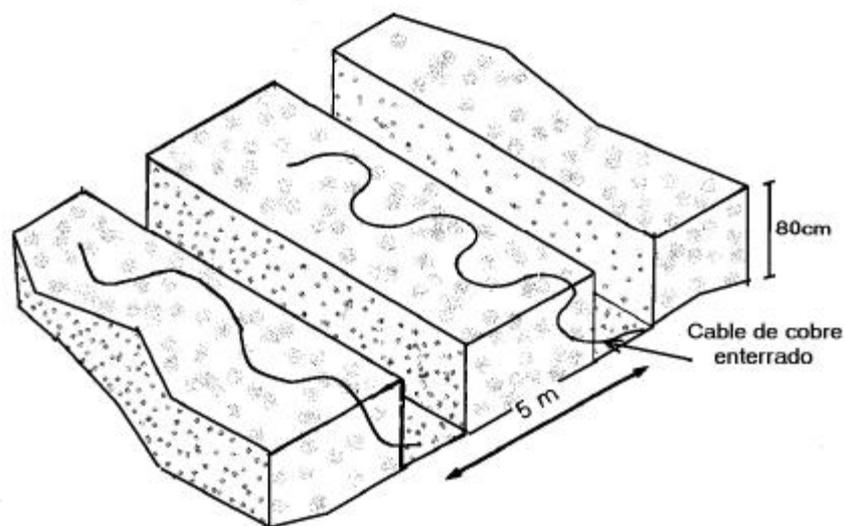


Fig. 7.9 Puesta a tierra mediante conductores enterrados

En este caso electrodo y línea de enlace con tierra, al igual que pasaba con las mallas, también se confunden, realizando el conductor las dos funciones.

La fórmula que nos permite obtener la resistencia de paso a tierras es:

$$R = \frac{2 \cdot \rho}{L} \quad [7.3]$$

Donde:

ρ = Resistividad aparente del terreno ($\Omega \cdot m$).

L = Longitud en m del cable enterrado.

□ Otros electrodos

Los electrodos más utilizados para una correcta puesta a tierra, son los descritos en los apartados precedentes, pero otros materiales metálicos pueden también llegado el caso, servir como electrodos. Así cimentaciones, conducciones de agua (con muchas limitaciones y siempre con permiso expreso de la compañía suministradora y de acuerdo con el REBT), vigas metálicas etc., pueden pasar a formar parte de la toma de tierra.

7.3.2.2 Línea de enlace con tierra

La forman los conductores que unen los electrodos, o anillo, con el punto de puesta a tierra. El conductor será de cobre recocido de 35 mm^2 de sección como mínimo, o de sección equivalente si se

utiliza otro material. La instrucción MIBT-017 nos indica las características específicas que deben cumplir estos conductores, que ya han estado definidas en el apartado de electrodos anterior.

La línea de enlace con tierra siempre transcurrirá por el interior del terreno, nunca de forma superficial, y sólo formara parte del electrodo cuando no discurra por el interior de tubo aislante (gres, fibrocemento, etc.) alguno.

7.3.2.3 Punto de puesta a tierra

Esta es la última parte de la toma de tierra, y según el REBT se define como: “Es un punto situado fuera del terreno que sirve de unión entre la línea de enlace con tierra y la línea principal de tierra”. Por tanto, es el punto que une la toma de tierra (parte enterrada y de la que forma parte) con la instalación exterior de tierra, como se puede apreciar en la siguiente figura.

El punto de puesta a tierra estará constituido por un dispositivo de conexión (regleta, placa, borne, etc.) que permita la unión entre los dos conductores que a él acometen: la línea de enlace con tierra y la línea principal de tierra, de forma que pueda, mediante útiles apropiados, separarse de esta última con el fin de poder realizar la medida de la resistencia a tierra, o bien simplemente, llevar a cabo el periódico servicio de mantenimiento.

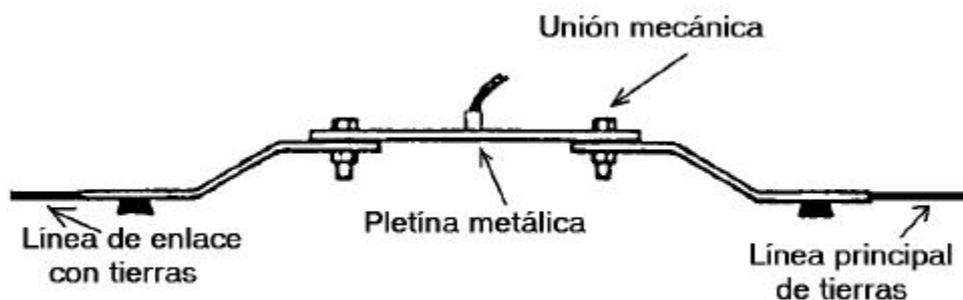


Fig. 7.10 Detalle de un punto de puesta a tierra

Asimismo, la instrucción MIBT-023 del REBT indica que “las instalaciones que lo precisen dispondrán de un número suficiente de puntos de puesta a tierra convenientemente distribuidos, que estarán conectados al mismo electrodo o conjunto de electrodos”.

La localización de los puntos de puesta a tierra, en un edificio de características normales, debe realizarse en:

- Instalación de las antenas
- Instalación del pararrayos
- Los patios de luces destinados a cocinas y cuartos de aseo
- El local a o lugar de la centralización de los contadores
- La base de las estructuras metálicas de los ascensores y montacargas
- El punto de ubicación de la caja general de protección
- Cuadro de contadores
- Cualquier local donde se prevea la instalación de elementos destinados a servicios generales o especiales y que por su clase de aislamiento o condición de instalación deban ponerse a tierra.

La norma tecnológica NTE-IEP “Puesta a Tierra” nos indica las características que deben reunir las arquetas del punto de puesta a tierra.

Como se aprecia en la siguiente figura, el punto de puesta a tierra estará formado por paredes de hormigón o de muro aparejado de un espesor considerable (hasta 12 cm). La tapa será del mismo material con una resistencia como mínimo de 175 kg/cm^2 . A él acometerá un tubo de fibrocemento o gres de 60 mm de diámetro.

La pletina de cobre recubierto de cadmio tendrá una longitud de 30 cm de largo, por 2.5 cm de ancho y unos 5 mm de espesor. En sus extremos se soldará o unirá de forma solidaria la línea principal de tierra y la línea de enlace con tierra, asegurándose que no pueda, por medios accidentales, producirse su desconexión.

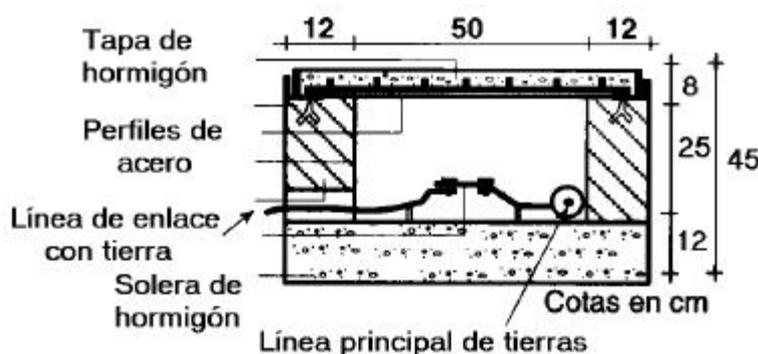


Fig. 7.11 Arqueta de conexión para el punto de puesta a tierra

7.3.3 Instalación de puesta a tierra

La instalación exterior de puesta a tierra nunca puede interrumpirse, por tanto estará formada por un conductor de cobre, sin elementos de protección, ni fusibles, ni ningún otro dispositivo de protección o seccionador que pueda interrumpir su continuidad. Discurrirá paralela a la instalación de enlace, desde la caja general de protección hasta el último punto de luz o toma de corriente de la instalación eléctrica de un edificio, enlazando todas las partes metálicas con el terreno mediante la toma de tierra.

La instalación de puesta a tierra la forman las siguientes líneas:

- Línea principal de tierra
- Línea secundaria de tierra
- Conductores de protección

Ya hemos insistido en la necesidad de la continuidad eléctrica de esta instalación, por tanto estas tres partes anteriores son simplemente una sola unidad con diferente sección y nombre.

7.3.3.1 Línea principal de tierra

Se denomina línea principal de tierra a los conductores que parten del punto de puesta a tierra. A ésta estarán conectadas las derivaciones para la puesta a tierra de las masas, a través de los conductores de protección y de las derivaciones de la línea principal de tierra.

El conductor será de cobre de 16 mm^2 de sección como mínimo, y estará convenientemente aislado, discurriendo paralelo a la línea de enlace o a la instalación correspondiente. Un ejemplo típico de la ubicación de esta línea principal de tierra en un edificio destinado a viviendas sería el circuito que transcurriría desde la caja general de protección hasta el cuadro de contadores, es decir, la línea repartidora (existirían pletinas para la unión, con soldadura aluminotérmica, de la línea principal de tierra, con la línea secundaria de tierra en el cuadro de contadores). Los conductores de la línea repartidora serían en este caso los conductores de referencia a la hora de utilizar la tabla nº 1, para dimensionar la línea principal de tierra.

Existirá una línea principal de tierra para cada punto de puesta a tierra; así en un edificio destinado a viviendas, locales comerciales u oficinas dispondremos de las siguientes líneas:

- Para la instalación de las antenas (la sección mínima será de 6 mm^2).
- Para la instalación del pararrayos (la sección mínima será de $2 \times 50 \text{ mm}^2$).
- Para las cocinas y cuartos de aseo, etc. (la sección mínima será de 6 mm^2).
- Para el local a o lugar de la centralización de los contadores (sección mínima de 6 mm^2)
- Para la base de las estructuras metálicas de los ascensores y montacargas (mínimo 6 mm^2).
- Para el punto de ubicación de la caja general de protección (mínimo 6 mm^2)
- Para el cuadro de contadores (mínimo 6 mm^2)

En cuanto a las pautas a seguir para su correcto dimensionado, se realizará de acuerdo con estas normas (que hacen referencia a la línea principal de tierra correspondiente a la instalación eléctrica; las otras líneas de tierra ya han sido dadas en el apartado anterior):

- Las dimensiones estarán determinadas por una sección mínima de 16 mm^2 , teniendo presente que siempre se comparará con los conductores de fase que a ella discurren paralelos, aplicándose la siguiente tabla, MIBT-017 del REBT.

Tabla 7.2 Secciones mínimas para la línea principal de tierra

Sección conductor de fase	Sección conductor de protección
$S_f < 16 \text{ mm}^2$	$S_p = S_f$
$16 \text{ mm}^2 < S_f < 35 \text{ mm}^2$	$S_p = 16 \text{ mm}^2$
$S_f > 35 \text{ mm}^2$	$S_p = S_f / 2$

Aparte, siempre será superior la sección de la línea principal de tierra a la de la línea secundaria de tierra.

- La sección será tal que, delante de cualquier defecto o fuga que pueda producirse, la máxima corriente que circule nunca será mayor que la que provoque una corriente cercana al punto de fusión del cobre o materiales que formen el conductor de protección en un tiempo máximo de 2 seg, tiempo más que suficiente para provocar la desconexión de los elementos de protección.

7.3.3.2 Derivaciones de la línea principal de tierra

Son aquellos conductores que unen la línea principal de tierra con los conductores de protección o directamente con las masas. Un ejemplo sencillo que nos permite ver la ubicación de esta línea

secundaria de tierra sería la derivación individual de un edificio de viviendas. Así los conductores que la acompañarían serían los que, saliendo del cuadro de contadores (donde existiría una pletina a tal fin), alcanzasen el ICP (interruptor de control de potencia) ya en el interior de la vivienda del abonado (volverían a conectarse a una pletina de donde partirían los conductores de protección).

El material utilizado para los conductores de la línea secundaria de tierras es el mismo que los empleados para la línea principal.

Al igual que en la línea principal, la tabla de referencia es la dada por la MIBT-017 del REBT, siendo los conductores de fase los que circulen paralelos al conductor de protección (dentro del mismo tubo).

Tabla 7.3 Secciones mínimas para las derivaciones de la línea principal de tierra

Sección conductor de fase	Sección conductor de protección
$S_f < 16\text{mm}^2$	$S_p = S_f$
$16\text{mm}^2 < S_f < 35\text{mm}^2$	$S_p = 16\text{mm}^2$
$S_f > 35\text{mm}^2$	$S_p = S_f / 2$

El mínimo permitido es de 2.5mm^2 de sección, si los conductores disponen de protección mecánica, o de 4mm^2 de sección (siempre con conductores de cobre), si los conductores carecen de la misma, debiéndose tener también presente que, la sección de los conductores de esta línea secundaria de tierra, siempre será mayor que la de los conductores de protección que a ella acometen.

Las uniones con la línea principal de tierra o con los conductores de protección se realizarán mediante soldadura aluminotérmica con alto punto de fusión y baja resistencia de contacto, o con elementos de presión mecánica que aseguren la continuidad del circuito aun con solicitaciones adversas. Si la unión no es entre cables, sino con masas, igualmente se utilizarán los métodos descritos anteriormente.

Como norma general estos conductores llevarán su correspondiente aislante (de igual color que los conductores de protección, amarillo-verde a rayas), discurrirán paralelos y conjuntamente con los de fase por un mismo tubo, intentándose que el recorrido sea el menor posible, sin cambios bruscos de dirección y sin esfuerzos mecánicos.

7.3.3.3 Conductores de protección

Su misión es asegurar la protección contra los contactos indirectos. Estos conductores son de cobre y unen la derivación de la línea principal de tierra con las masas de las instalaciones (cañerías, calderas, canalizaciones, marcos metálicos de puertas y ventanas, etc.). Siguiendo con el ejemplo del edificio de viviendas, la ubicación de estos conductores correspondería al circuito que discurre desde el cuadro general de mando y protección hasta el último punto de luz o toma de corriente de la instalación interior, es decir, es el último eslabón del circuito eléctrico, en este caso, del circuito de protección.

Los conductores de fase de referencia corresponderán a los conductores del circuito interior de la vivienda, local comercial u oficina, con los cuales transcurrirá paralelo el conductor de protección, por el interior del mismo tubo.

Al igual que en la línea principal y la línea secundaria de tierra, la tabla de referencia es la dada por la MIBT-017 del REBT, siendo los conductores de fase los que circulen paralelos al conductor de protección (dentro del mismo tubo).

Tabla 7.4 Secciones mínimas para el conductor de protección

Sección conductor de fase	Sección conductor de protección
$S_f < 16\text{mm}^2$	$S_p = S_f$
$16\text{mm}^2 < S_f < 35\text{mm}^2$	$S_p = 16\text{mm}^2$
$S_f > 35\text{mm}^2$	$S_p = S_f / 2$

El mínimo permitido es de 2.5 mm^2 de sección, si los conductores disponen de protección mecánica, o de 4 mm^2 de sección, si los conductores carecen de la misma.

Las uniones con la línea secundaria de tierra ya han sido descritas en el apartado anterior, realizándose con soldadura aluminotérmica con alto punto de fusión y baja resistencia de contacto o con elementos de presión mecánica que aseguren la continuidad del circuito aun con solicitaciones adversas. Si la unión no es entre cables, sino con masas, igualmente se utilizarán los métodos descritos anteriormente.

Existen finalmente unas normas concretas sobre los conductores de protección que nos indica la MIBT-017 del REBT/1973. Entre las más importantes podemos destacar y resumir:

- Los conductores de protección serán fácilmente identificables mediante colores llamativos como son el amarillo-verde a rayas.
- Cada circuito eléctrico llevará su correspondiente conductor de protección.
- El nivel de aislamiento del conductor de protección será idéntico al nivel de protección del conductor de fase que con él transcurra por un mismo tubo.
- Las secciones de cobre serán las dadas en las tablas anteriores, recordando que deben ir aumentando a medida que nos acercamos al terreno.
- Los tubos por donde discurran los conductores de fase de un circuito determinado siempre llevarán también su correspondiente conductor de protección.
- Las conexiones se realizarán con soldadura aluminotérmica de alto punto de fusión y baja resistencia de contacto, o bien mediante elementos de presión mecánica que aseguren la correcta continuidad del circuito incluso con solicitaciones adversas mecánicas.
- Las instalaciones con diferentes niveles de tensión tendrán también conductores de protección diferentes.

7.4 Resistencia de paso a tierra

La finalidad última de una puesta a tierra es la de ofrecer un camino fácil hacia tierra para las corrientes que puedan surgir a causa del mal funcionamiento de una instalación. Un buen contacto permite el paso de la corriente eléctrica, mientras que un mal contacto lo dificulta; al valor que define la bondad de este contacto se le denomina *resistencia de paso a tierra*, R (&). Así resulta indispensable que, a la hora de dimensionar los electrodos sobre un terreno determinado, el valor de la resistencia de paso a tierras sea el menor posible y pueda mantenerse constante a lo largo de todo el año.

Las normas tecnológicas de la edificación nos determinan los valores máximos de la resistencia de paso a tierra para diversos casos:

- Edificios sin pararrayos..... $R < 80 \Omega$
- Edificios con pararrayos..... $R < 15 \Omega$
- Edificios con instalaciones especiales..... $R < 5 \Omega$

La resistencia de paso a tierra se mide desde el punto de puesta a tierra, siendo por tanto la combinación de las resistencias de los electrodos más la de las líneas de enlace con tierra. Su medida se ve afectada por las variaciones que sufre el terreno a lo largo del año, coincidiendo con las variaciones climáticas que se producen. Entre los factores que más afectan a la variación del valor de la resistencia de puesta a tierra podemos citar la humedad, la salinidad, la estratigrafía del terreno, la temperatura, factores de origen eléctrico, etc.

7.5 Elementos que se deben conectar a la puesta a tierra

Según la NTE, a fin de conseguir una red equipotencial correcta dentro del edificio en contacto con tierra, se conectarán a tierra todos los elementos metálicos susceptibles de ponerse en tensión bajo ciertas circunstancias. Los elementos que se deben conectar a los puntos de puesta a tierra serán los siguientes:

- La instalación de pararrayos
- La instalación de antena colectiva de TV o FM
- Las estructuras metálicas y armaduras de muros y soportes de hormigón
- Las instalaciones de fontanería, gas, calefacción, depósitos, calderas, guías de aparatos elevadores y, en general todo elemento metálico importante
- Cuadro de contadores
- Caja general de protección
- Masas de las instalaciones eléctricas

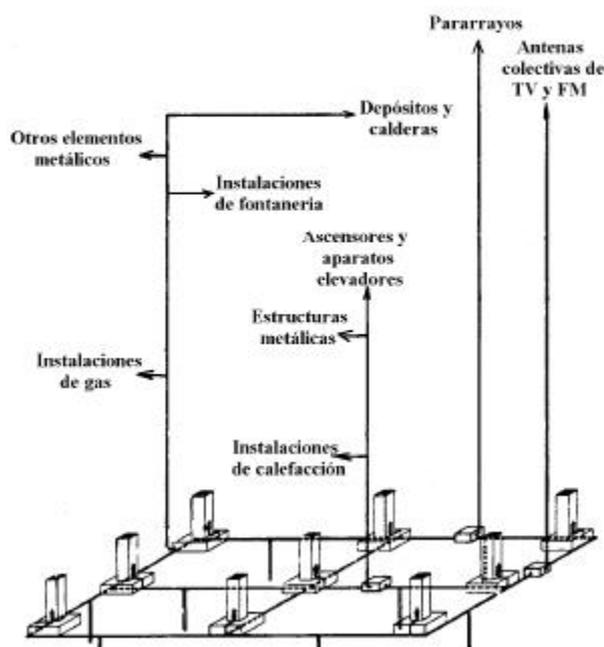


Fig. 7.12 Elementos más comunes que se deben conectar a una puesta a tierra

7.6 Tensión de paso y tensión de contacto

Estas dos tensiones son importantes a la hora de determinar los potenciales peligrosos ante una fuga a tierras.

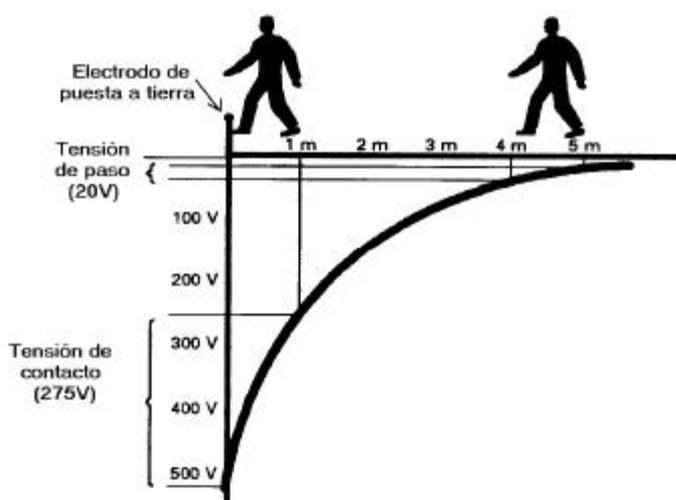


Fig. 7.13 Distribución del gradiente de potencial a partir de un electrodo de tierra

- Tensión de paso: es la diferencia de tensión que puede aparecer entre dos puntos del terreno adyacente a la puesta a tierra, separados una distancia de 1m (distancia de paso), ante una fuga a tierras. Se evitará que esta tensión alcance valores peligrosos para los seres humanos.
- Tensión de contacto: es la diferencia de tensión que puede aparecer entre dos puntos situados a 1m de distancia cuando existe una fuga a tierras, siendo estos puntos, la pica o el cable de enlace con tierra y el terreno a 1m de distancia.

7.7 Cálculo de la puesta a tierra

Ya se ha comentado que el valor de la resistencia de paso a tierra depende de tres factores:

- El terreno
- El electrodo
- Contacto electrodo-terreno

Por otra parte, también hemos visto que los valores máximos admitidos, en caso de corrientes de defecto, son:

- $R \leq 80 \Omega$ en edificios destinados a viviendas
- $R \leq 15 \Omega$ en edificios con pararrayos
- $R \leq 5 \Omega$ en instalaciones especiales

Para el cálculo teórico de la puesta a tierra, podemos emplear al menos tres procedimientos, que en la práctica quedan más limitados:

- Toma de tierra específica con pica, placa, etc.
- Toma de tierra en edificios con electrodos naturales
- Toma de tierra, conocido el valor de la resistencia de paso una vez se ha clavado la primera pica o placa

7.7.1 Toma de tierra específica con pica o placa

Este es uno de los métodos teóricos más utilizados y consiste en los siguientes pasos:

- Previamente se ha medido (como se explicará posteriormente) la resistividad del terreno, o en su caso, se ha utilizado para determinar el valor de esta resistividad la tabla aproximada de resistividades para diversos tipos de terrenos dada por el REBT.
- Identificaremos si el local que se debe poner a tierras dispone de pararrayos, de instalaciones especiales, etc. Con estos datos y según la NTE, conoceremos el valor máximo que puede presentar la resistencia de paso a tierra (80%, 15% o 5%).
- Realizaremos los cálculos determinados en la tabla, entrando con las fórmulas adecuadas (picas, placas, conductores enterrados). Como el valor de R ya ha sido prefijado, obtendremos el valor del perímetro $P(m)$ en el cálculo de placas, o la longitud $L(m)$, en el cálculo de picas o conductores enterrados.
- Conocido el valor del perímetro de la placa, o el valor de la longitud de la pica o del conductor enterrado, y conociendo los valores estándar de placas o picas (placas normales: 3 m de perímetro; picas normales: 2 m de longitud), obtendremos el número de placas, picas o metros de conductor enterrado, para la resistencia de paso de tierra pedida.
- Se determinará el precio más favorable, teniendo presente tanto el precio del material como también el precio de la mano de obra.
- Finalmente se irán realizando las medidas correspondientes cada vez que introduzcamos un nuevo electrodo, hasta obtener la resistencia deseada.
- Se elegirá la solución más adecuada de entre todas las propuestas.

Tabla 7.5 Fórmulas a aplicar para una correcta puesta a tierra

Electrodo	Resistencia de paso a tierra (Ω)
Placa enterrada	$R = 0.8 \cdot \frac{\rho}{P}$
Pica vertical	$R = \frac{\rho}{l}$
Conductor enterrado horizontalmente	$R = \frac{2 \cdot \rho}{l}$
ρ = Resistividad del terreno en ($\Omega \cdot m$) P = Perímetro de la placa en (m) l = Longitud de la pica o conductor en (m)	

7.7.2 Toma de tierra de un edificio

Para realizar este cálculo nos basaremos en la tabla dada por la NTE-IEP. Para poder entrar en esta tabla es necesario conocer unos datos previos:

- Longitud en metros del perímetro cubierto por la línea de enlace con tierra enterrada (siempre considerando cable desnudo), debajo de las cimentaciones del edificio.
- Naturaleza del terreno (afectará al valor de la resistividad del mismo).
- Análisis del edificio. ¿Posee o no pararrayos? Es decir, la resistencia de paso a tierra será como máximo de 80 Ω , o bien de 15 Ω , respectivamente.
- Se entra en la tabla y se determina el número de electrodos artificiales (picas) que se deben añadir al cable enterrado artificialmente.
- Siempre se escogerá el número de picas mayor si la longitud está entre dos valores de la tabla. Si la longitud de cable enterrado sobrepasa el máximo dado por la tabla, el número de picas a añadir será 0. Finalmente si la longitud del cable enterrado es inferior al valor mínimo dado por la tabla, se escogerá el número de picas de la última longitud dada en la tabla, recordando que es el número mínimo, por lo que se aconseja que se aumente la longitud del perímetro o el número de picas.

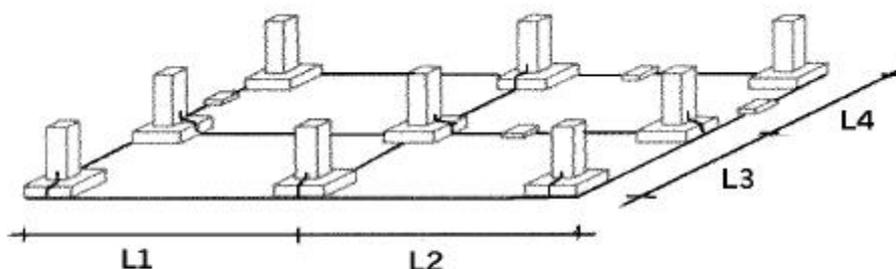


Fig. 7.14 Cable enterrado, conectado a los pilares, que bordea el perímetro de un edificio

Tabla 7.6 Número de picas a colocar en función del perímetro del edificio

TIPOS DE TERRENO								Número de picas	
Terrenos orgánicos arcillas y margas		Arenas y gravas arcillosas, rocas sedimentarias y metamórficas		Calizas agrietadas y rocas eruptivas		Grava y arena silicia			
sin para-rrayos	con para-rrayos	sin para-rrayos	con para-rrayos	sin para-rrayos	con para-rrayos	sin para-rrayos	con para-rrayos		
Longitud en planta de la conducción enterrada, en m	25	34	28	67	54	134	162	400	0
		30	25	63	50	130	158	396	1
		26		59	46	126	154	392	2
				55	42	122	150	358	3
				51	36	118	146	384	4
				47	34	114	142	380	5
				43	30	110	138	376	6
				39		106	134	372	7
				35		105	130	368	8
						98	126	364	9
						94	122	360	10
						90	118	356	11
						86	114	352	12
						82	110	346	13
						78	105	344	14
						74	102	340	15
						70	98	336	16
							94	328	18
							90	320	20
							86	312	22
							82	304	24
								296	26
								288	28
								280	30
								272	32
							264	34	
							256	36	
							246	38	
							240	40	
							232	42	
							224	44	
							216	46	
							208	48	
							200	50	

Aumentar longitud

7.7.3 Toma de tierra conocido el valor de la resistencia de paso una vez se ha clavado la primera pica o placa

Este es un método teórico aplicable solo en algunas situaciones, ya que necesita de unos condicionantes muy específicos. A continuación se enumeran algunas de las características que definen el método:

- La resistividad del terreno tiene que ser completamente conocida en toda la superficie en la cual vamos a realizar la puesta a tierra y mantenerse constante (esto es difícil, ya que aun en superficies pequeñas de terreno la resistividad puede sufrir amplias variaciones).
- Se determina la resistencia máxima que por las características del local le corresponde según la NET-IET (80 Ω , 15 Ω o 5 Ω).
- Se clava la primera pica o placa. Se mide la resistencia de paso a tierra. Con el valor hallado en esta primera medición, podremos saber el número de picas o placas totales (suponiendo que la resistividad del terreno es constante en toda su superficie), ya que con dos picas o placas la resistencia de paso valdrá la mitad, con tres picas o placas valdrá un tercio de su valor total, etc.
- Cuando se alcance el valor de la resistencia de paso a tierra dada por las normas, tendremos el número total de picas o placas que se deben colocar.
- Para la elección final se tendrá presente no solo el precio de compra del material, sino también el precio de la mano de obra para su instalación.

7.8 Medición de la puesta a tierra

En este apartado se expondrá cómo medir la resistencia de puesta a tierra de una toma determinada, y asimismo cómo determinar la resistividad del terreno.

En todos los casos se han utilizado los elementos medidores que se indican en las figuras. Con otros elementos de medida, resultará imprescindible la consulta de sus catálogos para un correcto funcionamiento de los mismos.

7.8.1 Medición de la resistencia de puesta a tierra

Para realizar una correcta medida de la resistencia de paso a tierras pueden utilizarse dos métodos (con el material que se expone).

7.8.1.1 Principio de los cuatro hilos

Este método se basa en las actuaciones descritas a continuación y en el esquema posterior:

- Lavar las picas para la sonda y la toma de tierra auxiliar, como está representado en la figura, separándolas unos 20 m.
- Conectar la toma de tierra a las bornas “E” y “ES” del aparato por medio de dos cables de medida separados. Conectar la sonda a la borna “S” y la toma auxiliar a la borna “H”.
- Poner los interruptores “E” y “ES” en el estado de “abierto” (pulsadores en la posición, *sin pulsar*).
- Medir la resistencia de puesta a tierra.

- La resistencia de la línea de medida entre la toma de tierra y la borna “E” no se suma a la medida, con este tipo de montaje.
- Los cables de medida, con el fin de evitar derivaciones, deben estar bien aislados y no deberán cruzarse ni discurrir durante grandes distancias paralelos, con el fin de limitar al máximo la influencia de acoplamientos.

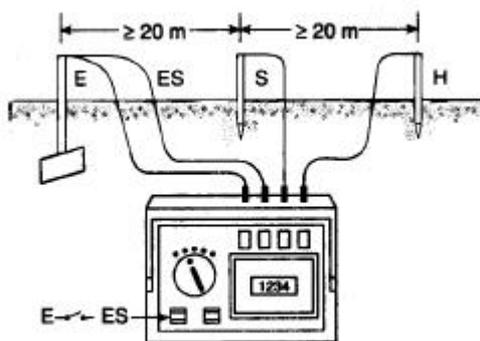


Fig. 7.15 Medida de la resistencia de puesta a tierra según el principio de los cuatro hilos

7.8.1.2 Principio de los tres hilos

Este método se basa en las siguientes actuaciones.

- Clavar las picas para la sonda y la toma de tierra auxiliar, como está representado en la figura, separadas unos 20 m.
- Conectar la toma de tierra a las bornas “E” y “ES” del aparato por medio de dos cables de medida separados. Conectar la sonda a la borna “S” y la toma auxiliar a la borna “H”.
- Poner los interruptores “E” y “ES” en el estado de “cerrado” (pulsadores en la posición de enclavados).
- Medir la resistencia de puesta a tierra.
- La resistencia de la línea de medida entre la toma de tierra y la borna “E” se debe sumar a la medida, con este tipo de montaje.
- Los cables de medida, con el fin de evitar derivaciones, deben estar bien aislados y no deberán cruzarse ni discurrir durante grandes distancias paralelos, con el fin de limitar al máximo la influencia de acoplamientos.

Su esquema de utilización es el mostrado en la siguiente figura:

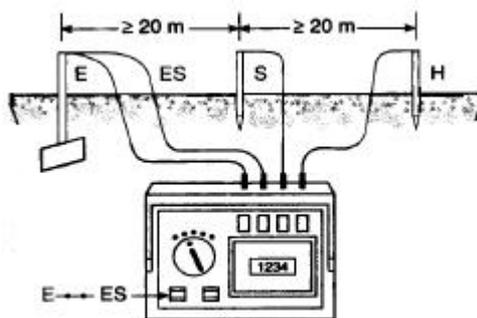


Fig. 7.16 Medida de la resistencia de puesta a tierra por el método de los tres hilos

7.8.2 Medición de la resistividad del terreno

El factor más importante en todo el proceso de cálculo de una correcta puesta a tierra consiste en la buena determinación de la resistividad del terreno, ya que ésta es muy superior a todas las otras resistencias que influyen en una instalación de puesta a tierra (cables, electrodos, soldaduras, etc.).

Para medir la resistividad del terreno no será suficiente con una sola medida, sino que será necesario efectuar varias de ellas, realizando una cuadrícula en toda la superficie del terreno propuesto para la puesta a tierra.

Una vez se han tenido presentes las dos consideraciones anteriores la medida pasará por:

- En una línea recta y a tramos con distancias “a” conocidas, clavar cuatro picas de tierra en el suelo y conectarlas al medidor de tierras según se indica en la figura.
- Calcular la resistencia específica de tierras aplicando la siguiente expresión.

$$\rho = 2 \cdot a \cdot R \quad [7.4]$$

Donde:

a = Distancia entre las dos picas de tierra

R = Resistencia de tierra obtenida con el medidor de tierra

- La profundidad con que se clavan las picas no debe exceder de 1.2 de la distancia “a”.
- Existe el riesgo de mediciones erróneas, si en paralelo a la disposición de la medida discurren tuberías, cables u otras líneas metálicas subterráneas.

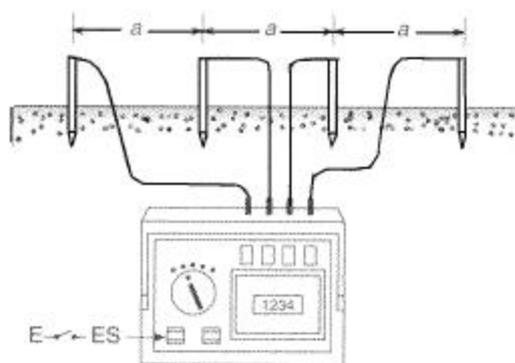


Fig. 7.17 Medida de la resistividad del terreno mediante el método Wenner

7.9 Emplazamiento y mantenimiento de la puesta a tierra

7.9.1 Emplazamiento de las puestas a tierra

Como conclusión a todo lo expuesto para la correcta instalación de una toma de tierra, recordamos que la parte más importante de toda la instalación es la correcta elección del terreno. Con un terreno mal conductor, la instalación de puesta a tierra siempre será mala, por más que utilicemos cables, picas, o soldaduras eficientes. En cambio con terrenos con bajas resistividades la instalación de puesta a tierra tiene asegurado un buen rendimiento.

Como elementos importantes, se han de tener presentes los siguientes:

- No colocar los electrodos a menos de 3 m de muros o rocas, ya que con distancias menores se impide la correcta disipación de las corrientes de fuga.
- No colocar electrodos en patios rodeados de muros por los cuatro lados.
- Los electrodos se situarán en aquella parte del terreno en la que la resistividad sea mínima y varíe poco con el paso del tiempo (orientaciones próximas al norte).
- Los electrodos de un edificio deberán instalarse debajo de las cimentaciones.
- Los empalmes, derivaciones y uniones deberán realizarse con soldadura aluminotérmica.
- No se instalarán electrodos en aquellos lugares donde puedan producirse corrientes telúricas o vagabundas.
- No se instalarán electrodos en las cercanías de cercas, alambradas, pozos, depósitos, etc., ya que el agua es mala conductora y los muros impiden la difusión de las corrientes de fuga.
- La distancia entre una puesta a tierra y un centro de transformación no será inferior a 15 m si el terreno es de baja resistividad.
- Se considerarán dos instalaciones de tierras como separadas (aisladas) cuando, habiéndose producido una descarga eléctrica de gran magnitud en una de ellas, esta descarga no produzca diferencias de potencial superiores a los 50 V en la otra toma de tierra.

7.9.2 Mantenimiento de las puestas a tierra

Para mantener dentro de unos valores aceptables prefijados la resistencia de paso a tierra, será necesario atender a dos requisitos básicos:

- Conservar el contacto electrodo-terreno
- Mantener y mejorar la conductividad del terreno

En cuanto al primer apartado: utilizar soldadura aluminotérmica, o mecanismos a presión mecánicos para las uniones; revisar el estado de picas, placas, cables, etc., y comprobar periódicamente su perfecto estado de conservación (una vez al año una revisión general y una vez cada 5 años, una revisión mucho más específica) serán aún los mejores métodos de mantenimiento que podamos ofrecer a las instalaciones de puesta a tierra.

Por el contrario, en cuanto a mantener o mejorar la conductividad del terreno, es posible con actuaciones adecuadas no sólo mantener la conductividad en unos valores determinados, sino que incluso estos valores pueden ser mejorados. Esto se consigue de dos formas:

- Aumentando la humedad del terreno
- Aumentando la concentración de sales o partículas metálicas en el terreno

En el primer caso, regando periódicamente la superficie ocupada por los electrodos, así como sus alrededores, se consigue mantener un nivel de humedad aceptable. También es posible conseguir este

fin añadiendo grasas en la parte superficial del terreno, lo que permitirá conservar el grado de humedad durante más tiempo.

En el segundo caso, se tendrá que tratar el terreno con elementos químicos, a fin de que resulte mejor conductor; estos productos pueden ser sales, abonos, geles, elementos electrolíticos, etc.

Uno de los sistemas más económicos y conocidos consiste en realizar una pequeña excavación por encima de los electrodos, seguidamente se añade sal común y se riega. Con este sistema las sales se van distribuyendo a medida que regamos la superficie, resultando un método sencillo y efectivo.

7.10 Revisión de las tomas de tierra

El REBT MIBT-039 indica: "Por la importancia que ofrece desde el punto de vista de la seguridad, cualquier instalación de toma de tierra, deberá ser obligatoriamente comprobada por los servicios oficiales en el momento de dar de alta la instalación para su funcionamiento".

La citada instrucción del REBT añade además: "Personal, técnicamente competente, efectuará esta comprobación anualmente en la época en que el terreno esté más seco. Para ello se medirá la resistencia de tierra, reparando inmediatamente los defectos que se encuentren. En los lugares en que el terreno no sea favorable a la buena conservación de los electrodos, éstos, así como también los conductores de enlace entre ellos hasta el punto de puesta a tierra, se pondrán al descubierto para su examen una vez, al menos, cada cinco años".

7.11 Cuestiones y problemas

Cuestiones

- 1 ¿Qué significa poner a tierra una instalación? ¿Por qué se realiza una puesta a tierra (indicar los motivos más importantes)?
- 2 ¿Qué materiales son susceptibles de conectar a tierra? ¿Qué instrucciones y normativas hacen referencia a la puesta a tierra dentro del REBT?
- 3 Indicar las partes que forman una puesta a tierra convencional (dar una breve explicación de cada una).
- 4 El terreno es uno de los elementos más importantes a tener presente en una correcta puesta a tierra. Indíquense los diversos factores que influyen en la resistividad del terreno.
- 5 Al efectuar una puesta a tierra en una zona fría, ¿cómo se evitará los efectos de las fuertes heladas? Las comprobaciones de la resistividad del terreno ¿en qué época se realizarán?
- 6 ¿Qué elementos forman la toma de tierra? ¿La línea de enlace con tierra también hace las veces de electrodo en alguna disposición?
- 7 ¿Qué es un electrodo? ¿Qué materiales se utilizan como electrodos y cuales son sus secciones? ¿Cómo afecta la composición química del terreno en la elección del material constitutivo del electrodo?
- 8 Enumerar los electrodos más utilizados, indicando sus características más representativas.
- 9 Los electrodos naturales tipo malla, ¿qué características deberán cumplir? ¿Cómo se realizará su unión con la línea de enlace con tierra?
- 10 ¿De cuántas formas puede instalarse una pica? ¿Qué elementos forman una pica? ¿Cómo se calcula el valor de la resistencia de paso a tierra de una pica?

- 11 ¿De cuántas formas puede instalarse una placa? ¿Qué elementos forman una placa? ¿Cómo se calcula el valor de la resistencia de paso a tierra de una placa?
- 12 ¿Cómo se instala un conductor enterrado? ¿Cómo se calcula el valor de la resistencia de paso a tierra de un conductor enterrado?
- 13 La línea de enlace con tierra, ¿qué características, secciones, materiales y formas de instalación adoptará para cada tipo de electrodo (malla, pica, placa, conductor enterrado)?
- 14 Los puntos de puesta a tierra, ¿qué funciones realizan? ¿Qué partes de la instalación de puesta a tierra unen?
- 15 Enumerar los puntos de puesta a tierra mínimos de los que debe constar una instalación de un edificio ¿Qué características deberá reunir la arqueta del punto de puesta a tierra?
- 16 Definir: línea principal de tierras (indíquense las secciones, materiales y formas de unión).
- 17 Definir: línea secundaria de tierras y conductores de protección (indíquense las secciones, materiales y formas de unión de cada una de las líneas anteriores).
- 18 ¿Qué elementos de un edificio deben conectarse a tierra?
- 19 La norma tecnológica de la edificación recomienda unos valores máximos para la resistencia de paso a tierra. ¿Cuáles son estos, y cuándo se aplican?
- 20 En un edificio previsto de pararrayos, ¿cuál es el valor mínimo de la sección de la línea de enlace con tierra? ¿Y en el caso de la instalación de antenas? Indíquense asimismo los materiales utilizados y el número de cables que forman las citadas redes conductoras.
- 21 ¿Con qué propósito se realiza una red equipotencial conectada a tierra? ¿Cuáles son los elementos a conectar a una red equipotencial? ¿Se deben conectar a esta red las tuberías que transporten materiales peligrosos, como gases o líquidos inflamables? ¿Y sus correspondientes depósitos, se conectarán asimismo a tierra?
- 22 ¿Qué se entiende por resistencia de paso a tierra? ¿Y por tensión de paso a tierra? ¿Y por tensión de contacto a tierra?
- 23 La ley establece unos periodos máximos para realizar las revisiones y comprobaciones de las instalaciones de puesta a tierra. ¿Cuáles son estas comprobaciones y con qué periodicidad se realizan?
- 24 ¿Cuál es la sección de un conductor de protección en un circuito para la cocina eléctrica en una instalación de grado de electrificación elevada? ¿Y para los equipos de calefacción o climatización?
- 25 ¿Cuál es el valor máximo de la tensión de contacto que se permite en locales secos, húmedos y locales mojados ó sumergidos?
- 26 ¿Cuáles son los factores a tener presentes a la hora de realizar un correcto mantenimiento de una puesta a tierra?
- 27 ¿Qué requisitos o condicionantes se tendrán en cuenta a la hora de escoger el emplazamiento de una toma de tierra?
- 28 Indicar algún dispositivo o método para realizar la medida de la resistencia de paso a tierra en una instalación de puesta a tierra.

Problemas

- 1 ¿Cuál será la resistencia de paso a tierra de seis picas de 2 m de longitud colocadas en paralelo, en un terreno con una resistividad aparente de $100 \ \Omega \cdot m$?
- 2 Determínese la resistencia de paso a tierra de un cable enterrado bajo la cimentación de un edificio de 60 m de perímetro. El cable esta unido haciendo anillo y la resistividad aparente del terreno es de $468 \ \Omega \cdot m$.
- 3 Calcule la resistencia de paso a tierra de una luminaria que esta puesta a tierra mediante una placa maciza de 1m por 0.5 m (2 mm de espesor), de cobre recocido, en un terreno de $185 \ \Omega \cdot m$ de resistividad aparente.

- 4 Si un terreno dispone de una resistividad aparente de $685 \ \Omega \cdot m$, ¿cuántos metros de cable de 35 mm^2 de sección se deberán enterrar en una zanja para obtener una resistencia de paso a tierra apropiada para un edificio dotado de ordenadores?
- 5 ¿Cuántas picas colocadas en paralelo se necesitarán para cumplir con los requisitos del punto anterior? ¿Y si la instalación se realiza mediante placas? Indicar también el número necesario de las mismas (indicar la distancia entre picas, y entre placas).
- 6 Hallar el número de picas necesario en un edificio de 135 m de perímetro (igual a la longitud de cable enterrado), dispuesto sobre un terreno de calizas agrietadas. El edificio posee pararrayos (indicar la distancia entre picas).
- 7 Hallar el número de picas necesario en un edificio de 170 m de perímetro (igual a la longitud de cable enterrado), dispuesto sobre un terreno de grava y arena silíceas. El edificio no posee pararrayos (indicar la separación entre picas).
- 8 Realizar el cálculo aproximado del número de picas o placas que vamos a necesitar para obtener una resistencia de paso a tierras adecuada para una vivienda dotada de ordenadores. El terreno donde se asienta la vivienda está formado por humos y limos. ¿Cómo se colocarán las picas o placas?
- 9 En un edificio sin malla de tierra, se desea instalar una toma de tierra por medio de picas. Como máximo la resistencia de paso a tierras será la determinada por las NTE, para edificios sin pararrayos. Se clava la primera pica y comprobando con el medidor la resistencia de paso a tierra, ésta ofrece un valor de $456 \ \Omega$. ¿Cuántas picas más deberemos colocar en paralelo? ¿Cómo se colocarán las picas?
- 10 Queremos realizar la instalación de una puesta a tierra de una oficina dotada de ordenadores. El terreno está compuesto de margas y arcillas compactas. ¿Qué solución será la más económica con los datos siguientes?

<input type="checkbox"/> Precio placas	6500 ptas/unidad
<input type="checkbox"/> Precio picas	4500 ptas/unidad.
<input type="checkbox"/> Tiempo colocación placas	1.3 h/unidad.
<input type="checkbox"/> Tiempo colocación picas	0.6 h/unidad.
<input type="checkbox"/> Precio mano de obra	2500 ptas/h.

IV Máquinas eléctricas y regulación de la tensión en los sistemas de potencia

Presentación

Con este cuarto módulo, formado por dos capítulos, se completa el estudio técnico de la materia. Concretamente, en el capítulo VIII se realiza un exhaustivo estudio del transformador, en representación de las restantes máquinas eléctricas. El transformador como máquina estática resulta de más fácil comprensión, facilitándonos los diagramas del mismo, así como los ensayos de vacío y cortocircuito, el conocimiento de los principios básicos de las restantes máquinas eléctricas. Del transformador se detallarán los principios de funcionamiento, tanto del transformador ideal como del real, así como sus circuitos equivalentes, para finalizar con la exposición de los diversos ensayos a realizar y con los problemas y soluciones a adoptar para reducir la caída de tensión de los mismos.

Por su parte, el capítulo IX trata de la regulación de la tensión en los sistemas de distribución de energía eléctrica. Es uno de los capítulos más importantes de la obra, ya que permite al lector acometer los cálculos que permiten regular la energía que pasa por una línea eléctrica, modificar su factor de potencia, eliminar los armónicos o simplemente aprovechar la línea de forma más racional. Todas estas funciones están encaminadas a conseguir una correcta utilización de los sistemas de compensación actuales, por lo que resulta de suma importancia su estudio previo, así como su correcta elección a la hora de ser aplicados.

Como ya se ha indicado, con este módulo se completa la parte más técnica de la obra, sirviendo por tanto de baremos para la evaluación de todo lo aprendido. De alguna forma, con este módulo se intenta llevar a la práctica (cálculos) todas las magnitudes, parámetros y diagramas dados a lo largo de la obra, aprendiéndose, asimismo, las técnicas para la compensación de energía reactiva, tan importantes en la actualidad a la hora de cumplir con los cada vez más restrictivos requisitos legales establecidos por las leyes referentes al transporte de la energía eléctrica. También en este módulo se introducen las máquinas eléctricas (representadas por el transformador), ya que no puede darse por completo el estudio de la energía eléctrica sin la comprensión de las máquinas que son capaces de generarla, transportarla o consumirla.

Unas cuestiones y ejercicios al final de cada capítulo permiten al lector evaluar su nivel de asimilación de la materia, aparte de resultar una forma rápida de repasar, *a posteriori*, cualquier duda o concepto sobre un capítulo.

Contenidos

- Capítulo VIII: Máquinas eléctricas. Transformadores

- Capítulo IX: Regulación de la tensión en líneas aéreas

Objetivos

Máquinas eléctricas. Transformadores

- Introducir al alumno a los principios básicos de las máquinas eléctricas.
- Consideraciones generales a tener presentes en la construcción de las máquinas eléctricas.
- Saber los principios de funcionamiento de los transformadores ideales, tanto en carga, como en vacío.
- Conocer el funcionamiento del transformador real, tanto en carga como en vacío.
- Entender la necesidad de los circuitos equivalentes.
- Saber construir el circuito equivalente de un transformador, así como saber calcular todos sus parámetros.
- Identificar los diversos circuitos equivalentes posibles, así como la necesidad de aplicar cada uno de ellos en las circunstancias más adecuadas.
- Razonar el porqué de los ensayos de las máquinas eléctricas.
- Identificar y saber realizar el ensayo de vacío. Obtención de los parámetros a él asociados.
- Entender el ensayo de cortocircuito. Obtención de los parámetros característicos mediante este ensayo.
- Saber obtener el circuito equivalente del transformador mediante los parámetros obtenidos con los ensayos de vacío y de cortocircuito.
- Entender el concepto de caída de tensión de una máquina eléctrica.
- Aplicar formas para disminuir la caída de tensión.

Regulación de la tensión en líneas aéreas

- Comprender la necesidad de la regulación de la tensión en los sistemas eléctricos.
- Saber calcular las condiciones eléctricas en una línea conocidos sus parámetros al principio de la misma.
- Calcular las condiciones eléctricas de una línea, conocidos sus parámetros al final de la misma.
- Cálculo de las condiciones eléctricas de una línea, conocidos sus parámetros de forma combinada.
- Conocer el cálculo aproximado de la caída de tensión en líneas cortas.
- Flujo de potencia en las líneas eléctricas.
- Saber la regulación de la tensión en los sistemas eléctricos.
- Cálculo de las potencias reactivas de compensación a colocar en paralelo.
- Conocer los diversos tipos de compensación existentes modificando la carga.
- Saber los diversos tipos de compensación existentes sin modificar la carga.
- Conocer las ventajas e inconvenientes de los sistemas de compensación de energía.
- Potencia reactiva de compensación.
- Saber resolver un problema de compensación de energía reactiva, con la correspondiente mejora del factor de potencia.

8 Transformadores

8.1 Introducción

No siempre coinciden los lugares de generación y consumo de energía eléctrica, más bien ocurre lo contrario: donde existen yacimientos de carbón o recursos hidráulicos (normalmente en zonas montañosas aptas para la creación de embalses) no suelen existir grandes aglomeraciones urbanas, resultando indispensable el transporte de esta energía en ocasiones a grandes distancias. El transporte de energía eléctrica, como se indicó en los primeros capítulos, conlleva unas pérdidas inherentes de energía, que dependen de la resistencia y de la intensidad que circula por los conductores, a estas pérdidas se les denomina *pérdidas Joule* debido al científico que las estudió y formuló. En concreto, la potencia disipada en un conductor de resistencia R por el que circula una corriente alterna de intensidad I_e es: $P = I_e^2 \cdot R$

Si se desea reducir las pérdidas energéticas del transporte, puede optarse entre dos opciones: disminuir la resistencia del conductor que transporta la corriente o disminuir la intensidad que circula por el mismo.

La primera opción se consigue, o bien cambiando el material constructivo de las líneas (solución difícil ya que esto representaría el uso de materiales más conductores con un gran coste), o bien aumentando la sección del conductor, lo que implica un aumento del coste de la instalación al aumentar la cantidad de metal a utilizar y ser mayor el peso que tendrán que soportar las torres de las líneas de transmisión.

La segunda opción, disminuir la intensidad que circula por los conductores, puede conseguirse aumentando la diferencia de potencial en las líneas de conducción, ya que la potencia que transporta una línea eléctrica es $P = V \cdot I$, de modo que para cierto valor de potencia, cuanto mayor sea la tensión V , más pequeña será la intensidad, consiguiéndose una disminución de la potencia disipada.

El hecho de disminuir la intensidad obliga a realizar el transporte de energía eléctrica a una tensión o potencial muy elevado (para mantener constante el valor de la potencia), de lo que resultan aisladores mayores. Una vez en el lugar de consumo, esta energía (a alto potencial) resultaría peligrosa, siendo necesario reducirla hasta alcanzar valores normales de consumo, lo que conlleva un aumento de la intensidad para seguir manteniendo la potencia constante.

La facilidad con la que pueden modificarse las tensiones e intensidades en alterna sin sufrir apenas pérdidas, frente a las dificultades de hacer lo propio con suministros en continua, fue una de las principales razones que impulsó el uso de la energía alterna trifásica senoidal.

El dispositivo que permite modificar la tensión e intensidad de un suministro en alterna se denomina *transformador*. El transformador es una máquina eléctrica basada en el fenómeno de la inducción

mutua y destinado para transformar la tensión de una corriente alterna, pero conservando la misma frecuencia y potencia. El transformador más simple consta de un núcleo de acero y dos devanados aislados, tanto del núcleo como entre sí.

Los generadores o alternadores de las centrales eléctricas suelen producir energía eléctrica cuya tensión no excede de los 20kV o 25kV. Esta tensión, demasiado pequeña para el transporte de grandes potencias, se eleva mediante transformadores (elevadores), hasta alcanzar valores de hasta medio millón de voltios. Una vez en el lugar del consumo, se reduce la tensión, utilizando nuevamente transformadores (reductores), para volver a valores de tensión no peligrosos para el consumo.

8.2 Consideraciones generales

Para comprender todos los fenómenos que permitirán al transformador realizar sus funciones adecuadamente, es indispensable conocer la construcción básica de un transformador elemental.

Primeramente se construirá el núcleo, que estará formado por chapas magnéticas con o sin grano orientado. Estas chapas se dispondrán juntas hasta conseguir el espesor del núcleo deseado. No suelen construirse núcleos macizos, ya que en ellos por histéresis o foucault se producirían unas pérdidas del todo inaceptables. El núcleo adquiere consistencia gracias a la unión de las chapas, la cual puede realizarse de muy diversas formas; para un pequeño transformador como el del ejemplo, es suficiente con unos tornillos colocados en los extremos o vértices de las chapas que aseguren su unión con el paso del tiempo.

El otro elemento importante son los bobinados (primario y secundario). Para su construcción, primeramente se aislará la zona donde vayan a colocarse, ya que aunque estos bobinados se realizan con hilo de cobre esmaltado y por tanto aislado, un contacto accidental de estos hilos con el núcleo supondría un cortocircuito peligroso para el transformador.

Se aislará, pues, la zona de los bobinados con material eléctricamente no conductor resistente a las altas temperaturas que puedan producirse cuando el transformador funcione a pleno rendimiento. Una vez colocado el aislador se procederá a construir el bobinado, realizándose para ello capas superpuestas de hilo, entre cada capa es aconsejable la colocación de un papel fino y resistente o similar para prevenir posibles contactos entre las distintas capas e incluso la colocación de estos aisladores permite una distribución más uniforme de los hilos de cobre.

Una vez construido el transformador, cada bobinado estará perfectamente aislado del núcleo y por tanto también aislado del otro bobinado, no existiendo ningún tipo de continuidad eléctrica entre núcleo y bobinados o entre los dos bobinados. La transmisión de energía eléctrica se deberá efectuar, pues, por otros medios, como por ejemplo los electromagnéticos.

Con este elemental transformador construido, veamos como responde si se conecta en corriente continua o bien en alterna.

Si conectamos al primario del transformador a tensión continua (invariable con el tiempo), como el bobinado posee resistencia, por el mismo, y según la ley de Ohm, circulará una intensidad que, dadas las características de la tensión y recordando que la resistencia tampoco variará su valor, también será continua.

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{Recordando que la resistencia es} \quad R = \rho \frac{L}{S} \quad [8.1]$$

Donde:

- I = Intensidad que circula por el devanado en amperios (A)
- U = Tensión en bornes del devanado en voltios (V)
- R = Resistencia que ofrece el hilo de cobre en Ω
- ρ = Resistividad del cobre en $(\Omega \text{ mm}^2/\text{m})$. Este valor depende del material y de la temperatura
- L = Longitud del hilo en m
- S = Sección del hilo en mm^2

La corriente al circular por el bobinado creará una fuerza magnetomotriz, que dependerá del valor de la intensidad y del número de espiras o vueltas que formen cada bobinado. Esta tensión magnética dividida por la reluctancia o resistencia del núcleo de hierro creará un flujo según la ley de Hopkinson, que también será constante.

$$\mathcal{U} = NI \cdot I \quad \text{Esta fuerza magnetomotriz dará lugar a un flujo} \quad \phi = \frac{\mathcal{U}}{\mathcal{R}} \quad [8.2]$$

Como la reluctancia depende del tipo de material y de las dimensiones físicas del núcleo, ésta puede considerarse constante, así pues, con una tensión continua existirá una intensidad continua que producirá un flujo continuo. Este flujo no variará con el tiempo, no existiendo, según la Ley de Faraday-Lenz, tensión o fuerza electromotriz inducida en las bobinas del secundario.

$$e_{ind} = N_2 \frac{d\phi}{dt} = 0 \quad [8.3]$$

Esta deducción nos lleva a una conclusión importante: con corriente continua si se produce flujo magnético que concatena los bobinados primarios con los secundarios del transformador, pero al ser un flujo continuo, invariable con el tiempo, no se generará tensión inducida en la salida del segundo bobinado, es decir, el transformador no funcionará. Concluyéndose que no pueden existir transformadores en corriente continua.

Si el transformador se conecta en tensión alterna, y aplicando las mismas fórmulas, se producirá corriente alterna al pasar por el devanado primario, esta corriente alterna creará un flujo magnético alterno que enlazará con las espiras del devanado secundario e inducirá en éstas una f.e.m. Puesto que el flujo magnético es alterno, la f.e.m. inducida en el devanado secundario del transformador será también alterna y su frecuencia será igual a la de la corriente en el devanado primario. El flujo magnético alterno que pasará por el núcleo del transformador intersectará no sólo en el devanado secundario, sino también con el devanado primario del transformador, lo que provocará que en el devanado primario se induzca también una f.e.m.

$$e_{ind} = N_2 \frac{d\phi}{dt} \neq 0 \quad [8.4]$$

Con tensión alterna sí existe el transformador.

Las magnitudes de las f.e.m. que se inducen en los devanados de los transformadores dependen de la frecuencia de la corriente alterna, del número de espiras en cada devanado y de la magnitud del flujo magnético en el núcleo. Para una frecuencia y un flujo magnético determinado, la magnitud de la f.e.m. de cada devanado depende sólo del número de espiras del mismo. Esta relación entre las magnitudes de la f.e.m. y los números de espiras de los devanados del transformador puede expresarse con la fórmula: $E_1 / E_2 = N_1 / N_2$

Así pues, un transformador elemental estará constituido por un núcleo de hierro dulce con dos arrollamientos (bobinas), de N_1 y N_2 espiras respectivamente. Uno de estos arrollamientos se conectará a la corriente cuya tensión desea modificarse y se denomina *primario*, mientras que el otro bobinado constituye la salida de la tensión transformada, denominándose *secundario*. Según sea el número de espiras del primario mayor o menor que el número de espiras del secundario, el transformador actuará como reductor o elevador de la tensión. Si $N_1 > N_2$, entonces $V_1 > V_2$ y $I_1 < I_2$, el transformador reduce la tensión aumentando el valor de la intensidad y viceversa, permitiendo así reducir las pérdidas que se producen en el transporte de energía.

En resumen, los transformadores son los enlaces entre los generadores del sistema de potencia y las líneas de transmisión, así como entre líneas de diferentes niveles de tensión. No debe olvidarse que las líneas de transmisión operan a voltajes nominales de hasta 500 KV de línea, mientras que los generadores raramente pasan de los 15-25 KV. Finalmente, los transformadores también disminuyen los voltajes hasta los niveles de distribución requeridos para uso normal 380/220 V, siendo altamente eficientes (el rendimiento se aproxima al 100%) y muy fiables. Últimamente, se ha ampliado el campo de usos de los transformadores, ya que aparte de modificar el factor de potencia y la potencia activa, se les hace trabajar para incidir también en los flujos de potencia reactiva y aparente.

La nomenclatura es: E_1 y $E_2 = f.e.m.$ de los devanados primario y secundario; N_1 y $N_2 =$ números de espiras de los devanados primario y secundario. Los voltímetros V_1 y V_2 , conectados a los bornes de los devanados primario y secundario, nos indicarán las tensiones U_1 y U_2 de estos devanados. Si designamos con U_2 la tensión del devanado secundario durante el funcionamiento en vacío, puede decirse que: $U_1 \propto E_1$ y $U_2 \propto E_2$.

En la práctica, la diferencia entre las f.e.m. y las tensiones es tan pequeña que la relación entre las tensiones y los números de espiras de ambos devanados puede expresarse como: $U_1/U_2 \approx N_1/N_2$. De aquí se deduce que cuantas veces el número de espiras en el devanado primario sea mayor (o menor) que el número de espiras del devanado secundario, tantas veces será la tensión del devanado primario mayor (o menor) que la del devanado secundario.

La diferencia entre la f.e.m. y la tensión en el devanado primario del transformador se hace particularmente pequeña cuando el devanado secundario está abierto y la corriente en éste es igual a cero (marcha en vacío). En estas condiciones, por el devanado primario pasará solamente una corriente insignificante denominada corriente de vacío. En este caso, la tensión en los bornes del devanado secundario será igual a la f.e.m. que se inducirá en el mismo. El número que indica cuántas veces la tensión en el devanado primario es mayor (o menor) que la tensión en el devanado secundario se denomina *relación de transformación* del transformador y se designa con la letra m ($m = U_1/U_2 = N_1/N_2$). Las corrientes nominales de los devanados se adoptan iguales a los cocientes de la división de la potencia nominal del transformador por las tensiones nominales correspondientes.

8.2.1 Aplicaciones

Existen unas aplicaciones básicas para la utilización de los transformadores de tensión:

- Transporte de energía eléctrica: gracias a su capacidad de transformar los parámetros de tensión e intensidad, con la consiguiente reducción de las pérdidas por efecto Joule. Existirán dos transformadores, uno al principio de línea, para la elevación del potencial (transformador elevador), y uno al final de línea, para la reducción del mismo (transformador reductor).

- Interconexión de líneas eléctricas a diferentes niveles de tensión: por su capacidad de transformar los niveles de tensión, los transformadores son ideales para interconectar líneas a diferente nivel de tensión, dando para todas ellas una salida común.
- Variar los flujos de potencia activa, reactiva, y aparente.
- Variar los valores de la intensidad, tanto en módulo, como en ángulo (desfase).
- Protección de circuitos separados galvánicamente, etc.

Los transformadores de intensidad también disponen de unas aplicaciones específicas:

- Los transformadores de corriente se utilizan para la medición y el control de corrientes alternas (50/60 Hz) en circuitos de potencia.
- Como sensores de corriente para activar sistemas de protección frente a sobrecargas e infracciones en: convertidores de potencia, inversores, puentes rectificadores, motores, sistemas de alimentación ininterrumpida (S.A.I).
- Como sensores de corriente en instrumentación, *aparatura* eléctrica y en equipos eléctricos de medida, regulación y control.

La designación actual de los diferentes tipos de transformadores pasa por:

- Monofásico
- Trifásico
- Con refrigeración por aire (seco)
- De aceite con refrigeración natural por aire
- De aceite con refrigeración artificial por aire (ventilado)
- De tres devanados (un devanado primario y dos secundarios por fase)
- De pararrayos (dispone de protección aislada contra cargas disruptivas)

8.3 Principio de funcionamiento del transformador transformador ideal y real

Antes de iniciar el estudio de los transformadores es importante conocer la nomenclatura y los términos utilizados para designar las diferentes magnitudes y funciones del transformador. Los subíndices n indican valores nominales; los subíndices 1 y 2 denominan las magnitudes del primario y secundario respectivamente.

La potencia aparente nominal de un transformador monofásico es el producto de su tensión nominal primaria por la corriente nominal correspondiente (es un valor convencional de referencia). Para los transformadores trifásicos se designará en función de los valores de línea (es decir, multiplicando por $\sqrt{3}$ las tensiones de fase):

$$S_n = \sqrt{3} V_{1n} I_{1n} = \sqrt{3} V_{2n} I_{2n} \quad [8.5]$$

La potencia nominal, junto con las tensiones nominales, fija las capacidades de corriente de los devanados del transformador (son los valores para los cuales el transformador ha sido proyectado).

Las pérdidas en el cobre dependen de la magnitud de la corriente e inciden en el calentamiento de los arrollamientos, que trabajando con valores superiores a los nominales, suelen acortar drásticamente la vida de los aislantes. Los transformadores pueden llegar a tener más de una potencia nominal, según se utilice o no refrigeración forzada, o dependiendo de la altitud de la zona en la que vaya a trabajar la

máquina (a mayor altitud menor presión y temperatura). Los términos nominal y plena carga son sinónimos.

Consideremos el transformador monofásico de la figura 6.1, constituido por un núcleo magnético real de permeabilidad finita, que presenta una pérdidas en el hierro P_{Fe} , y unos arrollamientos primario y secundario con un número de espiras N_1 y N_2 respectivamente. Supondremos que el transformador se alimenta por el devanado de tensión más elevada, es decir, se considera que la máquina va a trabajar como transformador reductor.

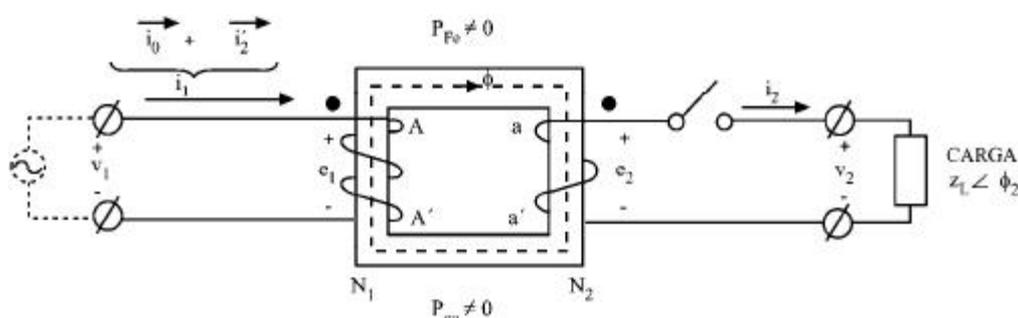


Fig. 8.1 Transformador monofásico elemental ideal

Los convenios de signos adoptados para las corrientes y tensiones de la figura anterior corresponden al sentido normal de transferencia de la energía, es decir:

- El primario constituye un receptor respecto a la fuente de alimentación (la red), lo que significa que este devanado absorbe una corriente y una potencia y desarrolla una f.c.e.m. (fuerza contraelectromotriz).
- El secundario se comporta como un generador respecto a la carga conectada en sus bornes, suministrando una corriente y una potencia. Siendo a su vez receptor de una f.e.m. inducida por el flujo magnético del primario.

Para empezar, vamos a suponer que se cumplen las siguientes condiciones ideales, para poder comprender mejor el funcionamiento del transformador, sin que las imperfecciones reales de la máquina enmascaren los fenómenos físicos más importantes.

- Los devanados primario y secundario disponen de resistencias óhmicas despreciables: no hay pérdidas por efecto Joule y no existen caídas de tensiones resistivas en el transformador. En condiciones reales estas resistencias serán pequeñas pero no nulas.
- No existen flujos de dispersión: todo el flujo magnético está confinado al núcleo y enlaza ambos devanados. En el transformador real existirán pequeñas partes del flujo total que solamente atravesarán cada uno de los arrollamientos, son los flujos de dispersión que completarán su circuito a través del aire.

8.3.1 Transformador ideal trabajando en vacío

Con estas suposiciones vamos a empezar el estudio del transformador ideal en vacío. Al aplicar una tensión alterna V_1 al primario, por él circulará una corriente alterna, que a su vez producirá un flujo

alterno en el núcleo, cuyo sentido vendrá determinado por la ley de Ampère aplicada a este arrollamiento. En la figura 6.1, se muestran los sentidos positivos de la corriente y el flujo. Debido a la variación periódica del flujo se crearán unas f.e.m.s. inducidas en los arrollamientos, que de acuerdo con la ley de Faraday, responderán a las ecuaciones:

$$e_1 = N_1 \frac{d\psi}{dt} \quad \text{y} \quad e_2 = N_2 \frac{d\psi}{dt} \quad [8.6]$$

En la figura 6.1, se indican las polaridades de las f.e.m.s. para que estén de acuerdo con la ley de Lenz de oposición al cambio de flujo (todo efecto se opone a la causa que lo produce). Realmente e_1 representa una f.c.e.m. porque se opone a la tensión aplicada V_1 y limita la corriente del primario. La polaridad asignada a e_2 tiene en cuenta que al cerrar el interruptor S del secundario se tendería a producir una corriente i_2 en el sentido mostrado en la figura, de tal modo que al circular por el devanado secundario daría lugar a una acción contraria sobre el flujo primario, como así lo requiere la ley de Lenz (aplicar la ley de Ampère a este arrollamiento). No se incluye el signo menos en las expresiones anteriores, porque ya se ha tenido en cuenta el mismo cuando se han señalado las polaridades de las f.e.m.s.

También se observa que los terminales superiores de los devanados primario y secundario tienen, en el instante indicado, una polaridad positiva respecto de los otros. Existe un modo para identificar estos bornes homólogos: se considera un sentido de flujo positivo en el núcleo, y a continuación se señalan con un punto aquellos extremos de los arrollamientos por los que hay que introducir corriente para obtener los citados flujos de sentido positivos. Obsérvese que en el caso de la figura 6.1, si se considera un flujo positivo con sentido de giro hacia la derecha, se tendrá que introducir corriente por los terminales superiores para que se originen flujos de sentido positivo, teniendo en cuenta la ley de Ampère.

Además, los terminales se han señalado siguiendo las normas CEI (Comité Electrotécnico Internacional), que recomiendan que se designen terminales de la misma polaridad con la misma letra, utilizando mayúsculas para el lado de A.T. y minúsculas para el lado de B.T., los extremos positivos se indican A-a y los negativos con A'-a' (si el transformador es trifásico en emplean las letras B y C para los otras fases). Estos convenios presentan la ventaja de conocer las polaridades de los devanados sin necesidad de tener en cuenta los sentidos de los arrollamientos en el núcleo del transformador.

Una vez designados los sentidos de las f.e.m.s. y de las corrientes en el transformador, interesa conocer las relaciones existentes entre las tensiones, los flujos y las f.e.m.s. Si aplicamos la 2ª ley de Kirchoff al circuito de la figura 9.1, teniendo en cuenta que los devanados son ideales, obtenemos:

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\psi}{dt} \quad [8.7]$$

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\psi}{dt} \quad [8.8]$$

Partiendo de un flujo senoidal de la forma:

$$\psi = \psi_m \text{sen } \omega t = \psi_m \cos (\omega t - 90^\circ) \quad [8.9]$$

Y substituyéndolo en las expresiones anteriores, obtendremos:

$$v_1 = e_1 = N_1 \omega \psi_m \cos \omega t \quad [8.10]$$

$$v_2 = e_2 = N_2 \omega \psi_m \cos \omega t \quad [8.11]$$

Lo que indica que las tensiones y f.e.m.s. van adelantadas 90° respecto al flujo, siendo sus valores eficaces:

$$V_1 = E_1 = \frac{N_1 \sqrt{2} \dot{\Phi}_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f N_1 \dot{\Phi}_m \quad [8.12]$$

$$V_2 = E_2 = \frac{N_2 \sqrt{2} \dot{\Phi}_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f N_2 \dot{\Phi}_m \quad [8.13]$$

Dividiendo entre sí las ecuaciones anteriores resulta:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \quad [8.14]$$

Donde el factor m se denomina relación de transformación. De este modo, en un transformador ideal, la relación de tensiones coincide con la relación de espiras que, en definitiva, es la relación transformación.

Si el interruptor S de la figura 6.1 está abierto, el transformador funciona sin carga (en vacío), comportándose el primario como una bobina con núcleo de hierro. Este tipo de circuito puede representarse como un circuito paralelo formado por una resistencia (que representa las pérdidas en el hierro) más una bobina (que representa el efecto inductivo de la creación de flujo). En este caso, el transformador absorberá una corriente de vacío i_0 . La corriente i_0 forma un ángulo α_0 con la tensión aplicada V_1 , de forma que la potencia absorbida en vacío, denominada P_0 , será igual a las pérdidas en el hierro P_{Fe} , cumpliéndose:

$$P_0 = P_{Fe} = V_1 \cdot I_0 \cdot \cos \alpha_0 \quad [8.15]$$

Donde V_1 e I_0 representan los valores eficaces de la tensión y de la corriente respectivamente.

La corriente I_0 tiene dos componentes, una activa I_{Fe} y otra reactiva I_∞ . En la figura 6.2, se representa el diagrama fasorial de un transformador ideal en vacío, adoptándose como referencia la tensión aplicada V_1 .

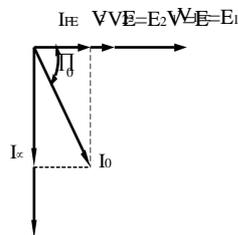


Fig. 8.2 Diagrama fasorial de un transformador ideal en vacío

8.3.2 Transformador ideal trabajando en carga

Cuando se cierra el interruptor S de la figura 6.1, el transformador funcionará en carga, apareciendo por el circuito secundario una corriente i_2 , que retrasa $\sqrt{2}$ de la f.e.m. E_2 :

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_L} = \frac{E_2 \cdot 0^\circ}{Z_L \sqrt{2}} = \frac{E_2}{X_L} \cdot \sqrt{2} \quad [8.16]$$

Al circular i_2 por el devanado secundario se produce una f.m.m. desmagnetizante $N_2 \cdot i_2$ que se opone a la f.m.m. primaria existente $N_1 i_0$. A menos que esta f.m.m. del secundario no quede neutralizada por una corriente adicional que circule por el primario, el flujo total se verá reducido, con las consiguientes reducciones en las f.e.m.s. e_1 y e_2 , que son proporcionales a él, rompiéndose el equilibrio entre v_1 y e_2 en el primario. Para que esto no ocurra y pueda restablecerse el equilibrio es preciso neutralizar la f.m.m. $N_2 i_2$ del secundario, mediante una corriente adicional primaria i'_2 equivalente a una f.m.m. $N_1 i'_2$ de valor:

$$N_1 i'_2 = N_2 i_2 \quad [8.17]$$

A partir de la cual deducimos el valor de la corriente i'_2 :

$$i'_2 = \frac{E_2}{N_1} \quad i_2 = \frac{i_2}{m}; \quad \text{siendo} \quad m = \frac{N_1}{N_2} \quad [8.18]$$

Por tanto, la corriente total necesaria en el primario i_1 , con el transformador en carga, será:

$$i_1 = i_0 + i'_2 = i_0 + \frac{i_2}{m} \quad [8.19]$$

Que en forma fasorial corresponde a:

$$I_1 = I_0 + I'_2 = I_0 + \frac{I_2}{m} \quad [8.20]$$

La ecuación anterior expresa la relación entre la corriente primaria I_1 , la de vacío I_0 y la secundaria I_2 , indicándonos que la corriente primaria tiene dos componentes.

- Una corriente de excitación o de vacío I_0 , cuya misión consiste en producir el flujo en el núcleo magnético y “vencer” las pérdidas en el hierro a través de sus componentes I_∞ , I_{Fe} respectivamente.
- Una componente de carga I'_2 , que se encarga de equilibrar o contrarresta la acción desmagnetizante de la f.m.m. secundaria para que el flujo en el núcleo permanezca constante e independiente de la carga.

Un modo más simple de demostrar la ecuación anterior es proceder en sentido inverso, partiendo de las ecuaciones (1) que nos indican que si la tensión primaria V_1 es constante el flujo \sqrt{m} en el núcleo magnético deberá permanecer constante para cualquier régimen de carga. Así si se denomina R a la reluctancia del circuito magnético del transformador, la ley de Hopkinson nos indica que, si el flujo es constante, también deberá ser constante la f.m.m. necesaria para producirlo en cualquier régimen de carga. Por tanto, las f.m.m.s. en vacío y en carga deberán ser iguales. Si recordamos que en vacío, las corrientes que circulaban por los devanados eran $I_1 = I_0$ e $I_2 = 0$, y se obtenía una f.m.m. total de valor:

$$F = N_1 I_0 \quad [8.21]$$

Ahora en carga, como las corrientes que circulan son I_1 e I_2 , se tendrá una f.m.m. resultante:

$$F = N_1 I_0 - N_2 I_2 \quad [8.22]$$

El signo menos de la expresión anterior está de acuerdo con la acción desmagnetizante del secundario, esto último puede comprobarse aplicando la teoría de los circuitos magnéticos al esquema de la figura 6.1. Si igualamos ahora, las dos expresiones anteriores, se obtiene:

$$N_1 I_0 = N_1 I_1 - N_2 I_2 \quad [8.23]$$

De donde se deduce:

$$I_1 = I_0 + \frac{N_2}{N_1} I_2 = I_2 + \frac{I_2}{m} = I_0 + I_2 \quad [8.24]$$

Que coincide con la expresión anteriormente encontrada, que nos mostraba la corriente total necesaria en el primario.

A plena carga, la corriente I_2 es veinte veces mayor que I_0 , por lo que puede despreciarse, denominándose a I_2 corriente secundaria reducida. Debido a esto, la ecuación anterior queda reducida a:

$$I_1 \approx I_2 = \frac{I_2}{m} \quad [8.25]$$

8.3.3 Funcionamiento de un transformador real en vacío y en carga

En el apartado anterior se ha realizado el estudio de un transformador ideal en el que los arrollamientos no tenían resistencia ni flujos de dispersión. En los transformadores reales hay que tener en cuenta ambas características, ya que la aparición de resistencia es inherente a la constitución de los devanados con hilo conductor. En la figura 6.3, se muestra el circuito del transformador de la figura 6.1, donde para mayor claridad se han considerado las resistencias R_1 y R_2 de los arrollamientos fuera de las bobinas.

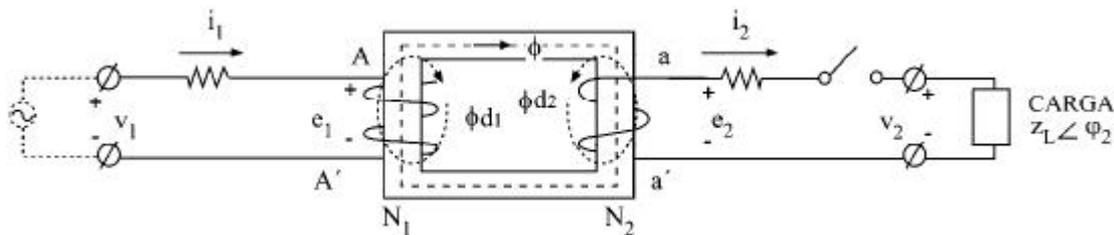


Fig. 8.3 Transformador real monofásico elemental

En la figura, también se observa que de todo el flujo producido por los devanados, sólo una parte es común ($\sqrt{}$) a los dos bobinados. Esto es debido a los flujos de dispersión que aparecen en los arrollamientos. Si se denominan $\sqrt{1}$ y $\sqrt{2}$ a los flujos totales que atraviesan los devanados primario y secundario, y $\sqrt{d1}$, $\sqrt{d2}$ a los flujos de dispersión respectivos se cumplirá:

$$\sqrt{1} = \sqrt{c} + \sqrt{d1} \quad [8.26]$$

$$\sqrt{2} = \sqrt{c} + \sqrt{d2} \quad [8.27]$$

A primera vista, la introducción de los flujos de dispersión complica nuestro estudio, ya que desaparece la idea del flujo común único que existía en el transformador ideal. Sin embargo, se puede

conservar la misma forma de proceder si, en serie, se añaden a cada arrollamiento unas bobinas con el mismo número de espiras que los devanados correspondientes (y con núcleo de aire, ya que el flujo de dispersión se cerraba a través del aire), de tal forma que, al circular por ellas las intensidades respectivas, darán lugar a los mismos flujos de dispersión que en los bobinados reales.

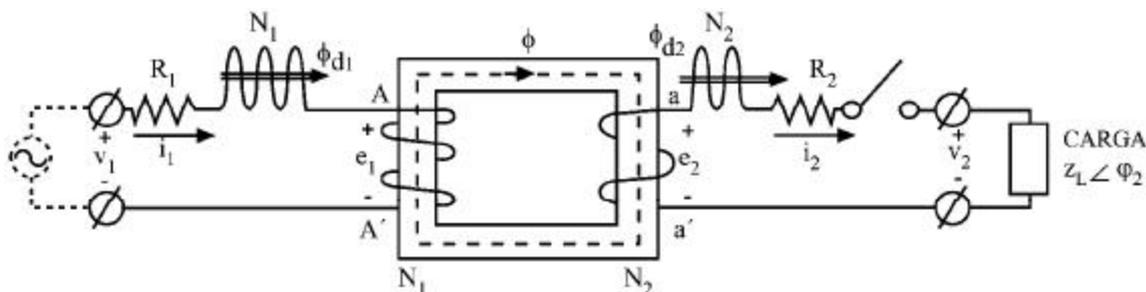


Fig. 8.4 Transformador real. Considerándose las resistencias y flujos de dispersión

En la figura 8.4, se ha representado esta idea donde se han indicado con L_{d1} y L_{d2} los coeficientes de autoinducción respectivos de estas bobinas adicionales (con núcleo de aire), cuyos valores de acuerdo con su definición serán:

$$L_{d1} = N_1 \frac{d\lambda_{d1}}{di_1} \quad L_{d2} = N_2 \frac{d\lambda_{d2}}{di_2} \quad [8.28]$$

Dando lugar a las reactancias de dispersión X_1 y X_2 de ambos devanados:

$$X_1 = L_{d1} \quad X_2 = L_{d2} \quad [8.29]$$

Aplicando la 2ª ley de Kirchhoff a los circuitos primario y secundario de la figura 8.4, se obtiene:

$$v_1 = e_1 + R_1 i_1 + L_{d1} \frac{di_1}{dt} \quad e_2 = v_2 + R_2 i_2 + L_{d2} \frac{di_2}{dt} \quad [8.30]$$

Donde los valores de e_1 y e_2 vienen expresados por las primeras ecuaciones vistas en este capítulo:

$$e_1 = N_1 \frac{d\lambda}{dt} \quad e_2 = N_2 \frac{d\lambda}{dt} \quad [8.31]$$

Que se corresponden con los siguientes valores eficaces:

$$E_1 = 4.44 f N_1 \lambda_m \quad E_2 = 4.44 f N_2 \lambda_m \quad [8.32]$$

Donde λ_m es el flujo común máximo que circula por el circuito magnético de la figura 8.4.

Las ecuaciones halladas mediante la aplicación de la 2ª ley de Kirchhoff se expresan en forma compleja, de la siguiente manera:

$$V_1 = E_1 + R_1 I_1 + j X_1 I_1 \quad [8.33]$$

$$V_2 = E_2 - R_2 I_2 - j X_2 I_2 \quad [8.34]$$

Estas ecuaciones, relacionan las tensiones con las f.e.m.s. y caídas de tensión dentro de los devanados del transformador.

Comparando estas ecuaciones con las anteriores ($E=4.44fN_m$), se obtiene que la relación entre los valores eficaces de las f.e.m.s. inducidas será:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \quad [8.35]$$

Esta ecuación se cumple siempre, tanto para un transformador ideal como para el transformador real. Ahora bien, si se tiene en cuenta las ecuaciones encontradas mediante la aplicación de la 2ª ley de Kirchoff a ambos devanados y las expresadas en forma compleja, en el transformador real, dejan de cumplirse las igualdades entre f.e.m.s. y tensiones que aparecían en el transformador ideal. En el caso real el cociente entre las tensiones primaria y secundaria deja de ser igual a la relación de transformación. En los transformadores industriales, las caídas de tensión a plena carga son del orden del 6% al 10% de las tensiones nominales, por lo que las relaciones expresadas en forma compleja se convierten en las siguientes ecuaciones aproximadas:

$$V_2 \approx E_2 \quad [8.36]$$

$$V_1 \approx E_1 \quad [8.37]$$

Como consecuencia, la relación entre las tensiones primaria y secundaria será aproximadamente igual a:

$$\frac{V_1}{V_2} = m \quad [8.38]$$

Si el transformador trabaja en vacío, las relaciones reales de V_1 y V_2 , expresadas en forma compleja, se transforman en las siguientes expresiones, ya que, I_2 es igual a cero:

$$V_1 = E_1 + R_1 I_0 + j X_1 I_0 \quad [8.39]$$

$$V_2 = E_2 \quad [8.40]$$

La corriente de vacío I_0 es del orden de 0,6% a 4% de la I_n (corriente nominal o de plena carga del primario), las caídas de tensión en el vacío ($R_1 I_0$ y $X_1 I_0$) son muy pequeñas; por este motivo, en vacío, pueden considerarse como exactas las igualdades:

$$V_1 = E_1 \quad [8.41]$$

$$V_2 = E_2 \quad [8.42]$$

Donde V_{20} representa la magnitud de la tensión secundaria en vacío. Por consiguiente y teniendo en cuenta las expresiones anteriores y la relación de transformación ideal, se podrá escribir:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_{20}} = \frac{N_1}{N_2} = m \quad [8.43]$$

Que nos define la relación de transformación como el cociente entre la tensión primaria aplicada al transformador y la tensión secundaria en vacío. Este cociente es el que incluye el fabricante en la placa de características de la máquina.