

Directora del capítulo  
*Dominique Folliot*

40

Sumario

Efectos fisiológicos de la electricidad  
*Dominique Folliot* . . . . . 40.2

Electricidad estática  
*Claude Menguy* . . . . . 40.6

Prevención y normas  
*Renzo Comini* . . . . . 40.11

## ● EFECTOS FISIOLÓGICOS DE LA ELECTRICIDAD

**Dominique Folliot**

El estudio de los peligros, la electrofisiología y la prevención de accidentes eléctricos exige la comprensión de varios conceptos técnicos y médicos.

Las definiciones de los términos electrobiológicos que se dan a continuación están tomadas del capítulo 891 de *International Electrotechnical Vocabulary* (Electrobiología) (Comisión Electrotécnica Internacional) (CEI) (1979).

Un *choque eléctrico* es el efecto fisiopatológico resultante del paso directo o indirecto de una corriente eléctrica externa a través del cuerpo. Comprende contactos directos e indirectos y corrientes unipolares y bipolares.

De los individuos (vivos o fallecidos) que han experimentado descargas eléctricas se dice que han sufrido *electrización*; el término *electrocución* debe reservarse para casos seguidos de muerte. Los *alcances de rayos* son sacudidas eléctricas mortales a consecuencia de los rayos (Gourbiere y cols. 1994).

La Oficina Internacional del Trabajo (OIT), la Unión Europea (UE), la *Union internationale des producteurs et distributeurs d'énergie électrique* (UNIPED), la Asociación Internacional de la Seguridad Social (AISS) y el Comité TC64 de la Comisión Electrotécnica Internacional han recopilado estadísticas internacionales sobre accidentes eléctricos. La interpretación de estas estadísticas se ve obstaculizada por las variaciones de unos países a otros en materia de técnicas de recogida de datos, de pólizas de seguro y de definiciones de accidentes mortales. Con todo, pueden considerarse posibles las estimaciones siguientes de la tasa de electrocución (Tabla 40.1).

El número de electrocuciones desciende poco a poco, en términos absolutos y, lo que resulta más llamativo, en función del consumo total de electricidad. Aproximadamente la mitad de los accidentes eléctricos tiene un origen profesional, mientras que la otra mitad ocurre en casa y en actividades de ocio. En Francia, la media de fallecimientos entre 1968 y 1991 fue de 151 por año, según cifras del *Institut national de la santé et de la recherche médicale* (INSERM).

Tabla 40.1 • Estimaciones de la tasa de electrocución, 1988.

	Electrocuciones por millón de habitantes	Total muertes
Estados Unidos <sup>1</sup>	2,9	714
Francia	2,0	115
Alemania	1,6	99
Austria	0,9	11
Japón	0,9	112
Suecia	0,6	13

<sup>1</sup> Según la National Fire Protection Association (Massachusetts, EE UU), estas estadísticas son más representativas para una recopilación general de datos y de requisitos de informes legales que de un ambiente más peligroso. Las estadísticas de EE UU incluyen fallecimientos por exposición a sistemas de transporte de electricidad y electrocuciones originadas por productos de consumo. En 1988, los productos de consumo causaron 290 fallecimientos (1,2 muertes por millón de habitantes). En 1993, la tasa de fallecimientos por electrocución debida a todas las causas descendió a 550 (2,1 muertes por millón de habitantes); el 38 % de ellas estuvo relacionada con productos de consumo (0,8 muertes por millón de habitantes).

### Base física y fisiopatológica de la electrización

Los especialistas en electricidad dividen los contactos eléctricos en dos grupos: directos, que implican el contacto con componentes activos, e indirectos, en los que los contactos tienen derivación a tierra. Cada uno de estos grupos exige medidas preventivas totalmente diferentes.

Desde el punto de vista médico, el camino que recorre la corriente a través del cuerpo es el determinante clave del pronóstico y la terapéutica. Por ejemplo, el contacto bipolar de la boca de un niño con la clavija de un cordón de extensión origina quemaduras muy graves en la boca, pero no la muerte si el niño está bien aislado del suelo.

En espacios de trabajo, donde es corriente que existan altas tensiones, también es posible que salte un arco eléctrico entre un componente activo que se encuentre a alta tensión y los trabajadores que se acercan demasiado al componente. Las situaciones específicas del trabajo influyen también en las consecuencias de los accidentes eléctricos: por ejemplo, los trabajadores pueden caerse o no actuar como es debido al ser sorprendidos por una sacudida eléctrica, por lo demás relativamente inofensiva.

Todas las tensiones presentes en los lugares de trabajo son susceptibles de provocar accidentes. Cada sector industrial tiene su propio conjunto de condiciones capaz de originar contacto directo, indirecto, unipolar, bipolar, por arco o inducido y, en último término, accidentes. Desde luego, no es posible abarcar en este artículo todas las actividades humanas relacionadas con la electricidad, pero conviene recordar al lector los principales tipos de trabajo eléctrico que han recogido las directrices preventivas internacionales que se describen en el capítulo sobre prevención:

1. actividades que implican trabajar con cables activos (la aplicación de procedimientos extremadamente rigurosos ha conseguido reducir el número de electrificaciones durante este tipo de trabajo);
2. actividades que implican trabajar con cables desactivados,
3. actividades realizadas en la proximidad de cables activos (estas actividades exigen la máxima atención, puesto que a menudo son ejecutadas por personas que no son electricistas).

### Fisiopatología

En la ley de Joule para corriente continua

$$W = V \times I \times t = R I^2 t$$

(el calor producido por una corriente eléctrica es proporcional a la resistencia y al cuadrado de la corriente) todas las variables guardan una estrecha relación entre sí. Si se trata de corriente alterna también es preciso tener en cuenta el efecto de la frecuencia (Folliot 1982).

Los organismos vivos son conductores eléctricos. La electrización tiene lugar cuando hay una diferencia de potencial entre dos puntos del organismo. Es importante subrayar que el peligro de accidentes eléctricos no surge del mero contacto con un conductor activo, sino del contacto simultáneo con un conductor activo y otro cuerpo a potencial diferente.

Los tejidos y órganos que recorre la corriente pueden experimentar una excitación funcional motora que en algunos casos es irreversible, o bien sufrir lesión temporal o permanente, en general a consecuencia de quemaduras. El grado de estas lesiones está en función de la energía liberada o de la cantidad de electricidad que atraviesa los tejidos. Así pues, el tiempo de paso de la corriente eléctrica es crítico para determinar la gravedad de la lesión. (Por ejemplo, las anguilas eléctricas y las rayas producen descargas muy desagradables, capaces de inducir pérdida del sentido. Pero aunque la tensión de la descarga sea de 600 V, la corriente de alrededor de 1A y la

resistencia del sujeto de unos 600 ohms, estos peces son incapaces de inducir una sacudida mortal, porque la duración de la descarga es demasiado corta, de algunas decenas de microsegundos.) Así pues, a altas tensiones ( $>1.000\text{ V}$ ), la muerte se debe casi siempre a la extensión de las quemaduras. A tensiones más bajas, la muerte está en función de la cantidad de electricidad ( $Q = I \times t$ ), que llega al corazón, determinada por el tipo, el emplazamiento y el área de los puntos de contacto.

En las secciones siguientes se estudian el mecanismo de la muerte ocasionada por accidentes eléctricos, los tratamientos inmediatos más eficaces y los factores que determinan la gravedad de la lesión, que son la resistencia, intensidad, tensión, frecuencia y forma de onda.

### Causas de muerte en accidentes eléctricos en la industria

En casos raros, la causa de la muerte es la asfixia, debida al tétanos prolongado del diafragma, a la inhibición de los centros respiratorios en casos de contacto con la cabeza o a densidades de corriente muy altas, por ejemplo, a consecuencia de alcances de rayo (Gourbiere y cols. 1994). Si se presta ayuda en los tres minutos siguientes, se puede reanimar a la víctima con unas bocanadas de respiración artificial boca a boca.

Por el contrario, la principal causa de muerte sigue siendo el colapso de la circulación periférica que sigue a la fibrilación ventricular. Aparece siempre que no se aplica masaje cardíaco al mismo tiempo que la respiración boca a boca. Todos los electricistas deberían saber cómo hacerlo, y continuar haciéndolo hasta la llegada de la asistencia médica urgente, que casi siempre tarda más de tres minutos. Muchísimos electropatólogos e ingenieros de todo el mundo han estudiado las causas de la fibrilación ventricular, con objeto de idear mejores medidas protectoras, activas o pasivas (Comisión Electrotécnica Internacional 1987; 1994). La desincronización aleatoria del miocardio exige la persistencia de una corriente eléctrica de frecuencia, intensidad y tiempo de tránsito específicos. Y lo más importante es que la señal eléctrica llegue al miocardio durante la denominada *fase vulnerable del ciclo cardíaco*, correspondiente al comienzo de la onda T del electrocardiograma.

La Comisión Electrotécnica Internacional (1987; 1994) ha publicado curvas que describen el efecto de la intensidad de corriente y del tiempo de tránsito sobre la probabilidad (expresada en tanto por ciento) de fibrilación y el camino mano-pie de la corriente en un varón de 70 kg y buena salud. Son adecuadas para corrientes industriales en el margen de frecuencias de 15 a 100 Hz, mientras que las frecuencias más altas se encuentran ahora en estudio. Cuando los tiempos de tránsito son inferiores a 10 ms, el área situada debajo de la curva de la señal eléctrica es una aproximación razonable de la energía eléctrica.

### Papel de los diversos parámetros eléctricos

Cada uno de los parámetros eléctricos (corriente, tensión, resistencia, tiempo, frecuencia) y la forma de onda son determinantes importantes de las posibles lesiones, por sí mismos y en virtud de su interacción.

Para la corriente alterna, así como para otras condiciones antes definidas, se han establecido umbrales de corriente. La intensidad de corriente durante la electrización se desconoce, puesto que está en función de la resistencia del tejido en el momento del contacto ( $I = V/R$ ), pero por lo general es perceptible a niveles que rondan 1 mA. A corrientes relativamente bajas la persona puede sufrir contracciones musculares que le impidan apartarse de un objeto activado. El umbral de esta corriente está en función de la capacidad, del área de contacto, de la presión de contacto y de variaciones individuales. En la práctica, todos los hombres y casi todas las mujeres y niños

pueden apartarse de corrientes de hasta de 6 mA. Con 10 mA, se ha observado que el 98,5 % de los hombres, el 60 % de mujeres y el 7,5 % de los niños se aparta. Con 20 mA sólo el 7,5 % de los hombres y ninguna mujer o niño se sueltan. Y la cifra se reduce a cero en todos los casos con 30 mA o más.

Corrientes de unos 25 mA pueden provocar la tetanización del diafragma, el músculo respiratorio más potente. Si el contacto se mantiene durante tres minutos, sobreviene también la parada cardíaca.

Hay peligro de fibrilación ventricular a niveles situados en torno a 45 mA, con una probabilidad en adultos del 5 % tras un contacto de 5 segundos. Durante la cirugía cardíaca, reconocida como una situación especial, una corriente de 20 a  $100 \times 10^{-6}\text{ A}$  aplicada directamente al miocardio, es suficiente para inducir fibrilación. A esta sensibilidad miocárdica se debe la rigidez de las normas aplicadas a los aparatos de electromedicina.

Si todo lo demás es constante ( $V$ ,  $R$ , frecuencia), los umbrales de corriente dependen también de la forma de onda, de la especie animal, del peso de la dirección de la corriente en el corazón, de la relación entre el tiempo de tránsito de la corriente y el ciclo cardíaco, del punto del ciclo cardíaco en el cual llega la corriente, y de factores individuales.

En general se conoce la tensión que interviene en los accidentes. En casos de contacto directo, la fibrilación ventricular y la gravedad de las quemaduras son directamente proporcionales a la tensión, puesto que

$$V = RI \text{ y } W = V \times I \times t$$

Las quemaduras debidas a una sacudida eléctrica de alta tensión van asociadas a muchas complicaciones, que sólo son predecibles en algunos casos. Por consiguiente, las víctimas de estos accidentes han de ser atendidas por especialistas bien informados. La liberación de calor tiene lugar sobre todo en los músculos y en los haces neurovasculares. La pérdida de plasma que sigue al daño en el tejido origina shock, en algunos casos rápido e intenso. Para un área superficial dada, las quemaduras electrotérmicas (quemaduras provocadas por una corriente eléctrica) son siempre más graves que otros tipos de quemaduras. Las electrotérmicas son al mismo tiempo externas e internas y, aunque en un principio no parezca ser evidente, pueden inducir lesión vascular con efectos secundarios graves. Entre éstos se cuentan estenosis internas y trombos que, con frecuencia, por la necrosis que producen, exigen la amputación.

La destrucción de tejidos también es responsable de la liberación de cromoproteínas, como la mioglobina. La misma liberación se observa en víctimas de traumatismos por aplastamiento, aunque el grado de liberación es notable en víctimas de quemaduras de alta tensión. Se cree que la precipitación de mioglobina en los túbulos renales, resultante de la acidosis causada por anoxia e hipercaliemia, es la causa de la anuria. Confirmada experimentalmente pero no aceptada por todos, a esta teoría se debe que se recomiende un tratamiento inmediato de alcalinización. La alcalinización intravenosa, que corrige también la hipovolemia y las acidosis resultantes de muerte celular, es la conducta recomendada.

En el caso de contactos indirectos, también se han de tener en cuenta la tensión de contacto ( $V$ ) y el límite de tensión convencional.

La tensión de contacto es la tensión a la cual una persona queda sometida cuando toca al mismo tiempo dos conductores entre los cuales existe una tensión diferencial debida a un aislamiento defectuoso. La intensidad de la corriente de paso resultante depende de las resistencias del cuerpo humano y del circuito exterior. No se debe permitir que esta corriente llegue a ser superior a los niveles de seguridad o, lo que es lo mismo, deberá permanecer dentro de las curvas de seguridad

tiempo-corriente. La tensión de contacto máxima tolerable por tiempo indefinido sin que induzca efectos electropatológicos se denomina *límite de tensión convencional* o, con una expresión más intuitiva, *tensión de seguridad*.

Se desconoce el valor real de la resistencia durante los accidentes eléctricos. La variación de las resistencias en serie —por ejemplo, ropa y calzado— explica gran parte de la variación observada en los efectos de accidentes eléctricos de una clara similitud, pero ejerce poca influencia sobre el resultado de accidentes que impliquen contactos bipolares y electrificaciones de alta tensión. En casos que impliquen corriente alterna, al cálculo estándar basado en tensión y corriente ( $R = V/I$ ) es preciso añadir el efecto de fenómenos capacitivos e inductivos.

La resistencia del cuerpo humano es la suma de la resistencia de la piel ( $R$ ) en los dos puntos de contacto y de la resistencia interna del cuerpo ( $R$ ). La resistencia de la piel varía con factores ambientales y, como mencionó Biegelmeir (Comisión Electrotécnica Internacional 1987; 1994), en parte depende de la tensión de contacto. Otros factores como la presión, el área de contacto, el estado de la piel en el punto de contacto, y factores individuales influyen también en la resistencia. Así pues, es poco realista el tratar de basar medidas preventivas en estimaciones de la resistencia de la piel. Por el contrario, la prevención debe basarse en la adaptación de equipo y procedimientos a las personas, no a la inversa. Con objeto de simplificar las cosas, la CEI ha definido cuatro tipos de ambiente: seco, húmedo, mojado e inmersión, y ha definido parámetros útiles para la planificación de las actividades de prevención en cada caso.

La frecuencia de la señal eléctrica responsable de los accidentes eléctricos es conocida de todos. En Europa, es casi siempre de 50 Hz, y en las Américas es por lo general de 60 Hz. En casos raros relacionados con los ferrocarriles en países como Alemania, Austria y Suiza, es de  $16\frac{2}{3}$  Hz, frecuencia que en teoría representa un riesgo mayor de tetanización y de fibrilación ventricular. Debe recordarse que la fibrilación no es una reacción muscular, sino que es provocada por estimulación repetitiva, con una sensibilidad máxima a la frecuencia aproximada de 10 Hz. Por esto es por lo que, para una tensión dada, la corriente alterna de frecuencia extremadamente baja, se considera que es de tres a cinco veces más peligrosa que la corriente continua en relación con los efectos que no sean quemaduras.

Los umbrales antes descritos son directamente proporcionales a la frecuencia de la corriente. Así pues, a 10 kHz el umbral de detección es diez veces superior. La CEI estudia ahora curvas revisadas del peligro de fibrilación para frecuencias superiores a 1.000 Hz (Comisión Electrotécnica Internacional 1994).

Por encima de una determinada frecuencia, las leyes físicas que rigen la penetración de corriente en el cuerpo cambian por completo. A medida que comienzan a predominar fenómenos capacitivos e inductivos, los efectos térmicos derivados de la cantidad de energía liberada se convierten en el efecto principal.

La forma de onda de la señal eléctrica responsable de un accidente eléctrico suele ser conocida. Puede ser un determinante importante de lesión en accidentes sobrevenidos por el contacto con condensadores o semiconductores.

### Estudio clínico de la descarga eléctrica

Es clásica la división de las electrificaciones entre incidentes de baja tensión (de 50 a 1.000 V) y de alta tensión (>1.000 V).

La baja tensión es un peligro cotidiano, desde luego omnipresente, y las descargas originadas por ella se encuentran en entornos domésticos, de ocio, agrícolas y hospitalarios, así como en los industriales.

Para pasar revista ordenadamente las descargas eléctricas de baja tensión, desde la más trivial a la más grave, debemos comenzar con las que no presentan complicaciones. Sus víctimas

pueden apartarse por sí mismas del daño, conservan la conciencia y mantienen la ventilación normal. Los efectos sobre el corazón se limitan a una simple taquicardia sinusal con o sin anomalías cardiográficas leves. A pesar de las consecuencias relativamente leves de estos accidentes, la electrocardiografía sigue siendo una precaución médica y médico-legal adecuada. Se aconseja la investigación técnica de estos incidentes, que pueden llegar a ser graves, como complemento del reconocimiento clínico (Gilet y Choquet 1990).

Las víctimas de descargas algo más fuertes y duraderas debidas a contactos eléctricos experimentan perturbaciones o pérdida de conciencia, pero se recuperan por completo con más o menos rapidez, y el tratamiento acelera la recuperación. Un reconocimiento revela por lo general hipertónias neuromusculares, problemas de hiperventilación reflectiva y congestión, ésta última como efecto secundario frecuente de obstrucción orofaríngea. Los trastornos cardiovasculares son el resultado de hipoxia o anoxia, o bien pueden adoptar la forma de taquicardia, hipertensión y, en algunos casos, incluso aborto. Los pacientes en estas condiciones necesitan atención hospitalaria.

Las víctimas ocasionales que pierden la conciencia, al cabo de unos cuantos segundos de contacto aparecen pálidos o cianóticos, dejan de respirar, tienen un pulso apenas perceptible y presentan midriasis, indicativa de lesión cerebral aguda. Aunque por lo general se debe a la fibrilación ventricular, la patogénesis precisa de esta muerte aparente carece de importancia. Lo importante es iniciar con rapidez un tratamiento bien definido, puesto que se sabe desde hace algún tiempo que este estado clínico nunca conduce a muerte real. El pronóstico en estos casos de descarga eléctrica (en los cuales es posible la recuperación total) depende de la rapidez y calidad de los primeros auxilios. La estadística demuestra que lo más probable es que éstos sean administrados por personal no médico y, por lo tanto, se recomienda proporcionar formación a todos los electricistas para que puedan realizar las acciones básicas que garanticen la supervivencia.

En casos de muerte aparente tiene que darse prioridad al tratamiento. Pero en otros casos hay que conceder atención a los traumas múltiples resultantes de tétanos violentos, de caídas o de la proyección de la víctima por el aire. Una vez resuelto el peligro inmediato de que la víctima pierda la vida, se debe atender al trauma y las quemaduras, incluidas las provocadas por contactos de baja tensión.

Los accidentes derivados de altas tensiones dan lugar a quemaduras importantes, aparte de los efectos descritos en los accidentes de baja tensión. La conversión de energía eléctrica en calor ocurre en los espacios internos y externos. En un estudio de accidentes eléctricos realizado en Francia por el departamento médico de la empresa suministradora de energía EDF-GDF, casi el 80 % de las víctimas sufrieron quemaduras, que se clasifican en cuatro grupos:

1. quemaduras de arco, que suelen afectar a la piel expuesta y que en algunos casos se complican con quemaduras debidas a ropa ardiendo;
2. quemaduras electrotérmicas múltiples, extensas y profundas, originadas por contactos de alta tensión;
3. quemaduras clásicas, provocadas por ropa ardiendo y por la proyección de material en llamas,
4. quemaduras mixtas, provocadas por arcos, incendio y paso de corriente.

Se realizará un seguimiento y los reconocimientos complementarios que exijan las particularidades del accidente. La estrategia utilizada para establecer un pronóstico o con fines médico-legales está determinada, como es natural, por la naturaleza de las complicaciones observadas o esperadas. En

electrificaciones de alta tensión (Folliot 1982) y en descargas atmosféricas (Gourbiere y cols. 1994), la enzimología y el análisis de cromoproteínas y de los parámetros de coagulación de la sangre son obligatorios.

Es fácil que el curso de la recuperación del trauma eléctrico se vea comprometido antes o después por complicaciones, en especial las que afectan a los sistemas cardiovascular, nervioso y renal. La envergadura de tales complicaciones es suficiente para hospitalizar a las víctimas de electrificaciones de alta tensión; algunas de ellas pueden dejar secuelas funcionales o que afecten al aspecto externo.

Si el camino de la corriente es tal que el corazón es atravesado por una corriente significativa, aparecerán complicaciones cardiovasculares. De éstas, las observadas con más frecuencia y las más benignas son los trastornos funcionales, con presencia o ausencia de correlatos clínicos. Las arritmias —taquicardia sinusal, extrasistolia, fluter y fibrilación atrial (en este orden)— son las anomalías electrocardiográficas más corrientes, cuyas secuelas pueden ser permanentes. Los trastornos de conducción son más raros, y además son difíciles de relacionar con accidentes eléctricos en ausencia de un electrocardiograma previo.

También se ha informado de trastornos más graves, como fallo cardíaco, lesión de válvulas y quemaduras miocárdicas, pero son raros, aun en víctimas de accidentes de alta tensión. También se ha informado de casos claros de angina e incluso de infarto.

En la semana siguiente a la electrificación de alta tensión aparece la lesión periférica vascular. Se han propuesto varios mecanismos patógenos: espasmo arterial, acción de la corriente eléctrica en las capas medias y musculares de los vasos y modificación de los parámetros de coagulación de la sangre.

Hay una amplia variedad de complicaciones neurológicas posibles. La más temprana en aparecer es el accidente cerebrovascular, con independencia de que la víctima experimente al principio pérdida de conciencia. La fisiopatología de estas complicaciones comprende trauma craneal (cuya presencia debe comprobarse), el efecto directo de la corriente sobre la cabeza o la modificación de la circulación sanguínea cerebral y la inducción de un edema cerebral retardado. Además, el trauma o la acción directa de la corriente eléctrica pueden provocar complicaciones medulares y periféricas secundarias.

Los trastornos sensoriales afectan el ojo y a los sistemas audio-vestibular o coclear. Es importante examinar lo antes posible la córnea, el cristalino y el fondo del ojo, y seguir la evolución de las víctimas de arcos y de contacto directo en la cabeza por si hubiera efectos retardados. Pueden desarrollarse cataratas después de un período de varios meses sin síntomas. Los trastornos vestibulares y la pérdida de audición se deben sobre todo a efectos de estallido y, en víctimas de descargas atmosféricas transmitidas por líneas telefónicas, a trauma eléctrico (Gourbiere y cols. 1994).

Las mejoras en las prácticas de urgencia móvil han hecho disminuir en gran medida la frecuencia de complicaciones renales, en especial la oligoanuria, en víctimas de electrificación de alta tensión. La rehidratación temprana y cuidadosa y la alcalinización intravenosa es el tratamiento preferente en víctimas de quemaduras graves. Se han comunicado algunos casos de albuminuria y de hematuria microscópica persistente.

### Cuadros clínicos y problemas diagnósticos

El cuadro clínico de la descarga eléctrica es complicado por la variedad de aplicaciones industriales de la electricidad y por sus cada vez más frecuentes y variadas aplicaciones médicas. Ahora bien, durante mucho tiempo los únicos accidentes eléctricos fueron los provocados por descargas atmosféricas (Gourbiere y

cols. 1994). Las descargas atmosféricas acumulan cantidades de electricidad muy notables: una de cada tres víctimas de descargas atmosféricas muere. Los efectos de una descarga atmosférica —quemaduras y muerte aparente— son comparables a los resultantes de la electricidad industrial y son atribuibles a descarga eléctrica, a transformación de energía eléctrica en calor, a efectos de estallido y a las propiedades eléctricas del rayo.

Las descargas atmosféricas son tres veces más frecuentes en hombres que en mujeres, lo cual refleja pautas de trabajo con distintos riesgos de exposición al rayo.

Los efectos más corrientes observados en víctimas de electrificación yatrofénica son las quemaduras resultantes del contacto con superficies metálicas puestas a masa de escalpelos eléctricos. La magnitud de las corrientes de fuga aceptables en dispositivos electromédicos varía de un dispositivo a otro. Lo mínimo que debe hacerse es observar las especificaciones de los fabricantes y las recomendaciones de empleo.

Para concluir esta sección nos gustaría debatir el caso especial de la descarga eléctrica en mujeres embarazadas, que puede provocar la muerte de la mujer, del feto o de ambos. En un caso célebre, un feto vivo fue liberado con éxito mediante un corte de cesárea 15 minutos después de que su madre hubiera muerto por electrocución a 220 V (Folliot 1982).

Los mecanismos patofisiológicos del aborto provocado por descarga eléctrica exige un estudio más detallado. ¿Es provocado por trastornos de conducción en el tubo cardíaco embrionario sometido a un gradiente de tensión, o por desgarro de la placenta resultante de vasoconstricción?

La aparición de accidentes eléctricos tan raros como éste son un motivo más para exigir notificación de todos los casos de lesiones ocasionadas por la electricidad.

### Diagnóstico positivo y médico-legal

Las circunstancias en las cuales ocurre la descarga eléctrica son por lo general lo bastante claras para permitir un diagnóstico etiológico inequívoco. Pero no siempre es éste el caso, incluso en entornos industriales.

El diagnóstico de fallo circulatorio tras la descarga eléctrica es de extraordinaria importancia, puesto que exige que haya personas en las cercanías que inicien los primeros auxilios inmediatos y básicos una vez que se haya cortado la corriente. La parada respiratoria en ausencia de pulso es una indicación absoluta para comenzar el masaje cardíaco y la respiración artificial boca a boca. Antes, estas medidas sólo se tomaban cuando aparecía midriasis (dilatación de las pupilas), signo diagnóstico de lesión cerebral aguda. Pero la práctica actual es intervenir tan pronto como el pulso deje de ser detectable.

Como la pérdida de conciencia debida a la fibrilación ventricular tarda varios segundos en presentarse, las víctimas tienen tiempo de apartarse del equipo que ha originado el accidente. Es un asunto con cierta importancia médico-legal: por ejemplo, cuando la víctima de un accidente se encuentra a varios metros de un armario eléctrico u otra fuente de tensión sin signos de lesión eléctrica.

No debe olvidarse que la ausencia de quemaduras eléctricas no excluye la posibilidad de electrocución. Si la autopsia de individuos hallados en ambientes eléctricos o cerca de un equipo capaz de generar tensiones peligrosas no revela lesiones de Jelinek visibles y ningún signo aparente de muerte, se debe considerar la posibilidad de electrocución.

Si el cuerpo se encuentra en el exterior, al diagnóstico de descarga atmosférica se llega por el proceso de eliminación. Se deben buscar signos de descarga atmosférica en un círculo de 50 metros de radio alrededor del cuerpo. El museo de electropatología de Viena ofrece una exhibición impresionante de estos signos, entre los que se cuentan vegetación carbonizada y arena

vitrificada. Los objetos metálicos que llevaba la víctima pueden aparecer fundidos.

Aunque por fortuna el suicidio por medios eléctricos es raro en la industria, las muertes en las que la negligencia es un factor propiciatorio siguen siendo una triste realidad. Suele suceder sobre todo en emplazamientos no normalizados, en especial los que incluyen la instalación y operación de suministros eléctricos provisionales en condiciones exigentes.

No hay motivo para que sigan ocurriendo accidentes eléctricos, puesto que se dispone de medidas preventivas eficaces, que se describen en el artículo "Prevención y Normas".

## ● ELECTRICIDAD ESTATICA

*Claude Menguy*

Todos los materiales difieren en el grado en que permiten el paso de cargas eléctricas. Los materiales *conductores* permiten el paso de cargas, mientras que los *aislantes* obstaculizan su movimiento. La electrostática es el campo de la ciencia dedicado a estudiar las cargas o los cuerpos cargados en reposo. Se tiene *electricidad estática* cuando en los objetos se forman cargas eléctricas que no se desplazan. Si las cargas circulan, se establece una corriente y la electricidad ya no es estática. Los no profesionales dan el nombre de electricidad a la corriente resultante de las cargas en movimiento, fenómeno que se explica en otros artículos de este capítulo. *electrización estática* es el término utilizado para designar cualquier proceso que dé por resultado la separación de cargas eléctricas positivas y negativas. La conducción se mide con una propiedad denominada *conductancia*, mientras que un aislante se caracteriza por su *resistividad*. La separación de cargas que conduce a la electrización es resultado de procesos mecánicos: por ejemplo, el contacto entre objetos, la fricción o la colisión de dos superficies. Puede tratarse de dos superficies sólidas o una sólida y otra líquida. Es más raro que el proceso mecánico sea la ruptura o separación de superficies sólidas o líquidas. En este artículo nos ocupamos del contacto y de la fricción.

### Procesos de electrización

El fenómeno de generación de electricidad estática por fricción (triboelectrización) se conoce desde hace miles de años. Para inducir electricidad basta con que haya contacto entre dos materiales. La fricción sólo es un tipo de interacción que aumenta el área de contacto y genera calor: *fricción* es el término general que describe el movimiento de dos objetos en contacto; la presión ejercida, su velocidad de deslizamiento y el calor generado son los determinantes principales de la carga generada por fricción. Algunas veces, la fricción originará también el arranque de partículas sólidas.

Cuando los dos sólidos en contacto son metales (contacto metal-metal), hay migración de electrones de uno al otro. Cada metal se caracteriza por un potencial inicial diferente (potencial de Fermi), y la naturaleza tiende siempre al equilibrio; es decir, los fenómenos naturales trabajan para eliminar las diferencias de potencial. Tal migración de electrones da lugar a la generación de un potencial de contacto. Como las cargas de un metal son muy móviles (los metales son conductores excelentes), las cargas se recombinarán incluso en el último punto de contacto antes de que los dos metales se separen. Por lo tanto, es imposible inducir electricidad por el hecho de poner en contacto dos metales y separarlos después; las cargas se desplazarán siempre para eliminar la diferencia de potencial.

Cuando un *metal* y un *aislante* entran en contacto casi sin fricción en el vacío, el nivel de energía de los electrones del metal se

aproxima al del aislante. Impurezas superficiales o del volumen se encargan de que ocurra así e impiden también la formación de un arco (la descarga de electricidad entre los dos cuerpos cargados: los electrodos) en el momento de la separación. La carga transferida al aislante es proporcional a la afinidad electrónica del metal, y cada aislante tiene también una afinidad electrónica, o atracción de electrones, asociada con ella. Así pues, también es posible la transferencia de iones positivos o negativos del aislante al metal. La carga en la superficie después del contacto y separación se calcula por la ecuación 1 de la Tabla 40.2.

Cuando dos aislantes entran en contacto, tiene lugar una transferencia de cargas a causa de los diferentes estados de su energía superficial (ecuación 2, Tabla 40.2). Las cargas transferidas a la superficie de un aislante pueden migrar hacia capas más profundas del material. La humedad y la contaminación superficial pueden modificar en gran medida el comportamiento de las cargas. La humedad superficial en particular incrementa las densidades de estados de energía superficial al aumentar la conducción superficial, que favorece la recombinación de cargas, y facilita la movilidad iónica. La mayoría de las personas reconocerán este fenómeno por sus experiencias cotidianas, ya que saben que en tiempo seco están sujetos a electricidad estática. El contenido de agua de algunos polímeros (plásticos) cambiará cuando se cargan. El aumento o disminución del contenido de agua llega a invertir el sentido de la circulación de cargas (su polaridad).

La polaridad (positividad y negatividad relativas) mutua de dos aislantes en contacto depende de la afinidad electrónica de cada material. Los aislantes se clasifican por sus afinidades electrónicas, algunos de cuyos valores ilustrativos se recogen en la Tabla 40.3. La afinidad electrónica de un aislante es una consideración importante en los programas de prevención que se debaten más adelante en este artículo.

Aunque ha habido intentos de establecer una serie triboeléctrica que ordenaría los materiales de manera que los que adquieren carga positiva al ponerse en contacto con materiales aparecieran en la serie antes que los que adquieren carga negativa al ponerse en contacto con esos mismos materiales, no se ha llegado a establecer una serie reconocida en todo el mundo.

Cuando se juntan un sólido y un líquido (para formar una *interfaz sólido-líquido*), hay una transferencia de cargas por la migración de los iones existentes en el líquido. Tales iones surgen de la disociación de posibles impurezas o por reacciones electroquímicas de oxidación-reducción. Como en la práctica no existen líquidos perfectamente puros, siempre habrá en el líquido algunos iones positivos y negativos que puedan ligarse a la interfaz líquido-sólido. Hay muchos tipos de mecanismo mediante los cuales se pueda inducir esta ligadura (p. ej., adhesión electrostática a superficies metálicas, absorción química, inyección electrolítica, disociación de grupos polares y, si la pared de la vasija es aislante, reacciones líquido-sólido.)

Como las sustancias que disuelven (disocian) son eléctricamente neutras en principio, generarán igual número de cargas positivas y negativas. La electrización sólo ocurre si las cargas positivas o las negativas se adhieren con preferencia a la superficie del sólido. Si sucede esto, se forma una capa muy compacta conocida como la capa de Helmholtz. Como la capa de Helmholtz está cargada, atraerá hacia sí iones de la polaridad opuesta. Tales iones se agruparán en una capa más difusa, conocida como capa de Gouy, que se sitúa encima de la superficie de la capa compacta de Helmholtz. El espesor de la capa de Gouy aumenta con la resistividad del líquido. Los líquidos conductores forman capas de Gouy muy delgadas.

La doble capa se separará si el líquido fluye y entonces la capa de Helmholtz permanecerá ligada a la interfaz y la capa de

Tabla 40.2 • Relaciones básicas en electrostática: conjunto de ecuaciones.

**Ecuación 1: Carga por contacto de un metal y un aislante**

En general, la densidad superficial de carga ( $\sigma_s$ ) que sigue al contacto y separación puede expresarse por:

$$\sigma_s = e N_E (\phi_m - \phi_i)$$

donde

$e$  es la carga de un electrón

$N_E$  es la densidad de estados de energía en la superficie del aislante

$\phi_i$  es la afinidad electrónica del aislante, y

$\phi_m$  es la afinidad electrónica del metal

**Ecuación 2: Carga posterior al contacto entre dos aislantes**

La forma general siguiente de la ecuación 1 se aplica a la transferencia de carga entre dos aislantes con estados energéticos diferentes (sólo con superficies perfectamente limpias):

$$\sigma_s = e \frac{N_{E1} \cdot N_{E2}}{N_{E1} - N_{E2}} (\phi_1 - \phi_2)$$

donde  $N_{E1}$  y  $N_{E2}$  son las densidades de estados de energía en la superficie de los dos aislantes, y  $\phi_1$  y  $\phi_2$  son las afinidades electrónicas de los dos aislantes.

**Ecuación 3: Densidad superficial de carga máxima**

La rigidez dieléctrica ( $E_G$ ) del gas circundante impone un límite superior a la carga que es posible generar en una superficie aislante plana. En el aire  $E_G$  es de unos 3 MV/m. La densidad superficial de carga máxima viene dada por:

$$\sigma_{smax} = e_0 E_G = 2,66 \times 10^{-5} \text{ C / m}^2 = 2,660 \text{ pC / cm}^2$$

**Ecuación 4: Carga máxima en una partícula esférica**

Cuando partículas esféricas ideales se cargan por efecto corona, la carga máxima que cada partícula puede adquirir viene dada por el límite de Pauthenier:

$$q_{max} = 4 \pi \epsilon_0 \rho E_G a^2$$

donde

$q_{max}$  es la carga máxima

$a$  es el radio de la partícula

$\epsilon_r$  es la permitividad relativa y

$$\rho = \frac{3\epsilon_r}{\epsilon_r + 2}$$

**Ecuación 5: Descargas de conductores**

El potencial de un conductor aislado portador de una carga  $Q$  viene dado por  $V = Q/C$  y la energía almacenada por:

$$W = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

**Ecuación 6: Evolución temporal del potencial de un conductor cargado**

En un conductor cargado por una corriente constante ( $I_G$ ), la evolución temporal del potencial es:

$$V = R_f I_G (1 - e^{-\frac{t}{R_f C}})$$

donde

$R_f$  es la resistencia de pérdida de corriente del conductor

**Ecuación 7: Potencial final de un conductor cargado**

Si el tiempo transcurrido es largo,  $t \gg R_f C$ , la ecuación anterior se convierte en:

$$V = R_f I_G$$

y la energía almacenada viene dada por:

**Ecuación 8: Energía almacenada de un conductor cargado**

$$W = \frac{1}{2} C R_f^2 I_G^2$$

Gouy será arrastrada por el líquido que se desplaza. El movimiento de estas capas cargadas produce una diferencia de potencial (el potencial *zeta*), y la corriente inducida por las cargas móviles se conoce como la *corriente de gasto*. La cantidad de carga que se acumula en el líquido depende del ritmo al cual los iones se difunden hacia la interfaz y de la resistividad del líquido ( $\kappa$ ). Ahora bien, la corriente de gasto es constante a lo largo del tiempo.

Ni los líquidos muy aislantes ni los conductores llegan a cargarse: los primeros porque hay muy pocos iones en presencia, y los segundos porque en líquidos que conducen muy bien la electricidad, los iones se recombinarán con gran rapidez. En la práctica, sólo habrá electrificación en líquidos cuya resistividad sea mayor que  $10^7 \Omega \text{ m}$  o menor que  $10^{11} \Omega \text{ m}$ . Los mayores valores observados son de  $\kappa = 10^9$  a  $10^{11} \Omega \text{ m}$ .

Los líquidos en movimiento inducirán acumulación de carga en las superficies aislantes sobre las cuales discurren. La medida de la formación de densidad superficial de carga estará limitada (1) por la rapidez con que los iones del líquido se recombinen en la interfaz líquido-sólido, (2) por la velocidad con que los iones del líquido sean conducidos por el aislante, o (3) porque se originen arcos en la superficie o el volumen del aislante y por lo tanto se pierda la carga. El régimen turbulento y el movimiento sobre superficies rugosas favorecen la electrificación.

Si a un cuerpo cargado (un electrodo) que tiene un radio pequeño (p. ej., un alambre) se le aplica una tensión alta (de varios kilovoltios), el campo eléctrico en la proximidad inmediata del cuerpo cargado es elevado, pero disminuye en seguida con la distancia. Si hay descarga de las cargas almacenadas, dicha descarga estará limitada a la región en que el campo

Tabla 40.3 • Afinidades electrónicas de determinados polímeros.<sup>1</sup>

Carga	Material	Afinidad electrónica (EV)
–	PVC (cloruro de polivinilo)	4,85
	Poliamida	4,36
	Policarbonato	4,26
	PTFE (politetrafluoretileno)	4,26
	PETP (tereftalato de polietileno)	4,25
	Poliestireno	4,22
	Poliamida	4,08

<sup>1</sup> Un material adquiere carga positiva cuando entra en contacto con un material que lo precede en la lista, y carga negativa cuando entra en contacto con un material que le sigue en la lista. No obstante, la afinidad electrónica de un aislante es multifactorial.

eléctrico es más intenso que la rigidez dieléctrica de la atmósfera circundante, fenómeno conocido como efecto corona, porque el arco también emite luz. (Muchas personas han visto las chispitas que se forman cuando han experimentado en su propia persona un shock de electricidad estática.)

La densidad de carga en una superficie aislante se modifica también por los electrones en movimiento generados por un campo eléctrico de gran intensidad. Tales electrones generarán iones a partir de las moléculas de gas existentes en la atmósfera con la cual entran en contacto. Cuando la carga eléctrica del cuerpo sea positiva, el cuerpo cargado repelerá los iones positivos que se hayan generado. Los electrones creados por objetos cargados negativamente perderán energía a medida que se retiran del electrodo, y se ligarán a moléculas gaseosas de la atmósfera para formar iones negativos que continuarán separándose de los puntos de carga. Los iones positivos y negativos quedan en reposo sobre cualquier superficie aislante y modifican la densidad de carga de la superficie. Es un tipo de carga mucho más fácil de controlar y más uniforme que las cargas generadas por fricción. Las cargas generadas de esta forma tienen un límite, que se describe matemáticamente en la ecuación 3 de la Tabla 40.2.

Para generar cargas más altas, es preciso incrementar la rigidez dieléctrica del ambiente, bien mediante la creación de un vacío, bien por metalización de la otra superficie de la película aislante. Por este último método se arrastra el campo eléctrico hacia dentro del aislante y por lo tanto se reduce la intensidad de campo en el gas circundante.

Cuando un conductor sumergido en un campo eléctrico ( $E$ ) se pone a tierra (véase la Figura 40.1), pueden producirse cargas por inducción. En estas condiciones, el campo eléctrico induce polarización (separación de los centros de gravedad de los iones negativos y positivos del conductor). Un conductor que se ponga a tierra temporalmente en un solo punto adquirirá una carga neta cuando se desconecte de tierra, a causa de la migración de cargas en la proximidad del punto. De aquí que las partículas conductoras situadas en un campo uniforme oscilen entre electrodos y produzcan cargas y descargas en cada contacto.

### Peligros asociados a la electricidad estática

Los efectos nocivos provocados por la acumulación de electricidad estática varían desde la incomodidad que se experimenta cuando al tocar un objeto cargado, como la manilla de una puerta, hasta las lesiones muy graves, incluso fallecimientos,

provocadas por una explosión debida a la electricidad estática. El efecto fisiológico de las descargas electrostáticas en seres humanos varía desde una picazón incómoda hasta acciones reflejas violentas. Se trata de efectos producidos por la corriente de descarga y, en especial, por la densidad de corriente en la piel.

En este artículo describiremos algunas de las formas por las cuales las superficies y los objetos se cargan en la práctica (electrización). Cuando el campo eléctrico inducido supera la capacidad del ambiente circundante para resistir a la carga (es decir, supera a la rigidez dieléctrica del ambiente), tiene lugar una descarga. (En el aire, la rigidez dieléctrica viene descrita por la curva de Paschen, y depende del producto de la presión por la distancia entre los cuerpos cargados.)

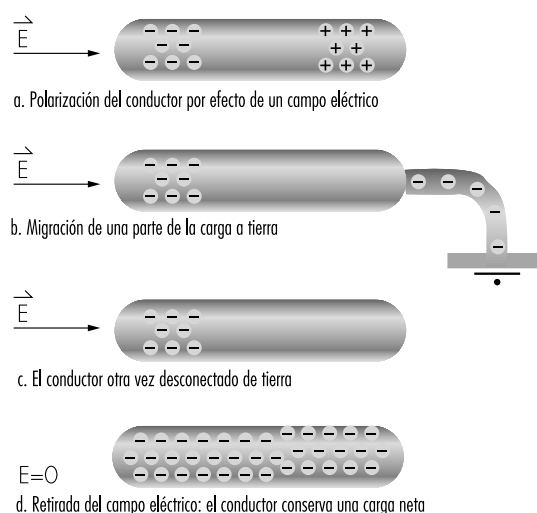
Las descargas disruptivas adoptan las formas siguientes:

- chispas o arcos que puentean dos cuerpos cargados (dos electrodos metálicos);
- descargas parciales, o en escobilla, que puentean un electrodo metálico y un aislante, o incluso dos aislantes; estas descargas se denominan parciales porque el camino de conducción no pone en cortocircuito dos electrodos metálicos, sino que en general es múltiple y en forma de escobilla,
- descargas en corona, conocidas también como poder de las puntas, que surgen en el fuerte campo eléctrico formado alrededor de cuerpos cargados o electrodos de radio muy pequeño.

Los conductores aislados tienen una capacidad neta  $C$  con respecto a tierra. En la ecuación 5 de la Tabla 40.2 se expresa la relación entre carga y potencial.

Una persona que lleve calzado aislante es un ejemplo corriente de conductor aislado. El cuerpo humano es un conductor electrostático, con una capacidad típica respecto a tierra de unos 150 pF y un potencial de hasta 30 kV. Como las personas son conductores aislados, pueden experimentar descargas electrostáticas, como la sensación (más o menos desagradable) que se nota cuando una mano se acerca a la manilla de una puerta o a otro objeto metálico. Cuando el potencial alcanza el valor aproximado de 2 kV, se experimentará el equivalente a una energía de 0,3 mJ, aunque este umbral varía de una persona a otra. Si las descargas son más fuertes, los movimientos reflejos involuntarios pueden originar caídas. En el caso

Figura 40.1 • Mecanismo de carga de un conductor por inducción.



de trabajadores que utilizan herramientas, ello puede dar lugar a lesiones en la víctima y en otras personas que se hallen trabajando cerca. Las ecuaciones 6 a 8 de la Tabla 40.2 describen la evolución temporal del potencial.

El arco real saltará cuando la fuerza del campo eléctrico inducido supere a la rigidez dieléctrica del aire. Debido a la rápida migración de las cargas en conductores, casi todas éstas confluyen en el punto de descarga y liberan toda la energía almacenada en forma de chispa. Las consecuencias son graves cuando se trabaja con sustancias inflamables o explosivas o en un ambiente inflamable.

La aproximación de un electrodo puesto a tierra a una superficie aislante cargada modifica el campo eléctrico e induce una carga en el electrodo. A medida que las superficies se acercan entre sí, la intensidad del campo aumenta y puede llegar a originar una descarga parcial desde la superficie aislante cargada. Como las cargas de las superficies aislantes no son muy móviles, en la descarga sólo participa una pequeña proporción de la superficie, y por consiguiente la energía liberada en este tipo de descarga es mucho menor que en los arcos.

La carga y la energía transferida parecen ser directamente proporcionales al diámetro del electrodo metálico, hasta unos 20 mm. La polaridad inicial del aislante también influye en la carga y en la energía transferida. Las descargas parciales de las superficies con carga positiva son menos energéticas que si las cargas son negativas. Es imposible determinar *a priori* la energía transferida por una descarga desde una superficie aislante, al contrario que ocurre en la situación que afecta a superficies conductoras. En realidad, como la superficie aislante no es equipotencial, ni siquiera es posible definir las capacidades que intervienen.

### Descarga disruptiva

En la ecuación 3 (Tabla 40.2) vimos que la densidad superficial de carga de una superficie aislante en el aire no puede ser superior a  $2.660 \text{ pC/cm}^2$ .

Si consideramos una placa aislante o una película de espesor  $a$ , que descansa en un electrodo metálico o que tenga una cara metálica, es fácil demostrar que el campo eléctrico es arrastrado hacia el interior del aislante por la carga inducida en el electrodo a medida que se depositan cargas en la cara no metálica. El resultado es que el campo eléctrico en el aire se debilita y se hace menor que si una de las caras no fuera metálica. En este caso, la rigidez dieléctrica del aire no limita la acumulación de carga en la superficie aislante y es posible alcanzar densidades de carga muy elevadas ( $>2.660 \text{ pC/cm}^2$ ). La acumulación de carga aumenta la conductividad superficial del aislante.

Cuando un electrodo se aproxima a una superficie aislante, tiene lugar una descarga disruptiva que afecta a una gran proporción de la superficie cargada, que se ha convertido en conductora. Debido a las grandes áreas superficiales que intervienen, este tipo de descarga libera grandes cantidades de energía. En el caso de películas, el campo en el aire es muy débil, y la distancia entre el electrodo y la película no puede ser mayor que el espesor de la película para que suceda la descarga. La descarga disruptiva se produce también cuando un aislante cargado se separa de su alma metálica. En tales circunstancias, el campo en el aire experimenta un aumento abrupto y toda la superficie del aislante se descarga para restablecer el equilibrio.

### Descargas electrostáticas y peligros de incendio y explosión

En atmósferas explosivas pueden tener lugar violentas reacciones de oxidación exotérmicas, con transferencia energética a la atmósfera, provocadas por:

- llamas francas;
- chispas eléctricas;
- chispas de radiofrecuencia en las inmediaciones de una emisora de radio potente;
- chispas producidas por colisiones (p. ej., entre metal y hormigón),
- descargas electrostáticas.

Nos interesa únicamente este último caso. La temperatura de inflamabilidad (temperatura a la cual el líquido arde en contacto con una llama franca) de diversos líquidos, y la temperatura de ignición espontánea de diversos vapores se dan en la Sección de Química de esta *Enciclopedia*. El peligro de incendio asociado a las descargas electrostáticas se calcula tomando como referencia el límite inferior de inflamabilidad de los gases, vapores y sólidos o de los aerosoles líquidos. El límite puede variar en términos considerables, como se ilustra en la Tabla 40.4.

Una mezcla de aire y de un gas o vapor inflamable sólo explota si la concentración de la sustancia inflamable está situada entre sus límites explosivos superior e inferior. Dentro de este intervalo, la energía mínima de ignición (EMI), o energía que ha de poseer una descarga electrostática para incendiar la mezcla, depende íntimamente de la concentración. Se ha demostrado de modo concluyente que la energía mínima de ignición depende de la velocidad de liberación de energía y, por extensión, de la duración de la descarga. El radio del electrodo es otro factor condicionante:

- Los electrodos de pequeño diámetro (del orden de varios milímetros) dan lugar a descargas en corona en vez de producir chispas.
- Con electrodos de diámetros mayores (del orden de varios centímetros), la masa del electrodo se basta para enfriar las chispas.

En general, las EMI más bajas se obtienen con electrodos que tienen el tamaño justo para impedir descargas en corona.

La EMI depende también de la distancia entre los electrodos, y es mínima a la distancia de amortiguación ("distance of pincement"), distancia a la cual la energía producida en la zona de reacción se hace superior a las pérdidas térmicas en los electrodos. Se ha demostrado experimentalmente que cada sustancia inflamable tiene una distancia de seguridad máxima, correspondiente a la distancia entre electrodos mínima a la cual ocurre una explosión. En los hidrocarburos, esta distancia es menor que 1 mm.

La probabilidad de explosiones de polvo depende de su concentración. La probabilidad máxima va asociada a concentraciones del orden de  $200 \text{ a } 500 \text{ g/m}^3$ . La EMI también depende del tamaño de las partículas, y las más finas son las que explotan con más facilidad. Tanto en gases como en aerosoles, la EMI disminuye con la temperatura.

Tabla 40.4 • Límites inferiores típicos de inflamabilidad.

Descarga	Límite
Algunos polvos	Varios julios
Aerosoles muy finos de azufre y aluminio	Varios milijulios
Vapores de hidrocarburos y otros líquidos orgánicos	200 microjulios
Hidrógeno y acetileno	20 microjulios
Explosivos	1 microjulio

Tabla 40.5 • Carga específica asociada a determinadas operaciones industriales.

Operación	Carga específica (q/m) (C/kg)
Cernido	$10^8-10^{11}$
Llenado o vaciado de silos	$10^7-10^9$
Transporte por tornillo sin fin	$10^6-10^8$
Molienda	$10^6-10^7$
Micronización	$10^4-10^7$
Transporte neumático	$10^4-10^6$

### Ejemplos de la industria

Muchos procesos utilizados a diario para manipular y transportar sustancias químicas generan cargas electrostáticas. Entre ellas se cuentan:

- el vertido de polvos desde sacos;
- el cernido;
- el transporte por tuberías;
- la agitación de líquidos, sobre todo en presencia de varias fases, sólidos suspendidos o gotitas de líquidos no miscibles;
- el rociado o niebla de líquidos.

Las consecuencias de la generación de cargas electrostáticas comprenden problemas mecánicos, peligro de descarga electrostática en los operadores y, si se utilizan productos que contengan disolventes o vapores inflamables, incluso explosión (véase la Tabla 40.5).

Los hidrocarburos líquidos, como el petróleo, el queroseno y muchos disolventes corrientes, tienen dos características que les confieren una sensibilidad especial a los problemas de electricidad estática:

- resistividad alta, que les permite acumular elevados niveles de cargas,
- vapores inflamables, que aumentan el riesgo de descargas de baja energía que disparan incendios y explosiones.

Pueden generarse cargas durante el transporte (p. ej., en la circulación por tuberías, bombas o válvulas). El paso por filtros finos, como los utilizados durante el llenado de los depósitos de aviones, genera densidades de carga de varios centenares de microcoulombios por metro cúbico. La sedimentación de partículas y la generación de nieblas o espumas cargadas durante el llenado de depósitos también origina cargas.

Entre 1953 y 1971 la electricidad estática fue la responsable de 35 incendios y explosiones durante el llenado o a continuación del llenado de depósitos de queroseno, y durante el llenado de depósitos de camiones se produjeron aún más accidentes. La presencia de filtros o salpicaduras durante el llenado (que pueden generar espumas o nieblas) son los factores de riesgo que más veces fueron identificados. También hubo accidentes a bordo de barcos petroleros, sobre todo durante la limpieza de tanques.

### Principios de la prevención de electricidad estática

Todos los problemas relativos a electricidad estática se derivan de:

- la generación de cargas eléctricas;
- la acumulación de estas cargas en aislantes o conductores aislados,

- el campo eléctrico producidos por estas cargas, que a su vez dan lugar a una fuerza o a una descarga disruptiva.

Las medidas preventivas tratan de evitar la acumulación de cargas electrostáticas, y la estrategia más recomendable es impedir que se generen las cargas eléctricas. Si esto no fuera posible, hay que aplicar medidas dirigidas a conectar las cargas a tierra. Por último, si la formación de descargas es inevitable, los objetos sensibles deberán protegerse contra los efectos de las descargas.

### Supresión o reducción de la generación de cargas electrostáticas

Es la primera medida que debe emprenderse en la prevención electrostática, porque es la única medida preventiva que elimina el problema en su origen. Pero, como se ha descrito antes, las cargas se generan siempre que dos materiales, uno de los cuales como mínimo es aislante, entran en contacto y a continuación se separan. En la práctica, puede haber generación de carga incluso por contacto y separación de un material consigo mismo. En realidad, la generación de carga afecta a las capas superficiales de los materiales. Como la más ligera diferencia de humedad superficial o contaminación superficial da lugar a la generación de cargas estáticas, es imposible impedir por completo la generación de cargas.

Para reducir la cantidad de cargas generadas por superficies que entran en contacto, es preciso:

- Evitar que los materiales entren en contacto mutuo si tienen afinidades electrónicas muy diferentes; es decir, si están muy separados en la serie triboeléctrica. Por ejemplo, evitar el contacto entre vidrio y Teflon (PTFE), o entre PVC y poliamida (nailon) (véase la Tabla 40.3).
- Reducir la tasa de flujo entre materiales, con lo cual disminuye la velocidad de deslizamiento entre materiales sólidos. Por ejemplo, puede reducirse el ritmo de extrusión de películas plásticas, del movimiento de materiales colocados en una cinta transportadora o el caudal de líquidos en una tubería.

No se han establecido límites definitivos de seguridad para medidas de caudal. La norma británica BS-5958-Parte 2 *Code of Practice for Control of Undesirable Static Electricity* recomienda que el producto de la velocidad (en metros por segundo) y el diámetro de la tubería (en metros) sea inferior a 0,38 para líquidos con conductividades menores que 5 pS/m (en picosiemens por metro) y menor que 0,5 para líquidos con conductividades superiores a 5 pS/m. Tal criterio sólo es válido para líquidos de una sola fase transportados a velocidades no superiores a 7 m/s.

Debe ponerse de relieve que al reducir la velocidad de deslizamiento o de flujo no sólo se disminuye la generación de cargas, sino que también se ayuda a disipar cargas que pudieran haberse generado. Y es así porque al disminuir las velocidades de circulación resultan tiempos de permanencia mayores que los asociados a las zonas de relajación, donde los caudales se reducen por estrategias, como aumentar el diámetro de las tuberías, lo cual, a su vez, incrementa la puesta a tierra.

### Puesta a tierra de la electricidad estática

La regla básica de la prevención electrostática es eliminar las diferencias de potencial entre objetos. Para conseguirlo, o bien se conectan entre sí, o se ponen a masa (toma de tierra). Con todo, los conductores aislados acumulan cargas y por lo tanto se cargan por inducción, fenómeno exclusivo de ellos. Las descargas de conductores pueden adoptar la forma de chispas de alta energía y son peligrosas.

Tabla 40.6 • Ejemplos de equipos sensibles a descargas electrostáticas.

Elemento sensible	Ejemplos
Fuente	Un operador que toca la manilla de una puerta o el chasis de un coche Componente con carga electrónica que entra en contacto con un objeto puesto a tierra
Blanco	Componentes o materiales electrónicos que tocan a un operador cargado
Entorno	Mezcla explosiva inflamada por una descarga electrostática

Se trata de una regla que se atiene a las recomendaciones en materia de prevención de descargas eléctricas, que también exigen la puesta a tierra de todas las partes metálicas accesibles, como se especifica en la norma francesa *Instalaciones eléctricas de baja tensión* (NFC 15-100). Para conseguir la máxima seguridad electrostática, que es lo que aquí nos ocupa, esta regla debe generalizarse a todos los elementos conductores. Se incluyen aquí cercos metálicos de mesa, manillas de puertas, componentes electrónicos, depósitos utilizados en las empresas químicas y el chasis de los vehículos que transportan hidrocarburos.

Desde el punto de vista de seguridad electrostática, el ideal sería que todo fuera conductor y estuviera siempre puesto a tierra, a la que se transferirían en todo momento las cargas generadas. En estas circunstancias, todo tendría siempre el mismo potencial, y por lo tanto el campo eléctrico —y el riesgo de descarga— sería cero. Pero casi nunca es posible alcanzar esta situación ideal, por los motivos siguientes:

- No todos los productos que es necesario manipular son conductores, y muchos de ellos no pueden hacerse conductores mediante el uso de aditivos. Así sucede con numerosos productos agrícolas y farmacéuticos, así como con líquidos de gran pureza.
- Hay propiedades convenientes para el producto final, como por ejemplo la transparencia óptica o la baja conductividad térmica, que pueden excluir el empleo de materiales conductores.
- Es imposible disponer una puesta a tierra permanente en equipos móviles como carruajes metálicos, herramientas electrónicas sin cordón, vehículos e incluso operadores humanos.

#### Protección contra las descargas electrostáticas

Debe tenerse en cuenta que en esta sección únicamente se abordan la protección de equipo sensible a la electrostática contra descargas inevitables, la reducción de la generación de cargas y la eliminación de éstas. La capacidad de proteger el equipo no

suprime la necesidad fundamental de prevenir ante todo la acumulación de carga electrostática.

Como se ilustra en la Figura 40.2 todos los problemas electrostáticos incluyen una fuente de descarga electrostática (el objeto cargado inicialmente), un blanco que recibe la descarga y el medio por el cual circula la descarga (descarga dieléctrica). Debe subrayarse que el blanco o el medio pueden ser sensibles a la electrostática. Algunos ejemplos de elementos sensibles se recogen en la Tabla 40.6.

#### Protección de trabajadores

Los trabajadores que tienen motivos para creer que se encuentran cargados eléctricamente (por ejemplo, cuando desmontan un vehículo en tiempo seco o andan con determinados tipos de calzado), pueden adoptar numerosas medidas protectoras, como las siguientes:

- Reducir la densidad de corriente en la piel, para lo cual basta con tocar un conductor puesto a tierra con un elemento metálico, como una llave o herramienta.
- Reducir el valor de cresta de la corriente mediante la descarga en un objeto disipador que se pueda tener a mano (un dispositivo de sobremesa o especial, como una muñequera protectora con resistencia en serie).

#### Protección en atmósferas explosivas

En atmósferas explosivas, es el propio ambiente el que resulta ser sensible a las descargas electrostáticas, que de ocurrir podrían dar lugar a ignición o explosión. En estos casos, la protección consiste en sustituir el aire, bien por una mezcla gaseosa cuyo contenido de oxígeno sea inferior a la concentración mínima para que la mezcla se inflame bien por un gas inerte, como el nitrógeno. Los gases inertes se han utilizado en silos y en vasijas de reacción de los sectores químico y farmacéutico. En este caso, es preciso tomar las precauciones debidas para garantizar que los trabajadores reciban un suministro de aire adecuado.

## PREVENCION Y NORMAS

*Renzo Comini*

### Peligros y medidas preventivas en instalaciones eléctricas

Los numerosos componentes que forman parte de las instalaciones eléctricas presentan diversos grados de robustez. Pero con independencia de su inherente fragilidad, todos tienen que funcionar con fiabilidad en condiciones inclementes. Por desgracia, aun en las mejores circunstancias, el equipo eléctrico está sujeto a fallos susceptibles de ocasionar lesiones a las personas o daños materiales.

El funcionamiento seguro de las instalaciones eléctricas es el resultado de un buen diseño inicial, no la mera actualización debida a los sistemas seguridad. Tal afirmación es un corolario del hecho de que mientras la corriente circula a la velocidad de la luz, todos los sistemas electromecánicos y electrónicos presentan retardos de reacción provocados sobre todo por la inercia térmica, la inercia mecánica y las condiciones de mantenimiento. Los retardos, cualesquiera que sean sus orígenes, son lo bastante duraderos para que las personas puedan sufrir lesiones, y el equipo, daños (Lee, Capelli-Schellpfeffer y Kelly 1994; Lee, Cravhalho y Burke 1992; Kane y Sternheim 1978.)

Es esencial que el equipo sea instalado y mantenido por personal cualificado. Se debe subrayar que es preciso establecer medidas técnicas que garanticen el funcionamiento

Figura 40.2 • Dibujo esquemático del problema de la descarga electrostática.



seguro de las instalaciones y al mismo tiempo protejan al personal y al equipo.

### **Introducción a los peligros eléctricos**

La operación adecuada de las instalaciones eléctricas exige que la maquinaria, el equipo y las líneas y circuitos eléctricos estén protegidos de los peligros causados tanto por factores internos (es decir, que surgen dentro de la instalación) como externos (Andreoni y Castagna 1983).

Las causas internas comprenden:

- tensiones excesivas;
- cortocircuitos;
- modificación de la forma de onda de la corriente;
- inducción;
- interferencia;
- corrientes excesivas;
- corrosión, que provoca fugas de corriente eléctrica a tierra;
- calentamiento de materiales conductores y aislantes, que pueden producir quemaduras en el operador, emisiones de gases tóxicos, incendio de componentes y, en atmósferas inflamables, explosiones;
- fugas de líquidos aislantes, como el aceite,
- generación de hidrógeno o de otros gases que favorezcan la formación de mezclas explosivas.

Cada combinación peligro-equipos exige medidas protectoras específicas, algunas de las cuales son obligatorias en virtud de leyes o de reglamentos técnicos internos. Los fabricantes tienen la responsabilidad de conocer las estrategias técnicas específicas capaces de reducir riesgos.

Entre las causas externas se cuentan:

- factores mecánicos (caídas, golpes, vibración);
- factores físicos y químicos (radiación natural o artificial, temperaturas extremas, aceites, líquidos corrosivos, humedad);
- viento, hielo, rayos;
- vegetación (árboles y raíces, secos y mojados);
- animales (en zonas urbanas y rurales), que pueden dañar el aislamiento de líneas de distribución de energía y, por lo tanto, provocar cortocircuitos o falsos contactos,
- y, no menos grave aunque se mencione en último lugar, algunos adultos o niños descuidados, imprudentes o inconsistentes de los riesgos y de los procedimientos de funcionamiento.

Otras causas externas son la interferencia electromagnética procedente de líneas de alta tensión, receptores de radio, máquinas de soldar (capaces de generar sobretensiones transitorias) y solenoides.

Las causas de los problemas más habituales proceden del mal funcionamiento o falta de normalización de elementos como:

- equipo protector mecánico, térmico o químico;
- sistemas de ventilación, sistemas de refrigeración de máquinas, equipo, líneas o circuitos,
- coordinación de aislantes empleados en partes diferentes de la planta
- coordinación de fusibles y disyuntores automáticos.

Un solo fusible o disyuntor automático es incapaz de proporcionar una protección adecuada frente a excesivas corrientes en dos circuitos diferentes. Los fusibles o disyuntores automáticos protegen contra fallos de fase-neutro, pero la protección contra fallos de fase-tierra exige disyuntores automáticos de corriente residual. Se recomiendan las medidas siguientes:

- utilización de relés de tensión y descargadores para coordinar los sistemas de protección;

- sensores y componentes mecánicos o eléctricos en los sistemas protectores de la instalación;
- separación de circuitos a tensiones diferentes (debe mantenerse una separación de aire adecuada entre conductores; las conexiones deben estar aisladas; los transformadores se deben equipar con pantallas conectadas a tierra y protección conveniente contra tensiones excesivas, y con bobinados de primario y secundario totalmente segregados);
- códigos de colores u otras precauciones útiles para evitar equivocaciones en la identificación de hilos;
- confundir el conductor de la fase activa con el neutro da lugar a la electrización de los componentes metálicos externos del equipo,
- equipo de protección contra interferencia electromagnética.

La importancia de estas medidas es especial en la instrumentación y las líneas utilizadas para la transmisión de datos o el intercambio de señales de protección y/o control. Se debe mantener la separación adecuada entre las líneas o los filtros y pantallas empleados. En los casos más críticos se utilizan a veces cables de fibra óptica.

El riesgo asociado a las instalaciones eléctricas aumenta cuando el equipo trabaja en condiciones extremas, las más corrientes de las cuales se derivan de peligros eléctricos en ambientes húmedos o mojados.

Las finas capas conductoras líquidas que se forman sobre las superficies metálicas y aislantes en ambientes húmedos o mojados crean caminos nuevos, irregulares y peligrosos para la corriente. La infiltración de agua reduce la eficacia del aislamiento y, si el agua llega a penetrar en el aislamiento, puede provocar fugas de corriente y cortocircuitos. Se trata de efectos que no sólo dañan las instalaciones eléctricas, sino que multiplican los riesgos para las personas. Así, este peligro justifica la necesidad de normas especiales para trabajar en ambientes duros, como emplazamientos a la intemperie, instalaciones agrícolas, edificios en construcción, cuartos de baño, minas, bodegas y algunos emplazamientos industriales.

Se dispone de equipo que suministra protección contra la lluvia, las salpicaduras laterales o la inmersión completa. El equipo ideal debe ser cerrado, aislado y anticorrosión. Los recintos metálicos han de estar puestos a tierra. El mecanismo de fallo en estos ambientes mojados es el mismo que el observado en atmósferas húmedas, pero los efectos son más graves.

### **Peligros eléctricos en atmósferas pulverulentas**

El polvo fino que entra en las máquinas y en el equipo eléctrico produce abrasión, sobre todo de las piezas móviles. El polvo conductor puede provocar también cortocircuitos, mientras que el polvo aislante interrumpe el paso de corriente y aumenta la resistencia de contacto. Las acumulaciones de polvo fino o grueso alrededor de las cajas de equipo son depósitos potenciales de humedad y agua. El polvo seco es un aislante térmico, que reduce la dispersión del calor y aumenta la temperatura local; este aumento puede dañar los circuitos eléctricos y provocar incendios o explosiones.

Se deben instalar sistemas estancos al agua y a prueba de explosión en emplazamientos industriales o agrícolas donde se lleven a cabo procesos en que intervengan polvos.

### **Peligros eléctricos en atmósferas explosivas o en emplazamientos que alberguen materiales explosivos**

Las explosiones, incluidas las de atmósferas que contengan gases y polvos explosivos, pueden dispararse por la apertura y cierre de circuitos eléctricos activos, o bien por cualquier otro proceso transitorio capaz de generar chispas de energía suficiente.

He aquí los lugares en los que existe este peligro:

- minas y lugares subterráneos donde se puedan acumular gases, en especial metano;
- empresas químicas;
- salas de almacenamiento de baterías de plomo, en las que se puede acumular hidrógeno;
- el sector agroalimentario, en el que se pueden generar polvos orgánicos naturales;
- el sector de materiales sintéticos,
- la metalurgia, en especial la que utiliza aluminio y magnesio.

Allí donde exista este peligro, el número de circuitos y equipos eléctricos deberá ser el mínimo: por ejemplo, mediante la eliminación de motores y transformadores eléctricos o su sustitución por equipo neumático. El equipo eléctrico que no pueda eliminarse debe quedar encerrado, para evitar cualquier contacto de gases y polvos inflamables con chispas, y mantenido dentro del recinto cerrado en una atmósfera de gas inerte a presión positiva. Donde haya posibilidad de explosión se utilizarán recintos a prueba de explosión y cables eléctricos a prueba de incendios. Se ha desarrollado un abanico completo de equipo a prueba de explosión para algunos sectores de alto riesgo (p. ej., el sector del petróleo y el químico).

Debido al elevado coste del equipo a prueba de explosión, las plantas se suelen dividir en zonas de distinto peligro eléctrico. Cuando se aplica este criterio, en las zonas de alto riesgo se emplea equipo especial, mientras que en las demás se acepta un cierto grado de riesgo. Se han desarrollado diversos criterios y soluciones técnicas específicas de sectores; éstas comprenden por lo general alguna combinación de puesta a tierra, segregación de componentes e instalación de barreras divisorias de zonas.

### Unión equipotencial

Si todos los conductores que pudieran tocarse simultáneamente, incluso los de tierra, estuviesen al mismo potencial, no habría peligro para las personas. Los sistemas de unión equipotencial son un intento de lograr esta condición ideal (Andreoni y Castagna 1983; Lee, Cravalho y Burke 1992).

En la unión equipotencial, cada conductor expuesto del equipo eléctrico no dedicado a la transmisión y todo conductor accesible ajeno del mismo emplazamiento se conectan a un conductor de protección puesto a tierra. Debe recordarse que mientras los conductores de equipo no destinados a la transmisión están inactivos durante el funcionamiento normal, pueden activarse en caso de fallo de aislamiento. Al disminuir la tensión de contacto, la unión equipotencial impide que los componentes metálicos alcancen tensiones que lleguen a ser peligrosas para el personal y el equipo.

En la práctica, es necesario conectar la misma máquina a la malla de unión equipotencial en más de un punto. Deben identificarse con cuidado las zonas de contacto defectuoso debido, por ejemplo, al recubrimiento de aislantes como lubricantes y pintura. De modo similar, es conveniente conectar todas las tuberías de servicios locales y externos (p. ej., agua, gas y calefacción) a la rejilla de unión equipotencial.

### Puesta a tierra

En la mayoría de los casos, es necesario minimizar la caída de tensión entre los conductores de la instalación y tierra. Para realizarlo, los conductores se conectan a un conductor de protección puesto a tierra.

Hay dos tipos de conexiones de tierra:

- tierras funcionales: por ejemplo, puesta a tierra del conductor neutro de un sistema trifásico, o del punto medio del devanado secundario de un transformador,

- tierras de protección: por ejemplo, puesta a tierra de todos los elementos conductores de equipo. El objeto de este tipo de puesta a tierra es minimizar tensiones en los elementos conductores, mediante la creación de un camino preferente para las corrientes de fuga, en especial las corrientes que pudieran afectar a las personas.

En condiciones de funcionamiento normal, por la conexiones de puesta a tierra no pasa ninguna corriente. Pero en caso de activación accidental del circuito, la baja resistencia de la conexión de puesta a tierra hace que el paso de corriente sea lo bastante elevado para fundir el fusible o los conductores no conectados a tierra.

La tensión de fuga máxima en mallas equipotenciales admitida en la mayoría de las normas es 50 V para ambientes secos, 25 V para ambientes mojados o húmedos y 12 V para laboratorios médicos y otros ambientes de alto riesgo. Aunque estos valores únicamente son indicativos, debe ponerse de relieve la necesidad de garantizar una toma de tierra adecuada en puestos de trabajo, espacios públicos y en residencias especiales.

La eficacia de la puesta a tierra depende sobre todo de la existencia de corrientes de fuga altas y estables a tierra, pero también de un acoplamiento galvánico adecuado de la malla equipotencial y del diámetro de los conductores de conexión a la malla. Debido a la importancia de las fugas a tierra, tiene que ser evaluada con gran exactitud.

Las conexiones a tierra tienen que ser tan fiables como las mallas equipotenciales, y es preciso verificar periódicamente su funcionamiento correcto.

A medida que la resistencia a tierra aumenta, el potencial del conductor de puesta a tierra y de la tierra en torno del conductor se aproxima a la del circuito eléctrico; en el caso de la tierra en torno del conductor, el potencial generado es inversamente proporcional a la distancia del conductor. Con objeto de evitar tensiones escalonadas peligrosas, los conductores de tierra han de estar apantallados como es debido y puestos a tierra a profundidades adecuadas.

Como alternativa a la puesta a tierra del equipo, las normas permiten emplear equipos con doble aislamiento. Su uso, recomendado en emplazamientos residenciales, minimiza la probabilidad de fallo del aislamiento al suministrar dos sistemas de aislamiento separados. No es aconsejable confiar en que el equipo con doble aislamiento proteja como es debido contra fallos de conexiones, como los asociados a las clavijas sueltas pero activadas, puesto que las normas de algunos países relativas a clavijas y enchufes murales no consideran el empleo de dichas clavijas.

### Disyuntores

El método más seguro de reducir peligros eléctricos para personas y equipo es minimizar la duración de la corriente de fuga y el aumento de tensión, en el momento ideal antes de que la energía eléctrica haya empezado a aumentar. Los sistemas de protección en el equipo eléctrico suele incorporar tres relés: un relé de corriente de defecto para proteger contra las fugas hacia tierra, un relé magnético y un relé térmico para proteger contra sobrecargas y cortocircuitos.

En los disyuntores de corriente de defecto, los conductores del circuito se arrojan en torno a un anillo que detecta el vector suma de las corrientes entrantes y salientes del equipo a proteger. El vector suma es igual a cero durante el funcionamiento normal, pero es igual a la corriente de fuga en casos de fallo. Cuando esta corriente alcanza el umbral del disyuntor, éste se dispara. Los disyuntores de corriente de defecto se pueden disparar por corrientes tan bajas como 30 mA y con retardos tan breves como 30 ms.

La corriente máxima que transporta un conductor sin ningún peligro está en función del área de su sección transversal, su aislamiento y su instalación. Si se sobrepasa la carga segura máxima o si la disipación de calor está limitada, el conductor experimentará un calentamiento excesivo. Los dispositivos limitadores de corriente, como fusibles y disyuntores magnetotérmicos, cortan automáticamente el circuito si el paso de corriente es excesivo, o si aparecen corrientes a tierra, sobrecarga o cortocircuito. Los dispositivos limitadores de corriente deben interrumpir el paso de corriente cuando ésta es superior a la permitida por la capacidad del conductor.

La elección de equipo protector capaz de proteger personal y equipo es uno de los aspectos más importantes de la gestión de instalaciones eléctricas y ha de tener en cuenta no sólo la capacidad de transporte de corriente de los conductores, sino también las características de los circuitos y del equipo conectado a ellos.

En los circuitos que soporten cargas de corriente muy altas será preciso emplear fusibles o disyuntores especiales de gran capacidad.

### Fusibles

Existen varios tipos de fusibles, cada uno de ellos diseñado para una aplicación específica. El empleo de un tipo de fusible equivocado o de un fusible de capacidad inadecuada puede provocar lesiones a personas y daños al equipo. Los fusibles de capacidad excesiva originan con frecuencia el calentamiento del cableado o equipo, con la consiguiente posibilidad de que se produzcan incendios.

Antes de sustituir fusibles, deje el circuito fuera de servicio, efectúe el enclavamiento de los aparatos de corte y compruebe que está inactivo. La comprobación puede salvar vidas. A continuación, identifique la causa del posible cortocircuito o sobrecarga y sustituya los fusibles fundidos por otros del mismo tipo y capacidad. No inserte nunca fusibles en un circuito activo.

### Disyuntores

Si bien los disyuntores se emplean desde hace mucho tiempo en circuitos de alta tensión con grandes capacidades de corriente, ha venido aumentando su utilización en muchas otras clases de circuitos. Existen numerosos tipos, que ofrecen opciones de armado inmediato y retardado y operación manual o automática.

Los disyuntores se clasifican en dos categorías generales: térmicos y magnéticos.

Los disyuntores térmicos únicamente reaccionan frente a la subida de temperatura. Por lo tanto, las variaciones de la temperatura ambiente del disyuntores afectará al punto en que el disyuntor se dispara.

Los disyuntores magnéticos, por el contrario, sólo reaccionan ante la cantidad de corriente que pasa por el circuito. Es un tipo de disyuntor más adecuado para los casos en que existan fluctuaciones amplias de la temperatura que exigirían sobredimensionar el disyuntor, o cuando el disyuntor se dispara con frecuencia.

En el caso de contacto con líneas que transporten mucha corriente, los circuitos de protección no impiden lesiones personales ni daños al equipo, puesto que se diseñan para proteger únicamente líneas y sistemas de transporte de energía del paso excesivo de corriente provocado por fallos.

Debido a la resistencia del contacto con tierra, la corriente que atraviesa un objeto que está en contacto al mismo tiempo con la línea y tierra será en general menor que la corriente de disparo. Las corrientes de defecto atravesando el cuerpo humano deben reducirse en mayor grado por la resistencia del cuerpo mientras no llegue a disparar el disyuntor, por lo que son extremadamente peligrosas. En la práctica, es casi imposible

diseñar un sistema de transporte de energía que impida lesiones corporales o daños a cualquier objeto que toque las líneas de transporte sin que éstas dejen de ser un sistema útil de transmisión de energía, puesto que los umbrales de disparo de los dispositivos de protección de los circuitos que interesan están muy por encima del nivel de peligro para el hombre.

### Normas y reglamentos

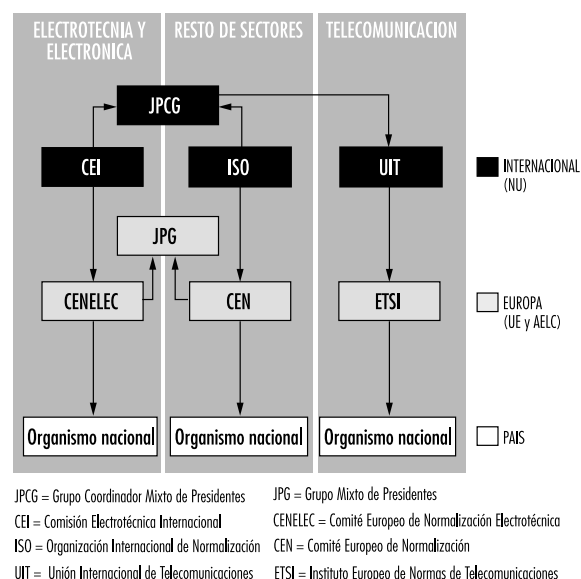
El entramado de normas y reglamentos internacionales se ilustra en la Figura 40.3 (Winckler 1994). Las filas corresponden al ámbito geográfico de las normas, mundial (internacional), continental (regional) o nacional, mientras que las columnas corresponden a los campos de aplicación de las normas. La CEI y la Organización Internacional de Normalización (ISO) comparten ambas una estructura superior, el Grupo Coordinador Mixto de Presidentes (JPCG); el equivalente europeo es el Grupo Mixto de Presidentes (JPG).

Cada organismo de normalización mantiene reuniones periódicas internacionales. La composición de los distintos organismos refleja el desarrollo de la normalización.

El *Comité Europeo de Normalización Electrotécnica* (CENELEC) fue creado en 1957 por los comités de ingeniería eléctrica de los países firmantes del Tratado de Roma que estableció la Comunidad Económica Europea. A los seis miembros fundadores se sumaron después los miembros de la Asociación Europea de Libre Comercio (AELC), y CENELEC en su forma actual data del 13 de febrero de 1972.

En contraste con la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI), el CENELEC se centra en la implantación de normas internacionales en los países miembros y no en la creación de nuevas normas. Tiene particular importancia recordar que mientras la adopción de normas de la CEI por los países miembros es voluntaria, la adopción de normas y reglamentos del CENELEC es obligatoria en la Unión Europea. Más del 90 % de las normas del CENELEC han derivado de normas de la CEI, y más del 70 % de ellas son idénticas. La influencia del CENELEC ha atraído también el interés de los países de Europa oriental, la mayoría de los cuales se convirtieron en miembros afiliados en 1991.

Figura 40.3 • Estructura de las normas y reglamentos internacionales.



La Asociación Internacional de Ensayos y Materiales, precursora de la ISO, como se conoce en la actualidad, fue fundada en 1886 y mantuvo su actividad hasta la primera Guerra Mundial, tras la cual dejó de funcionar como asociación internacional. Algunas organizaciones nacionales sobrevivieron, como la American Society for Testing and Materials (ASTM). En 1926 se fundó en Nueva York la Asociación Internacional de Normalización (ISA), que mantuvo actividad hasta la segunda Guerra Mundial. La ISA fue reemplazada en 1946 por la ISO, que es responsable de todos los campos excepto los de ingeniería eléctrica y telecomunicaciones. El *Comité Europeo de Normalización* (CEN) es el equivalente europeo de la ISO y tiene la misma función que el CENELEC, aunque sólo el 40 % de las normas CEN se derivan de normas ISO.

La cada vez mayor consolidación económica internacional crea la necesidad de bases de datos técnicos comunes en el campo de la normalización. Se trata de un proceso que está en curso en varias partes del mundo, y es probable que haga evolucionar nuevos organismos de normalización extraeuropeos. CANENA es un organismo regional de normalización creado por los países del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLC) (Canadá, México y Estados Unidos). El cableado de edificios en EE UU se rige por el National Electrical Code, ANSI/NFPA 70-1996. Esta norma se aplica también en otros países de América del Norte y del Sur. Define los requisitos de la instalación de cableados en locales desde el punto de conexión hasta el sistema de suministro eléctrico. Abarca la instalación de conductores y equipo eléctrico dentro o sobre edificios públicos y privados, incluidas casas móviles, vehículos recreativos y edificios flotantes, parques de materiales, parques de atracciones, estacionamientos y otros solares, y subestaciones industriales. No ampara instalaciones en barcos ni embarcaciones que no sean edificios flotantes: material rodante, aviones o vehículos de automoción. El National Electric Code no es aplicable a otros campos que estén ya regulados por el National Electrical Security Code, como las instalaciones de equipos del servicio público de comunicaciones y las instalaciones de suministro de electricidad.

### Normas europeas y americanas para la operación de instalaciones eléctricas

La norma europea EN 50110-1, *Operación de Instalaciones Eléctricas* (1994a), preparada por la Task Force 63-3 del CENELEC, es el documento básico que se aplica a la operación de instalaciones eléctricas y a las actividades de trabajo en ellas, con ellas o cerca de las mismas. La norma establece los requisitos mínimos para todos los países del CENELEC; las normas nacionales adicionales se describen en subpartes separadas de la norma (EN 50110-2).

La norma se aplica a instalaciones diseñadas para la generación, transmisión, conversión, distribución y utilización de energía eléctrica, y para la operación a los niveles de tensión habituales. Aunque las instalaciones típicas trabajan a tensiones bajas, la norma se aplica también a instalaciones de muy baja y de alta tensión. Las instalaciones pueden ser permanentes y fijas (p. ej., instalaciones de distribución en fábricas o edificios de oficinas) o móviles.

En la norma se especifican los procedimientos de operación y mantenimiento seguros para el trabajo en instalaciones eléctricas o cerca de las mismas. Entre las actividades de trabajo aplicables se incluyen las de trabajo no eléctrico, como la construcción junto a líneas aéreas o cables subterráneos, además de todos los tipos de trabajo eléctrico. Determinadas instalaciones eléctricas, como las existentes a bordo de aviones y barcos, no están sujetas a la norma.

La norma equivalente en Estados Unidos es el National Electrical Safety Code (NESC), del American National Standards Institute (1990). El NESC se aplica a instalaciones y funciones de suministro de servicios públicos desde el punto de generación de electricidad y señales de comunicación, pasando por la malla de transmisión, hasta el punto de suministro a las instalaciones del cliente. Determinadas instalaciones, como las existentes en minas y barcos, no están sujetas al NESC. Las directrices del NESC se han ideado para garantizar la seguridad de los trabajadores dedicados a la instalación, el funcionamiento o el mantenimiento de líneas de suministro eléctrico y de comunicación y sus equipos asociados. Tales directrices constituyen la norma mínima aceptable de seguridad profesional y pública en las condiciones especificadas. La norma no pretende ser una especificación de diseño o un manual de instrucciones. En el aspecto formal, el NESC tiene que ser considerado una norma nacional de seguridad aplicable en Estados Unidos.

Las reglas extensivas de las normas europeas y americanas sustentan la realización segura de trabajos en instalaciones eléctricas.

### La norma europea (1994a)

#### Definiciones

La norma sólo da definiciones de los términos más corrientes; en la Comisión Electrotécnica Internacional (1979) se dispone de más información. Para los fines de esta norma, la instalación eléctrica se refiere a todo el equipo empleado en la generación, transporte, conversión, distribución y utilización de energía eléctrica. Se incluyen todas las fuentes de energía, incluso baterías y condensadores (ENEL 1994; EDF-GDF 1991).

#### Principios básicos

*Operación segura:* El principio básico de trabajo seguro en, con o cerca de una instalación eléctrica es la necesidad de evaluar el riesgo eléctrico antes de comenzar el trabajo.

*Personal:* Las mejores reglas y procedimientos de trabajo en, con o cerca de una instalación eléctrica carecen de valor si los trabajadores no están totalmente familiarizados con ellas y no las cumplen a rajatabla. Todo el personal que interviene en el trabajo en, con o cerca de una instalación eléctrica, deberá ser instruido en los requisitos de seguridad, las reglas de seguridad y las normas empresariales aplicables a su trabajo. Cuando el trabajo es largo o complejo, esta instrucción deberá repetirse. Se exigirá a los trabajadores que observen estos requisitos, reglas e instrucciones.

*Organización:* Cada instalación eléctrica se colocará bajo la responsabilidad de la persona nombrada para controlar la instalación eléctrica. En casos de empresas que comprendan más de una instalación, es esencial que las personas nombradas para controlar cada instalación cooperen entre sí.

Cada actividad de trabajo será responsabilidad de la persona nombrada para controlar el trabajo. Cuando el trabajo comprenda otras tareas, se nombrarán personas responsables de la seguridad de cada una de ellas, quienes informarán al coordinador. Puede nombrarse a una misma persona para controlar el trabajo y para controlar la instalación eléctrica.

*Comunicación:* Aquí se incluyen todos los medios de transmisión de información entre personas, es decir, palabra hablada (incluidos teléfono, radio y conversación), escrita (incluido el fax) y los medios visuales (incluidos los paneles de instrumentos, vídeo, señales y luces).

Deberá hacerse una notificación formal de toda la información necesaria para la operación segura de la instalación eléctrica, p. ej., disposición de las redes, estado de las de conmutaciones y posición de los dispositivos de seguridad.

*Lugar de trabajo:* Deberá proporcionarse espacio de trabajo, acceso e iluminación adecuados en las instalaciones eléctricas en las cuales, con las cuales o cerca de las cuales se haya de realizar cualquier trabajo.

*Herramientas, equipo y procedimientos:* Las herramientas, equipo y procedimientos cumplirán los requisitos de las normas europeas, nacionales e internacionales aplicables, cuando éstas existan.

*Dibujos e informes:* Los dibujos e informes de la instalación estarán actualizados y disponibles.

*Señalización:* Se dispondrán las señales adecuadas que llamen la atención sobre peligros específicos en los lugares necesarios cuando la instalación esté funcionando y durante cualquier trabajo.

### **Procedimientos operativos estándar**

*Actividades operativas:* Las actividades operativas están ideadas para cambiar el estado eléctrico de una instalación eléctrica. Hay dos tipos:

- operaciones encaminadas a modificar el estado eléctrico de una instalación eléctrica, p. ej., con objeto de utilizar equipo, conectar, desconectar, poner en marcha o parar una instalación o sección de una instalación para llevar a cabo un trabajo. Son actividades que pueden realizarse localmente o por control remoto,
- desconexión antes o reconexión después de un trabajo sin tensión, que será ejecutada por trabajadores cualificados o formados.

*Pruebas funcionales:* Incluyen los procedimientos de medición, prueba e inspección.

Se define por medición todo el conjunto de actividades utilizadas para recoger datos físicos en instalaciones eléctricas. La medición deberá ser ejecutada por profesionales cualificados.

La prueba comprende todas las actividades ideadas para verificar el funcionamiento o la condición eléctrica, mecánica o térmica de una instalación eléctrica. La prueba deberá ser ejecutada por trabajadores cualificados.

La inspección consiste en verificar que una instalación eléctrica cumple las especificaciones técnicas y los reglamentos de seguridad aplicables.

### **Procedimientos de trabajo**

*Generalidades:* La persona nombrada para controlar la instalación eléctrica y la persona nombrada para controlar el trabajo deben cerciorarse ambas de que los trabajadores reciben instrucciones específicas y detalladas antes de iniciar el trabajo y a la terminación del mismo.

Antes de empezar el trabajo, la persona nombrada para controlarlo deberá informar a la encargada de controlar la instalación eléctrica sobre la naturaleza del trabajo que se pretende realizar, su emplazamiento y las consecuencias para la instalación eléctrica. La notificación se dará por escrito siempre que sea posible, en especial cuando el trabajo sea complejo.

Las actividades de trabajo se dividen en tres categorías: trabajo sin tensión, trabajo con tensión y trabajo en la proximidad de instalaciones con tensión. Para cada tipo de trabajo se han desarrollado medidas de protección contra descargas eléctricas, cortocircuitos y arcos.

*Inducción:* Cuando se ejecuten trabajos en líneas eléctricas sometidas a inducción de corriente, se deberá tomar las precauciones siguientes:

- puesta a tierra a intervalos adecuados; esto reduce el potencial entre conductores y tierra hasta el nivel de seguridad,

- unión equipotencial del lugar de trabajo; así se impide que los trabajadores formen parte de un circuito inductivo.

*Condiciones atmosféricas:* Cuando se vean relámpagos o se oigan truenos, no se deberán iniciar o continuar trabajos en instalaciones de exterior o en instalaciones de interior conectadas directamente a líneas aéreas.

### **Trabajo sin tensión**

Las prácticas de trabajo siguientes garantizarán que las instalaciones eléctricas en el lugar de trabajo permanezcan sin tensión mientras dure la actividad laboral. A menos que haya contraindicaciones claras, las prácticas deberán aplicarse en el orden que se indica.

*Desconexión completa:* La sección de la instalación en la cual se haya de ejecutar el trabajo deberá ser aislada de todas las fuentes de suministro de corriente, y asegurada contra la reconexión.

*Seguro contra reconexión:* Todos los dispositivos cortacircuitos utilizados para aislar la instalación eléctrica durante el trabajo deberán ser desactivados, si es posible mediante el bloqueo del mecanismo de operación.

*Verificación de que la instalación está inactiva:* La ausencia de corriente deberá ser verificada en todos los polos de la instalación eléctrica del lugar de trabajo o lo más cerca del mismo que sea posible.

*Puesta a tierra y en cortocircuito:* En todos los lugares de trabajo de alta tensión y en algunos de baja tensión, todas las partes en que se vaya a trabajar deberán ser puestas a tierra y en cortocircuito después de haber sido desconectadas. Los equipos y dispositivos de puesta a tierra y en cortocircuito deben conectarse en primer lugar a la toma de tierra; sólo después de esta puesta a tierra se conectarán al sistema los componentes que se vayan a derivar a tierra. Siempre que sea posible en la práctica, los sistemas de puesta a tierra y en cortocircuito deberán ser visibles desde el lugar de trabajo. Las instalaciones de baja y alta tensión tienen sus propios requisitos específicos. En estos tipos de instalación, todos los lados de los lugares de trabajo y todos los conductores que entran al recinto deberán ser puestos a tierra y cortocircuitados.

*Protección contra partes activas adyacentes:* Cuando haya partes de una instalación eléctrica en la proximidad del lugar de trabajo que no sea posible desactivar, es preciso tomar medidas protectoras adicionales. Los trabajadores no comenzarán el trabajo sin haber recibido permiso de la persona nombrada para controlar el trabajo, quien a su vez deberá recibir autorización de la persona nombrada para controlar la instalación eléctrica. Una vez realizado el trabajo, los trabajadores abandonarán el lugar de trabajo, serán guardadas las herramientas y el equipo, y a continuación se quitarán los sistemas de puesta a tierra y en cortocircuito. La persona nombrada para controlar el trabajo notificará entonces a la persona nombrada para controlar la instalación eléctrica que la instalación está disponible para la reconexión.

### **Trabajo con tensión**

*Generalidades:* El trabajo con tensión es el que se realiza dentro de una zona en que hay paso de corriente. La norma EN 50179 proporciona una guía sobre las dimensiones de la zona de trabajo con tensión. Se aplicarán medidas protectoras ideadas para prevenir descargas eléctricas, arcos y cortocircuitos.

*Formación y calificación:* Deberán aplicarse programas específicos de formación para desarrollar y mantener la capacidad de los trabajadores calificados o formados para desempeñar trabajo relacionados con la tensión. Una vez impartido el programa, los

trabajadores recibirán una nota de calificación y autorización para realizar trabajos específicos con tensiones específicas.

**Mantenimiento de las calificaciones.** La capacidad de realizar trabajos con tensión deberá ser mantenida mediante la práctica o nueva formación.

**Técnicas de trabajo.** En la actualidad, hay tres técnicas reconocidas, que se distinguen por su aplicabilidad a diferentes tipos de partes activas y por el equipo necesario para prevenir descargas eléctricas, arcos y cortocircuitos:

- trabajo con pértiga (trabajo a distancia);
- trabajo con guantes aislantes (trabajo en contacto),
- trabajo con manos desnudas (trabajo a potencial).

Cada técnica exige preparación, equipo y herramientas diferentes, y la elección de la técnica más adecuada dependerá de las características del trabajo en cuestión.

**Herramientas y equipo.** Deberán especificarse las características, almacenamiento, mantenimiento, transporte e inspección de herramientas, equipo y sistemas.

**Condiciones atmosféricas.** Se aplican restricciones al trabajo con tensión en condiciones atmosféricas adversas, puesto que las propiedades de los aislantes, la visibilidad y la movilidad del trabajador quedan disminuidas.

**Organización del trabajo.** El trabajo deberá prepararse por adelantado; la preparación se presentará por escrito cuando el trabajo sea complejo. La instalación en general, y la sección donde se vaya a ejecutar el trabajo en particular, deberá mantenerse en el estado definido durante la preparación. La persona nombrada para controlar el trabajo informará a la que controla la instalación eléctrica sobre la naturaleza del trabajo, el lugar de la instalación donde será ejecutado el trabajo y la duración estimada del mismo. Antes de comenzar el trabajo, deberá explicarse a los trabajadores la naturaleza de éste, las medidas de seguridad importantes, el papel de cada trabajador, y las herramientas y equipos que se van a utilizar.

Existen procedimientos específicos para instalaciones de muy baja tensión, de baja tensión y de alta tensión.

### **Trabajo en la proximidad de partes con tensión**

**Generalidades.** El trabajo en la proximidad de partes activas, con tensiones nominales superiores a 50 VCA ó 120 VCC sólo será realizado cuando se hayan adoptado medidas de seguridad que garanticen la imposibilidad de tocar las partes con tensión o de entrar en la zona activada. Para ello se pueden emplear pantallas, barreras, cerramientos o cubiertas aislantes.

Antes de comenzar el trabajo, la persona nombrada para controlar el trabajo instruirá a los trabajadores, en particular a los no familiarizados con el trabajo en la proximidad de partes con tensión, con las distancias de seguridad que deben observarse en el lugar de trabajo, las prácticas principales de seguridad y la necesidad de un comportamiento que garantice la seguridad de todo el equipo de trabajo. Los límites del lugar de trabajo estarán definidos con precisión, marcados y señalizados para atraer la atención sobre las condiciones de trabajo no habituales. La información se repetirá las veces que sea necesario, en particular cuando haya cambios en las condiciones de trabajo.

Los trabajadores deberán cerciorarse de que ninguna parte de su cuerpo ni ningún objeto invada la zona activada. Se adoptarán precauciones especiales cuando se manipulen objetos largos, por ejemplo, herramientas, puntas de cable, tuberías y escaleras.

**Protección mediante pantallas, barreras, cerramientos o cubiertas aislantes.** La selección e instalación de estos dispositivos protectores deberá suministrar protección suficiente contra ataques eléctricos y mecánicos predecibles. El equipo deberá estar mantenido a punto y protegido durante el trabajo.

### **Mantenimiento**

**Generalidades.** Su finalidad es conservar la instalación eléctrica en la condición adecuada. El mantenimiento puede ser preventivo (es decir, periódico, para evitar paradas y mantener el equipo en condiciones de trabajo normal) o correctivo (es decir, el realizado para sustituir piezas defectuosas).

El trabajo de mantenimiento se clasifica en dos categorías de riesgo:

- trabajo que implica el riesgo de descarga eléctrica, en que deben observarse los procedimientos aplicables al trabajo con tensión y al trabajo en la proximidad de partes activas,
- trabajo en que el diseño del equipo permite realizar algunas operaciones de mantenimiento sin necesidad de aplicar procedimientos completos de trabajo con tensión.

**Personal.** El personal que vaya a realizar el trabajo deberá tener la cualificación adecuada (o bien recibirá formación suficiente), y contará con las herramientas e instrumentos apropiados de medición y prueba.

**Trabajo de reparación.** El trabajo de reparación consta de las fases siguientes: localización del fallo; arreglo del fallo y/o sustitución de componentes; nueva puesta en servicio de la sección reparada de la instalación. Cada una de estas fases exige procedimientos específicos.

**Trabajo de sustitución.** En general, la sustitución de fusibles en instalaciones de alta tensión deberá ser realizada sin tensión. La sustitución de fusibles será efectuada por trabajadores cualificados que observen los procedimientos de trabajo adecuados. La sustitución de lámparas y piezas desmontables, como motores de arranque, se llevará a cabo sin tensión. En instalaciones de alta tensión, el trabajo de sustitución se realizará también con procedimientos de reparación.

### **Formación de personal en materia de riesgos eléctricos**

La organización eficaz del trabajo y la formación en seguridad son elementos clave para tener éxito en cualquier organización, programa de prevención y programa de salud y seguridad en el trabajo. Los trabajadores han de poseer la formación adecuada para hacer su trabajo con seguridad y eficacia.

La responsabilidad de implantar la formación de empleados pertenece a la dirección, que ha de reconocer la necesidad de que para que la organización pueda alcanzar sus objetivos los empleados han de rendir a un determinado nivel. La consecución de estos niveles de rendimiento exige el establecimiento de políticas de formación y, por extensión, de programas concretos de formación. En los programas se deben incluir fases de formación y de calificación.

Los programas de trabajo con tensión incluirán los elementos siguientes:

**Formación:** En algunos países, los programas y las instalaciones de formación han de contar con la aprobación formal de un comité de trabajo con tensión u organismo similar. Los programas se basan ante todo en la experiencia práctica, complementada con formación técnica. La formación adopta la forma de trabajo práctico en instalaciones modelo, interiores o exteriores, semejantes a aquéllas en que se deberá realizar el trabajo real.

**Calificaciones.** Los procedimientos de trabajo con tensión son muy exigentes, e insisten en la necesidad de utilizar a la persona adecuada en el lugar correcto. La manera más fácil de lograrlo es disponer de personal cualificado con diferentes niveles de especialización. La persona nombrada para controlar el trabajo debe ser un trabajador cualificado. Cuando sea necesaria la supervisión, también ésta debe ser responsabilidad de una persona cualificada. Los trabajadores sólo deben

trabajar en instalaciones cuya tensión y complejidad se correspondan con su nivel de cualificación o formación. En algunos países, la cualificación está regulada por normas nacionales.

Por último, los trabajadores deben recibir instrucciones y formación en técnicas esenciales de salvamento. Remitimos al lector que desee ampliar la información al capítulo relativo a primeros auxilios.

## Referencias

- American National Standards Institute (ANSI). 1990. *National Electrical Safety Code: ANSI C2*. Nueva York: ANSI.
- Andreoni, D, R Castagna. 1983. *L'Ingegnere e la Sicurezza*. Vol. 2. Roma: Edizioni Scientifiche.
- Comisión Electrotécnica Internacional (CEI). 1979. *Electrobiologie*. Capítulo 891 en *General Index of International Electrotechnical Vocabulary*. Ginebra: CEI.
- . 1987. *Effets du Courant Passant par le Corps humain: Deuxième partie*. ICE 479-2. Ginebra: CEI.
- . 1994. *Effets du Courant Passant par le Corps humain: Première partie*. Ginebra: CEI.
- Comunidad Económica Europea (CEE). 1989. *Directiva del Consejo de 12 de junio de 1989 sobre la adopción de medidas para promover mejoras en la seguridad y la salud de los trabajadores en el lugar de trabajo*. Documento num. 89/391/CEE. Luxemburgo: CEE.
- EDF-GDF. 1991. *Carnet de Prescriptions au Personnel—Prévention du Risque électrique*.
- ENEL Spa. 1994. *Disposizioni per la Prevenzione del Rischio Elettrico*.
- Folliot, D. 1982. *Les accidents d'origine électrique, leur prévention*. Collection monographie de médecine du travail. París: Editions Masson.
- Gilet, JC, R Choquet. 1990. *La Sécurité électrique: Techniques de prévention*. Grenoble, Francia: Société alpine de publication.
- Gourbiere, E, J Lambrozo, D Folliot, C Gary. 1994. *Complications et séquelles des accidents dus à la foudre*. *Rev Gén Electr* 6 (4 de junio).
- Kane, JW, MM Sternheim. 1980. *Fisica Biomedica*. Roma: EMSI.
- Lee, RC, EG Cravalho, JF Burke. 1992. *Electrical Trauma*. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Lee, RC, M Capelli-Schellpfeffer, KM Kelly. 1994. *Electrical injury: A multidisciplinary approach to therapy, prevention and rehabilitation*. *Ann NY Acad Sci* 720.
- Norma Europea (1994a). *Operation of Electrical Installations*. Versión definitiva EN 50110-1.
- Norma Europea (1994b). *Operation of Electrical Installations* (Anexos Nacionales) Versión definitiva EN 50110-2.
- Winckler, R. 1994. *Electrotechnical Standardization in Europe: A Tool for the Internal Market*. Bruselas: CENELEC.
- ## Otras lecturas recomendadas
- Association Suisse des Electriciens. 1990. *Requisitos básicos de seguridad para los equipos eléctricos de pequeño voltaje* (Prescriptions de sécurité fondamentales pour matériels électriques à basse tension). Zurich: Association Suisse des Electriciens.
- Casini, VJ. 1993. *Occupational electrocutions: Investigation and prevention*. *Prof Saf* 38(1):34-39.
- Comisión Electrotécnica Internacional (CEI). 1990a. *Graphic Symbols for Use on Equipment*. Ginebra: CEI.
- . 1990b. *Safety of Transportable Motor-Operated Electric Tools-Part 1: General Requirements*. Ginebra: CEI.
- . 1994. *Marking of Electrical Equipment with Ratings Related to Electrical Supply-Safety Requirements*. Ginebra: CEI.
- Donnachie, PE. 1994. *Dangers of electricity: An introduction*. *Health Safety Data F C:1* (Junio):1-4.
- Fraser, D. 1990. *Unit: Safety technology-module: Electrical safety*. En *Occupational Health and Safety*. Portsmouth: Portsmouth Polytechnic.
- Garside, R. 1990. *Electrical Apparatus and Hazardous Areas*. Aylesbury: Hexagon Technology.
- Grube, BJ, DM Heimbach, LH Engrav, MK Copass. 1990. *Neurologic consequences of electrical burns*. *J Trauma* 30(3):254-258.
- Harvey-Sutton, PL, TR Driscoll, MS Frommer, JE Harrison. 1992. *Work-related electrical fatalities in Australia, 1982-1984*. *Scand J Work Environ Health* 18(5):293-297.
- Hauptverband der Gewerblichen Berufsgenossenschaften. 1989. *Código de práctica para la prevención de riesgos de ignición por cargas electrostáticas: Directrices sobre la electricidad estática* (en alemán). Colonia: Carl Heymanns Verlag.
- Health and Safety Executive. 1993. *Electricity at Work: Safe Working Practices*. Londres: Her Majesty's Stationery Office.
- Institut national de Recherche et de Sécurité. 1993. *Accidentes de origen eléctrico (Accidents d'origine électrique)*. París: Institut national de recherche et de sécurité.
- Jenkins, BD. 1993. *Touch Voltages in Electrical Installations*. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Kinloch, CD. 1987. *Electrical Installation: Snags and Solutions*. Reed Business Publishing.
- Omeish, TM, M Sebastian. 1991. *Overcoming electrical risks in hazardous process areas*. *Fire Prev* (245) (Diciembre):21-26.
- Paureau, J, M Rollin. 1990. *Calzado antiestático de seguridad: Evaluación de los principales métodos utilizados para determinar la resistencia del aislamiento* (en francés). *Cahiers de notes documentaires—Sécurité et hygiène du travail*, 2º trimestre (139): 405-419.
- Pineault, M, M Rossignol, RG Barr. 1994. *Inter-rater analysis of a classification scheme of occupational fatalities by electrocution*. *J Saf Res* 25(2):107-115.
- Reilly, JP, H Antoni. 1992. *Electrical Stimulation and Electropathology*. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Suruda, A, L Smith. 1992. *Work-related electrocutions involving portable power tools and appliances*. *J Occup Med* 34(9):887-892.
- Tilley, L. 1992. *Electrocution-A shock to the system*. *Aust Safety News* 63(11):58-59.
- Walker, E. 1992. *Safety Managers Pocket Guide to Electrical Inspection*. Rotterdam: Saxton Safety Services.
- Yakuboff, KP, HE Kleinert. 1991. *Electrical injuries*. En *Occupational Hand and Upper Extremity Injuries and Diseases*, dirigido por ML Kasdan. Filadelfia: Hanley & Belfus.