

NTP 400: Corriente eléctrica: efectos al atravesar el organismo humano

Courant électrique: effets de son passage par le corps humain
Electrical current: Effects passing through the human body

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

Redactor:

Luis Pérez Gabarda
Ingeniero Industrial

CENTRO NACIONAL DE NUEVAS TECNOLOGÍAS

Objetivo

El enorme desarrollo de la electricidad en el campo de la utilización ha ido acompañado de una preocupación prevencionista, que ha generado la evolución de nuestros conocimientos acerca del comportamiento del cuerpo humano al someterle al paso de la electricidad.

Nos limitamos en esta NTP al accidente eléctrico ocasionado por el paso de la electricidad a través de nuestro organismo, tratando de dar el más reciente enfoque causa-efecto.

Antecedentes

Durante las últimas décadas se han realizado experiencias sobre cadáveres, personas vivas y fundamentalmente sobre animales, que permiten hacernos una idea de los efectos que produce el paso de la electricidad por el cuerpo de personas en condiciones fisiológicas normales.

Este desarrollo del conocimiento ha originado que la primera edición de la norma CEI 479, aparecida en el año 1974, fuese sustituida a los 10 años por la CEI 4791:1984 y ésta, una década después es revisada por la CEI 479-1:1994, que aparece con carácter prospectivo y de aplicación provisional. Paralelamente, las Normas UNE 20-572-80 y 20-572-92 (parte 1) han ido adaptándose a esta evolución.

En esta NTP nos vamos a referir a la publicación más reciente, la norma CEI 479-1:1994 tratando con especial interés la «**fibrilación ventricular**», que constituye la causa esencial de los accidentes mortales debidos a la electricidad.

Efectos de la corriente

Las consecuencias del paso de la corriente por el cuerpo pueden ocasionar desde lesiones físicas secundarias (golpes, caídas, etc.), hasta la muerte por fibrilación ventricular.

Una persona se **electriza** cuando la corriente eléctrica circula por su cuerpo, es decir, cuando la persona forma parte del circuito eléctrico, pudiendo, al menos, distinguir dos puntos de contacto: uno de entrada y otro de salida de la corriente. La **electrocución** se produce cuando dicha persona fallece debido al paso de la corriente por su cuerpo.

La **fibrilación ventricular** consiste en el movimiento anárquico del corazón, el cual, deja de enviar sangre a los distintos órganos y, aunque esté en movimiento, no sigue su ritmo normal de funcionamiento.

Por **tetanización** entendemos el movimiento incontrolado de los músculos como consecuencia del paso de la energía eléctrica. Dependiendo del recorrido de la corriente perderemos el control de las manos, brazos, músculos pectorales, etc.

La **asfixia** se produce cuando el paso de la corriente afecta al centro nervioso que regula la función respiratoria, ocasionando el paro respiratorio.

Otros factores fisiopatológicos tales como contracciones musculares, aumento de la presión sanguínea, dificultades de respiración, parada temporal del corazón, etc. pueden producirse sin fibrilación ventricular. Tales efectos no son mortales, son, normalmente,

reversibles y, a menudo, producen marcas por el paso de la corriente. Las quemaduras profundas pueden llegar a ser mortales.

Para las **quemaduras** se han establecido unas curvas (figura 1) que indican las alteraciones de la piel humana en función de la densidad de corriente que circula por un área determinada (mA/mm^2) y el tiempo de exposición a esa corriente. Se distinguen las siguientes zonas:

- Zona 0: habitualmente no hay alteración de la piel, salvo que el tiempo de exposición sea de varios segundos, en cuyo caso, la piel en contacto con el electrodo puede tomar un color grisáceo con superficie rugosa.
- Zona 1: se produce un enrojecimiento de la piel con una hinchazón en los bordes donde estaba situado el electrodo.
- Zona 2: se provoca una coloración parda de la piel que estaba situada bajo el electrodo. Si la duración es de varias decenas de segundos se produce una clara hinchazón alrededor del electrodo.
- Zona 3: se puede provocar una carbonización de la piel.

Es importante resaltar que con una intensidad elevada y cuando las superficies de contacto son importantes se puede llegar a la fibrilación ventricular sin ninguna alteración de la piel.

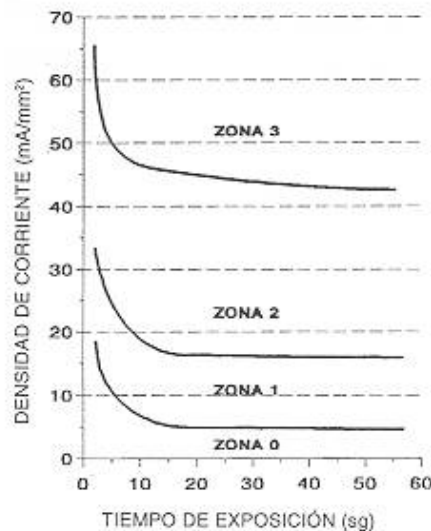


Fig. 1: Efecto sobre la piel

En la figura 2 se indican los efectos que produce una corriente alterna de frecuencia comprendida entre 15 y 100 Hz con un recorrido mano izquierda-los dos pies. Se distinguen las siguientes zonas:

- Zona 1: habitualmente ninguna reacción.
- Zona 2: habitualmente ningún efecto fisiológico peligroso.
- Zona 3: habitualmente ningún daño orgánico. Con duración superior a 2 segundos se pueden producir contracciones musculares dificultando la respiración, paradas temporales del corazón sin llegar a la fibrilación ventricular,
- Zona 4: riesgo de parada cardíaca por: fibrilación ventricular, parada respiratoria, quemaduras graves,....

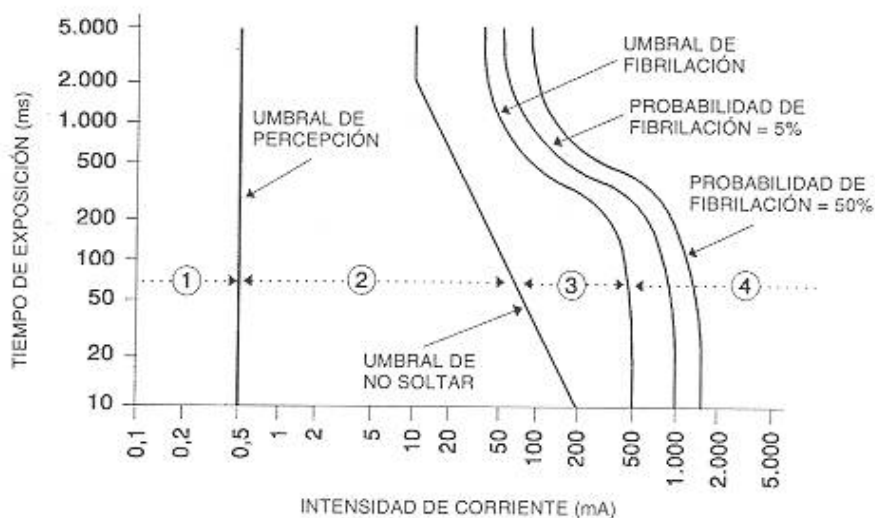


Fig. 2: Corriente alterna, efecto en el organismo

Principales factores que influyen en el efecto eléctrico

Intensidad de la corriente

Es uno de los factores que más inciden en los efectos y lesiones ocasionados por el accidente eléctrico. En relación con la intensidad de corriente, son relevantes los conceptos que se indican a continuación.

Umbral de percepción: es el valor mínimo de la corriente que provoca una sensación en una persona, a través de la que pasa esta corriente. En corriente alterna esta sensación de paso de la corriente se percibe durante todo el tiempo de paso de la misma; sin embargo, con corriente continua solo se percibe cuando varía la intensidad, por ello son fundamentales el inicio y la interrupción de; paso de la corriente, ya que entre dichos instantes no se percibe el paso de la corriente, salvo por los efectos térmicos de la misma. Generalizando, la Norma CEI 479-11994 considera un valor de 0,5 mA en corriente alterna y 2 mA en corriente continua, cualquiera que sea el tiempo de exposición.

Umbral de reacción: es el valor mínimo de la corriente que provoca una contracción muscular.

Umbral de no soltar: cuando una persona tiene sujetos unos electrodos, es el valor máximo de la corriente que permite a esa persona soltarlos. En corriente alterna se considera un valor máximo de 10 mA, cualquiera que sea el tiempo de exposición. En corriente continua, es difícil establecer el umbral de no soltar ya que solo el comienzo y la interrupción del paso de la corriente provoca el dolor y las contracciones musculares.

Umbral de fibrilación ventricular: es el valor mínimo de la corriente que puede provocar la fibrilación ventricular. En corriente alterna, el umbral de fibrilación ventricular decrece considerablemente si la duración del paso de la corriente se prolonga más allá de un ciclo cardíaco. Adecuando los resultados de las experiencias efectuadas sobre animales a los seres humanos, se han establecido unas curvas, por debajo de las cuales no es susceptible de producirse. La fibrilación ventricular está considerada como la causa principal de muerte por choque eléctrico.

En corriente continua, si el polo negativo está en los pies (corriente descendente), el umbral de fibrilación es de aproximadamente el doble de lo que sería si el polo positivo estuviese en los pies (corriente ascendente). Si en lugar de las corrientes longitudinales antes descritas fuese una corriente transversal, la experiencia sobre animales hace suponer que, solo se producirá la fibrilación ventricular con intensidades considerablemente más elevadas.

En la figura 3 se representan los efectos de una corriente continua ascendente con trayecto mano izquierda-los dos pies; se puede apreciar que para una duración de choque superior a un ciclo cardíaco el umbral de fibrilación en corriente continua es muy superior que en corriente alterna.

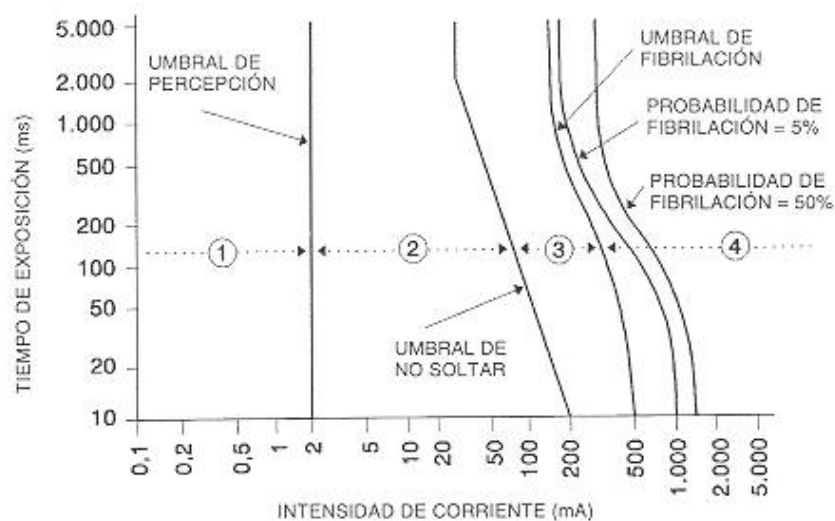


Fig. 3: Corriente continua, efecto en el organismo

Período vulnerable: afecta a una parte relativamente pequeña del ciclo cardíaco durante el cual las fibras de; corazón están en un estado no homogéneo de excitabilidad y la fibrilación ventricular se produce si ellas son excitadas por una corriente eléctrica de intensidad suficiente. Corresponde a la primera parte de la onda T en el electrocardiograma y supone aproximadamente un 10% del ciclo cardíaco completo. Ver figura 4.

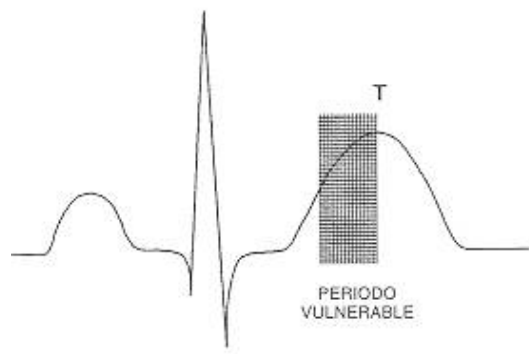


Fig. 4: Periodo vulnerable del ciclo cardiaco

La figura 5 reproduce un electrocardiograma en el cual se representan los efectos de la fibrilación ventricular, indicándose las variaciones que sufre la tensión arterial cuando se produce la fibrilación, la tensión arterial experimenta una oscilación e inmediatamente, decrece, en cuestión de un segundo, hacia valores mortales.

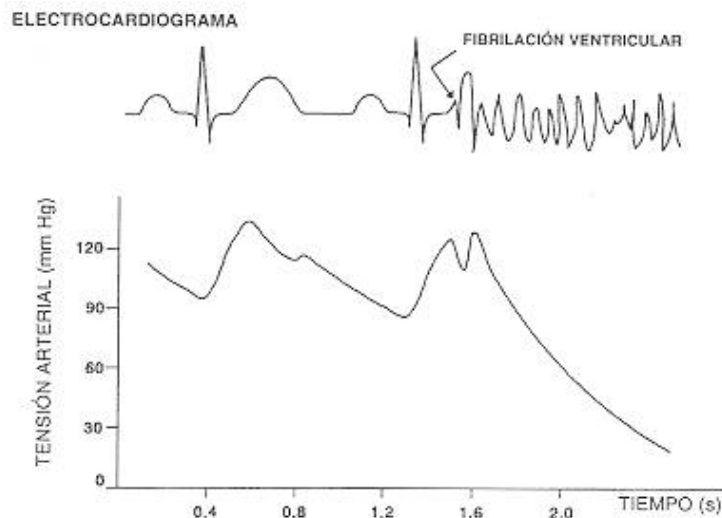


Fig. 5: Efecto de la fibrilación ventricular en el electrocardiograma y en la tensión arterial

Duración del contacto eléctrico

Junto con la intensidad es el factor que más influye en el resultado del accidente. Por ejemplo, en corriente alterna y con intensidades inferiores a 100 mA, la fibrilación puede producirse si el tiempo de exposición es superior a 500 ms.

Impedancia del cuerpo humano

Su importancia en el resultado del accidente depende de las siguientes circunstancias: de la tensión, de la frecuencia, de la duración del paso de la corriente, de la temperatura, del grado de humedad de la piel, de la superficie de contacto, de la presión de contacto, de la dureza de la epidermis, etc.

Las diferentes partes del cuerpo humano, tales como la piel, los músculos, la sangre, etc., presentan para la corriente eléctrica una impedancia compuesta por elementos resistivos y capacitivos. Durante el paso de la electricidad la impedancia de nuestro cuerpo se comporta como una suma de tres impedancias en serie:

- Impedancia de la piel en la zona de entrada.
- Impedancia interna del cuerpo.
- Impedancia de la piel en la zona de salida.

Hasta tensiones de contacto de 50 V en corriente alterna, la impedancia de la piel varía, incluso en un mismo individuo, dependiendo de factores externos tales como la temperatura, la humedad de la piel, etc.; sin embargo, a partir de 50 V la impedancia de la piel decrece rápidamente, llegando a ser muy baja si la piel está perforada.

La impedancia interna del cuerpo puede considerarse esencialmente como resistiva, con la particularidad de ser la resistencia de los brazos y las piernas mucho mayor que la del tronco. Además, para tensiones elevadas la impedancia interna hace prácticamente despreciable la impedancia de la piel. Para poder comparar la impedancia interna dependiendo de la trayectoria, en la figura 6 se indican las impedancias de algunos recorridos comparados con los trayectos mano-mano y mano-pie que se consideran como impedancias de referencia (100%).

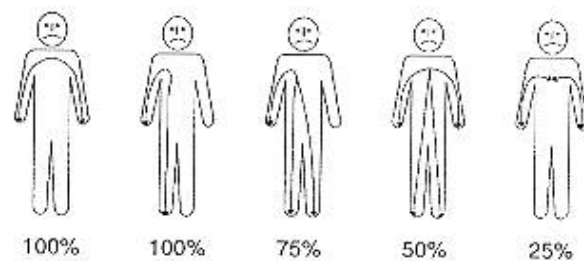


Fig. 6: Impedancia interna del organismo

En las tablas 1 y 2 se indican unos valores de la impedancia total del cuerpo humano en función de la tensión de contacto, tanto para corriente alterna y continua, respectivamente.

Tabla 1: Impedancia del cuerpo humano frente a la corriente alterna

Tensión de contacto (V)	Trayectoria mano-mano, piel seca, c. alterna, frecuencia 50-60 Hz, superficie de contacto 50-100 cm ²		
	Impedancia total (Ω) del cuerpo humano que no son sobrepasados por el		
	5% de las personas	50% de las personas	95% de las personas
25	1.750	3.250	6.100
50	1.450	2.625	4.375
75	1.250	2.200	3.500
100	1.200	1.875	3.200
125	1.125	1.625	2.875
220	1.000	1.350	2.125
700	750	1.100	1.550
1.000	700	1.050	1.500
valor asintótico	650	750	850

Tabla 2: Impedancia de cuerpo humano frente a la corriente continua

Tensión de contacto (V)	Trayectoria mano-mano, piel seca, c. continua superficie de contacto 50-100 cm ²		
	Impedancia total (Ω) del cuerpo humano que no son sobrepasados por el		
	5% de las personas	50% de las personas	95% de las personas
25	2.200	3.875	8.800
50	1.750	2.990	5.300
75	1.510	2.470	4.000
100	1.340	2.070	3.400
125	1.230	1.750	3.000
220	1.000	1.350	2.125
700	750	1.100	1.550
1.000	700	1.050	1.500
valor asintótico	650	750	850

Las variaciones de la impedancia del cuerpo humano en función de la superficie de contacto, se representan en la figura 7, en relación con la tensión aplicada. En la Instrucción MIE BT 001 artículo 58 del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT) se considera que la resistencia del cuerpo entre mano y pie es de 2.500 ohm.

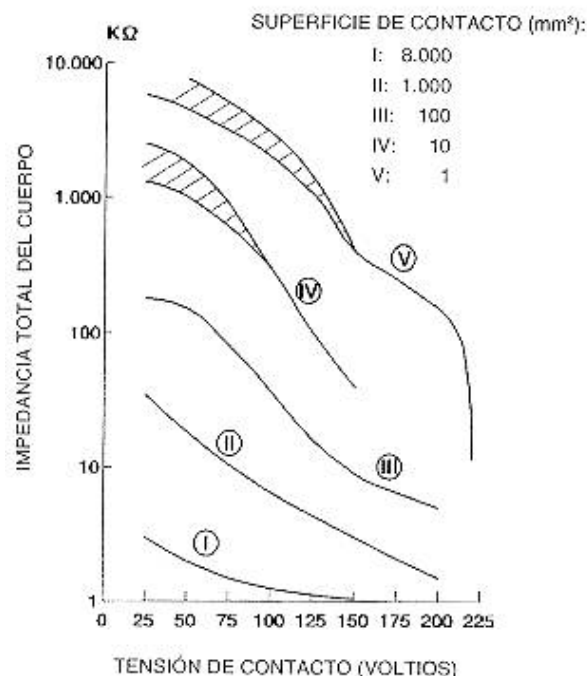


Fig. 7: Impedancia del cuerpo en función de la superficie de contacto (50 Hz)

Tensión aplicada

En sí misma no es peligrosa pero, si la resistencia es baja, ocasiona el paso una intensidad elevada y, por tanto, muy peligrosa. El valor límite de la tensión de seguridad debe ser tal que aplicada al cuerpo humano, proporcione un valor de intensidad que no suponga riesgos para el individuo.

Como anteriormente se mencionó, la relación entre la intensidad y la tensión no es lineal debido al hecho de que la impedancia del cuerpo humano varía con la tensión de contacto. Ahora bien, por depender la resistencia del cuerpo humano, no solo de la tensión, sino también de la trayectoria y del grado de humedad de la piel, no tiene sentido establecer una única tensión de seguridad sino que tenemos que referirnos a infinitas tensiones de seguridad, cada una de las cuales se correspondería a una función de las distintas variables anteriormente mencionadas.

Las tensiones de seguridad aceptadas por el REBT MIBT-21/2.2 son 24 V para emplazamientos húmedos y 50 V para emplazamientos secos, siendo aplicables tanto para corriente continua como para corriente alterna de 50 Hz.

Frecuencia de la corriente alterna

Normalmente, para uso doméstico e industrial se utilizan frecuencias de 50 Hz (en U.S.A. de 60 Hz), pero cada vez es más frecuente utilizar frecuencias superiores, por ejemplo:

- 400 Hz en aeronáutica.
- 450 Hz en soldadura.
- 4.000 Hz en electroterapia.
- Hasta 1 MHz en alimentadores de potencia.

Experimentalmente se han realizado medidas de las variaciones de impedancia total del cuerpo humano con tensiones comprendidas entre 10 y 25 Voltios en corriente alterna, y variaciones de frecuencias entre 25 Hz y 20 KHz.

A partir de estos resultados se han deducido las curvas representadas en la figura 8, para tensiones de contacto comprendidas entre 10 y 1.000 Voltios y para un trayecto mano-mano o mano-pie.

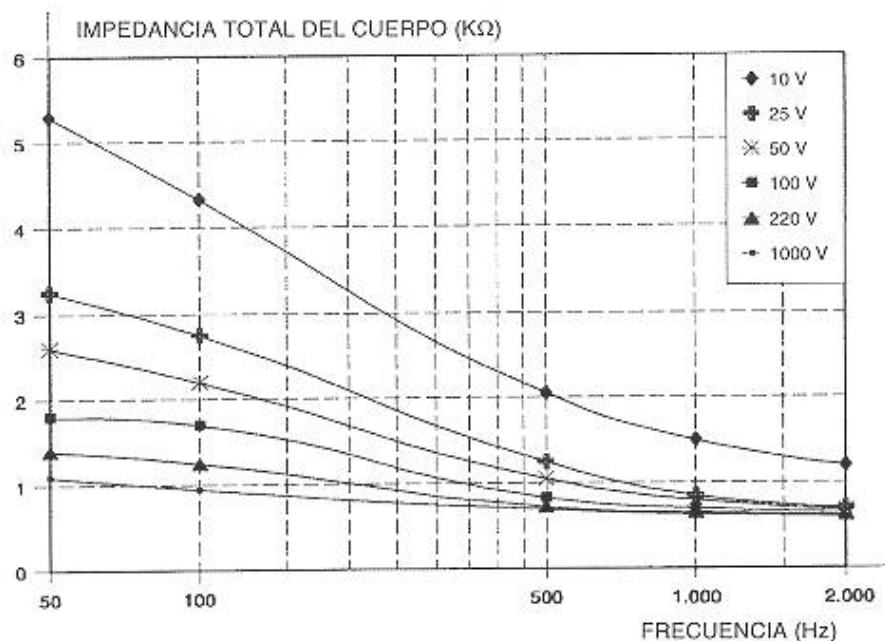


Fig. 8: Impedancia total en función de la tensión y la frecuencia

Para tensiones de contacto de algunas decenas de voltios, la impedancia de la piel decrece proporcionalmente cuando aumenta la frecuencia. Por ejemplo, a 220 V con una frecuencia de 1.000 Hz la impedancia de la piel es ligeramente superior a la mitad de aquella a 50 Hz. Esto es debido a la influencia del efecto capacitivo de la piel.

Sin embargo, a muy altas frecuencias disminuye el riesgo de fibrilación ventricular pero prevalecen los efectos térmicos. Con fines terapéuticos, es usual, en medicina el empleo de altas frecuencias para producir un calor profundo en el organismo. A partir de 100.000 Hz no se conocen valores experimentales que definan ni los umbrales de no soltar ni los umbrales de fibrilación; tampoco se conoce ningún incidente, salvo las quemaduras provocadas por intensidades de «algunos amperios» y en función de la duración del paso de la corriente.

La corriente continua, en general, no es tan peligrosa como la alterna, ya que entre otras causas, es más fácil soltar los electrodos sujetos con la mano y que para duraciones de contacto superiores al período del ciclo cardíaco, el umbral de fibrilación ventricular es mucho más elevado que en corriente alterna.

Recorrido de la corriente a través del cuerpo

La gravedad del accidente depende del recorrido de la misma a través del cuerpo. Una trayectoria de mayor longitud tendrá, en principio, mayor resistencia y por tanto menor intensidad; sin embargo, puede atravesar órganos vitales (corazón, pulmones, hígado, etc.) provocando lesiones mucho más graves. Aquellos recorridos que atraviesan el tórax o la cabeza ocasionan los mayores daños.

Las figuras 2 y 3 indicaban los efectos de la intensidad en función del tiempo de aplicación; en las mencionadas figuras se indicaba que nos referíamos al trayecto de «mano izquierda a los dos pies». Para otros trayectos se aplica el llamado **factor de corriente de corazón «F»**, que permite calcular la equivalencia del riesgo de las corrientes que teniendo recorridos diferentes atraviesan el cuerpo humano. Se representan en la figura 9.

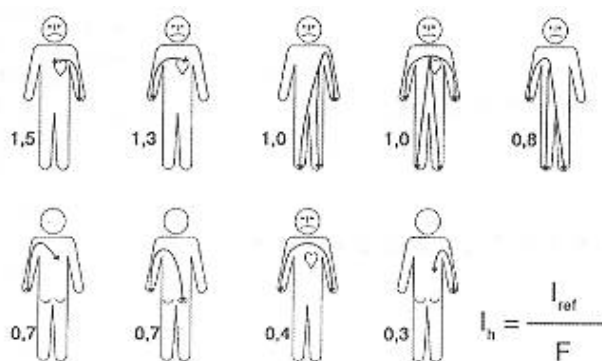


Fig. 9: Factor de corriente de corazón " F "

La mencionada equivalencia se calcula mediante la expresión:

$$I_h = \frac{I_{ref}}{F}$$

siendo,

I_h = corriente que atraviesa el cuerpo por un trayecto determinado.

I_{ref} = corriente «mano izquierda-pies».

F = factor de corriente de corazón.

Como es lógico, para el trayecto de las figuras 2 y 3, el factor de corriente de corazón es la unidad. Se aprecia que de los trayectos definidos en esta tabla, el más peligroso es el de pecho-mano izquierda y el de menor peligrosidad de los reseñados el de espalda-mano derecha.

Por ejemplo, podemos aventurar que una corriente de 200 mA con un trayecto mano-mano tendrá un riesgo equivalente a una corriente de 80 mA con trayectoria mano izquierda-los dos pies.

Aplicación práctica

Como aplicación práctica de estos conceptos, vamos a desarrollar un sencillo ejemplo:

La figura 10 representa dos estados sucesivos de una instalación provista de un interruptor diferencial (D). En el primer estado (I) se representa un motor (del) sin toma de tierra, con una derivación que ocasiona una diferencia de potencial entre la carcasa del motor y tierra de 150 Voltios.

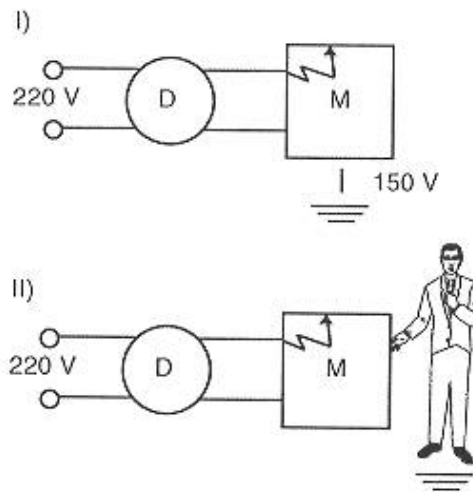


Fig. 10: Caso práctico

En el segundo estado (II) se representa dicha instalación y a un individuo que se pone en contacto con la carcasa del motor. Siendo la resistencia del individuo de 1.500 ohm indicar:

- Intensidad máxima que podrá circular a través del individuo.
- Tiempo máximo de actuación del interruptor diferencial para que no se alcancen los umbrales de no soltar y de fibrilación ventricular, tanto en corriente alterna de 50 Hz, como en corriente continua ascendente.
- Indicar, según la legislación vigente, cual debe ser el tiempo máximo de disparo del interruptor diferencial.

SOLUCIÓN:

Cuestión a):

Según la ley de Ohm: $V = I_h \times R$

$$I_h = \frac{150}{1500} = 0,1 \text{ A} = 100 \text{ mA}$$

Cuestión b):

En corriente alterna

Trayectoria mano derecha-pies: factor de corriente de corazón $F = 0,8$

$$I_{ref} = F \times I_h = 0,8 \times 100 = 80 \text{ mA}$$

Interpolando en el gráfico de corriente alterna (figura 2):

- Umbral de no soltar $\approx 50 \text{ ms} = 0,05 \text{ segundos}$
- Umbral de fibrilación $\approx 550 \text{ ms} = 0,55 \text{ segundos}$

En corriente continua ascendente

$$I_{\text{ref}} = 80 \text{ mA}$$

Interpolando en el gráfico de corriente continua (figura 3):

- Umbral de no soltar $\approx 100 \text{ ms} = 0,1 \text{ segundos}$
- Umbral de fibrilación $\approx \infty$ (no se alcanza)

Como se puede apreciar, en este caso concreto, el umbral de no soltarse alcanza en corriente alterna en la mitad de tiempo que en corriente continua, pero aún es más significativo el umbral de fibrilación que en corriente alterna se alcanzaría en tan solo cincuenta y cinco centésimas de segundo y, sin embargo, en corriente continua no se podría alcanzar.

Cuestión c):

Según la norma de obligado cumplimiento UNE 20.383-75 (MIE REBT-044) en su apartado 18, para un interruptor automático diferencial de intensidad diferencial nominal de disparo $I_{\delta N} \leq 0,03 \text{ mA}$ los tiempos de disparo deben ser:

Si $I = I_{\delta N} \rightarrow$ tiempo de disparo $< 0,2 \text{ s}$

Si $I = 2 I_{\delta N} \rightarrow$ tiempo de disparo $< 0,1 \text{ s}$

Si $I = 10 I_{\delta N} \rightarrow$ tiempo de disparo $< 0,04 \text{ s}$

En nuestro caso:

$$I = I_h = 100 \text{ mA}$$

$$I_{\delta N} = 30 \text{ mA}$$

por tanto,

$$I = (100/30) I_{\delta N} \rightarrow I = 3,3 I_{\delta N}$$

luego el tiempo de disparo debe estar comprendido entre 0,04 y 0,1 segundos; valores muy inferiores a los umbrales de fibrilación ventricular.

Conclusión: en este caso, el interruptor diferencial dispara y desconecta la instalación antes de que se produzca la fibrilación ventricular en una persona en condiciones fisiológicas normales.

Bibliografía

(1) CEI/IEC 479-1: 1994

Effets of current on human beings and livestock. Part 1: General aspects

Third edition 1994-09

(2) UNE 20-572-92 Parte 1 (equivalente a CEI 479-1: 1984)

Efecto de la corriente eléctrica al pasar por el cuerpo humano. Aspectos generales