

NTP 437: Aspectos particulares de los efectos de la corriente eléctrica (I)

Aspects particuliers des effets du courant électrique (I)
Special aspects of effects of the electric current (I)

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

Normalmente, cuando describimos la corriente eléctrica, nos referimos a corriente continua y a corriente alterna, de baja o de alta tensión, y se da por hecho que en el caso de corriente alterna la frecuencia es de 50 Hz, que es aquella que citan los Reglamentos Electrotécnicos como frecuencia nominal obligatoria para la red eléctrica de servicio público.

La utilización de frecuencias superiores a la normalizada está condicionada al cumplimiento por parte de estas instalaciones de las instrucciones especiales que dicte el Ministerio de Industria y Energía o la Comunidad Autónoma, en el caso de que tenga transferidas dichas competencias.

Sin embargo, existen multitud de aplicaciones de la electricidad en las cuales se generan y utilizan formas de onda de geometrías especiales y muy dispares entre ellas. A título indicativo, entre las formas de onda básicas se encuentran las funciones: rampa, escalón, rampa modificada, impulso rectangular, parábola, periódica, senoidal periódica, etc.

De acuerdo con lo expresado en el párrafo anterior, el objetivo de esta NTP consiste en describir los efectos que producen, alguna de las formas de onda más utilizadas, al atravesar el cuerpo humano.

Introducción

En teoría de circuitos se manejan, como funciones de excitación y respuesta, tensiones e intensidades que varían con el tiempo. La dependencia funcional

$$u = u(t) \text{ ó } i = i(t)$$

puede darse analítica o gráficamente. En ambos casos nos referimos a esa relación funcional mediante el término «forma de onda».

Los efectos tanto de la corriente alterna de frecuencia 50 Hz como de la corriente continua fueron descritos en la NTP 400.

En esta Nota Técnica de Prevención tratamos los efectos de la corriente alterna de frecuencia superior a 100 Hz y los efectos de la descarga de condensadores. Debemos dejar patente que el nivel actual de conocimientos sobre estos casos particulares están, en muchos casos a nivel de investigación, por tanto, las informaciones dadas deben considerarse como provisionales. Esto último, desde nuestro enfoque prevencionista, no impide que puedan ser utilizadas para la prevención de riesgos con una indudable eficacia.

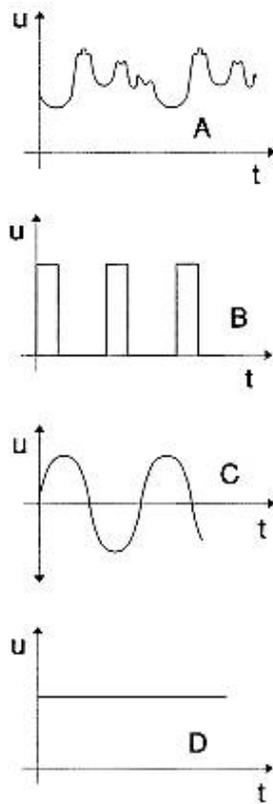


Fig. 1: Ejemplos de forma de onda. A: Señal de televisión, B: Tren de impulsos rectangulares (radar), C: Tensión industrial, D: Tensión constante.

Definiciones

Nos referimos a la NTP 400 en cuanto a los conceptos fundamentales de:

- Electrización.
- Electrocutión.
- Tetanización.
- Asfixia.
- Fibrilación ventricular.
- Umbral de percepción.
- Umbral de no soltar.
- Umbral de fibrilación ventricular.
- Período vulnerable del ciclo cardíaco.
- Etc.

También definimos los siguientes términos para el caso de descarga de condensadores:

- **Constante de tiempo «T»:** tiempo necesario para que la amplitud inicial de una magnitud de un campo que decrece según una ley exponencial sea multiplicada por el factor:

$$\frac{1}{e} = \frac{1}{2,718} = 0,3679$$

- **Duración de choque de una descarga «3T»:** tiempo que separa el comienzo de la descarga del momento en el que la intensidad de descarga ha disminuido hasta el 5% de su valor de cresta.
- **Umbral de dolor:** valor máximo de la cantidad de electricidad (Intensidad · tiempo), o de la energía específica (intensidad² · tiempo) que una persona puede soportar voluntariamente sin provocarle dolor, cuando mantiene un gran electrodo en las

manos.

- **Dolor:** sensación suficientemente desagradable para que no sea aceptada, por segunda vez, por la misma persona.

Corriente alterna de frecuencia superior a 100 Hz

Decíamos, en la NTP 400, que normalmente para uso doméstico e industrial se utilizan frecuencias de 50 Hz, pero que cada vez es más frecuente la utilización de frecuencias superiores y nos referíamos a los casos concretos de la aeronáutica, la soldadura, la electroterapia y los alimentadores de potencia con frecuencias que van desde 400 Hz hasta 1 MHz.

Para poder establecer los efectos que tiene la variación de la frecuencia se define el Factor de Frecuencia « F_f » como:

$$F_f = \frac{\text{Umbral a la frecuencia de la corriente estudiada}}{\text{Umbral a la frecuencia de 50 Hz}}$$

Debe tenerse en cuenta que los factores de frecuencia para los tres umbrales utilizados habitualmente (de percepción, de no soltar y de fibrilación ventricular) son diferentes entre sí.

La determinación del efecto de la corriente eléctrica para adultos, con un trayecto mano izquierda-pies se determina por medio de la figura 2 (ver figura 2 de la NTP 400), que nos dá los efectos de la intensidad en función del tiempo de aplicación de una corriente alterna de frecuencia 50 Hz. A esta figura 2 hay que aplicarle una corrección cuando la frecuencia es superior a 50 Hz.

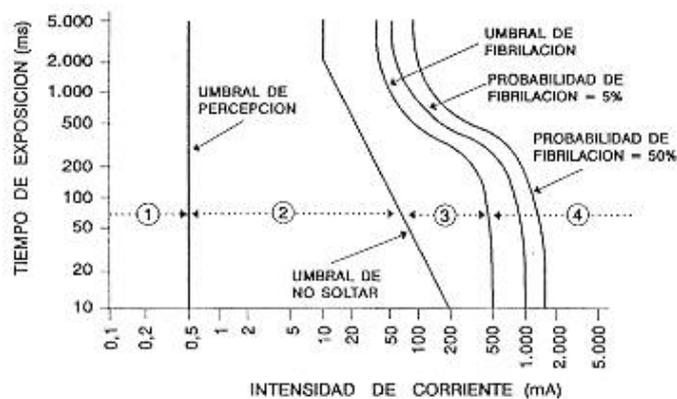


Fig. 2: Efectos de la corriente eléctrica alterna de 50 Hz, en adultos, con trayectoria mano izquierda-los dos pies

Vamos a estudiar tres márgenes de frecuencia y sus efectos.

I: Frecuencias comprendidas entre 100 Hz y 1.000 Hz inclusives

Los distintos umbrales se determinarán con las siguientes figuras:

- Umbral de percepción por medio de las figura 2 y figura 3.
- Umbral de no soltar por medio de las figura 2 y figura 4.
- Umbral de fibrilación por medio de las figura 2 y figura 5.

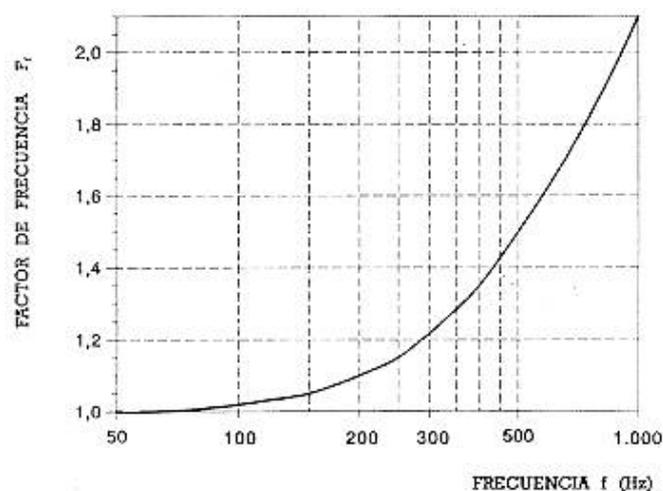


Fig. 3: Umbral de percepción. F_f para frecuencias comprendidas entre 50 y 1.000 Hz

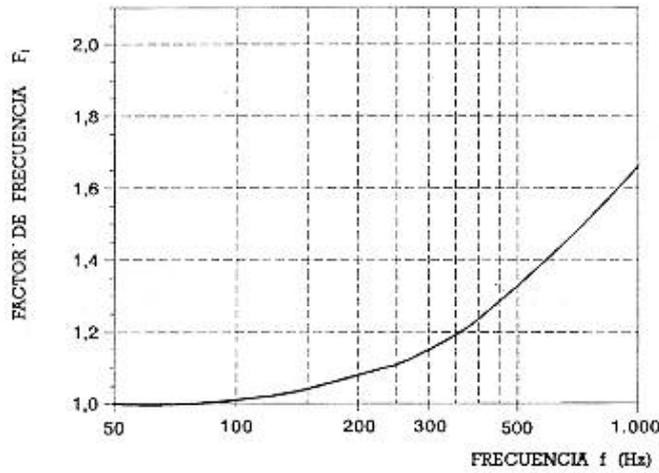


Fig. 4: Umbral de no soltar. F_f para frecuencias comprendidas entre 50 y 1.000 Hz

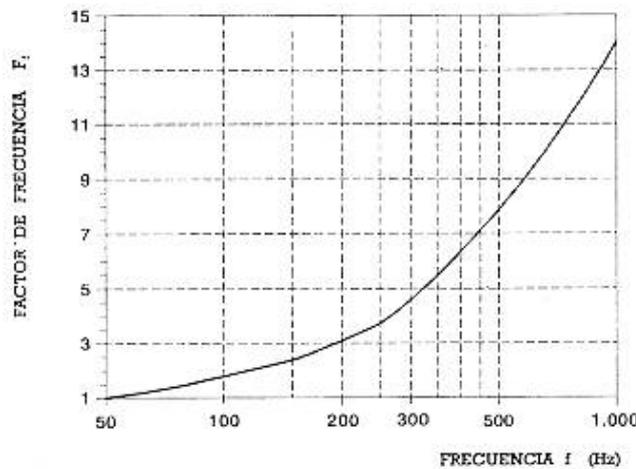


Fig. 5: Umbral de fibrilación. F_f para frecuencias comprendidas entre 50 y 1.000 Hz

Ejemplo: supongamos que deseamos conocer cuales son los umbrales de percepción, de no soltar y de fibrilación de una corriente alterna de frecuencia 500 Hz, para una persona adulta, con un recorrido de la corriente mano izquierda-los dos pies y con tiempo de exposición de 100 ms.

Según la figura 3: para una frecuencia de 500 Hz, el Factor de Frecuencia del umbral de percepción es, aproximadamente, $F_f = 1,5$. Luego, el umbral de percepción se obtendrá entre la relación:

$$1,5 = \frac{\text{Umbral a la frecuencia de la corriente estudiada}}{\text{Umbral a la frecuencia de 50 Hz}}$$

y la figura 2 para una frecuencia de 50 Hz (0,5 mA); es decir,

$$\text{Umbral de percepción: } 0,5 \times 1,5 = 0,75 \text{ mA}$$

Igualmente para el umbral de no soltar, según la figura 4: para una frecuencia de 500 Hz, el factor de frecuencia es, aproximadamente, $F_f = 1,33$. Luego, el umbral de no soltar se obtendrá por la relación

$$1,33 = \frac{\text{Umbral de no soltar a 500 Hz}}{55}$$

habiendo considerado que en la figura 2 para un tiempo de exposición de 100 ms obtenemos un valor de 55 mA para el umbral de no soltar.

Por tanto, el umbral de no soltar a 500 Hz será

$$\text{Umbral de no soltar } 55 \times 1,33 = 73,15 \text{ mA}$$

Por último, el umbral de fibrilación ventricular, según la figura 5: para una frecuencia de 500 Hz, el factor de frecuencia es,

aproximadamente, $F_f = 8$. En la figura 2 obtenemos para 50 Hz un valor de 450 mA (aproximadamente). Por tanto,

$$8 = \frac{\text{Umbral de fibrilación a 500 Hz}}{450}$$

Por consiguiente, el umbral de fibrilación a 500 Hz será

$$\text{Umbral de fibrilación: } 450 \times 8 = 3.600 \text{ mA}$$

En el caso de la fibrilación ventricular, la figura 5 se aplica únicamente para duraciones de choque superiores a un ciclo cardíaco. Para duraciones inferiores no se dispone de ningún valor experimental.

II: Frecuencias comprendidas entre 1.000 Hz y 10.000 Hz

Los distintos umbrales se calculan igual que en el caso anterior pero con las siguientes figuras:

- Umbral de percepción, con la figura 2 y la figura 6.
- Umbral de no soltar, con la figura 2 y la figura 7.

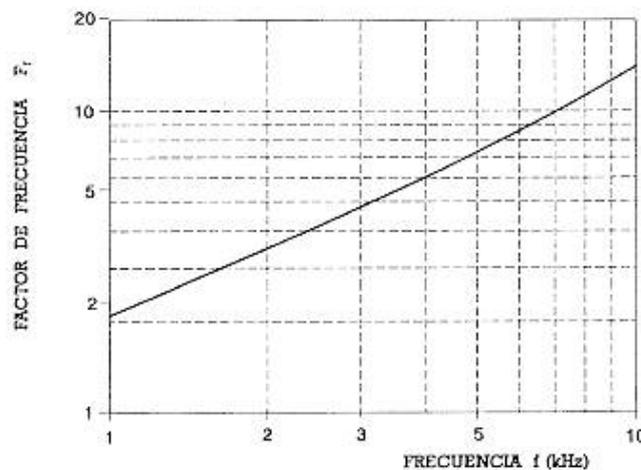


Fig. 6: Umbral de fibrilación. F_f para frecuencias comprendidas entre 1.000 y 10.000 Hz

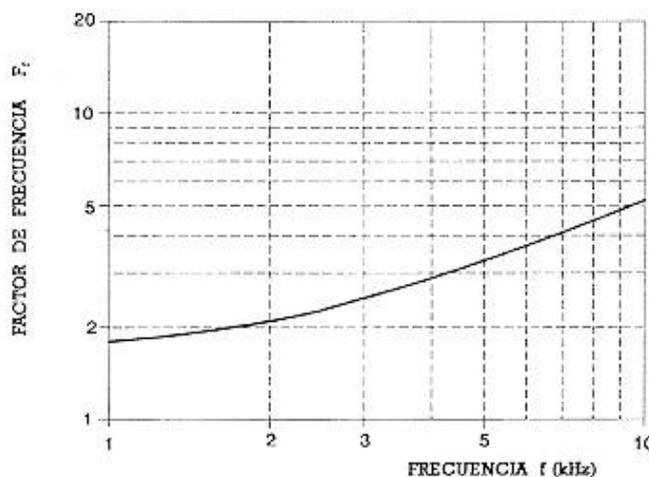


Fig. 7: Umbral de no soltar. F_f para frecuencias comprendidas entre 1.000 y 10.000 Hz

Para la determinación del umbral de fibrilación, no disponemos de curvas que nos relacionen la frecuencia con el factor de frecuencia.

III: Frecuencias superiores a 10.000 Hz

Para frecuencias comprendidas entre 10 kHz y 100 kHz, el umbral de percepción varía entre 10 mA y 100 mA (valores eficaces).

Para frecuencias superiores a 100 kHz y para corrientes de algunas centenas de miliamperios, el umbral de percepción, que a frecuencias inferiores se percibe como la clásica sensación de picoteo, se manifiesta como una sensación de calor.

Para valores superiores a 10 kHz, tanto para el umbral de no soltar como para el umbral de fibrilación no se disponen de valores

experimentales; pero tampoco se conoce ningún incidente a frecuencias superiores a 100 kHz. Sin embargo a estos valores de la frecuencia, para intensidades de algunos amperios y en función de la duración del paso de la corriente, se pueden producir quemaduras.

Descarga de condensadores

Las corrientes de impulsión única de corta duración, ocasionadas por descarga de condensadores pueden ser una fuente de peligro en el caso de defecto de aislamiento de los componentes electrónicos o en el caso de contacto con las partes activas de tales aparatos.

Este peligro no solo se presenta cuando el equipo eléctrico está conectado, y por tanto en tensión, sino que el peligro puede permanecer después de haber realizado el corte efectivo de todas las fuentes de alimentación. Esto es debido a que los condensadores pueden quedarse cargados al realizar la desconexión de los equipos.

Este fenómeno eléctrico puede suponer un serio peligro en los trabajos de mantenimiento.

Con el transcurso del tiempo, el condensador inicialmente cargado, tenderá a autodescargarse, según el proceso que se indica a continuación.

Por disposición constructiva de un condensador, es obvio que a no ser que las placas estén separadas por un dieléctrico perfecto, tal como el vacío, existirá siempre un pequeño valor de corriente eléctrica entre las placas. Tal corriente de conducción puede ser tenida en cuenta, aproximadamente, por medio de una gran resistencia «R» en paralelo con el condensador, como se muestra en el circuito equivalente de la figura 8.

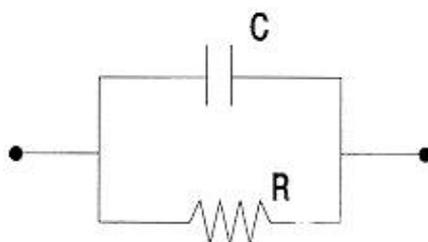


Fig. 8: Circuito equivalente de un condensador

Por esta razón, cualquier carga del condensador llega a anularse al cabo de un tiempo más o menos largo. La pérdida de carga se hace tanto más lentamente cuanto mayor es R. El tiempo que transcurre hasta que la carga queda reducida a «1/e» de su valor original (siendo «e» el número neperiano), es lo que se llama constante de tiempo. Tal valor puede oscilar entre unos pocos minutos o menos, para un condensador electrolítico, y varios meses, o aún más tiempo para un condensador con dieléctrico de plástico.

Por lo tanto, hay un peligro eléctrico en las baterías de condensadores de los equipos eléctricos; por ejemplo, en algunas fuentes de alimentación de los láseres, en concreto las de los gases ionizados y los de Neodimio. Dichos condensadores pueden permanecer cargados incluso después de que todo el sistema láser haya sido apagado; una descarga inoportuna de los mismos durante la manipulación en la fuente de alimentación, por ejemplo para comprobar algún fusible, puede llegar a ser mortal. Este proceso es el siguiente:

Supongamos que tenemos un circuito con un condensador alimentado por una fuente de tensión alterna, según se representa en la figura 9 y que la resistencia del circuito es nula.

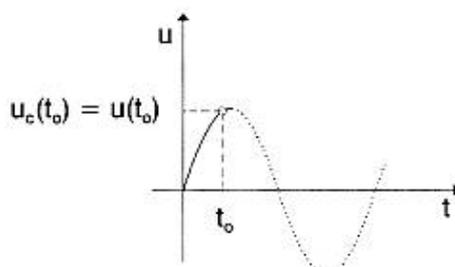
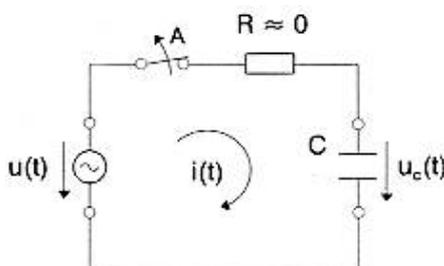


Fig. 9: Estado de carga del condensador al desconectar el circuito

Si la fuente de tensión alterna describe una curva senoidal y en un instante t_0 interrumpimos la corriente abriendo el interruptor A, el condensador quedará cargado con la tensión que suministraba la fuente de tensión en el momento t_0 (suponemos un circuito ideal).

Cuando un individuo de resistencia R_H toca los bornes del condensador y con ello cierra el circuito, el condensador tenderá a descargarse a través del individuo y consecuentemente, ocasionando en él una descarga eléctrica de intensidad variable en el tiempo « $I(t)$ » según se indica en la figura 10.

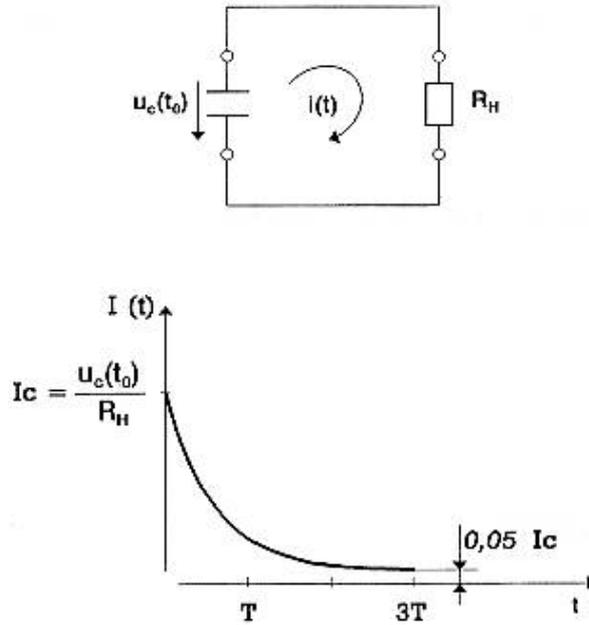


Fig. 10: Descarga de un condensador a través de un individuo de resistencia R_H

Para la determinación de los efectos de la descarga de un condensador en nuestro cuerpo, distinguimos dos casos particulares:

- a. Si la duración de choque de la descarga ($3T$) es mayor de 10 milisegundos se aplican los valores indicados en la figura 11 (ya descrita en la NTP 400 Fig 3), tomando como intensidad el valor eficaz de la intensidad de descarga. Siendo la intensidad de cresta:

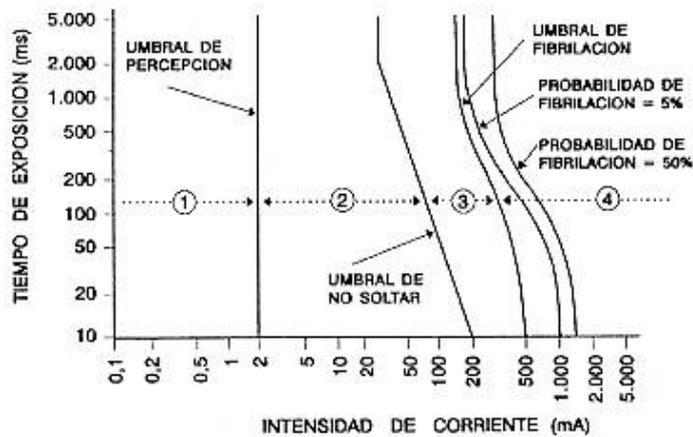


Fig. 11: Efectos de la corriente continua ascendente, en adultos, con trayectoria pies-mano izquierda

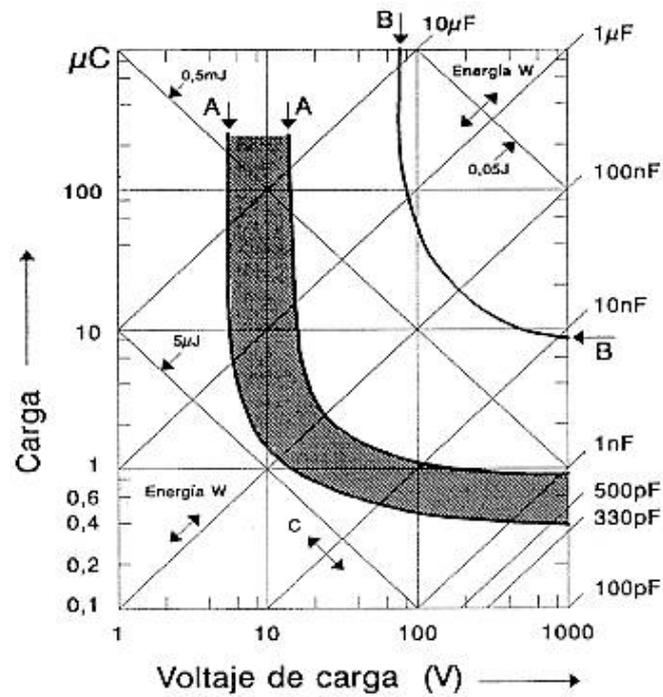
$$I_{CRESTA} = \frac{U_C \text{ en el instante } t_0}{R_H \text{ inicial del individuo}}$$

y la intensidad eficaz, para este tipo de onda:

$$I_{EFICAZ} = \frac{I_{CRESTA}}{\sqrt{6}}$$

- b. Cuando la duración de choque de la descarga ($3T$) es igual o menor de 10 ms, se siguen los siguientes criterios:

Los umbrales de percepción y de dolor dependen de la forma de los electrodos, de la carga de impulsión y de su valor de cresta. En la figura 12 se representan los umbrales de percepción y de dolor para descargas de condensadores, teniendo las manos secas y con grandes superficies de contacto.



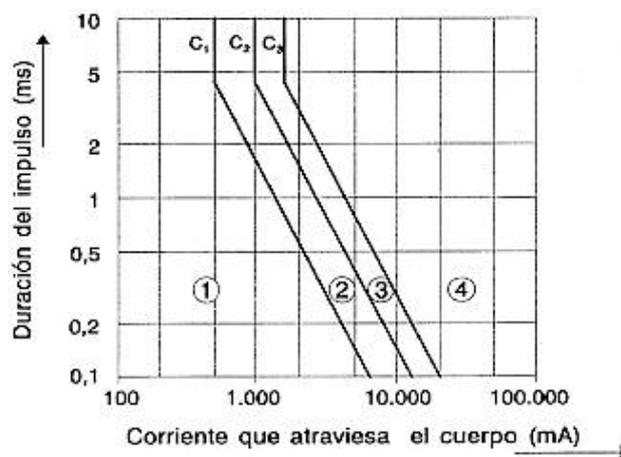
ZONA A: UMBRAL DE PERCEPCION

CURVA B: UMBRAL TIPICO DE DOLOR

Fig. 12: Umbrales de percepción y de dolor, para una duración de choque de descarga $3T \leq 10$ ms, para un trayecto mano-mano, con las manos secas y elevada superficie de contacto

B umbral de fibrilación ventricular depende de la intensidad de la corriente de impulsión, de la fase del corazón a la que la impulsión comienza, del trayecto de la intensidad en el cuerpo y de las condiciones fisiológicas del individuo.

Experiencias sobre animales demuestran que para impulsiones de corta duración, la fibrilación solo se produce si la impulsión tiene lugar durante el período vulnerable del ciclo cardíaco. En la figura 13 se representan las zonas con peligro de fibrilación para un trayecto mano izquierda-los dos pies, con una duración de choque de descarga igual o inferior a 10 ms, considerando la intensidad eficaz como la corriente que atraviesa el cuerpo.



- ZONA 1: SIN PELIGRO DE FIBRILACION
- ZONA 2: PROBABILIDAD DE FIBRILACION ≤ 5 %
- ZONA 3: PROBABILIDAD DE FIBRILACION ≤ 50 %
- ZONA 4: PROBABILIDAD DE FIBRILACION > 50 %

Zonas de peligro para la descarga de un condensador, para valores de $3T \leq 10$ ms, para un trayecto mano izquierda-los dos pies

(1) Mº DE INDUSTRIA Y ENERGÍA
Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión

(2) Mº DE INDUSTRIA Y ENERGÍA
Reglamento sobre Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación.

(3) PARRA PRIETO, V.
Electrotecnia I -Circuitos-
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Madrid

(4) RUPÉREZ CALVO, Mª J., LÓPEZ MUÑOZ, G.
Algunas cuestiones sobre el Láser
INSHT Madrid

(5) UNE 20-572-93 Parte 2
Efectos de la corriente eléctrica al pasar por el cuerpo humano
(Equivalente a CEI 479-2: 1987)

(6) CEI 479-1
Effects of current on human beings and livestock - Part 1. General aspects
Third edition 1994-09

(7) Nota Técnica de Prevención 400. Luis Pérez Gabarda
Corriente eléctrica: efectos al atravesar el organismo humano
INSHT Madrid