

# NOTAS SOBRE SEGURIDAD ELÉCTRICA

## Referencias bibliográficas

Technical Specification CEI-IEC-TS-60479-1, cuarta edición, 2005

Edward A. Lacy, Handbook of Electronic Safety Procedures, Prentice-Hall, New Jersey, 1977

## Referencias en línea

<http://www.tlc-direct.co.uk/Book/3.4.1.htm>

## SECCIÓN I

### El cuerpo humano como elemento de circuito

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

1. Impedancia de la piel en la zona de entrada.
2. Impedancia interna del cuerpo.
3. Impedancia de la piel en la zona de salida.

La impedancia de la piel varía de un individuo a otro dependiendo de la edad, sexo, condición física, callosidades, etc., y en el mismo individuo depende de la temperatura y humedad (transpiración). La impedancia también depende del tiempo durante el que circula la corriente, haciéndose menor a medida que este transcurre (es decir, circula más corriente) y de la tensión aplicada: a partir de los 50 V alternos la impedancia decrece al aumentar el voltaje (circula más corriente). La impedancia también depende de la frecuencia. Su impedancia está en el intervalo de 1000 a 100000 Ohms.

La impedancia interna del cuerpo es esencialmente resistiva, siendo la resistencia de brazos y piernas mucho mayor que la del tronco. Los tejidos con mayor resistencia son huesos y grasa, mientras que músculos y nervios presentan la menor resistencia. El modelo más elemental puede representar al cuerpo humano como una solución salina la que, por ende, presenta poca resistencia. La resistencia interna del cuerpo está en el intervalo 300-1000 Ohm, siendo común aceptar el valor de 500 Ohm como referencia.

1 Este documento es solamente informativo y no debe usarse como referencia, norma ni especificación técnica.

La piel, constituida por células muertas, presenta la mayor resistencia. Sin embargo, el paso de la corriente puede producir sudoración, disminuyendo la resistencia de la piel. Esta también se hace despreciable en caso de heridas. En esas condiciones la impedancia del cuerpo es del orden de 500 Ohm. En el caso contrario, la impedancia total del cuerpo es la suma  $Z_{total}=Z_{contacto}+Z_{interna}$ .

Ejemplo 1: Determinar la corriente que circularía por el cuerpo en caso de accidente con la red a 220 V.

La corriente, según la ley de Ohm, generaría en ese caso una corriente  $I=220/500$  A= 440 mA, la que es mortal.

Ejemplo 2: Una persona puede morir debido a la corriente alterna (50 Hz) si la corriente que circula por el corazón supera los 60 mA. Determinar el máximo voltaje que puede considerarse seguro.

En este caso se determina el voltaje usando la ley de Ohm:  $V_{m\acute{a}x}=RI=500 \text{ Ohm} * 60 \text{ mA}= 30 \text{ V} (!)$

Nótese que accidentes mortales a ese voltaje son extremadamente infrecuentes, debido entre otras cosas a que a esos voltajes la resistencia de la piel aun no es despreciable (figura 1).

A pesar de la información de la figura 1, un 5% de la población puede presentar impedancia total de unos 1000 Ohm (mano a mano) si el contacto es de gran área y las manos impregnadas con agua salada. Bajo estas condiciones se calcularía una tensión de seguridad máxima de 60 V. Para efectos prácticos se considera que el máximo voltaje con que puede operarse dentro del margen de seguridad está en el intervalo 50-60 V.

Debe recordarse que la relación entre tensión y corriente no es necesariamente lineal, ya que el cuerpo humano no es un sistema ohmico. En particular, su impedancia depende del tiempo (disminuyendo a tiempos mayores).

Voltajes moderadamente elevados, como los 380 V de la red trifásica, pueden perforar (eléctricamente) la piel reduciendo fuertemente la impedancia y, por lo tanto, derivando en corrientes mucho mayores. De hecho, los accidentes con 380 V suelen ser fatales.

Figura 1. Valores representativos (no son el promedio) de la impedancia de una persona:

- mano a mano,
- área de contacto pequeña (tomando cables con los dedos)
- condiciones de piel húmeda.

Los valores se reducen si el área de contacto es grande.

Un 5% de la población presenta valores del orden de la mitad de lo representado en la figura, es decir, es más sensible.

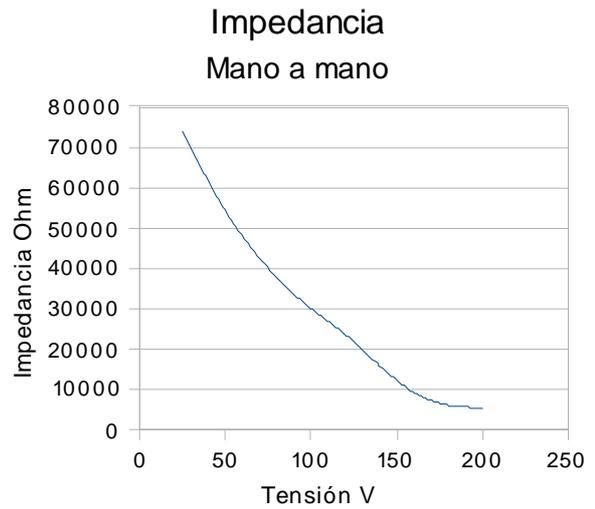
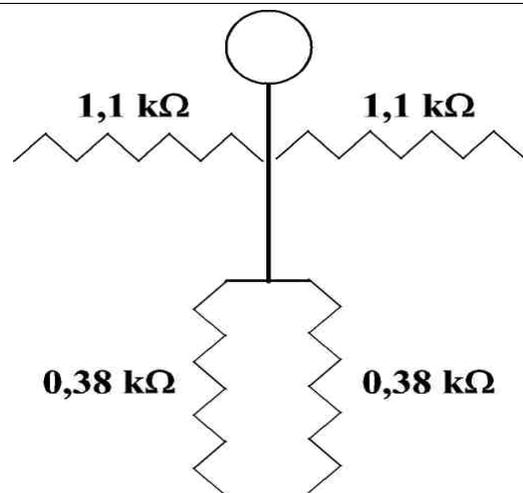


Figura 2

Esquema de la resistencia de los miembros, frente a la cual la del tronco es despreciable. Corresponde a:

- Manos con contacto de área mediana
- Pies con contactos de área grande
- Ambiente seco

Las condiciones son diferentes a las de la figura 1, por lo que también difieren los valores de impedancia.



Los valores entregados son válidos para corrientes alternas a baja frecuencia. Las impedancias para corriente continua son algo mayores.

## SECCIÓN II

### Definiciones

- 1) Se dice que una persona se **electriza** cuando circula corriente por ella.
- 2) **Electrocución**: resultado fatal del accidente anterior .
- 3) **Fibrilación ventricular**: movimiento anárquico (no organizado) de las fibras musculares de los ventrículos cardíacos. El corazón pierde la facultad de enviar sangre con resultado fatal. Constituye la principal causa de muerte en accidentes eléctricos. Requiere de reanimación con desfibrilador.
- 4) **Fibrilación auricular**: movimiento anárquico (no organizado) de las fibras musculares de las aurículas cardíacas. Es menos severa que la ventricular.
- 5) **Tetanización**: contracción involuntaria de los músculos debido al paso de la corriente eléctrica.
- 6) **Asfixia**: fallo respiratorio debido a que la corriente afecta el centro nervioso que regula la función respiratoria. La víctima queda incapacitada de gritar pidiendo ayuda.
- 7) Fractura **primaria**: aquella debida directamente a la tetanización. La contracción involuntaria puede ser suficientemente violenta para quebrar los propios huesos.
- 8) Fractura **secundaria**: aquella producida como consecuencia indirecta de la electrización (al caer de una escala, por ejemplo).
- 9) **Electrodo**: punto de contacto por el que entra (o sale) la corriente al cuerpo.
- 10) **Quemaduras**: se deben directamente al efecto Joule. En la piel se clasifican en cuatro zonas.
  - (a) Zona 0: ninguna o escasa alteración de la piel (la piel en contacto con el electrodo puede asumir un color grisáceo con superficie rugosa si el contacto es de varios segundos).
  - (b) Zona 1: enrojecimiento de la piel, hinchazón en los bordes donde estaba el electrodo.
  - (c) Zona 2: coloración parduzca de la piel que estaba en contacto con el electrodo. Hinchazón si el contacto fue de varios segundos
  - (d) Zona 3: carbonización de la piel.
  - (e) Puede haber quemaduras internas, dependiendo de la trayectoria de la

corriente.

11) Clasificación de la tensión

- (a) **Muy baja tensión (MBT):** hasta 50 V rms.
- (b) **Baja tensión (BT):** desde 50 V hasta 1000 V rms.
- (c) **Media tensión (MT):** desde 1000 V hasta 33000 V rms.
- (d) **Alta tensión (AT):** por encima de 33000 V rms.

## **SECCIÓN III**

### **Efectos biológicos de la corriente alterna**

La expresión de uso común es “me dió la corriente”, ya que nadie dice “me dió la tensión” o “me dió el voltaje”. Esta afirmación es correcta, puesto que los efectos biológicos están determinados por la corriente que circula por el organismo, su duración y la trayectoria. Eso no significa que la tensión sea completamente irrelevante: por encima de 250 V rms (particularmente a los 380 V rms de la línea trifásica) la piel deja de ser una barrera resistiva, por lo que solamente subsiste la resistencia interna del cuerpo, que es baja y puede reducirse a 330 Ohm en el caso más desfavorable.

Los efectos de la corriente se describen en función de la corriente creciente.

#### **Umbral de percepción**

Es el valor mínimo de la corriente que puede ser detectada por una persona. La norma CEI 479-11994 establece dicho valor como de 0,5 mA independientemente de la duración de la corriente. Se trata de un valor referencial ya que diferentes individuos tienen umbrales de percepción diferentes.

#### **Umbral de reacción**

Es el valor mínimo de la corriente que genera una reacción muscular (involuntaria). Su valor no está bien definido.

#### **Umbral de no soltar**

Las contracciones musculares involuntarias tienen como consecuencia peligrosa que la mano se aferra al electrodo siendo imposible soltarlo voluntariamente. El umbral es el valor máximo de corriente al cual es posible soltarse. Nuevamente varía de un individuo a otro, pero se ha establecido un valor convencional en torno a los 10 mA, cualquiera que sea el tiempo de exposición.

#### **Umbral de fibrilación ventricular**

Es la corriente mínima que puede causar fibrilación ventricular, accidente generalmente mortal. Dicho umbral decrece considerablemente si la corriente se aplica por una duración superior a la de un ciclo cardíaco. La ocurrencia de la fibrilación para tiempos menores depende de cuál fue la parte del ciclo cardíaco afectada, ya que

aproximadamente un diez por ciento de éste es particularmente sensible. Se han construido curvas intensidad-tiempo por debajo de las cuales la ocurrencia de la fibrilación es improbable.

La figura 3 muestra los umbrales anteriores desplegados como curvas en el plano Tiempo de exposición vs Corriente. La curva vertical de la izquierda representa el umbral convencional de percepción. A la izquierda de la línea (zona A), es decir, a corrientes menores, el sujeto no experimenta sensación alguna ante el paso de la corriente. Se recuerda que se trata de una curva convencional, diferentes sujetos tienen umbrales diferentes.

La curva segmentada representa el umbral de no soltar convencional, mientras que la continua (en azul) es una curva real medida en personas. En la zona B el sujeto experimenta sensaciones crecientemente desagradables, pero todavía es capaz de soltar voluntariamente los electrodos.

La curva en rojo representa el umbral de fibrilación, estimado para incluir a los individuos más sensibles (existen curvas correspondiente al 5% más sensible, al 50% y al 95%, todas ellas algo más a la derecha de la representada). En la zona C el sujeto no puede soltar los electrodos, pero aun no corre peligro de muerte si la corriente se mantiene constante (recordar que esta crece con el tiempo).

Finalmente, a la derecha del umbral de fibrilación, zona D, existe riesgo creciente de fibrilación y muerte. Mucho más a la derecha la fibrilación es acompañada de quemaduras.

Nótese que durante el accidente eléctrico la corriente aumenta en función del tiempo, por lo que la condición inicial y el riesgo del sujeto también lo hacen. Una corriente de 50 mA, por ejemplo, puede permitir a algunos sujetos desprenderse durante los primeros 0,1 ms (aunque el tiempo de reacción de una persona es varias décimas de milisegundos). Pasado ese tiempo el sujeto no se puede desprender y después de 0,5 s corre riesgo de fibrilación.

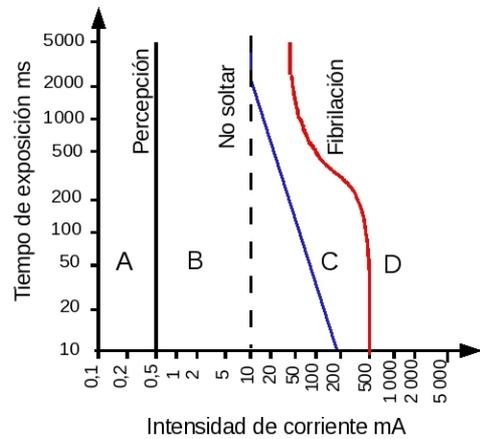
También debe considerarse que la resistencia del sujeto disminuye con el tiempo. Luego, las condiciones de un accidente que generen inicialmente una corriente por debajo del umbral de no soltar pueden generar corrientes mayores y llevar al sujeto a condiciones de mayor riesgo. Los dispositivos de seguridad, que se mencionan en otra sección, se especifican precisamente a través de sus tiempos de respuesta, que están regulados por

7 Este documento es solamente informativo y no debe usarse como referencia, norma ni especificación técnica.

normas.

Figura 3

Umbrales de percepción, de no soltar y de fibrilación.



Las curvas anteriores corresponden a corriente alterna de baja frecuencia (hasta 100 Hz). Las frecuencias más peligrosas, es decir, aquellas a las cuales el umbral de fibrilación es menor, están en el intervalo 50-60 Hz, precisamente la que se usa en la alimentación eléctrica en casi todos los países del mundo. Los umbrales son mayores para corriente continua. Finalmente, corrientes de muy alta frecuencia presentan el “efecto piel”, circulan por la superficie del conductor, por lo que no generan fibrilación, efecto que es reemplazado por extensas quemaduras superficiales.

## SECCIÓN IV

### Instalación monofásica

La alimentación eléctrica domiciliar es sinusoidal con una frecuencia nominal de 50 Hz, es decir, la tensión de la red es una función de la forma  $V(t)=V_0\sin(\omega t)$ , donde  $V_0=220\sqrt{2}V=311V$ . Su valor medio es cero y el valor cuadrático medio o rms (“root mean square”, en inglés) es 220V.

La red consta de tres alambres (un hilo) o cables (varios hilos) de color codificado:

-Rojo = fase o “vivo” conectado a la red a 220 V. Es uno de los agujeros (o patas) extremos del enchufe.

-Blanco = neutro nominalmente a 0 V, conectado generalmente a una “tierra de trabajo” cuya ubicación está reglamentada. Es el agujero (o pata) central del enchufe

-Verde o verde con amarillo = tierra o “masa”, a 0 V, conectada a una “tierra de protección” diferente de la anterior. Es el otro de los agujeros extremos (o patas) del enchufe.

En Chile los enchufes son simétricos, pudiendo las patas extremas del enchufe conectarse indistintamente a neutro y fase, lo que desde el punto de vista del funcionamiento de los equipos es indiferente, aunque no lo sea desde el punto de vista de la seguridad. En algunos países los enchufes son asimétricos y pueden conectarse de un solo modo. En algunos laboratorios de la facultad la fase está rotulada.

Los primeros dos colores (rojo y blanco) pueden ser substituidos por otros, pero el color de la tierra es una convención internacional. Esto significa que la tierra siempre debe conectarse a través de un cable de ese color (a menos que se trate de un cable desnudo). Recíprocamente, JAMÁS debe aplicarse tensión a un cable de ese color.

La corriente circula normalmente (es decir, si no hay fallas) entre la fase y el neutro. Los *fusibles de sobrecarga* se interrumpen la fase si la corriente que circula por el circuito supera la capacidad de la línea, lo que podría generar recalentamiento de los cables con riesgo de incendio. Esta condición se produce debido a fallas en un equipo o al conectar demasiados equipos a la línea (particularmente estufas, microondas, hervidores de agua).

La carcasa metálica de los equipos se conecta a la tierra, del mismo modo que algunas partes interiores. Existen equipos llamados de “doble aislación” (secadores de pelo, algunos taladros) que no se conectan normalmente a la tierra; de hecho se

recomienda *no* conectar algunos de ellos. En condiciones normales no circula corriente hacia la tierra. Si debido a una falla de aislación la carcasa se energiza (es decir, se conecta a la fase), la corriente es desviada hacia la tierra, protegiendo de ese modo al operador.

Una protección adicional para el operador se provee a través de otros interruptores llamados “diferenciales”, que interrumpen la fase. Estos dispositivos se encuentran en el tablero eléctrico, junto a los fusibles de sobrecarga. El diferencial compara la corriente que ingresa al circuito por la fase con la que sale por el neutro. En condiciones normales de operación ambas deben ser iguales. Si existe una diferencia, es que hay una fuga a la tierra en alguna parte del circuito. La curva de fibrilación de la figura 3 ha sido usada para construir interruptores diferenciales que operan antes de que la fuga a tierra, presumiblemente a través de una persona, alcance el umbral de fibrilación.

Debe hacerse notar que en algunos ambientes en que operan máquinas de potencia (talleres) no se puede instalar aun diferenciales, ya que éstos operarían por la sola puesta en marcha de las máquinas. El diferencial no provee protección alguna si el operador, bien aislado de la tierra, queda conectado entre fase y neutro. Finalmente, un ejemplo: si una persona queda conectada *directamente* entre la fase y tierra, bajo condiciones desfavorables (manos húmedas) en que su resistencia puede reducirse a 400  $\Omega$ , circularía una corriente  $I=220V/400\Omega=550$  mA, corriente por encima del umbral de fibrilación incluso a tiempos menores que el requerido para accionar el interruptor diferencial.