



Universidad de la República  
Uruguay

**nib**

núcleo de ingeniería biomédica

# **ELECTRICIDAD, ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN BIOMÉDICA CON SEGURIDAD**

**Clase 5 – Efectos de la corriente eléctrica sobre la materia viva  
1 de abril de 2025**

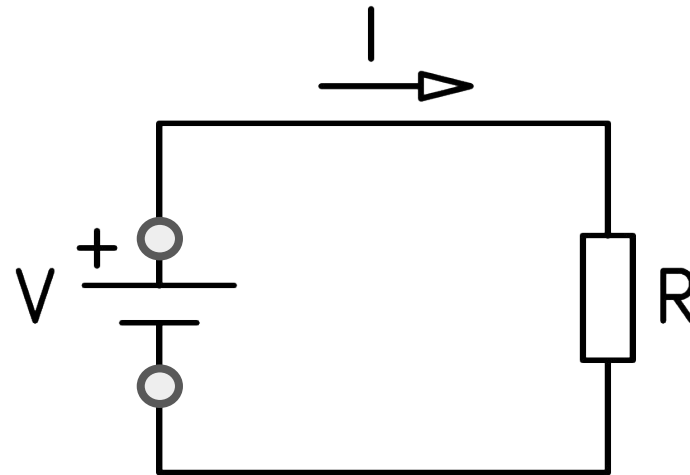
Prof. Franco Simini, Ing. Isabel Morales,  
Lic. Natalia Garay, Br. Alejandra Rial.

núcleo de ingeniería biomédica de las Facultades de Medicina e Ingeniería  
HC piso 15 sala 2

# Contenido de la clase

- Ley de ohm y modelo eléctrico de la membrana
- Efectos fisiológicos de la corriente eléctrica
- Parámetros que afectan a los efectos fisiológicos
- Microshocks y macroshocks
- Fibrilación ventricular
- Modelo eléctrico del cuerpo humano

# Ley de ohm



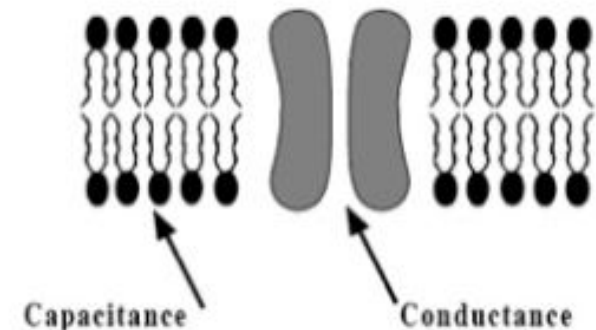
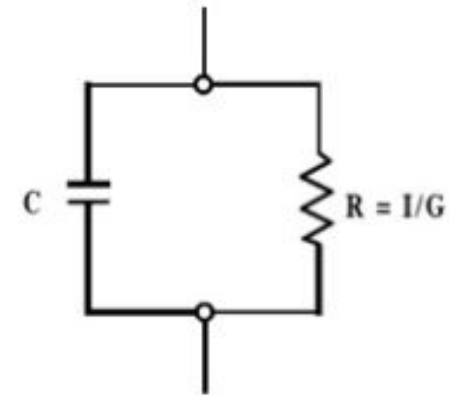
$$I = \frac{V}{R}$$

- I: Es un fenómeno físico causado por el desplazamiento de una carga (ión o electrón) - **Amperios**
- V: Es una magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos - **Voltios**
- R: Es una medida de la oposición al flujo de corriente en un circuito eléctrico - **Ohms**

# Circuito equivalente membrana

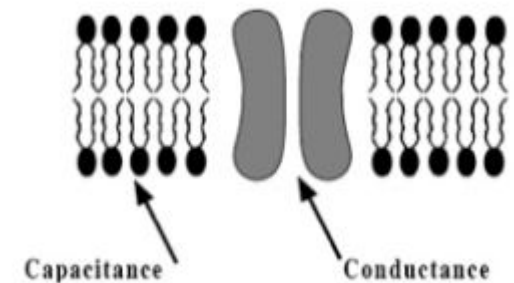
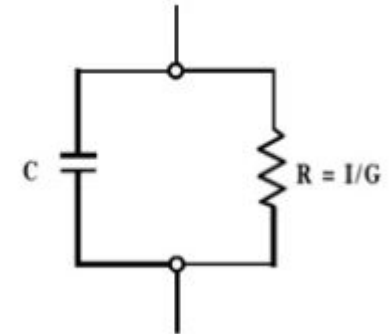
Es un modelo que permite entender el comportamiento eléctrico de la membrana

- Membrana lípidica  
capacitor que almacena cargas
- Canales iónicos  
resistencia frente a una corriente  
despolarizante o hiperpolarizante
- Potencial de membrana  
generada por la intensidad de corriente

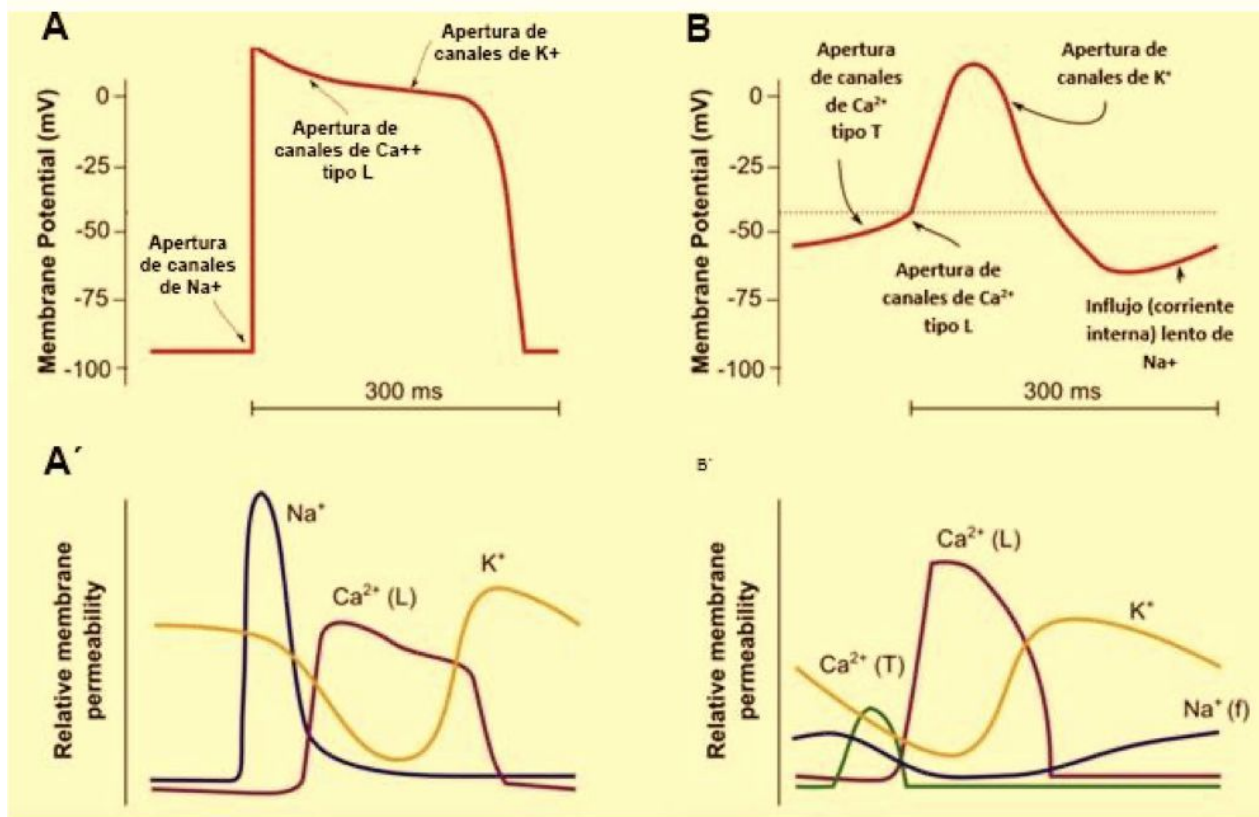


# Circuito equivalente membrana

<b>Estado de la membrana</b>	<b>Comportamiento eléctrico</b>	<b>Efecto fisiológico</b>
En reposo	Alta resistencia (carga estable)	Estado basal
Exitada (despolarización)	Resistencia disminuye (canales abiertos)	Potencial de acción / contracción
Estimulada desde el exterior	Estímulo baja resistencia (artificialmente)	Activación anómala (fibrilación)



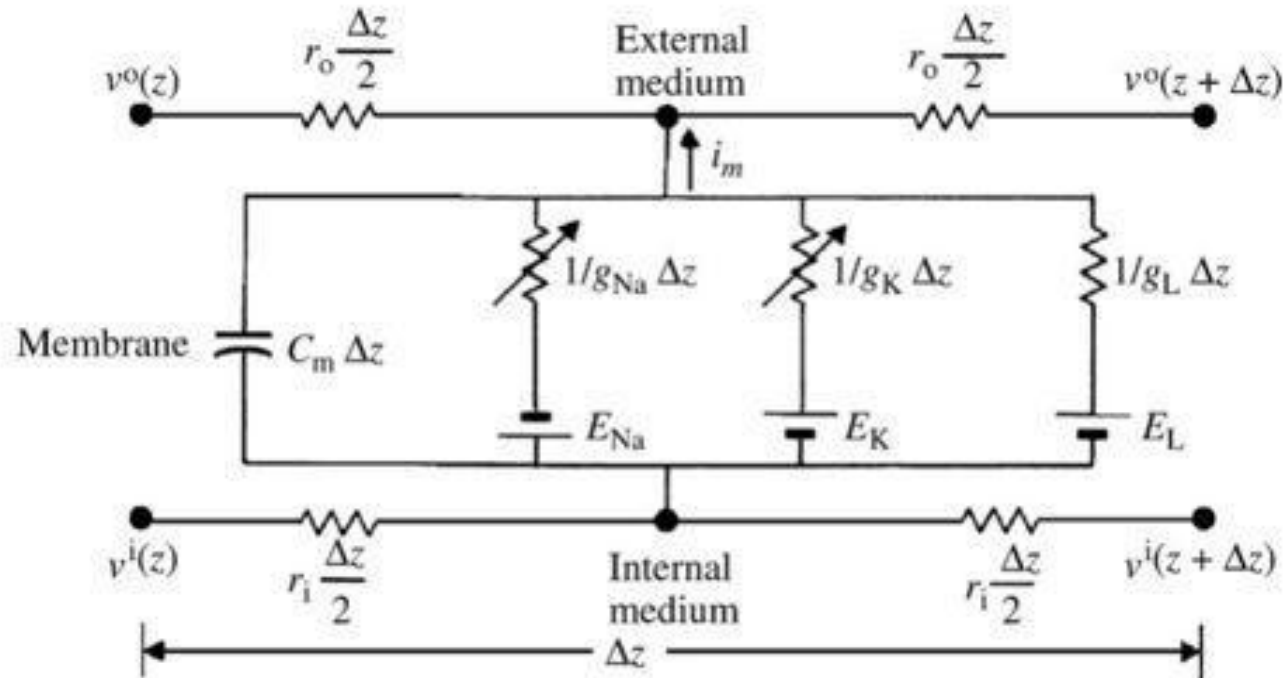
# Circuito equivalente membrana



<https://fisiologia.facmed.unam.mx/wp-content/uploads/2019/10/Practica-potencial-de-acci%C3%B3n-cardiaco.pdf>

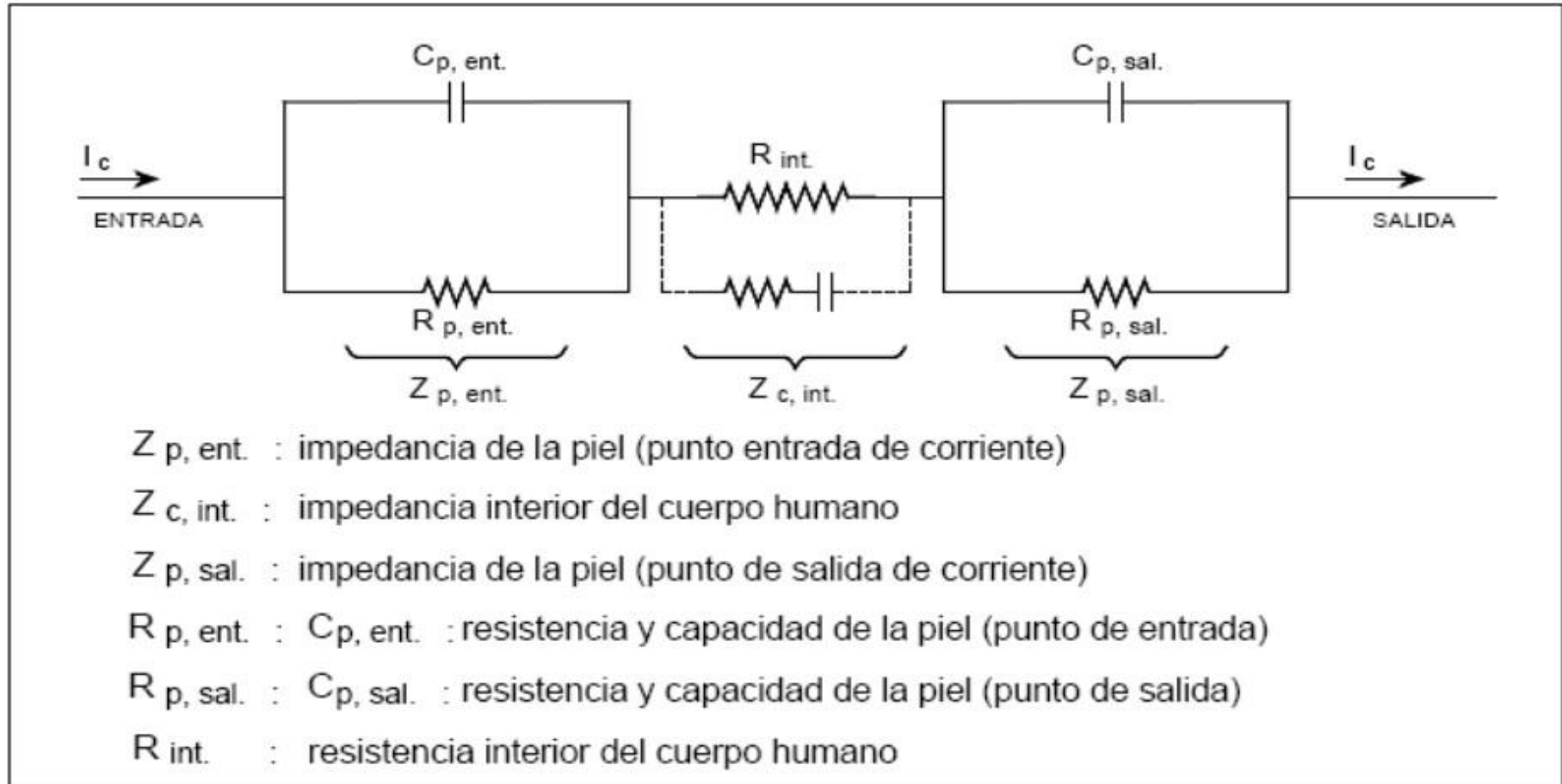
Una membrana cardíaca estimulada por una corriente externa puede desencadenar una fibrilación ventricular, incluso con corrientes pequeñas si el trayecto incluye el corazón.

# Circuito equivalente membrana



- Diagrama del circuito equivalente de red de una pequeña longitud de una celda cilíndrica de una fibra muscular esquelética.
- La membrana se caracteriza por una capacitancia de membrana específica y conductancias de membrana específicas.

# Circuito equivalente de la piel



Impedancia (Z) ; Corriente (I) ; Capacitancia (C) ; Resistencia (R)

R interna aproximadamente 500 ohms

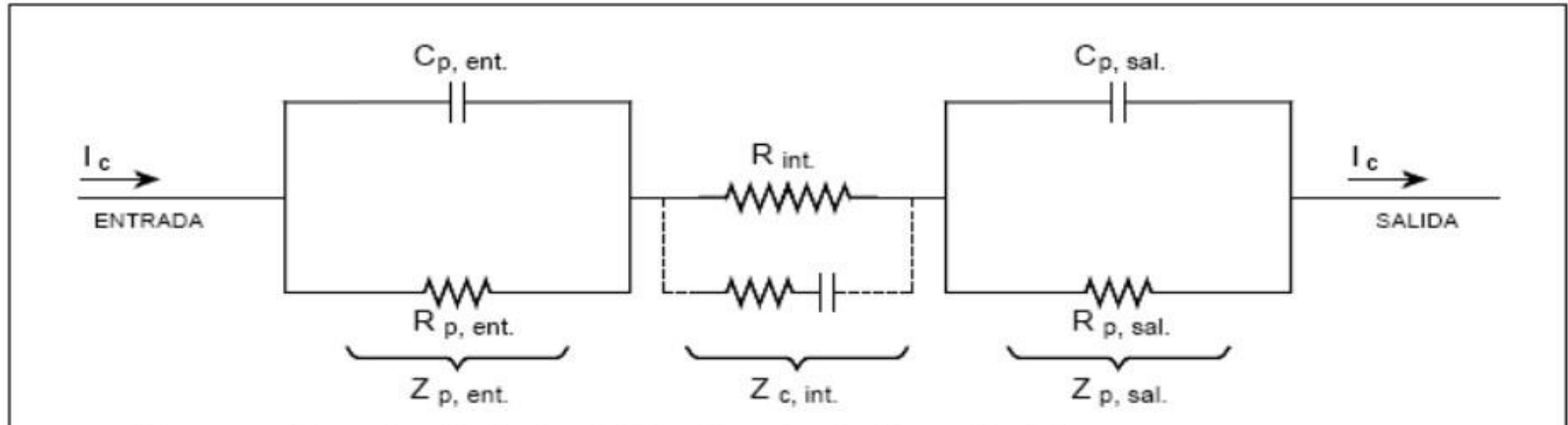


# Circuito equivalente de la piel

¿Para qué se usa este modelo?

- Para estimar el flujo de corriente en accidentes eléctricos
- En el diseño seguro de equipos biomédicos
- Para comprender el riesgo de fibrilación o microshocks
- En estudios de neuroestimulación, fisioterapia y cirugía eléctrica

# Circuito equivalente de la piel

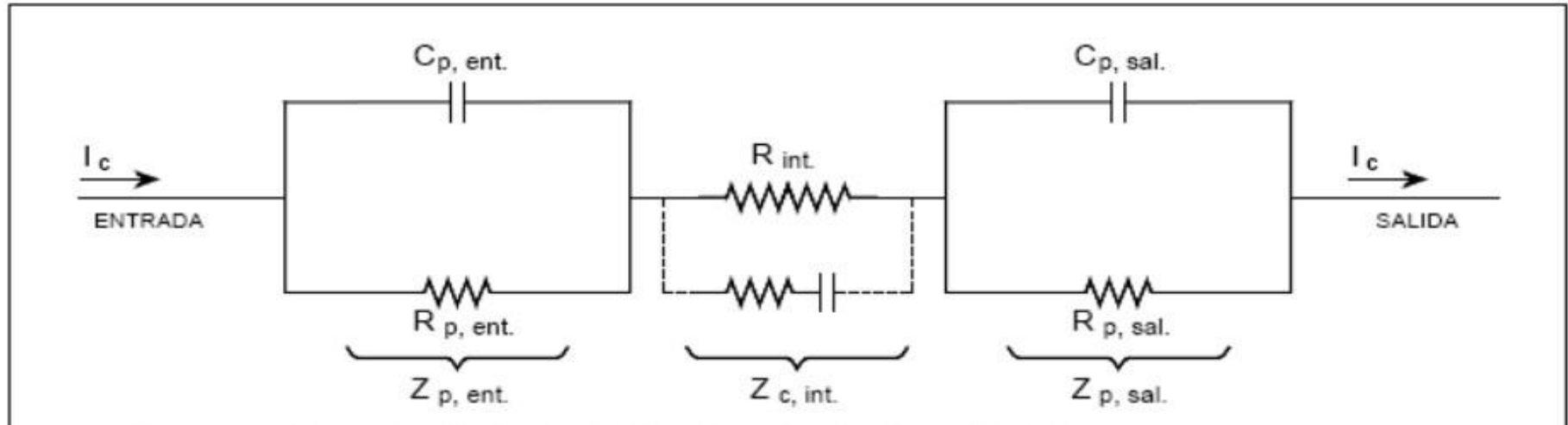


Caso 1: Frecuencia se acerca a señales DC o de bajas frecuencias, capacitor actúa como circuito abierto

La corriente fluye sólo a través de las resistencias.

La **impedancia** del cuerpo humano, alta a baja frecuencia

# Circuito equivalente de la piel



Caso 2: Frecuencia aumenta (AC), el capacitor ofrece menos impedancia.

La corriente pasa más fácilmente, baja impedancia total

La **impedancia** del cuerpo humano, disminuye con el aumento de la frecuencia

Por eso, el cuerpo humano presenta menor impedancia a  
frecuencias altas

(como las usadas en bisturíes eléctricos,  $>100$  kHz)

# Impedancia del cuerpo humano

**Impedancia (Z):** Oposición al flujo de la corriente en un circuito de corriente alterna.

Se habla de impedancia porque tiene en cuenta los efectos de capacitancia e inductancia que dependen de la frecuencia.

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

Donde:

- $R$  = resistencia del cuerpo (piel, tejidos)
- $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$  = reactancia capacitiva de la piel
- $f$  = frecuencia
- $C$  = capacitancia del cuerpo

# Impedancia del cuerpo humano

La **impedancia** del cuerpo humano depende de factores internos y externos:

Tensión de contacto.

Condiciones de humedad de la piel.

Frecuencia de la corriente.

Condiciones del contacto: presión y área de contacto

Trayectoria de la corriente por el cuerpo.

Condiciones fisiológicas de la persona.

Ayuda a conocer si una corriente será perceptible, dolorosa o mortal.

# Condiciones de humedad de la piel

Se suelen considerar los siguientes valores medios para la resistencia del cuerpo en corriente alterna **50 Hz**:

1600 $\Omega$  en estado seco.

800 $\Omega$  en estado mojado.

200 $\Omega$  en estado inmerso en agua.

**¿Verdadero o Falso?**

Cuanto más húmeda la piel, menor es su  
impedancia

# Condiciones de humedad de la piel

Se suelen considerar los siguientes valores medios para la resistencia del cuerpo en corriente alterna **50 Hz**:

1600 $\Omega$  en estado seco.

800 $\Omega$  en estado mojado.

200 $\Omega$  en estado inmerso en agua.

**Verdadero**



¿Qué pasa si baja la resistencia de la piel?

El cuerpo humano se vuelve **más vulnerable** a los efectos de la corriente eléctrica.

Porque la corriente encuentra menos oposición para circular. Ingresará más corriente al cuerpo para un mismo voltaje.

# ¿Qué pasa si baja la resistencia de la piel?

Situación: Un paciente entra en contacto con una fuente de 50 V en distintas condiciones de piel.

Condición de la piel	Resistencia estimada (ohm)	Corriente resultante	Riesgo asociado
Seca	1600 $\Omega$		umbral de no soltar
Húmeda	800 $\Omega$		posible fibrilación
Sumergida en agua	200 $\Omega$		letal

# ¿Qué pasa si baja la resistencia de la piel?

Situación: Un paciente entra en contacto con una fuente de 50 V en distintas condiciones de piel.

Condición de la piel	Resistencia estimada (ohm)	Corriente resultante ( $I = V/R$ )	Riesgo asociado
Seca	1600 $\Omega$	31 mA	umbral de no soltar
Húmeda	800 $\Omega$	62 mA	posible fibrilación
Sumergida en agua	200 $\Omega$	250 mA	letal

# Efectos fisiológicos de la corriente eléctrica

- El cuerpo debe ser parte de un circuito eléctrico.

Los factores que influyen:

- Tamaño de la persona
- Estado del individuo
- Recorrido de la corriente
- Momento y duración de la corriente respecto al ciclo cardíaco

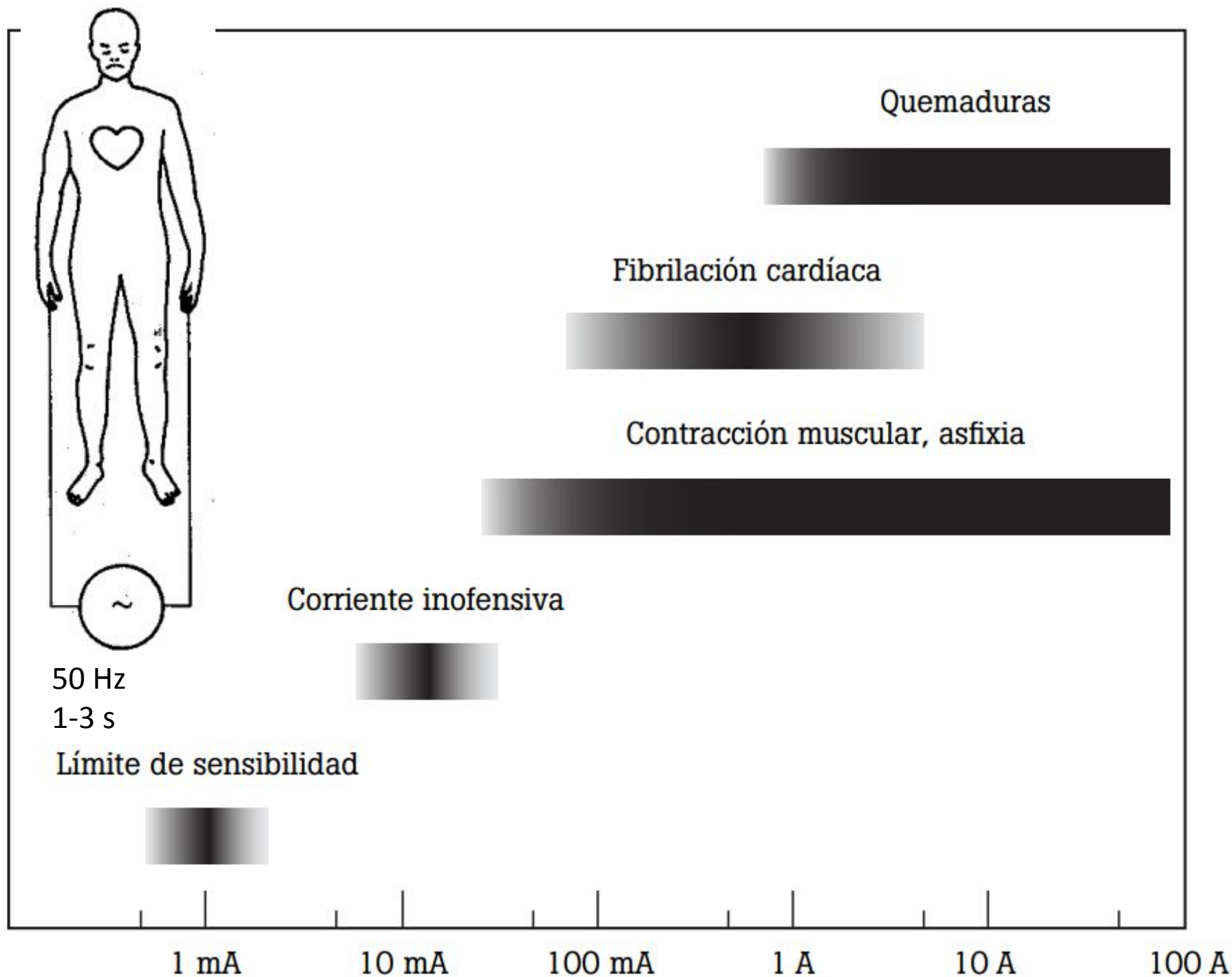
Los efectos dependen de:

- Magnitud de la corriente que circula por el tejido, **amperes**
- Frecuencia de la corriente, medida en **hertz**
- Tiempo de exposición a la corriente eléctrica, **segundos**
- Zona por la que circula y el órgano afectado, Impedancia medida en **ohms**

# Efectos de los campos eléctricos de origen externo

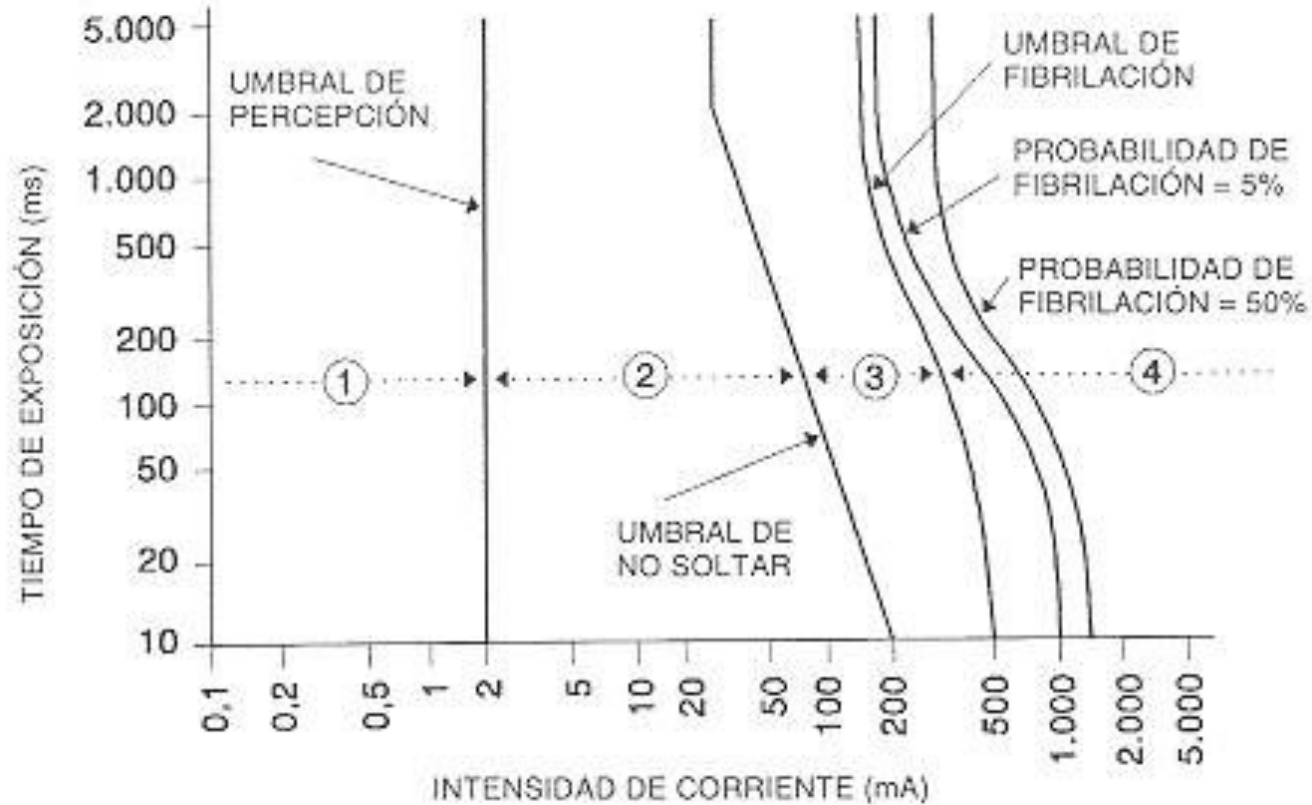
Los tejidos biológicos son afectados por:

- **Electrólisis:** 0Hz a 0,1Hz
  - corrientes aplicadas mediante electrodos
  - separación de componentes
- **Estimulación nerviosa:** 10Hz a 10kHz
  - Estudios eléctricos neurofisiológicos
  - Rehabilitación en fisioterapia.
- **Calentamiento:** 10Hz a 100kHz
- **Daño tisular:** >200 KHz.
  - Bisturí eléctrico en block quirúrgico - corte/coagulación



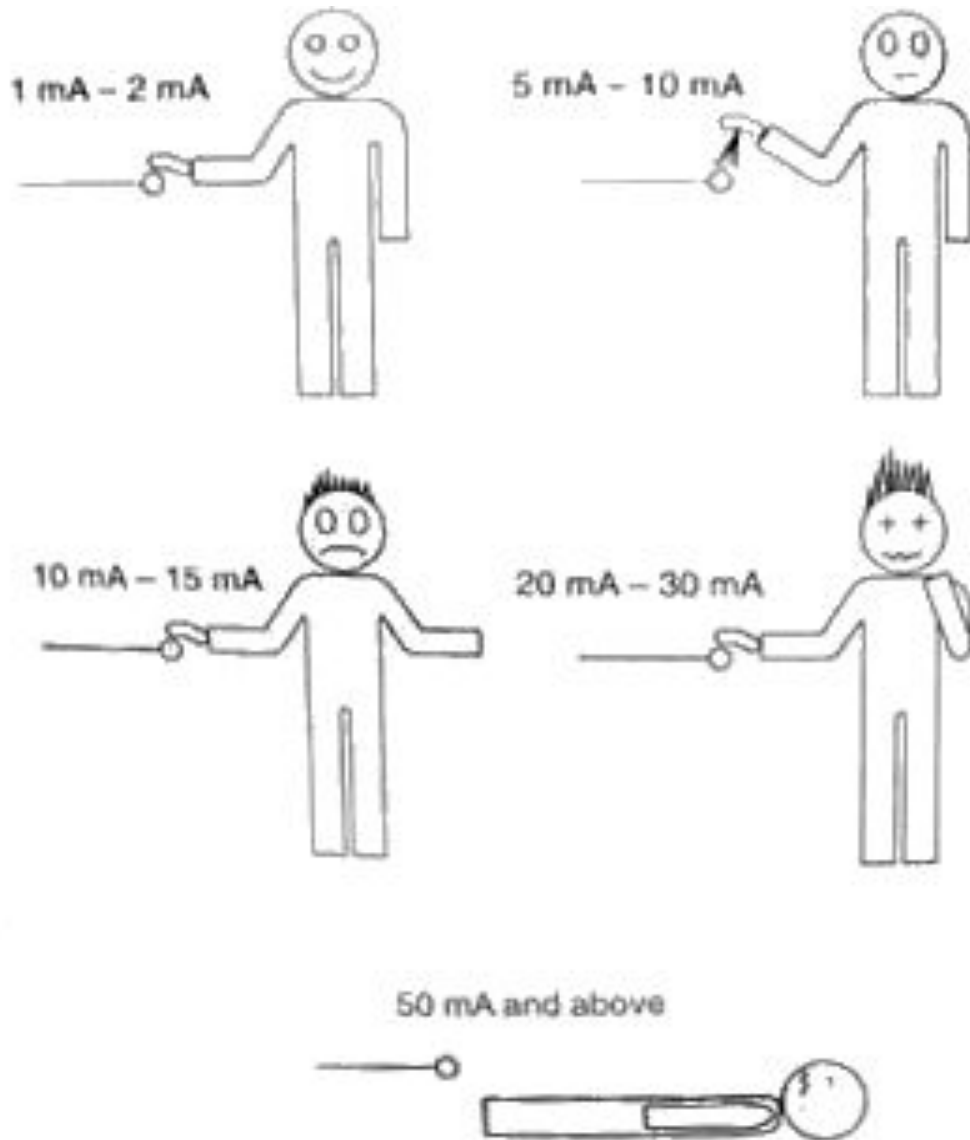
**Figura 1:** Efectos del flujo de corriente desde un punto de contacto de la piel a otro.

# A mayor tiempo, la misma corriente tiene más efecto



ELECTROCARDIOGRAMA





**Umbral de percepción:** Valor mínimo de intensidad que provoca una sensación en una persona. 0.5mA.

**Umbral de reacción:** Corriente mínima que produce una contracción muscular.

**Umbral de no soltar:** Valor máximo de la intensidad para el cual una persona puede soltarse de los electrodos que provocan el paso de la corriente. En corriente alterna se considera que este valor es de 10 mA, para cualquier tiempo de exposición.

**Umbral de fibrilación ventricular:** Valor mínimo de la intensidad que puede originar fibrilación ventricular. Si la duración del paso de la corriente es mayor a un ciclo cardíaco, el umbral es menor.



# Nota

¿Verdadero o Falso?

La corriente alterna es más peligrosa que la continua porque estimula más al músculo

# Nota

## Verdadero

La corriente alterna es más peligrosa que la continua porque estimula más al músculo

Estimula más fácilmente los nervios y músculos, interfiere con el ritmo cardiaco y es más difícil de soltar una vez que hay contacto

La corriente continua genera una contracción sostenida, más fácil de vencer y por lo tanto, la persona puede solar el contacto

¿Hasta qué punto la corriente eléctrica es inofensiva en el cuerpo humano? (AC - 50Hz 1-3 seg)

- a. aprox. 10 mA
- b. aprox. 6 A
- c. aprox 1 A
- d. aprox 100 mA

¿Hasta qué punto la corriente eléctrica es inofensiva en el cuerpo humano? (AC - 50Hz 1-3 seg)

a. aprox. 10 mA (límite de seguridad)

b. aprox. 6 A

c. aprox 1 A

d. aprox 100 mA

¿Con qué corriente (mínima estimada) entre mano y mano comienza la fibrilación cardíaca? (AC- 50Hz, 1-3 seg)

a. aprox. 60 mA

b. aprox. 6 A

c. aprox 1 A

d. aprox 100 mA

¿Con qué corriente (mínima estimada) entre mano y mano comienza la fibrilación cardíaca? (AC- 50Hz, 1-3 seg)

- a. aprox. 60 mA (si ocurre en el momento vulnerable del ciclo cardiaco, fase de repolarización)
- b. aprox. 6 A
- c. aprox 1 A
- d. aprox 100 mA

## EFFECTOS DE LA CORRIENTE SOBRE EL SER HUMANO a 50 Hz

	Intensidad	Resultado
Umbral de percepción	<b>1 a 3 mA</b>	No existe peligro
Electrización	<b>3 a 10 mA</b>	Sensación de hormigueo. Movimientos involuntarios.
Tetanización	<b>&gt;10 mA</b>	Pérdida del control motor. Contracciones musculares. Umbral de no soltar.
Paro respiratorio	<b>&gt;20mA</b>	Si la corriente afecta el centro nervioso responsable de la respiración. Dolor y fatiga.
Asfixia	<b>25 a 30 mA</b>	Si la corriente llega al tórax, se produce tetanización del diafragma, impidiendo el movimiento de los músculos respiratorios
Fibrilación ventricular	<b>&gt;75mA</b>	Si la corriente llega al corazón, se descontrola el ritmo cardíaco.
Contracciones sostenidas del miocardio	<b>1 A a 6 A</b>	Vuelve a ritmo normal si se elimina la corriente a tiempo
Daños físicos y quemaduras	<b>&gt;10 A</b>	

## Variables a tomar en cuenta

(1) Frecuencia

(2) Tiempo de exposición

(3) Masa corporal

(4) Puntos de entrada de la corriente



# (1) Frecuencia

Red eléctrica de uso doméstico o industrial:

- 230 V (AC)
- Frecuencia uruguay...

# (1) Frecuencia

Red eléctrica de uso doméstico o industrial:

- 230 V (AC)
- Frecuencia uruguay **50 Hz**

Aeronáutica:

- 400 Hz

En estudios de electroterapia o eléctricos:

- 4000 Hz aproximadamente

A partir de 100kHz no se conocen valores que definan ni los umbrales de no soltar, ni los umbrales de fibrilación.

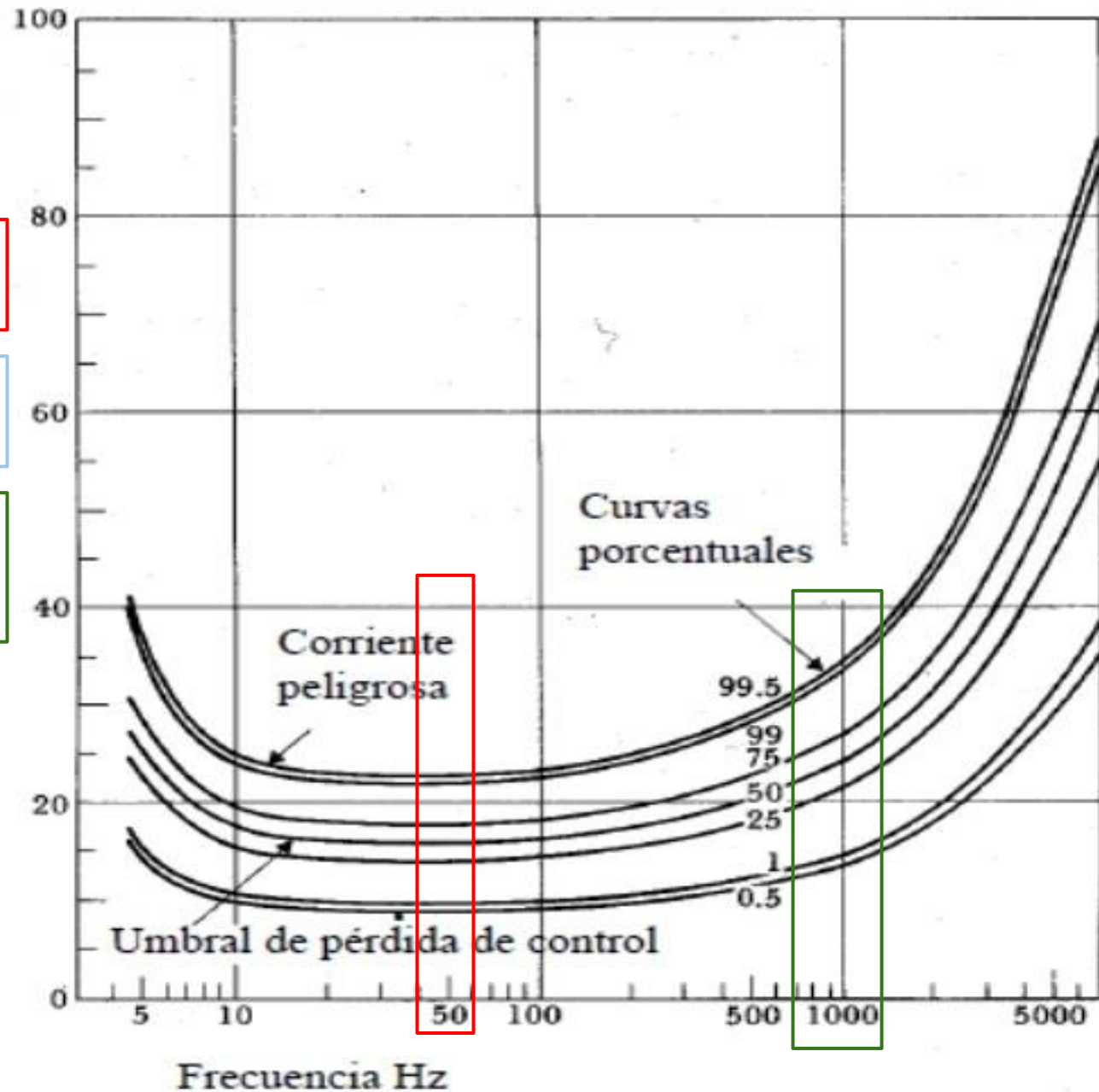
# (1) Frecuencia

Corriente de pérdida de control, mA rms

Valor mínimo de corriente de no soltar está entre 50 y 60 Hz

Menor a 10 Hz, valor de corriente de soltar, incrementa

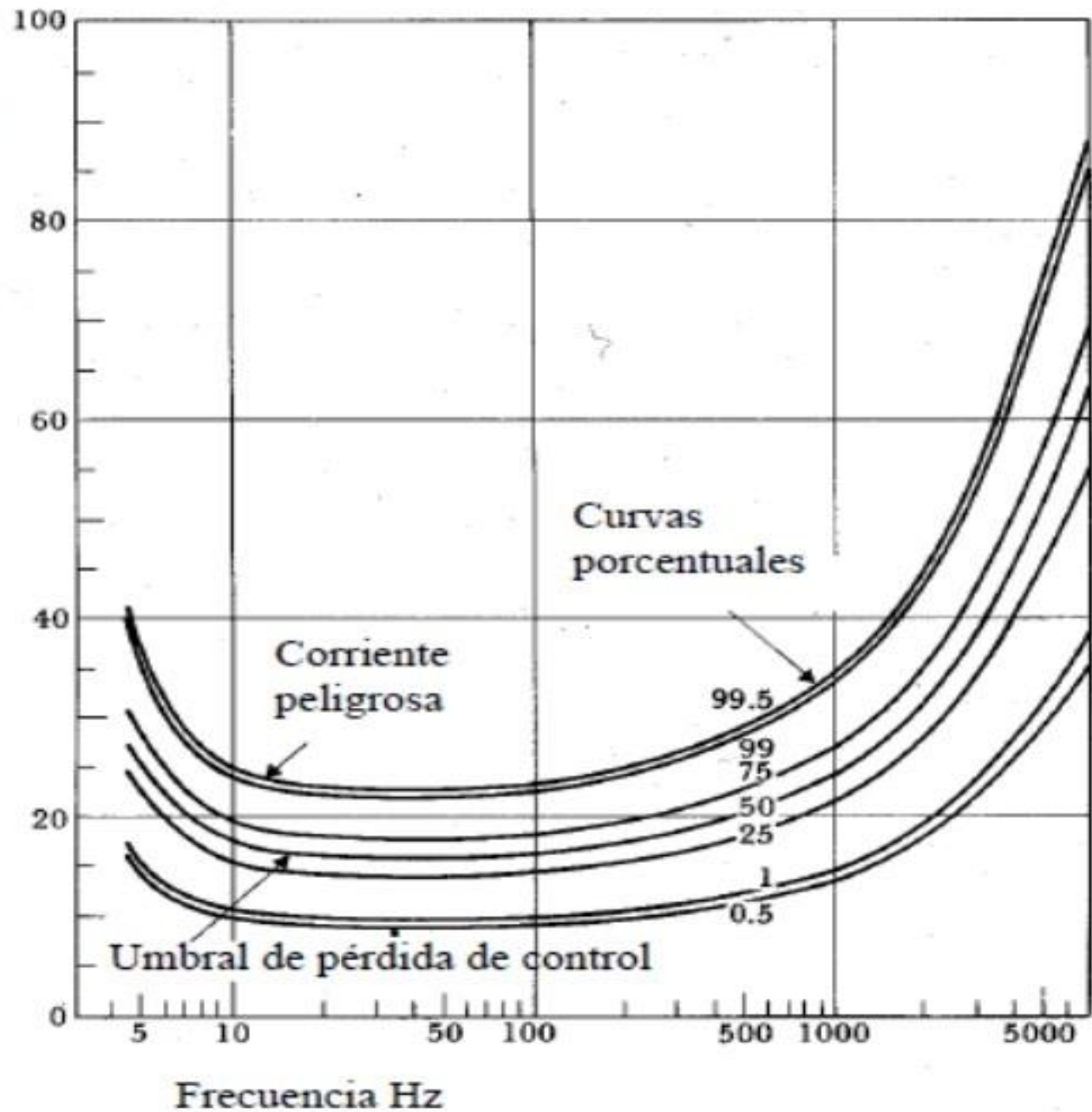
Sobre 1000 Hz, valor de corriente de soltar, nuevamente incrementa



Corriente de  
pérdida de  
control, mA rms

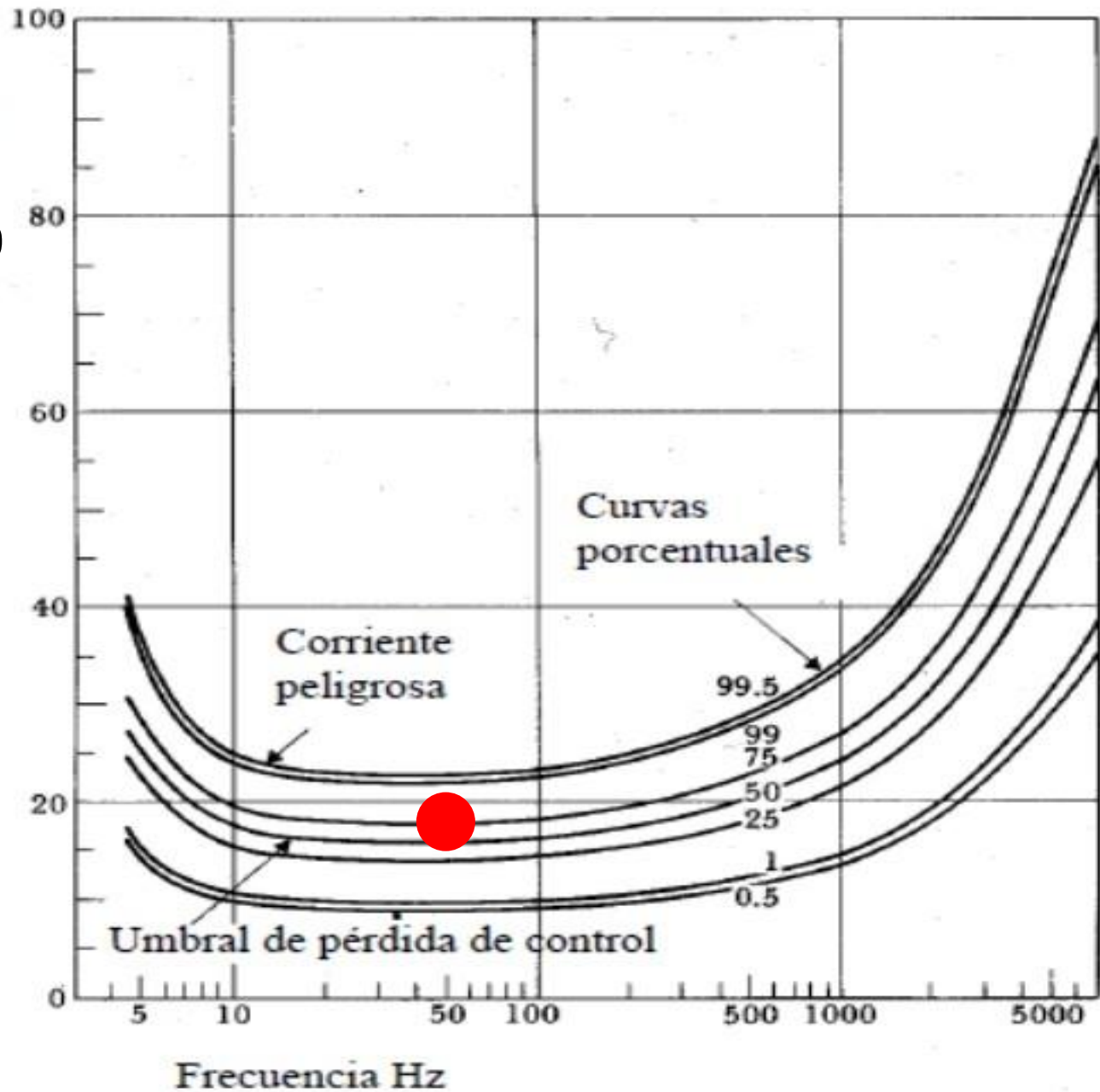
Compare el percentil 50  
¿Cuál de las siguientes  
frecuencias es la más  
dañina?

- a. 20mA a 50Hz
- b. 10mA a 100Hz
- c. 40mA a 5000Hz
- d. 20mA a 100Hz



# (1) Frecuencia más dañina

Corriente de pérdida de control, mA rms

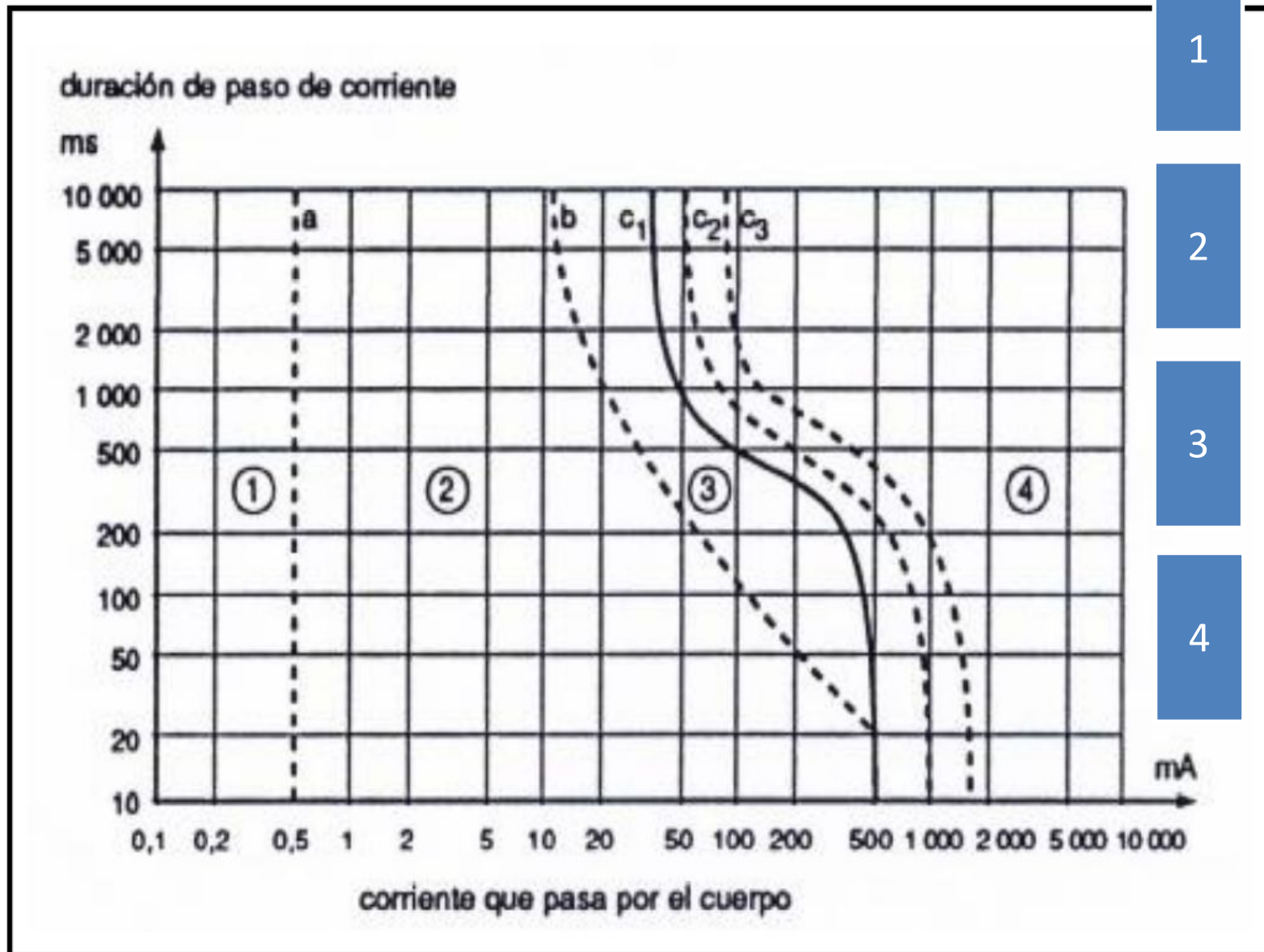


Compare el percentil 50  
¿Cuál de las siguientes  
frecuencias es la más  
dañina?

- a. 20mA a 50Hz
- b. 10mA a 100Hz
- c. 40mA a 5000Hz
- d. 20mA a 100Hz

# (2) Tiempo de exposición

En función del valor eficaz de la corriente y del tiempo de duración de la descarga. Ejemplo: 15Hz y 100Hz – trayecto mano-pie.



1

Ninguna reacción

2

No efectos fisiológicos

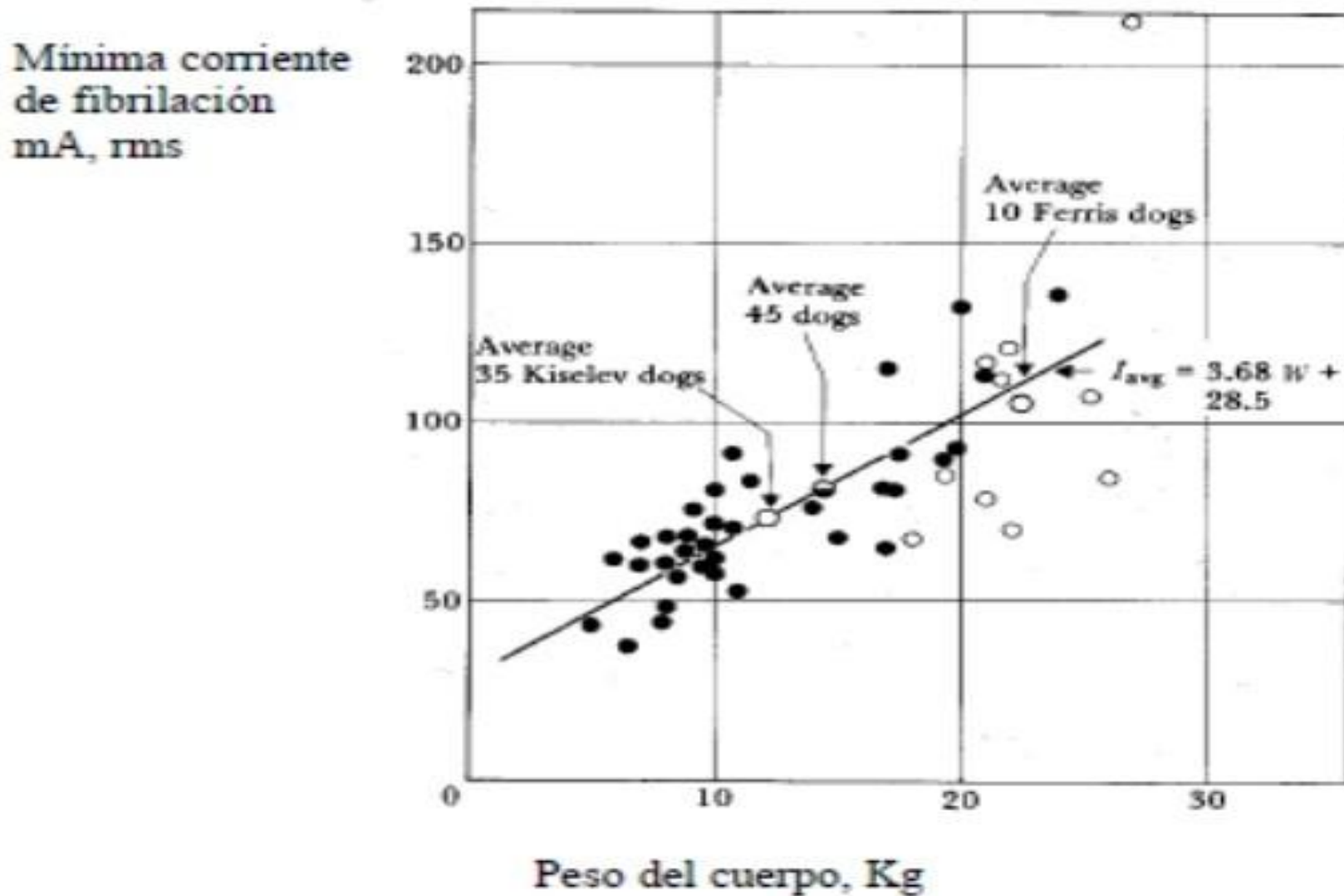
3

Contracciones musculares

4

Probabilidad de fibrilación, paros y quemaduras

# (3) Masa corporal



Además, **aumenta conforme al peso del cuerpo.**

Estos datos son útiles para extrapolar los umbrales de fibrilación a los humanos.

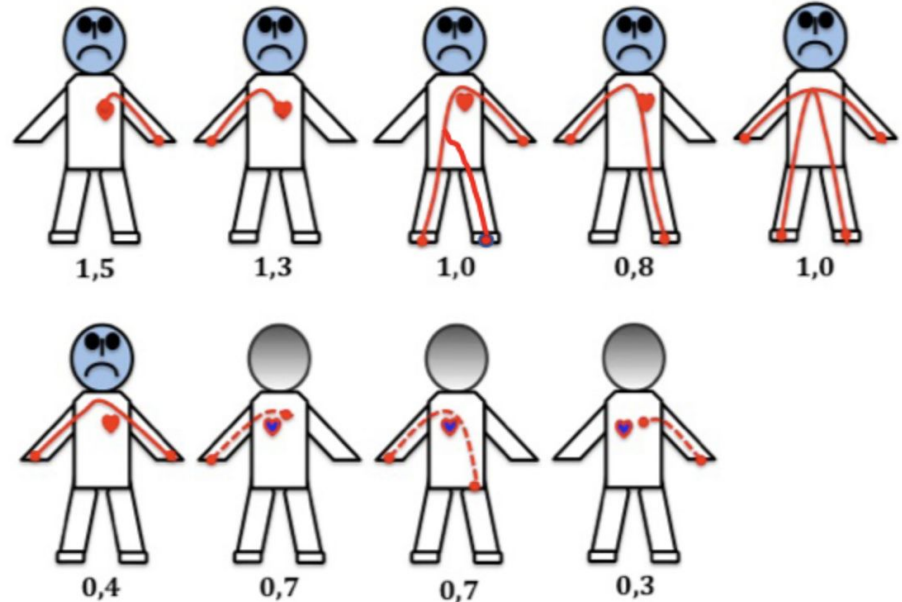


# (4) Puntos de entrada de la corriente

El peligro depende del recorrido de la corriente a través del cuerpo y por donde entra y sale la corriente eléctrica.

Los puntos determinan el recorrido de la corriente y cuáles órganos o sistemas pueden verse afectados

La gravedad de un accidente depende del camino de la corriente a través del cuerpo.



Factor de corriente corazón: mano izquierda – dos pies

<https://losmundosdebrana.com/2014/11/25/efectos-de-la-corriente-electrica-en-el-cuerpo-humano-ii-la-edad-de-la-gran-potencia/>



# (4) Puntos de entrada de la corriente

Trayecto	Puntos de contacto	Riesgo	Observaciones
Mano - mano	A través del tórax	Alto	Puede afectar el corazón
Mano - pie	Atraviesa todo el cuerpo	Muy alto	Trayectoria larga, atraviesa el corazón
Pie - pie	Parte inferior	Medio	Menor riesgo cardíaco
Mano - cabeza	Atraviesa el sistema nervioso	Alto	Posible daño cerebral
Misma extremidad	Ej: brazo - brazo	Bajo	No cruza el corazón o el tronco
Interno (Catéter)	Punto directo al corazón	Crítico	Riesgo de microshock con muy baja corriente

## (4.1) ¿Cómo entra la corriente?

Contacto directo: con la **parte activa** de una instalación eléctrica.

Al tocar elementos sometidos a tensión, como cables o barras metálicas desnudas

Contacto indirecto: con las **masas** puestas bajo **tensión** debido a una falla de aislamiento. Objetos, normalmente inofensivos, cuya tensión se debe a fallos y defectos de aislamiento

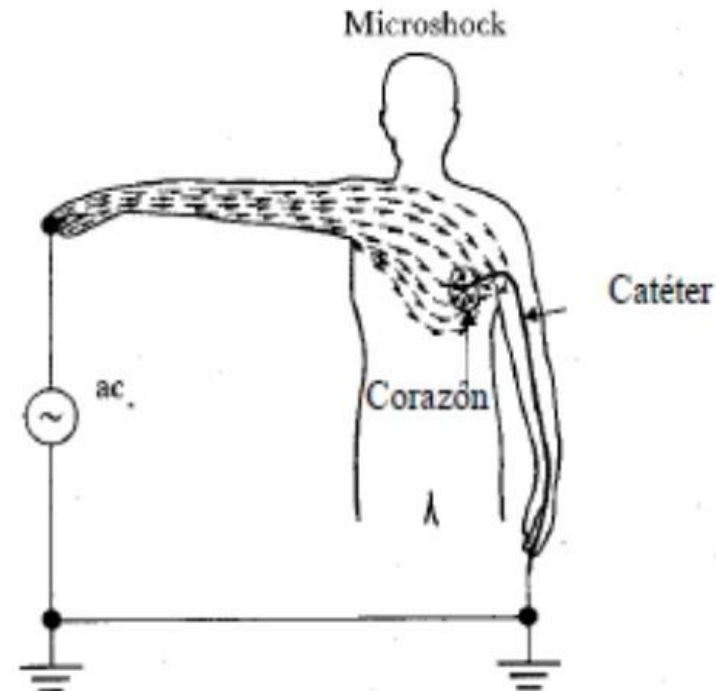
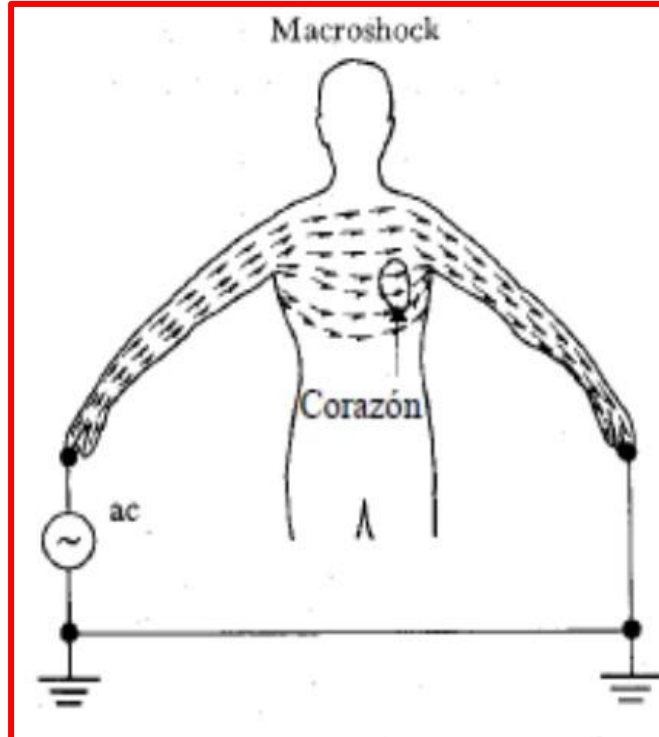
Vía invasiva, cuando hay instrumentos biomédicos.

Dos tipos de situaciones: el **MACROSHOCK** y el **MICROSHOCK**

# Macroshock

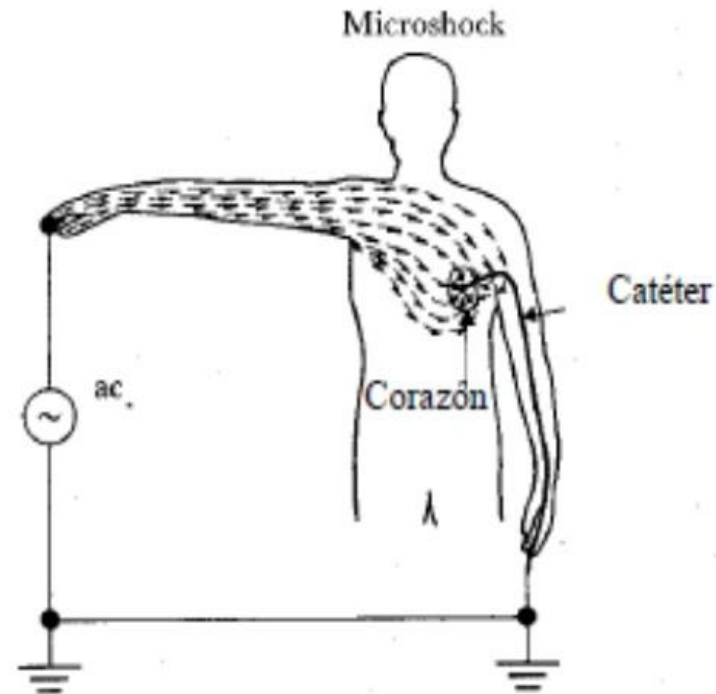
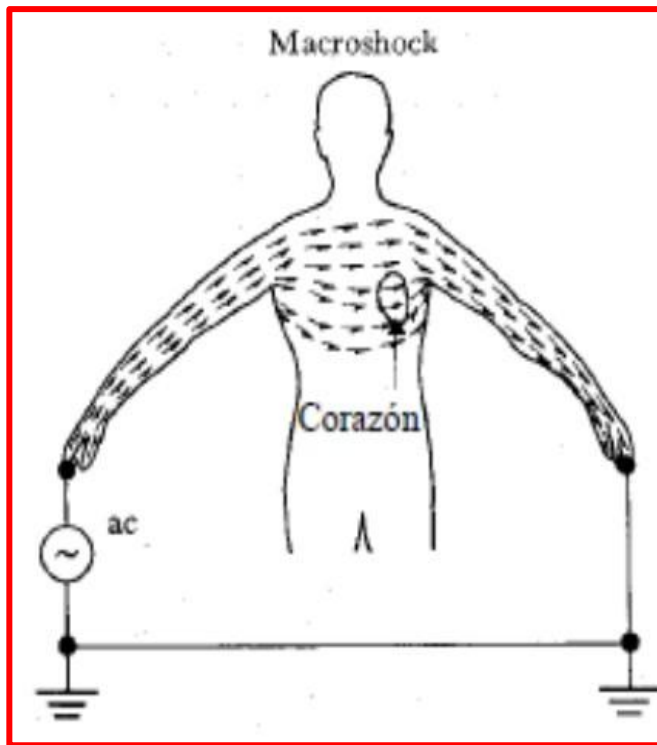
Paso de corriente eléctrica a través del cuerpo humano desde un punto externo al cuerpo hasta otro punto externo.

Se da típicamente cuando una persona entra en contacto con una fuente de tensión, como un equipo defectuoso o un cable expuesto.



# Macroshock

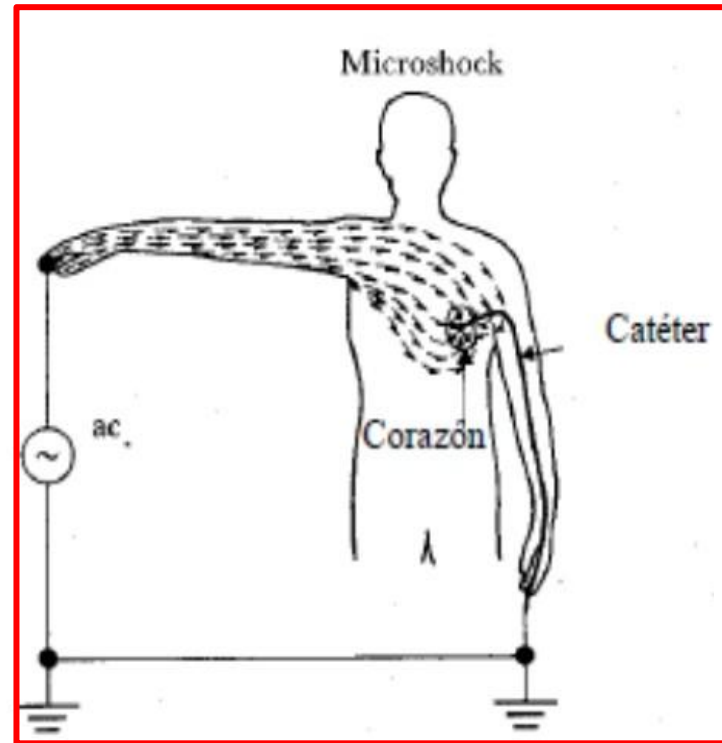
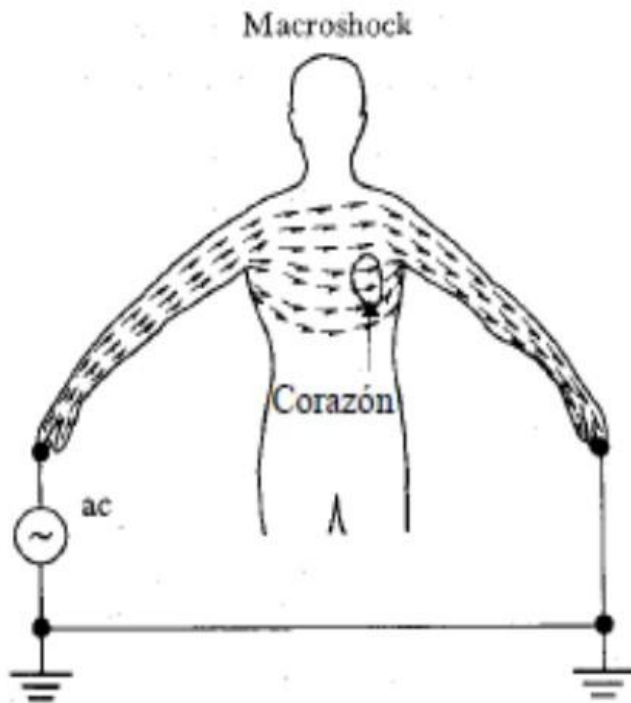
El **macroshock** está relacionado con la circulación de corriente en la **superficie corporal (mano a pie o de mano a mano)** puede atravesar el corazón y otros órganos vitales.



La corriente que atraviesa el cuerpo supera el umbral de seguridad (del orden de 10mA).

# Microshock

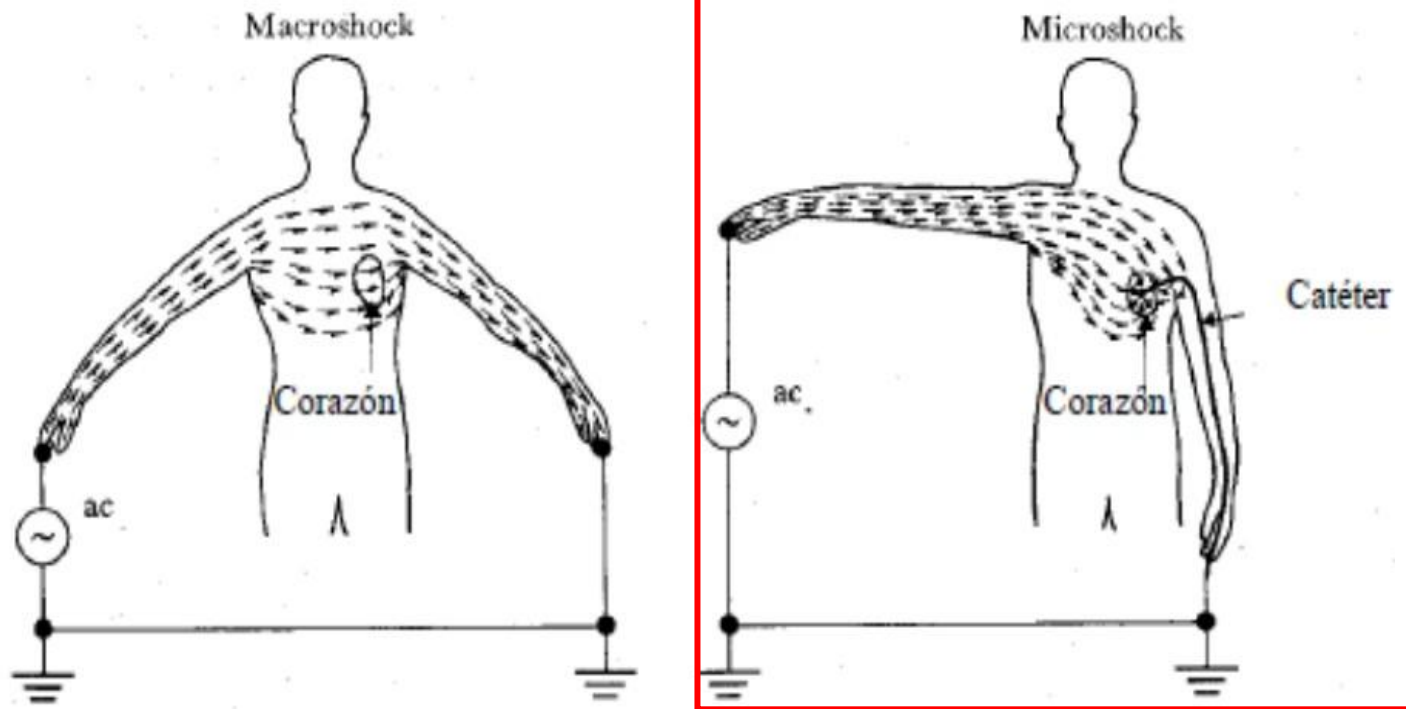
Paso de una corriente eléctrica extremadamente pequeña directamente al corazón, a través de un catéter o electrodo implantado. Estas corrientes pueden ser del orden de microamperios ( $>10 \mu\text{A}$ ), son extremadamente peligrosas porque acceden directamente al tejido cardíaco.



# Microshock

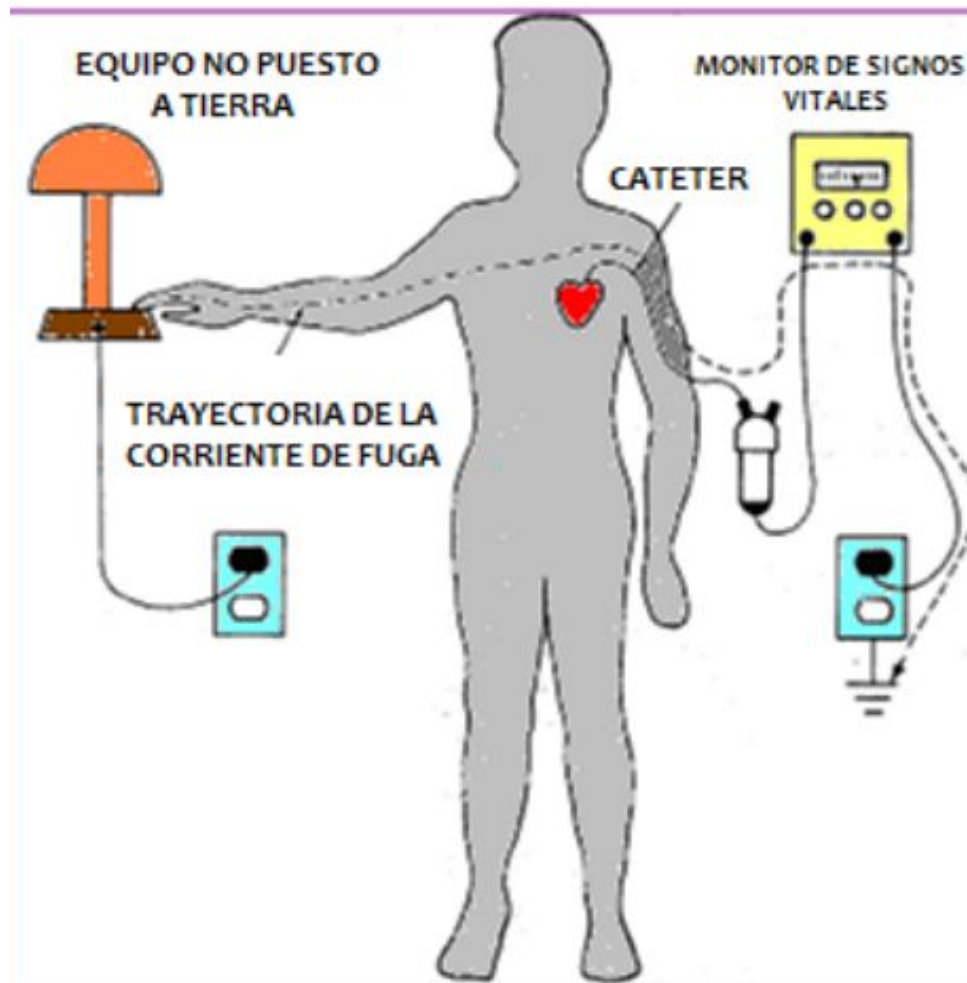
Este tipo de descarga puede producir fibrilación ventricular con una corriente inofensiva si circulara externamente.

Por eso, se aplican normas estrictas en equipos biomédicos que hacen contacto directo con el corazón, limitando las corrientes de fuga y asegurando un aislamiento eléctrico adecuado.

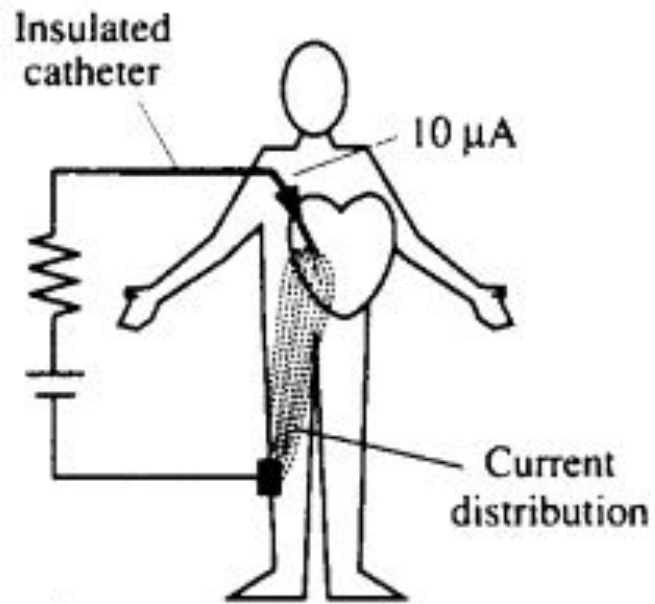


# Microshock

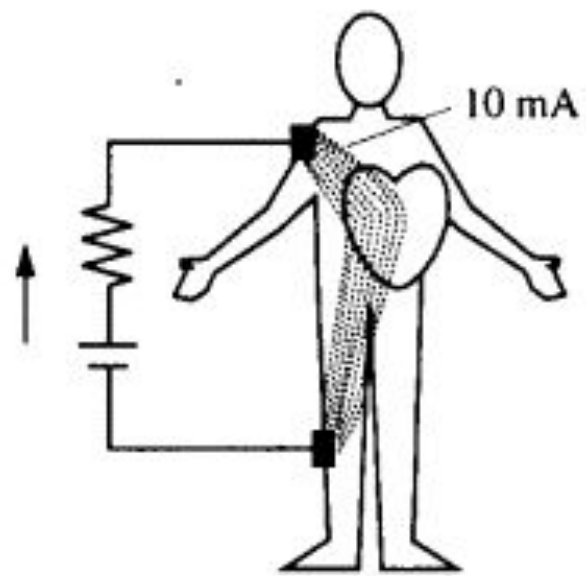
Existe peligro a partir de corrientes mayores a  $10 \mu\text{A}$ .  
Simples **corrientes de fuga** se convierten en un alto riesgo.



Importancia de aterrar equipos biomédicos



Microshock  
(a)



Macroshock  
(b)



## MICROSHOCK

Corriente que pasa directamente al corazón por un acceso interno.

Desde un catéter o electrodo hasta el corazón.

>10  $\mu$ A

Corazón (miocardio)

Paciente con marcapasos, catéter o desfibrilador implantado.

Entorno hospitalario (UCI, quirófano)

Equipos tipo CF/BF, aislamiento del paciente.

## MACROSHOCK

Corriente que atraviesa el cuerpo por contacto externo

Desde una extremidad a otra (ej. mano a pie).

>10 mA

Corazón, músculos, sistema nervioso

Persona que toca una fuente energizada.

Hogar, industria, hospital

Puesta a tierra, doble aislamiento.

## **¿Macroshock o microshock?**

Una descarga de 1A por tocar la superficie metálica  
de un dispositivo

## Macroshock

Una descarga de 1A por tocar la superficie metálica  
de un dispositivo

**¿Macroshock o microshock?**

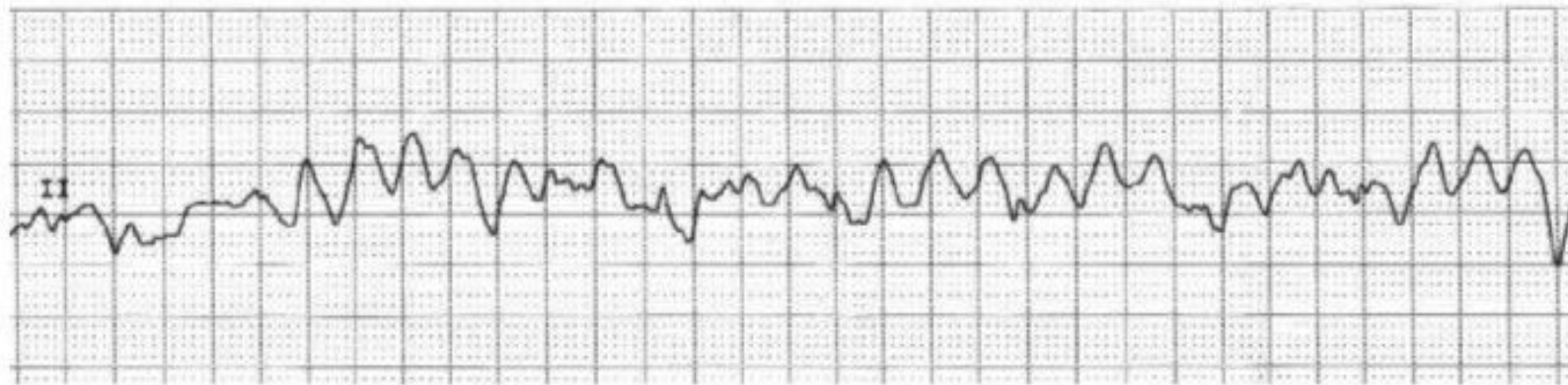
Una descarga de 100uA durante un cateterismo  
cardíaco

## Microshock

Una descarga de 100uA durante un cateterismo  
cardíaco

# Fibrilación ventricular

Prevenir este único estímulo o pulso eléctrico que produce una fibrilación ventricular durante el **periodo vulnerable de repolarización del corazón.**



ECG de un corazón en fibrilación

# Precauciones

Puesta a tierra y equipotencialidad

Sistema de masas equipotenciales.

**Todas las partes conductoras accesibles del equipo deberán estar puestas a tierra.**

Resistencia máxima entre el terminal de protección de **tierra** del equipo y cualquier **otra parte** conectada debe ser inferior a **0,1Ω**.

# Corrientes de fuga

- **Corriente de fuga a tierra:** A través del conductor de tierra
- **Corrientes de fuga del chasis:** Fluye del chasis a tierra, pero no por el conductor de tierra.
- **Corrientes de fuga del paciente:** Fluye desde una parte del equipo aplicada al paciente hacia tierra. Ej. A través de electrodos.



# Corrientes de fuga

- **Corriente auxiliar del paciente:** Fluye a través del paciente entre aparatos aplicados en funcionamiento normal sin intentar producir efectos fisiológicos.
- **Corriente funcional del paciente:** Fluye a través del paciente entre aparatos aplicados en funcionamiento normal intentando conseguir un efecto fisiológico.

¿Preguntas?