



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



Instalaciones Eléctricas

Protección contra contactos eléctricos

PROTECCIÓN CONTRA LOS CHOQUES ELÉCTRICOS

1.- Introducción

En este tema, se tratan los requisitos que deben cumplir las instalaciones eléctricas de baja tensión para asegurar la protección de los usuarios contra los “*choques eléctricos*”, es decir para reducir al mínimo el riesgo de electrocución.

Se entiende por “*choque eléctrico*” al efecto fisiológico resultante de la circulación de la corriente eléctrica a través del cuerpo humano.

Las normas IEC de referencia son las siguientes:

IEC 60364-4-41: “*Instalaciones eléctricas en edificios*” - Parte 4
“*Protección para garantizar la seguridad*” – Capítulo 41
“*Protección contra los choques eléctricos*”.

IEC 60479-1: “*Efectos de las corriente eléctrica circulando a través del cuerpo humano*” - Parte 1 “*Efectos de la corriente eléctrica alterna de frecuencias comprendidas entre 15 y 100 Hz*”.

2.- Efectos fisiológicos de la CA sobre el cuerpo humano

Actividad biológica originada por impulsos eléctricos.

Si se suma otra corriente de origen externo debido a un contacto eléctrico, dependiendo de la magnitud y duración de la corriente puede ocasionar la muerte de la persona.

Tetanización: contracciones musculares producidas por impulsos eléctricos.

Si la frecuencia de esos estímulos es elevada (frecuencia 50Hz) el músculo es llevado a la contracción completa.

Asfixia: si el centro nervioso que regula la respiración se ve afectado por la corriente, puede llegar a producirse un paro respiratorio.

Quemaduras: el pasaje de la corriente por el cuerpo humano es acompañado de disipación de calor por efecto joule, produciendo quemaduras internas y externas.

Fibrilación ventricular: sucesión de contracciones rápidas y desordenadas de las fibras del miocardio, cuando la fibrilación afecta a los ventrículos es rápidamente mortal. En la mayoría de los accidentes eléctricos fatales, la muerte del afectado se produce por esta causa.

Otros efectos: contracciones musculares, dificultades de respiración, incremento en la presión arterial, perturbaciones en la formación y propagación de los impulsos en el corazón, incluida la fibrilación auricular y paros cardíacos temporales.

Factores que influyen en la gravedad de un choque eléctrico

La corriente que circula por el cuerpo humano, en caso de un choque eléctrico, depende de la tensión de contacto y de la impedancia que encuentra la corriente durante su trayecto a través del cuerpo:

$$I_h = \frac{U_c}{Z_h(U_c)}$$

Esta relación no es lineal, pues la impedancia del cuerpo humano depende de diversos factores internos y externos como:

- Tensión de contacto U_c
- Condiciones de humedad de la piel
- Frecuencia de la corriente
- Trayecto de la corriente por el cuerpo
- Condiciones del contacto: presión y área de contacto
- Condiciones fisiológicas de la persona

Impedancia del Cuerpo Humano en función de la Tensión de Contacto

En la tabla se indican los valores de la impedancia total del cuerpo humano, que son superados por el 95% de las personas (solo el 5% no supera este valor), en función de la tensión de contacto. Estos valores son válidos para corriente alterna con frecuencia 50/60Hz, para un trayecto mano-mano o mano-pie, con superficies de contacto de 50 a 100cm² y en estado seco.

Tensión de Contacto (V)	Z(Ω)
25	1750
50	1450
75	1250
100	1200
125	1125
220	1000
700	750
1000	700
Valor asintótico	650

Influencia de la humedad de la piel

La **Impedancia del cuerpo humano** está muy influenciada por las condiciones de humedad de la piel.

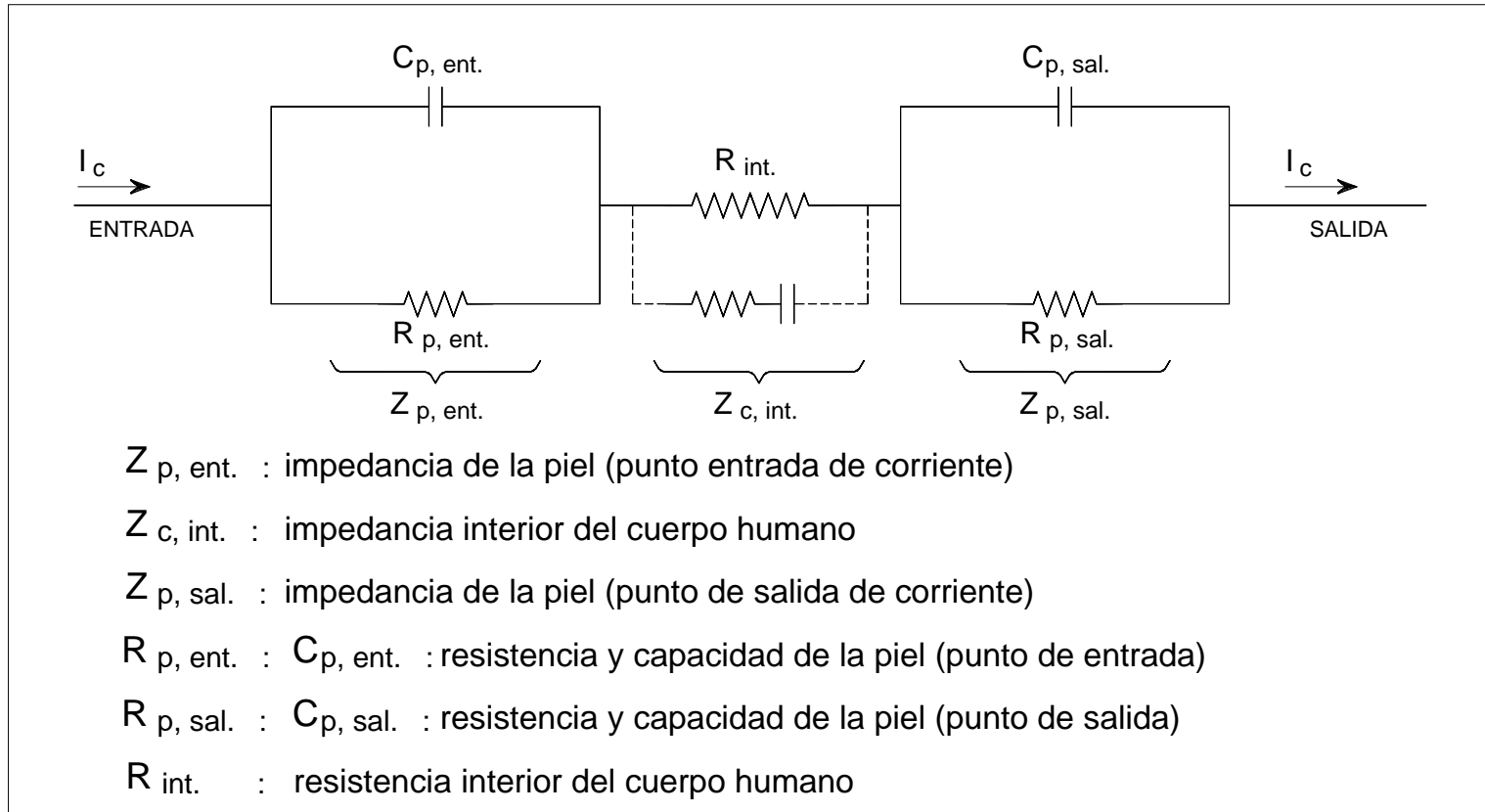
Así es que la norma IEC 60364-4-41, consideran tres posibles condiciones según los criterios expuestos en la tabla.

Estado	Aplicación
Seco	Persona con piel seca o húmeda de sudoración normal, y con calzado
Mojado	Persona con piel mojada, y sin calzado
Inmerso en agua	Persona inmersa en agua

Influencia de la frecuencia

La impedancia del cuerpo humano disminuye cuando la frecuencia aumenta, hecho que se puede explicar a partir del modelo de la figura.

Impedancias del Cuerpo Humano (modelo norma IEC60479-1)



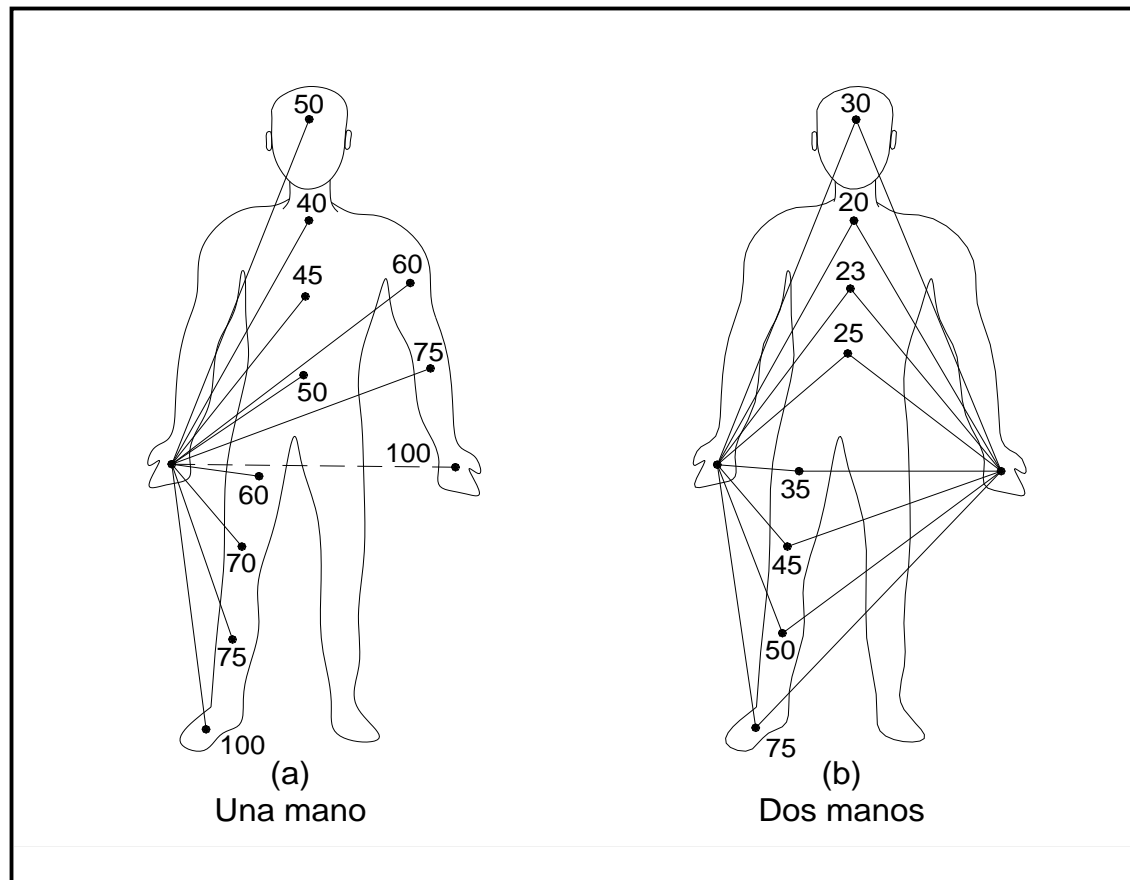
$Z_{\text{int}} \sim \text{Resistencia} \sim 500 \Omega$

Influencia de las condiciones del contacto

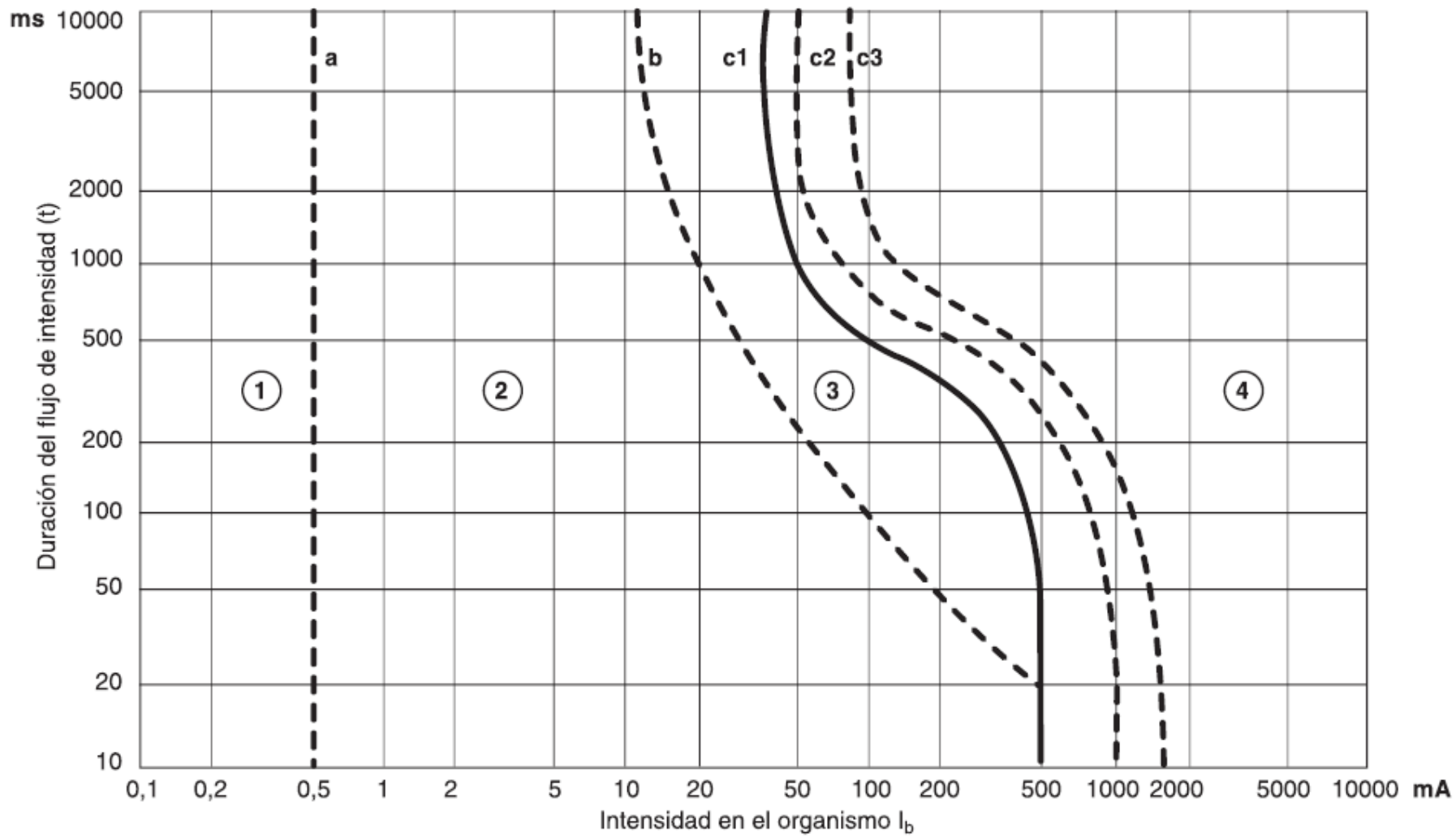
Además la impedancia de los puntos de contacto depende fundamentalmente de la superficie de contacto (disminuye cuanto mayor es el área de contacto) y de la presión de contacto (disminuye cuanto mayor es la presión de contacto este es el caso de las herramientas portátiles). Además depende mucho, como ya mencionamos antes, del estado de humedad de la piel y del estado de la misma.

Influencia según el trayecto por el organismo

La impedancia del cuerpo humano depende del trayecto que recorre la corriente por el cuerpo. Los trayectos que pasan por órganos vitales (cerebro, corazón, pulmones, etc.) presentan un mayor riesgo. Las cifras de la figura indican el % de la Impedancia para el trayecto correspondiente con relación al trayecto mano-mano o mano-pie.



3.- Zonas tiempo-corriente de los efectos de la CA (15 a 100Hz), trayecto mano izquierda pies



Zonas tiempo-corriente en CA (15 a 100Hz)

Zona	Efectos
1 (curva a – umbral de percepción - $I = 0.5 \text{ mA}$)	Habitualmente ninguna reacción.
2 (curva b – umbral de no soltar - $I = 10 \text{ mA} + 10/t$)	Habitualmente ningún efecto fisiológico peligroso.
3 (curva c1 – umbral de fibrilación ventricular)	Habitualmente ningún daño orgánico. Probabilidad de contracciones musculares y dificultades respiratorias, paros cardíacos temporales.
4 (curva c3 – probabilidad de fibrilación ventricular 50%)	Probabilidad de fibrilación ventricular Daños fisiológicos tales como paro cardíaco, paro respiratorio, quemaduras graves.

4.- Valores convencionales de seguridad

- Los efectos de la corriente eléctrica se agravan a medida que aumenta el valor eficaz de la intensidad de corriente y el tiempo de duración del contacto.
- Para facilitar el diseño, en las normas se establecen **tensiones de contacto límites de seguridad** a las que una persona puede estar sometida sin riesgo.

Estado seco	Estado mojado	Estado inmerso en agua
50 V	25V	12V

- Y **tiempos máximos de seguridad** en que deben operar las protecciones en función de la tensión de contacto, cuando esta supera las tensiones límites de seguridad.

Tensión de contacto límite de seguridad

- Se define como el valor máximo de la tensión de contacto que se admite que puede mantenerse indefinidamente en unas condiciones dadas.

Tensiones de contacto límites de seguridad para CA, con frecuencia entre 15 a 100 Hz		
Estado seco	Estado mojado	Inmerso en agua
50V	25V	12V

Tiempos máximos de seguridad

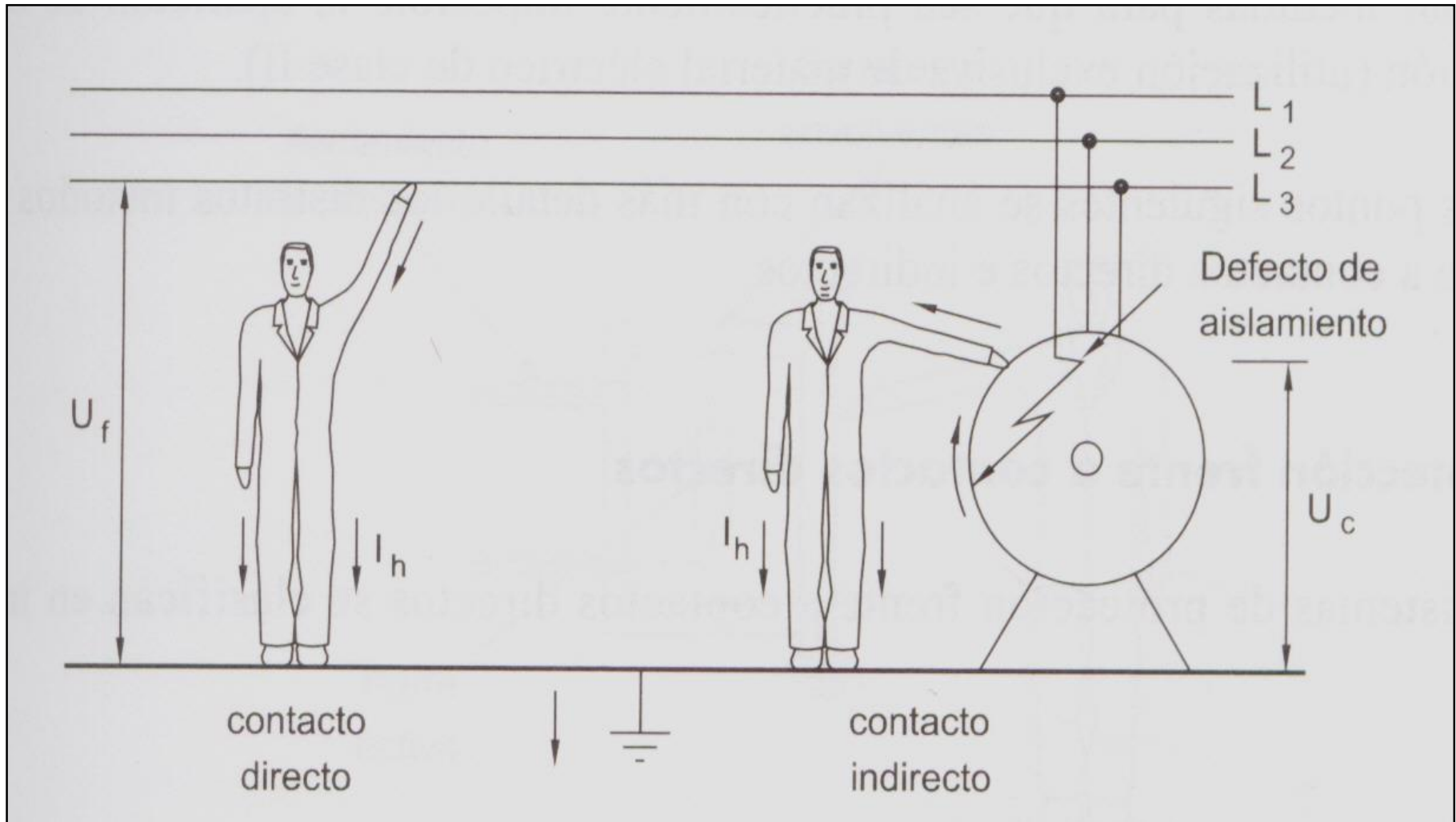
- Cuando la tensión de contacto supera la tensión de contacto límite de seguridad, se define el tiempo máximo al que el cuerpo humano puede estar sometido a esa tensión, según el estado (seco o mojado)
- Conceptualmente, una instalación se considera segura si, en caso de aparecer una tensión de contacto mayor que la tensión límite de seguridad en cualquier parte accesible a las personas, se garantiza que será eliminada por las protecciones en un tiempo inferior al tiempo máximo de seguridad.

Tiempos máximos de seguridad (s)		
Tensión de contacto (V)	Estado seco	Estado mojado
25	∞	∞
50	∞	0,48
75	0,60	0,30
90	0,45	0,25
120	0,34	0,18
150	0,27	0,12
220	0,17	0,05
280	0,12	0,02
350	0,08	-
500	0,04	-

5.- Contacto directo e indirecto

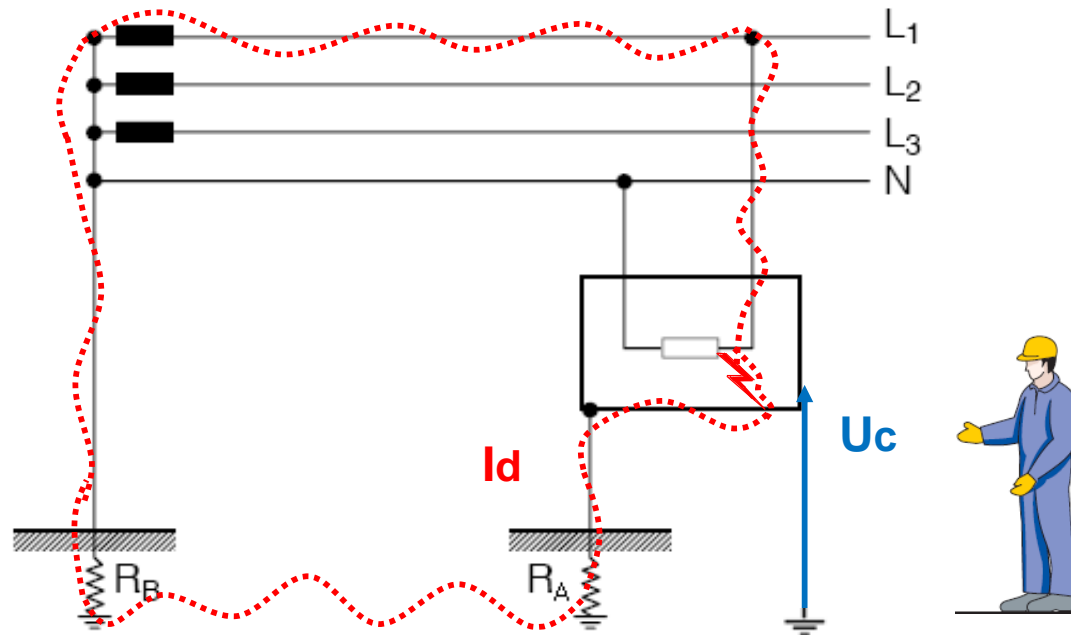
- **Parte activa:** todo conductor o toda parte conductora destinada a estar bajo tensión en servicio normal (ejemplo: conductores de fase y conductor de neutro y bornes de conexión del equipamiento, barras de cobre de un tablero eléctrico).
- **Masa:** toda parte conductora de un equipo eléctrico que puede ser tocada y que normalmente no está bajo tensión pero que puede ser puesta bajo tensión en caso de falla del aislamiento principal (ejemplo: gabinete metálico de los tableros eléctricos, canalizaciones metálicas de los conductores activos, carcasa metálica de motores, transformadores u otros equipos eléctricos).
- **Contacto directo:** contacto de las personas con las partes activas de una instalación eléctrica.
- **Contacto indirecto:** contacto de las personas con las masas puestas bajo tensión debido a una falla del aislamiento.
- **Tensión de contacto:** es la diferencia de potencial que aparece, debido a un defecto de aislamiento, entre dos partes conductoras simultáneamente accesibles.

Contactos directo e indirecto



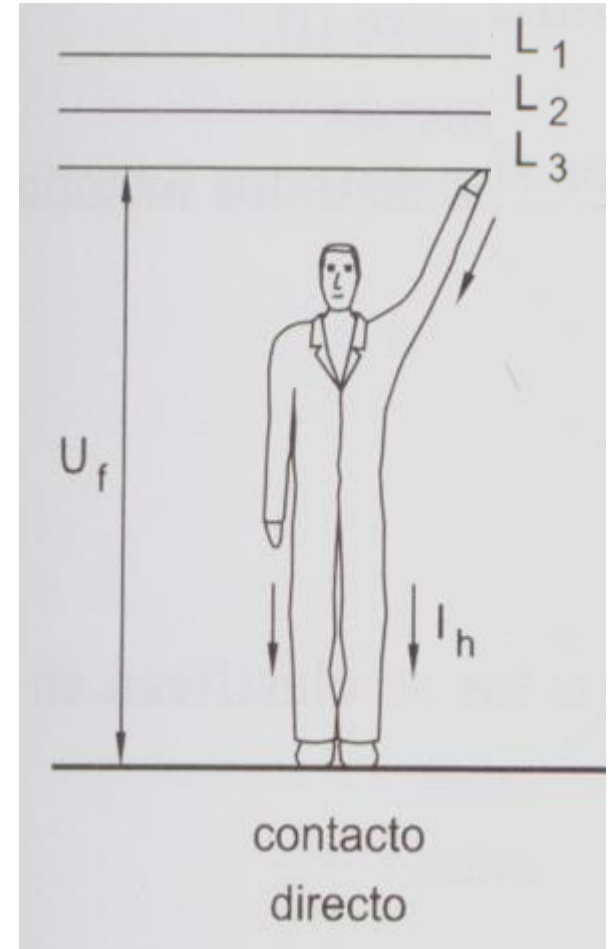
Contacto indirecto

- La corriente de defecto I_d , depende del sistema de distribución en baja tensión.



Protección contra contactos directos

- Las medidas de protección contra los contactos directos se clasifican en tres categorías:
 - Medidas de protección completas
 - Medidas de protección parciales
 - Medida de protección complementaria



Medidas de protección completas contra contactos directos

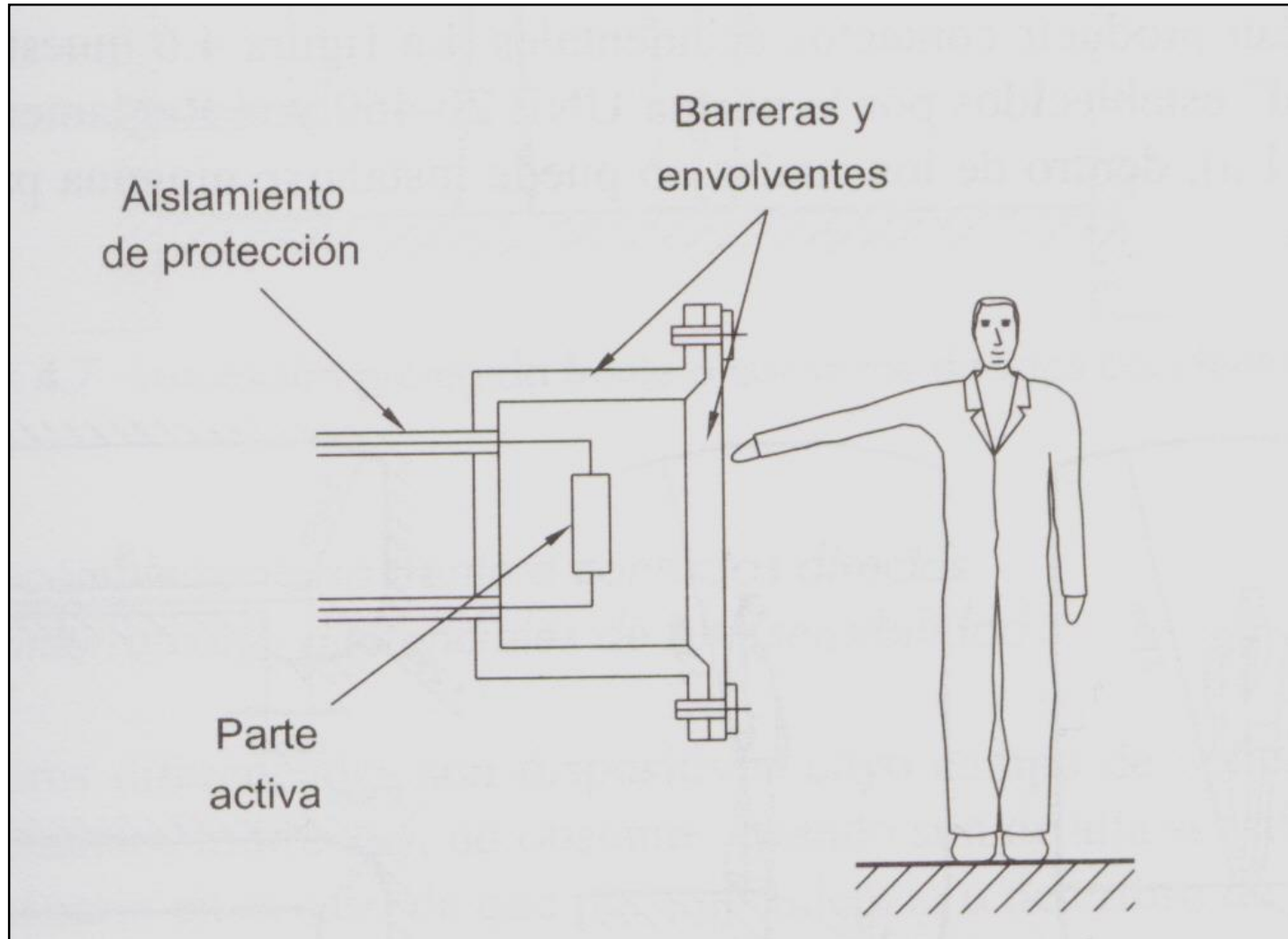
- Impiden cualquier contacto directo accidental o voluntario.
- Única que garantiza la protección contra los contactos directos
- Deben ser aplicadas en aquellos locales de acceso no restringido, en donde pueda circular personas si la capacitación técnica adecuada.

Medidas de protección completas contra contactos directos

- a) Aislamiento principal de las partes activas
 - Totalmente recubriendo las partes activas
 - Posibilidad de eliminar este aislamiento solo por destrucción
 - Soportar esfuerzos por estar en servicio (mecánicos, químicos, eléctricos y térmicos)

- b) Barreras o envolventes para las partes activas
 - Grado de protección mínimo IP2X ($\varnothing < 12\text{mm}$).
 - Eliminadas con una llave o herramienta con partes activas sin tensión
 - Se puede restablecer la tensión de las partes activas solamente previa reposición de la barrera o envolvente.


Protección contra contactos directos mediante aislamiento principal y barreras o envolventes





Tablero secundario

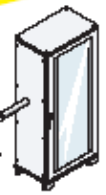



1ª CIFRA: protección contra cuerpos sólidos


1  Protegido contra los cuerpos sólidos superiores a 50 mm (ejemplo: contactos involuntarios de la mano)

2  Protegido contra los cuerpos sólidos superiores a 12,5 mm (ejemplo: dedo de la mano)


3  Protegido contra los cuerpos sólidos superiores a 2,5 mm (ejemplo: herramientas, cables)


4  Protegido contra los cuerpos sólidos superiores a 1 mm (ejemplo: herramientas finas, pequeños cables)


5  Protegido contra el polvo (sin sedimentos perjudiciales)

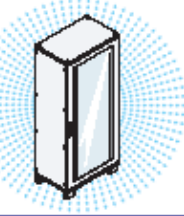
6  Totalmente protegido contra el polvo

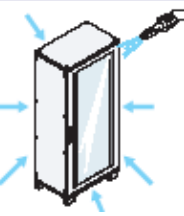
2ª CIFRA: protección contra el agua

1  Protegido contra la caída vertical de gotas de agua (ejemplo: condensación)

2  Protegido contra las caídas de agua verticales con una inclinación máxima de 15° de la vertical

3  Protegido contra el agua en forma de lluvia hasta 60° de la vertical

4  Protegido contra las proyecciones de agua en todas direcciones

5  Protegido contra los chorros de agua en todas las direcciones mediante manguera

Medidas de protección parciales contra contactos directos

- Impiden cualquier contacto directo accidental
- NO impiden el contacto voluntario
- Deben ser aplicadas solo en aquellos locales de acceso restringido a personal capacitado. (ej. Subestaciones)

Medidas de protección parciales contra contactos directos

a) Obstáculos

Los obstáculos deben impedir:

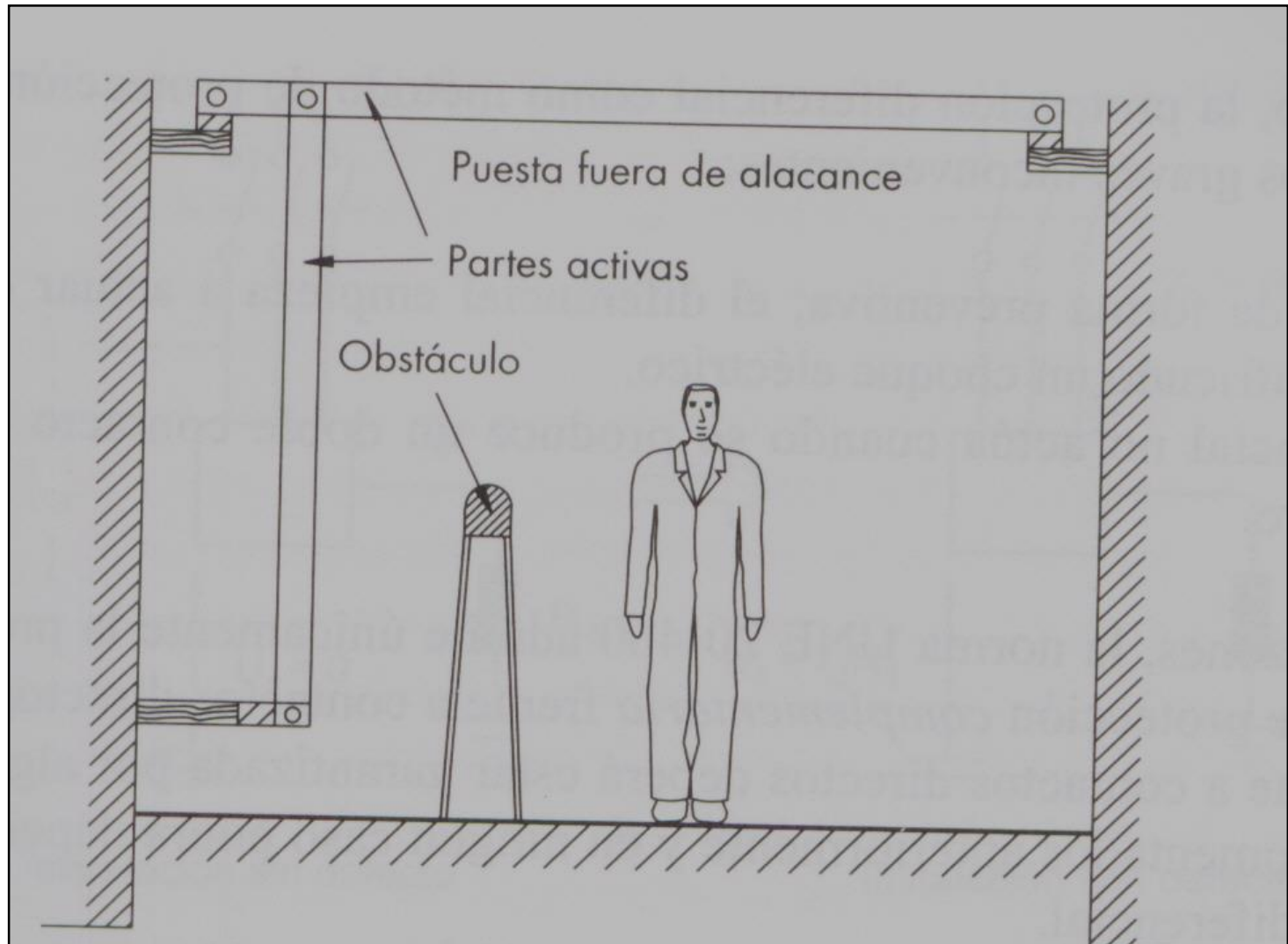
- Un acercamiento físico no intencional con las partes activas.
- Los contactos accidentales o fortuitos con las partes activas durante la operación.

Pueden ser removidos sin necesidad de utilizar una llave o herramienta. Se consideran obstáculos por ejemplo, barandas, vallas, enrejados, etc.

b) Puesta fuera del alcance normal

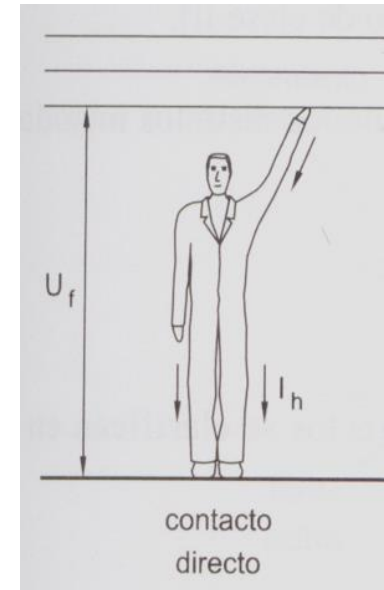
Partes activas fuera del alcance de forma de garantizar que no se puedan producir contactos accidentales.

Instalación protegida contra los contactos directos accidentales

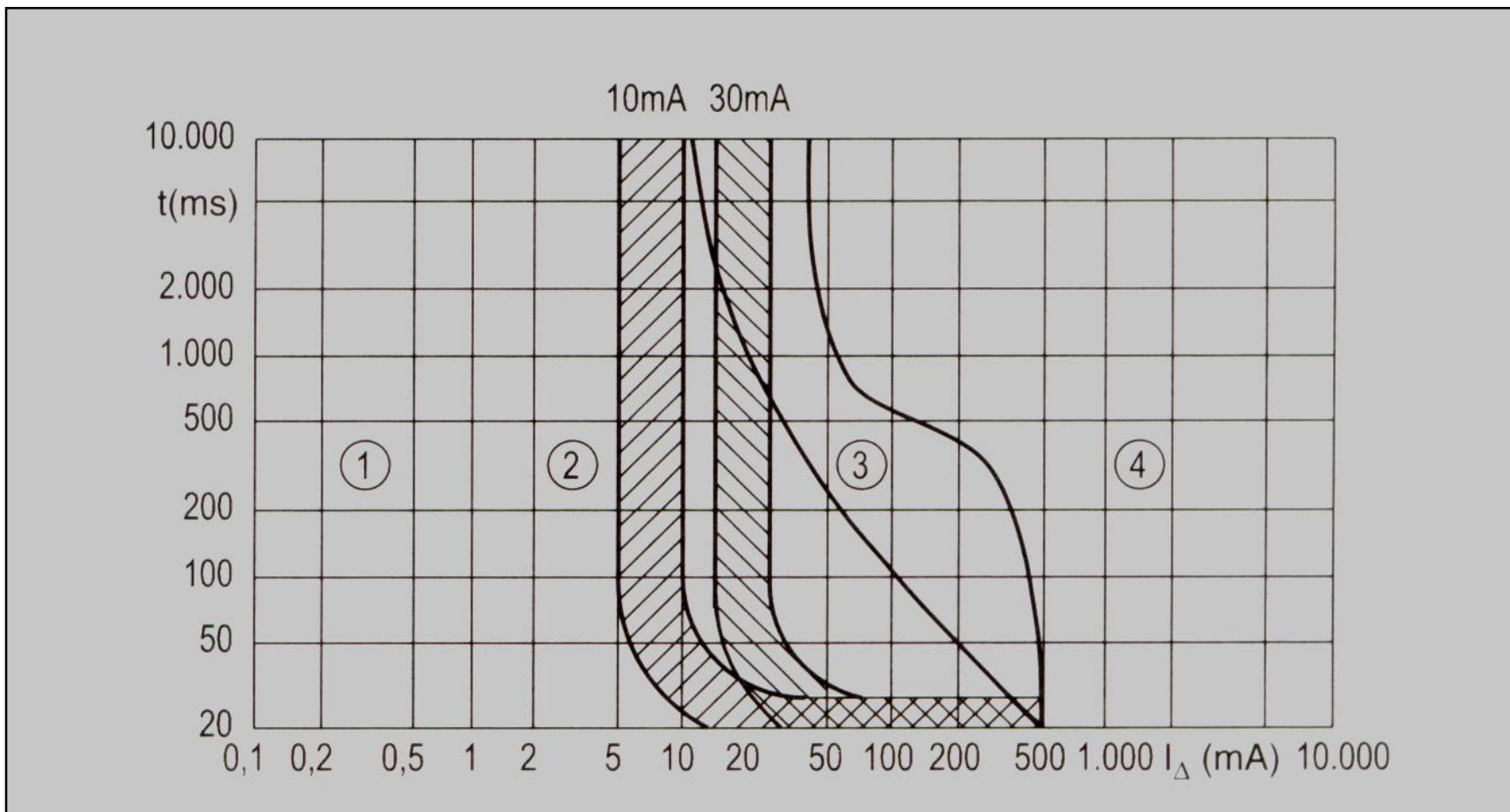


Medida de protección complementaria contra contactos directos

- Los interruptores diferenciales de alta sensibilidad ($I_{\Delta n} \leq 30mA$) protegen al usuario en el caso de que por imprudencia o deterioro de la instalación se produzca un contacto directo.
- Inconvenientes:
 - No actúa de forma preventiva, sino que comienza actuar cuando ya existe una persona sufriendo un choque eléctrico.
 - El interruptor diferencial no actúa cuando se produce un doble contacto directo fase-fase o fase-neutro.
- La protección contra contacto directo en ningún caso podrá depender sólo de la actuación del interruptor diferencial (protección complementaria)



Características de disparo de los interruptores diferenciales comerciales de alta sensibilidad



7. Dispositivos de protección diferencial residual



En condición normal de funcionamiento:

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 + \bar{I}_N = 0$$

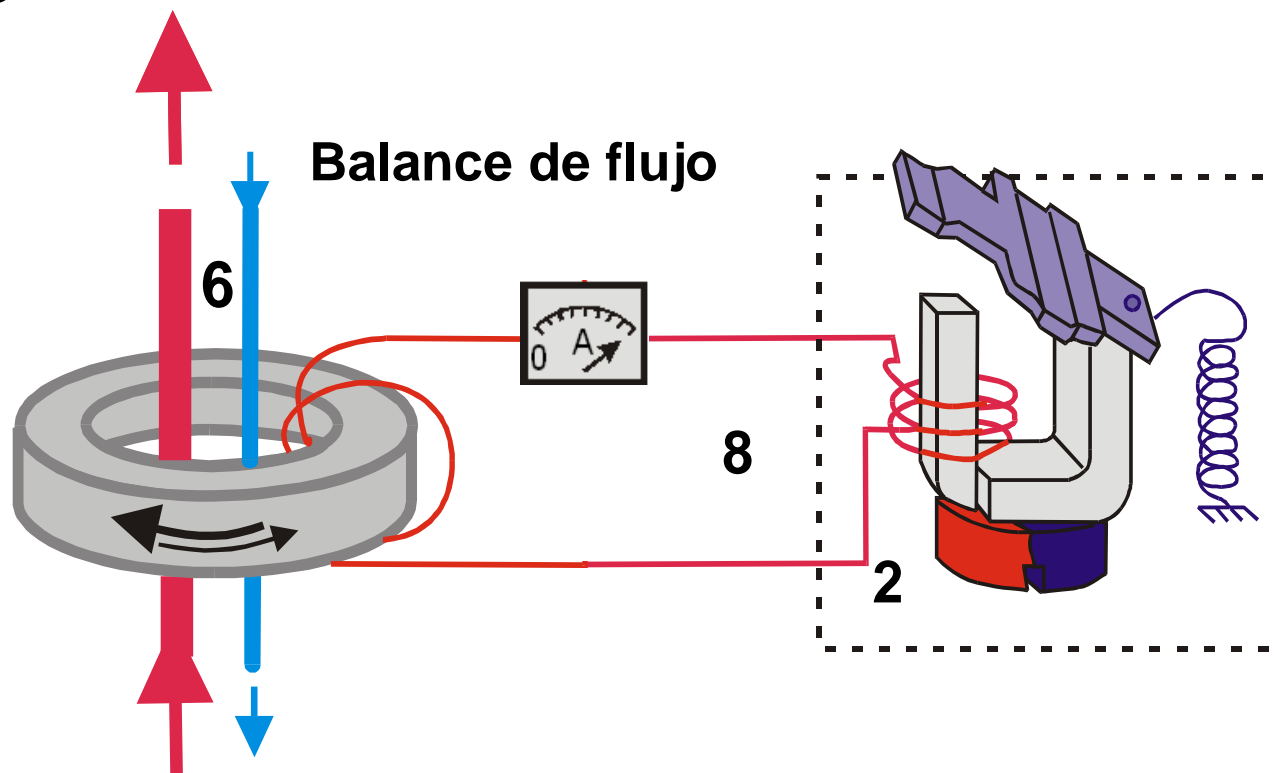
En condición de falla de aislamiento:

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 + \bar{I}_N = \bar{I}_d$$

Cuando el valor de I_d supera un cierto valor $I_{\Delta n}$ (corriente diferencial nominal de funcionamiento), se produce la orden de apertura al interruptor asociado.

Principio de funcionamiento

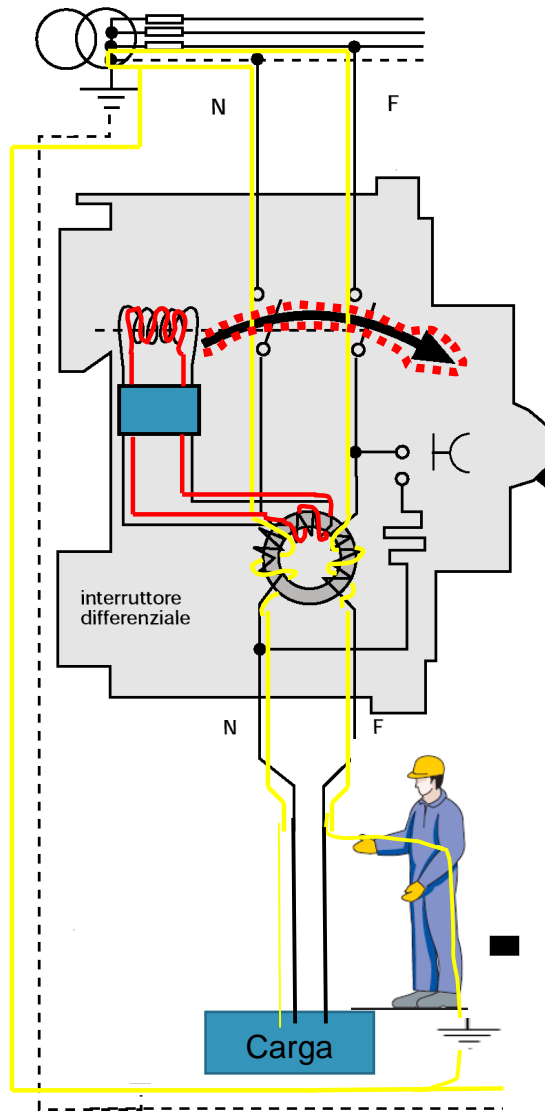
- Trip



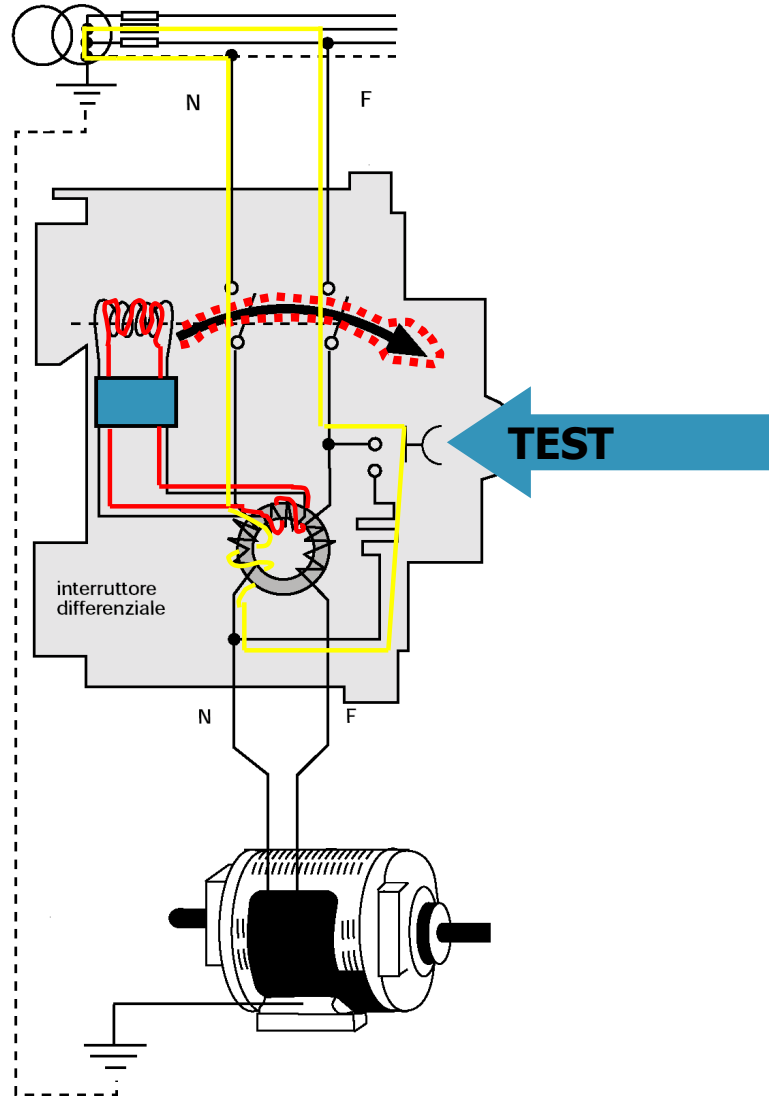
Intensidades del primario distintas = Intensidad de fuga = Disparo

Contacto directo

¿Como funciona un interruptor diferencial?



¿Como funciona un interruptor diferencial? Botón de test



Características diferenciales residuales

Corriente diferencial nominal de funcionamiento ($I\Delta n$), el dispositivo actúa en forma segura para corrientes de defecto:

$$I_d \geq I\Delta_n$$

Corriente diferencial nominal de no funcionamiento ($I\Delta n/2$), el dispositivo no actúa para corrientes de defecto:

$$I_d < \frac{I\Delta_n}{2}$$

Por lo que cuando se elige un dispositivo diferencial residual se deben tener en cuenta las fugas naturales de la instalación o circuito protegido:

$$\frac{I\Delta_n}{2} > I_{fugas}$$

Medida de protección complementaria contra contactos directos, diferencial 30mA

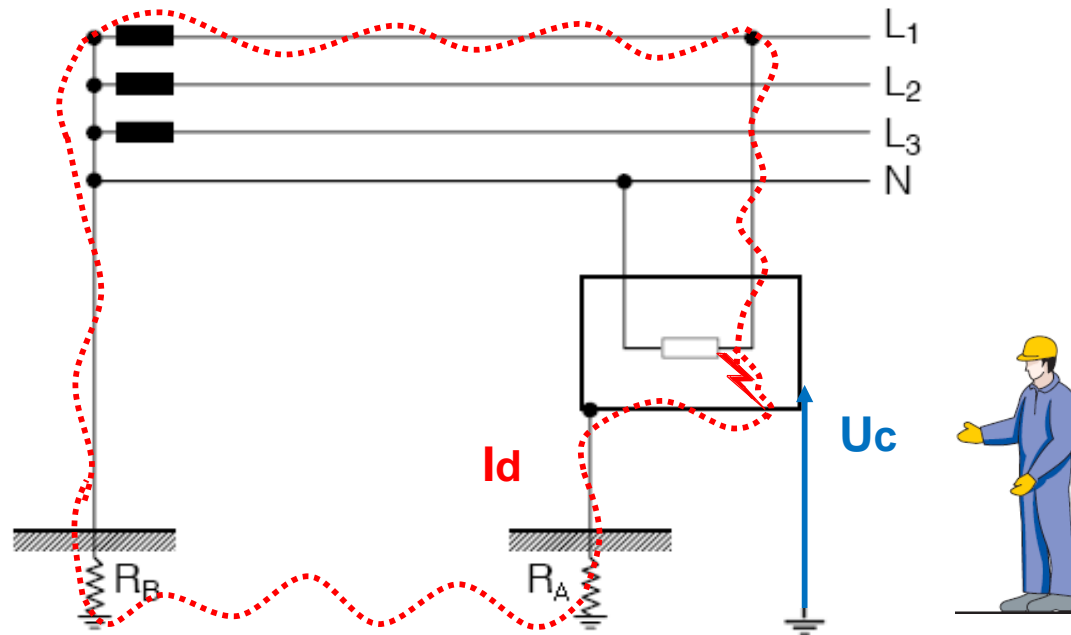
Reglamento de UTE de BT exige la protección con interruptores diferenciales residuales de alta sensibilidad para:

- Las instalaciones en viviendas y análogas.
- Los circuitos terminales que alimentan tomacorrientes.
- Las instalaciones de provisorios de obra.

Sensibilidad máxima de $I_{dn} = 30\text{mA}$

Contacto indirecto

- La corriente de defecto I_d , depende del sistema de distribución



Sistemas de Distribución en baja tensión

- En las instalaciones de baja tensión se distinguen tres sistemas de distribución según la forma de realizar la puesta a tierra de las masas de la instalación y del neutro de transformador (TT, TN, IT).

Nomenclatura utilizada:

1^{era} letra : representa la situación del neutro del transformador respecto a tierra.

T → neutro de alimentación conectado a tierra

I → aislamiento de todas las partes activas de la alimentación respecto a tierra o conexión del neutro a través de una impedancia elevada

Sistemas de Distribución en baja tensión

- Sistemas de distribución (TT, TN, IT).

Nomenclatura utilizada:

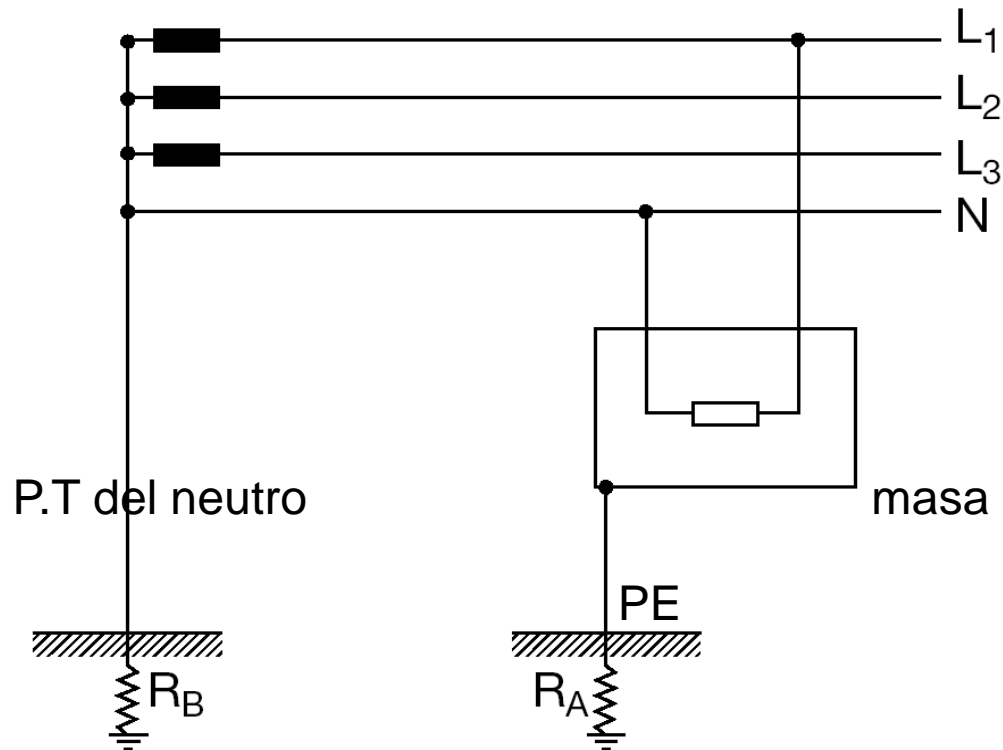
2^{nda} letra : representa la situación de las masas respecto a tierra.

T → masas conectadas directamente a tierra

N → masas conectadas a tierra a través del neutro del transformador

Sistema de distribución TT

- Puesta a tierra del neutro del transformado eléctricamente independiente de la puesta a tierra de las masas de la instalación de baja tensión.
 - Sistema de distribución utilizado en las Red de Distribución Pública en 400V de UTE (sistema trifásico de 4 conductores, 3 fases y neutro).

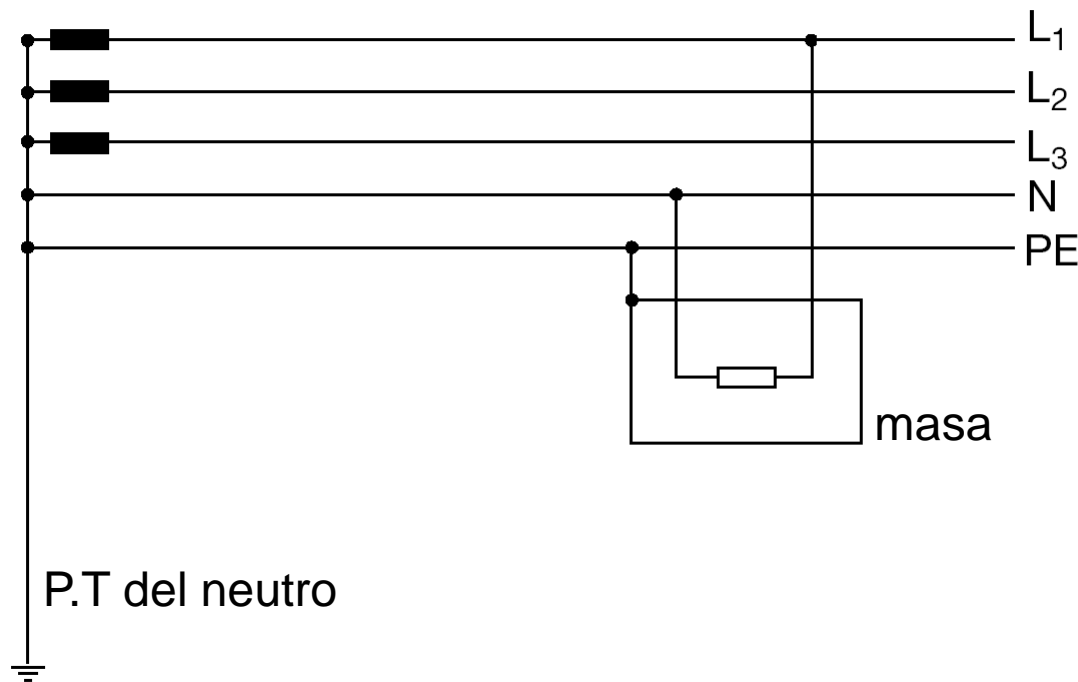


Sistema de distribución TN

- Se dispone de una única puesta a tierra a la que se conecta el Neutro del secundario del transformador y las masas de la instalación de baja tensión.
- Habitualmente utilizado en instalación industriales alimentadas de la Red de Distribución directamente en media tensión y disponen de una subestación transformadora.
- Tres variantes:
 - **Sistema TN-S**: Los conductores de neutro y de protección están siempre separados (N y PE).
 - **Sistema TN-C**: Las funciones de neutro y protección están combinadas en un único conductor (PEN).
 - **Sistema TN-C-S**: Las funciones de neutro y de protección están combinadas en un único conductor en una parte de la instalación (PEN) y están separados en otra parte (PE + N).

Sistema TN-S

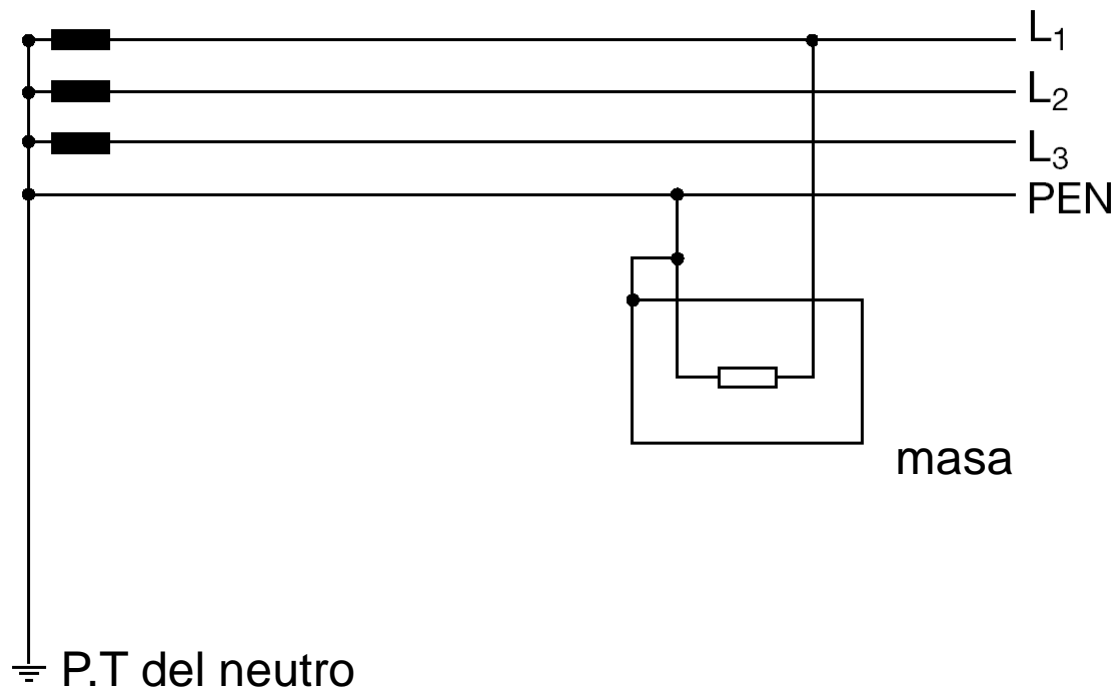
- En este sistema se utilizan dos conductores, uno como neutro de servicio (conductor N) y el otro como conductor de protección conectado a las masas (conductor PE). El conductor de neutro y el conductor de protección están separados en toda la instalación.



Sistema TN-C

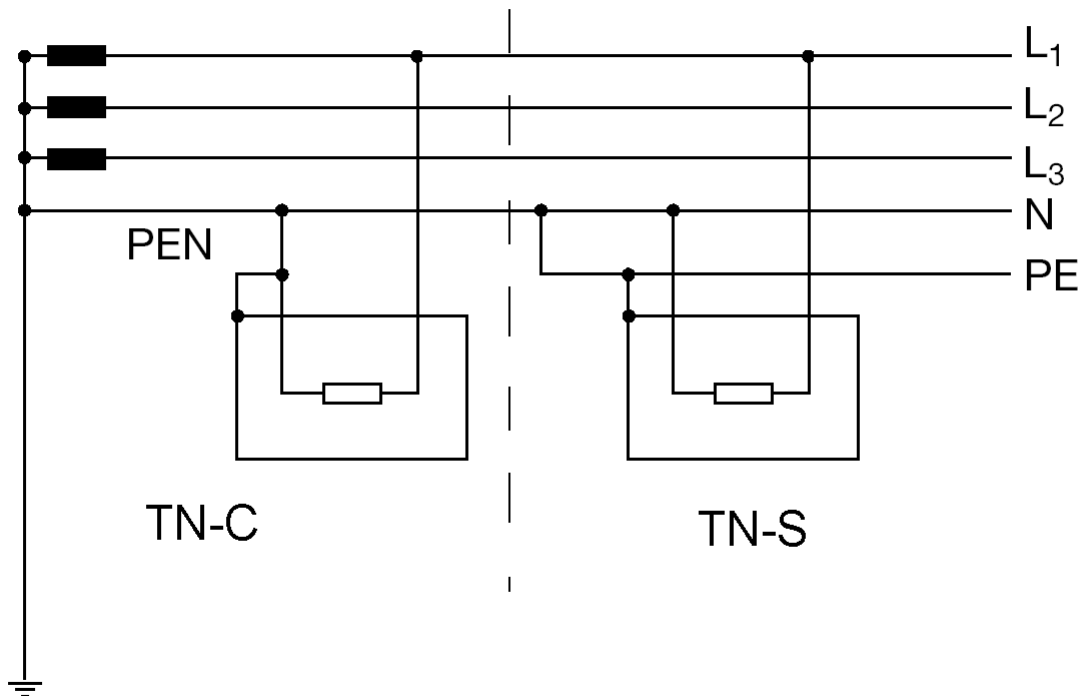
- Las funciones de neutro y de protección están combinadas en un solo conductor (PEN) en toda la instalación.

LAS NORMAS RECOMIENDAN FUERTEMENTE LA NO UTILIZACIÓN DEL SISTEMA TN-C.



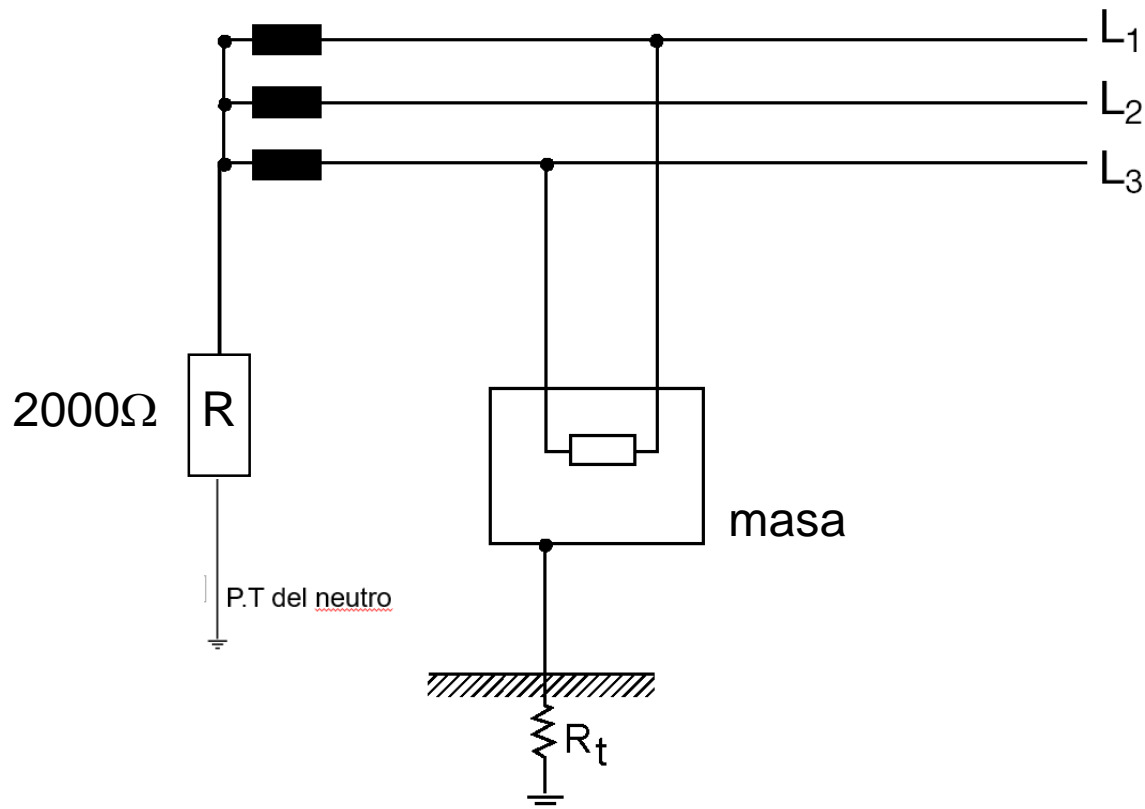
Sistema TN-C-S

- Se utiliza en algunas instalaciones industriales, TN-C desde el Transformador al TG, y un sistema TN-S hacia los Tableros derivados a las Cargas.



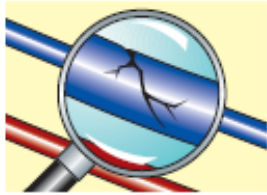
Sistema de distribución IT

- El sistema IT tiene todas las partes activas aisladas de tierra incluido el neutro o el neutro del sistema conectado a tierra a través de una Resistencia elevada 1000 a 2000 Ω , mientras que las masas de la instalación de baja tensión se conectan a una puesta a tierra de protección directamente.
 - Este sistema de distribución es el que se utiliza en la Red de Distribución Pública en 230V de UTE (sistema trifásico 3 conductores, 3 fases).

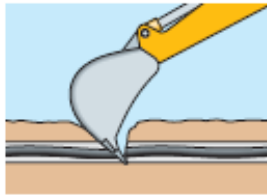


La pérdida de aislamiento entre conductores normalmente en tensión y piezas conductoras expuestas puede generar un defecto, lo que normalmente se denomina defecto a tierra.

Las causas principales de la pérdida de aislamiento son:



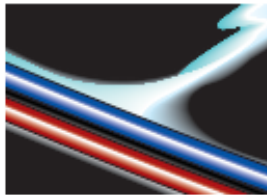
- deterioro temporal de las propiedades dieléctricas (grietas en las gomas aislantes, etc.);



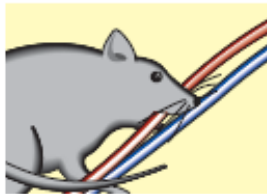
- rotura mecánica (p. ej. corte de un cable en el suelo por parte de una excavadora);



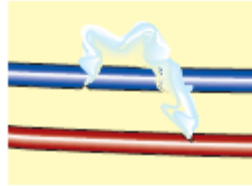
- entornos especialmente agresivos (presencia de polvo, humedad, contaminación, etc.);



- sobretensiones de origen atmosférico o debidas a conmutaciones eléctricas;



- acción de roedores.



- arcos eléctricos localizados y sobrecalentamientos subsiguientes;



- perturbaciones en los sistemas de telecomunicaciones;



- fenómenos de erosión de los electrodos de tierra.

Protección contra contactos indirectos

Medida de protección por corte automático de la alimentación

Se deben cumplir las siguientes condiciones generales para garantizar la seguridad:

- Las masas deben ser conectadas a la puesta a tierra de acuerdo con el tipo de sistema de distribución (TT, TN o IT).
- Todas las masas accesibles simultáneamente deben ser conectadas a la misma puesta a tierra de protección.

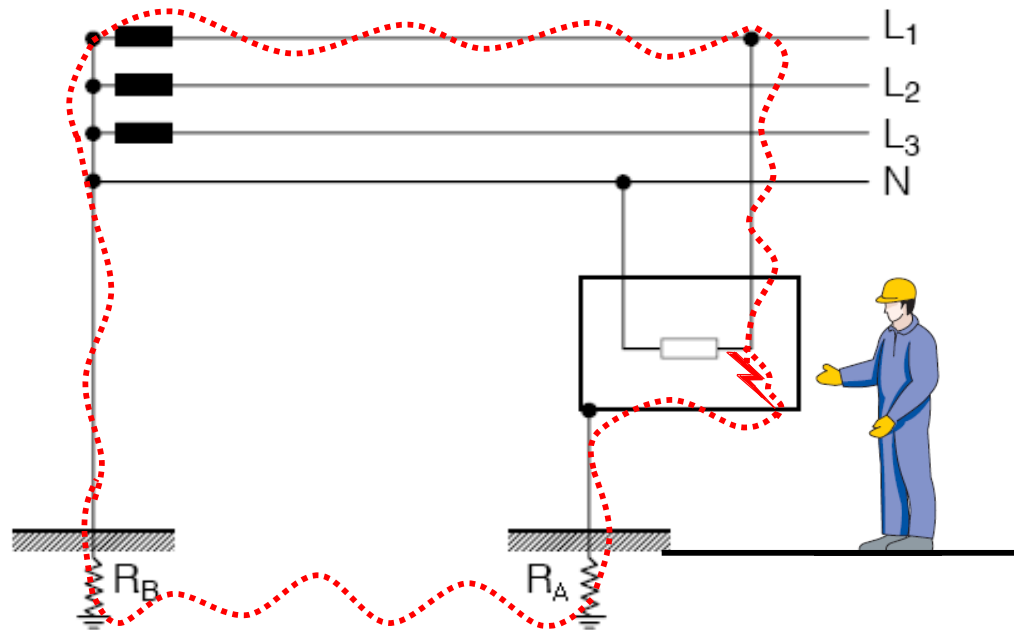
Para cualquier defecto de aislación con tensión de contacto mayor a la tensión límite de seguridad:

$$U_C > U_L$$

- El dispositivo de protección debe actuar desconectando la alimentación del circuito.
- La desconexión automática de la alimentación se debe hacer en un tiempo inferior al tiempo máximo de seguridad según la tensión de contacto.

Sistemas TT

- El sistema TT es el que se utiliza en prácticamente todas las instalaciones alimentadas desde la red pública en BT, y también en algunas plantas industriales de pequeño porte que cuentan con Subestación de Transformación propia.



Sistemas TT

- Como la impedancia de los cables de fase y del secundario del transformador (decenas a centenas de $m\Omega$) \lll resistencias de las puesta a tierra de protección y del neutro (decenas de Ω). La corriente queda determinada aproximadamente por la siguiente expresión:

$$I_d \cong \frac{U_0}{R_A + R_B + R_d} \Rightarrow I_d = \frac{U_0}{R_A + R_B} \quad (R_d = 0 - \text{defecto franco})$$

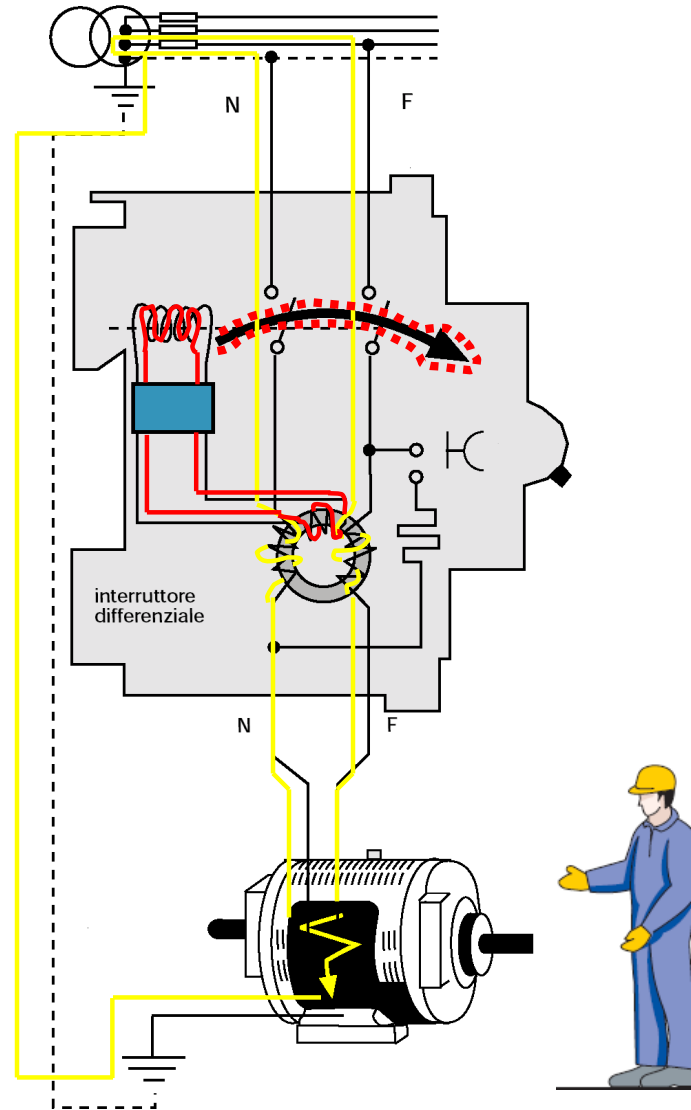
$$U_{c_{M\acute{A}X}} = R_A \cdot I_d = U_0 \cdot \frac{R_A}{R_A + R_B} = \frac{U_0}{1 + \frac{R_B}{R_A}}$$

- La corriente de defecto será de decenas de amperios, y en la mayoría de los casos los interruptores automáticos de protección contra sobrecorrientes no actuarán frente a dichas corrientes en el tiempo que se requiere.

Por lo tanto en este tipo de sistemas se debe utilizar dispositivos de protección diferencial residual para la protección contra los contactos indirectos.

Contacto Indirecto sistema TT

¿Como funciona un interruptor diferencial?



Tipos de interruptores diferenciales residuales:

- Norma IEC 61008: Interruptores automáticos para actuar por corriente diferencial residual, sin dispositivo de protección contra sobrecorrientes, para usos domésticos y análogos.
- Norma IEC 61009: Interruptores automáticos para actuar por corriente diferencial residual, con dispositivo de protección contra sobrecorrientes incorporado, denominados del tipo “combinados”, para usos domésticos o análogos.
- Norma IEC 60947-2: Interruptores automáticos con protección diferencial residual incorporada. Bloque diferencial adaptable a interruptor automático caja moldeada o Relé diferencial con “toroide separado”.

Interruptor diferencial tipo Riel Din



Corriente nominales: 25, 40, 63, 80 y 100A

Sensibilidad I_{dn} : 10, 30, 100, 300, 500mA

Cantidad de polos: 2 y 4 polos

Tipos de diferenciales según los tipos de corrientes que detectan, (AC, A, B)

Y además estos pueden ser clasificados por los tiempos de actuación, selectivos, inmunizados.

Dispositivo de detección de corriente diferencial

- No tiene como parte integrada el dispositivo de apertura del circuito
- Habitualmente utilizado para colocar protección diferencial en un interruptor en caja moldead.



- Relé diferencial (norma IEC 62020)



- Transformador externo que puede detectar fugas de corriente.

- Regulación de sensibilidad:

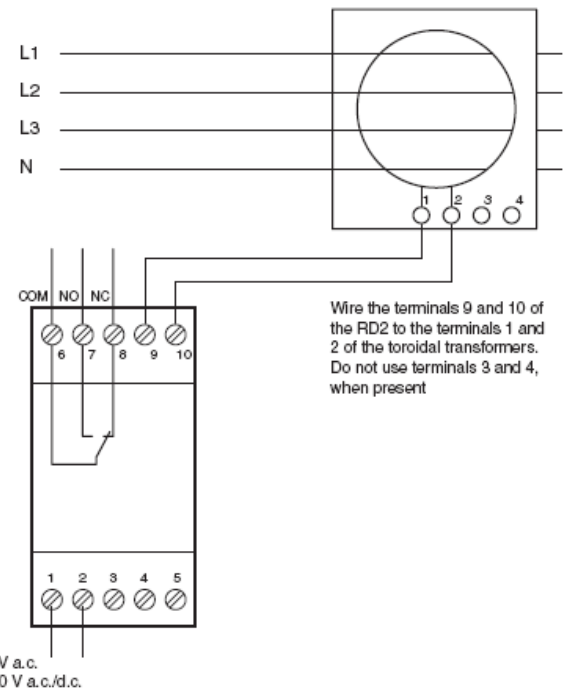
Ejemplo: $I_d = 0.03 \dots 5A$

- Regulación de tiempo de actuación:

Ejemplo: Tiempo= $0.05 \dots 2s$


- Toroides de distintos diámetros:

Ejemplo: 35mm hasta 210mm



Criterio práctico de selección del dispositivo de protección diferencial en un Sistema TT:

La corriente diferencial nominal de funcionamiento del dispositivo diferencial residual de protección y la resistencia de la puesta a tierra de protección de las masas deben cumplir la siguiente condición:


$$R_A \cdot I\Delta_n \leq U_L$$


R_A Es la resistencia de la puesta a tierra de protección.

U_L Es la tensión límite de seguridad: 50V (locales secos), 25V (locales mojados).

$I\Delta_n$ Es la corriente diferencial nominal (sensibilidad) de funcionamiento del dispositivo de protección.

La condición anterior garantiza que todos los defectos que originan tensiones de contacto $> U_L$ provocarán el disparo del dispositivo diferencial.

Criterio práctico de selección del dispositivo de protección diferencial en un Sistema TT:

 El dispositivo diferencial residual debe actuar en un tiempo menor al tiempo máximo de seguridad según la tensión de contacto.

DISPOSITIVO DIFERENCIAL NO LIMITA LA TENSIÓN DE CONTACTO, SINO QUE ACTUA LIMITANDO EL TIEMPO QUE PUEDEN PERMANECER LA TENSIONES DE CONTACTO $> U_L$.

Interruptor diferencial – Tiempos de disparo IEC

<u>protección diferencial</u>		tiempos de actuación s/IEC 1008					
Tipo	I_n A	$I_{\Delta n}$ A	$I_{\Delta n}$	$2 I_{\Delta n}$	$5 I_{\Delta n}$	500 A	[Seg]
Gral.	Cualq. Valor	Cualq. Valor	0,3	0,15	0,04	0,04	tiempo de func. max.
S	≥ 25	$> 0,03$	0,5	0,2	0,15	0,15	tiempo de func. max.
			0,13	0,06	0,05	0,04	tiempo de no actuación

Tiempos máximos de seguridad


Tiempos máximos de seguridad (s)		
Tensión de contacto (V)	Estado seco	Estado mojado
25	∞	∞
50	∞	0,48
75	0,60	0,30
90	0,45	0,25
120	0,34	0,18
150	0,27	0,12
220	0,17	0,05
280	0,12	0,02
350	0,08	-
500	0,04	-

Criterio práctico de selección del dispositivo de protección diferencial en un Sistema TT:

Corriente diferencial nominal de no funcionamiento ($I\Delta n/2$), el dispositivo no actúa para corrientes de defecto:

$$I_d < \frac{I\Delta_n}{2}$$

Por lo que cuando se elige un dispositivo diferencial residual se deben tener en cuenta las fugas naturales de la instalación o circuito protegido:


$$\frac{I\Delta_n}{2} > I_{fugas}$$

Comentarios sobre la Protección en el Sistema TT

- Para el cálculo de la tensión de contacto máxima se considera la peor condición, defecto franco ($R_d = 0$), que la persona está en contacto simultáneo con la masa en defecto y con el potencial de referencia de tierra (0 V), y se desprecia la corriente de defecto que se deriva por el cuerpo (resistencia cuerpo humano $\gg R_A$).
- Otro aspecto importante es que cuanto menor sea la Resistencia de la Puesta a Tierra de Protección R_A , menor será la tensión de contacto. La limitación de la tensión de contacto aumenta el margen de seguridad en las instalaciones para los usuarios.

$$U_{c_{MÁX}} = R_A \cdot I_d = U_0 \cdot \frac{R_A}{R_A + R_B} = \frac{U_0}{1 + \frac{R_B}{R_A}}$$

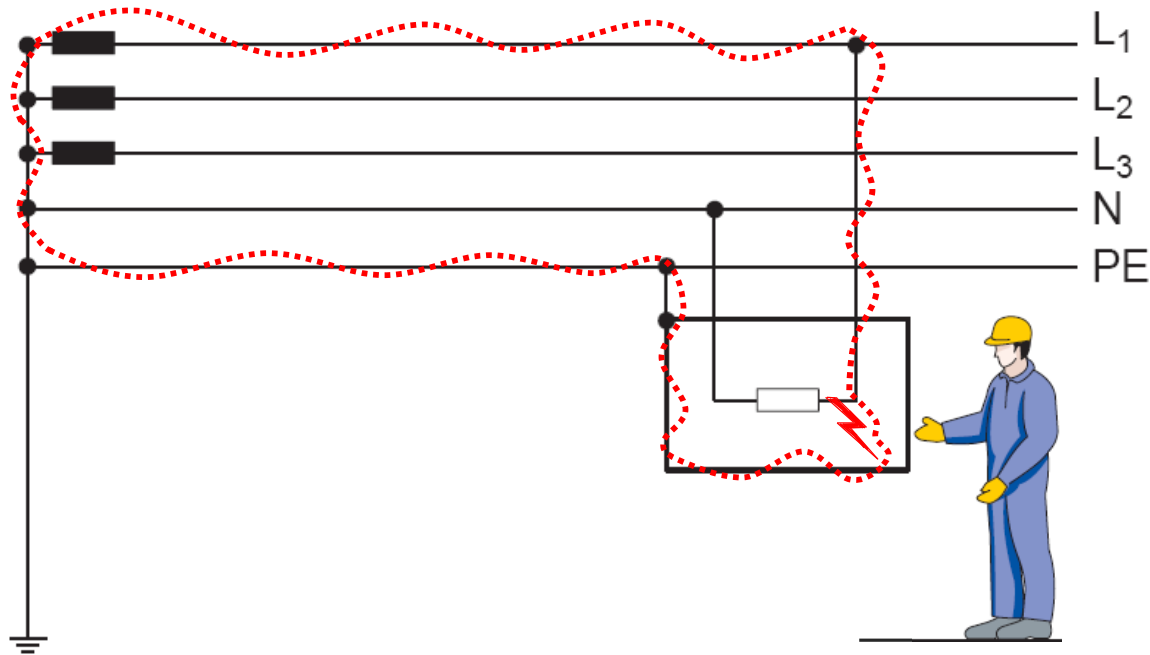
- Valor de la Resistencia de Puesta a Tierra:
Una vez adoptado un valor $I\Delta_n$ en la práctica se debe diseñar con valores:

$$R_A \ll \frac{U_L}{I\Delta_n}$$

- Esto es debido a que el valor de la resistencia de puesta a tierra de la instalación, una vez en servicio puede diferir del que se toma como base para el proyecto, a causa de errores en la estimación de la resistividad del terreno y a las variaciones estacionales a las que está sometida.

Sistema TN-S

- En general este sistema de distribución es muy utilizado en grande plantas industriales, en las que se cuenta con un servicio de mantenimiento calificado.



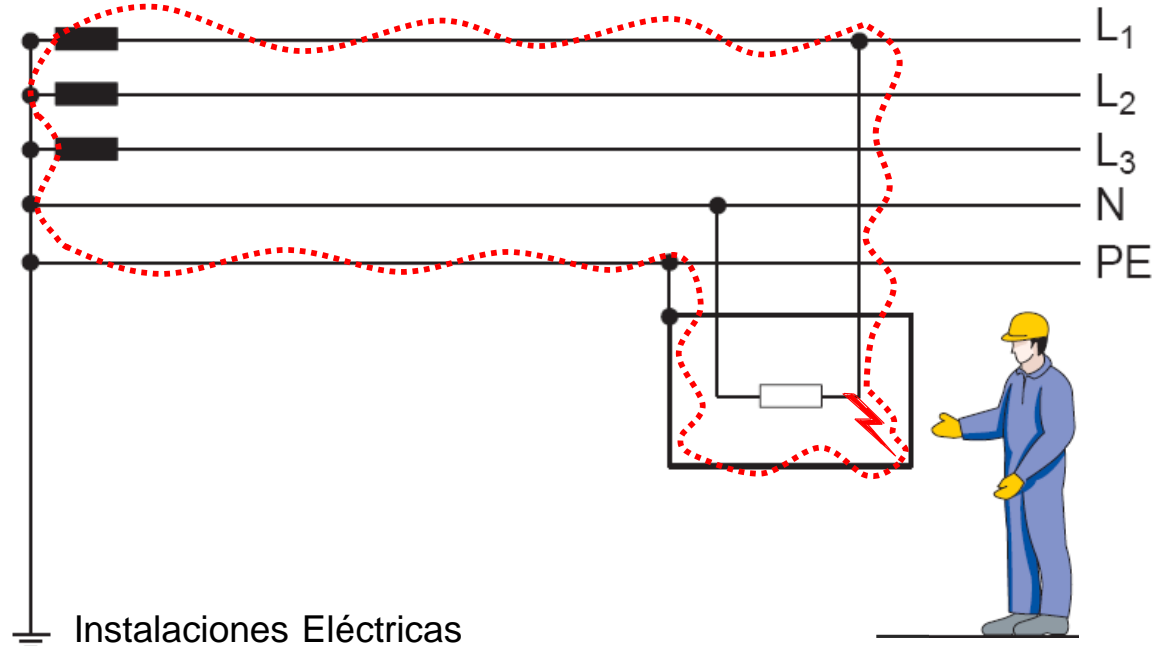
Sistema TN-S

- La corriente de defecto esta limitada únicamente por la impedancia de los conductores de fase y de protección y del secundario del transformador (del orden de decenas o centenas de $m\Omega$), por lo que la corriente de defecto será del orden de kA.
- Protección contra contactos indirectos: interruptores automáticos

$$I_d = \frac{U_0}{Z_S}$$

U_0 , es la tensión nominal entre fase y neutro de la instalación.

Z_S , es la impedancia del bucle de defecto.



Sistema TN-S

- La corriente de defecto puede ser calculada en forma aproximada por la siguiente expresión, si el conductor de protección (PE) forma parte de la misma canalización que los conductores de fase (esto es lo usual en sistemas TN-S):

➔

$$I_d = \frac{U_0}{Z_S} \cong \frac{U_0}{\sqrt{\left[R_T + \sum \left(\frac{\rho_F L_F}{S_F} + \frac{\rho_{PE} L_{PE}}{S_{PE}} \right) \right]^2 + \left[X_T + \sum (x_F L_F + x_{PE} L_{PE}) \right]^2}}$$

- Cálculo aproximado** ($S < 120 \text{ mm}^2$): : se considera sólo la impedancia de los cables del circuito final protegido, y la hipótesis de que la tensión cae un 20% cuando hay un defecto franco. Se cumple que los conductores de fase y de protección son del mismo largo, del mismo material conductor, y se puede despreciar la reactancia ($S < 120 \text{ mm}^2$):


$$I_d = \frac{0,8 \cdot U_0}{\frac{\rho \cdot L}{S_F} \left(1 + \frac{S_F}{S_{PE}} \right)}$$

➔

$$U_{c_{MÁX}} = Z_{PE} \cdot I_d \quad Z_{PE} = \text{Impedancia del conductor PE}$$

Sistema TN-S

- Para que los dispositivos de protección contra sobrecorrientes sean efectivos en la protección contra contactos indirectos se debe cumplir:


$$I_d \geq I_a$$

I_a Corriente que asegura la actuación del dispositivo de protección en un tiempo menor al tiempo máximo de seguridad según la tensión de contacto.

Para los interruptores automáticos la corriente I_a es en general la corriente de ajuste del disparo magnético, que siempre actúa en un tiempo inferior al tiempo máximo de seguridad.

- Como se puede observar en la expresión de I_d , la corriente de defecto es inversamente proporcional a la longitud del circuito, por lo que la condición anterior impone un límite para la longitud del circuito.

$$L \leq \frac{0,8 \cdot U_0 \cdot S_F}{\rho(1+m) \cdot I_a}$$

Sistema TN-S

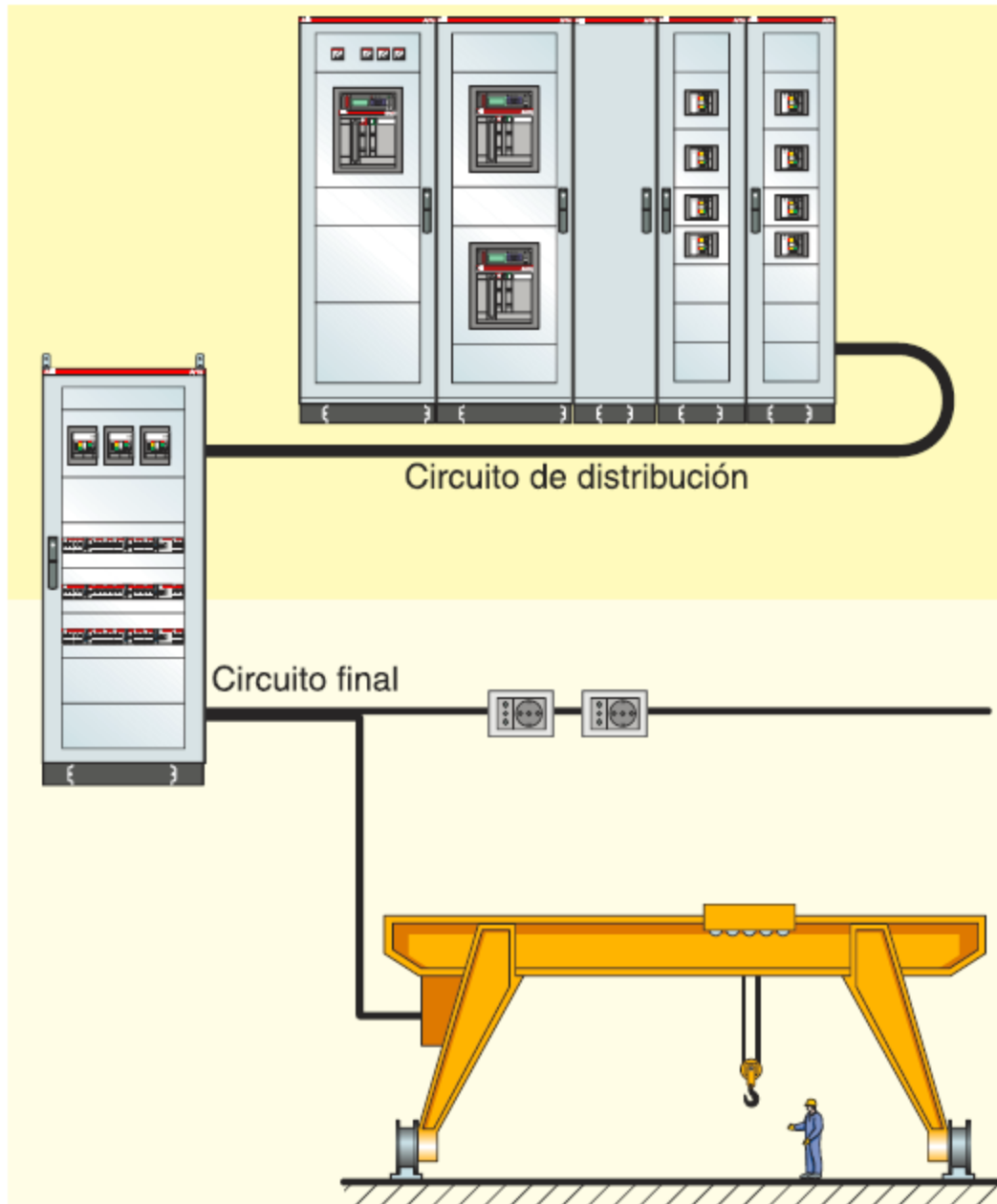
Método de selección del dispositivo establecido por la IEC 60439

$$Z_s \cdot I_a \leq U_0$$

I_a Corriente que asegura la actuación del dispositivo de protección en un tiempo como máximo igual al definido en la siguiente tabla, según la tensión nominal entre fase y neutro.

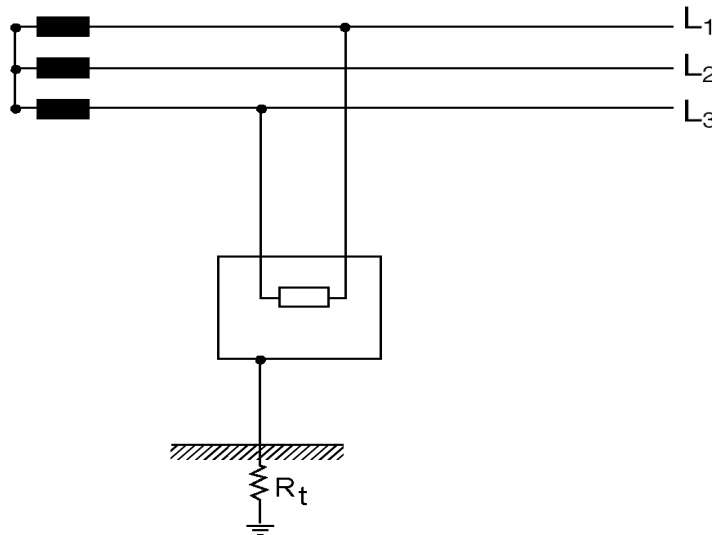
Tiempos de actuación máximo según la tensión de fase, válido para circuitos terminales que alimentan equipos y tomas.

U_0 (V)	Tiempo máximo de actuación (s)	
	Estado seco	Estado mojado
120, 127	0,8	0,35
220, 230	0,4	0,20
380, 400	0,2	

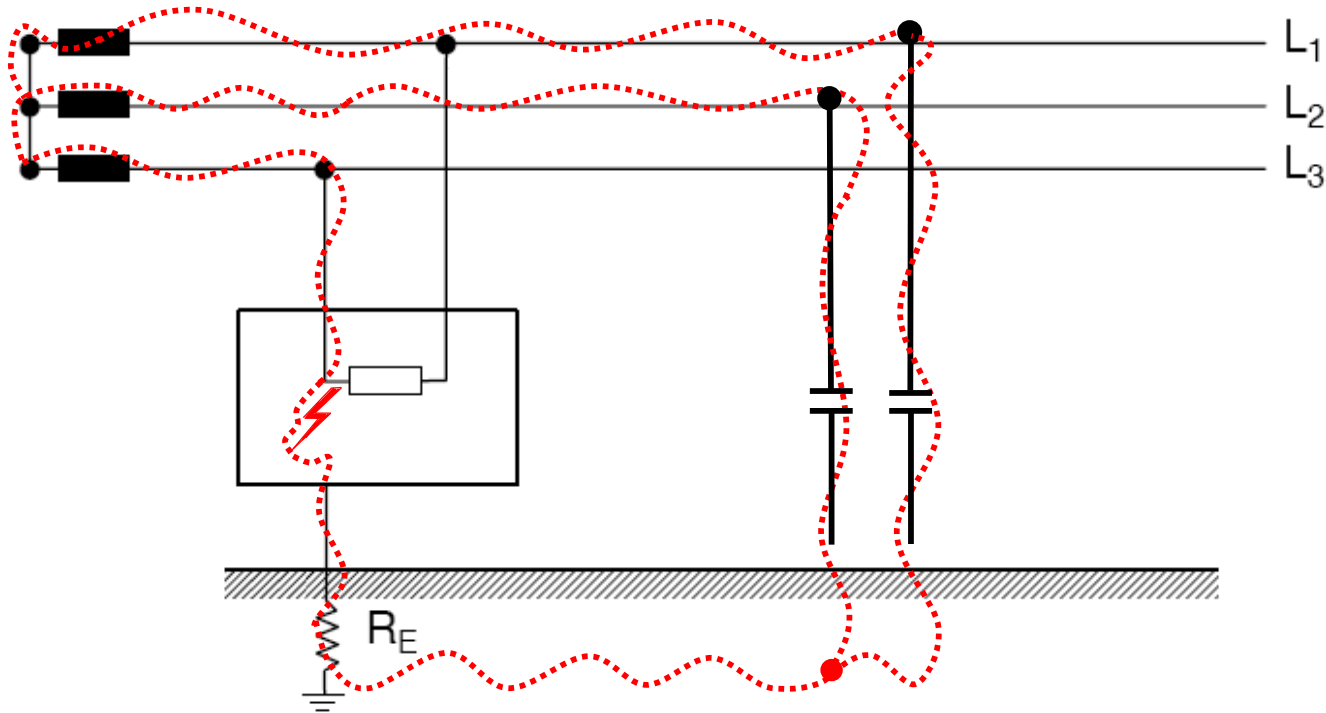


Sistema IT

- El esquema de distribución IT se emplea esencialmente en instalaciones en las que es necesario garantizar una elevada continuidad del servicio.
- En este caso el sistema de distribución está aislado de tierra o el neutro del sistema está conectado a tierra a través de una resistencia de valor elevado (1000 o 2000Ω). Las masas son conectadas a una puesta a tierra de protección.
- La resistencia de aislamiento entre fase y tierra de una instalación varía en función del envejecimiento de los aislantes, de los receptores, de las condiciones de humedad, etc.



Sistema IT



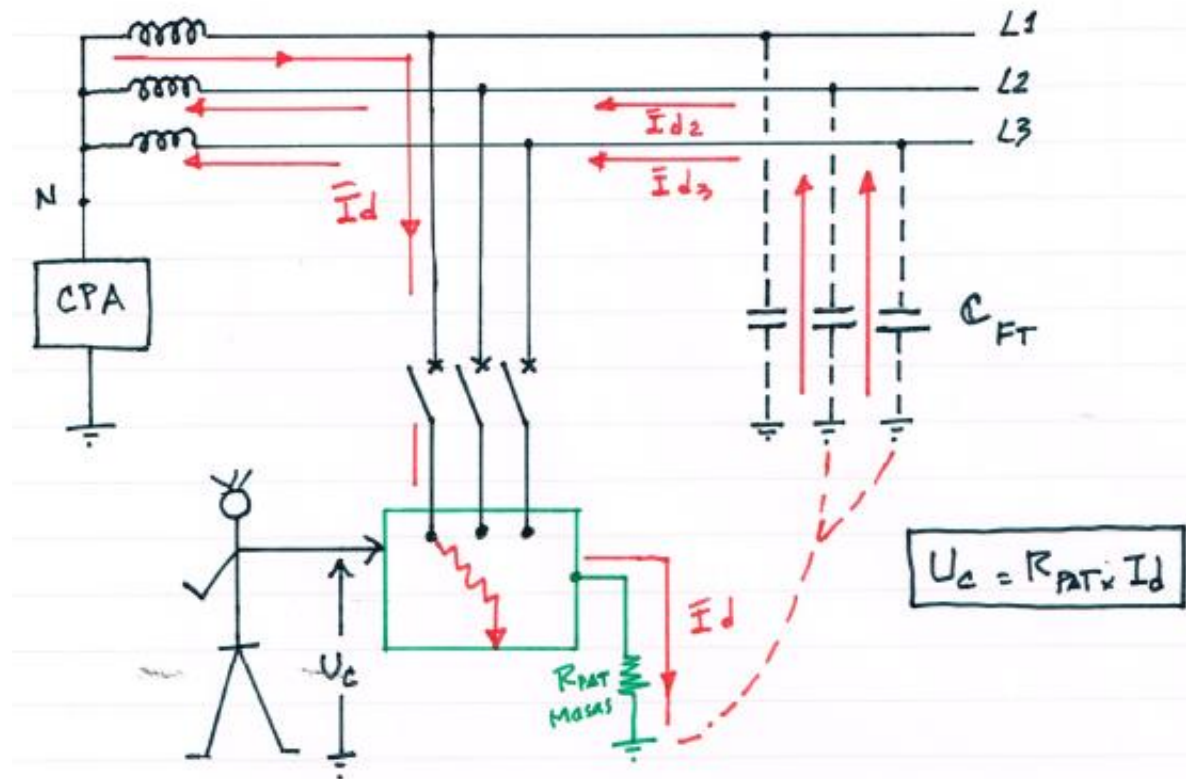
En caso de un primer defecto a tierra, la corriente circula a través de las impedancias capacitivas de los cables a tierra. La capacidad uniformemente distribuida fase a tierra de los conductores de una instalación de baja tensión sin falla es del orden de $0,3 \mu\text{F}/\text{km}$ por fase. Por lo que podemos considerar que la impedancia a tierra de un cable de un fase de baja tensión de 1km de longitud es aproximadamente:

$$Z_{C_{FT}} \cong \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{FT}} = \frac{1000}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,3} = 10,6 \text{ k}\Omega$$

MEDIDAS DE PROTECCION CONTRA CONTACTOS INDIRECTOS

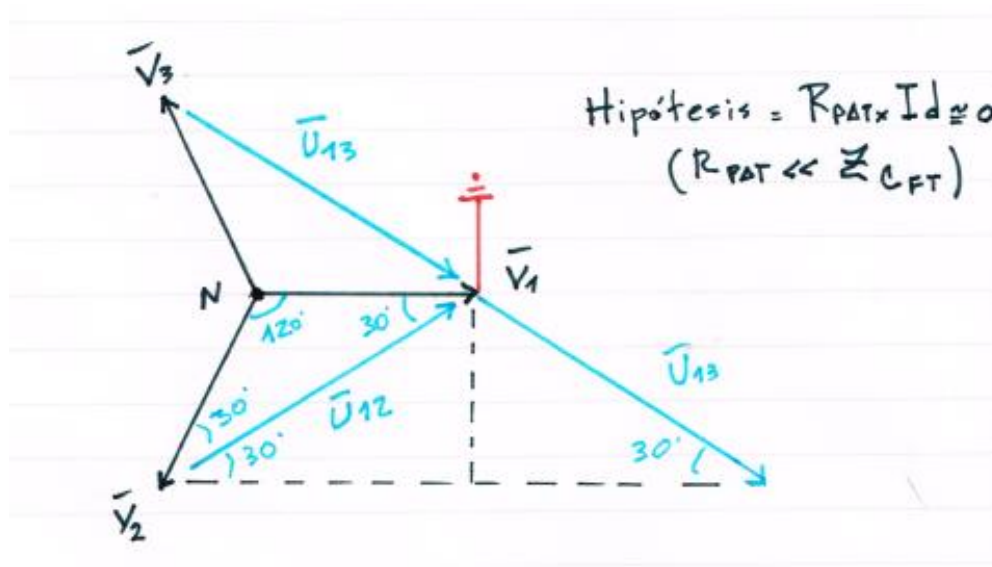
Sistema de Distribución IT

El bucle de un **primer defecto de aislamiento** esta formado por los conductores de fase, la puesta a tierra de las masas, el retorno por las fugas capacitivas a tierra de la instalación y las fases involucradas del secundario del transformador.



MEDIDAS DE PROTECCION CONTRA CONTACTOS INDIRECTOS

Sistema de Distribución IT: primer defecto fase-masa



$$\vec{I}_d = \vec{I}_{d2} + \vec{I}_{d3} = j\omega C_{FT} \vec{U}_{12} + j\omega C_{FT} \vec{U}_{13} = j\omega C_{FT} (\vec{U}_{12} + \vec{U}_{13})$$

$$I_d = \omega \times C_{FT} \times \sqrt{3} \times U_n$$

Si por ejemplo: $U_n = 230V$ $R_{PAT} = 10\Omega$ $C_{FT} = 3\mu F$ (10 km cables)

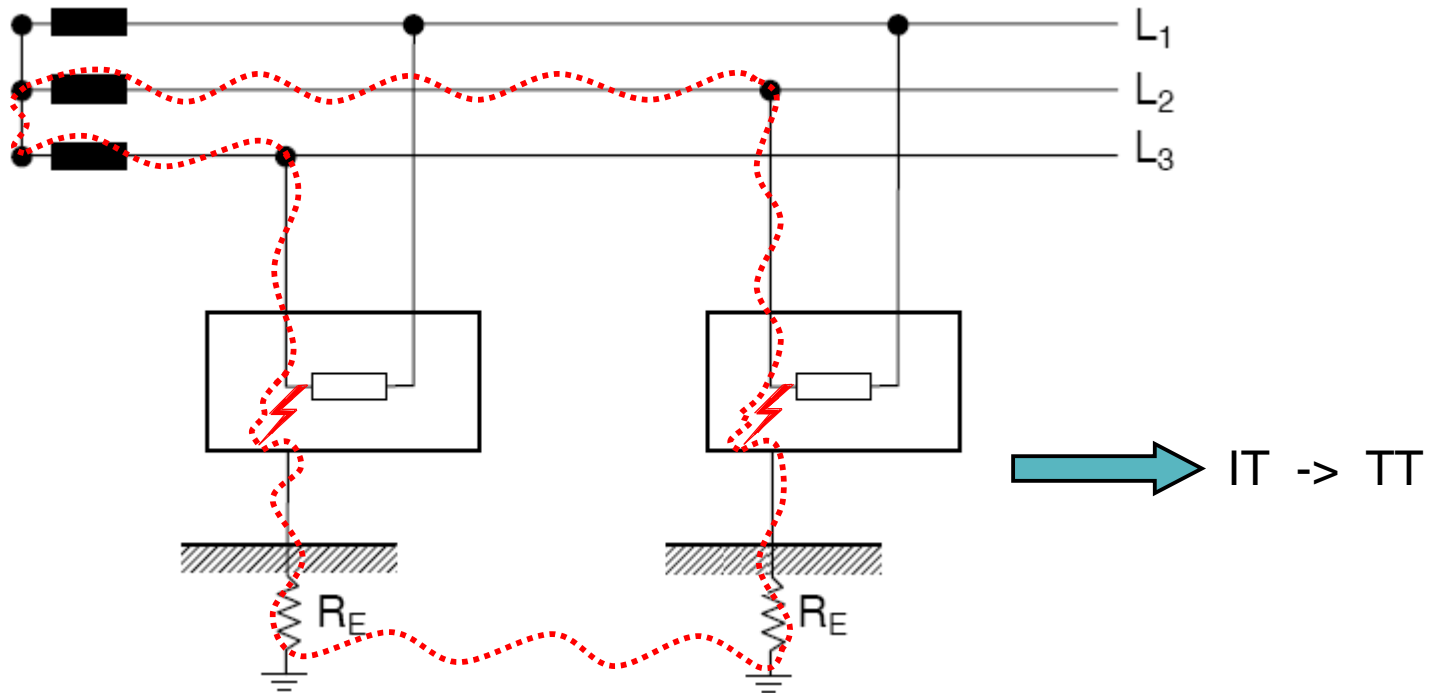
$$I_d = 2 \times \pi \times 50 \times 3 \cdot 10^{-6} \times \sqrt{3} \times 230 = 0,375 A$$

$$V_c = R_{PAT} \times I_d = 3,75V$$

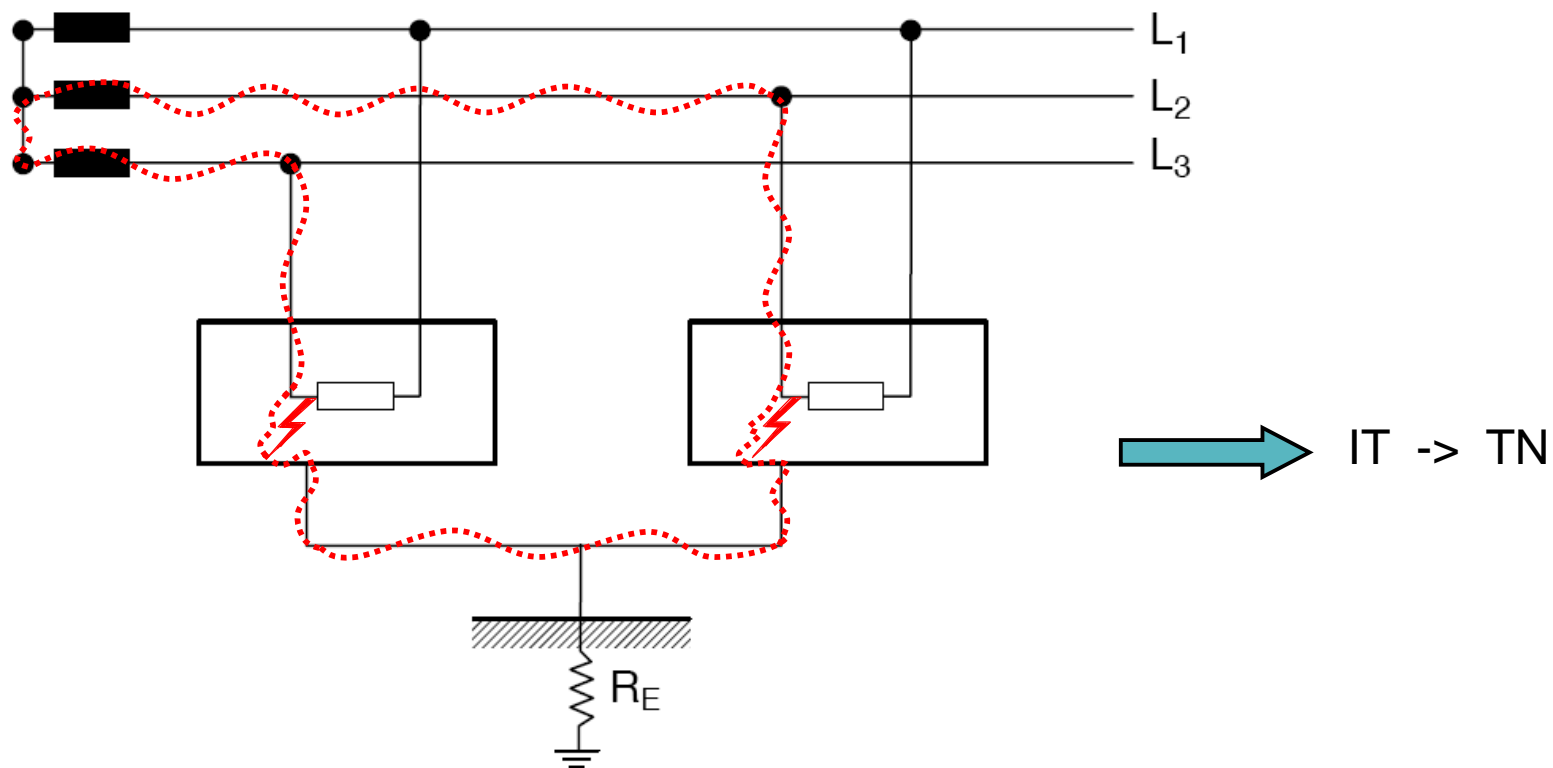
Sistema IT

- Primer defecto no genera una tensión de contacto peligrosa y la instalación puede mantenerse en servicio, pero se debe:
 - Señalizar el primer defecto de aislamiento mediante una alarma (acústica y visual), para lo cual se debe instalar un Controlador Permanente de Aislación (CPA).
 - Luego se debe localizar el defecto y eliminarlo lo antes posible, ya que en caso de un segundo defecto de aislamiento de una fase diferente si existirá riesgo para las personas.
 - En caso de un segundo defecto de aislamiento de dos fases diferentes, desde el punto de vista de la corriente de defecto el sistema se puede comportar como un sistema TT si las masas de los circuitos afectados no están interconectadas, y como un sistema TN si las masas están interconectadas por un conductor de protección.

Sistema IT – Tierras de las masas independientes



Sistema IT - Cable PE común a todas las masas



Resumen Sistemas de Distribución

Protección contra contactos indirectos

Sistema Distribución	Zs (bucle defecto)	Id (corriente defecto)	Dispositivo Protección
TT	Ω	A	Dispositivos diferencial residual
TN-S	$m\Omega$	kA	Interruptor automático
IT	$k\Omega$	mA	Controlador Permanente Aislación

Tipos de interruptores diferenciales residuales:

- Norma IEC 61008: Interruptores automáticos para actuar por corriente diferencial residual, sin dispositivo de protección contra sobrecorrientes, para usos domésticos y análogos.
- Norma IEC 61009: Interruptores automáticos para actuar por corriente diferencial residual, con dispositivo de protección contra sobrecorrientes incorporado, denominados del tipo “combinados”, para usos domésticos o análogos.
- Norma IEC 60947-2: Interruptores automáticos con protección diferencial residual incorporada. Bloque diferencial adaptable a interruptor automático caja moldeada o Relé diferencial con “toroide separado”.







Dispositivo de detección de corriente diferencial

- **No tiene como parte integrada el dispositivo de apertura del circuito**



- Relé diferencial (norma IEC 62020)

- Transformador externo que puede detectar fugas de corriente.

- Regulación de sensibilidad:

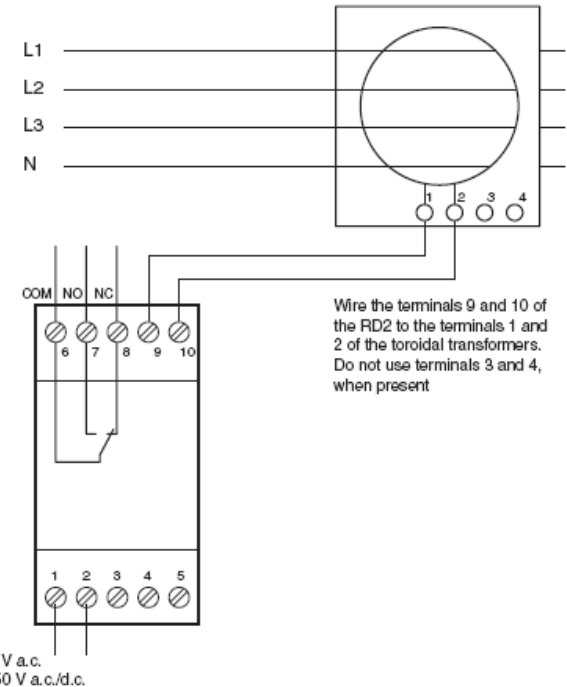
Ejemplo: $I_d = 0.03 \dots 5A$

- Regulación de tiempo de actuación:

Ejemplo: Tiempo = $0.05 \dots 2s$

- Toroides de distintos diámetros:

Ejemplo: 35mm hasta 210mm





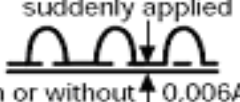
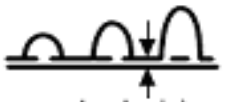

Clasificación según la naturaleza de la corriente de defecto que detectan.

La corriente residual
sinusoidal
diferencial

- **Clase A**
sólo corriente
continua

- **Clase A**
corriente
continua

- **Clase B**
las mismas
de rectificación

	Form of residual current	Correct functioning of residual current devices		
		Type	A	B
Sinusoidal ac	 suddenly applied	AC	+	+
	 slowly rising	+	+	+
Pulsating dc	 suddenly applied with or without \uparrow 0,006A		+	+
	 slowly rising			
Smooth dc				+

S

de detectar
onente de

detectar
ante, o

detectar
edentes

Tiempo de funcionamiento

Según las normas IEC 61008 y 61009, los dispositivos diferenciales residuales se clasifican de acuerdo al tiempo de actuación en **tipo general instantáneo** o **tipo selectivo (S)** con disparo retardado.

También existen los llamados inmunizados o superinmunizados, que soportan sobretensiones sin dispararse.

Selectividad entre Interruptores diferenciales residuales en serie

$$\frac{I\Delta_n(D_A)}{2} > I\Delta(D_B)$$

Selectividad en corriente:

$$t_r(D_A) > t_f(D_B)$$

Selectividad en tiempo de actuación:

t_r = retardo del disparo = tiempo de no respuesta del Dispositivo.

t_f = tiempo de funcionamiento, desde la detección del defecto hasta la interrupción total.