

Programa de Formação Técnica Continuada

Proteção Diferencial



Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Schneider
 **Electric**

Índice

1.0 O choque elétrico

1.1	Introdução.....	1
1.2	As estatísticas técnicas e médicas.....	1
1.3	Terminologia.....	2
1.4	Os limites de sensibilidade e suportabilidade.....	2
1.5	Tensões de segurança.....	3
1.6	Contatos diretos e indiretos.....	3
1.7	Medidas de proteção contra contatos diretos.....	3
1.8	Medidas de proteção completa.....	3
1.9	Medidas particulares de proteção.....	4
1.10	Medidas adicionais de proteção contra contatos diretos.....	4

2.0 Proteção contra contatos indiretos

2.1	Medida de proteção pelo desligamento automático da fonte.....	5
2.2	Desconexão automática para uma instalação TT.....	6
2.3	Tempo de desconexão especificado.....	6
2.4	Desconexão automática para uma instalação TN.....	7
2.5	Especificação dos tempos máximos de desconexão.....	7
2.6	Proteção por meio de um disjuntor.....	8
2.7	Proteção por intermédio de fusíveis.....	8
2.8	Desconexão automática para uma instalação IT.....	8
2.9	A interrupção da falta é obtida diferentemente nos seguintes casos.....	9
2.10	Disjuntores.....	10
2.11	Fusíveis.....	10
2.12	RCCB.....	10
2.13	Medidas de proteção contra contatos diretos e indiretos sem desligamento do circuito.....	10

3.0 Dispositivo de Corrente Diferencial (RCBO)

3.1	Aplicação dos RCBO's.....	11
3.2	Correntes permanentes de fuga para terra.....	11
3.3	Influência de sobretensões.....	12
3.4	Compatibilidade eletromagnética.....	12
3.5	Implementação.....	12
3.6	Componentes em corrente contínua.....	13
3.7	Recomendações relativas à instalação de RCBO's com transformadores de corrente toroidais separados.....	13
3.8	Requisitos de suportabilidade eletrodinâmica.....	15

1. O choque elétrico

1.1 Introdução

Pode-se definir o choque elétrico como o conjunto dos efeitos patológicos e fisiológicos causados pela passagem de uma corrente elétrica pelo corpo humano. Em breve histórico sobre os efeitos das correntes elétricas sobre as pessoas, pode-se dizer que:

Os primeiros estudos sobre a ação fisiológica da corrente elétrica foram feitos na França pelos cirurgiões imperiais Larvey, Bichat e seus colaboradores enquanto que o Dr. Uré realizou as primeiras experiências de reanimação de pessoas eletrizadas. Isso foi possível por ter sido construído por ordem de Napoleão I, na Escola Politécnica, um gerador de pilhas capaz de fornecer 7 a 8 A sob 500V.

Na Áustria o prof. Zelinek da Universidade de Viena no fim do século XIX retoma os estudos sobre os efeitos das correntes elétricas sobre os corpos humanos; seus seguidores fundaram posteriormente o Instituto de Eletropatologia de Viena (fundada no centenário do nascimento dele, em 1971).

Quase todos os dados utilizados hoje são baseados nas experiências do prof. Dalziel da Universidade de Berkley na Califórnia que realizou numerosos trabalhos sobre os efeitos fisiológicos sobre os animais. A partir de modelos em animais com as reações mais próximas dos seres humanos foram obtidos os valores limites suportáveis usados até hoje.

A EdF fez um levantamento durante 10 anos (anos 60/70) das causas de acidentes mortais ocorridos na França e que são reproduzidos na tabela I.

Tabela 1: Acidentes mortais de eletrocussão ocorridos na França durante 10 anos (*)

USOS INDUSTRIAIS	AT	BT	Total	%
Contatos diretos acidentais com linhas em canteiros de obras:				
Aparelhos de levantamento (gruas)	150	6	156	29
Outras(manutenção de barramentos)	73	4	77	14
Trabalhos agrícolas (manutenção)	10		10	2
Trabalhos em linhas	54	41	95	17
Aparelhagem em SE dos usuários	86	4	90	16
Instalações gerais de canteiros e de fábricas:				
Máquinas fixas		10	10	2
Aparelhagem BT (painéis e quadros)		26	26	5
Fiação BT		20	20	4
Lâmpadas portáteis		10	10	2
Máquinas e ferramentas portáteis	1	33	34	6
Pontes rolantes e talhas		15	15	3
TOTAIS	374	169	543	100

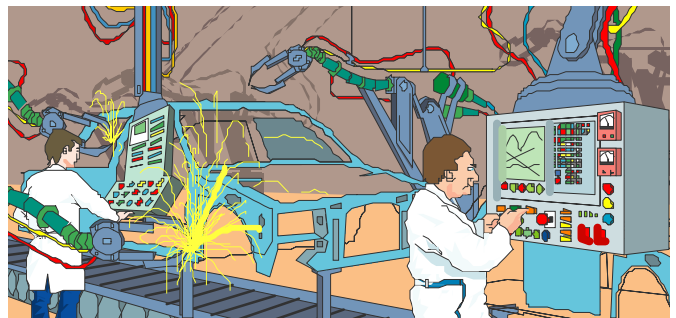
USOS DOMÉSTICOS, AGRÍCOLAS E DIVERSOS	BT	%
Aplicações agrícolas	89	31
Aplicações domésticas:		
Máquinas de lavar roupa e pratos	54	19
Receptores de rádio e de televisão	47	16
Ferros de passar roupa	45	16
Cozinha, aquecimento	18	6
Refrigeradores	12	4
Outras origens	14	5
Diversos sem relação com os precedentes	8	3

(*) D 95 TECHNIQUES DE LÍNGENIEUR 3-1975, Jean Bessou

A partir desses levantamentos, realizados também em diversos outros países é que foram sendo estabelecidas as regras de proteção pelas normas nacionais européias e americanas e posteriormente adotadas pelas normas internacionais da IEC. Continuam a ser feitos estudos e ensaios sobre os efeitos não só das correntes elétricas mas também dos campos elétricos e magnéticos tanto de alta como de baixa frequência.

1.2 As estatísticas técnicas e médicas

Na área industrial a maior quantidade de acidentes se deu (v. tabela I) nas áreas externas e devido a contatos entre equipamentos ou materiais e linhas aéreas.



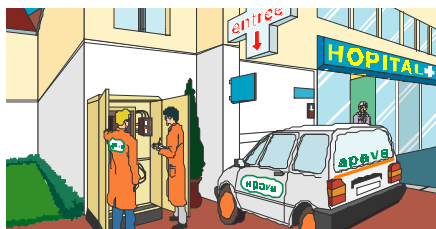
Nas áreas agrícola e residencial, cerca de 30% foram nos aparelhos móveis agrícolas. Cerca de 30% dos acidentes se deram na alimentação: cabos, conectores, tomadas, prolongadores.

Quanto à idade dos acidentados, a faixa de maior concentração foi de 18 a 30 anos e os com formação profissional foram os mais atingidos. Isso pode ser devido à imprudência e excesso de confiança ou à sua má formação profissional.

As queimaduras elétricas representam cerca de 90% dos acidentes elétricos não mortais e se dividem assim:

- 75%: arco em baixa tensão
- 13%: eletrotérmicas por efeito Joule
- 12%: queimaduras diversas.

Quanto à eficácia dos métodos de reanimação, constatou-se na França que em cerca de 60% as pessoas atendidas conseguiram se recuperar. Os sucessos foram obtidos com os procedimentos aplicados até 2 minutos após o acidente e às vezes se estenderam por até 2 horas.



1.3 Terminologia

Os principais termos usados são:

eletrocussão: é um acidente elétrico mortal

eletrização: é um acidente elétrico por contato mas não tendo a morte como consequência.

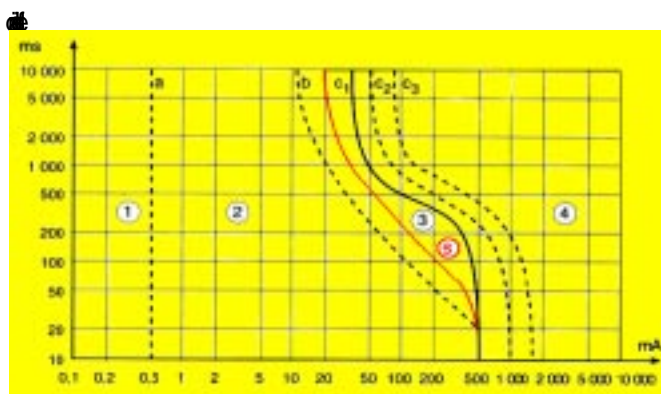
Em seguida à eletrização pode haver uma morte aparente em que há: **interrupção da respiração**, que pode ser restabelecida por reanimação por respiração artificial sendo o método boca-a-boca o mais eficiente, ou uma **interrupção da circulação** quando o coração passa a funcionar com uma fase de movimentos anárquicos (não ritmados) denominada fibrilação ventricular de curta duração seguida de parada definitiva. A recuperação, muitas vezes denominada ressuscitação é conseguida com um aparelho denominado desfibrilador com o qual se aplica uma corrente transitória (descarga de um capacitor) que provoca uma parada instantânea de todos os centros nervosos que produzem os pulsos que comandam os movimentos dos músculos cardíacos. Após essa parada, é retomado o movimento ritmado, com ou sem ajuda de massagem cardíaca.

Quando há a fibrilação diz-se que houve uma **eletrização com perda da consciência** que se não for atendida em um curto espaço de tempo (no máx. 5 min.) provoca a morte cerebral (interrupção da circulação de sangue no cérebro).

A **eletrização sem perda de consciência** apresenta uma variação muito grande de reações musculares, desde um simples "formigamento" até uma violenta contração muscular (tetanização elétrica) que pode causar a queda ou projeção da vítima à distância. Em baixa tensão, no caso mais freqüente, há uma contração da mão sobre os condutores com lesões profundas, queimaduras (internas e externas) e consequências renais (mais ou menos) rápidas. Pode haver também uma contração dos músculos torácicos que produz a parada respiratória citada acima. A língua também pode "enrolar" produzindo a asfixia por interrupção da respiração (a vítima vai ficando roxa).

1.4 Os limites de sensibilidade e suportabilidade

Baseado-se nos valores estabelecidos principalmente por Darziel foi desenvolvida a técnica de proteção pessoal. A IEC 479-1 estabeleceu 4 zonas (fig. 1) assim



1 - imperceptível: as correntes abaixo de 0,5 mA podem passar por longos períodos pelo corpo sem causar mal ou reações (reta A).

2 - perceptível: as correntes abaixo de 10 mA por longos períodos (10s) e acima de 10 mA e tempos decrescentes (desde 10s até 20ms) embora sentidas pelas pessoas, também não causam mal (curva B).

3 - reações reversíveis: entre as curvas b e c, os valores correspondentes de i e t causam contração muscular.

4 - possibilidade de efeitos irreversíveis; limitados pelas curvas:

C1: não há fibrilação do coração

C2: 5% de probabilidade de fibrilação

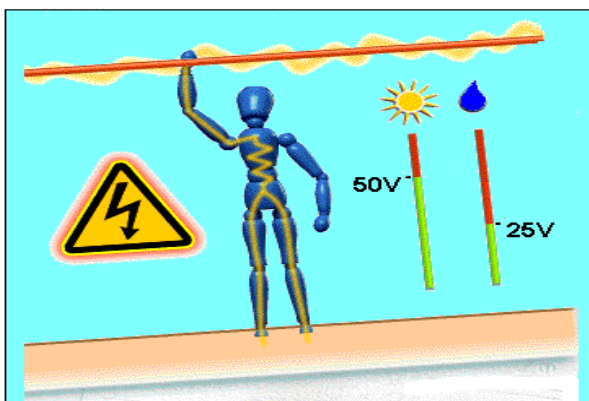
C3: 50% de probabilidade de fibrilação

A partir desses limites é que foram desenvolvidos os dispositivos de proteção por interrupção da corrente de defeito.

Efeitos fisiológicos da corrente elétrica	
CA: 15 a 100Hz - trajetória entre extremidades da corpo, pessoas de, no máximo, 50kg de peso	
Faixa de corrente (mA)	Reação fisiológicas habituais
500 mA	Parada cardíaca
30 mA	Risco de fibrilação cardíaca irreversível
10 mA	Nenhum efeito perigoso se houver interrupção em no máximo 5 segundos
0,5 mA	Ligeira contração muscular
0,1 mA	Sensação de formigamento

1.5 Tensões de segurança

Como não se pode medir diretamente a corrente que atravessa o organismo normalmente, refere-se, na técnica da proteção, à tensão aplicada sem causar efeitos fisiopatológicos perigosos. Por outro lado, a resistência do corpo humano varia com a tensão aplicada (2500 W a 25V, 2000 W a 50V, 1000 W a 250V e valor assintótico de 600 W). Esses valores são válidos para tensão mão-a-mão ou mão-a-pés, de modo que a corrente passe pelo tórax em condições de pele úmida e supondo um contato direto com superfícies metálicas. Estas condições desfavoráveis consideradas dão uma garantia a favor da segurança. As normas IEC que regulam essa proteção são: IEC 364, IEC 479-1, IEC 755, IEC 1008, IEC 1009, e IEC 947-2, apêndice B.



1.6 Contatos diretos e indiretos

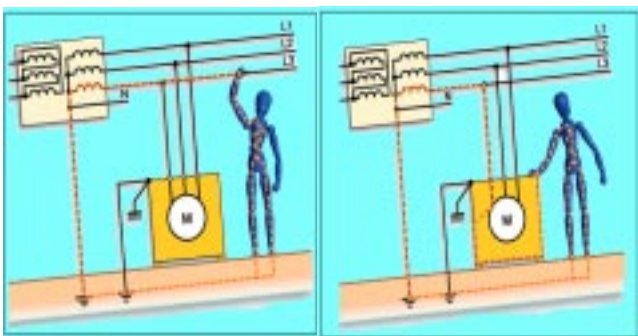
As normas e regulamentos distinguem dois tipos de contatos perigosos:

- ◆ contato direto
- ◆ contato indireto

e as correspondentes medidas de proteção.

Contato direto

Um contato direto se refere ao contato de uma pessoa com um condutor que normalmente está energizado



Contato indireto

Um contato indireto se refere a uma pessoa que entra em contato com uma parte condutora que normalmente não está energizada, mas que se torna energizada acidentalmente (devido a uma falha de isolamento ou alguma outra causa).

Proteção contra contatos diretos

Duas medidas complementares são normalmente usadas como prevenção contra os riscos de acidentes por contatos diretos:

- ◆ **prevenção física** de contato com as partes vivas por barreiras, isolamento, afastamento tornando inacessível, etc..
- ◆ **proteção adicional**, a despeito das medidas acima, para a possibilidade de ocorrer assim mesmo um contato direto. Esta proteção é baseada em relés rápidos e de alta sensibilidade, operados por corrente residual os quais são altamente eficientes na maioria dos casos de contatos diretos.



1.7 Medidas de proteção contra contatos diretos

Nota: A IEC e as normas nacionais freqüentemente fazem distinção entre dois graus de proteção:

- ◆ completa (isolação, envoltórios)
- ◆ parcial ou particular

1.8 Medidas de proteção completa

1.8.1 Proteção por isolamento das partes vivas

Esta proteção consiste em uma isolamento em conformidade com as normas relevantes. Pinturas, vernizes e esmaltes não proporcionam uma proteção adequada.

1.8.2 Proteção por barreiras ou envoltórios

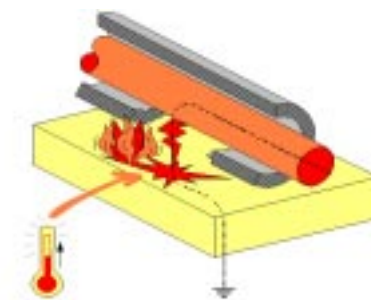
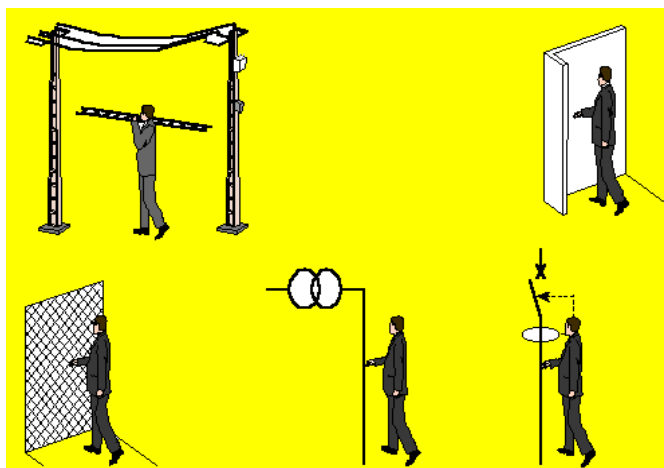
Esta medida está em uso generalizado desde que muitos componentes e materiais são instalados em gabinetes, estantes, painéis de controle e envoltórios de quadros de distribuição, etc.. Para ser considerada como proporcionando uma proteção efetiva contra os riscos de contatos diretos, estes equipamentos precisam possuir um grau de proteção ao menos igual ao IP2X ou IPXXB

(não deve ser penetrado por um dedo articulado de teste com 12,5 mm de diâmetro).

Além disso, a abertura de um envoltório (porta, painel, gaveta, etc.) só pode ser feita:

- ◆ por intermédio de uma chave ou ferramenta especialmente destinada a essa função
- ◆ depois de uma isolamento completa das partes vivas do envoltório, ou
- ◆ com a ação automática de uma guilhotina metálica, removível somente com uma chave ou ferramentas.

O envoltório metálico e todas guilhotinas metálicas precisam ser interligadas ao condutor de proteção da instalação.



Para proteger os usuários nessas circunstâncias, são usados dispositivos de disparo rápido, altamente sensíveis, baseados na corrente residual para terra (a qual pode ou não ser através de um corpo humano ou de um animal). Eles proporcionam uma desconexão automática da fonte com suficiente rapidez para prevenir a morte por eletrocussão ou danos à saúde de uma pessoa anteriormente saudável.

1.8.3 Medidas de proteção parcial

Proteção por meio de obstáculos, ou por colocação fora de alcance

Esta prática se aplica somente aos locais onde somente têm acesso pessoas qualificadas ou especialmente autorizadas.

1.9 Medidas particulares de proteção

Proteção pelo uso de esquemas em extra baixa tensão de proteção SELV (Safety Extra Low Voltage), PELV (Protection Extra Low Voltage) ou FELV (Funcional Extra Low Voltage).

Estas medidas são empregadas somente em circuitos de baixa potência e em circunstâncias particulares onde os riscos são grandes como em piscinas, lâmpadas e outros aparelhos portáteis para uso ao tempo, etc.. Estes casos serão analisados mais adiante.

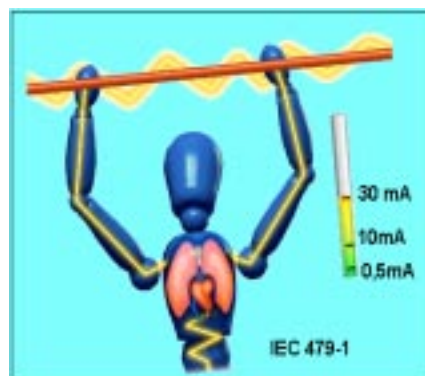
1.10 Medidas adicionais de proteção contra contatos diretos

Uma medida adicional de proteção contra contatos diretos é proporcionada pelo uso de dispositivos de proteção operados por correntes residuais, os quais operam com 30 mA ou menos e são referidos, em inglês, como RCD (residual current device) e no Brasil como DCD (dispositivo de corrente diferencial). Todas as medidas de proteção referidas anteriormente são preventivas, mas a experiência mostrou, que por diversas razões, elas não podem ser consideradas como infalíveis. Entre essas razões podem ser citadas:

- ◆ falta de manutenção adequada
- ◆ imprudência, falta de cuidado
- ◆ envelhecimento normal (ou anormal) e corte da isolamento; por exemplo, flexão e abrasão dos terminais de conexão
- ◆ contatos acidentais
- ◆ imersão em água, etc. - uma situação na qual a isolamento não é mais efetiva.

Nota: As prescrições para circuitos da IEC impõem o uso de DCD nos circuitos de alimentação de tomadas instaladas em locais considerados particularmente perigosos, ou usadas para propósitos especiais. Os regulamentos ou normas de alguns países exigem seu uso em todos os circuitos de tomadas.

Estes dispositivos operam pelo princípio da medição da corrente diferencial, pelo qual, qualquer diferença entre a corrente que entra e a que sai, precisa (em um sistema alimentado por uma fonte aterrada) fluir para terra. Isto pode ser através de uma isolamento defeituosa, ou do contato de um condutor energizado com um objeto aterrado, como uma pessoa, por exemplo.



Os DCD's padronizados suficientemente sensíveis para proteção contra contatos diretos são dimensionados para a corrente diferencial de 30mA. A IEC padronizou outras correntes para os DCD: 10mA e 6mA (usados geralmente para proteção de aparelhos individuais). Esta proteção adicional é imposta em alguns países para circuitos de corrente nominal de até 32 A ou mesmo mais se o local for úmido e ou temporário (como em obras, por ex.).

2. Proteção contra contatos indiretos

NOTAS:

1. Os regulamentos nacionais que cobrem as instalações de BT impõem ou recomendam fortemente o emprego de dispositivos para proteção contra contatos indiretos.

2. As medidas de proteção são:

- desconexão automática da fonte (na detecção da primeira ou segunda falta, dependendo do sistema de aterramento).
- medidas particulares, de acordo com as circunstâncias.

Materiais condutores (1) usados na fabricação de aparelhos elétricos e que não façam parte do circuito elétrico do mesmo e são separados destes pela "isolação básica". A falha da isolação básica resultará na energização das partes condutoras. O toque de uma parte condutora energizada devido a uma falha da isolação é referido como um contato indireto.

São adotadas várias medidas contra esse risco que incluem:

- desconexão automática da alimentação do aparelho defeituoso.
 - Medidas especiais, como:
 - Uso de materiais isolantes da classe II ou um grau equivalente de isolação,
 - Uso de materiais não condutores nos locais, colocação fora -do -alcance ou instalação de barreiras isolantes.
 - Equipotencialização no local.
 - Separação elétrica por intermédio de transformadores de isolação.
- (1) Materiais condutores (usualmente metais) que possam ser tocados sem desmontagem do aparelho são referidos como "partes condutoras expostas". No Brasil são também referidos como "massa metálica".
- (2) A definição de resistências de paredes, piso e forro de um local não condutor são dadas mais adiante (veja "medidas de proteção contra contatos diretos ou indiretos sem desligamento do circuito", pág. 11)

2.1 MEDIDA DE PROTEÇÃO PELO DESLIGAMENTO AUTOMÁTICO DA FONTE

Nota: Isto pode ser conseguido se as partes condutoras expostas dos aparelhos estiverem adequadamente aterradas.

Princípio:

Esta medida de proteção depende de dois requisitos fundamentais:

- O aterramento de todas as partes condutoras expostas do equipamento e a constituição de uma malha de interligação (com instalação de um TAP - Terminal de Aterramento Principal).
- O desligamento da parte do circuito envolvida no defeito, de modo que os requisitos de segurança, tensão de toque/tempo, sejam respeitados para qualquer nível de tensão de toque UC (3).

(3) Tensão de toque UC

É a tensão existente (em consequência de uma falha da isolação) entre uma parte condutora exposta e qualquer elemento condutor que possa ser tocado e que esteja a um potencial diferente (geralmente a terra).

Quanto maior for o valor de UC, maior será a rapidez de desligamento requerida para proporcionar a proteção (veja gráfico e tabela 20). O maior valor de UC que pode ser tolerado indefinidamente sem risco para o homem é conhecido como "limite convencional de tensão de toque" (UL).

Nota: Na prática os tempos de desconexão e a escolha dos esquemas de proteção a usar dependem do tipo de sistema de aterramento empregado: TT, TN ou IT; nos parágrafos correspondentes são dadas indicações precisas.

Seccionamento automático da alimentação (Esquema TN)

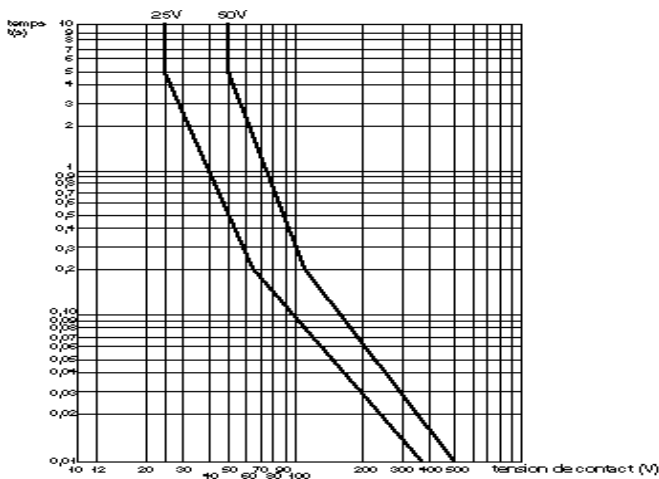
TABELA 20 - Tempos de seccionamento máximo no esquema TN

U ₀ (V)	Tempo de seccionamento (s)	
	Situação 1	Situação 2
115, 120, 127	0,8	0,36
220	0,4	0,20
277	0,4	0,20
400	0,2	0,05
>400	0,1	0,02

U₀ = tensão nominal entre fase e terra, valor eficaz em corrente alternada

Os limites teóricos de tempos de desligamento (1) A resistência do piso e o uso de sapatos são levados em conta nesses valores.

* Para a maioria dos locais, a máxima tensão de toque permitida (UL) é 50V. Para locais especiais (piscinas, por ex.) o limite é reduzido a 25V (veja mais adiante).



2.2 Desconexão automática para uma instalação TT

Nota: A desconexão automática para uma instalação com aterramento TT é efetivada para um DCR tendo uma sensibilidade de

$$I\Delta n \leq \frac{UL}{RA} = \frac{50V^*}{RA}$$

Onde RA = resistência do eletrodo de terra da instalação

* 25V em alguns casos particulares.

Princípio

Neste esquema todas as partes condutoras, expostas e estranhas, da instalação precisam ser ligadas a um eletrodo comum de aterramento. O neutro do sistema de alimentação é normalmente aterrado em um ponto externo à área de influência do eletrodo da instalação mas não há essa necessidade.

A impedância do laço de falta para terra consiste essencialmente nos dois eletrodos de terra (isto é, eletrodos da fonte e da instalação) em série, de modo que a intensidade da corrente de falta é geralmente muito baixa para operar relés de sobrecorrente ou fusíveis, e o uso de dispositivo de proteção de corrente diferencial é essencial. Este princípio de proteção é válido também se for usado um eletrodo comum de aterramento, principalmente no caso de uma subestação tipo consumidor dentro da área da instalação onde as limitações de espaço impõem a adoção de um esquema TN de aterramento, mas onde todas as condições requeridas pelo sistema TN não podem ser completadas.

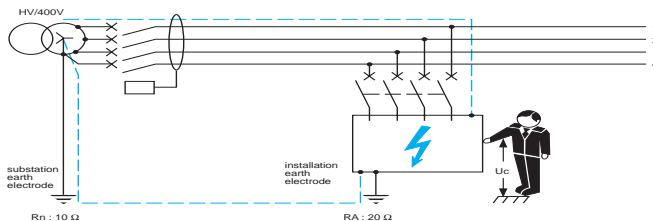


Figura 10: desconexão automática para uma instalação com aterramento TT.

Exemplo

A resistência Rn do eletrodo de terra do neutro da subestação é 10 ohms.

A resistência RA do eletrodo de terra da instalação é 20 ohms.

A corrente de falta Id = 7.7A

A tensão de toque Uc = Id x RA = 154V e portanto perigosa, mas IDn = 50/20 = 2.5A de modo que um DCR de 300mA irá operar em 30ms para suprimir a condição de existir uma tensão de toque de 50V ou mais nas partes condutoras expostas.

Nota: os tempos de disparo dos DCR são geralmente inferiores àqueles prescritos na maioria das normas nacionais: esta característica facilita seu uso e permite a adoção de um sistema efetivo de proteção discriminativa.

2.3 Tempo de desconexão especificado

O termo DCD é um termo geral para todos os dispositivos que operam segundo o princípio da corrente diferencial (ou residual).

O termo RCCB (residual current circuit breaker) em inglês é definido na IEC 1008 como uma classe específica de RCD.

Os tipos G (geral) e S (seletivo) têm características tempo de disparo/corrente mostradas na tabela 70. Estas características deixam um certo grau de disparo seletivo entre as várias combinações de características nominais e tipo como será mostrado mais adiante.

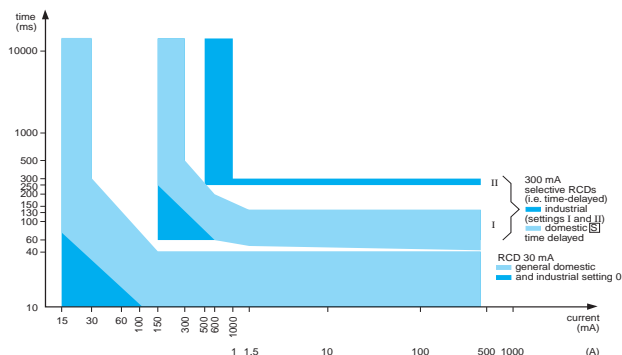


fig 36 - ajustes de retardo para DCD's

2.4 Desconexão automática para uma instalação TN.

Princípio

Neste esquema todas as partes condutoras, expostas e externas da instalação são ligadas diretamente ao ponto de aterramento da fonte por condutores de proteção.

O modo pelo qual esta conexão direta é obtida depende de como os métodos de implementação do sistemas TN, TN-C, TN-S ou TN-C-S são usados. Na figura 12 é mostrado o método TN-C, no qual o condutor neutro atua como ambos, condutor de proteção - terra (PE) e como neutro (N), sendo denominado condutor PEN. Em todos arranjos TN, qualquer falta na isolação para terra constitui um curto-circuito fase - neutro.

Altos níveis de correntes de falta simplificam os requisitos de proteção mas pode dar origem a tensões de toque excedendo a 50 % da tensão fase - neutro no ponto de falta durante o breve tempo de desconexão. Na prática, portanto, os eletrodos de aterramento são normalmente instalados em intervalos ao longo do neutro da rede de alimentação, onde o consumidor é geralmente obrigado a instalar um eletrodo no local de entrada. Em grandes instalações são freqüentemente providos eletrodos de aterramento dispersos ao longo da instalação, de modo a reduzir a tensão de toque tanto quanto possível.

Em edifícios elevados, todas as partes condutoras estranhas são conectadas ao condutor de proteção em cada nível.

De modo a assegurar proteção adequada, a corrente de falta

$$I_d = \frac{U_o}{Z_s} \text{ ou } 0,8 \frac{U_o}{Z_c} \geq I_a$$

Onde:

U_o = tensão nominal fase-neutro

Z_s = impedância do laço de terra da corrente de falta à terra, igual à soma das impedâncias :

da fonte, dos condutores de fase energizados até o ponto de falta, dos condutores de proteção do ponto de falta de volta para a fonte.

Z_c = a impedância do laço do circuito defeituoso ("método convencional").

NOTA: o percurso através dos eletrodos de aterramento de volta para a fonte terá (geralmente) valores de impedância muito maiores que aqueles relacionados acima, e não precisa ser considerado.

I_d = corrente de falta

I_a = à corrente igual ao valor requerido para operar o dispositivo de proteção no tempo especificado.

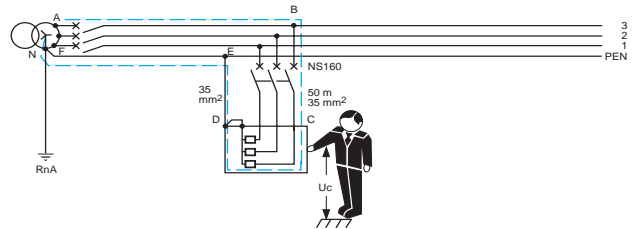


Figura 12. Desconexão automática para uma instalação TN.

Na figura 12 a tensão de toque é:

$$U_c = \frac{230}{2} = 115V$$

e é portanto perigosa

A impedância Z_s do laço é igual a: $Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{DE} + Z_{EN} + Z_{NA}$

Se Z_{BC} e Z_{DE} forem predominantes, então:

$$Z_s = 2\rho \frac{L}{S} = 64,3m\Omega$$

de modo que

$I_d = 230/0,0643 = 3.576 \text{ A}$ (» 22 In, baseada em um disjuntor de 160 A)

O dispositivo de disparo magnético "instantâneo" do disjuntor é varias vezes menor que este valor, de modo que é assegurada uma operação positiva no tempo mais curto possível.

NOTA: alguns especialistas baseiam tais cálculos na consideração que uma queda de tensão de 20% ocorre na parte BANE (fig. 12) do laço da impedância. Este método, o qual é recomendado, é explicado mais adiante, "método convencional" e neste exemplo dará uma corrente de falta

NOTA: para aterramento tipo TN, o máximo tempo permissível de desconexão depende da tensão nominal do sistema.

2.5 Especificação dos tempos máximos de desconexão

Os tempos de especificação são uma função da tensão nominal fase/terra, a qual, para todos efeitos práticos nos sistemas TN é a tensão fase/neutro.

U_o (volts) tensão fase/neutro	Tempo de desconexão (segundos) UL=50V veja nota 2
127	0,8
230	0,4
400	0,2
> 400	0,1

Tabela 13: tempos máximos de desconexão para sistemas TN (IEC 364-4- 41).

Nota 1 : um intervalo de tempo maior que aqueles especificados na tabela (mas em qualquer caso menor que 5 segundos) é permitido sob certas circunstâncias para circuitos de distribuição tanto quanto para circuitos finais alimentando um aparelho fixo, na condição de que, em conseqüência, uma tensão de toque perigosa não apareça em outro aparelho. A IEC recomenda e certos regulamentos nacionais obrigam, a provisão de ligação equipotencial de todas as partes metálicas, estranhas e expostas, que são simultaneamente acessíveis, em qualquer área em que são instaladas tomadas, a partir das quais possam ser alimentados aparelhos portáteis ou móveis. A barra de equalização de potenciais (ou Terminal de Aterramento Principal - TAP) é instalada no armário do painel de distribuição para a área correspondente.

Nota 2 : quando a tensão limite convencional for 25V, os tempos de desconexão especificados são:

0,35s para 127V
0,25s para 230V
0,05s para 400V

Se os circuitos correspondentes forem circuitos finais, então esses tempos podem ser facilmente alcançado pelo uso de DCD.

Nota 3 : o uso de DCD pode, como mencionado na nota 2, ser necessário em circuitos TN. O uso de DCD em sistemas TN-C-S significa que os condutores de proteção e neutro precisam (evidentemente) ser separados a montante do DCD. Esta separação é geralmente feita no ponto de entrada.

2.6 Proteção por meio de um disjuntor

NOTA: se a proteção é para ser proporcionada por um disjuntor, é suficiente verificar que a corrente de falta irá sempre exceder o nível de corrente de ajuste da unidade de disparo instantâneo ou retardado (I_m):

$$I_m < \frac{U_o}{Z_s} \text{ ou } 0,8 \frac{U_o}{Z_c}$$

*de acordo com o método "convencional" de cálculo.

A unidade de disparo instantâneo de um disjuntor irá eliminar um curto-circuito para terra em menos que 0,1s.

Em conseqüência, a desconexão automática dentro do tempo máximo permissível irá sempre ser assegurada, desde que todas unidades de disparo, magnético ou eletrônico, instantâneo ou levemente retardado sejam adequadas: $I_a = I_m$.

O disparo instantâneo de um disjuntor irá eliminar uma falta para terra em menos de 0,1s.

Em conseqüência, uma desconexão automática dentro do máximo tempo tolerável irá sempre ser assegurada, desde que todos tipos de unidades de disparo, magnético ou eletrônico, instantâneo ou levemente

retardado, são adequados:

$$I_a = I_m$$

A máxima tolerância autorizada pela norma correspondente, entretanto, precisa sempre ser tomada em consideração.

É suficiente portanto que toda corrente de falta U_o/Z_s ou $0,8U_o/Z_c$ determinada pelo cálculo (ou estabelecido no local) ser maior que a corrente de ajuste instantâneo, ou que o nível de disparo de tempo curto, para assegurar o disparo dentro do limite de tempo permitido.

2.7 Proteção por intermédio de fusíveis

NOTA: I_a pode ser determinada a partir das curvas de comportamento do fusível. Em qualquer caso, a proteção não pode ser alcançada se a impedância do laço Z_s ou Z_c excede um certo valor.

O valor de corrente que assegura a operação correta de um fusível pode ser conseguida da curva de comportamento corrente/tempo para o fusível correspondente.

A corrente de falta U_o/Z_s ou $0,8U_o/Z_c$ como d determinado acima, precisa exceder largamente que a necessária para assegurar a operação positiva do fusível.

A condição para observar é que:

$$I_a < \frac{U_o}{Z_s} \text{ ou } 0,8 \frac{U_o}{Z_c}$$

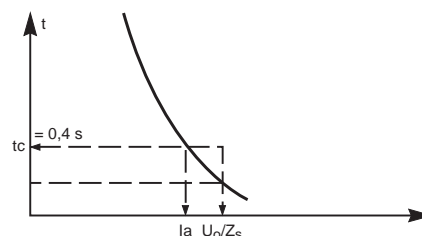


Figura 15: desconexão por fusíveis para uma instalação TN.

Exemplo:

A tensão nominal fase - neutro da rede é 230V e o máximo tempo de desconexão dado pelo gráfico da fig. 15 é 0,45s. O valor correspondente de I_a pode ser lida no gráfico.

Usando a tensão (230V) e a corrente I_a , a impedância do laço completo ou a impedância do laço de impedância pode ser calculada por $Z_s = 230/I_a$ ou $Z_c = 0,8 \times 230/I_a$. Este valor de impedância não pode ser excedido e deve preferivelmente ser substancialmente menor para assegurar satisfatória operação do fusível.

2.8 Desconexão automática em uma segunda falta em sistemas IT

Neste tipo de sistema:

- a instalação é isolada da terra, ou o ponto neutro

$$(2) 0,8 \frac{\sqrt{3}V_o^*}{2Z_c} \geq I_a$$

Tempos especificados de disparo/fusão.

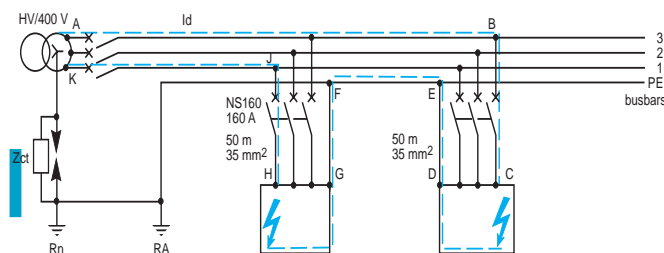
Tempos de desconexão para esquemas IT, com 3 fios e três fases diferem daqueles adotados para esquemas IT 4 fios, 3 fases e ambos os casos são dados na tabela 18.

Uo/U (volts)	disconnection time (seconds) UL = 50 V (1)	
	3-phase 3-wires	3-phase 4-wires
Uo = phase-neutral volts U = phase-phase volts		
127/220	0.8	5
230/400	0.4	0.8
400/690	0.2	0.4
580/1000	0.1	0.2

18: tempos de desconexão especificados para uma instalação IT.

(1) Quando a tensão convencional limite por 25v, os tempos de desconexão torna-se:

- No caso de um esquema trifásico, 3 fios, 0,4ohms a 127/220v; 0,25 a 220/400v.
- No caso de um esquema 3 fases, 4 fios, 1 segundo a 127/220v; 0,5 segundos a 220/400v e 0,2 segundos a 400/690v



19: disparo de disjuntor em uma segunda falta a terra quando partes condutores expostos são conectados a um condutor comum de proteção os níveis de corrente e medidas de proteção aos níveis de corrente e medidas de proteção dependem do equipamento de manobra e fusível correspondente

2.10 Disjuntores

No caso mostrado na figura 19, os níveis de ajuste instantâneo e de retardo curto do relé de sobrecorrente precisam ser especificados.

Os tempos recomendados na tabela 18 podem ser realmente aplicados.

2.11 Fusíveis

A corrente Ia para a qual a operação do fusível precisa ser assegurada em um tempo especificado de acordo com a tabela 18 pode ser encontrada nas curvas de operação dos fusíveis, como descrito na figura 15.

A corrente indicada deve ser significativamente menor que as correntes de falta calculadas para o circuito em tela.

2.12 RCCB

Em casos particulares, são necessários o RCCB. Neste caso, a proteção contra riscos de contatos indiretos pode ser alcançada pelo uso de um RCCB em cada circuito.

2o caso: refere-se a partes condutoras expostas os quais são aterradas individualmente (cada parte a um eletrodo) ou em grupos separados (um eletrodo para cada grupo).

Se todas as partes condutoras expostas não forem ligadas a um sistema único de eletrodos, é possível uma segunda ocorrer em um grupo diferente ou em aparelhos individuais aterrados separadamente. Proteção adicional àquela descrita no caso 1, é requerida, e consiste em um DCD instalado no disjuntor que controla cada grupo e cada aparelho individualmente aterrado.

A razão para este requisito é que o grupo de eletrodos separados são "interligados" através da terra de modo que a corrente de curto circuito fase-fase geralmente será limitada quando passar através da ligação pelo solo, pelas resistências de contato dos eletrodos com o solo, tornando dessa maneira a proteção de sobrecorrente inoperante.

DCD's mais sensíveis são por isso necessários, mas a corrente de operação deles precisa ser evidentemente superior àquela da primeira falta.

Para uma segunda falta que ocorra dentro de um grupo que tenha o mesmo sistema de eletrodos, a proteção de sobrecorrentes vai operar, como descrito no caso 1.

Nota: Em instalações trifásicas a quatro fios a proteção contra sobrecorrente no condutor neutro é às vezes mais convenientemente conseguida pelo uso de um transformador de corrente do tipo em anel em torno do condutor neutro, como mostrado na figura 20.

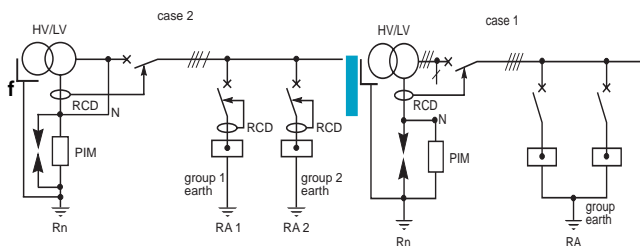


Figura 20: aplicação de DCD quando as partes condutoras expostas são aterradas individualmente ou por grupos em sistemas IT.

2.13 Medidas de proteção contra contatos diretos e indiretos sem desligamento do circuito.

O uso de SELV (Safety by extra low voltage)

Esta solução é usada em situações em que a operação de um equipamento elétrico apresenta um sério risco (piscinas, estacionamento de campings, etc..).

Esta medida depende de fonte de alimentação a uma tensão muito baixa a partir do secundário de transformador de isolamento especialmente projetado de acordo com as normas internacionais (IEC 742). A tensão suportável de impulso entre os enrolamentos primário e secundário é muito alta e/ou uma blindagem metálica é às vezes incorporada; entre os enrolamentos a tensão no secundário não deve exceder 50V.

O uso de PELV (Protection by Extra Low Voltage)

Este sistema é para uso geral onde seja requerida uma tensão muito baixa, ou preferido por razões de segurança além daquelas situações de alto risco citadas acima. A concepção é similar à do sistema SELV, mas o secundário do transformador é aterrado em um ponto.

A IEC-364-4-41 define precisamente o significado da referência PELV. A proteção contra riscos de contatos diretos é geralmente necessária, exceto quando o equipamento está em zona equipotencializada e a tensão nominal não supera 25V ef. e o equipamento é usado normalmente em locais secos e não é esperada uma grande área de contato com o corpo humano.

FELV (Functional Extra Low Voltage)

Quando por razões funcionais for usada uma tensão de 50V ou menos, mas não forem cumpridos todos os requisitos relacionados com a SELV e PELV precisam ser tomadas medidas apropriadas descritas na IEC 364-4-41 para assegurar proteção contra os riscos de contatos diretos e indiretos, de acordo com a localização e uso destes circuitos.

Nota:

Tais condições podem, por exemplo, se encontradas quando o circuito contém equipamentos (tais como transformadores, relés, chaves de controle remoto, contadores) não suficientemente isolados em relação a circuitos de altas tensões.

3. Dispositivos de Corrente Diferencial (RCBO)

Princípio

Os componentes essenciais são mostrados esquematicamente na fig. 65. Um núcleo magnético envolve todos os fios condutores de corrente de um circuito elétrico e o fluxo magnético gerado no núcleo dependerá em cada instante da soma aritmética das correntes; as correntes que passam em um sentido são consideradas positivas e as que passam no sentido contrário serão negativas.

Em um circuito sem falha, $i_1 + i_2 = 0$ e não haverá fluxo no núcleo magnético e a f.e.m. será nula em sua bobina. Havendo uma corrente de falta, ela passará através do núcleo mas o retorno à fonte será pela terra ou pelos condutores de proteção em um sistema TN. Não haverá mais o equilíbrio entre as correntes que

passaram pelo núcleo magnético e a diferença entre as correntes dará origem a um fluxo magnético no núcleo.

A diferença entre as correntes é conhecida como corrente "residual" e o princípio é denominado da "corrente diferencial". O fluxo magnético no núcleo induz uma f.e.m. em sua bobina de modo que circulará uma corrente i_3 na bobina do dispositivo de disparo. Se a corrente residual exceder o valor requerido para operar o dispositivo de disparo, o circuito associado irá disparar o disjuntor.

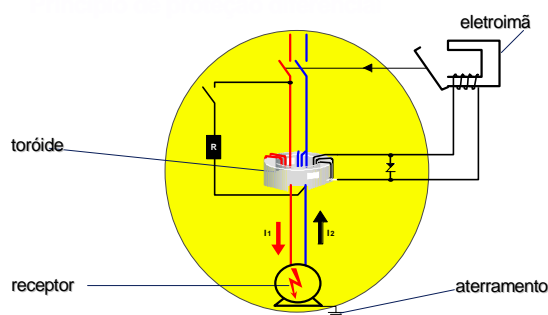


Fig. 65: o princípio de operação do RCBO

3.1 Aplicação dos RCBO's

NOTA: correntes de fuga para terra existem sempre sem serem devidas a faltas, assim como sobretensões transitórias as quais, juntas ou independentemente, podem levar a um disparo não desejado por um RCBO.

Foram desenvolvidas algumas técnicas para superar esses problemas operacionais.

3.2 Correntes permanentes de fuga para terra

Toda instalação de BT tem uma corrente de fuga permanente para terra, a qual é devida principalmente à isolamento não perfeita e à corrente capacitiva intrínseca entre os condutores vivos e a terra. Quanto maior for a instalação menor será a resistência da isolamento e maior será sua capacitância sendo em consequência maior a corrente de fuga.

Em sistemas trifásicos a corrente capacitiva de fuga para terra será nula se os condutores de todas as três fases tiverem igual capacitância para terra, condição que não é conseguida em instalações práticas. A corrente capacitiva para terra é, muitas vezes, aumentada pela presença de capacitores de filtros associados com circuitos eletrônicos (automação, informática e sistemas baseados em computadores etc.).

Na ausência de dados mais precisos, a corrente de fuga para terra, permanente, em uma dada instalação pode ser estimada a partir dos seguintes valores, para 230V, 50 Hz segundo o Boletim da UTE de Abril de 92.

Terminal de FAX: 0,5 a 1,0 mA
 Terminal ITE (ETI, pela BR 5410): 1 a 2 mA
 Impressora (ETI): < 1 mA
 Fotocopiadora: 0,5 a 1,5 mA

Correntes de fuga transitórias

A energização inicial das capacitâncias mencionadas acima dá origem a correntes transitórias de alta frequência e de duração muito curta semelhantes àquelas mostradas na fig. 66. A ocorrência repentina de uma primeira falta em um sistema IT também causará correntes transitórias de altas frequências para terra devidas à súbita elevação da tensão das duas fases sãs para a tensão fase-fase em relação à terra.

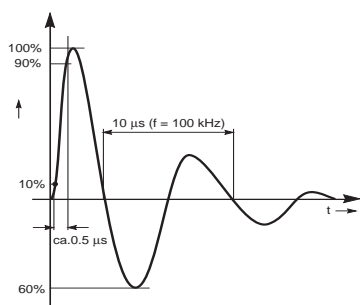
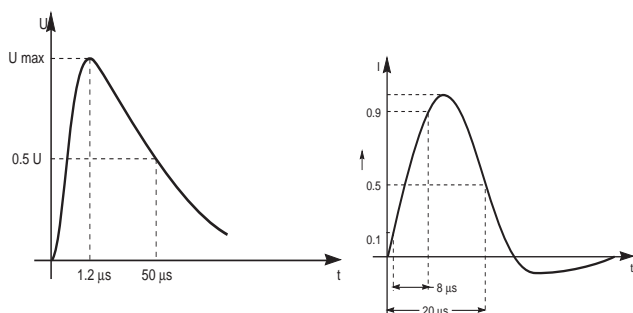


Fig.66: onda transitória de corrente padronizada de 0,5 us/100 kHz

3.3 Influência de sobretensões

Os sistemas de força são submetidos a sobretensões de várias origens: atmosféricas ou devidas a variações bruscas das condições de operação (faltas, operação de fusíveis, chaveamentos, etc.). Estas variações bruscas freqüentemente causam tensões e correntes transitórias elevadas nos circuitos indutivos e capacitivos do sistema, antes que uma nova situação estável seja atingida.

Registros feitos mostram que nos sistemas em BT as sobretensões permanecem geralmente abaixo de 6 kV e que elas podem ser representadas adequadamente por impulsos convencionais da forma 1,2/50 mm. (fig. 67).



figs. 67 e 68 - Impulsos de tensão e corrente em BT

Estas sobretensões dão origem a correntes transitórias representadas por correntes de impulso convencionais tipo 8/20ms com valor de pico de várias dezenas de ampères (fig. 68). As correntes transitórias fluem para terra através de uma falha da isolação ou da capacitância dos pára-raios.

3.4 Compatibilidade eletromagnética

Os transitórios de tensão e de corrente (ou impulsos unidirecionais) de alta frequência mencionados acima, junto com outras fontes de perturbações eletromagnéticas (bobinas de contadores, relés, contatos secos), descargas eletrostáticas e radiações eletromagnéticas (rádio, sistemas de ignição etc.) são parte do importante campo da CEM (compatibilidade eletromagnética, ou EMC em inglês).

É essencial que os DCD sejam imunes a possíveis maus funcionamentos devidos às perturbações eletromagnéticas. Na prática, os níveis mostrados na tabela 70 são considerados nas especificações de projeto e fabricação.

3.5 Implementação

- Cada DCD instalado precisa ter um nível mínimo de imunidade para disparos não desejados, de conformidade com os requisitos da tabela 70. DCD do tipo S ou com ajustes de retardo níveis I e II (veja fig. 36) cobrem todas correntes transitórias incluindo aquelas de pára-raios com durações inferiores a 40 ms.
- correntes de fuga permanentes a jusante de um DCD precisam ser estudadas, particularmente no caso de grandes instalações e/ou onde estão presentes filtros, ou ainda, no caso de uma instalação IT. Se as capacitâncias forem conhecidas, a corrente de fuga equivalente para a escolha da sensibilidade de um DCD é, em $\text{mA}^* = 0,072C$ em 50 Hz ou $0,086C$ em 60 Hz onde C é a capacitância (em nF) de uma fase para terra.

Desde que os DCD que estejam de acordo com as normas IEC (e muitas normas nacionais) devem operar na faixa $0,5ID_n - ID_n$ para uma corrente nominal de ID_n , a corrente de fuga a jusante de um DCD não deve superar $0,5ID_n$.

A limitação da corrente de fuga permanente a $0,25 ID_n$, pela subdivisão dos circuitos, irá, na prática eliminar a influência de todas correntes transitórias correspondentes.

Em casos muito particulares, tais como a extensão ou renovação parcial de instalações IT extensas, o fabricante deve ser consultado.

3.6 Componentes em corrente contínua

Fontes auxiliares em C.C. são de uso comum para indicação e controle de equipamentos elétricos e mecânicos e certos aparelhos incluem retificadores (diodos, triacs, tiristores). No evento de uma falta à terra a jusante de um retificador, a corrente de falta inclui um componente C.C.. O risco depende do nível de isolamento dos circuitos C.C. do aparelho, e cada caso precisa ser analisado individualmente.

Este tipo de problema geralmente está ligado a aplicações industriais.

A IEC classifica os DCD's de acordo com sua capacidade de funcionar corretamente em presença de componentes C.C. na corrente residual.

São 3 classes distintas:

Classe AC: operam somente devido a componentes c.a.

Classe A: operam se as correntes residuais consistem de pulsos unidirecionais.

Classe B: operam em corrente contínua pura.

NOTA: para uso geral são normalmente usados DCD da classe AC. São disponíveis os da classe A para aplicações específicas, como um variante dos dispositivos da classe AC.

3.7 Recomendações relativas à instalação de DCD's com transformadores de corrente toroidais separados

O detetor de corrente diferencial é um circuito magnético fechado (usualmente circular) de permeabilidade magnética muito alta, no qual é enrolado uma bobina de fios, constituindo o conjunto um transformador de corrente toroidal (ou em anel). Devido à sua alta permeabilidade, qualquer pequeno afastamento de uma perfeita simetria dos condutores envolvidos pelo núcleo, ou à proximidade de material ferroso (caixa de aço, partes de chassis, etc.) podem afetar o equilíbrio das forças magnéticas, por ocasião de grandes correntes de carga (corrente de partida de motores, corrente magnetizante de energização de transformadores, etc.) o suficiente para causar a operação indevida do DCD.

A não ser que sejam tomadas medidas particulares, a relação entre a corrente de operação DIn e a máxima corrente de fase I_{ph} (max.) é geralmente menor que $1/1.000$.

Este limite pode ser substancialmente aumentado (se a resposta pode ser dessensibilizada) pela adoção das medidas mostradas na fig. 71 e resumidas na tabela 72.

Escolha das características de um disjuntor de corrente diferencial (RCCB - IEC 1008) Corrente nominal

A corrente nominal de um RCCB é escolhida de acordo com a máxima corrente de carga permanente que ele irá alimentar, avaliada de acordo com a demanda estimada [utilizando os fatores de utilização máxima $[k_u]$ e de simultaneidade $[k_s]$].

- ◆ se o RCCB for ligado em série com e a jusante de um disjuntor, a corrente nominal de ambos será a mesma, isto é, $I_n > I_{n1}^*$ (fig. 73.a)

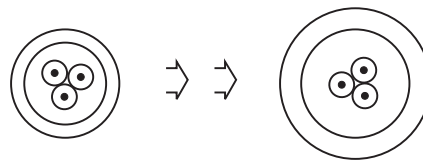
- ◆ se o RCCB for instalado a montante de um grupo de circuitos protegidos por disjuntores, como mostrado na fig. 73b, a sua corrente nominal será dada por:

$$I_n \geq k_n \times k_s (I_{n1} + I_{n2} + I_{n3} + I_{n4})$$

Centralize the cables in the ring core



Use an oversized magnetic ring core



Insert a tubular magnetic screen.

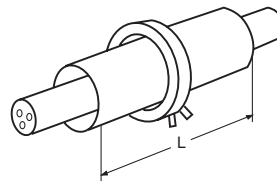


Fig. 71: meios de reduzir a relação DIn/I_{ph} (máx.)

* Algumas normas nacionais incluem um teste de corrente térmica suportável maior que I_n de modo a assegurar uma coordenação correta.

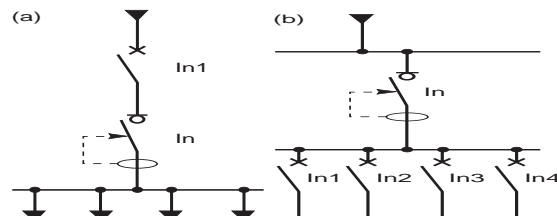


fig 73 - implementação de RCCB's

	type of test	required withstand quantity		
overvoltage transient current	1.2/50 μ s impulse	6 kV peak		
	0.5 μ s/100 kHz impulse	200 A peak*		
	8/20 μ s impulse	200 A peak		
		60 A peak for 10 mA RCDs 5 kA peak for types "S" or time-delayed models (see note*)		
switching	repetitive transient bursts IEC 801-4	4 kV		
static electricity	electrostatic discharges IEC 801-2	8 kV		
radiated waves	radiated electromagnetic fields IEC 801-3 V/m* for RCDs having IDn < 10 mA this test is not required (IEC 1008-1).			
x IDn	1	2	5	> 5
instantaneous (ms)	300	150	40	40
domestic type S (ms)	500	200	150	150
industrial setting I** (ms)	150	150	150	150*
Merlin Gerintable G11: maximum operating times of RCCBs (IEC 1008). ** Note : the use of the term "circuit breaker" does not mean that RCCB can break short-circuit currents. For such duties RCDs known as RCBOs (O for overcurrent) as defined in IEC				
*Note: Time-delayed RCDs are normally installed near the service position of installations, where current surges of external origin are the most severe. The 5 kA peak test reflects this high-performance duty requirement.				

Tab 70 - Características de RCBO's e CEM

measures	diameter (mm)	sensitivity dim inution factor
careful centralizing of cables through the ring core		3
oversizing of the ring core	$\varnothing 50 > \varnothing 100$	2
	$\varnothing 80 > \varnothing 200$	2
	$\varnothing 120 > \varnothing 200$	6
use of a steel or soft-iron shielding sleeve	$\varnothing 50$	4
c of wall thickness 0.5 mm	$\varnothing 80$	3
c of length 2 x inside diameter of ring core	$\varnothing 120$	3
c completely surrounding the conductors and overlapping the circular core equally at both ends	$\varnothing 200$	2
These measures can be combined. By carefully centralizing the cables in a ring core of 200 mm diameter, where a 50 mm core would be large enough, and using a sleeve, the ratio 1/1,000 could become 1/30,000.		

Tabela 72: meios de reduzir a relação IDn / Iph (máx.)

Coordination of circuit breakers and RCCBs- max. short-circuit current in kA (r.m.s.)										
upstream circuit breaker	type	C60a	C60N	C60H	C60L	NC100H	NC100L			
downstream RCCB	2p	25 A	10	16	20	45		45		
		40 A	10	16	20	40		45		
	4p	63 A		16	20	30	5	45		
		80 A					5			
downstream RCCB	2p	25 A	5	8	10	25		22		
		40 A	5	8	10	25		22		
	4p	63 A		8	10	15	5	22		
		80 A								
Coordination of fuses and RCCBs- max. short-circuit (not applicable to aM fuses)										
upstream fuses gl (not applicable to aM fuses)		16 A	25 A	32 A	40 A	50 A	63 A	80 A	100 A	
downstream RCCB	2p	25 A	100	100	100					
		40 A		100	100	80			10 (1)	
	4p	63 A				80	50	30	20	10 (1)
		80 A						30	20	
downstream RCCB	2p	25 A	100	100	100				10 (1)	
		40 A		100	100	80			10 (1)	
	4p	63 A				80	50	30	20	10 (1)
		80 A						30	20	10 (1)

3.8 Requisitos de suportabilidade eletrodinâmica

A proteção contra curtos-circuitos precisa ser prevista por um DPCC (dispositivo de proteção contra curto-circuito [SCPD em inglês]) a montante mas considera-se que quando o RCCB está localizado na mesma caixa de distribuição (de acordo com as respectivas normas) com o disjuntor a jusante, a proteção contra curto circuito fornecida por estes (saídas de circuitos) DPCC é uma alternativa adequada.

A coordenação entre o RCCB e os SPCD é necessária e os fabricantes geralmente fornecem tabelas associando RCCB e disjuntores ou fusíveis (veja tabela 74).