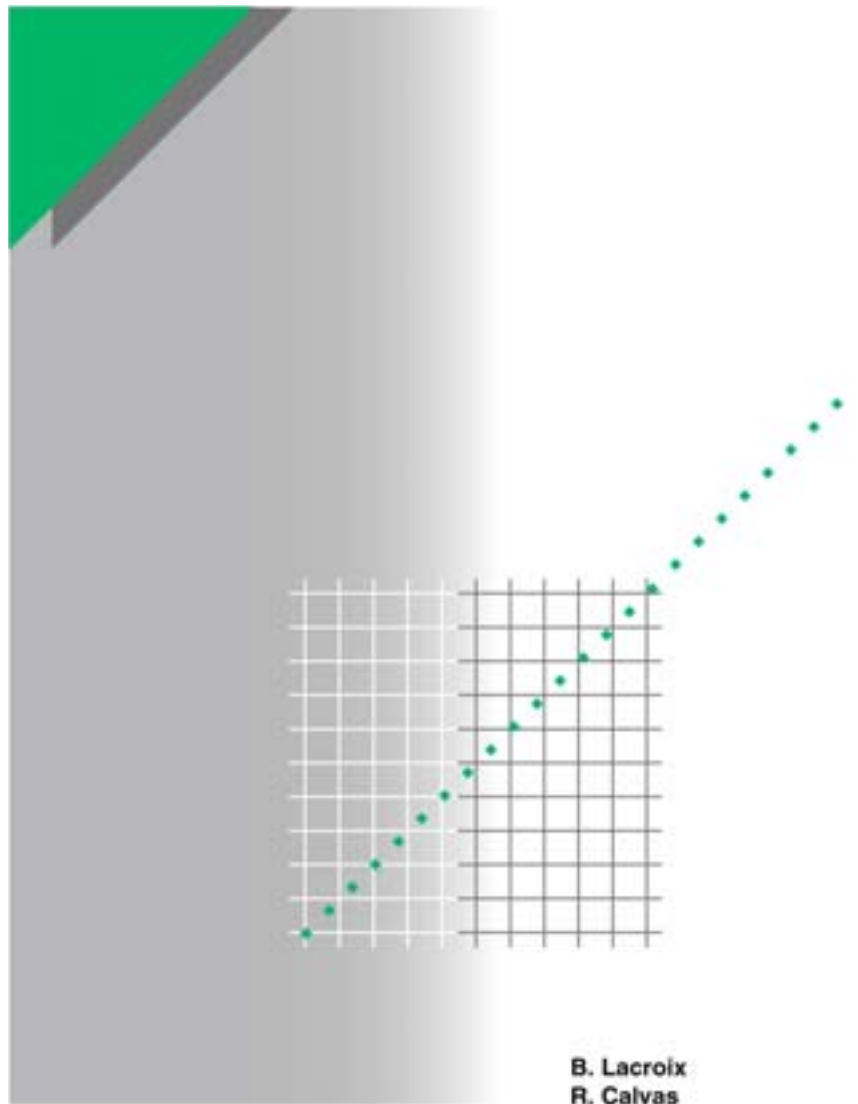


Caderno técnico nº 172

Esquemas das ligações de aterramento de BT (regimes do neutro)



B. Lacroix
R. Calvas

Os Cadernos Técnicos constituem uma coleção de uma centena de títulos editados especialmente para engenheiros e técnicos que procuram uma informação mais aprofundada, complementar à dos manuais, catálogos e boletins técnicos.

Os Cadernos Técnicos fornecem conhecimentos sobre as novas técnicas e tecnologias eletrotécnicas e eletrônicas. Possibilitam também uma melhor compreensão dos fenômenos encontrados nas instalações, sistemas e equipamentos.

Cada Caderno Técnico trata em profundidade um tema preciso nos campos das redes elétricas, proteções, controle-comando e automações industriais.

Podem ser feitos downloads na Internet das últimas obras editadas através do site da Schneider Electric.

Código: <http://www.schneider-electric.com>

Título: ***Le rendez-vous des experts (O encontro dos experts)***

Para obter um Caderno Técnico ou a lista dos títulos disponíveis, entre em contato com a Schneider Electric Brasil.

A coleção dos Cadernos Técnicos integra-se na “Collection Technique” (Coleção Técnica) da Schneider Electric.

Atenção

O autor se exime de quaisquer responsabilidades subseqüentes à utilização incorreta das informações e esquemas reproduzidos no presente documento, e não pode ser considerado responsável nem por eventuais erros ou omissões, nem por conseqüências ligadas à colocação em operação das informações e esquemas contidos nesta obra.

A reprodução completa ou parcial de um Caderno Técnico é permitida com a autorização da Direção Científica e Técnica, com a citação obrigatória: “Extrato do Caderno Técnico Schneider Electric n° (a especificar)”.

nº 172

Esquemas das ligações de aterramento de BT (regimes do neutro)



Bernard Lacroix

Engenheiro pela ESPCI 74 (Escola Superior de Física e Química Industrial de Paris), trabalhou 5 anos na Jeumont Schneider, onde participou, entre outros, do desenvolvimento do variador de velocidade chaveado do TGV.

Entrou na Merlin Gerin em 1981, foi sucessivamente técnico comercial no setor de onduladores, depois foi responsável comercial do setor de proteção às pessoas.

Desde 1991, é encarregado da prescrição no setor de distribuição de BT de Potência.



Roland Calvas

Engenheiro pela ENSERG 1964 (Escola Nacional Superior de Eletrônica e Radioeletricidade de Grenoble) e diplomado no Instituto de Administração de Empresas, entrou na Merlin Gerin em 1966.

Durante seu trajeto profissional, foi responsável comercial, depois responsável no marketing pelo setor de proteção às pessoas.

Hoje é encarregado da comunicação técnica do Grupo Schneider.

Léxico

CEM: Compatibilidade Eletromagnética

CPI: Controlador Permanente de Isolação

CR: proteção de Curto Retardo (proteção contra sobrecorrentes de curto-circuito por disjuntor com disparador rápido)

DDR: Dispositivo Diferencial Residual

DLF: Dispositivo de Localização de Falha

DPCC: Dispositivo de Proteção contra Curtos-Circuitos (disjuntores ou fusíveis)

Eletrização: aplicação de uma tensão entre duas partes do corpo

Eletrocussão: eletrização que provoca a morte

GTP: Gerenciamento Técnico de Prédios

GTE: Gerenciamento Técnico da distribuição de Energia elétrica

I Δ n: nível de funcionamento de um DDR

U_L: tensão limite convencional (tensão de contato máxima admissível) dita de segurança

MT/AT: Média Tensão: 1 a 35 kV segundo o CENELEC (circular de 27.07.92) - Alta Tensão classe A: 1 a 50 kV segundo o decreto francês de 14.11.88

Esquemas das ligações de aterramento de baixa tensão (regimes do neutro)

Este Caderno Técnico revê os riscos, ligados às falhas de isolamento, para a segurança das pessoas e dos bens. Também enfatiza a influência do esquema das ligações de aterramento sobre a disponibilidade da energia elétrica.

São apresentados os três esquemas, definidos pela norma IEC 60364 e utilizados com graus diferentes em todos os países.

Cada esquema, ainda chamado “regime do neutro”, é examinado em relação à segurança (segurança, manutenção e disponibilidade).

Não existe um mau esquema das ligações de aterramento, pois todos garantem a segurança das pessoas. Cada um dos esquemas possui vantagens e inconvenientes e o usuário deve ser orientado, portanto, segundo suas necessidades, exceto se houver prescrição ou interdição normativa ou legislativa.

O leitor interessado nas práticas dos diferentes países e na evolução dos esquema das ligações de aterramento, é convidado a ler o Caderno Técnico nº 173.

Sumário

1 Evolução das necessidades		p. 4
	1.2 Causas das falhas de isolamento	p. 4
	1.3 Riscos ligados às falhas de isolamento	p. 5
2 Esquema das ligações de aterramento e a proteção das pessoas		p. 8
	2.1 Aterramento do neutro ou esquema TN	p. 9
	2.2 Neutro aterrado ou esquema TT	p. 10
	2.3 Neutro isolado ou impedante ou esquema IT	p. 11
3 Esquema de aterramento, riscos de incêndio e não disponibilidade da energia	3.1 Risco de incêndio	p. 15
	3.2 Risco de não disponibilidade da energia	p. 15
4 Influências da MT na BT, segundo o esquema de aterramento	4.1 Relâmpago	p. 17
	4.2 As sobretensões de operação	p. 17
	4.3 Arco entre MT e massa interno do transformador	p. 18
	4.4 Arco entre MT e BT interno do transformador	p. 19
5 Dispositivos ligados à escolha do esquema das ligações de aterramento	5.1 Aterramento do neutro - TN	p. 20
	5.2 Neutro aterrado - TT	p. 21
	5.3 Neutro isolado ou impedante - IT	p. 21
	5.4 Proteção do neutro	p. 23
6 Escolha do esquema das ligações de aterramento e conclusão	6.1 Metodologia para escolha	p. 25
	6.2 Conclusão	p. 26
7 Bibliografia		p. 27

1 Introdução

1.1 Evolução das necessidades

Hoje os três esquemas das ligações de aterramento, por muito tempo conhecidos como “regimes do neutro”, tais como definidos pelas normas IEC 60364 e NF C 15-100, são:

- aterramento do neutro - TN
- neutro aterrado - TT
- neutro isolado ou impedante - IT

Estes três esquemas têm a mesma finalidade com relação à proteção das pessoas e dos bens: o domínio dos efeitos das falhas de isolamento. São considerados equivalentes com respeito à segurança das pessoas contra os contatos indiretos.

No entanto, isto não se aplica necessariamente da mesma maneira na segurança da instalação elétrica de BT com relação à:

- disponibilidade da energia,
- manutenção da instalação.

Estas grandezas, calculáveis, são objeto de requerimentos cada vez mais exigentes na indústria e nos edifícios do setor terciário.

Além disso, os sistemas de controle-comando dos edifícios - GTB - e de gerenciamento da distribuição da energia elétrica - GTE - têm uma função cada vez mais importante com relação à administração e à segurança.

Portanto, esta evolução da necessidade de segurança influencia a escolha do esquema de ligações de aterramento.

Deve-se sempre lembrar que as considerações da continuidade de serviço (manter uma rede de distribuição pública saudável desconectando os consumidores com uma falha de isolamento) têm um papel relevante na emergência dos esquemas das ligações de aterramento.

1.2 Causas das falhas de isolamento

Para assegurar a proteção das pessoas e a continuidade da operação, os condutores e as peças energizadas de uma instalação elétrica são “isoladas” em relação aos massas ligados a terra.

A isolamento é realizada por:

- utilização de materiais isolantes;
- distância que necessita de um afastamento de isolamento em gases (por exemplo, no ar) e de linhas de fuga (relativos ao equipamento, por exemplo, trajeto de contorno de um isolador).

Uma isolamento é caracterizada por tensões especificadas que, conforme as normas, são aplicadas aos produtos e aos equipamentos novos:

- tensão de isolamento (maior tensão da rede)
- tensão de suportabilidade aos choque de relâmpago (onda 1,2; 50 μ s)
- tensão de suportabilidade à frequência industrial (2 U + 1 000 V/1min)

Exemplo para um painel de BT do tipo PRISMA:

- tensão de isolamento: 1 000 V
- tensão de choque: 12 kV

No comissionamento de uma nova instalação, realizada conforme as regras da arte, utilizando produtos fabricados segundo as normas, o risco de falha de isolamento é muito pequeno, no entanto, com o envelhecimento da instalação, estes riscos aumentam.

De fato, esta é a razão de diversas agressões, que dão origem a falhas de isolamento, por exemplo:

- durante a instalação:
 - deterioração mecânica do isolante de um cabo;
- durante a operação:
 - poeiras mais ou menos condutoras,
 - desgaste térmico dos isolantes devido a temperatura excessiva devido:
 - ao clima,
 - ao número elevado de cabos em um conduíte,
 - a armário mal ventilado,
 - aos harmônicos,
 - às sobrecorrentes...
 - forças eletrodinâmicas desenvolvidas durante curto-circuito, que podem danificar um cabo ou diminuir uma distância de isolamento,
 - sobretensões de operação, de relâmpago,
 - sobretensões 50 Hz de retorno, resultantes de uma falha de isolamento em MT.

Geralmente, é uma combinação destas causas primárias que conduz à falha de isolamento.

Este é:

- seja em modo diferencial (entre os condutores ativos) e torna-se um curto-circuito;
- seja em modo comum (entre condutores ativos e massa ou terra), uma corrente de falha - dita em modo comum ou homopolar (MT) - circula então no condutor de proteção (PE) e/ou no terra.

Os esquemas das ligações de aterramento de BT são essencialmente relacionados pelas falhas em modo comum, do qual ocorrem principalmente nos receptores e cabos.

1.3 Riscos ligados à falha de isolamento

Uma falha de isolamento, qualquer que seja a causa, apresenta riscos:

- de vida às pessoas,
- de preservação dos bens,
- de disponibilidade da energia elétrica, tudo isto dependente da segurança.

Risco de eletrização das pessoas

Uma pessoa (ou um animal) submetida a uma tensão elétrica é eletrizada. Segundo a gravidade da eletrização, esta pessoa pode sofrer:

- um desconforto,
- uma contração muscular,
- uma queimadura;
- uma parada cardíaca (é a eletrocussão) (ver **fig. 1**).

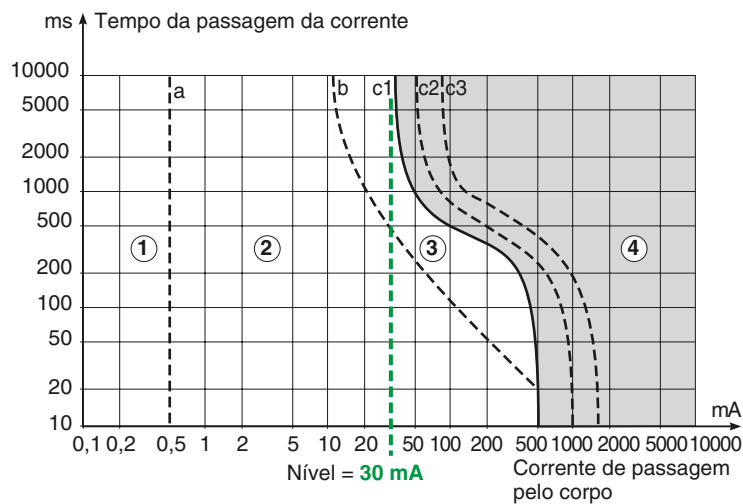
Proteger as pessoas dos efeitos perigosos da corrente elétrica é prioritário, conseqüentemente,

o risco de eletrização é o primeiro que deve ser considerado.

A corrente - em valor e tempo -, que atravessa o corpo humano (especialmente o coração), é que é perigosa.

Em baixa tensão, o valor da impedância do corpo (cujo elemento importante é a resistência da pele), evolui praticamente apenas em função do ambiente (locais secos e úmidos, e locais molhados). Para cada um dos casos, uma tensão de segurança (tensão de contato máxima admissível durante no mínimo 5 s) foi definida: chamada tensão limite convencional UL na norma IEC 60479.

As normas IEC 60364 § 413.1.1.1 e NF C 15-100 precisam que, se a tensão de contato (U_c) risca ultrapassar a tensão UL, o tempo de aplicação da tensão de falha deve ser limitado pela intervenção dos dispositivos de proteção (ver **fig. 2**).



Zona 1: percepção

Zona 3: contrações musculares

c1: probabilidade 5%

Zona 2: desconforto considerável

Zona 4: risco de fibrilação ventricular (parada cardíaca)

c2: probabilidade > 50%

Fig. 1: zonas tempo/corrente dos efeitos nas pessoas das correntes alternadas (15 a 100 Hz) segundo IEC 60479-1.

■ Locais ou slots secos ou úmidos: $U_L \leq 50$ V

Tensão de contato presumida (V)	< 50	50	75	90	120	150	220	280	350	500
Tempo de interrupção máximo do dispositivo de proteção (s)	Corrente alternada	5	5	0,60	0,45	0,34	0,27	0,17	0,12	0,08
	Corrente contínua	5	5	5	5	5	1	0,40	0,30	0,20

■ Locais ou slots molhados: $U_L \leq 25$ V

Tensão de contato presumida (V)	25	50	75	90	110	150	220	280
Tempo de interrupção máximo do dispositivo de proteção (s)	Corrente alternada	5	0,48	0,30	0,25	0,18	0,10	0,05
	Corrente contínua	5	5	2	0,80	0,50	0,25	0,06

Fig. 2: tempo máximo de retenção da tensão de contato segundo a norma IEC 60364.

Risco de incêndio

Este risco, quando se materializar, pode ter conseqüências dramáticas para as pessoas e os bens. Um grande número de incêndios são originados de aquecimento importante e preciso ou um arco elétrico provocado por uma falha de isolamento. Quanto mais elevada for a corrente de falha, maior será o risco de incêndio ou explosão dos locais.

Risco de não disponibilidade da energia

O domínio deste risco é cada vez mais importante. Mesmo se, para eliminar a falha, a parte que está em falha for desconectada automaticamente, isto pode resultar em:

- risco para as pessoas, por exemplo:
 - falta repentina de iluminação,
 - colocar fora de serviço equipamentos úteis à segurança;
- risco econômico devido à perda de produção. Este risco deve ser especialmente dominado nas indústrias com processos para os quais o religamento pode ser longo e custoso.

Além disso, se a corrente de falha for elevada:

- desgastes na instalação ou nos receptores, podem ser grandes e aumentar os custos e os tempos de reparo,
- a circulação de correntes elevadas em modo comum (entre rede e terra) pode também causar distúrbios nos equipamentos sensíveis, principalmente se estes fizerem parte de um sistema de “baixas correntes”, geograficamente distribuído com ligações galvânicas.

Finalmente, na desenergização, o aparecimento de sobretensões e/ou fenômenos de irradiações eletromagnéticas, podem provocar mau funcionamento ou danificar os equipamentos sensíveis.

Contatos direto e indireto

Antes de começar o estudo dos esquemas das ligações de aterramento, é útil fazer uma recapitulação sobre a eletrização por contatos direto e indireto.

■ Contato direto e medidas de proteção

Trata-se do contato acidental de pessoas com um condutor ativo (fase ou neutro) ou um componente condutor normalmente energizado (ver **fig. 3a**).

No caso onde o risco é elevado, a solução comum consiste em distribuir a eletricidade em uma tensão não perigosa, isto é, uma tensão menor que a tensão de segurança. A utilização da baixíssima tensão de segurança (TBTS ou TBTP).

Em BT (230/400 V), as medidas de proteção consistem em colocar estas partes ativas fora do alcance ou isolá-las pela utilização de isolantes, invólucros, barreiras.

Uma medida complementar contra os contatos diretos consiste em utilizar os Dispositivos Diferenciais Residuais (DDR) instantâneos de Alta Sensibilidade ≤ 30 mA chamados DDR-HS.

O tratamento da proteção contra os contatos diretos é totalmente independente do esquema de aterramento, mas esta medida é necessária em todos os casos de alimentação de circuitos onde a operação do esquema de aterramento a jusante não for controlada. Na França, o decreto de 14.11.88 e a norma NF C 15-100 § 532-2-6 torna obrigatória esta medida em relação a:

- tomadas de corrente com calibres ≤ 32 A,
- certos tipos de instalação (temporária, obras...).

■ Contato indireto, medidas de proteção e de prevenção

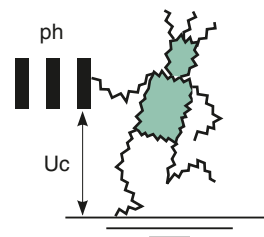
O contato de uma pessoa com os quadros metálicos energizados acidentalmente, é chamado contato indireto (ver **fig. 3b**).

Esta energização acidental é resultante de uma falha de isolamento.

Uma corrente de falha circula e provoca uma elevação do potencial entre o massa do receptor elétrico e o terra: há então o aparecimento de uma tensão de falha que será perigosa, se for superior à tensão UL.

Em relação a este risco, as normas de instalação IEC 60364 de nível internacional e NF C 15-100 nível francês (estas normas são similares na essência), oficializaram três Esquemas das Ligações de Aterramento e definiram as regras de instalação e de proteção correspondentes.

a) contato direto



b) contato indireto

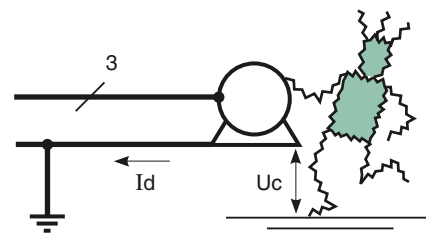


Fig. 3: contatos diretos e indiretos

As medidas de proteção contra os contatos indiretos baseiam-se em três princípios fundamentais:

■ **aterramento dos massas dos receptores e dos equipamentos elétricos** para evitar que uma falha de isolamento apresente um risco equivalente a um contato direto

■ **equipotencialidade dos massas acessíveis simultaneamente**

A interconexão destes massas contribui de forma eficaz na redução da tensão de contato. Ela é feita através do condutor de proteção (PE) que liga os massas dos materiais elétricos para o conjunto de um edifício, podendo se completada com ligações equipotenciais suplementares, se necessário (ver **fig. 4**).

Lembrete: a equipotencialidade não pode ser total em todos os locais (principalmente locais com um único nível). Conseqüentemente, para o estudo dos esquemas de aterramento e das proteções associadas, a hipótese escolhida pelas entidades de normatização $U_c = U_d$ é aplicada, pois U_c é igual a U_d .

□ U_d = tensão de falha, em relação ao terra profundo, do massa de um aparelho elétrico com uma falha de isolamento,

□ U_c = tensão de contato depende do potencial U_d e da referência de potencial da pessoa exposta ao risco, geralmente o solo.

■ **controle do risco elétrico:**

□ este controle é otimizado pela **prevenção**.

Ao medir, por exemplo, a isolamento de um equipamento antes de sua energização, ou pela prevenção de falha baseada no acompanhamento da evolução da isolamento de uma instalação isolada do terra (esquema IT),

□ se a falha de isolamento ocorrer e gerar uma tensão de falha perigosa, deve-se eliminá-la por desconexão automática da parte da instalação onde é produzida a falha. A maneira de eliminar o risco depende do esquema de aterramento.

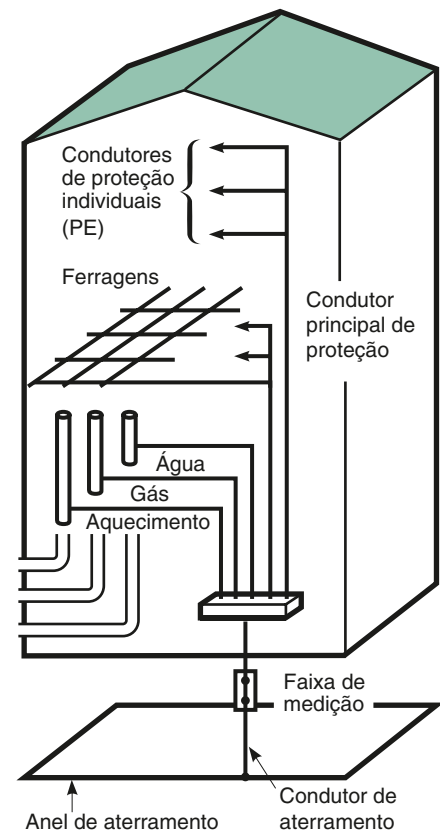


Fig. 4: equipotencialidade em um imóvel

2 Esquema das ligações de aterramento e proteção das pessoas

Neste capítulo, os riscos de eletrização, até mesmo de eletrocussão, serão precisados pelos diferentes esquemas de ligações de aterramento, definidos pelo IEC - International Electrotechnical Committee (comitê eletrotécnico internacional) na norma IEC 60364.

O esquema das ligações de aterramento de BT caracteriza o modo de aterramento do secundário do transformador MT/BT e as formas de aterrar os massas da instalação.

A identificação dos tipos de esquemas é assim definida através de 2 letras:

- a primeira, ligação do neutro do transformador (2 casos possíveis):
 - T para “ligado” ao terra,
 - I para “isolado” do terra;
- segunda, para o tipo de ligação dos massas da aplicação (2 casos possíveis):
 - T para “ligado diretamente” ao terra,
 - N para “ligado ao neutro” na origem da instalação, o qual é ligado ao terra (ver [fig. 5](#)).

A combinação destas duas letras representa três possíveis configurações:

- **TT**: neutro do transformador T e massa T,
- **TN**: neutro do transformador T e massa N,
- **IT**: neutro do transformador I e massa T.

Nota 1:

O esquema TN, segundo as normas IEC 60364 e NF C 15-100, possui diversos subesquemas:

- **TN-C**: se os condutores do neutro N e do PE são os mesmos (PEN),
- **TN-S**: se os condutores do neutro N e do PE são diferentes,
- **TN-C-S**: utilização de um TN-S a jusante de um TN-C (o inverso é proibido).

Observar que o TN-S é obrigatório para redes com condutores de secção $\leq 10 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$.

Nota 2:

Cada esquema de aterramento pode ser aplicado no conjunto de uma instalação elétrica de BT, mas vários esquemas de aterramento podem coexistir em uma mesma instalação, ver o exemplo da [figura 6](#).

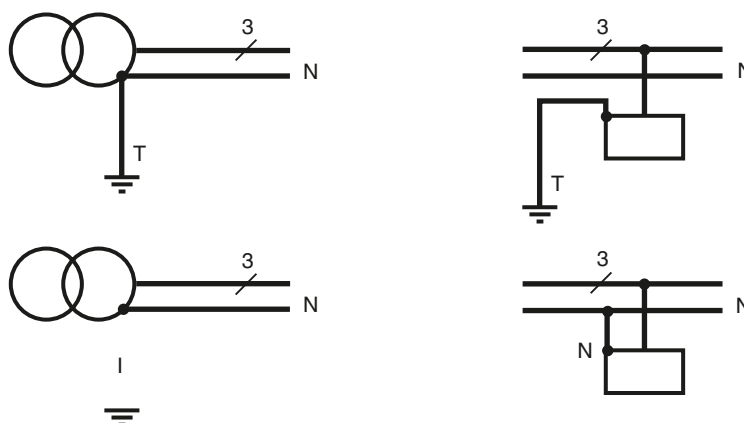


Fig. 5: modo de conexão, aterramento do neutro do transformador e das massas dos receptores elétricos

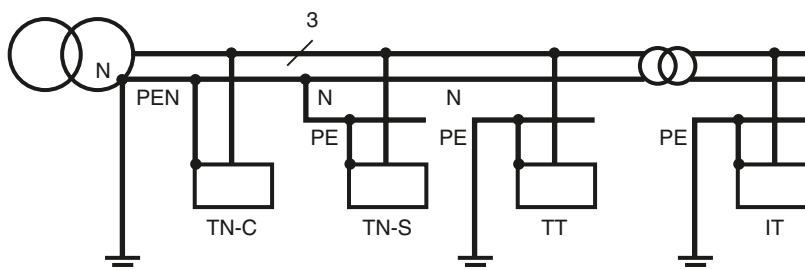


Fig. 6: exemplo de diversos sistemas de aterramento em uma mesma instalação

Nota 3:

Na França, segundo a norma NF C 13-100 relativa às subestações de fornecimento, para apreender os riscos originários de média tensão, o esquema de aterramento de BT é expresso

com ajuda de uma letra adicional seguindo a interconexão das diferentes ligações de aterramento (ver **fig. 7**).

Examinaremos agora como realizar a proteção das pessoas, em cada dos casos.

Letra suplementar	Aterramento da subestação MT/BT	Aterramento do neutro BT	Aterramento da aplicação BT
R (ligadas)	■	■	■
N (do neutro)	■	■	□
S (separada)	□	□	□

(■ = interconectada, □ = independente)

Fig. 7: ligação das conexões de BT com as da subestação MT/BT

2.1 Aterramento do neutro ou esquema TN

Na presença de uma falha de isolamento, a corrente de falha I_d somente será limitada pela impedância dos cabos do anel da falha (ver **fig. 8**):

$$I_d = \frac{U_0}{R_{ph1} + R_d + R_{PE}}$$

Para uma partida, desde que $R_d \approx 0$:

$$I_d = \frac{0,8 U_0}{R_{ph1} + R_{PE}}$$

De fato, ao ocorrer um curto-circuito, é admissível que as impedâncias a montantes da partida considerada provoquem uma queda de tensão da ordem de 20% sobre a tensão simples U_0 , que é a tensão nominal entre fase e terra, cujo coeficiente é 0,8.

Portanto, I_d induz a uma tensão de falha, em relação ao terra:

$$U_d = R_{PE} I_d$$

isto é:

$$U_d = 0,8 U_0 \frac{R_{PE}}{R_{ph1} + R_{PE}}$$

Para as redes 230/400 V, esta tensão da ordem de $U_0/2$ (se $R_{PE} = R_{ph}$) é perigosa, pois é maior que a tensão limite de segurança, mesmo em local seco ($U_L = 50$ V). Será assim necessário assegurar uma desenergização automática e imediata da instalação ou de parte de instalação (ver **fig. 9**).

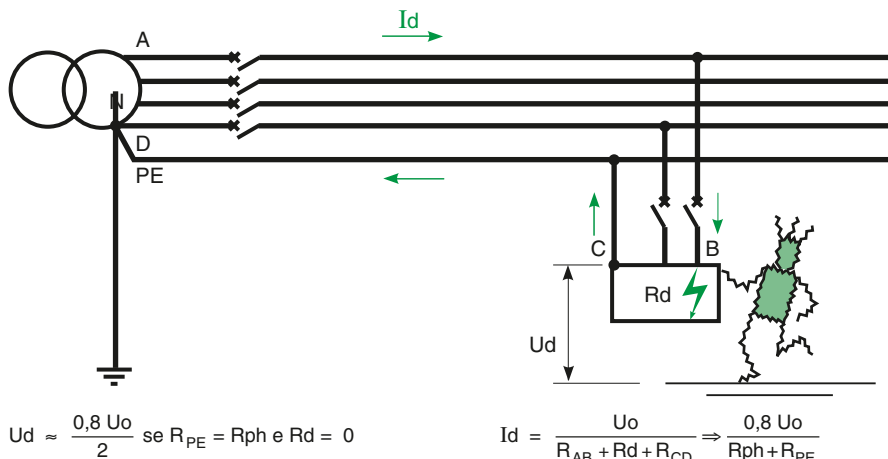


Fig. 8: corrente e tensão de falha no esquema TN

U_0 (volts) tensão fase/neutro	Tempo de interrupção (segundos) $U_L = 50$ V	Tempo de interrupção (segundos) $U_L = 25$ V
127	0,8	0,35
230	0,4	0,2
400	0,2	0,05
> 400	0,1	0,02

Fig. 9: tempo de interrupção no esquema TN (segundo as normas IEC 60364 e NF C 15-100, tabelas 41 A e 48 A).

Se a falha de isolamento for similar a um curto-circuito fase-neutro, a interrupção será realizada pelo Dispositivo de Proteção contra Curtos-Circuitos – DPCC – com um tempo máximo de interrupção especificado na função de U_L .

Colocação em operação

Para estar seguro que o dispositivo de proteção está realmente ativado, é necessário, qualquer que seja o local da falha, que a corrente I_d seja superior ao nível de funcionamento da proteção I_a ($I_d > I_a$).

Esta condição deve ser verificada no projeto da instalação pelo cálculo das correntes de falha, isto para todos os circuitos da distribuição.

Um mesmo percurso do condutor de proteção PE e dos condutores ativos facilita este cálculo e é recomendado pela norma (NF C 15-100 § 544-1). Para garantir esta condição, um outro jeito consiste em impor um valor máximo de impedância aos anéis de falha em função do tipo e do calibre dos DPCC escolhidos (ver a norma inglesa BS 7671). Uma tal abordagem pode conduzir ao aumento da secção dos condutores ativos e/ou de proteção.

Uma outra maneira de verificar que o DPCC irá assegurar a proteção das pessoas, é calcular o comprimento máximo que cada partida não deverá ultrapassar para um nível de proteção I_a dado.

Para calcular I_d e $L_{m\acute{a}x}$, três métodos simples podem ser utilizados (ver Caderno Técnico nº 158 ou o manual NF C 15-105):

- o método das impedâncias,
- o método de composição,

■ o método convencional (manual NF C 15-105, parte C).

Este último fornece a seguinte equação:

$$I_d = \frac{0,8 U_0}{Z} = \frac{0,8 U_0}{R_{ph} + R_{PE}} = \frac{0,8 U_0 S_{ph}}{\rho (1+m) L}$$

Para que a proteção assegure corretamente sua função, é necessário que $I_a < I_d$, daí a expressão de $L_{m\acute{a}x}$, comprimento máximo permitido pela proteção, tendo por nível I_a :

$$L_{m\acute{a}x} = \frac{0,8 U_0 S_{ph}}{\rho (1+m) I_a}$$

- $L_{m\acute{a}x}$: comprimento máximo em m
- U_0 : tensão simples 230 V para uma rede trifásica 400 V
- ρ : resistividade em temperatura de funcionamento normal
- I_a : corrente de interrupção automática:
 - para um disjuntor $I_a = I_m$ (I_m corrente de funcionamento da bobina magnética ou de curto retardo),
 - para um fusível, corrente tal que o tempo total de interrupção do fusível (tempo de pré-arco + tempo de arco) esteja segundo a norma (ver **fig. 9**),
- $m = \frac{S_{ph}}{S_{PE}}$

Se a linha tiver um comprimento superior a $L_{m\acute{a}x}$, será necessário diminuir I_a ou aumentar S_{PE} ou ser protegido utilizado um Dispositivo Diferencial Residual (DDR).

2.2 Neutro aterrado ou esquema TT

Na presença de uma falha de isolamento, a corrente de falha I_d (ver **fig. 10**), é essencialmente limitada.

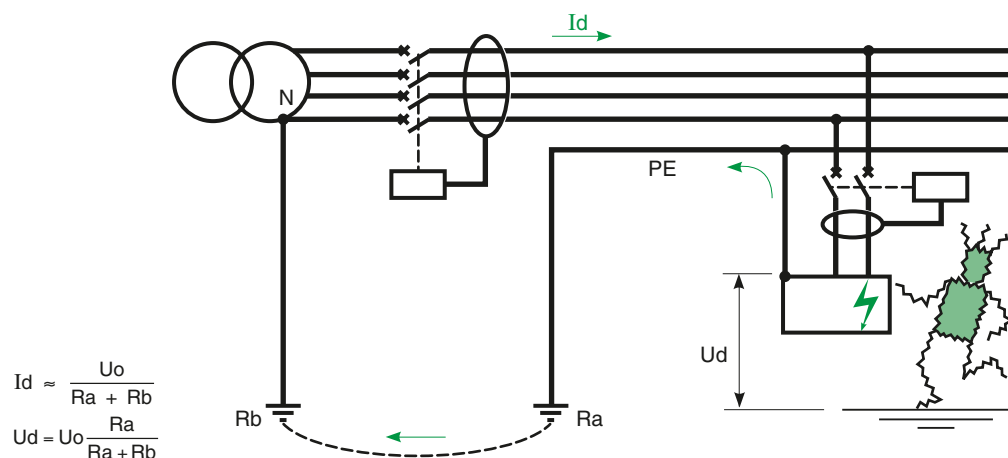


Fig. 10: corrente e tensão de falha em esquema TT.

pelas resistências do terra (se o aterramento das massas e o aterramento do neutro não estiverem associados).

Sempre com a hipótese $R_d = 0$, a corrente de falha é:

$$I_d \approx \frac{U_o}{R_a + R_b}$$

Esta corrente de falha induz a uma tensão de falha na resistência do terra das aplicações:

$$U_d = R_a I_d, \text{ ou } U_d = \frac{U_o R_a}{R_a + R_b}$$

As resistências do terra são normalmente baixas e com a mesma ordem de grandeza ($\approx 10 \Omega$), esta tensão da ordem de $U_o/2$ é perigosa.

Portanto, é obrigatório prever uma desconexão automática da parte da instalação envolvida pela falha (ver **fig. 11**).

Colocação em operação

Se a corrente de falha acima da qual há risco

$$\left(I_{d_o} = \frac{U_L}{R_a} \right) \text{ for amplamente inferior}$$

às regulagens dos dispositivos de proteção contra sobrecorrentes, será necessário instalar, no topo da instalação, no mínimo um DDR. Para melhorar a disponibilidade da energia elétrica, a utilização de diversos DDR permite realizar uma seletividade amperimétrica e cronométrica no desligamento. Todos estes DDR terão um nível de corrente nominal $I_{\Delta n}$ inferior a I_{d_o} .

$I_{\Delta n} \leq \frac{U_L}{R_a}$	Resistência máxima (Ω) da conexão de aterramento R_a para $U_L =$		
	U_L	50 V	25 V
3 A		16 Ω	8 Ω
1 A		50 Ω	25 Ω
500 mA		100 Ω	50 Ω
300 mA		166 Ω	83 Ω
30 mA		1,660 Ω	833 Ω

Fig. 11: limite superior da resistência da conexão de aterramento das massas não deve ser excedido em função da sensibilidade dos DDR e da tensão limite $U_L [I_{\Delta n} = F (F$

A desenergização, por intervenção dos DDR, deve ser feita segundo a norma em menos de 1 s.

Observar que a proteção por DDR:

- é independente do comprimento dos cabos,
- permite diversos aterramentos R_a separados (disposição inadequada, pois o PE não é mais uma única referência de potencial para o conjunto da instalação).

O Caderno Técnico nº 114 trata em detalhes da tecnologia e da utilização dos DDR.

2.3 Neutro isolado ou impedante ou esquema IT

O neutro é isolado, isto é, não está ligado ao terra. Os aterramentos das massas são normalmente interconectados (como para os esquemas de aterramento TN ou TT).

■ Em operação normal (sem falha de isolamento), a rede é aterrada pela impedância de fuga da rede.

Para lembrar, a impedância natural de fuga a terra de um cabo trifásico com 1 km de comprimento, é caracterizada pelos valores típicos:

□ $C = 1 \mu F / km,$

□ $R = 1 M\Omega / km,$

que dão (em 50 Hz):

□ $Z_{cf} = 1 / j C \omega = 3200 \Omega,$

□ $Z_{rf} = R_f = 1 M\Omega,$

logo, $Z_f \approx Z_{cf} = 3200 \Omega.$

Para fixar corretamente o potencial de uma rede em IT em relação ao terra, é aconselhado, sobretudo se for curto, instalar uma impedância ($Z_n \approx 1500 \Omega$) entre o neutro do transformador e o terra ... é o esquema IT ou neutro impedante.

■ Comportamento na primeira falha

□ neutro isolado:

A corrente de falha se estabelece como segue (valor máximo no caso de falha direta e neutro não distribuído).

$I_f = I_{c1} + I_{c2},$ com:

$I_{c1} = j C_f \omega V_{13}$

e

$I_{c2} = j C_f \omega V_{23},$

onde:

$I_d = U_o 3 C_f \omega.$

Para 1 km de rede 230/400 V, a tensão de falha será igual a:

$U_c = R_b I_d,$

isto é, 0,7 V

se $R_b = 10 \Omega.$

Esta tensão é não perigosa e a instalação pode ser mantida em serviço. Se o neutro for distribuído, o desvio do potencial do neutro em relação ao

terra adiciona uma corrente $I_{cn} = U_0 C_f \omega$ e $I_d = U_0 4 C_f \omega$ (ver **fig. 12**).

□ neutro impedante:

Corrente da primeira falha:

$$I_d = \frac{U}{Z_{eq}} \quad \text{com}$$

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{Z_n} + 3j C_f \omega$$

A tensão de falha correspondente permanece baixa e não perigosa, a instalação pode ser mantida em serviço.

Continuar a operação sem risco, é uma vantagem, mas é necessário:

- saber que há uma falha,
- encontrá-la e eliminá-la rapidamente, antes que uma segunda falha ocorra.

Para atender a esta expectativa:

- a mensagem "falha presente" é fornecida por um Controlador Permanente de Isolção (CPI) que supervisiona todos os condutores ativos, inclusive o neutro (obrigatório segundo a norma NF C 15-100),
- a procura é feita pelos localizadores de falha.

■ Comportamento na segunda falha

Quando uma segunda falha ocorrer e a primeira falha ainda não foi eliminada, existem três possibilidades:

- falha relativa ao mesmo condutor ativo: não acontece nada e a operação pode continuar,
- falha relativa a dois condutores ativos diferentes: se todos os massas estiverem interconectados, a falha dupla é um curto-circuito (pelo PE).

O risco de eletrização é similar ao encontrado no esquema TN. As condições mais desfavoráveis para os DPCC (I_d mais baixo) são obtidas no caso onde as duas falhas ocorrem nas partidas que possuem com as mesmas características (secções e comprimentos) (ver **fig. 13**).

Os DPCC devem respeitar as relações:

- se o neutro for distribuído e um dos dois condutores em falha for o neutro:

$$I_a \leq \frac{0,8 U_0}{2 Z}$$

- ou se o neutro não for distribuído:

$$I_a \leq \frac{0,8 U_0 \sqrt{3}}{2 Z}$$

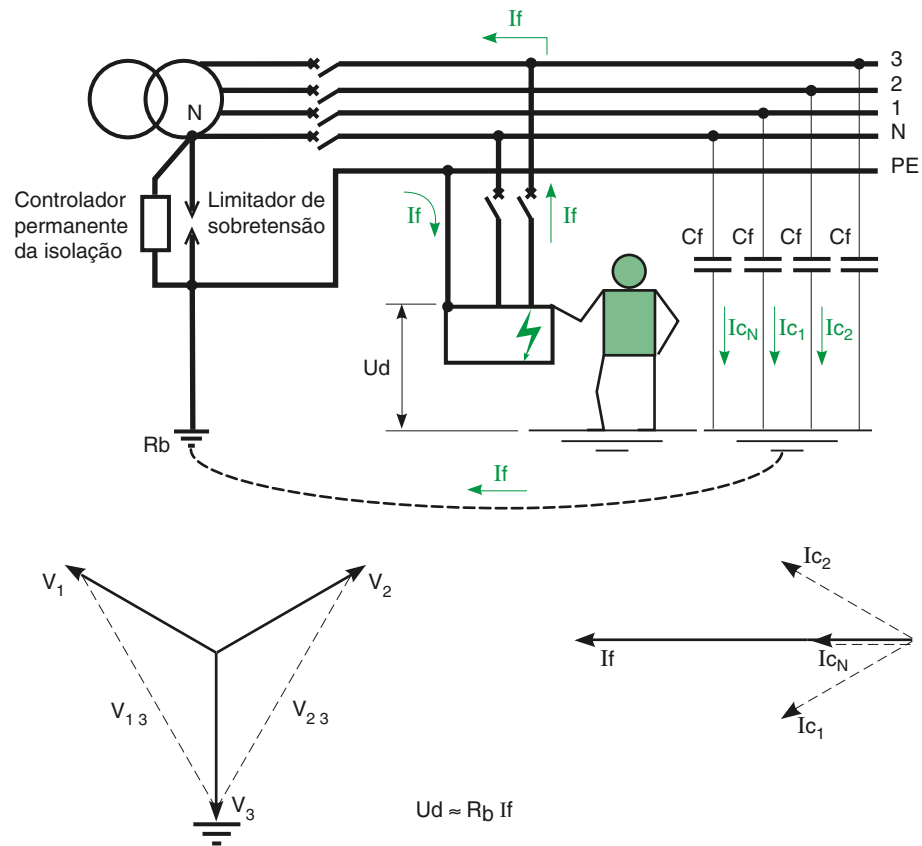


Fig. 12: corrente da primeira falha de isolamento em esquema IT.

Note que no caso onde uma das duas falhas é no neutro, a corrente de falha e a tensão de falha são duas vezes mais baixas do que no esquema TN. Isto estimulou a entidade de normatização em permitir tempos maiores de funcionamento dos DPCC (ver **fig. 14**).

Como no esquema de aterramento TN, a proteção por DPCC somente é válida para comprimentos máximos de cabos:

- neutro distribuído:

$$L_{\text{máx}} = \frac{1}{2} \frac{0,8 U_0 S_{ph}}{\rho (1+m) I_a}$$

- neutro não distribuído:

$$L_{\text{máx}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{0,8 U_0 S_{ph}}{\rho (1+m) I_a}$$

Isto à condição que o neutro seja protegido e que sua secção seja igual à secção das fases... Exatamente por esta razão é que a norma NF C 15-100 desaconselha distribuir o neutro.

□ a falha é relativa a dois condutores ativos diferentes, mas todos os massas não estão interconectados.

Para massas aterrados individualmente ou agrupados, cada circuito ou cada grupo de circuitos deve ser protegido por um DDR.

Conseqüentemente, no caso de falha de isolamento nos grupos conectados a dois aterramentos diferentes, o comportamento do esquema das ligações de aterramento em relação à falha de isolamento (I_d , U_d) será semelhante ao de um esquema TT (a corrente de falha passa pelo terra). A proteção das pessoas contra contatos indiretos será então assegurada da mesma maneira

$$I_{\Delta n} \leq \frac{U_L}{R_a} \quad \text{segundo a tabela da } \textbf{figura 11}.$$

Observar que os tempos especificados pela norma permitem uma seletividade cronométrica horizontal para privilegiar a continuidade de serviço em certas partidas.

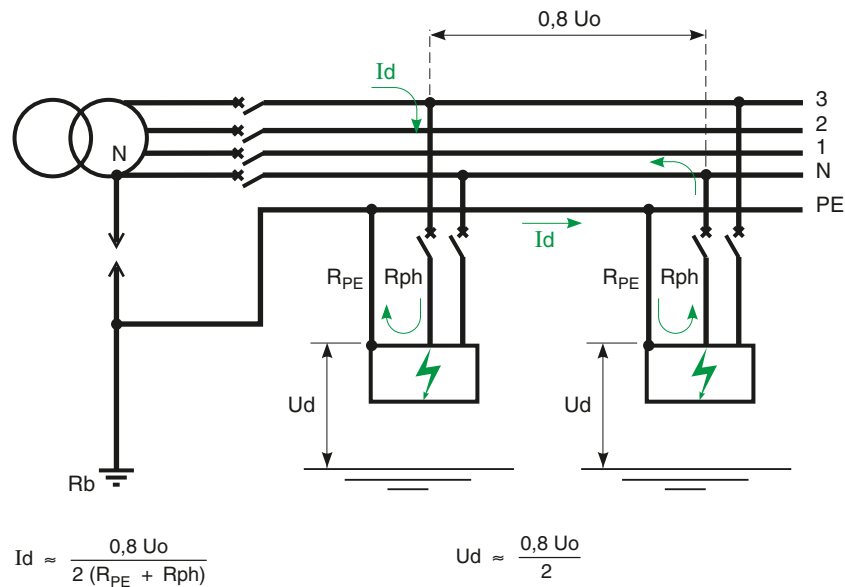


Fig. 13: corrente da 2ª falha do esquema IT (neutro distribuído) e partidas relativas com a mesma secção e mesmo comprimento.

Uo/U (volts) Uo: tensão fase/neutro U: tensão entre fases	UL = 50 V tempo de interrupção (segundos)		UL = 25 V tempo de interrupção (segundos)	
	Neutro não distribuído	Neutro distribuído	Neutro não distribuído	Neutro distribuído
127/220	0,8	5	0,4	1,00
230/400	0,4	0,8	0,2	0,5
400/690	0,2	0,4	0,06	0,2
580/1000	0,1	0,2	0,02	0,08

Fig. 14: tempos de interrupção máximos especificados em esquema IT (segundo as normas IEC 60364 e NF C 15-100, tabelas 41B e 48A).

Nota:

Para proteger uma rede BT não aterrada (IT) contra elevações de tensão (arco no transformador MT/BT, contato acidental com uma rede de tensão mais elevada, relâmpagos na rede MT), a norma francesa NF C 15-100 impõe que um limitador de sobretensão seja instalado entre o ponto neutro do transformador MT/BT e o terra (R_b).

O leitor que desejar se aprofundar no estudo dos esquemas das ligações de aterramento, poderá ler o Caderno Técnico nº 178.

Para obter uma visão sintética das grandezas que caracterizam os diferentes esquemas das ligações de aterramento, em relação à proteção das pessoas, as principais fórmulas são listadas na tabela da **figura 15**.

	Id	Ud	Lmáx	Continuidade de serviço	
TN	$\frac{0,8 U_0 S_{ph}}{\rho (1+m) L}$	$\frac{0,8 U_0}{1+m}$	$\frac{0,8 U_0 S_{ph}}{\rho (1+m) I_a}$	Seletividade vertical	
TT	$\frac{U_0}{R_a + R_b}$	$\frac{U_0 R_a}{R_a + R_b}$	sem esforço	Seletividade vertical	
IT	1ª falha	$< 1 A$	$\ll U_L$	Não desligamento	
	Falha dupla com neutro distribuído	$\leq \frac{1}{2} \frac{0,8 U_0 S_{ph}}{\rho (1+m) L}$	$\leq \frac{m}{2} \frac{0,8 U_0}{1+m}$	$\frac{1}{2} \frac{0,8 U_0 S_{ph}}{\rho (1+m) I_a}$	Seletividade vertical e possibilidade de seletividade horizontal para benefício das partidas de correntes elevadas
	Falha dupla com neutro não distribuído	$\leq \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{0,8 U_0 S_{ph}}{\rho (1+m) L}$	$\leq \frac{m \sqrt{3}}{2} \frac{0,8 U_0}{1+m}$	$\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{0,8 U_0 S_{ph}}{\rho (1+m) I_a}$	

Lembramos que:

■ $\rho = 22 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ para Cu (36 para Al);

■ $m = \frac{S_{ph}}{S_{PE}}$

■ a seção do PE, geralmente igual à seção das fases, pode ser igual à metade da seção das fases quando esta ultrapassar 35 mm^2 ... o que aumenta Ud em TN e IT.

Fig. 15: grandezas características das SLT.

3 Esquemas de aterramento, riscos de incêndio e não disponibilidade da energia

3.1 Risco de incêndio

Foi demonstrado e depois aceito pelas entidades de normatizações, que um contato preciso entre um condutor e uma peça metálica pode provocar, nos locais especialmente sensíveis, um incêndio quando a corrente de falha ultrapassar 500 mA.

A título de exemplo:

- locais com risco elevado: fazendas, indústrias petroquímicas,
- locais com risco médio, mas onde as consequências podem ser muito graves: prédios com altura elevada que recebe público...

Esquema com neutro isolado, o risco de incêndio:

- é muito baixo na primeira falha,
- é tão importante quanto no esquema TN na segunda falha.

Para os esquemas de aterramento TT e sobretudo TN, a corrente de falha é perigosa vista a potência desenvolvida ($P = R_d I^2$):

- em TT = $5 A < I_d < 50 A$,
- em TN = $1 kA < I_d < 100 kA$.

A potência empregada no ponto onde ocorreu a falha, sobretudo no esquema TN, é considerável e convém agir desde os mais baixos níveis de corrente e o mais rápido possível para limitar a energia dissipada ($\int R_d i^2 dt$).

Esta proteção, especificada pela norma IEC e exigida pelas normas francesas (NF C 15-100 § 482-2-10), é fornecida por um DDR instantâneo com limite $\leq 500 mA$ e isto, qualquer que seja o esquema de aterramento.

Quando os riscos de incêndio são especialmente elevados (fabricação/estocagem de materiais inflamáveis...), é necessário, e obrigatório, utilizar esquema de aterramento com massas aterradas para reduzir naturalmente este risco (TT ou IT).

Note que o esquema TN-C é proibido na França pela norma NF C 15-100 se houver risco de incêndio (condições BE2) e/ou de explosão (condições BE3): como os condutores PE e de neutro podem ser confundidos, não é possível utilizar os DDR.

3.2 Risco de não disponibilidade da energia

Este risco é importante para o empreendedor, pois conduz a custos de não produção e de reparos que podem ser relevantes.

O risco é diferente segundo o esquema das ligações de aterramento escolhido.

Lembrar que a disponibilidade (D) é uma grandeza

estatística (ver **fig. 16**) equivalente à relação entre dois períodos:

- tempo durante o qual o setor está presente,
- duração de referência igual ao tempo “setor presente + setor ausente”.

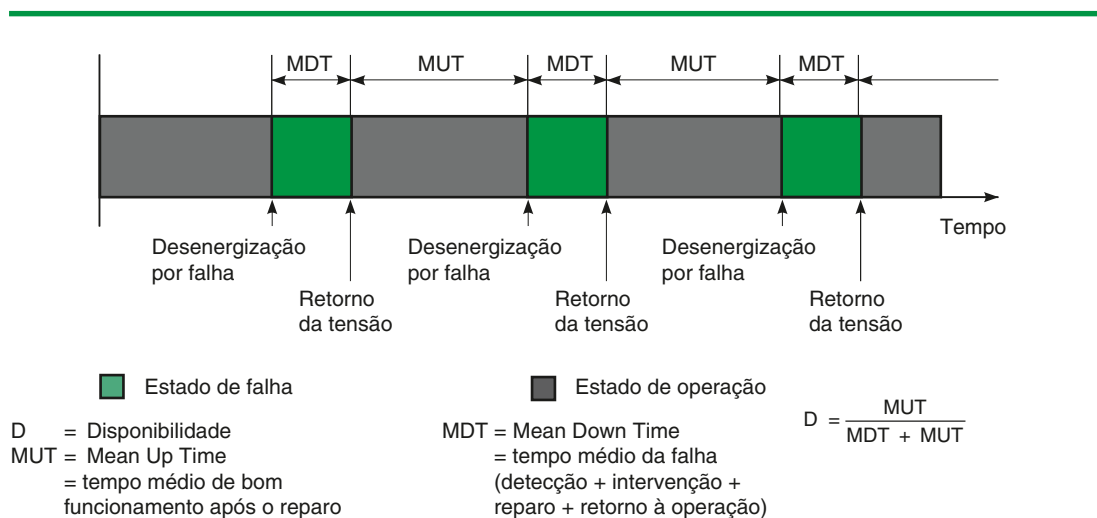


Fig. 16: disponibilidade da energia elétrica.

O tempo de bom funcionamento (MUT) depende do estado geral da isolação da rede. Portanto, a isolação se degrada no tempo com as agressões térmicas e esforços eletrodinâmicos provenientes especialmente das correntes de falha.

O tempo de paralização (MDT) depende também da corrente de falha e principalmente de sua intensidade que, segundo seu valor, pode provocar:

- desgastes mais ou menos importantes nos receptores, cabo...
- incêndios
- funcionamento incorretos nos equipamentos de corrente baixa do controle-comando.

Frente à disponibilidade da energia elétrica, convém estudar cada esquema de aterramento. O esquema das ligações de aterramento IT merece um especial aprofundamento, pois é o único que permite o não desligamento na presença de uma falha.

■ Esquema de aterramento IT

Para conservar toda a vantagem do esquema de aterramento IT, que é de não interromper a distribuição elétrica desde a primeira falha, deve ser evitada a segunda falha, que apresenta os mesmos riscos importantes que o esquema TN. Para fazer isto, é preciso eliminar esta primeira falha antes que ocorra uma segunda.

O uso de dispositivos de detecção e métodos de localização eficazes e a presença do pessoal da manutenção reativa reduz consideravelmente a probabilidade da “falha dupla”.

Além disso, atualmente existem dispositivos de controle que permitem monitorar a tempo a evolução da isolação das diferentes partidas, fazer uma previsão da falha e antecipar a manutenção da primeira falha.

Isto proporciona uma disponibilidade máxima e uma disponibilidade máxima possível com o esquema de aterramento IT.

■ Esquemas de aterramento TN e TT

Estes esquemas utilizam a seletividade no desligamento. Em TN, isto é adquirido através das proteções de curto-circuito, se o projeto de proteção da instalação tiver sido bem estudado (seletividade amperimétrica e cronométrica).

Em TT, é fácil a colocação em operação, pois os DDR permitem realizar uma seletividade amperimétrica e cronométrica.

Deve-se lembrar que em TN, há risco de o tempo de reparo, devido ao $\int i^2 dt$, ser mais importante do que em TT, o que influencia também na disponibilidade.

■ Para todos os esquemas de aterramento

Sempre é interessante prevenir as falhas de isolação, especialmente as falhas de isolação de certos motores antes de dar partida. Deve-se saber que 20% dos defeitos no motor são devidos a uma falha de isolação, que se manifesta na energização. De fato, uma perda de isolação, mesmo que pequena, em um motor quente que se resfria em um ambiente úmido (condensação) degenera em falha direta em uma nova partida, provocando por um lado desgastes importantes nos enrolamentos, por outro, uma perda de operação e até riscos maiores, pois trata-se de um motor para sistema de segurança (motor com bomba de evacuação das águas, incêndio, ventilador...).

A prevenção deste tipo de incidente pode ser feita, qualquer que seja o esquema das ligações de aterramento, por um Controlador Permanente de Isolação que supervisiona o receptor desenergizado. Na presença de uma falha, a partida é então impedida.

Para concluir este parágrafo, é claro que, para uma boa disponibilidade da energia, os esquemas de aterramento se classificam em uma ordem de preferência: IT, TT, TN.

Nota:

Se para necessidades de continuidade de serviço, a instalação possuir um grupo gerador ou um ASI - Alimentação Sem Interrupção - (ondulador), ao passar para a fonte de substituição, há risco de não funcionamento ou funcionamento tardio dos DPCC (Icc mais baixa - ver **fig. 17**).

Em TN e IT, para a segurança das pessoas e dos bens, é indispensável verificar se as condições de proteção continuam respeitadas (nível e tempo de funcionamento), sobretudo para as partidas longas. Se não for o caso, convém instalar DDR.

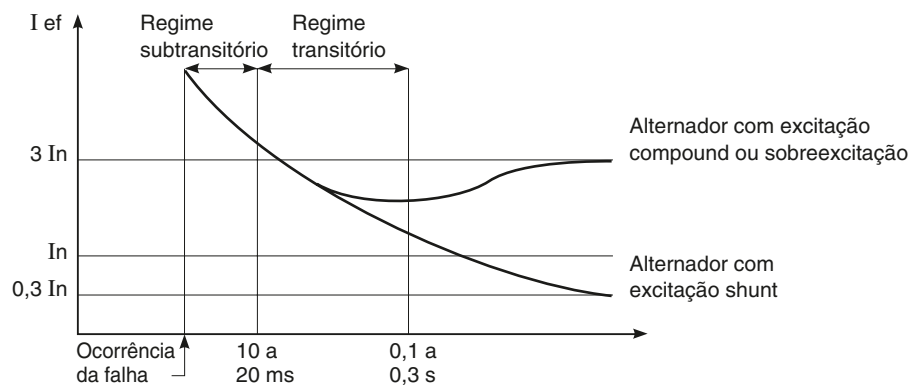


Fig. 17: estabelecimento de uma corrente de curto-circuito em uma rede alimentada por gerador de segurança a “diesel/alternador”.

4 Influências da MT na BT, segundo os esquemas de aterramento

As redes de BT, exceto na utilização de uma fonte de substituição sem interrupção (com isolamento galvânica) ou de um transformador BT/BT, estão sob a influência da MT.

Esta influência ocorre:

- por acoplamento capacitivo: transmissão de sobretensões dos enrolamentos de MT nos enrolamentos de BT,
- por acoplamento galvânico, no caso de arco entre os enrolamentos de MT e BT,
- por impedância comum, se os diversos aterramentos são ligados e que uma corrente da MT passa ao terra.

Isto ocasiona distúrbios em BT, freqüentemente sobretensões, cujos fenômenos gerados são incidentes em MT:

- relâmpago,
- sobretensões de operação,
- um arco entre MT e massa interno do transformador,
- um arco entre MT e BT interno do transformador.

Sua conseqüência mais freqüente é a destruição dos isolantes de baixa tensão, resultando em riscos de eletrização das pessoas e danos a materiais e equipamentos.

4.1 Relâmpago

Se a rede de MT for aérea, para limitar as conseqüências diretas ou indiretas dos raios, o distribuidor deve instalar pára-raios ZnO.

Colocados no último poste antes da subestação MT/BT, estes pára-raios limitam a sobretensão e descarregam a corrente de descarga do raio no terra (ver Cadernos Técnicos nº 151 e 168).

Uma onda do relâmpago é contudo transmitida, por efeito capacitivo entre os enrolamentos do transformador, aos condutores ativos BT. Pode atingir 10 kV pico. Mesmo que seja atenuada progressivamente pelas capacitâncias parasitas da rede em relação ao terra, é aconselhado

instalar limitadores de sobretensão (pára-raios) ZnO na origem da rede BT, qualquer que seja o esquema de aterramento (ver **fig. 18**).

Do mesmo modo, para evitar um acoplamento por impedância comum, é prudente nunca conectar ao aterramento do neutro de BT:

- os pára-raios de MT
 - os pára-raios instalados nos tetos dos imóveis
- Isto porque a corrente de descarga dos raios provocaria uma subida do potencial do PE e/ou do neutro de BT (risco de arco de retorno) e a perda da eficácia do aterramento por vitrificação.

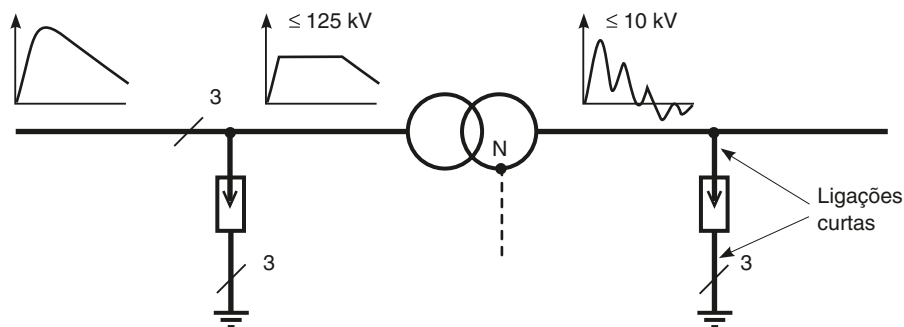


Fig. 18: limitação e transmissão das sobretensões de relâmpago (que o neutro esteja aterrado ou não, há sobretensões de modo comum nas fases).

4.2 As sobretensões de operação

Certos equipamentos de MT (por exemplo, os disjuntores a vácuo), ao serem operados, provocam sobretensões importantes (ver Caderno Técnico nº 143).

Contrariamente à descarga do raio, que é um distúrbio em modo comum (entre rede e terra), estas sobretensões são, em BT, distúrbios em

modo diferencial (entre condutores ativos). São transmitidas à rede de BT por acoplamento capacitivo e magnético.

Como qualquer fenômeno em modo diferencial, as sobretensões de operação não interferem, ou muito pouco, qualquer que seja o esquema das ligações de aterramento utilizado.

4.3 Arco entre MT e massa interno do transformador

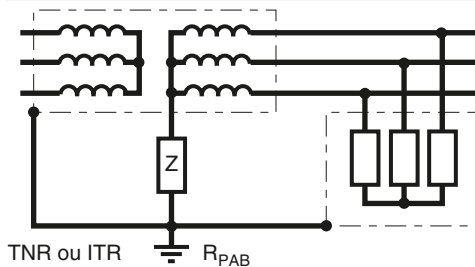
Quando ocorrer um arco entre a MT e o massa interno do transformador, e quando o massa do transformador e o neutro da instalação de BT estiverem ligados a um mesmo aterramento, uma corrente "homopolar" MT (cuja intensidade é função do esquema de aterramento-MT) poderá levar o massa do transformador e do neutro da instalação de BT a um potencial perigoso.

Conseqüentemente, o valor do aterramento do transformador condiciona diretamente a tensão de toque (igual à tensão de contato) na subestação $U_t \leq R_p I_{hMT}$ e a tensão de

resistência dielétrica dos equipamentos de BT da subestação $U_{tp} = R_p I_{hMT}$ (se o aterramento do neutro de BT for separado do aterramento da subestação).

O aterramento da subestação e o aterramento do neutro de BT não são geralmente ligados. Se estiverem, um limite é dado ao valor do aterramento comum para evitar a subida em potencial da rede de BT em relação ao terra profundo. A **figura 19** indica os valores do aterramento comum para os valores de I_{hMT} das redes públicas francesas, o leitor interessado

Esquemas (1)

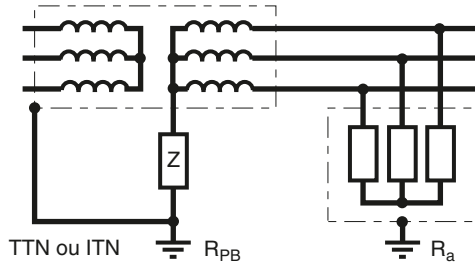


TNR ou ITR R_{PAB}

Resistência máxima da conexão de aterramento dos massas da subestação R_p (Ω)

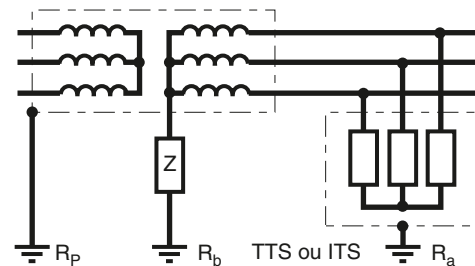
Sem valor estipulado, mas os seguintes valores permitem evitar uma elevação excessiva em potencial do conjunto

I_{hMT} (A)	R_{PAB} (Ω)
300	3 a 20
1000	1 a 10



TTN ou ITN R_{PB} R_a

I_{hMT} (A)	R_{PB} (Ω)
300	3
1000	1



R_P R_b TTS ou ITS R_a

U_{tp} (kV)	2	4	10
I_{hMT} (A)	R_P (Ω)		
300	4	8	20
1000	1	3	10

Z : ligação direta nos esquemas TN e TT

ligação por impedância ou isolada nos esquemas IT com presença de um éclateur

I_{hMT} : intensidade máxima da corrente de primeira falha monofásica a terra da rede de alta tensão que alimenta a subestação

U_{tp} : tensão de suportabilidade à frequência industrial dos materiais em baixa tensão da subestação

(1) a terceira letra dos esquemas das ligações a terra significa segundo a norma NF C-13100 que:

- todos os massas são ligados: R;
- o massa da subestação é ligado ao massa do Neutro: N;
- os aterramentos são Separados: S.

Fig. 19: resistência máxima da conexão de aterramento dos massas da subestação em função do esquema das ligações a terra da rede.

consultar a norma IEC 60384-4-442 que explica os riscos em função dos esquemas das ligações de aterramento de BT.

Para as redes públicas (exceto na Austrália e nos EUA, onde a corrente de falha pode ser muito elevada), os valores encontrados sempre são de 10 A na Irlanda (uma impedância compensa a corrente capacitiva) a 1000 A na França (redes subterrâneas) e na Grã Bretanha.

As redes de MT industriais são geralmente operadas em IT impedante, possuem uma corrente homopolar I_{hMT} de algumas dezenas de ampères (ver Caderno Técnico nº 62).

O valor máximo permitido da aterramento depende das condições da equipotencialidade dos massas da rede de BT, logo, de seu esquema das ligações de aterramento.

4.4 Um arco entre MT e BT interno do transformador

Para evitar que o nível do potencial em relação ao aterramento do rede de BT se eleve ao nível da tensão simples da rede de MT ao ocorrer um arco entre MT e BT interno do transformador, deve-se ligar a rede de BT ao terra.

Esta falha tem por consequência:

■ em TN

Toda a rede de BT, inclusive o PE, é submetida à tensão $I_{hMT} R_{pAB}$ ou R_{AB} .

Se esta sobretensão ultrapassar a resistência dielétrica da rede de BT (na prática, em torno de 1500 V), arcos em BT serão possíveis se a equipotencialidade de todos os massas, elétricos ou não, do edifício não for total.

■ em TT

Enquanto os massas dos receptores estiverem no potencial do terra profundo, toda a rede de BT será submetida a $I_{hMT} R_{pB}$ ou R_b : há um risco de arco “de retorno” dos receptores se a tensão desenvolvida no R_{pB} ou R_b ultrapassar sua resistência dielétrica.

■ em IT

A operação de um limitador de sobretensão, que entra em curto-circuito quando for atingida sua tensão de arco, cria assim um problema como o da rede TN (ou TT, se houver diversos aterramentos na aplicação).

Em todos os casos, o arcos entre MT e BT provocam esforços que podem ser severos para a instalação, assim como para os receptores de BT, se o valor de aterramento do neutro de BT não for controlado. O leitor interessado pode consultar a norma IEC 60364, que explica os riscos em função dos esquemas de aterramento.

O exemplo de distribuição pública aérea na França fornece resposta a uma situação onde os riscos de descarga de raios, de sobretensão de operação, de arcos entre MT e o massa do transformador e arcos entre MT e BT são presentes (ver **fig. 20**). Ele demonstra que a equipotencialidade de toda a distribuição (todos os massas de MT, os neutros e os massas da aplicação ligados) não é indispensável: cada risco é tratado separadamente.

Neste capítulo, foi descrita a influência da rede de MT e seus resultados são os seguintes:

- o interesse da utilização de pára-raios na origem da instalação de BT, qualquer que seja o esquema de aterramento, isto se a alimentação de MT e especialmente a de BT, for aérea;
- o fato de ligar o aterramento da subestação com o aterramento do neutro de BT, e até com o dos massas das aplicações, impõe esforços variáveis na rede de BT em função do esquema de aterramento MT (valor de I_h).

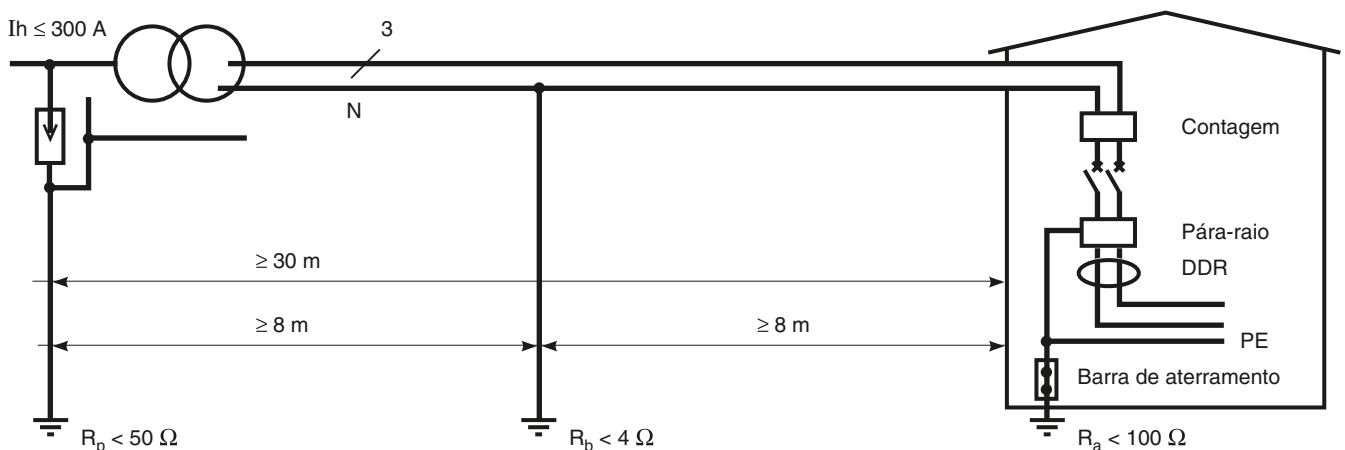


Fig. 20: distribuição de energia pública aérea rural na França.

5 Dispositivos ligados à escolha do esquema de aterramento

A escolha de um esquema de aterramento afeta não somente a **segurança** (no sentido amplo), como também a instalação, especialmente em relação ao equipamento a ser operado.

5.1 Aterramento do neutro - TN

Neste esquema, os DPCC (disjuntor ou fusíveis) fornecem proteção contra as falhas de isolamento, através do desligamento automático com tempo de interrupção máximo especificado (função da tensão simples U_0 : ver **fig. 9**).

■ Com disjuntor

O desligamento do disjuntor é realizado em um nível determinado pelo tipo bobina de disparo (ver **fig. 21**). Quando a corrente de falha ultrapassar o nível de disparo da proteção contra curtos-circuitos (em geral "instantâneo"), ocorre a abertura em um tempo claramente inferior ao tempo de interrupção máximo especificado, por exemplo, 5 s para os circuitos de distribuição (norma NF C 15-100 § 413.1.3.3) e 0,4 s para os circuitos terminais. Quando a impedância da fonte e dos cabos tiver um valor elevado, é necessário utilizar bobinas de disparo de nível baixo, ou então associar os DDR aos DPCC. Estes DDR podem ser relés diferenciais separados ou associados aos disjuntores (disjuntores diferenciais) de baixa sensibilidade. Seu nível deve ser:

$$I_{\Delta n} < \frac{0,8 U_0}{R_{ph} + R_{PE}}$$

A utilização de DDR tem a vantagem de tornar desnecessária a verificação da impedância de anel, vantagem especialmente interessante se foram feitas modificações ou expansões na instalação.

Esta última solução não é evidentemente aplicável a um esquema de aterramento tipo TN-C (se o condutor de proteção for o mesmo do condutor de neutro).

■ Com fusíveis

Os fusíveis utilizados para a proteção contra curtos-circuitos são do tipo gG. Suas características tempo/corrente (ver **fig. 22**) são definidas pelas normas (fusíveis domésticos: IEC 60241, fusíveis industriais: IEC 60269).

Verificar a adequação com o tempo de interrupção máximo especificado, que impõe assim uma validação individual dos calibres previstos para cada proteção. Se não for apropriada, deve-se reduzir a impedância do anel de falha (aumento das secções) ou substituir o fusível por um disjuntor de nível baixo ou por um disjuntor diferencial.

	Tipo de disparador	Nível de funcionamento
Residencial (EN 60898)	B	$3 I_n \leq I_a \leq 5 I_n$
	C	$I_n \leq I_a \leq 10 I_n$
	D	$10 I_n \leq I_a \leq 20 I_n$
Industrial (norma IEC 60947-2)	G (nível baixo)	$2 I_n \leq I_a \leq 5 I_n$
	D	$I_n \leq I_a \leq 10 I_n$
	MA (para partida de motor)	$6,3 I_n \leq I_a \leq 12,5 I_n$

Fig. 21: corrente de desligamento (magnético ou de curto retardo) dos disjuntores BT.

I_n gG (A)	I_{mín.} 10 s	I_{máx.} 5 s	I_{mín.} 0,1 s	I_{máx.} 0,1 s
63	160	320	450	820
80	215	425	610	110
100	290	580	820	1450

Fig. 22: exemplo dos limites dos níveis de funcionamento dos fusíveis (segundo a norma IEC 60269 § 5-6-3).

5.2 Neutro aterrado - TT

Com este esquema, o baixo valor das correntes de falha (ver capítulo anterior) não permite aos DPCC assegurar a proteção das pessoas contra os contatos indiretos. Deve-se utilizar os DDR associados a disjuntores (ver **fig. 23** e **24**) ou a interruptores (ver IEC 60364 - § 413.1.4.2 e NF C 15-100).

Estes dispositivos devem atender às normas, especialmente:

- IEC 60755: regras gerais
- IEC 61008: interruptores diferenciais “domésticos”

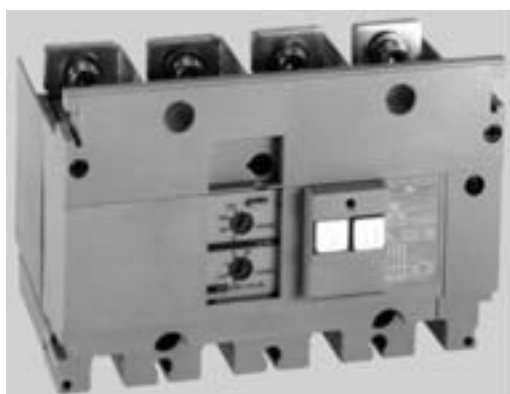


Fig. 23: bloco Vigi Compact NS.

- IEC 61009: DPCC diferencial “doméstico”
- IEC 60947-2: disjuntores diferenciais “industriais”.

Sua operação deve atender aos objetivos:

- de proteção das pessoas, isto é:
 - nível $I\Delta n \leq UL/R_a$,
 - tempo de interrupção $\leq 1s$;
- de continuidade de serviço com níveis e temporizações que permitem a seletividade amperimétrica e cronométrica
- de proteção contra incêndio com $I\Delta n \leq 500 \text{ mA}$.

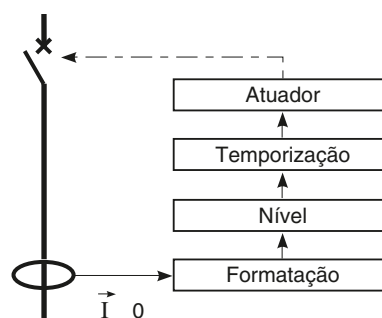


Fig. 24: esquema funcional de um DDR.

5.3 Neutro isolado ou impedante - IT

Deve-se lembrar que em caso de falha dupla, a segurança das pessoas é garantida pelos DPCC. Na primeira falha de isolamento, foi demonstrado por cálculo que não há perigo (tensão de contato bem inferior à tensão limite de segurança). A desenergização automática não é obrigatória: esta é a vantagem essencial deste esquema.

Para manter esta vantagem, as normas recomendam (IEC 60364 - § 413.1.5.4) ou impõem (NF C 15 -100) a instalação de um Controlador Permanente de Isolação – CPI, e a localização da primeira falha. Realmente, se uma segunda falha ocorrer, a interrupção automática é indispensável, pois há risco de eletrização: este é então o papel dos DPCC eventualmente associados ao DDR.

A localização da primeira falha para reparo (manutenção curativa) é consideravelmente facilitada pela utilização de um Dispositivo de Localização de Falha - DLF. Também é possível uma manutenção preventiva, baseada na monitoração (registro) das variações das impedâncias de isolamento de cada circuito.

As redes BT, operadas segundo o esquema IT, que têm sua origem em um transformador MT/BT, devem ser protegidas contra os riscos de falha de isolamento entre a MT e a BT por um “limitador de sobretensão”. Finalmente, para fixar o potencial da rede BT, em relação ao terra (rede curta alimentada por um transformador MT/BT), pode ser instalada uma impedância entre o neutro do transformador e o terra. Seu valor em 50 Hz, em torno de 1500 W, é muito elevado em corrente contínua e em baixíssima frequência para não obstruir a medição da isolamento e a localização da falha.

- Princípio de funcionamento dos CPI

Uma falha em um circuito, traduz-se na rede por uma redução da isolamento, mais exatamente, de resistência da rede em relação ao terra.

Na França, os CPI e os DLD devem atender à norma de fabricação UTE 63080.

A função do CPI é supervisionar o valor desta resistência. Funcionam normalmente por injeção de corrente alternada ou contínua entre a rede e o terra e por medição do valor desta corrente (ver **fig. 25**).

A injeção de corrente contínua permite conhecer permanentemente a resistência de isolamento da rede. Se esta resistência ficar abaixo de um nível pré-estabelecido, o CPI sinaliza a falha.

A injeção de corrente alternada de baixa frequência ($F \approx$ alguns Hertz) permite o controle da resistência de falha, mas com distorção devido à presença das capacitâncias de fuga da rede. Este inconveniente menor, visto a frequência de injeção, é compensado por uma vantagem em relação à localização da primeira falha (um único dispositivo de injeção).

Agora são disponíveis dispositivos de injeção de corrente de baixa frequência BF, que podem indicar separadamente a resistência e a reatância de isolamento da rede. Sua técnica permite, além disso, localizar a primeira falha sem abrir os circuitos e sem problema devido às partidas fortemente capacitivas.

■ Princípio de funcionamento dos DLD

A solução mais freqüentemente utilizada é injetar uma corrente identificável (com frequência diferente da rede). O gerador pode ser o CPI.

Isto pode ser realizado por meio de sensores magnéticos (transformadores toróides e/ou pinça amperimétrica) associados a um amplificador sintonizado na frequência da corrente injetada, monitorar seu percurso até o ponto da falha (ver **fig. 26**).

Finalmente, uma outra solução pode também ser utilizada. Ela consiste em comparar permanente-

mente e em cada partida, o valor de sua resistência com um valor de nível predefinido ou programável.

Esta última solução, informatizada, permite ao mesmo tempo, no local e a distância:

- sinalizar a primeira falha (CPI)
- em seguida, codificá-la (DLD) para reparo (manutenção curativa) (ver **fig. 27**)

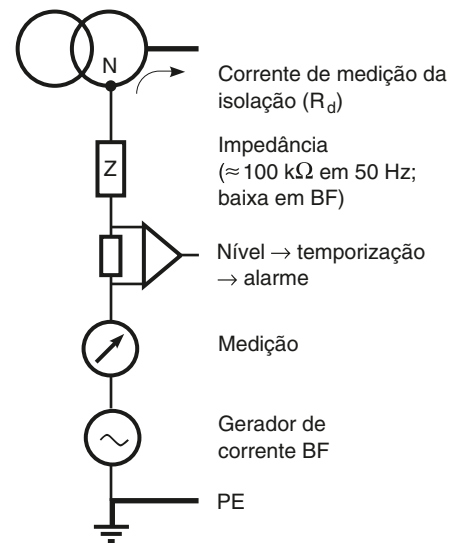


Fig. 25: esquema funcional de um controlador permanente de isolamento (CPI).

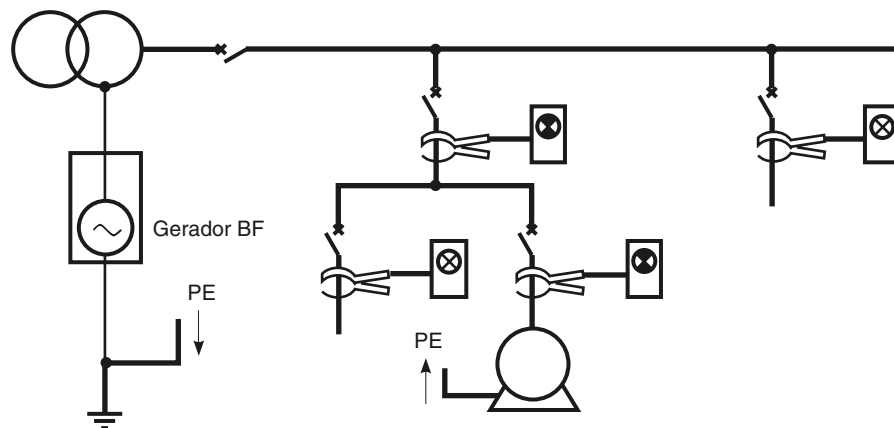


Fig. 26: localização da falha de isolamento por controle do trajeto de uma corrente de baixa frequência injetada na origem da instalação.

□ e conhecer a evolução da isolação ao tempo, partida a partida, para intervir nas partidas cuja isolação cai anormalmente (manutenção preventiva).

■ Limitadores de sobretensão (norma NF C 63-150)

São conectados entre um condutor ativo (neutro ou fase) da instalação e o terra.

Sua tensão de arco U_e deve então ser adaptada à montagem prevista, assim, para uma rede 230/400 V - 50 Hz, há dois modelos:

□ 250 V, para a conexão ao neutro ($400 \text{ V} < U_e \leq 750 \text{ V}$),

□ 400 V, para a conexão a uma fase ($700 \text{ V} < U_e \leq 1\ 100 \text{ V}$).

Seu objetivo é duplo:

□ limitar a tensão na rede BT na ocorrência de um arco entre MT/BT no transformador de distribuição. Neste caso, o limitador deve descarregar no terra a corrente "residual" da rede de MT,

□ limitar as sobretensões da descarga do raio. Isto é considerado em suas características, por exemplo, para o modelo 250 V:

- U_n : 250 V,

- U arco a 50 Hz: mín. 400 V, máx. 750 V,

- U arco segundo a onda 1,2/50 μs :

$\hat{u} < 1570 \text{ V}$,

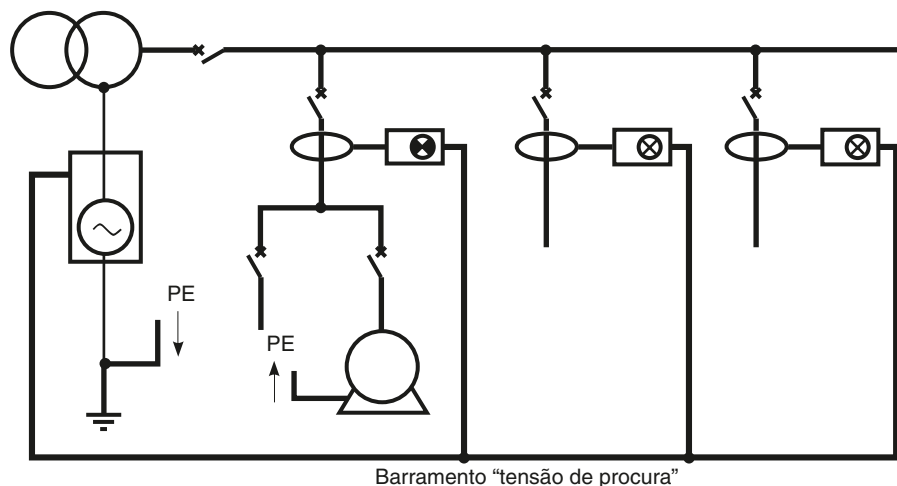
- \hat{i}_{raio} : 20 vezes 2 500 A (onda 8/20 μs) sem entrar em curto-circuito,

- $\hat{i}_{50 \text{ Hz}}$: 20000 A / 0,2 s,

5000 A / 5 s,

1200 A / 2 min.

Esta resistência à corrente de pico $\hat{i}_{50 \text{ Hz}}$ é maior que o valor da corrente "residual" da rede de MT. Isto deve-se ao fato de que um limitador que esteve em "arco" durante uma sobretensão elevada, pode permanecer em curto-circuito, deve ser ainda capaz de suportar uma corrente de curto-circuito de BT seguida de uma primeira falha de isolação da rede de BT protegida. Os limitadores comercializados com a marca Merlin Gerin, podem suportar 40 kA/0,2 s.



A passagem da corrente de procura nos condutores é detectada pelos sensores magnéticos (toróides). Cada receptor que contém um amplificador seletivo (ajustado na frequência e na fase da corrente de busca), calcula a resistência e a capacidade do circuito (com a tensão e a fase das quais ele obtém a referência por um barramento) e sinaliza a presença da falha.

Fig. 27: princípio de funcionamento de um DLD com medição de impedância em BF.

5.4 Proteção do neutro segunda o esquema de aterramento

O neutro deve ser cortado por um dispositivo multi-pólos:

■ em regime TT e TN, se a secção do neutro for inferior à secção das fases,

■ em distribuição terminal, visto o risco de inversão neutro/fase.

O neutro deve ser protegido e cortado:

■ em regime IT, para intervenção do dispositivo de proteção na falha dupla, uma das falhas podendo estar no neutro,

■ em regime TT e TN-S, se a secção do neutro for inferior à secção das fases,

■ qualquer que seja o esquema de aterramento, se a instalação produz correntes de harmônicos de faixa 3 e múltiplos (sobretudo se a secção do neutro for reduzida).

Em TN-C o neutro, que é também o PE, não pode ser cortado, porque é perigoso devido às suas variações de potencial provenientes das correntes de carga e das correntes de falha de isolação.

Para evitar os riscos, é necessário ter, para cada área/consumidor, uma equipotencialidade local e um aterramento.

A **figura 28** mostra os tipos de disjuntores que podem ser utilizados em função do esquema de aterramento. Deve-se observar que os esquemas de aterramento TT e TN podem utilizar os mesmos dispositivos (com bloco diferencial em TT adicional).

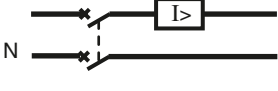
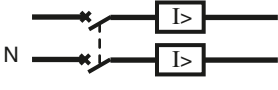
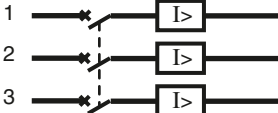
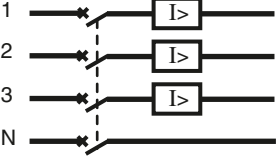
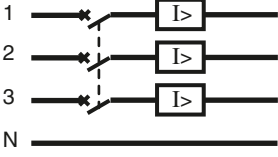
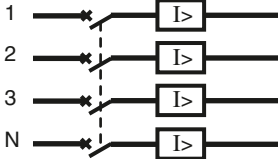
Circuitos	Esquemas			
	TN-C	TN-S	TT	IT
Circuitos monofásicos				
Circuitos monofásicos com proteção unipolar	não	sim	sim	não
 Disjuntor bipolar (1 pólo protegido, 2 pólos interrompidos)				
Circuitos monofásicos com proteção bipolar	não	sim	sim	sim
 Disjuntor bipolar (com 2 pólos protegidos)				
Circuitos trifásicos sem neutro				
Com proteção bipolar	sim	sim	sim	sim
 Disjuntor tripolar				
Circuitos trifásicos com neutro				
Sem detecção de sobrecorrente no neutro	não	sim	sim	não
 Disjuntor tetrapolar com 3 pólos protegidos				
 Disjuntor tripolar	sim	sim	sim	não
Com detecção de sobrecorrente no neutro	não	sim	sim	sim
 Disjuntor tetrapolar com 4 pólos protegidos				

Fig. 28: utilização dos disjuntores segundo os SLT.

6 Escolha do esquema de aterramento e conclusão

Os três esquemas das ligações de aterramento mundialmente utilizados e normalizados pela IEC 60364 têm como objetivo comum a busca da melhor **segurança**.

Com relação à proteção das pessoas, os três esquemas são equivalentes, se todas as regras de instalação e operação forem respeitadas. Dadas as características específicas de cada esquema, não se pode fazer uma escolha a priori.

Esta escolha deve resultar de um projeto entre o usuário e o projetista da rede (instalador, empresa de engenharia...) sobre:

- as características da instalação,
- as condições e requerimentos de operação.

Seria ilusório querer instalar uma rede com neutro isolado em uma parte da instalação que, por natureza, possui um nível de isolamento baixo (alguns milhares de ohms): instalações antigas, estendidas, com linhas externas...

Da mesma forma, seria contraditório, em uma indústria onde a continuidade de serviço ou de produtividade é imperativa e os riscos de incêndio elevados, escolher uma operação com aterramento do neutro.

6.1 Metodologia de escolha do esquema de aterramento

■ Inicialmente, **não esquecer que os três esquemas de aterramento** podem coexistir em uma mesma instalação elétrica, o que é uma garantia para obter a melhor resposta às necessidades de segurança e de disponibilidade.

■ Em seguida, **assegurar-se que a escolha não seja recomendada ou imposta** por normas ou a legislação (decretos, decisões ministeriais).

■ Depois **dialogar com o usuário** para conhecer suas exigências e seus recursos:

- necessidade de continuidade de serviço,
- serviço com ou sem manutenção,
- risco de incêndio.

Globalmente:

- continuidade de serviço, com serviço de manutenção: a solução é o IT,
 - continuidade de serviço, sem serviço de manutenção: sem solução totalmente satisfatória; preferir o TT, pois a seletividade no desligamento torna mais fácil a colocação em operação e reduz os desgastes em relação ao TN.
- As expansões são simples de serem realizadas (sem cálculo).

□ continuidade de serviço não essencial e serviço de manutenção competente: preferir o TN-S (reparo e expansões rápidas e executadas segundo as regras),

□ continuidade de serviço não essencial e sem serviço de manutenção: preferir o TT,

□ risco de incêndio: IT, se serviço de manutenção e utilização de DDR 0,5 A ou TT.

■ considerar a especificidade da rede e dos receptores:

□ rede muito longa ou corrente de fuga elevada: preferir o TN-S,

□ utilização de fontes de substituição ou de segurança: preferir o TT,

□ receptores sensíveis às correntes elevadas de falha (motores): preferir o TT ou IT,

□ receptores com isolamento baixa natural (fornos) ou com filtro AF importante (computadores de grande porte): preferir o TN-S,

□ alimentação dos sistemas de controle-comando: preferir o IT (continuidade de serviço) ou o TT (melhor equipotencialidade dos dispositivos comunicantes).

6.2 Conclusão

A melhor escolha, com um único esquema de aterramento não existe, convém então, em diversos casos, instalar diversos esquemas das ligações de aterramento em uma mesma instalação.

Como regra, uma instalação distribuída, distinguindo bem os prioritários dos não prioritários, utilizando fontes de emergência ou alimentações sem interrupção, é preferível a uma instalação monolítica arborescente.

O objetivo deste Caderno Técnico é ampliar seu conhecimento a respeito dos esquemas de aterramento. Esperamos que ele lhe permita otimizar a **segurança** de suas instalações.

O Caderno Técnico nº 173, que proporciona uma melhor compreensão da utilização de esquemas de aterramento no mundo e sobre sua evolução, completando de maneira útil sua informação.

Assinalamos finalmente que o manual de instalação elétrica, editado em 1991 pela Merlin Gerin, seguido da publicação da nova norma NF C 15-100, pode ser de grande utilidade para a instalação prática dos regimes do neutro.

Este manual é disponível também no idioma inglês, e está em concordância com a norma IEC 60364.

7. bibliografia

Normas e decretos

- IEC 60241: Seccionadores com base fusíveis para uso doméstico ou similar.
- IEC 60269: Fusíveis de baixa tensão.
- IEC 60364: Instalações elétricas dos edifícios.
- IEC 60479: Efeitos da corrente que atravessa o corpo humano.
- IEC 60755: Regras gerais para os dispositivos de proteção com corrente diferencial residual.
- IEC 60947-2: Aparelhagem de Baixa Tensão - 2ª parte: Disjuntores.
- NF C 15-100: Instalações elétricas de baixa tensão.
- NF C 63-150: Limitadores de sobretensão: regras.
- NF C 63-080: Dispositivos de controle permanente da isolação e dispositivos de localização de falhas associados.
- Decreto francês de 14.11.88

Cadernos Técnicos

- Aterramento do neutro em rede industrial de AT, Caderno Técnico nº 62
F. SAUTRIAU
- Os dispositivos diferenciais residuais de BT, Caderno Técnico nº 114
R. CALVAS
- Proteção das pessoas e alimentações estáticas sem interrupção, Caderno Técnico nº 129
J.-N. FIORINA
- Os distúrbios elétricos de BT, Caderno Técnico nº 141
R. CALVAS

- Introdução do conceito de segurança, Caderno Técnico nº 144
P. BONNEFOI

- Sobretensões e coordenação da isolação em AT, Caderno Técnico nº 151
D. FULCHIRON

- As descargas por raio e as instalações elétricas de AT, Caderno Técnico nº 168
B. DE METZ NOBLAT

- Os esquemas das ligações de aterramento no mundo e evoluções, Caderno Técnico nº 173
B. LACROIX et R. CALVAS

- Conhecimentos e utilização do esquema das ligações de aterramento com neutro isolado, Caderno Técnico nº 178 (edição 1998)

Publicações diversas

- Manual de instalação elétrica (parte G) Ed. FRANCE IMPRESSION CONSEIL 1991.
- Manual de instalação elétrica (seção G) Instituto Schneider de formação (1996).
- Manual de engenharia elétrica Ed. ELECTRA 1986.
- Electrical Review novembro de 1991 - outubro de 1992.
- A proteção diferencial Caderno Técnico J3E - 02/90

Contate-nos:

Tel.: 0800 789 110 - Fax: 0800 789 111

e-mail: schneider.br@br.schneider-electric.com

www.schneider-electric.com.br

Schneider Electric Brasil Ltda.

Contatos comerciais: São Paulo (SP): Tel.: (0--11) 5524-5233 - Fax: (0--11) 5522-4354 - Ribeirão Preto (SP): Tel.: (0--16) 620-6212 - Fax: (0--16) 620-8

Rio de Janeiro (RJ): Tel.: (0--21) 2509-5857 - Fax: (0--21) 2509-3520 - Belo Horizonte (MG): Tel.: (0--31) 3261-8668 - Fax: (0--31) 3262-0071 - Goiânia (GO): Tel./Fax: (0--62) 515-3010 - Curitiba (PR): Tel.: (0--41) 2101-1299 - Fax: (0--41) 2101-1276 - Fortaleza (CE): Tel.: (0--85) 3244-3748 - Fax: (0--85) 3244-3684 Joinville (SC): Tel./Fax: (0--47) 433-6455 - (0--47) 422-4392 - Porto Alegre (RS): Tels.: (0--51) 3342-2512 e 3342-2655 - Fax: (0--51) 3342-

As informações contidas neste documento estão sujeitas a alterações técnicas sem prévio aviso. 9

P.124.00-12/04