

# Isolamento eléctrico

Hermínio Duarte-Ramos  
DEE / FCT / UNL

## 1. Introdução

Nas instalações de baixa tensão, à tensão estipulada de 230 V / 400 V, o nível de isolamento eléctrico deve ser mantido acima do valor limite mínimo, sob pena de se criar condições de risco para as pessoas utilizadoras dos sistemas eléctricos, particularmente as que manipulam equipamentos a operar com defeito de isolamento. Então, pode ocorrer um contacto indirecto, com consequências prejudiciais.

Por isso, os sistemas de baixa tensão, constituídos por equipamentos consumidores de energia eléctrica e circuitos alimentadores a partir de um quadro eléctrico, devem ser providos de dispositivos de protecção contra falhas de isolamento, que reajam às chamadas correntes diferenciais residuais e provoquem a desconexão daqueles circuitos quando se atingir o limiar de disparo, por intermédio de aparelhos de corte.

É esta problemática, fundamental à engenharia de segurança, que aqui se trata nos seus aspectos teóricos e práticos básicos. Para fazer esse tratamento usa-se uma linguagem própria, que convém conhecer claramente de antemão.

## 2. Questões de terminologia

Por razões de clarificação dos conceitos usados abordam-se algumas ideias gerais, que muitas vezes se confundem por deficiente interpretação dos termos técnicos. Para o efeito seguem-se as definições actuais da Comissão Electrotécnica Internacional, repartindo a análise nos dois aspectos de materiais e de qualidade.

### 2.1. Terminologia de materiais

Chama-se **material isolante** (*insulating material*) ou simplesmente

**isolante** a um sólido de fraca condutividade eléctrica, a qual se considera praticamente desprezável, utilizado para separar partes condutoras a diferentes potenciais eléctricos. É um conceito genérico, mas que exclui os isolantes líquidos e os isolantes gasoso. Exemplo: PVC (policloreto de vinilo).

Diz-se **isolação eléctrica** (*electrical insulation*) ou apenas **isolação** quando se refere a parte de um produto electrotécnico (condutor, dispositivo, aparelho ou equipamento) que separa partes condutoras a diferentes potenciais eléctricos. Corresponde à realização concreta do isolamento eléctrico por meio de materiais isolantes. Exemplo: um cabo monocondutor tipo V tem isolação eléctrica construída por PVC à volta do condutor.

Designa-se **isolamento eléctrico** (*electrical insulation*) ou só **isolamento** ao estado de separação de partes condutoras a diferentes potenciais eléctricos, caracterizado pelas propriedades adquiridas por um condutor através da isolação. Exemplo: um cabo eléctrico tem isolação com espessura suficiente para oferecer boas propriedades de funcionamento aos condutores do cabo, ou seja, bom isolamento.

Denomina-se **nível de isolamento** (*insulation level*) à tensão de ensaio que a isolação deve suportar, em condições específicas. Exemplo: num cabo tipo V para baixa tensão a espessura isolante de PVC deve garantir um nível de isolamento até 1000 V.

Considera-se **resistência de isolamento** (*insulation resistance*) o valor da resistência medido, em condições especificadas, entre dois corpos condutores separados por materiais isolantes. Geralmente um desses corpos condutores é a terra.

Ainda interessa atender à **corrente de fuga** (*leakage current*) definida pela corrente que flui das partes activas (fa-

ses e neutro num sistema trifásico) para a terra, num caminho diferente do desejado, devido a um isolamento imperfeito e na ausência de qualquer avaria.

Como dispositivo, um **isolador** (*insulator*) destina-se a isolar electricamente e a manter mecanicamente um condutor submetido a um dado potencial eléctrico.

### 2.2. Terminologia de qualidade

Um **defeito** (*defect*) é qualquer imperfeição de um material que afecta o desempenho normal, mais ou menos conforme a extensão lesiva. Exemplo: golpe numa isolação ou quebra duma mola por acção mecânica. Acontece muito por desgaste de peças móveis ou pela acumulação de poeiras. A reparação dos defeitos, eliminando as lesões verificadas, repõe as condições de desempenho normal. Mas há defeitos naturais, consequentes de imperfeições estruturais, como a existência de electrões livres na banda de condução num material isolante, que dão origem à corrente de fuga.

Uma **falha** (*failure*) define-se pela cessão da aptidão para cumprir uma determinada função. Trata-se de um acontecimento, que ocorre num dado instante. Geralmente resulta de um defeito existente, permanente ou temporário. Após uma falha é frequente ficar-se no estado de avaria, se o defeito persistir com condições graves, mas na ocorrência de um defeito temporário ou instantâneo tal não acontece (o que justifica a técnica de religação dos disjuntores de alta tensão).

Uma **avaría** (*fault*) corresponde a um estado caracterizado pela inaptidão para desempenhar uma determinada função. Nesta noção, evidentemente, exclui-se a inaptidão durante a manutenção preventiva ou outras acções programadas, ou devido à falta de meios

externos. A avaria costuma resultar de uma falha, mas pode existir sem falha prévia.

A título exemplificativo, relacionando todos estes conceitos, pode-se dizer que um defeito num isolante (acumulação de poeiras na porcelana de um isolador) pode dar origem a uma falha (contornamento do isolador por um arco eléctrico) que dá lugar a uma avaria (rotura do isolador de porcelana).

### 3. Dispositivos diferenciais

Um **dispositivo diferencial** tem por objectivo essencial detectar a presença de uma corrente de fuga à terra para além de um valor limite. Associa-se a um aparelho de corte, para limitar a duração da falha, constituindo no conjunto um disjuntor diferencial, se este tiver poder de corte em curto-circuito, ou simplesmente um interruptor diferencial, caso isso não se verifique (Fig. 1).

Sob o ponto de vista conceptual, o dispositivo diferencial é formado por um toro magnético que envolve todos os condutores activos da rede trifásica a proteger, ou seja, os condutores das três

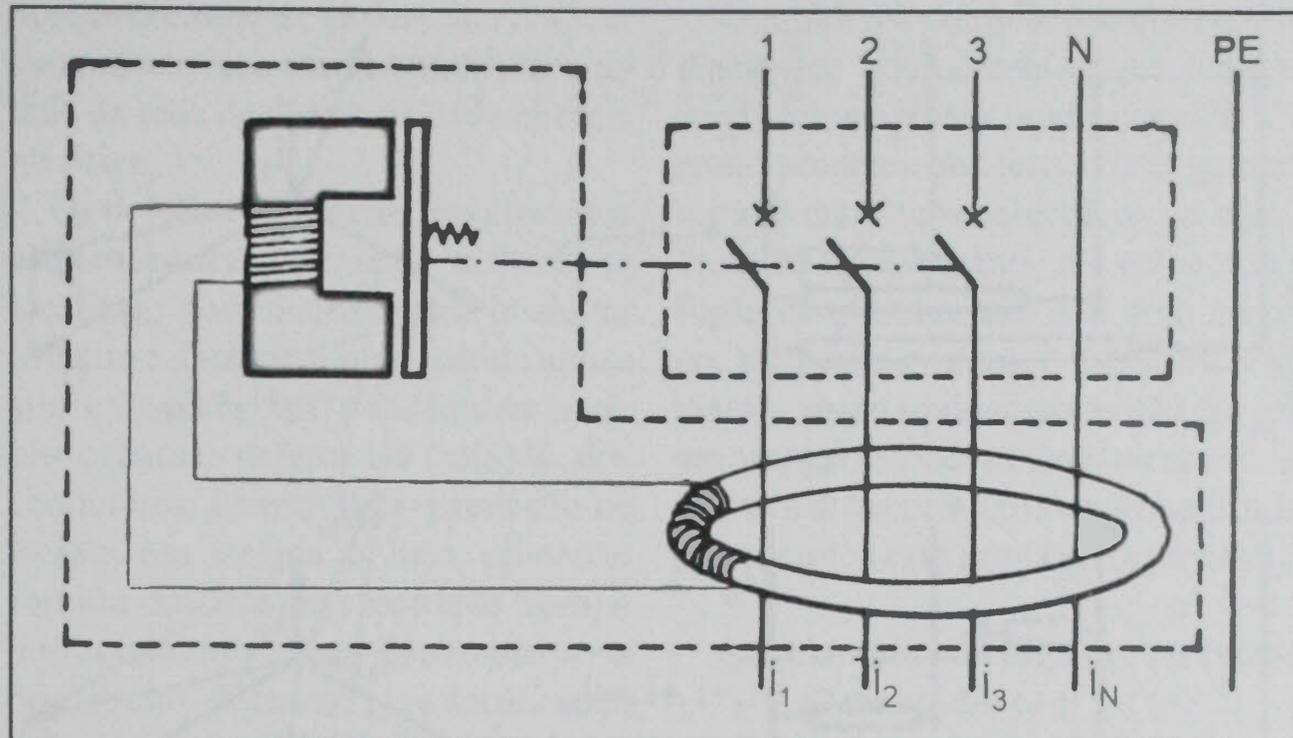


Fig. 2 - Esquema de princípio de um disjuntor diferencial.

fases e neutro, deixando de fora o condutor de protecção (Fig. 2). Uma bobina de medição, enrolada à volta do toro com fio fino, alimenta um relé que faz actuar o componente de interrupção do circuito trifásico.

Enquanto o circuito funciona em condições normais, sem ocorrência de falha à terra, a soma vectorial dos fasores das correntes nas três fases e no neutro é sempre nula, mesmo com cargas desequilibradas. De facto, nessas condições obtém-se  $I_1 + I_2 + I_3 + I_N = 0$  (Fig. 3a).

Quando ocorre um defeito de isolamento que põe um dos condutores activos mais ou menos em contacto com a terra, a soma fasorial de todas as correntes que passam pelo interior do circuito magnético deixa de ser nula, porque uma fracção da corrente na fase defeituosa passa para a terra sem retornar pelo neutro (Fig. 3b). Tudo corresponde ao aparecimento de uma **corrente diferencial residual**  $I_{\Delta} = I_1 + I_2 + I_3 + I_N$ , sendo  $I_2$  a nova corrente na fase defeituosa que atravessa o circuito magnético.

Deste modo, surge um fluxo magnético no toro, a bobina enrolada à volta do circuito magnético será sede de uma tensão induzida, que alimenta um relé electromagnético, o qual provoca o accionamento de abertura do aparelho de corte da corrente nas três fases.

Na prática existe sempre uma ínfima corrente de fuga num circuito eléctrico e portanto a existência de uma corrente diferencial residual. Não seria, porém, razoável impedir a operação desse circuito enquanto não fosse sede de uma fuga suspeita de perigo. Por isso, um dispositivo diferencial é regulado para operar a partir de um certo valor limite da corrente de fuga, definindo a **corrente diferencial residual nominal**  $I_{\Delta n}$  do dispositivo.

São valores normais de  $I_{\Delta n}$ :

- 10 mA em instalações que exijam grande sensibilidade aos defeitos de isolamento, como nas instalações hospitalares;

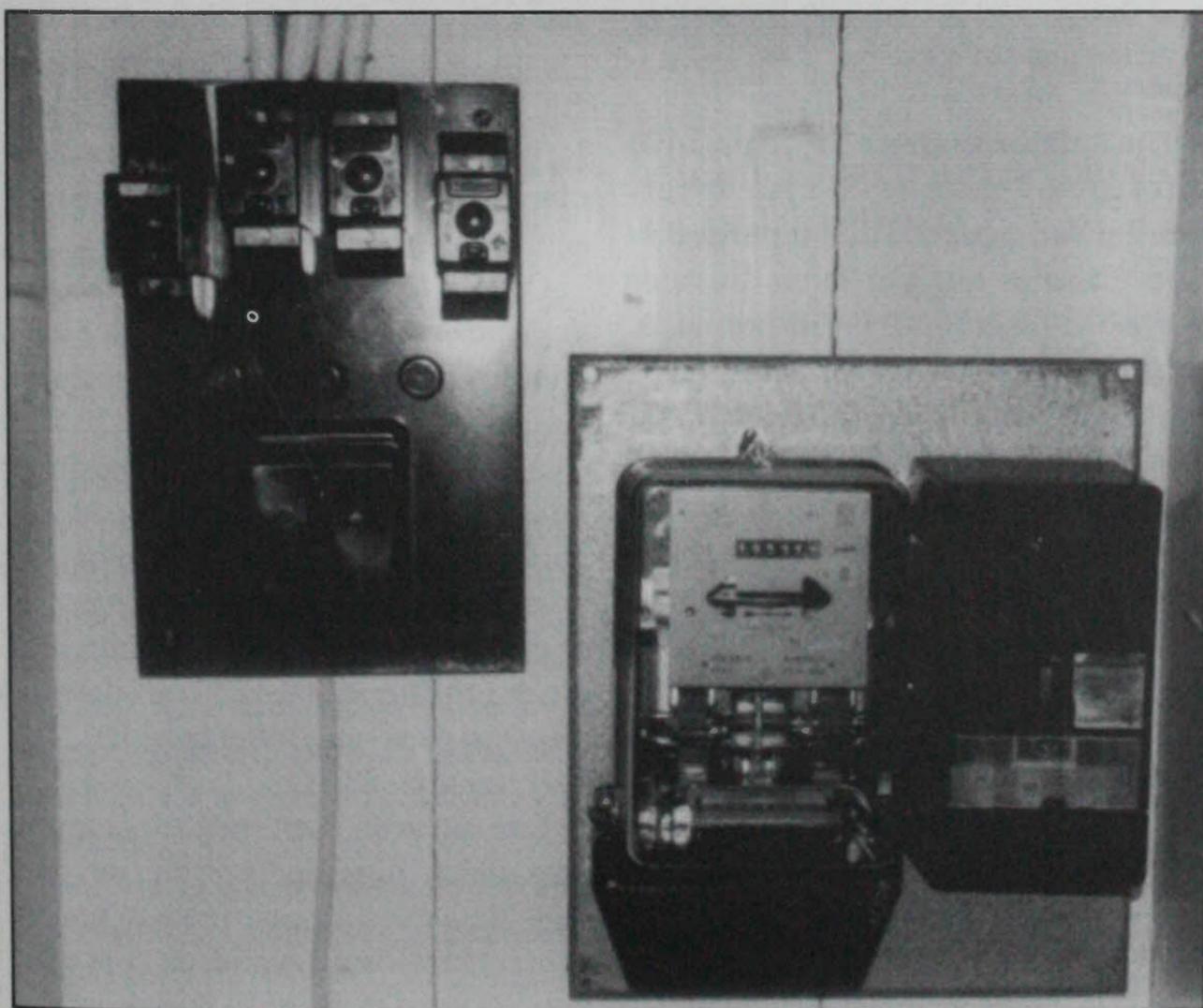


Fig. 1 - Quadro eléctrico de uma habitação. Da direita para a esquerda: disjuntor diferencial, contador e interruptor geral sob os disjuntores dos circuitos de distribuição.

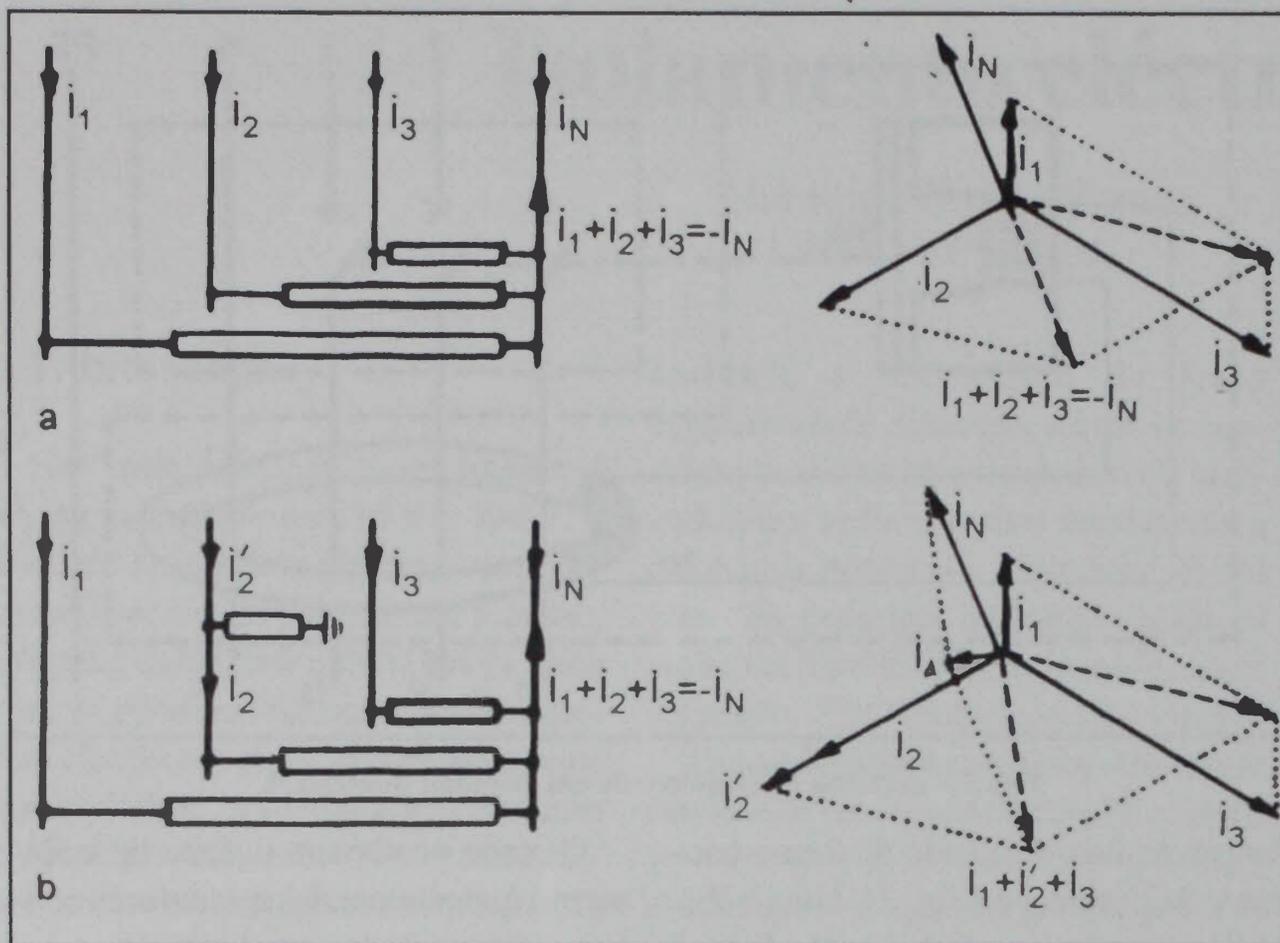


Fig. 3 - Funcionamento trifásico: esquema em cargas desequilibradas (à esquerda) e esquema fasorial (à direita).

a) Funcionamento normal (sem defeito):  $\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{I}_N = 0$ .

b) Funcionamento com defeito numa fase (fase 2):  $\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{I}_N = \dot{I}_\Delta$ .

- 30 mA nas instalações domésticas, onde as pessoas contactam com muitos e variados equipamentos electrodomésticos, susceptíveis de defeitos de isolamento durante a operação, pondo essas pessoas em perigo de contactos indirectos;
- 100 mA para instalações de serviços, como escritórios onde seja menos perigosa a ocorrência de contactos indirectos;
- 300 mA nas instalações industriais, que podem operar com maiores correntes de fuga sem perigo para pessoas.

Estas indicações são obviamente meras referências genéricas, pois a sensibilidade dos dispositivos diferenciais depende da segurança que as aplicações exigirem.

#### 4. Disparo dos dispositivos diferenciais

A acção de disparo de um dispositivo diferencial, pelo aparecimento de uma corrente diferencial residual que atinge o valor limite em que se dá a actuação,

pode ocorrer por duas causas de naturezas diferentes:

- defeitos electromecânicos do próprio aparelho;
- defeitos de isolamento dos circuitos que protege.

Um **defeito eléctrico do dispositivo diferencial** deve-se a uma hipersensibilidade, quando a corrente de disparo é menor que um terço do valor nominal do aparelho. Haverá, portanto, que efectuar uma conveniente regulação das condições de disparo do dispositivo.

Um **defeito mecânico do dispositivo diferencial** pode resultar do desgaste dos órgãos móveis. Note-se que a fixação destes órgãos, por acumulação de poeira em massa lubrificante, dificulta o respectivo disparo, forçando a acção de protecção para intensidades de correntes diferencial residual superiores ao valor limite mínimo, que é inconveniente sob o ponto de vista da segurança.

Em geral, os disparos dos dispositivos diferenciais dão-se por **defeito de isolamento**, que originam correntes de

fuga mais ou menos distribuídas por diversos locais, donde resulta uma corrente diferencial residual com intensidade na gama de disparo do respectivo dispositivo. As fugas de corrente associadas a estes defeitos da isolação à terra são devidas aos equipamentos consumidores e aos circuitos que os alimentam, tendo um caracter permanente ou aleatório consoante as suas ocorrências no tempo.

#### 5. Temporalidade dos defeitos de isolamento

No que respeita ao tempo em que se manifestam os defeitos de isolamento distinguem-se as situações permanentes e as aleatórias.

##### 5.1. Defeitos de isolamento permanentes

No caso de defeitos permanentes de isolamento eléctrico, em que o sistema opera normalmente sem perigo, incluindo os equipamentos e os circuitos alimentadores, pode-se medir a corrente de fuga actual, com o circuito desligado, através de um medidor de isolamento, que funciona sob a tensão de 500 V para instalações domésticas e a 1000 V nas instalações industriais. Daí obtém-se a resistência de isolamento actual da respectiva instalação.

O **valor limite teórico do isolamento de disparo** de um sistema define-se pela relação entre a sua tensão estipulada de alimentação, convencionado a 230 V, e o valor limite de disparo do dispositivo diferencial, que se convencionou ser igual a um terço do valor nominal do diferencial. Por exemplo, a protecção de um circuito monofásico por intermédio de um diferencial de 30 mA deveria disparar para um isolamento de  $230/0,01$ , ou seja, 23 kΩ.

Esta situação corresponde a admitir uma única fuga de corrente na fase considerada. Tal restrição é pouco consentânea com a realidade concreta, pois em geral existem diversas possibilidades de fuga nos circuitos extensos. Por isso, na prática admite-se antes um

**valor limite do isolamento de disparo** que é dez vezes superior ao teórico, isto é 230 kΩ para um diferencial de 30 mA. Daqui conclui-se que a resistência de isolamento não deve ser inferior a 1000 Ω por volt da tensão estipulada da instalação.

Acontece, todavia, que na baixa tensão se admite a tolerância de  $\pm 10\%$  à volta do valor estipulado, pelo que os consumidores mais próximos do transformador de alimentação recebem 253 V. Isto justifica que as normas determinem a resistência de isolamento mínima de 250 kΩ para a sensibilidade de 30 mA. Note-se que se subentende uma extensão máxima de 100 m para as canalizações eléctricas.

Por idêntico raciocínio, nos diferenciais mais sensíveis estabelece-se uma resistência de isolamento de 750 kΩ, pois com o valor limite da corrente de fuga igual a  $0,01/3 = 0,033$  mA calcula-se  $253/0,033 = 759$  kΩ.

## 5.2. Defeitos de isolamento aleatórios

Se os defeitos de isolamento ocorrerem fortuitamente, a questão complica-se. Nesta análise convém distinguir os dois casos dos equipamentos consumidores e dos circuitos alimentadores.

Os **defeitos aleatórios nos equipamentos** têm efeitos semelhantes aos defeitos permanentes, excluindo defeitos efémeros de curto-circuito por disrupção geralmente fase-terra, mas podem decalar-se no tempo após a conexão do equipamento ao circuito alimentador. Nos equipamentos que funcionam por ciclos de programação, como acontece nas máquinas de lavar, alguns defeitos são permanentes mas escondidos, porque os respectivos condutores só conectam com a alimentação durante certos períodos de operação. Assim, a fuga numa máquina de lavar pode originar o disparo do diferencial ao fim de várias dezenas de minutos de utilização.

Note-se que determinados defeitos permanentes nos equipamentos podem não ser acessíveis à medição se houver componentes electrónicos que só sejam activos sob a tensão de alimentação,

porque o ensaio de isolamento realiza-se com o circuito alimentador desconectado da rede de distribuição de energia eléctrica.

Os **defeitos aleatórios nos circuitos alimentadores** são mais difíceis de localizar, pois ocorrem em qualquer instante e num lugar qualquer de toda a sua extensão, em consequência de um eventual defeito na isolação dos condutores. Exemplifica a redução de isolamento devida a uma dilatação fortuita dos fios pela corrente normal nos condutores numa determina zona do circuito eléctrico, cuja localização é na verdade difícil. Tal ocorrência agrava-se no decurso do tempo, tornando-se num defeito permanente, na sequência de descargas parciais nas cavidades formadas, que conduzem à deterioração progressiva dos materiais isolantes na vizinhança, provocando uma diminuição da resistência de isolamento.

A humidade responsabiliza-se pela maioria dos agravamentos de isolamento nos circuitos eléctricos, sobretudo nas partes nuas dos condutores, que estão mais sujeitas às variações atmosféricas. Tais defeitos são aleatórios mas não efémeros, e por conseguinte podem ser observados criteriosamente.

## 6. Localidade dos defeitos de isolamento

As fugas de corrente nos sistemas de baixa tensão dão-se nos equipamentos consumidores de energia eléctrica e ao longo dos condutores de alimentação.

### 6.1. Corrente de fuga nos equipamentos consumidores

Os equipamentos eléctricos são construídos admitindo uma corrente de fuga normal máxima de 1 mA por quilo-watt instalado à temperatura de 25 °C. Por isso, a carga de um circuito protegido com um dispositivo diferencial de 30 mA tem que se limitar a 12 kW, para que o disparo possa ocorrer um pouco acima de um terço da corrente nominal do dispositivo.

O problema complica-se com resistências de equipamentos que funcionam a temperaturas superiores a 25 °C, como acontece nos ferros de engomar, torradeiras, fogões eléctricos ou cilindros de água quente. As respectivas fugas de corrente não são dominadas em operação normal. Nestas circunstâncias, esses equipamentos não devem ser protegidos todos com o mesmo dispositivo diferencial, convindo reparti-los por circuitos com protecção individual.

### 6.2. Corrente de fuga nos circuitos alimentadores

Os condutores dos circuitos de alimentação, mais ou menos extensos conforme o local dos equipamentos receptores relativamente ao quadro eléctrico onde se encontra o dispositivo diferencial de protecção, originam genericamente três tipos de corrente de fuga:

- **corrente de fuga capacitiva:** devida à capacidade entre os condutores e a terra, varia em função do número de condutores isolados e do espaçamento entre si;
- **corrente de fuga indutiva:** causada por uma eventual indutividade consequente do percurso dos condutores onde circula a corrente eléctrica;
- **corrente de fuga resistiva:** criada pela deficiente qualidade da isolação dos condutores, aumenta com a sua imperfeição dieléctrica e maus contactos nas conexões dos condutores.

Nas instalações eléctricas devem ser praticadas condições de montagem que evitem inconvenientes: estender os cabos devidamente afastados e sem enrolamento, tomando especial cuidado nas conexões, de modo a evitar deficiências na isolação. Em geral, estas correntes de fuga, adicionadas fasorialmente, determinam intensidades muito fracas nas instalações bem executadas. No entanto o agravamento das correntes de fuga resistivas por defeitos de isolamento dão lugar a falhas de isolamento que os dispositivos diferenci-

ais contabilizam segundo a sua sensibilidade.

A corrente de fuga num **condutor activo** (fase ou neutro) avalia-se pela relação entre a sua tensão estipulada, e respectiva tolerância para maior rigor, em relação à terra e a resistência de isolamento. Assim, será rigoroso o cálculo nos condutores das fases, porque se conhece a tensão aplicada e mede-se resistência de isolamento do respectivo circuito. Dito de outra maneira, os defeitos das fases permitem definir a falha de isolamento correspondente ao limiar de isolamento que provoca o disparo do dispositivo diferencial.

No **condutor neutro**, porém, o potencial eléctrico anda muito próximo de zero, atingindo alguns volts consoante o desequilíbrio de cargas ocasional nas três fases. Deste modo, mesmo um curto-circuito franco neutro-terra com o sistema em serviço pode não originar o disparo do diferencial. Por exemplo, a impedância de disparo dum diferencial de 30 mA é teoricamente de 23 k $\Omega$  sob 230 V. Com a tensão do neutro de 1 V a impedância de disparo para uma fuga no neutro é 230 vezes mais fraca, ou

seja, 100  $\Omega$ . Assim, em condições de funcionamento normal a fuga no neutro não terá qualquer consequência no diferencial, porque se adopta uma resistência de isolamento para o neutro de 250 k $\Omega$  como limiar de disparo, exactamente como para as fases.

## 7. Conclusões

O isolamento eléctrico nas instalações de baixa tensão é importante sob o ponto de vista da segurança das pessoas. Quando a degradação das isolações provocar uma corrente de fuga inadmissível, que põe em perigo as pessoas pela possibilidade de contactos indirectos, o respectivo dispositivo diferencial deve actuar, dando ordem de desconexão do circuito eléctrico.

Nesta problemática procurou-se sistematizar, como conhecimento de fundo, o que realmente se entende por isolante, isolação e isolamento, por um lado, e, por outro lado, quais as diferenças conceptuais entre defeito, falha e avaria.

Descreveu-se a técnica de protecção contra falhas de isolamento, através do princípio de funcionamento de um dispositivo diferencial, definição da sua corrente diferencial residual nominal e estabelecimento de valor limite da corrente de fuga, correspondente ao valor limite do isolamento de disparo.

Além disso, analisaram-se os modos de ocorrência de defeitos de isolamento em equipamentos e nos circuitos de alimentação, quer os que existem permanentemente durante a operação dos circuitos e equipamentos, quer aqueles que só esporadicamente se manifestam. Ainda se chamou a atenção para a particularidade do condutor neutro relativamente às fases de um sistema trifásico.

Aproveitou-se a oportunidade para justificar regras importantes para a actividade prática das instalações eléctricas, como realizar circuitos com bons isolamentos, medir a resistência de isolamento, separar os circuitos de alimentação de diferentes equipamentos, dimensionar a sensibilidade dos dispositivos diferenciais e compreender o efeito dos defeitos escondidos.

**Visite o ENDIEL 95 na FIL  
em Lisboa de 31 de Maio a 4 de Junho.  
Uma exposição electrotécnica  
para encontro dos electrotécnicos.  
A revista *ELECTRICIDADE*  
está no stand 126 do Pavilhão 1  
Aproveite para nos conhecermos melhor**