

MANUEL BOLOTINHA

Transformadores de Potência



AUTOR

Manuel Bolotinha

TÍTULO

Transformadores de Potência

EDIÇÃO

Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

E-mail: geral@quanticaeditora.pt . www.quanticaeditora.pt

Praça da Corujeira n.º 38 · 4300-144 PORTO

CHANCELA

Engebook – Conteúdos de Engenharia

DISTRIBUIÇÃO

Booki – Conteúdos Especializados

Tel. 220 104 872 . Fax 220 104 871 . E-mail: info@booki.pt . www.booki.pt

PARCEIRO DE COMUNICAÇÃO

oelectricista – Revista Técnica

REVISÃO

Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

DESIGN

Luciano Carvalho

Publindústria, Produção de Comunicação, Lda.

IMPRESSÃO

Espanha, janeiro, 2019

DEPÓSITO LEGAL

438110/18



A **cópia ilegal** viola os direitos dos autores.

Os prejudicados somos todos nós.

Copyright © 2018 | Publindústria, Produção de Comunicação, Lda.

Todos os direitos reservados a Publindústria, Produção de Comunicação, Lda. para a língua portuguesa.

A reprodução desta obra, no todo ou em parte, por fotocópia ou qualquer outro meio, seja eletrónico, mecânico ou outros, sem prévia autorização escrita do Editor, é ilícita e passível de procedimento judicial contra o infrator.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida, no todo ou em parte, sob qualquer forma ou meio, seja eletrónico, mecânico, de fotocópia, de gravação ou outros sem autorização prévia por escrito do autor.

Por opção do autor, este livro não segue o novo Acordo Ortográfico de 1990.

CDU
621.3 Engenharia Elétrica

ISBN
Papel: 9789898927224
E-book: 9789898927231

Booki – Catalogação da publicação
Família: Electrotecnia
Subfamília: Produção, Transporte e Distribuição de Energia Elétrica

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABELAS E FIGURAS.....	IX
1. INTRODUÇÃO	1
2. NORMAS E REGULAMENTOS APLICÁVEIS	5
3. TENSÕES NORMALIZADAS E TENSÕES DE SERVIÇO.....	9
4. PRINCIPIOS TEÓRICOS	13
4.1 Conceitos gerais.....	15
4.2 Impedância reflectida.....	17
4.3 Transformador ideal e transformador real.....	18
5. TIPOS CONSTRUTIVOS.....	21
5.1 Transformadores isolados a óleo.....	23
5.2 Transformadores isolados a gás.....	25
5.3 Transformadores secos	27
5.4 Transformadores monofásicos e autotransformadores	29
5.5 Transformadores de fases dissociadas	30
5.6 Transformadores de três enrolamentos.....	31
5.7 Transformadores zig-zag de ligação à terra.....	31
5.8 Transformadores desfasadores	32
6. COMPONENTES E MATERIAIS	35
6.1 Introdução.....	37
6.2 Núcleo	39
6.3 Enrolamentos.....	41

6.4	Materiais de isolamento dos enrolamentos.....	45
6.5	Cuba, radiadores e conservador	46
6.6	Travessias.....	47
6.7	Sistema de refrigeração.....	49
6.8	Comutadores de tomadas e regulação em carga.....	49
6.9	Protecções intrínsecas.....	52
6.10	Acessórios	54
7.	PARÂMETROS E CARACTERÍSTICAS DOS TRANSFORMADORES	57
7.1	Potência nominal.....	59
7.2	Tensões e frequência.....	60
7.3	Perdas e rendimento	60
7.4	Perdas magnéticas e histerese	62
7.5	Tensão de curto-circuito.....	63
7.6	Grupo de ligações.....	63
8.	REFRIGERAÇÃO DOS TRANSFORMADORES	67
8.1	Considerações gerais	69
8.2	Tipos de refrigeração e fluídos.....	71
8.3	Refrigeração e potência nominal.....	73
9.	DEFEITOS NOS TRANSFORMADORES E PROTECÇÕES	75
9.1	Introdução.....	77
9.2	Defeitos no óleo, no gás e no isolamento dos enrolamentos.....	77
9.3	Defeitos nos enrolamentos.....	78
9.4	Defeitos no núcleo	79
9.5	Sobreaquecimento e sobrecargas.....	79
9.6	Protecções intrínsecas.....	80
9.7	Protecção diferencial.....	81
9.8	Protecção contra sobrintensidades.....	84
9.9	Protecção restrita de defeitos à terra	85
9.10	Protecção contra sobrecargas.....	86
9.11	Protecção contra descargas atmosféricas	88
10.	OPERAÇÃO DE TRANSFORMADORES	91
10.1	Entrada em serviço dos transformadores.....	93
10.2	Paralelo de transformadores.....	94
11.	ENSAIOS	97
11.1	Ensaio em fábrica	99
11.2	Ensaio em obra e comissionamento.....	101
11.3	Ensaio e características do óleo.....	102

12.	TRANSPORTE E MONTAGEM	105
12.1	Transporte	107
12.2	Instalação	108
12.3	Fossa de óleo e separador óleo água	112
12.4	Protecção contra incêndios	113
13.	PRINCÍPIOS DE MANUTENÇÃO	117
13.1	Introdução	119
13.2	Inspecção visual	120
13.3	Falhas nos transformadores	120
13.4	Diagnóstico e controlo online	121
13.5	Programação de manutenção preventiva e inspecções	126
13.6	Análise do óleo e recolha de amostras	128
13.7	Ensaios	130
13.8	Termografia por infravermelhos	131
ANEXOS	133	
ANEXO 1 – SISTEMAS TRIFÁSICOS – CONCEITOS GERAIS	135	
A1.1	Princípios básicos	135
A1.2	Ligação dos sistemas trifásicos	137
A1.3	Desfasagem entre correntes e tensões. Potências eléctricas e factor de potência	138
A1.4	Queda de tensão	139
A1.5	Componentes simétricas	140
ANEXO 2 – LEIS FUNDAMENTAIS DA ELECTROTECNIA	143	
A2.1	Lei de Ohm	143
A2.2	Lei de Joule	144
A2.3	Leis de Kirchhoff	144
A2.4	Lei de Gauss	144
A2.5	Lei de Ampère-Maxwell	145
A2.6	Leis de Lenz e de Faraday	145
ANEXO 3 – ÍNDICES DE PROTECÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	147	
A3.1	Introdução	147
A3.2	Índice de protecção dos equipamentos contra a penetração de corpos sólidos e de água	147
A3.3	Índice de protecção dos equipamentos contra os impactos mecânicos	148

ANEXO 4 – SISTEMA DE UNIDADES.....	149
ANEXO 5 – REGIMES DE NEUTRO EM INSTALAÇÕES DE MAT, AT, MT E BT.....	151
A5.1 Introdução e objectivos	151
A5.2 Geradores.....	152
A5.3 Transformadores MAT/MAT, MAT/AT e AT/MT.....	153
A5.4 Redes de transporte MAT e AT.....	154
A5.5 Redes de distribuição e utilização MT	154
A5.6 Redes de distribuição e utilização BT.....	160
A5.7 Redes de distribuição e utilização BT (notas finais).....	166
BIBLIOGRAFIA.....	167

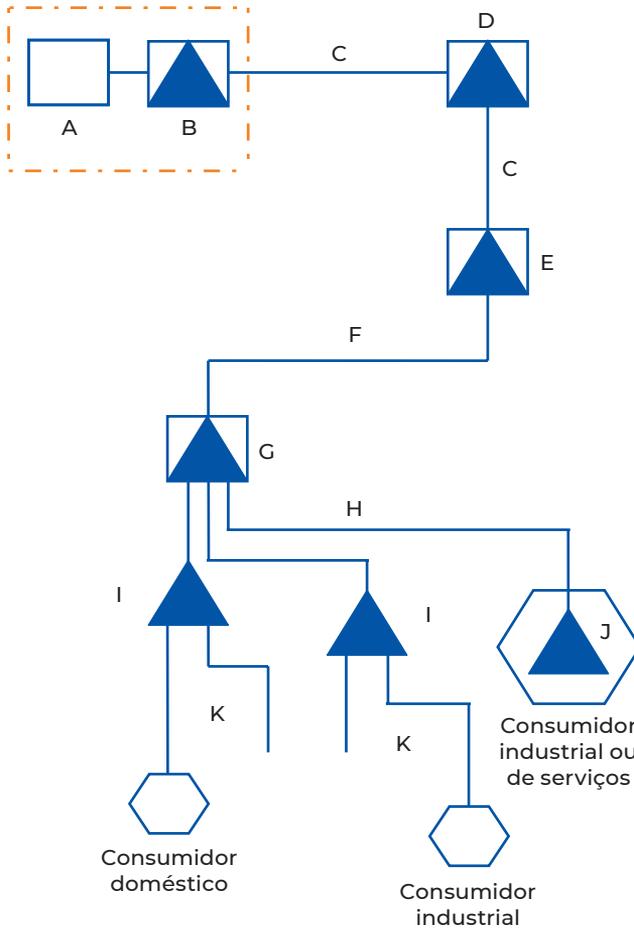


Figura 1 – Representação esquemática da produção, transporte, distribuição e utilização de energia eléctrica

Legenda da Figura

- A** – Central Eléctrica
- B** – SE elevadora MT/MAT
- C** – Rede de Transporte MAT ou Rede Primária (aérea e subterrânea)
- D** – SE MAT/MAT
- E** – SE MAT/AT
- F** – Rede de Transporte AT (aérea e subterrânea)
- G** – SE AT/MT
- H** – Rede de distribuição MT (aérea e subterrânea)
- I** – PT de Serviço Público MT/BT
- J** – PT Cliente MT/BT
- K** – Rede de distribuição BT (aérea e subterrânea)

O princípio de funcionamento do transformador pode descrever-se da seguinte forma:

- Aplicando uma tensão alternada no enrolamento primário, à medida que essa tensão vai aumentando cria-se um campo magnético no núcleo, cujo fluxo varia e percorre o enrolamento secundário.
- A variação do fluxo magnético que percorre um condutor induz nesse condutor uma corrente eléctrica.
- O aumento da corrente no enrolamento primário origina um aumento do fluxo magnético através do enrolamento secundário, induzindo nesse enrolamento uma tensão.

É este **acoplamento electromagnético** entre os enrolamentos primário e secundário, acompanhado de uma transferência de energia eléctrica, que está na base do funcionamento do transformador, como se mostra na **Figura 2**.

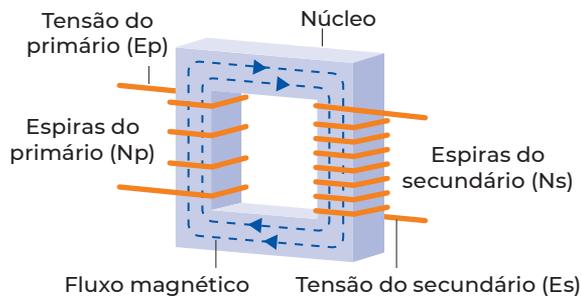


Figura 2 – Princípio de funcionamento do transformador

As **linhas de força do campo magnético** *aumentam*, expandindo-se em torno do *enrolamento secundário*, à medida que a **corrente aumenta** no *enrolamento primário*, utilizando-se diversos tipos de materiais para o *núcleo*, com o objectivo de **direcionar as linhas do campo magnético** para o *enrolamento secundário*.

Tal como se verifica com a *corrente eléctrica*, também as *linhas do campo magnético* tendem a circular pelo **percurso que apresenta menos resistência**. A oposição do material do núcleo à circulação do campo magnético designa-se por **relutância magnética**⁵ do material, uma característica semelhante à resistência dos circuitos eléctricos.

As leis fundamentais do electromagnetismo que explicam o funcionamento do transformador são as leis de Faraday e de Ampère-Maxwell e, também, segundo alguns académicos, a lei de Lenz.⁶

⁵ Ver Anexo 4.

⁶ Ver Anexo 2.

- **Perdas nos enrolamentos**, também designadas por *perdas no cobre*:
 - › *Perdas por efeito de Joule*, devidas à **resistência dos enrolamentos** e existe circulação de corrente.
 - › *Perdas causadas por linhas do fluxo magnético* que circulam nos enrolamentos, devidas à respectiva **reactância indutiva**.

Os transformadores podem ser representados por um circuito equivalente, referido ao primário, reflectindo as perdas atrás referidas – **Diagrama de Steinmetz** (Figura 4).

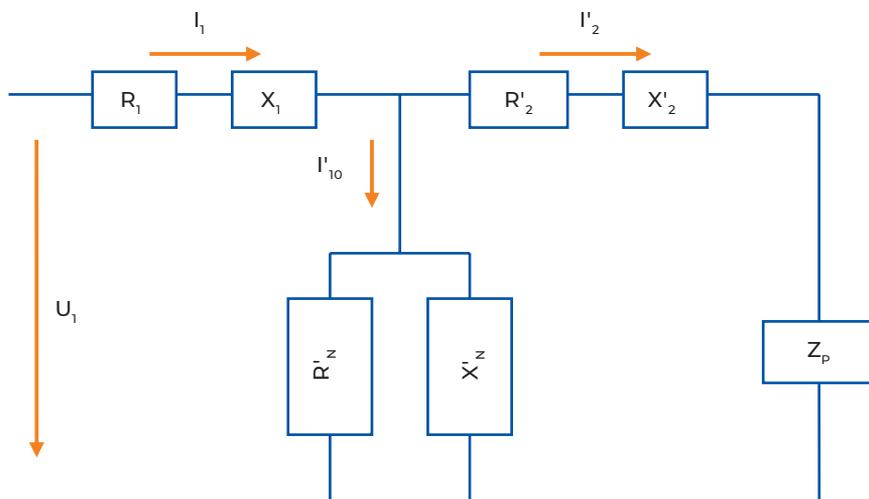


Figura 4 – Diagrama de Steinmetz

Legenda da Figura

R_1	– Resistência do enrolamento primário
X_1	– Reactância indutiva do enrolamento primário
R'_2	– Resistência do enrolamento secundário (referida ao primário)
X'_2	– Reactância indutiva do enrolamento secundário (referida ao primário)
R'_N	– Resistência do núcleo (referida ao primário)
X'_N	– Reactância indutiva do núcleo (referida ao primário)
Z_p	– Impedância reflectida ¹²
I_1	– Corrente primária
I'_2	– Corrente secundária (referida ao primário)
I'_{10}	– Corrente de magnetização (referida ao primário)
U_1	– Tensão primária

¹² Ver Capítulo 4.2.



Figura 7 – Transformador isolado a gás

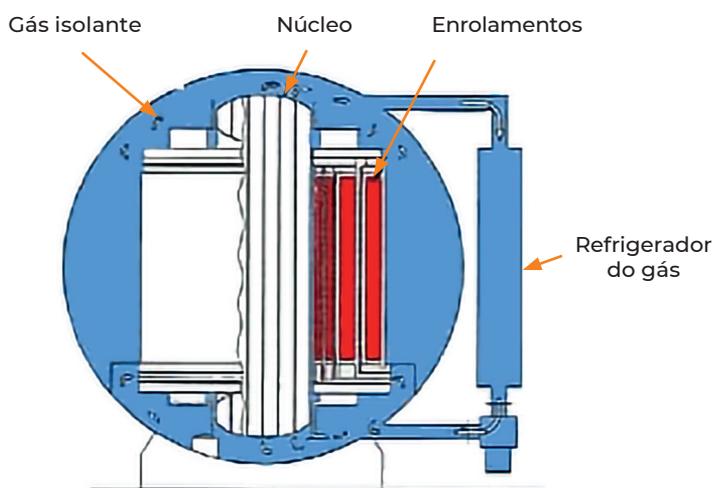


Figura 8 – Desenho esquemático de um GIT

Quando comparados com os *transformadores isolados a óleo*, os **GIT** apresentam o mesmo tipo de construção do *núcleo e dos enrolamentos* (ver Capítulo 6), que são instalados numa **cuba totalmente selada** e cheia com um gás, normalmente o SF₆, com uma pressão entre **0,14 e 0,15 MPa**¹⁷. Uma alternativa ao SF₆, utilizada por alguns fabricantes é o **octafluorociclobutano** (símbolo químico: **C4F8**), embora a respectiva tecnologia ainda não esteja muito desenvolvida.

¹⁷ Ver Anexo 4.

5.6 TRANSFORMADORES DE TRÊS ENROLAMENTOS

Habitualmente os transformadores de potência têm **dois enrolamentos**, *primário e secundário*. Contudo, nas *SE MAT e AT* os transformadores podem ter ainda um *terceiro enrolamento* (**terciário**), ligado em **triângulo**¹⁸, com uma tensão “terciária” em MT, que para além de realizar a *compensação de harmónicas*, quando os enrolamentos primário e secundário estão ligados em **estrela**¹⁹ (**Yy**), pode ainda ser utilizado para a alimentação do *Transformador dos Serviços Auxiliares da SE*.

Na **Figura 14** mostra-se um exemplo de um transformador com três enrolamentos.

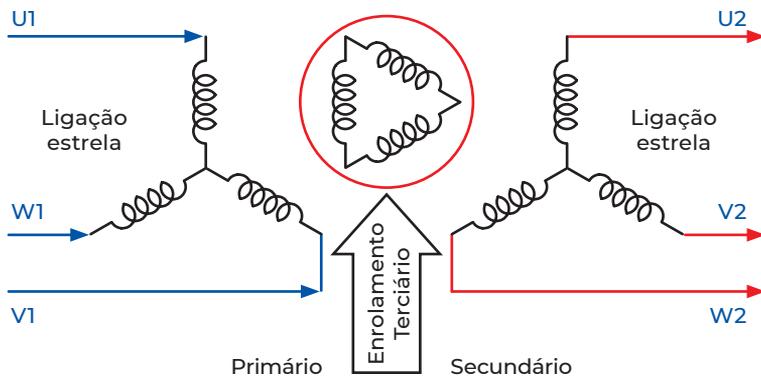


Figura 14 – Diagrama de um transformador com enrolamento terciário

5.7 TRANSFORMADORES ZIG-ZAG DE LIGAÇÃO À TERRA

O **regime de neutro**²⁰ de um transformador e de uma rede pode ser:

- Ligação directa à terra
- Ligação à terra através de uma resistência ou de uma reactância (por exemplo a bobina de Peterson)
- Isolado

¹⁸ Ver Capítulo 7.5.

¹⁹ Ver Capítulo 7.5.

²⁰ Ver Anexo 5.



Figura 26 – Disposição em disco contínuo

Os enrolamentos são habitualmente dispostos de **forma concêntrica**, em torno das pernas do núcleo, com os enrolamentos de ambos os níveis de tensão **sobrepostos**, distinguindo-se **dois tipos de disposição**, como se representa na **Figura 27**:

- **HI-LO**: enrolamento da tensão mais baixa na perna do núcleo e enrolamento da tensão mais elevada sobreposto, no exterior.
- **LO-HI-LO**: o enrolamento correspondente à tensão mais baixa é dividido em dois, envolvendo o enrolamento correspondente à tensão mais elevada.

HI representa o enrolamento da tensão mais elevada e **LO** o(s) enrolamento(s) da tensão mais baixa.

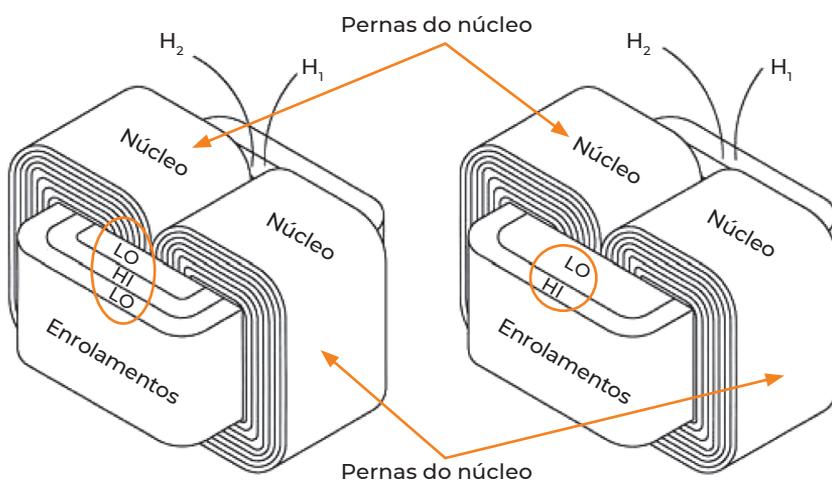


Figura 27 – Disposições LO-HI-LO e HI-LO

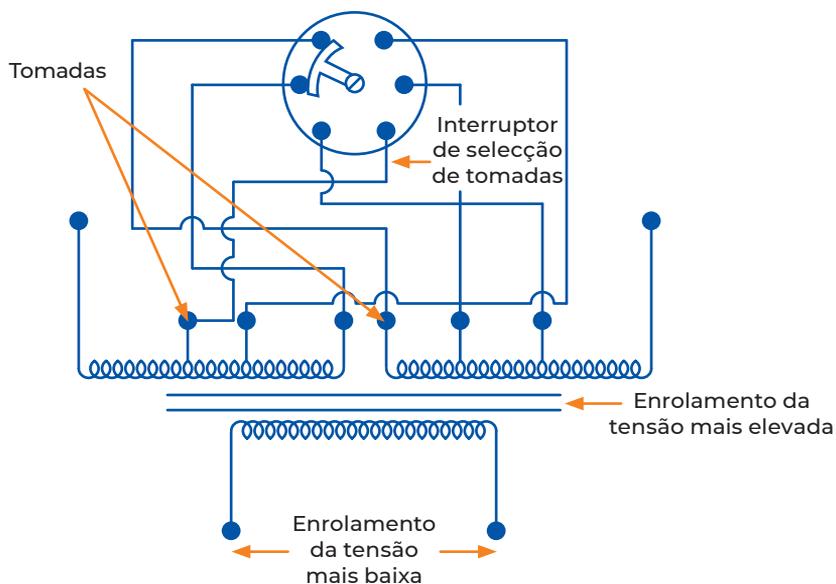


Figura 31 – Esquema de funcionamento de um comutador de tomadas mecânico



Figura 32 – Comutador de tomadas mecânico

Tradicionalmente a **extinção do arco** nos *comutadores de tomadas em carga* é feita no **óleo**, que é **obrigatoriamente separado do óleo da cuba do transformador**, no caso de transformadores isolados a óleo.

Verifica-se actualmente uma cada vez maior utilização da tecnologia de **extinção no vácuo**, que no caso dos *GIT* é a **única utilizada**.

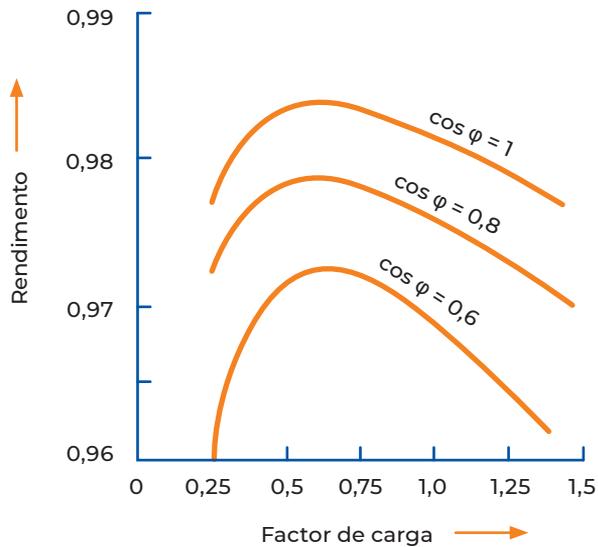


Figura 36 – Curvas de variação do rendimento

Exemplo

Considere-se um transformador **60/10 kV; 40 MVA; $P_0 = 23 \text{ kW}$; $P_{cu} = 150 \text{ kW}$; $\cos \varphi = 0,83$.**

Sendo:

$S_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 = 40 \text{ MVA}$, ter-se-á:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\sqrt{3} \times U_2 \times I_2 \times \cos \varphi}{\sqrt{3} \times U_1 \times I_1 \times \cos \varphi} = \frac{40 \times 10^6 \times 0,83}{40 \times 10^6 \times 0,83 + (23 + 150) \times 10^3} \approx 99\%$$

A corrente secundária a que corresponde o **rendimento máximo** do transformador, com uma carga com *factor de potência unitário*, é calculada pela expressão:

$$I_2 = \sqrt{\frac{P_{Cu}}{R}}$$

Onde R é a soma das resistências dos enrolamentos primário e secundário, reportada ao secundário.

7.4 PERDAS MAGNÉTICAS E HISTERESE

Como referido anteriormente, uma das causas das **perdas magnéticas** (ou *perdas em vazio*) dos transformadores é a **histerese**.

A **histerese** é um fenómeno que se verifica nos materiais, designadamente nos **materiais ferromagnéticos**, que como visto no Capítulo 6.2 são os materiais que constituem o **núcleo dos transformadores**, que resulta da **capacidade** de um material **conservar uma deformação** causada por um *determinado estímulo*, mesmo na **ausência desse estímulo**.

Como se pode observar na **Figura 37**, que representa a **curva de magnetização** e o designado **ciclo de histerese** de um *material ferromagnético*, o **campo magnético (H)** aplicado ao material do núcleo leva-o até à **saturação**³⁴; quando esse *campo magnético diminui* e atinge o valor “zero” o *material ferromagnético* conserva ainda uma **densidade de fluxo magnético (B)** positiva.

Para que se obtenha **B = 0** é necessário *aplicar um campo magnético “negativo”*, isto é de **sentido contrário** ao aplicado inicialmente.

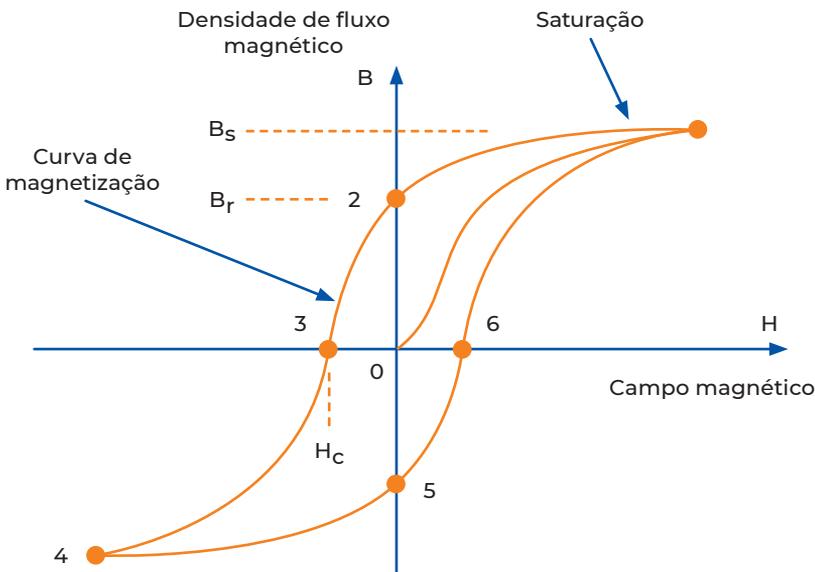


Figura 37 – Ciclo de histerese de um material ferromagnético

³⁴ A **saturação** de um *material ferromagnético* verifica-se quando ao aumento do *campo magnético* não corresponde o aumento da *densidade de fluxo magnético*.

- **Protecção do comutador de tomadas em carga**, caso exista (**2 níveis**: *alarme e disparo*) – relé de sobrepresão de gás.

Transformadores secos

- **Medição da temperatura dos enrolamentos (2 níveis**: *alarme e disparo*), que é realizada por dois métodos distintos – *detector resistivo de temperatura em platina (PT 100)* ou um *termistor* (material semi-condutor sensível à temperatura), designado por **PTC** (*Positive Temperature Coefficient*).

Em situações de disparo as protecções intrínsecas actuam directamente na bobina de disparo de ambos os disjuntores (do lado primário e do lado secundário) de protecção dos transformadores.

9.7 PROTECÇÃO DIFERENCIAL

A forma ideal de proteger qualquer equipamento é **comparar a corrente que entra com a corrente que sai**. Em condições normais **ambas as correntes são iguais**; caso tal não aconteça, isso significa que **há um defeito**.

Para tal utiliza-se uma **protecção diferencial** (código *87P*, de acordo com as *Normas ANSI/IEEE/IEC*), cujo princípio de funcionamento é a **lei dos nós de Kirchhoff**⁴¹, e cujo diagrama se ilustra na **Figura 41**.

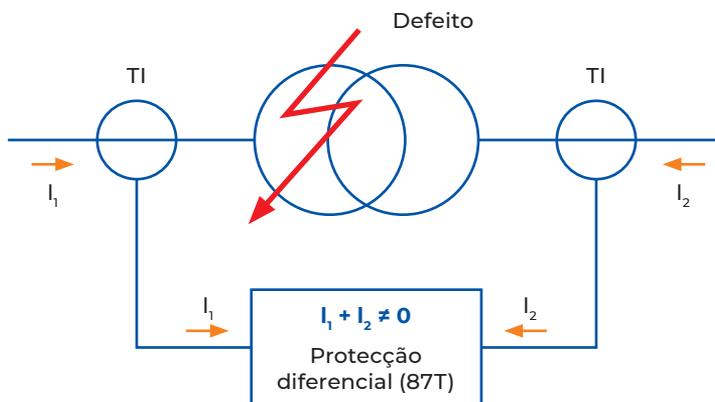


Figura 41 – Diagrama da protecção diferencial

⁴¹ Ver Anexo 2, Capítulo 3.

9.8 PROTECÇÃO CONTRA SOBRIINTENSIDADES

Os transformadores MT/BT e MT/MT (nalgumas situações), para potências até **2,5-3 MVA**, habitualmente só **são protegidos contra sobreintensidades**:

- Curto-circuito trifásico ou fase-fase, instantâneo (código ANSI/IEEE/IEC 50).
- Curto-circuito trifásico ou fase-fase, temporizado (código ANSI/IEEE/IEC 51).
- Curto-circuito fase-terra, instantâneo (código ANSI/IEEE/IEC 50N).
- Curto-circuito fase-terra, temporizado (código ANSI/IEEE/IEC 51N).

Estas protecções são também utilizadas em transformadores MAT/MAT, MAT/AT e AT/MT com potências nominais superiores a **3-4 MVA**, como protecção de back-up à protecção diferencial.

Nos transformadores MT/BT dos PT (de serviço público ou privados) com potências até **630 kVA** (embora nalguns casos se estenda até aos **1250 kVA**), é habitual utilizarem-se **fusíveis associados a interruptores**, como se mostra na **Figura 43**.

Neste caso os interruptores deverão ser equipados com **bobina de disparo**, para permitir a actuação das protecções intrínsecas dos transformadores.

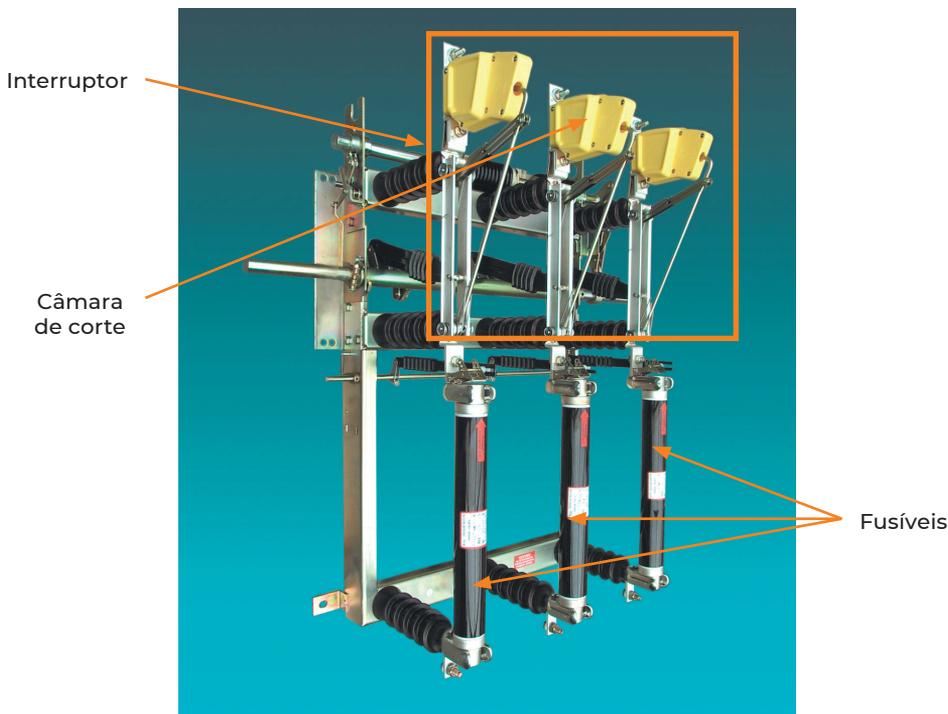


Figura 43 - Interruptor associado a fusíveis

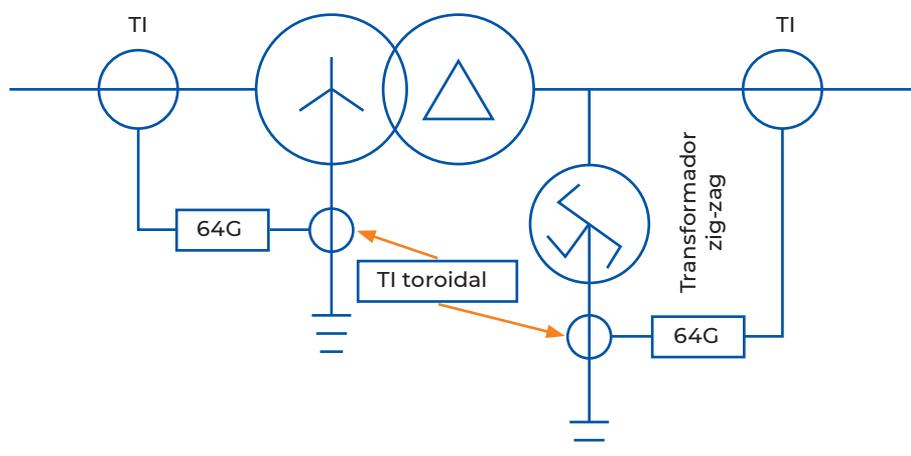


Figura 44 – Esquema da protecção restrita de defeitos à terra

Num transformador com um enrolamento ligado em estrela, no caso de um defeito externo ao transformador, a **corrente na linha da fase afectada e a corrente através da ligação do neutro à terra são iguais**, e conseqüentemente a **corrente que passa na protecção é nula**, pelo que **este tipo de protecção não é sensível a defeitos externos ao transformador**.

Pelo contrário, se o defeito for interno, a corrente que passa na protecção já não é nula e ela actua.

No caso de *cargas desequilibradas*, a **soma das correntes dos três transformadores de linha não é zero**, e *uma corrente flui através do neutro*; a ligação dos TI das fases e do TI do neutro é feita para que a *soma das correntes secundárias dos TI de fase esteja em oposição à corrente secundária do TI do neutro*, anulando-se, o que torna esta **protecção insensível aos desequilíbrios de carga**.

9.10 PROTECÇÃO CONTRA SOBRECARGAS

O critério de base para definir a *carga admissível num transformador de potência* é a **temperatura mais elevada do ponto mais quente do isolamento sólido dos enrolamentos**⁴⁹ (habitualmente designado por *hot-spot*).

Essa *temperatura não deve exceder os valores prescritos nas normas aplicáveis*, para **evitar defeitos no isolamento (a capacidade de carga de um transformador é principalmente limitada pela temperatura dos enrolamentos)**.

⁴⁹ Ver Capítulo 6.4.

A temperatura do isolamento sólido é o **principal factor do envelhecimento** do transformador. Esse isolamento, com a temperatura e o tempo, entra num **processo de despolimerização**, provocando a **degradação das propriedades mecânicas do papel**, tais como a elasticidade e a resistência aos esforços de tracção.

O papel fragiliza-se, tornando-se **quebradiço, não suportando os esforços de curto-circuito e as vibrações próprias do funcionamento do transformador**. Este facto caracteriza o fim de vida do isolamento, e como se trata de um **processo irreversível**, tal significa também o **fim de vida do transformador**.

Habitualmente as **sobrecargas** acontecem em **situações de contingência**, quando alguns sistemas ficam isolados da rede, ou quando os transformadores se encontram a **80-90%** da sua potência nominal (indicada na chapa de características), e é **solicitada uma carga adicional**, com particular relevância em verões muito quentes.

Tradicionalmente, para a **protecção contra sobrecargas**, eram utilizados relés de máximo de intensidade com **característica de tempo inverso** (uma característica de tempo inverso caracteriza-se por a corrente variar inversamente com o tempo, como se exemplifica na **Figura 45**).

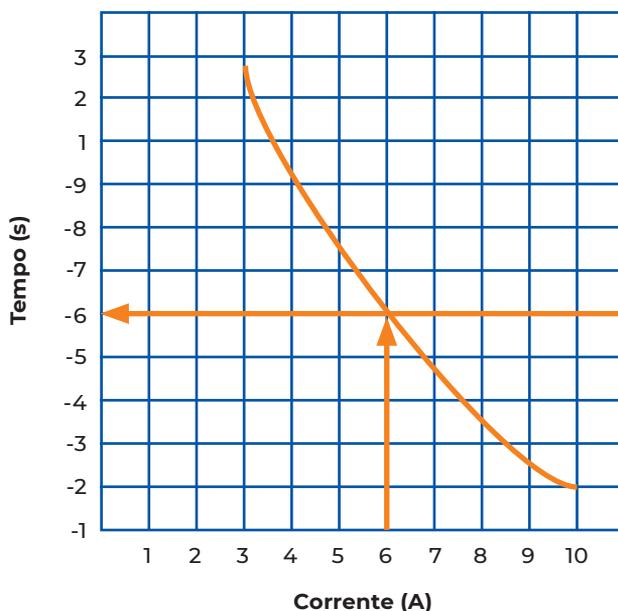


Figura 45 – Curva característica de tempo inverso

Contudo, como os transformadores são geralmente instalados no exterior, ficam sujeitos à variação da temperatura ambiente, o que **afecta a sua capacidade de carga**, e consequentemente **dificulta a regulação do relé**.

Estas *correntes de arranque* **reduzem significativamente a qualidade do serviço** e **podem dar origem a defeitos de funcionamento das protecções**, e **induzem esforços electromecânicos nos enrolamentos**, que *podem reduzir a vida útil do transformador*, e são o resultado das características de magnetização dos transformadores, de que se apresenta uma curva tipo na **Figura 48**.

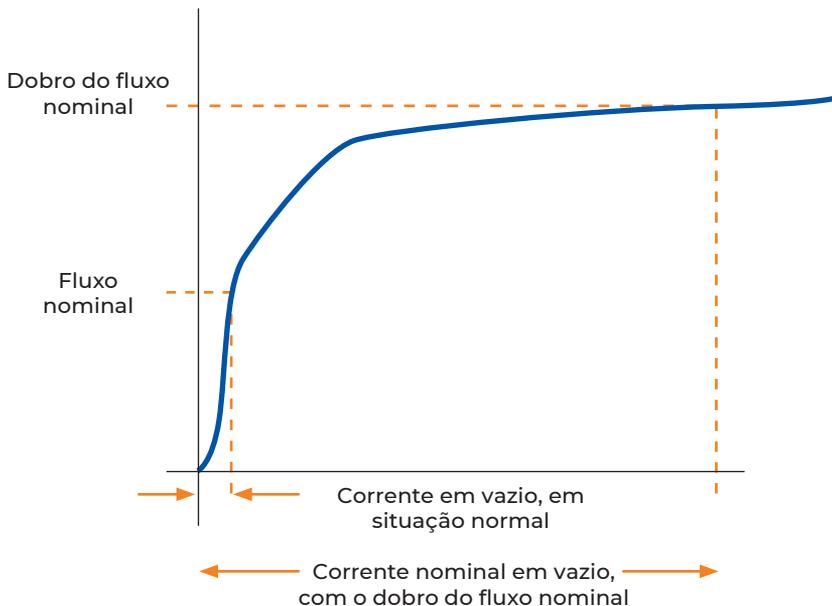


Figura 48 – Curva típica de magnetização de um transformador

Para a *eliminação ou redução destas correntes de arranque* as soluções mais habituais, a estudar e implementar em fase de projecto, são a **pré-inserção de resistências** e a **energização sequencial com resistências de terra**.

10.2 PARALELO DE TRANSFORMADORES

Quando dois transformadores trifásicos **TF1** e **TF2** se destinam a ser *ligados em paralelo* é necessário conhecer os *desfasamentos entre as tensões primárias e secundárias em cada um deles*. Só assim se poderá saber se as **3 tensões secundárias do TF1 estão em fase** com as respectivas tensões do TF2; caso não o estejam, então **não deverá ser feito o paralelo** pois que, nessa situação, **podem existir correntes de circulação intensas entre os transformadores, danificando-os**.

De igual forma as **tensões de curto-circuito** devem ser iguais, para que a *repartição de carga entre os transformadores* se faça **sem que um deles possa entrar em sobrecarga**.



Carris de rolamento

Figura 51 – Carris de rolamento

Nos transformadores de montagem exterior as ligações das travessias MAT e AT aos barramentos e outros equipamentos são habitualmente realizadas em **tubo ou cabo nu, de cobre ou alumínio**, como se apresenta na **Figura 52**. Já as travessias MT são usualmente ligadas a cabos isolados, através de **caixas terminais de cabo**.



Tubos de alumínio

Cabos nus de alumínio

Figura 52 – Ligações de um transformador de montagem exterior

A fossa é preenchida com **pedras de média dimensão** (cerca de 40 mm), que embora permitam o escoamento do óleo, evitam que em **caso de incêndio as chamas penetrem na fossa**.

A **capacidade da fossa** deve ser tal que possa conter a totalidade do volume do óleo do transformador, o volume da água da chuva durante o tempo de duração de um presumível incêndio do transformador (para transformadores montados no exterior) e o volume da água de combate a incêndios do transformador, caso exista (ver Capítulo 12.4), **calculado para o tempo de duração do incêndio**.

Associado à fossa deverá existir um **separador óleo-água**, para evitar que o óleo derramado seja **escoado pela rede de drenagem** da SE, que se apresenta na **Figura 57**.

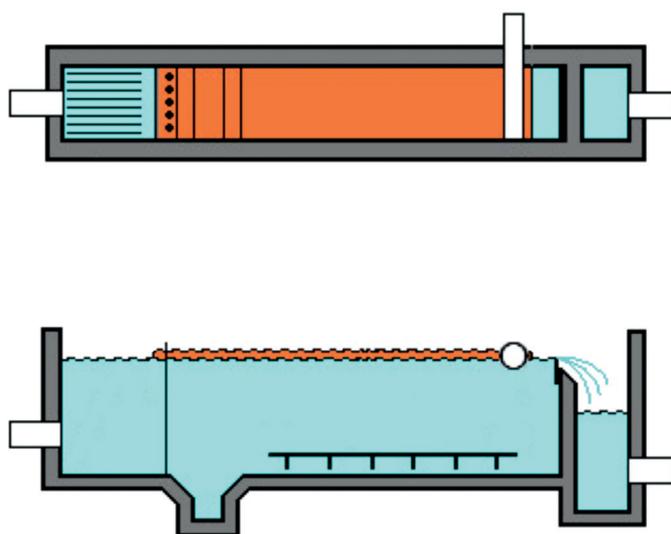


Figura 57 – Separador óleo-água

12.4 PROTECÇÃO CONTRA INCÊNDIOS

As grandes quantidades de óleo contidas nos transformadores constituem a principal **fonte combustível** existente numa SE. Um **incêndio num transformador**, embora raro, tem habitualmente um **grande impacto** e **consequências desastrosas** para os equipamentos e estruturas adjacentes, ficando o transformador totalmente destruído, como se mostra na **Figura 58**.



Figura 58 – Transformador após um incêndio

As mais habituais **causas de incêndio** num transformador são:

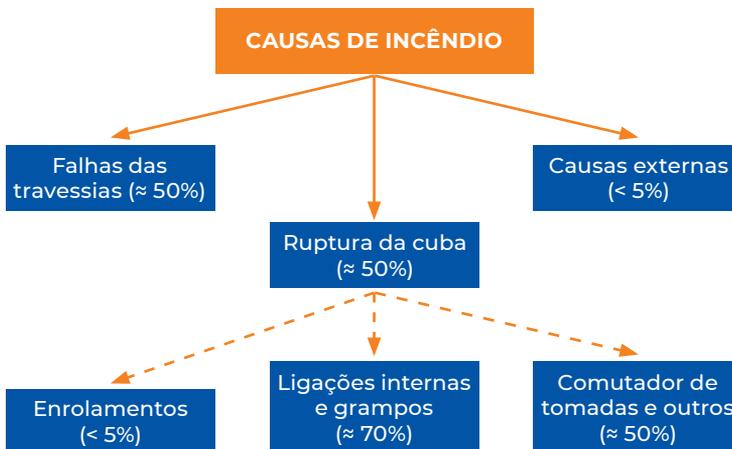


Figura 59 – Causas de incêndio dos transformadores

Um incêndio num transformador é uma **fonte potencial de disseminação de óleo em chamas**, o que pode originar que o **incêndio se propague a outras áreas**, sendo portanto necessário, aquando da instalação *tomar precauções para evitar que um incêndio no transformador se propague a edifícios ou equipamentos próximos ou contíguos*, **afastando os transformadores**, sendo prática comum, para transformadores e autotransformadores MAT/MAT e MAT/AT instalar **paredes corta-fogo de separação** entre eles, como se representa na **Figura 60**.

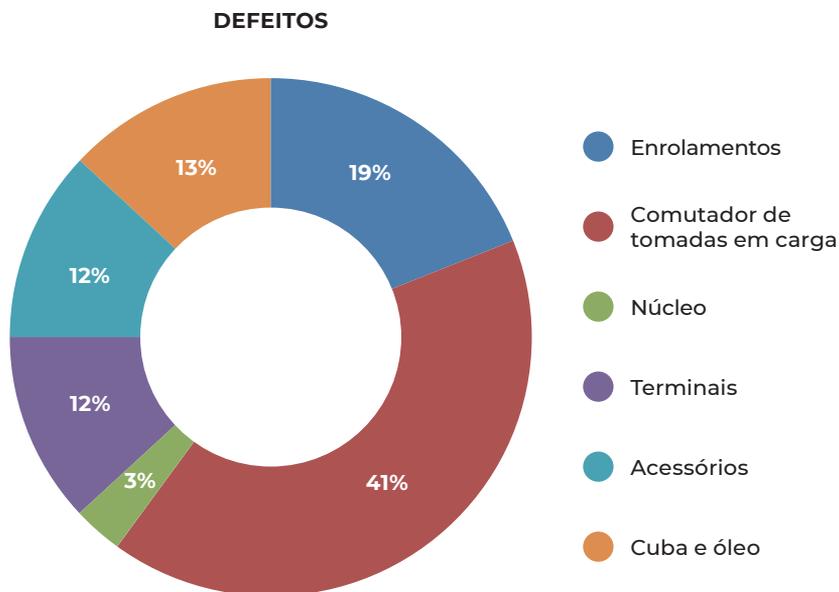


Figura 62 – Distribuição estatística de defeitos em transformadores com isolamento a óleo

13.4 DIAGNÓSTICO E CONTROLO ONLINE

O custo e a importância dos transformadores conduziram ao desenvolvimento de **técnicas de diagnóstico** de transformadores, que actualmente se baseiam na utilização de **equipamentos para medição online**, dando *ênfase à recolha de dados relacionados com a integridade do transformador*, variando com os sensores usados, os parâmetros controlados e as técnicas de medida usadas.

Os equipamentos utilizados para esse fim são habitualmente **instalados em permanência no transformador**, devendo, portanto, **ser fiáveis e de baixo custo**.

Os **sensores** mais habitualmente utilizados no equipamento de diagnóstico são:

- Sensor de temperatura do óleo.
- Sensor de nível do óleo.
- Sensor de medição do teor de água.
- Sensor de funcionamento do comutador de tomadas em carga.
- Unidade de controlo de sobrecargas.

Na **Figura 63** apresentam-se os **sensores e as unidades de diagnóstico e controlo online** dos transformadores.

Tabela 6 – Gases dissolvidos no óleo e respectivas fontes

GÁS	FONTE
Hidrogénio	Efeito de coroa e descargas parciais
Oxigénio e Azoto	Água; Corrosão; Defeitos de estanquidade
Monóxido de carbono	Degradação do papel de isolamento dos enrolamentos
Metano e Etano	Temperatura baixa do óleo
Etileno	Temperatura alta do óleo
Acetileno	Arco eléctrico

A **análise da concentração dos gases dissolvidos no óleo** e referidos na **Tabela 9**, no seu nível mais baixo, permite detectar os **níveis de descargas parciais e o sobreaquecimento localizado**, ilustrando-se na **Figura 64** o esquema desta análise.

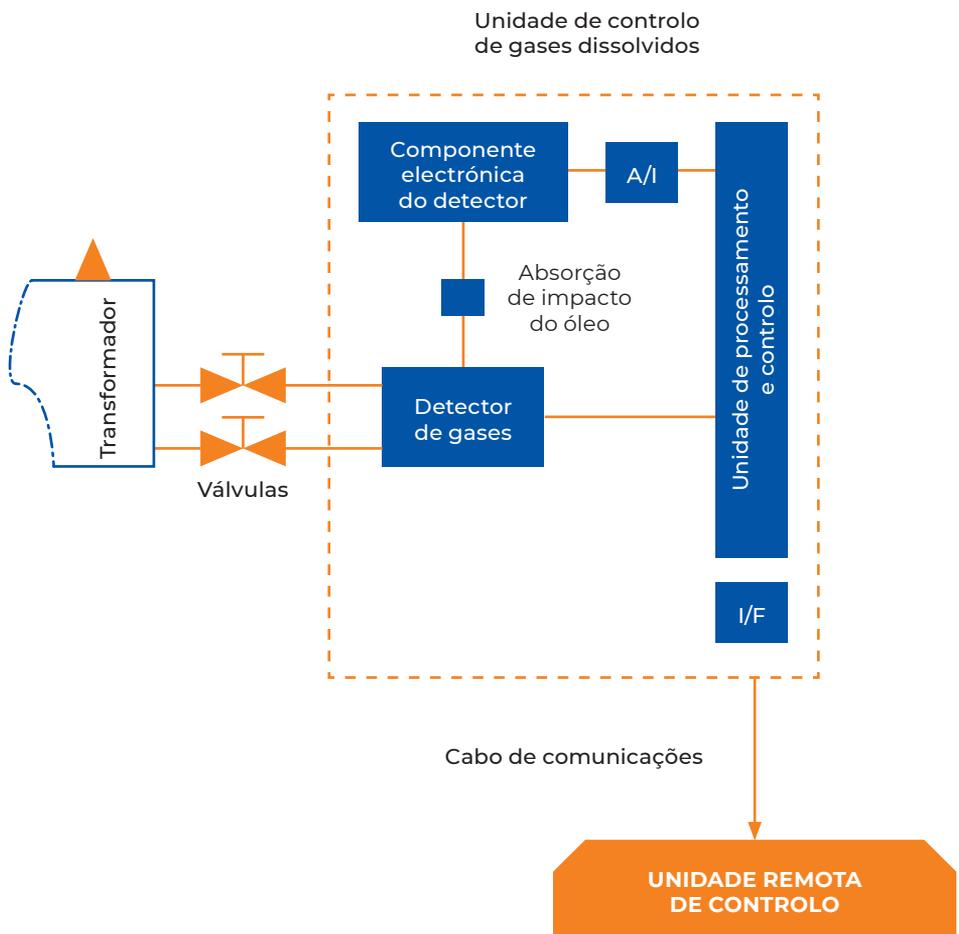


Figura 64 – Diagrama da unidade de controlo de gases dissolvidos

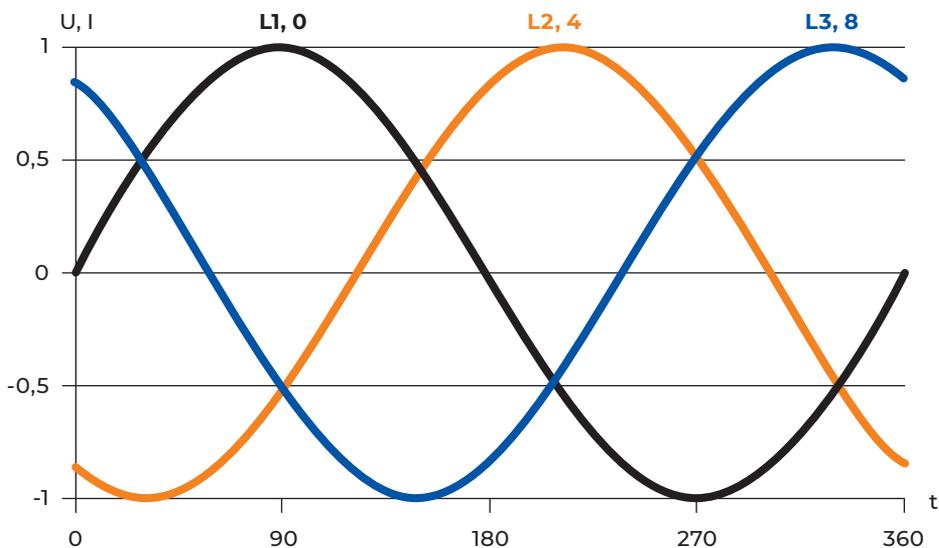


Figura A1.1 – Representação sinusoidal das grandezas eléctricas

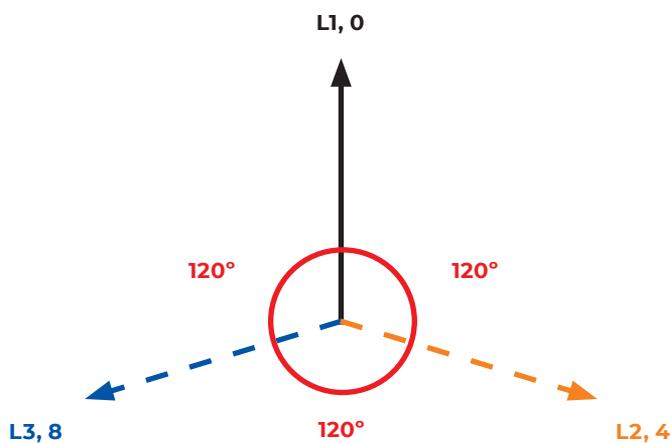


Figura A1.2 – Representação vectorial das grandezas eléctricas

Quando num sistema trifásico a **carga é equilibrada**, a corrente no neutro é zero; em **sistemas desequilibrados**, no pior caso, a corrente no neutro não ultrapassa a corrente na fase mais sobrecarregada.

Nos sistemas MT e AT (transporte, distribuição e utilização de energia eléctrica) o neutro não é utilizado.

A1.3 DESFASAGEM ENTRE CORRENTES E TENSÕES. POTÊNCIAS ELÉCTRICAS E FACTOR DE POTÊNCIA

A existência de **componentes indutivas e capacitivas** nas redes e equipamentos causa uma **desfasagem** entre a corrente e a tensão, podendo aquela estar em **atraso** (quando predomina a componente indutiva, como se mostra na **Figura A1.4**) ou em **avanço** (quando predomina a componente capacitiva).

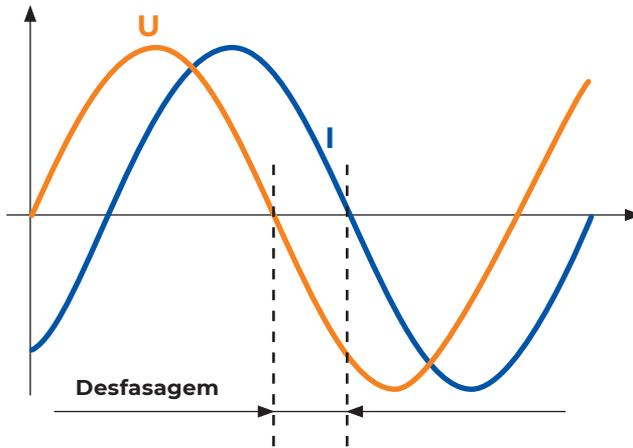


Figura A1.4 – Desfasagem entre corrente e tensão

A *desfasagem*, que é representada por um **ângulo (φ)**, que causa que a *potência activa* (notação **P**) seja inferior à potência fornecida – a *potência aparente* (notação **S**), sendo a diferença entre aquelas potências a *potência reactiva* (notação **Q**).

Representando estas *potências* por *vectores*, obtém-se o “**triângulo de potências**”, que se representa na **Figura A1.5**.

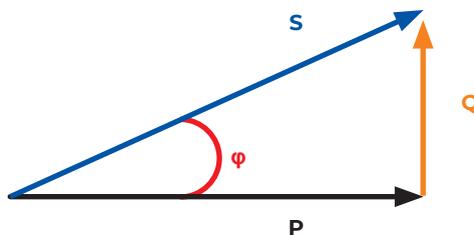


Figura A1.5 – Triângulo de potências

O **cos φ** designa-se por **factor de potência**, variando entre “0” e “1”.

- X é a reactância indutiva do cabo de alimentação.
- φ é a desfasagem.

A queda de tensão exprime-se habitualmente em [%], sendo calculada pela expressão:

$$\Delta U [\%] = \Delta U [V] \times 100 / U$$

A1.5 COMPONENTES SIMÉTRICAS

As redes e equipamentos têm uma **impedância interna** que pode ser dividida em **três componentes simétricas**, associadas à **rotação do campo electromagnético**, que no caso de um sistema não equilibrado são as seguintes:

- *Componente directa* ou *síncrona* (X_d / Z_d) – o campo electromagnético gira no **sentido dos ponteiros do relógio**, com uma **desfasagem entre fases de 120°**.
- *Componente inversa* (X_i / Z_i) – o campo electromagnético gira no **sentido contrário ao dos ponteiros do relógio**, sendo a **desfasagem entre fases igualmente 120°**.
- *Componente homopolar* (X_0 / Z_0) – o campo electromagnético é **estático** e **não há desfasagem entre fases**.

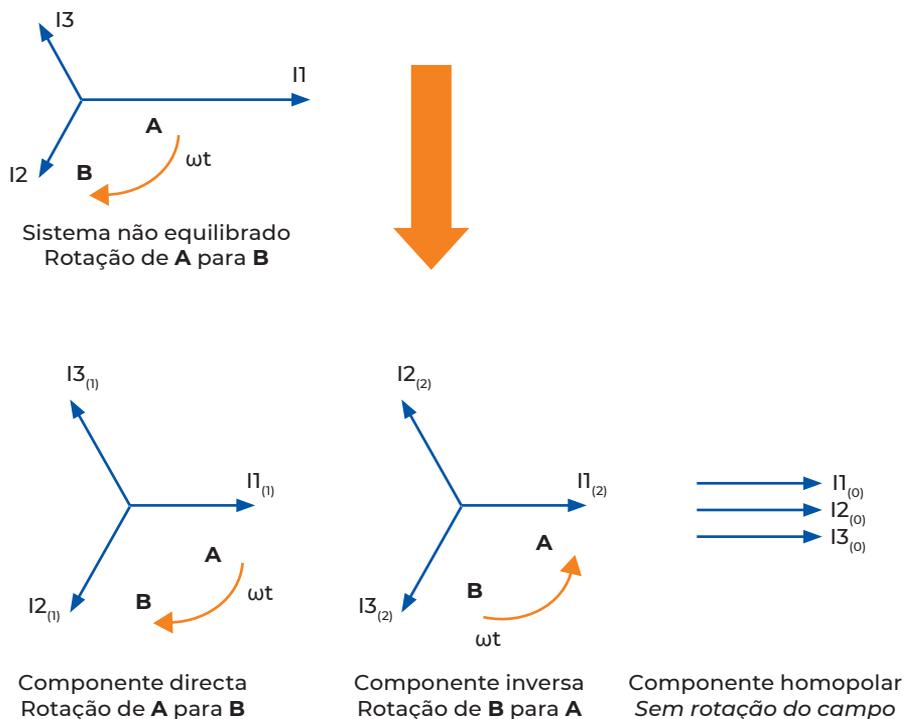


Figura A1.6 – Componentes simétricas

Ao ímã (natural ou artificial) que produz o campo magnético é dada a designação de **indutor** e à espira ou circuito onde se produz a **f.e.m.**, a de **induzido**.

A **lei de Faraday** define que o valor da **f.e.m. induzida** depende de:

- Grandeza da variação do fluxo.
- Rapidez da variação do fluxo.
- Quantidade de espiras do circuito do induzido.

O sentido da corrente induzida é determinado pela chamada **lei de Lenz**, que se pode enunciar da seguinte forma:

O sentido da corrente induzida na espira é tal que o fluxo por ela produzido tende a opor-se ao fluxo que lhe deu origem.

A **lei de Lenz**, que alguns académicos consideram ser uma pseudo-lei, é também conhecida pela **regra do saca-rolhas**.

A **Figura A2.3** mostra o sentido das linhas de força do fluxo do campo magnético em relação ao plano paralelo ou perpendicular.

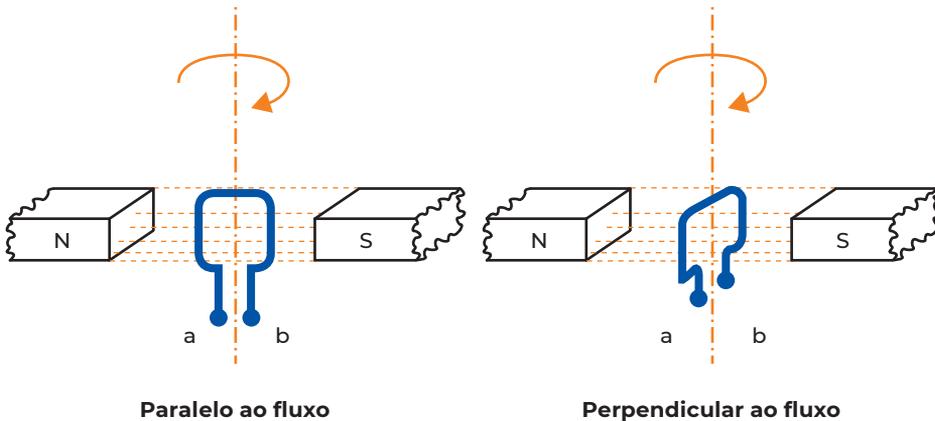


Figura A2.3 – Linhas de força do fluxo do campo magnético em relação ao plano paralelo ou perpendicular da espira

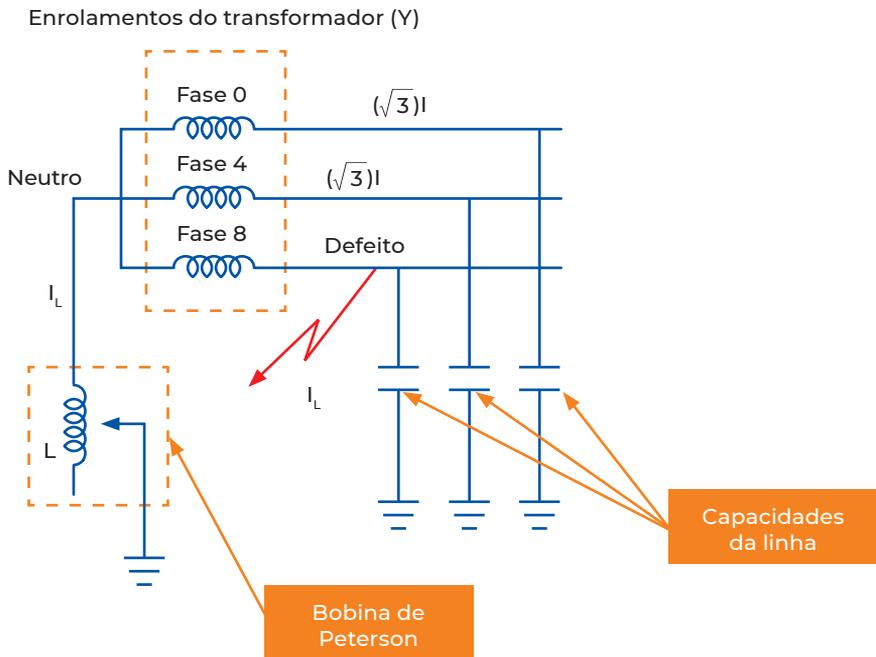
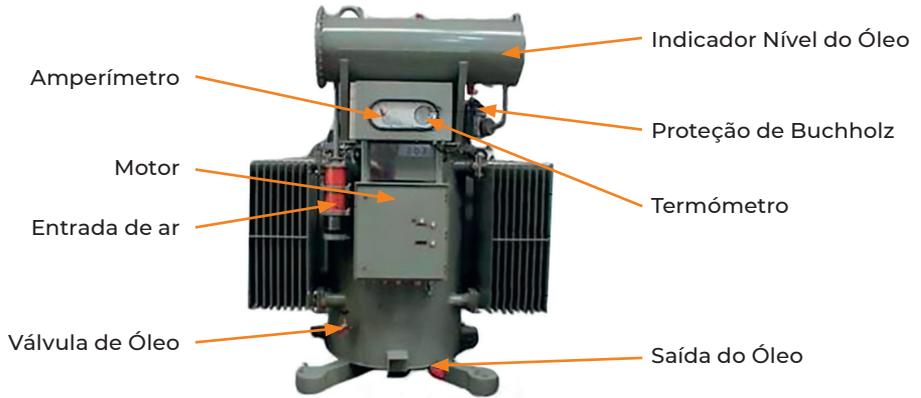


Figura A5.3 – Ligação do neutro à terra através de uma Bobina de Peterson e esquema da bobina

Quando ocorre um defeito a **corrente capacitiva** (I_c) é **neutralizada** pela **corrente através da bobina** (I_L), que é **igual à corrente de defeito** e à **corrente capacitiva**, mas **desfasada** desta de **180°**, **compensando também a corrente** *devida à capacidade entre os condutores da linha e a terra, corrente essa que **varia com a configuração da rede.***

Verifica-se assim a seguinte *igualdade*:

$$|I_c| = 2|(\sqrt{3})I| = |3I|$$

Tabela A5.1 – Correntes e impedâncias homopolares, em função da tensão nominal da rede

Tensão nominal da rede ⁷⁴ U_n (kV)	10		15		30	
$3I_0$ (A)	300	1000	300	1000	300	1000
Z_0 (Ω)	58	17,5	87	26	174	52

As **vantagens** deste sistema são as seguintes:

- Limita o valor das correntes de defeito.
- Proteções fáceis de implementar se a limitação da corrente for superior à corrente capacitiva no sistema.
- A impedância possui baixa resistência e não dissipa grande quantidade de energia térmica, assim sendo o tamanho pode ser reduzido.

Por outro lado as **desvantagens** são:

- A continuidade de serviço é degradada, o defeito tem de ser eliminado o mais rápido possível assim que ocorre.
- Quando os defeitos são eliminados, podem ocorrer sobretensões elevadas devido à ressonância que pode ocorrer entre as capacidades e a reatância da rede de distribuição.

Resistência de neutro

A **resistência de neutro** está ligada ao *ponto de neutro (acessível)* dos enrolamentos MT dos transformadores, como se representa na **Figura A5.6**.

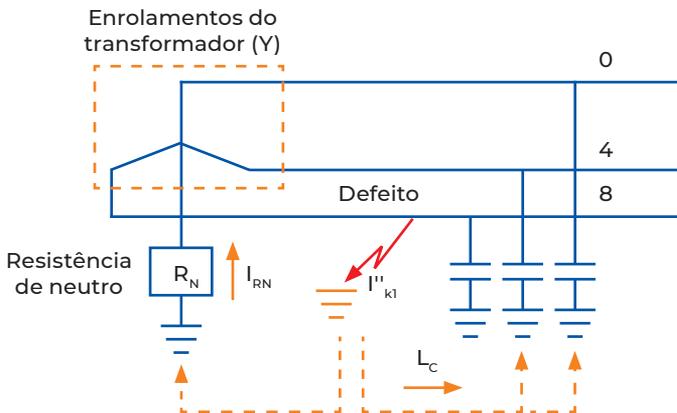


Figura A5.6 – Ligação do neutro à terra através de uma resistência

⁷⁴ Tensão composta.

A generalidade das instalações de utilização BT usa o **regime TT**.

Se o defeito não for **sólido** a corrente de defeito é baixa e a protecção contra curto-circuitos pode não "ver" o defeito ou actuar num tempo demasiado longo.

Assim, a **protecção das pessoas contra contactos indirectos** é complementada com **aparelhos de corte sensíveis à corrente diferencial-residual** (interruptores e disjuntores diferenciais – sensibilidades habituais: **10 mA; 30 mA; 300 mA; 500 mA; 1 A**).

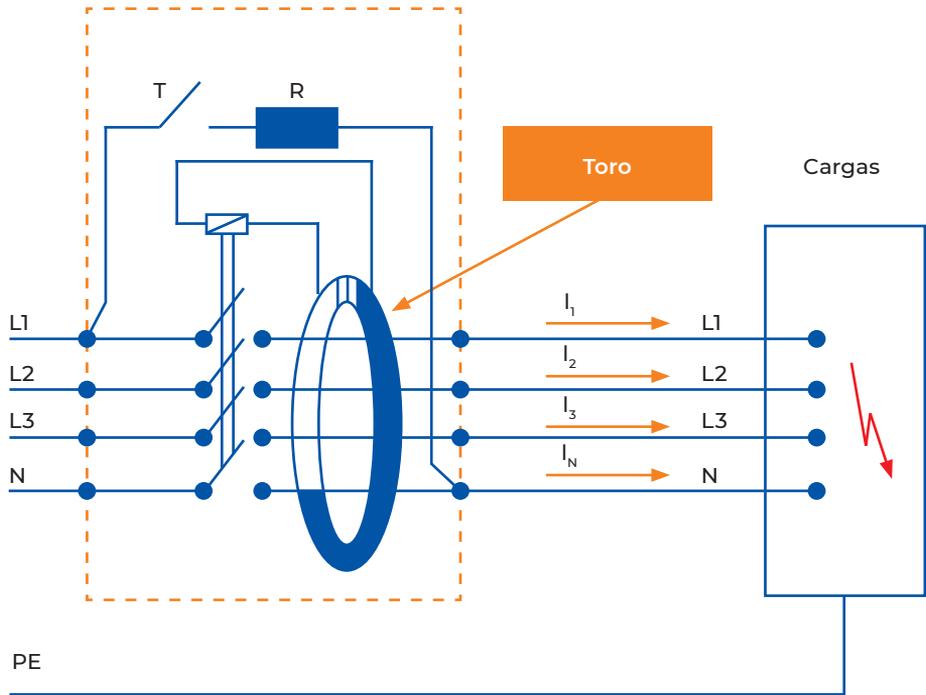


Figura A5.8 – Aparelho de corte sensível à corrente diferencial-residual

Em situações normais, sem defeito, verifica-se que a soma das correntes que é vista pelo toro é nula, isto é:

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_N = 0$$

Em caso de **defeito** tal não acontece, isto é:

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_N \neq 0 \rightarrow I_1 + I_2 + I_3 + I_N = -I_F$$

Onde I_F representa a **corrente de defeito**.

b) *Regime TN*

Neste regime o **neutro da instalação** é ligado à terra e a ligação das massas metálicas à terra é feita **através do condutor de neutro**, que se designa por **PEN**, como se representa na **Figura A5.9**.

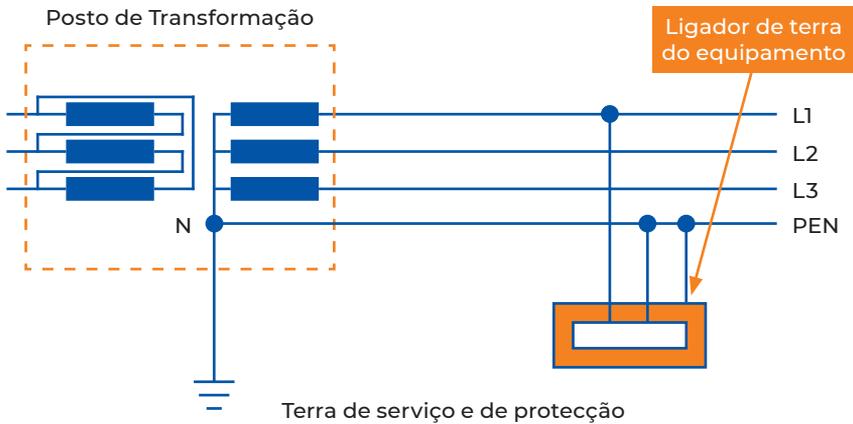


Figura A5.9 – Sistema TN

O regime TN divide-se em dois esquemas – **Esquema TN-C**, **Esquema TN-S** e **Esquema TN-C-S**.

i) *Esquema TN-C*

Neste esquema o **condutor de neutro** é também utilizado como **condutor de protecção (PEN)**, como se representa na **Figura A5.10**, apenas podendo ser utilizado quando a secção do condutor de neutro é $\geq 10 \text{ mm}^2$.

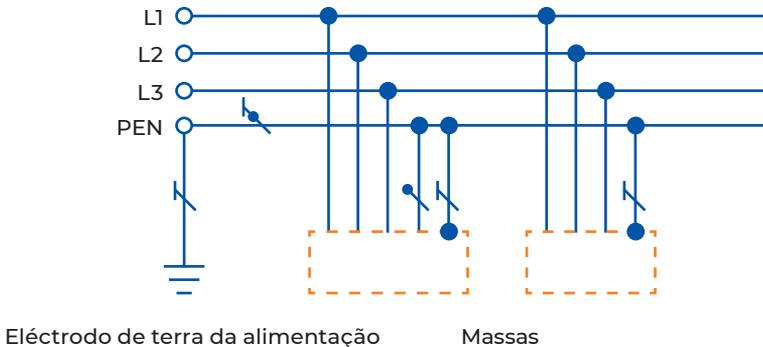


Figura A5.10 – Esquema TN-C (Fonte: RTIEBT)

Apresentam-se as **critérios base de aplicação** dos vários regimes de neutro de acordo com *vários parâmetros característicos* das redes e equipamentos.

A5.7 REDES DE DISTRIBUIÇÃO E UTILIZAÇÃO BT (NOTAS FINAIS)

Exceptuando os casos indicados para o regime **IT não é recomendável** utilizar numa mesma instalação **regimes de neutro diferentes**.

Na **Tabela A5.3** apresentam-se os **critérios base de aplicação** dos vários regimes de neutro de acordo com **vários parâmetros característicos** das *redes e equipamentos*.

Tabela A5.3 – Critérios base de aplicação dos regimes de neutro BT de acordo com vários parâmetros (Fonte: *Guide de l' installation électrique – Merlin Gerin – edição de Janeiro de 1982*)

Parâmetros de base	Características	Regime de neutro		
		Aconselhável	Possível	Desaconselhável
Natureza da rede	Rede muito comprida com boas tomadas de terra de utilização ($\leq 10 \Omega$)	TT	TN	IT
	Idem, mas com más tomadas de terra de utilização ($> 30 \Omega$)	TT		IT TN
	Rede perturbada (zona de trovoadas)	TN	TT	IT
	Rede com correntes de fuga importantes ($> 500 \text{ mA}$)	TN	TT	IT
	Rede com linha aéreas exteriores	TT	TN	IT
	Grupo electrogéneo de socorro	IT	TT	TN
Natureza dos receptores	Receptores sensíveis a grandes correntes de defeito, como por exemplo motores	IT	TT	TN
	Receptores de fraco isolamento (fornos eléctricos, máquinas de soldar, equipamento de cozinha industriais, etc.)	TN	TT IT	
	Vários receptores monofásicos móveis, semi-fixos e portáteis (berbequins, por exemplo)	TT		IT TN
	Receptores com movimento contínuo (telas transportadoras, por exemplo)	TN	IT	TT
Diversos	Alimentação por transformador com ligação Yy	IT	TT	TN
	Locais com risco de incêndio	TT IT		TN
	Instalação com modificações permanentes (instalações de estaleiro, por exemplo)	TT	IT	TN
	Aumento de potência de consumidores alimentados em <i>BT</i> e que passa a ser alimentado em <i>MT</i> com um <i>PT</i> privativo	TT		TN IT
	Instalações onde não é possível assegurar a continuidade dos circuitos de terra (<i>instalações de estaleiro</i> , por exemplo)	TT		TN IT

Transformadores de Potência

MANUEL BOLOTINHA

Sobre a obra

A energia eléctrica, desde a sua origem até aos consumidores finais, sofre diversas transformações do nível de tensão, que se realizam nas subestações e postos de transformação, onde a tensão é elevada ou reduzida.

A operação de modificação do nível da tensão é feita pelos **transformadores de potência**, que desempenham um papel chave no transporte e distribuição de energia.

Esta obra tem por objectivo dotar os profissionais do sector eléctrico na área da energia e os estudantes finalistas do curso de Engenharia Electrotécnica de uma ferramenta prática, complementada por conceitos teóricos devidamente apresentados e enquadrados, que lhes permita um conhecimento mais profundo desta máquina eléctrica – princípio de funcionamento, tipos, características e componentes, aplicações e tipos de defeitos e as proteções que devem ser utilizadas – e projetar, construir e manter instalações eléctricas com transformadores de potência.

Sobre o autor

Manuel Bolotinha, MSc, licenciou-se em 1974 em Engenharia Electrotécnica (Ramo de Energia e Sistemas de Potência) no Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa (IST/UL), onde foi Professor Assistente, e obteve o grau de Mestre em Abril de 2017 em Engenharia Electrotécnica e de Computadores na Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL).

Tem desenvolvido a sua actividade profissional nas áreas do projecto, fiscalização de obras e gestão de contratos de empreitadas designadamente de projectos de geração e transporte de energia, instalações industriais e infra-estruturas de distribuição de energia, aero-portuárias e ferroviárias, não só em Portugal, mas também em África, na Ásia e na América do Sul.

Membro Sénior da Ordem dos Engenheiros, tendo conduzido cursos de formação, de cujos manuais é autor, em Portugal, África e Médio Oriente.

É também autor de diversos artigos técnicos publicados em Portugal e no Brasil e de livros técnicos, em português e inglês, e tem proferido palestras na OE, ANEP, FCT-UNL, IST e ISEP.

Parceiro de Comunicação

o electricista 

Também disponível em formato e-book



www.engebook.pt



engebook