

## Capítulo V

# Transformadores de aterramento Parte I

*Paulo Fernandes Costa\**

Os transformadores de aterramento são aplicados em muitas situações onde o arranjo do sistema elétrico exige que seja criado um ponto de aterramento do neutro adicional, ou simplesmente criar este ponto quando de sua inexistência.

Em função do que foi estudado nos quatro artigos anteriores, não se recomenda que um sistema elétrico trifásico industrial seja mantido sem aterramento do neutro, pois, durante períodos de faltas fase-terra existe a possibilidade real de ocorrência de sobretensões transitórias que podem danificar a isolação de motores, transformadores, cabos, bem como de outros componentes importantes.

Outra razão para se implementar o aterramento do neutro se relaciona com as dificuldades de se identificar o local da falta fase-terra em sistemas com neutro isolado flutuante, isto é, neutro sem conexão à terra.

De fato, quando ocorre uma falta fase-terra nestes sistemas a corrente é somente de natureza capacitiva, de baixo valor e, portanto, de difícil detecção e de identificação do local de sua ocorrência.

Para sistemas elétricos industriais foi mostrado que a melhor opção é a de utilizar resistores de

baixo valor ôhmico em média tensão e resistores de alto valor ôhmico em baixa tensão.

Para sistemas de potência de alta tensão (SEP), a prática mais comum é a de aterrar o neutro solidamente, o que é vantajoso para a isolação bem como para a aplicação de para-raios nestes sistemas. A isolação dos SEP é um dos itens de maior peso no seu custo e geralmente é definida pelas sobretensões que podem ocorrer nos mesmos, entre as quais são importantes aquelas que ocorrem durante períodos de falta à terra, que são classificadas como “sobretensões transitórias” e “sobretensões temporárias”. Ambos os tipos são controlados pelo aterramento do neutro.

Outro motivo para se adotar sistema solidamente aterrado nos SEP, se prende à facilidade de detecção da falta fase-terra, uma vez que, com o sistema solidamente aterrado, obtemos baixo valor da impedância de sequência zero, que é importante fator de controle do valor do curto fase-terra. A presença de impedância proposital no neutro dos SEP, somada com as impedâncias naturais de retorno do curto fase-terra, principalmente das resistências de pé de torre das linhas de transmissão, pode reduzir significativamente o valor do curto em questão, e comprometer a operação de proteções

importantes, como a dos relés de distância de falta fase-terra.

Observa-se que nos sistemas elétricos industriais este raciocínio não se aplica, pois o retorno do curto fase terra é garantido pelo sistema de aterramento (malha de terra industrial) que se estende por toda a planta e garante reduzida impedância de retorno. Estes sistemas podem, portanto, ser aterrados por meio de resistores.

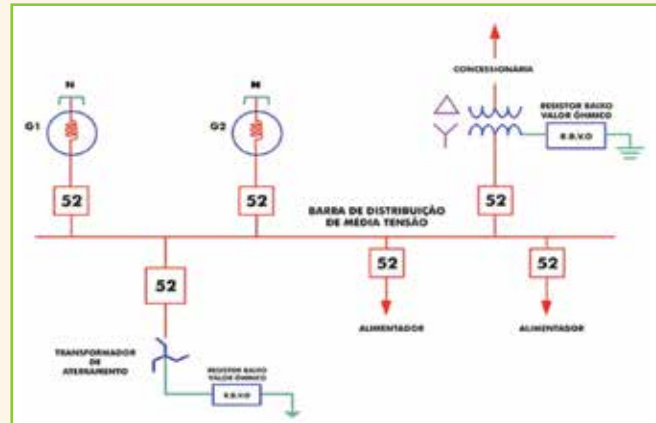
Do exposto, justifica-se plenamente a necessidade de conhecermos a aplicação dos transformadores de aterramento, cujo propósito é o de criar o ponto neutro em um sistema trifásico quando é importante e se deseja fazê-lo.

Este artigo e o próximo estão dedicados ao estudo dos transformadores de aterramento e juntamente com os quatro capítulos anteriores deste fascículo, completam a série de seis artigos que buscam fornecer informações importantes sobre o aterramento do neutro, principalmente nos aspectos voltados para aplicação industrial.

### **Casos típicos de necessidade dos transformadores de aterramento**

Para iniciar o estudo sobre transformadores de aterramento,

vamos considerar duas situações reais de sua aplicação. A primeira delas, já considerada no artigo anterior, é vista na Figura 1, a seguir.



**Figura 1 – Aplicação de transformador de aterramento na indústria.**

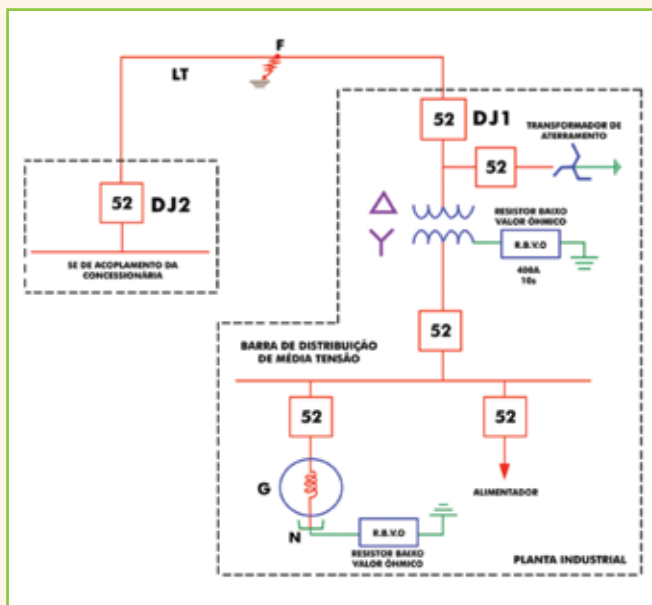
Podemos verificar que a aplicação de um resistor de aterramento na barra principal evita a instalação de resistores de baixo valor ôhmico nos neutros dos geradores G1 e G2, mantendo o sistema elétrico industrial com, no máximo, dois pontos de aterramento, o que é ideal, uma vez que simplifica o esquema de proteção de falta à terra e

reduz o valor da corrente total da falta de 1/3, no caso, da presença de dois geradores.

Por exemplo, se não fosse utilizado transformador de aterramento e o valor necessário para controlar a sobretensão transitória com o sistema industrial operando com, no mínimo, um gerador, for de 200 A e o sistema elétrico da concessionária puder também alimentar o sistema na ausência de qualquer gerador, seria necessário utilizar resistor de 200 A em todos os neutros (G1, G2, e transformador de acoplamento com a concessionária), totalizando 600 A de falta fase-terra.

Com a aplicação do resistor de aterramento na barra, conforme mostra a Figura 2, serão necessários apenas dois resistores, totalizando 400 A de falta à terra. Naturalmente que, quanto maior o número de geradores presentes na planta industrial, maior o ganho na aplicação do transformador de aterramento na barra, em termos de redução da corrente total de falta à terra.

Outra situação, bastante comum, está delineada na figura 2B a seguir, onde temos a interface de um sistema industrial com cogeração, e no qual o transformador de acoplamento com a concessionária possui a conexão estrela do lado da indústria e conexão triângulo do lado da concessionária. Verifica-se que, estando os sistemas de cogeração e da concessionária em paralelo, um curto circuito fase-terra no ponto F indicado provoca a abertura do disjuntor DJ2 na subestação da concessionária (que possui neutro solidamente aterrado), enquanto que o disjuntor DJ1 na planta industrial se mantém fechado devido ao fato de não existir ponto de aterramento do neutro no transformador

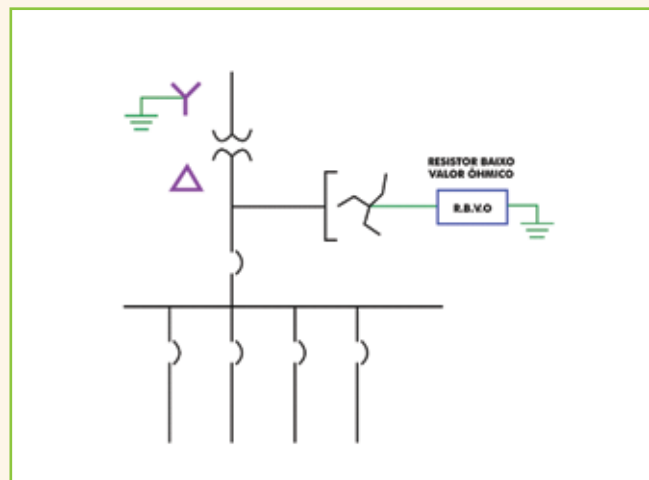


**Figura 2 – Aplicação de aterramento no lado da concessionária.**

TR1, no lado da conexão triângulo.

A solução correta neste caso consiste em criar um ponto de aterramento no lado da conexão triângulo, utilizando um transformador de aterramento com o neutro solidamente aterrado, conforme indicado na Figura 2. Este procedimento evita a ocorrência de sobretensões transitórias na linha/sistema que executa a conexão entre os disjuntores DJ1 e DJ2 após abertura do disjuntor DJ2 para curto no ponto F.

A solução para o caso do transformador de acoplamento ser de conexão contrária à examinada, isto é, triângulo no lado da indústria e estrela aterrada no lado da concessionária, seria instalar o transformador de aterramento no lado da conexão triângulo, isto é, lado da indústria, como visto na Figura 3. Neste caso o neutro do transformador de aterramento será aterrado por meio de resistor, devido às necessidades do sistema elétrico industrial.



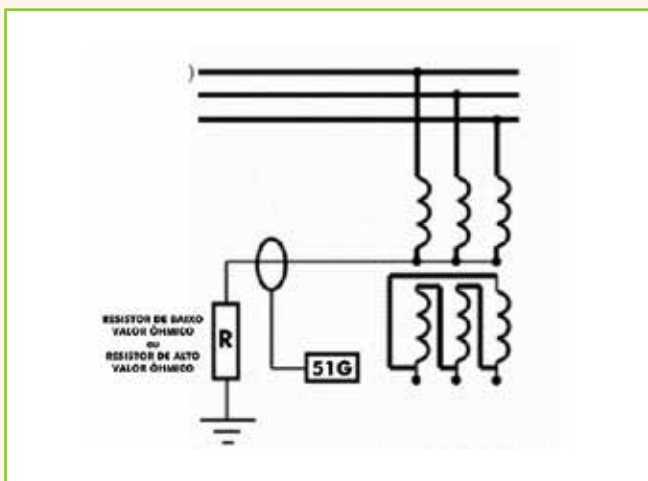
**Figura 3 – Aplicação de aterramento no lado da indústria.**

Observa-se que algumas concessionárias padronizam este tipo de conexão na interface com os sistemas elétricos industriais, a fim de eliminar as sobretensões transitórias e garantir a operação da proteção fase-terra nos dois lados da conexão, isto é abertura dos dois disjuntores DJ1 e DJ2 mostrados na Figura 2.

### Tipos de transformadores de aterramento

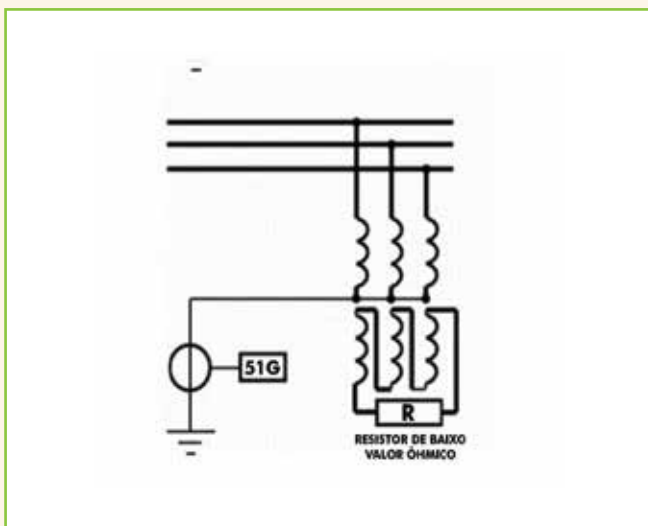
Embora existam outros tipos, atualmente, são utilizadas três conexões básicas de transformadores de aterramento para criação do neutro em um sistema elétrico trifásico, a saber:

- Conexão estrela com neutro acessível no lado primário e triângulo no lado secundário. O enrolamento em triângulo é utilizado apenas para compensação das correntes de sequência zero, não sendo utilizado para cargas. O neutro acessível do lado em estrela é utilizado para aterramento sólido ou através de resistor. Ver Figura 4.



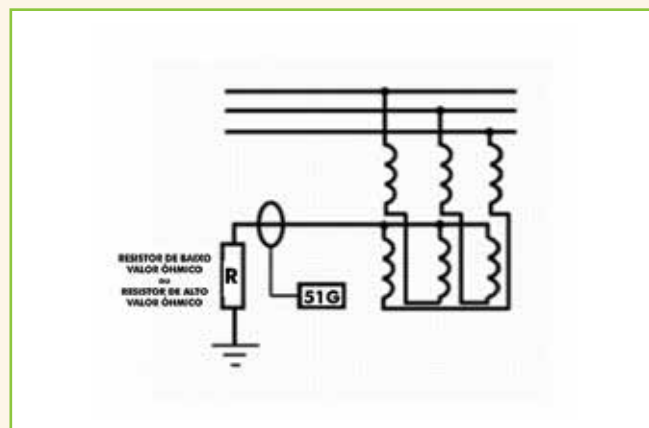
**Figura 4 – Transformador de aterramento conexão estrela-triângulo.**

- Conexão estrela com neutro acessível no lado primário e delta aberto no lado secundário. O lado em estrela deve neste caso ser sempre solidamente aterrado, enquanto que o lado em delta aberto só pode ser utilizado para o caso de aterramento através de resistor, pois se for fechado, voltamos ao caso anterior. Observa-se que o resistor fica instalado entre os terminais do delta aberto (Figura 5).



**Figura 5 – Transformador de aterramento conexão estrela-delta aberto.**

- Conexão denominada “zigzague”. Esta é uma conexão especial que utiliza um transformador trifásico, na realidade um reator trifásico, com duas bobinas por fase, conectadas de uma forma especial, cruzada, que caracteriza o nome do transformador. Esta conexão será alvo de considerações adicionais, devido a sua importância.



**Figura 6 – Transformador de aterramento conexão “zigzague”.**

Qualquer dos tipos de conexão, quando projetado corretamente funciona bem, sendo apenas uma questão de custo. Por exemplo, pode-se dispor na instalação de um transformador na conexão estrela- triângulo que se aproveitado, reduz os custos.

A conexão estrela aterrada com o resistor conectado nos terminais do delta aberto permite utilizar um resistor de baixa tensão, o que pode reduzir os custos. Em termos de custo de aquisição de um transformador de aterramento novo, em geral, o de conexão zigzague é o de menor custo.

### Operação dos transformadores e aterramento

Qualquer transformador de aterramento deve em princípio oferecer um caminho de baixa impedância para as correntes de sequência zero que circulam durante a falta à terra. Admitindo-se a existência de um curto fase-terra na fase A do sistema, com o mesmo sem carga, temos as seguintes condições de contorno para as correntes envolvidas:

$$I_{FT} = I_A, I_B = 0, I_C = 0$$

$I_{FT}$  é a corrente de fase-terra, e  $I_A, I_B, I_C$  são as correntes de nas fases A, B, C, respectivamente.

A definição de corrente ou componente de sequência zero significa que a mesma é a média aritmética das três correntes de fase, ou seja:

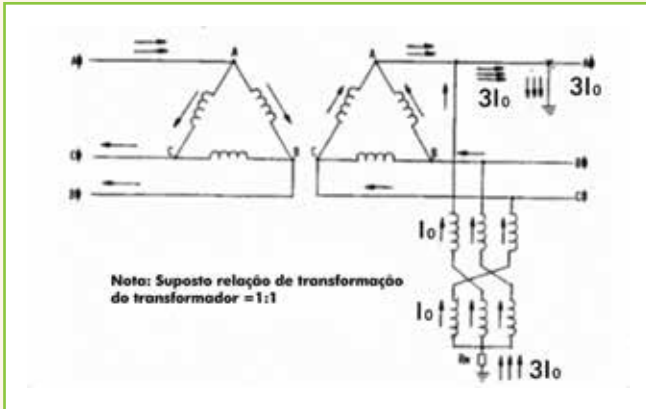
$$I_0 = 1/3 (I_A + I_B + I_C)$$

Considerando as condições de contorno:

$$I_0 = 1/3 (I_A) = 1/3 (I_{FT})$$

$$I_{FT} = 3I_0$$

Concluimos que, durante um curto fase-terra, a corrente  $3I_0$  circula do ponto de falta pelo neutro do transformador de aterramento, distribuindo-se no circuito de acordo com sua topologia, conforme mostra a Figura 7:



**Figura 7 – Circulação da corrente de sequência zero  $3I_0$ .**

Observam-se, no sistema da Figura 7, no qual foi adotado um transformador de aterramento na conexão “zig-zague”, os seguintes aspectos importantes:

a) A corrente de falta, igual a três vezes a corrente de sequência

zero, entra pelo ponto de aterramento criado pelo transformador de aterramento (com ou sem resistor) e se divide pelas três fases do mesmo, isto é, por cada fase ou perna do transformador de aterramento circula somente um terço da corrente total de falta, que é igual ao valor da corrente de sequência zero ( $I_0$ ). Isto acontece em qualquer tipo de transformador de aterramento, independentemente da sua forma construtiva.

b) Em termos de tensão, podemos, utilizando a Figura 7, extrair as seguintes conclusões que são importantes para se calcular a potência do transformador de aterramento para qualquer tipo de transformador que seja utilizado.

Considerando o neutro do transformador de aterramento aterrado por meio de resistor, podem ser obtidas as seguintes equações, em que  $V_{AT}, V_{BT}, V_{CT}$  são as tensões de fase para terra;  $V_{AN}, V_{BN}, V_{CN}$  são as tensões de fase para neutro e  $V_{NT}$  é a tensão de neutro para terra.

$$V_{AN} - V_{AT} + V_{NT} = 0$$

$$V_{BN} - V_{BT} + V_{NT} = 0$$

$$V_{CN} - V_{CT} + V_{NT} = 0$$

Considerando que  $V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} = 0$ , segue que:

$$3 V_{NT} = V_{AT} + V_{BT} + V_{CT}$$

$$V_{NT} = 1/3 (V_{AT} + V_{BT} + V_{CT}) = V_0$$

Conclui-se, pois, que a tensão de neutro para terra, ou o “deslocamento do neutro” como algumas vezes é denominada a tensão  $V_{NT}$ , é igual à tensão de sequência zero das tensões de fase para terra.

Para calcular  $V_0$  vamos considerar as equações de contorno de tensão correspondentes a um curto fase-terra na fase A, com o neutro aterrado por meio de resistor.

$$V_{AT} = 0, V_{BT} = V_{BA'}, V_{CT} = V_{CA'}$$

Considerando a sequência de fases  $V_{AB'}, V_{BC'}, V_{CA'}$  na qual  $V_{AB}$  é a referência, com ângulo zero, obtemos:

$$V_0 = 1/3(0 + V_{BA'} + V_{CA'}) = 1/3(0 - V_{AB} + V_{CA'})$$

Considerando  $V_{FF}$  como o módulo da tensão fase-fase e  $V_{FN}$  como módulo da tensão fase neutro, segue:

$$V_0 = 1/3(V_{FF} < 180^\circ + V_{FF} < 120^\circ) = 1/3(V_{FF} < 150^\circ)$$

$$V_0 = 1/3(3 V_{FN} < 150^\circ) = V_{FN} < 150^\circ$$

Este resultado mostra que o módulo da tensão de sequência zero das tensões de fase para terra é igual em módulo da tensão fase neutro.

### **Cálculo da potência dos transformadores de aterramento**

A potência do transformador de aterramento é definida em primeiro lugar pela potência desenvolvida por ele no momento do curto fase-terra denominada “potência instantânea” e em segundo lugar em função do tempo de operação desejado para o mesmo (10 segundos, 1 minuto, 5 minutos, 10 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas) que conduz a potência denominada “potência de curto tempo”, “potência de curta duração” ou “potência de carga”.

Se o aterramento é realizado por meio de resistor na indústria, em geral, o tempo de carga utilizado para o resistor é de 10 segundos, sendo adotado o mesmo para o transformador de aterramento. Em primeiro lugar, calcula-se a “potência instantânea” e, então, calcula-se a “potência de curto tempo”, utilizando-se um fator de redução em função do tempo de

carga.

A “potência instantânea” pode ser calculada considerando que, conforme mostra a Figura 7, circula a corrente de sequência zero em cada fase.

Portanto, considerando o circuito de sequência zero, podemos escrever que a potência instantânea ( $P_{INST}$ ) vale:

$$P_{INST} = 3V_0 I_0 = (3I_0)V_0$$

Porém,  $3I_0$  é igual à corrente de falta à terra  $I_{FT}$  e  $V_0$  é igual à tensão de fase terra  $V_{FN}$ .

$$P_{INST} = I_{FT} V_{FN}$$

Para encontrar a potência instantânea em kVA, devemos considerar a corrente em Ampères e a tensão fase neutro em kV. Teremos então:

$$P_{INST}(\text{kVA}) = I_{FT} \text{ kV}_{FF} / \sqrt{3}$$

Em geral, o valor da corrente de falta à terra  $I_{FT}$ , é prefixado pelo projetista em função do sistema elétrico (industrial ou de potência). Para os sistemas elétricos industriais valem as recomendações fornecidas nos dois primeiros capítulos deste fascículo.

A potência de curto tempo PCT também em kVA será:

$$P_{CT}(\text{kVA}) = (I_{FT} \text{ kV}_{FF} / \sqrt{3}) / K = P_{INST}(\text{kVA}) / K$$

O fator K, que depende do tempo de carga, pode ser avaliado conforme tabela a seguir.

**TABELA I – FATOR K E TEMPO DE CARGA**

Tempo de carga	Fator K
10 segundos	10
1 minuto	4,7
5 minutos	2,8
10 minutos	2,5
30 minutos	1,8
1 hora	1,6
2 horas	1,4

### **Potência contínua do transformador de aterramento**

Além da potência de curta duração do transformador de aterramento convém fazer previsão para uma potência

permanente para acomodar correntes que circulam continuamente no neutro como aquelas geradas por chaveamentos de inversores de frequência.

Esta potência, em geral, varia de um mínimo de 3% da potência de curta duração até cerca de 10% dela.

### **Reatância do transformador de aterramento**

Além das potências permanentes e de curta duração do transformador de aterramento deve ser fornecida também a sua reatância em Ohms para que seja possível fabricá-lo.

Esta questão será tratada no próximo artigo, juntamente com outros aspectos também importantes para aplicação de transformadores de aterramento.

### **Referências**

[1] Costa, P.F; *“Capítulo I – Aspectos importantes da escolha do tipo de resistor de aterramento do neutro nos sistemas elétricos industriais” Revista O Setor Elétrico, Julho 2014.*

[2] Costa, P.F; *“Capítulo II - Avanços na especificação e aplicação dos resistores de aterramento do neutro dos sistemas elétricos industriais em média tensão” Revista O Setor Elétrico, Agosto 2014.*

[3] Costa, P.F; *“Capítulo III - Avanços na especificação e aplicação dos resistores de aterramento do neutro dos sistemas elétricos industriais em baixa tensão”, Revista O Setor Elétrico, Setembro 2014.*

[4] Costa, P.F; *“Capítulo IV - Aterramento de sistemas elétricos industriais de média tensão com a presença de cogeração” Revista O Setor Elétrico, Outubro de 2014.*

---

*\*PAULO FERNANDES COSTA é Engenheiro Eletricista e Msc pela Universidade Federal de Minas Gerais, professor aposentado dos cursos de engenharia elétrica da UFMG e CEFET-MG e diretor da Senior Engenharia e Serviços LTDA, Belo Horizonte-MG. É palestrante e autor de vários artigos na área de aterramento, proteção, segurança, qualidade de energia e sistemas elétricos industriais em geral. Atua como consultor, bem como na área de desenvolvimento tecnológico, com experiência de mais de 40 anos. E-mail: pcosta@seniorengenharia.com.br.*

#### **Continua na próxima edição**

Confira todos os artigos deste fascículo em [www.osetoreletrico.com.br](http://www.osetoreletrico.com.br)  
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail [redacao@atituedeitoria.com.br](mailto:redacao@atituedeitoria.com.br)