



**XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro
Rio de Janeiro - RJ - Brasil**

Luís Fernando Dias	William A. de Souza	Ricardo Araujo dos Santos
CEMIG Distribuição S.A.	CEMIG Distribuição S.A.	CEMIG Distribuição S.A.
lfdias@cemig.com.br	wasouza@cemig.com.br	raraujo@cemig.com.br

Silverio Visacro Filho	Alberto Resende De Conti	Fernando Henrique Silveira
Universidade Federal de Minas Gerais	Universidade Federal de Minas Gerais	Universidade Federal de Minas Gerais
lrc@cpdee.ufmg.br	conti@cpdee.ufmg.br	silveira@cpdee.ufmg.br

Avaliação dos Riscos a Consumidores Associados à Operação Não-intencional de Alimentadores Rurais como Sistemas Monofilares com Retorno pela Terra

Palavras-chave

Aterramentos Elétricos
Furto do Neutro
Redes de Distribuição Rurais
Segurança de Consumidores
Sistemas MRT Não-intencionais

Resumo

No presente artigo apresenta-se uma análise do efeito do furto do condutor neutro de um ramal de alimentação monofásico nos potenciais de passo, de toque e transferido associados ao sistema de aterramento de um transformador monofásico que alimenta um consumidor rural exclusivo. Nas análises realizadas, foram considerados transformadores com potências de 5 a 15 kVA em diferentes condições de operação, supondo-se configurações de aterramento tipicamente empregadas em ramais de alimentação rurais com neutro multi-aterrado. Os resultados obtidos, apresentados na forma de valores limites de resistividade do solo que levariam à operação segura das configurações analisadas, indicam que o furto do condutor neutro em redes monofásicas rurais e a consequente operação dessas redes como sistemas monofilares com retorno pela terra (MRT) não-intencionais pode expor consumidores a riscos consideráveis

associados a potenciais de passo, de toque e transferido. Isso indica que medidas devam ser tomadas para assegurar a continuidade do condutor neutro em redes rurais que pressupõem o seu uso, ou, alternativamente, que os aterramentos dessas redes sejam devidamente aprimorados de forma a garantir a sua operação segura em situações adversas.

1. Introdução

Um dos problemas encontrados pelas concessionárias brasileiras na operação de redes de distribuição de média tensão instaladas em áreas rurais consiste no grande número de ocorrências envolvendo o furto do condutor neutro. No caso de sistemas elétricos que adotam a filosofia de neutro contínuo e multi-aterrado, o furto do neutro faz com que a rede de distribuição rural passe a utilizar a terra como condutor de retorno. No caso particular de consumidores rurais exclusivos atendidos por ramais monofásicos em que o padrão de entrada do consumidor é instalado no poste do transformador, o circuito de alimentação passa a ser fechado através do aterramento do transformador. Caso o consumidor também possua sistema de aterramento próprio, a corrente de carga passa a se dividir entre os aterramentos do transformador e do consumidor, retornando pela terra. Em ambos os casos, configura-se a operação involuntária do trecho afetado pelo furto do neutro como um ramal monofilar com retorno pela terra (MRT).

Embora não tenha sido projetado para operar dessa maneira, não é incomum que um ramal de alimentação rural multi-aterrado continue a funcionar sem grandes prejuízos técnicos mesmo na ausência do condutor neutro. Isso pode dificultar a identificação do problema em questão e condicionar trechos do sistema a operar como ramais MRT não-intencionais por longos intervalos de tempo. Esse quadro pode configurar situação de risco, pois a circulação da corrente de carga pelos aterramentos do transformador e do consumidor gera potenciais de passo, de toque e transferidos que em certas condições podem exceder os limites de segurança toleráveis por seres humanos. Como esses parâmetros não são geralmente conhecidos pelas concessionárias de energia elétrica, verifica-se a necessidade de se avaliar o desempenho de configurações de aterramento tipicamente empregadas em redes de distribuição rurais com neutro multi-aterrado no contexto de seu uso inadvertido em ramais MRT não-intencionais.

No presente artigo, esse problema é avaliado por meio de simulações computacionais nas quais a aproximação potencial constante é utilizada para estimar a resistência de aterramento e os gradientes de potencial no solo associados a duas diferentes configurações de eletrodos empregadas nos aterramentos do padrão de entrada de um consumidor rural exclusivo e do transformador que o alimenta. As avaliações realizadas supõem duas diferentes topologias de rede operando como ramais MRT não-intencionais e a utilização de transformadores monofásicos de diferentes potências. Os resultados obtidos indicam os valores limites de resistividade do solo que levariam à operação segura do sistema avaliado como MRT não-intencional em termos de potenciais de toque, passo e transferidos associados aos aterramentos do transformador e do consumidor.

Os resultados aqui apresentados se inserem no contexto de avaliações preliminares realizadas no projeto de P&D “Desenvolvimento de soluções tecnológicas alternativas para eletrificação rural no contexto da universalização do atendimento da energia e do freqüente furto de condutor neutro”, realizado em parceria entre o LRC/UFMG (Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas) e a CEMIG Distribuição S.A..

2. Desenvolvimento

1.1 Sistema Avaliado

A grande dispersão das unidades consumidoras em regiões rurais e a baixa potência típica das cargas faz

com que o fornecimento de energia a consumidores rurais usualmente demande o emprego de longos ramais monofásicos e a utilização de transformadores monofásicos com potência típica de 5 a 15 kVA (SILVA, 2006). Por questões operacionais, em grande parte do território brasileiro as redes de média tensão monofásicas rurais são projetadas para trabalhar com condutor neutro multi-aterrado. No entanto, tem-se verificado o frequente furto do condutor neutro, o que faz com que os aterramentos do transformador e do consumidor passem a constituir parte ativa do circuito de retorno. Como tais aterramentos não foram projetados para atuar com essa finalidade, faz-se necessário dimensionar os riscos a que consumidores rurais possam estar sujeitos quando da operação de ramais de alimentação rurais como sistemas MRT não-intencionais.

Para avaliar essa questão, duas situações são contempladas neste artigo. Em uma delas, ilustrada na Figura 1(a), supõe-se a operação de um ramal MRT não-intencional no qual um único aterramento é compartilhado pelo transformador e pelo consumidor. Essa configuração, a menos da ausência do neutro da média tensão, pode ser considerada representativa dos ramais de alimentação rurais encontrados na área de concessão da CEMIG no estado de Minas Gerais. A segunda situação avaliada neste artigo, ilustrada na Figura 1(b), consiste na operação de um ramal MRT não-intencional no qual o padrão do consumidor é instalado a uma distância de 30 m do poste do transformador, com aterramentos individuais para o transformador e o consumidor interconectados pelo neutro no circuito de baixa tensão. Essa condição pode ser considerada representativa, na área de concessão da CEMIG, de situações em que dois ou mais consumidores são alimentados por um único transformador, e também de novas redes rurais.

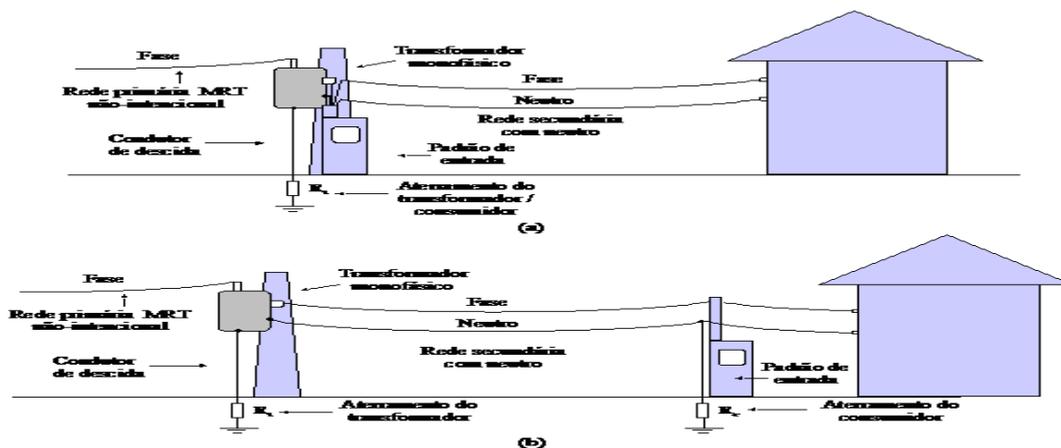


Figura 1 – Diagrama esquemático do circuito de alimentação de consumidor rural exclusivo por meio de rede MRT não-intencional (a) com aterramento único para o transformador e o padrão do consumidor e (b) com aterramentos distintos para o padrão e para o transformador.

Nas avaliações aqui apresentadas, supôs-se que o aterramento do transformador correspondesse à configuração 1x3H ilustrada na Figura 2(a), que consiste em 3 hastes paralelas com comprimento de 2,4 m enterradas a 0,5 m de profundidade e separadas 3 m entre si. Essa configuração é tipicamente utilizada por concessionárias brasileiras no aterramento de transformadores e demais equipamentos. Para o aterramento do consumidor, quando presente, supôs-se a utilização da configuração 1x1H ilustrada na Figura 2(b), que consiste em uma haste vertical com comprimento de 2,4 m, enterrada a uma profundidade de 0,5 m.



(a) Configuração 1x3H

(b) Configuração 1x1H

Figura 2 – Vista lateral das configurações de aterramento avaliadas neste estudo.

Nos estudos realizados, foram considerados transformadores monofásicos com potências de 5, 10 e 15 kVA com tensão nominal primária de 7,967 kV. Segundo dados recentes, transformadores com essas características correspondem à grande maioria dos transformadores monofásicos instalados na área rural de concessão da CEMIG. Transformadores monofásicos com potências de 25 e 37,5 kVA também são utilizados na área de concessão da CEMIG, porém em menor proporção. Por essa razão, optou-se por não analisá-los neste trabalho. A tabela 1 indica as correntes nominais dos transformadores avaliados.

Tabela 1 – Correntes nominais de transformadores monofásicos de 5, 10 e 15 kVA

Potência do Transformador	5 kVA	10 kVA	15 kVA
Corrente nominal (A)	0,628	1,255	1,888

1.2 Modelagem computacional do sistema de aterramento

O desempenho das configurações de aterramento 1x1H e 1x3H no contexto das topologias de rede ilustradas na Figura 1 foi avaliado com o emprego de um modelo computacional implementado pela equipe no LRC/UFG. Neste modelo, são parâmetros de entrada a resistividade do solo, a configuração geométrica dos eletrodos de aterramento e a corrente total injetada. Como os sistemas de aterramento avaliados possuem pequena dimensão e são analisados em baixa frequência, é razoável supor, sem erros consideráveis, que todos os eletrodos que o compõem constituam uma equipotencial. A partir dessa hipótese, conhecida como aproximação potencial constante, e da utilização da teoria eletromagnética, é possível escrever um sistema matricial contendo elementos resistivos próprios e mútuos em que as incógnitas do problema são as correntes associadas aos eletrodos. Uma vez determinadas essas correntes, pode-se calcular a resistência de aterramento da configuração analisada, a elevação de potencial total da malha de aterramento em relação ao infinito e o gradiente de potencial na superfície do solo (VISACRO, 2002). No caso particular das análises apresentadas neste artigo, supôs-se a injeção de uma corrente normalizada de 1 A nas configurações de aterramento analisadas para um solo de 1000 W.m. Os valores de resistência de aterramento, elevação de potencial em relação ao infinito e de gradiente de potencial obtidos para essa condição normalizada foram em seguida ajustados para as condições de corrente e de resistividade do solo específicas avaliadas nos diversos itens deste texto.

1.3 Critérios de avaliação dos limites de segurança associados aos potenciais de toque, passo e transferidos

A viabilidade de um sistema MRT depende do atendimento de critérios que possibilitem a operação segura do sistema de aterramento em termos de potenciais de toque, passo e transferido, em condições de regime

permanente, faltas temporárias e de descargas atmosféricas (SILVA, 2006). Naturalmente, esses mesmos critérios devem ser utilizados como base para a avaliação do desempenho das configurações de aterramento 1x1H e 1x3H no contexto de sua aplicação nos ramais MRT não-intencionais ilustrados na Figura 1. No presente estudo, busca-se delimitar o valor crítico de resistividade do solo a partir do qual a utilização dessas configurações de aterramento específicas passa a oferecer riscos para seres humanos, focando na operação do sistema em regime permanente. Análises referentes à operação do sistema em condição de faltas temporárias ou submetido aos efeitos de descargas atmosféricas não são apresentadas por se encontrarem atualmente em curso. Os critérios adotados no presente artigo são brevemente discutidos a seguir.

1.3.1. Potenciais de toque em regime permanente

Um dos riscos inerentes à operação de sistemas MRT não-intencionais reside no fato de os condutores de descida que conectam o transformador e o neutro do consumidor aos seus respectivos aterramentos servirem de caminho de retorno para a corrente do circuito primário. Como consequência, verifica-se uma diferença de potencial não nula entre o condutor de descida e o solo na vizinhança do poste. Esta diferença de potencial, chamada de potencial de toque, pode causar choque elétrico em uma pessoa que encoste inadvertidamente no condutor de descida com pelo menos uma de suas mãos. O valor limite do potencial de toque V_T que um ser humano pode suportar pode ser calculado com a expressão

$$V_T = (1000 + 1,64\rho)I_{CH} \quad (1)$$

onde r é a resistividade do solo, representado como um meio homogêneo, e I_{CH} é a corrente que circula no corpo humano em decorrência do contato com o condutor de descida (SILVA, 2006). A equação (1) leva a resultados essencialmente idênticos à equação proposta pela norma IEEE 80 (2000), na qual o fator multiplicativo de 1,64, obtido de forma rigorosa supondo-se que os pés possuam aterramento equivalente ao de discos metálicos espaçados em uma distância de 1 m entre si, é substituído por 1,5 para mais fácil referência.

Para o estudo dos potenciais de toque associados a um sistema de aterramento MRT não-intencional em regime permanente, supõe-se que I_{CH} em (1) corresponda ao valor limite de corrente que permite que uma pessoa consiga por si só largar a parte condutora com a qual mantém contato, ou deixar a região na qual exista o gradiente de potencial que cause a passagem dessa corrente por seu corpo. No presente texto, considera-se $I_{CH}=10$ mA (IEEE STD. 80, 2000).

A partir de (1), pode-se estimar o limite superior de resistividade do solo a partir do qual o potencial de toque no condutor de descida que conecta o aterramento do transformador ao solo excede o valor tolerável por seres humanos. A expressão resultante é dada por

$$\rho = \frac{10^6 I_{CH}}{V_T I - 1640 I_{CH}} \quad (2)$$

onde V_T corresponde à diferença de potencial máxima calculada em um raio de 1 m a partir do ponto de injeção de corrente junto ao poste do transformador considerando uma corrente de 1 A e um solo de resistividade $r=1000$ W.m, I corresponde à corrente injetada no aterramento do transformador, obtida como um múltiplo dos valores apresentados na Tabela 1 dependendo da condição de operação avaliada e da potência do transformador, e $I_{CH}=10$ mA para operação em regime permanente.

1.3.2. Potenciais de passo em regime permanente

Além de problemas associados aos potenciais de toque, a circulação de correntes nos aterramentos do transformador e do consumidor pode colocar seres humanos em situação de risco pela criação de gradientes de potencial na superfície do solo. Uma maneira de avaliar esse risco consiste no cálculo do potencial de passo, definido como a diferença de potencial que surge entre os pés de uma pessoa localizada na vizinhança de um sistema de aterramento quando seus pés estão espaçados em uma distância de 1 m. Uma estimativa do valor limite do potencial de passo que um ser humano é capaz de suportar na vizinhança do aterramento de um sistema MRT não-intencional pode ser obtida com expressão (SILVA, 2006)

$$V_P = (1000 + 5,93 \rho) I_{CH} \quad (3)$$

onde r é a resistividade do solo e I_{CH} é a corrente máxima que se admite circular no corpo humano em regime permanente, definida da mesma forma que na seção 2.3.1. A equação (3) leva a resultados essencialmente idênticos à equação apresentada na norma IEEE 80 (2000) para o cálculo do potencial de passo, em que o fator multiplicativo de 5,93 é arredondado para 6,0 para fácil referência.

A partir de (3), o limite superior de resistividade a partir do qual os potenciais de passo na superfície do solo excedem os valores toleráveis por seres humanos na condição de regime permanente pode ser obtido de

$$\rho = \frac{10^6 I_{CH}}{V_P I - 5930 I_{CH}} \quad (4)$$

onde V_P corresponde à tensão de passo máxima calculada na superfície do solo na vizinhança dos aterramentos do transformador e do consumidor considerando $r=1000 \text{ W.m}$ e uma corrente de 1 A, I corresponde à corrente injetada no aterramento do transformador, obtida como um múltiplo das correntes apresentadas na Tabela 1 em função da condição de operação avaliada e da potência do transformador, e $I_{CH}=10 \text{ mA}$ para operação em regime permanente.

1.3.3. Potenciais transferidos

Nos circuitos ilustrados na Figura 1, a corrente de carga do transformador se divide entre os aterramentos R_t e R_c (quando presente), causando uma elevação de potencial no neutro do circuito secundário que alimenta o consumidor. Como a unidade consumidora se encontra usualmente em ponto afastado do transformador e do padrão de entrada, pode-se afirmar que a diferença de potencial entre o neutro e a terra no interior da residência corresponde essencialmente à elevação de potencial total no sistema de aterramento. Caso essa elevação de potencial, denominada potencial transferido, exceda certo limite de segurança, o consumidor fica sujeito a acidentes causados pelo contato acidental com o condutor neutro no interior de sua residência.

O cálculo do potencial transferido pode ser realizado simplesmente com a expressão $V=RI$, onde R corresponde à resistência de aterramento da configuração analisada e I se refere à corrente injetada no aterramento, obtida como um múltiplo dos valores apresentados na Tabela 1 dependendo da condição avaliada e da potência do transformador. Supondo que R esteja diretamente relacionado à resistividade do solo por meio da relação $R=kr$, é possível estimar, a partir de (1), o valor limite de resistividade que assegura a circulação de uma corrente máxima I_{CH} menor que 10 mA em regime permanente no corpo humano. A expressão obtida é a seguinte

$$\rho = \frac{(1000 + 1,64\rho_s)I_{CH}}{kI} \quad (5)$$

onde r_s é a resistividade do solo no interior da residência. A fim de conferir às análises aqui apresentadas uma condição de maior severidade, supõe-se que o assoalho da residência seja constituído de cimento, utilizando-se $r_s=100$ W.m referente ao concreto molhado (IEEE STD.80, 2000, p.52).

2.Resultados e Análises

2.1Resistências de Aterramento

A Tabela 2 apresenta os valores de resistência de aterramento referentes às configurações apresentadas nas Figuras 1 e 2, calculados supondo-se uma resistividade do solo de 1000 W.m. Como se vê, a inclusão de uma haste de aterramento no padrão do consumidor a uma distância de 30 m do aterramento do transformador promove uma redução de aproximadamente 25% na resistência de aterramento associada à configuração de três hastes paralelas. Análises adicionais não apresentadas neste artigo comprovam que uma redução praticamente idêntica seria obtida caso o padrão de entrada estivesse posicionado a uma distância de 15 m a partir do poste do transformador.

Tabela 2 – Resistência de aterramento das configurações de eletrodos avaliadas.

Configuração	Resistência de aterramento R para $r=1000$ W.m	$R = kr$
1x3H compartilhada pelo transformador e padrão do consumidor	112,7 W	$k=0,1127 \text{ m}^{-1}$
1x3H no transformador / 1x1H no consumidor	85,2 W	$k=0,0852 \text{ m}^{-1}$

2.2Potenciais de Toque Associados à Operação de Transformadores de 5, 10 e 15 kVA

A figura 3 ilustra os valores limites de resistividade do solo que garantem a operação segura dos sistemas MRT não-intencionais ilustrados na Figura 1 em termos dos potenciais de toque associados ao condutor de descida no transformador. Os valores apresentados foram obtidos com o emprego da equação (2) considerando-se a injeção no solo de correntes com valores de 0 a 1,5 pu em regime permanente para transformadores de 5, 10 e 15 kVA.

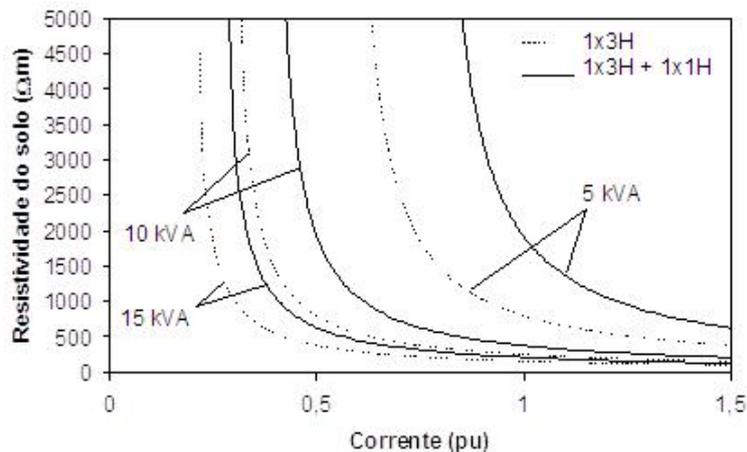


Figura 3 – Valores máximos de resistividade do solo que permitem a operação segura de sistema MRT não-intencional em termos de potenciais de toque nos condutores de descida de transformadores de 5, 10 e 15 kVA.

Analisando as curvas apresentadas na Figura 3, percebe-se uma acentuada variação no valor limite da resistividade do solo em função da corrente de operação do transformador. Considerando, por exemplo, o transformador de 5 kVA com aterramento único (configuração 1x3H), percebe-se que sua operação no contexto de um sistema MRT não-intencional em condições próximas à nominal só seria segura, em termos dos potenciais de toque no condutor de descida que conecta o transformador ao seu aterramento, em solos com resistividade inferior a 800 W.m. Esse valor sofre uma redução acentuada caso o transformador opere com uma corrente de sobrecarga de 1,5 pu, caindo para aproximadamente 370 W.m, e se eleva para valores superiores a 5000 W.m para uma corrente de operação de 0,5 pu. Isso indica que a operação do circuito da Figura 1(a) como MRT não-intencional pode submeter consumidores a riscos associados a potenciais de toque em regiões com solos de resistividade elevada ou mesmo em solos com resistividades médias ou baixas caso se considerem condições de leve sobrecarga ou próximas à nominal.

Ainda para o caso do transformador com potência de 5 kVA, se for considerada a presença de um aterramento adicional no consumidor com a configuração 1x1H, situação correspondente à Figura 1(b), os valores limites de resistividade do solo que permitiriam a operação segura do sistema avaliado como MRT não-intencional se tornam menos restritivos se comparados com os limites obtidos para a situação ilustrada na Figura 1(a). Isso ocorre porque a inclusão de um aterramento adicional no consumidor causa uma redução global na resistência de aterramento equivalente vista a partir do transformador. Por exemplo, para a circulação da corrente nominal no primário do transformador, a operação do sistema avaliado como MRT não-intencional com aterramentos independentes no transformador e no consumidor seria segura para solos com resistividades inferiores a 1920 W.m, enquanto na situação em que há um único aterramento no transformador esta operação só seria segura para solos com resistividade inferiores a 800 W.m, aproximadamente, pelo menos no que se refere aos potenciais de toque no condutor de descida do transformador.

Com relação ao efeito da potência do transformador nos resultados obtidos, percebe-se que a utilização de transformadores de maiores potências cria uma condição menos favorável à operação segura do sistema analisado. Isso ocorre por causa do aumento da corrente injetada no sistema de aterramento à medida que se aumenta a potência do transformador. Como se vê na Figura 3, em condições próximas à nominal os potenciais de toque no condutor de descida do transformador só se manteriam em limites seguros para solos com resistividades inferiores à faixa de 140 – 370 W.m, dependendo da configuração de aterramento considerada. Isso sugere que a operação de transformadores de 10 e 15 kVA no contexto de sistemas MRT não-intencionais causados pelo furto do neutro da média tensão leva invariavelmente a condições de risco para consumidores e pessoal técnico, a não ser que o solo possua resistividade excepcionalmente baixa.

Como comentário adicional, vale notar que em muitas situações o condutor de descida é lançado no interior de postes de concreto circulares, o que a princípio poderia reduzir o risco de contato acidental por seres humanos. No entanto, não é possível afirmar que essa situação configuraria condição de operação segura, pois toda a ferragem do poste tende a adquirir o mesmo potencial do sistema de aterramento. Havendo porção exposta da ferragem do poste ou mesmo a redução da resistividade elétrica do concreto devido à presença de água da chuva, os riscos por potencial de toque associados seriam semelhantes, senão idênticos, àqueles verificados na situação de contato direto com o condutor de descida propriamente dito.

2.3 Potenciais de Passo Associados à Operação de Transformadores de 5, 10 e 15 kVA

A figura 4 ilustra os valores limites de resistividade do solo que garantem a operação segura dos sistemas MRT não-intencionais ilustrados na Figura 1 em termos dos potenciais de passo na vizinhança do sistema de aterramento. Os valores apresentados foram obtidos com o emprego da equação (4) considerando-se a injeção no solo de correntes de 0 a 1,5 pu associadas ao emprego de transformadores de 5, 10 e 15 kVA. No caso que considera a presença de um único ponto de aterramento junto ao transformador, situação ilustrada na Figura 1(a), o potencial de passo máximo foi verificado na vizinhança do ponto de injeção de corrente. No caso que considera aterramentos independentes para o transformador e o consumidor, ilustrado na Figura 1(b), os maiores gradientes de potencial no solo e por conseguinte os maiores potenciais de passo foram calculados na vizinhança do aterramento do padrão do consumidor. Esses foram os valores utilizados como referência na equação (4).

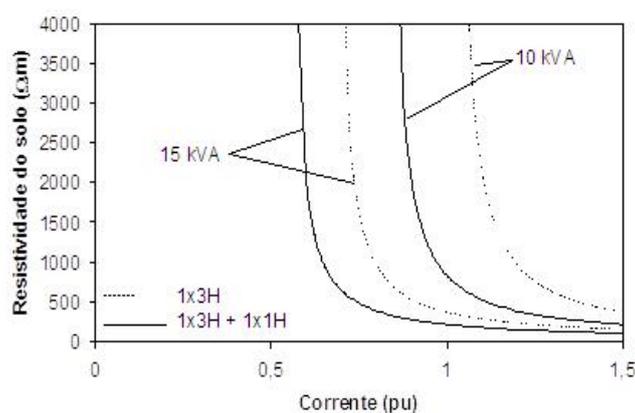


Figura 4 – Valores máximos de resistividade do solo que permitem a operação segura de sistema MRT não-intencional em termos de potenciais de passo na vizinhança dos aterramentos de transformadores de 10 e 15 kVA e do padrão do consumidor.

Analisando a Figura 4, percebe-se que a variação dos valores limites de resistividade do solo que levariam à operação segura dos sistemas MRT não-intencionais segundo o critério “potencial de passo” é similar àquela apresentada na Figura 3, referente ao critério “potencial de toque”. No entanto, uma comparação entre as curvas ilustradas nas Figuras 3 e 4 mostra que, em termos comparativos, os riscos associados aos potenciais de passo são comparativamente menores do que os riscos associados aos potenciais de toque. Isso fica claro, por exemplo, se for constatado que na Figura 4 não são apresentadas curvas referentes a transformadores de 5 kVA. Isso ocorre porque os níveis de corrente associados à operação do transformador de 5 kVA em regime permanente não foram suficientemente elevados para gerar potenciais de passo que colocassem em risco seres humanos.

Ainda que menos severos se comparados aos efeitos dos potenciais de toque, os riscos associados aos potenciais de passo na vizinhança dos sistemas de aterramento não podem ser desprezados para transformadores de potências 10 e 15 kVA. Por exemplo, se for considerada a circulação de uma corrente de 1 pu no primário de um transformador de 15 kVA, a operação segura desse transformador no contexto de um ramal MRT não-intencional ficaria condicionada à presença de solos com resistividade abaixo de 360 ou 210 W.m, dependendo da configuração de aterramento considerada. Tais valores de resistividade são improváveis, por exemplo, em grande parte do estado de Minas Gerais, onde tipicamente se verificam solos com resistividades elevadas. No caso de transformadores de 10 kVA, os valores limites de resistividade do solo se tornam um pouco menos restritivos. Ainda assim, caso dois pontos de aterramento sejam considerados como na Figura 1(b), a operação segura do ramal MRT não-intencional só seria possível, em termos de potenciais de passo, no caso de solos com resistividade abaixo de 800 W.m para a circulação de 1 pu no primário do transformador.

Vale frisar que os riscos associados aos potenciais de passo são maiores na situação ilustrada na Figura 1(b) (aterramentos independentes para o transformador e para o padrão do consumidor, configurações 1x3H e 1x1H, respectivamente) do que na situação ilustrada na Figura 1(a) (aterramento único no transformador, configuração 1x1H). Embora a princípio essa situação pareça um contra-senso, pois a inclusão da haste adicional no padrão do consumidor causa uma redução na resistência de aterramento equivalente vista a partir do transformador, esse fenômeno ocorre porque o gradiente de potencial na vizinhança da configuração 1x1H, que é um aterramento de eficiência limitada, é naturalmente mais acentuado do que na vizinhança da configuração 1x3H.

2.4 Potenciais Transferidos Associados à Operação de Transformadores de 5, 10 e 15 kVA

A figura 5 ilustra os valores limites de resistividade do solo que garantem a operação segura dos sistemas MRT não-intencionais ilustrados na Figura 1 em termos dos potenciais transferidos. Os valores apresentados foram obtidos com o emprego da equação (5) considerando-se a injeção no solo de correntes de 0 a 1,5 pu associadas ao emprego de transformadores de 5, 10 e 15 kVA.

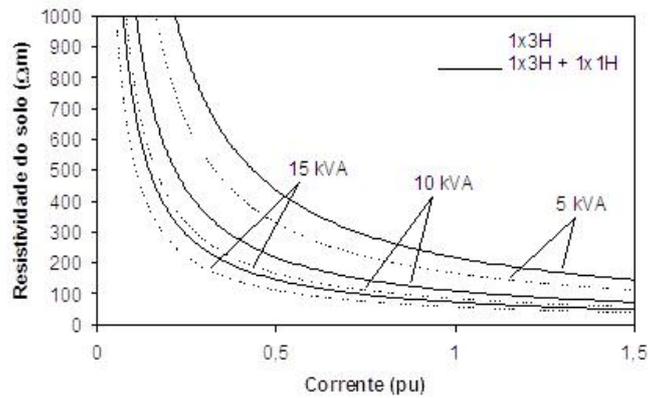


Figura 5 – Valores máximos de resistividade do solo que permitem a operação segura de sistema MRT não-intencional em termos de potenciais transferidos associados a transformadores de 5, 10 e 15 kVA.

Analisando a Figura 5 e comparando os resultados obtidos com aqueles apresentados nas Figuras 3 e 4, pode-se concluir que os potenciais transferidos caracterizam a condição mais restritiva para a operação segura das configurações da Figura 1 no contexto de ramais MRT não-intencionais. De fato, para a circulação de correntes de 1 pu no primário do transformador, condições seguras de operação só seriam verificadas para solos com resistividades inferiores a aproximadamente 200 W.m, no caso de transformadores de 5 kVA, e abaixo de 100 W.m, para transformadores de 10 e 15 kVA, dependendo das configurações de aterramento consideradas. Esses valores são muito inferiores, por exemplo, aos valores médios de resistividade do solo verificados em boa parte do território brasileiro. Esse quadro sugere que os potenciais transferidos constituem o parâmetro crítico referente à operação de redes rurais como sistemas MRT não-intencionais, podendo expor seres humanos a riscos consideráveis.

3. Conclusões

No presente artigo foi apresentada uma análise do efeito do furto do condutor neutro de um ramal de alimentação monofásico nos potenciais de passo, de toque e transferidos associados ao sistema de aterramento de um transformador monofásico que alimenta um consumidor rural exclusivo. Nas análises realizadas, foi considerado o emprego das configurações 1x3H (três hastes verticais paralelas alinhadas) e 1x1H (uma única haste vertical) nos aterramentos do transformador e do padrão do consumidor, supondo-se transformadores de potências de 5 a 15 kVA e a circulação de correntes de 0 a 1,5 pu em regime permanente no circuito primário. Como as configurações de aterramento avaliadas são tipicamente empregadas em ramais de alimentação rurais com neutro multi-aterrado, os resultados obtidos podem ser considerados representativos da operação não-intencional desses ramais como ramais monofilares com retorno pela terra (MRT), onde o retorno da corrente de carga se dá pelo sistema de aterramento do transformador e do consumidor.

Os resultados obtidos indicam que o atendimento a consumidores rurais exclusivos por ramais operando como MRT não-intencionais só seria completamente segura, nas condições avaliadas, para solos com resistividade muito reduzida, em geral inferior à faixa de 100 a 200 W.m. A obtenção de valores limites de resistividade do solo tão restritivos decorre dos riscos associados ao contato acidental de seres humanos com o neutro da baixa tensão no interior da residência, situação na qual a vítima seria submetida a toda a elevação de potencial desenvolvida no sistema de aterramento.

Os riscos associados aos potenciais de toque no condutor de descida que conecta o transformador ao seu aterramento são em geral menos severos se comparados com os riscos associados aos potenciais transferidos.

Ainda assim, para transformadores de 10 e 15 kVA a operação em correntes próximas à nominal só seria segura, em termos de tal parâmetro, para solos com resistividades inferiores à faixa de 140 a 370 W.m, dependendo da configuração de aterramento analisada. Esses limites são menos restritivos para transformadores de 5 kVA, exceto em condição de sobrecarga, situação na qual os valores de resistividade do solo que garantiriam a operação segura do sistema de aterramento em termos de potenciais de toque tenderia à faixa de 500 a 1000 W.m.

Dentre os parâmetros analisados, os riscos a seres humanos associados aos potenciais de passo desenvolvidos na vizinhança do sistema de aterramento em regime permanente são os menos críticos, ainda que seus efeitos não possam ser desprezados para transformadores de 10 e 15 kVA dependendo da resistividade do solo, da corrente de operação e da configuração de eletrodos de aterramento utilizada. Para transformadores de 5 kVA, que são utilizados com maior frequência na alimentação de consumidores rurais exclusivos, os resultados apresentados não indicaram quaisquer riscos associados a potenciais de passo devidos à operação do sistema em regime permanente, ao menos nas condições avaliadas.

Como conclusão final, pode-se afirmar que a operação de redes monofásicas rurais como ramais MRT não-intencionais decorrentes do furto do condutor neutro deve ser vista com cautela, pois, ao menos no caso particular da alimentação de consumidores rurais exclusivos, esta configuração não é capaz de satisfazer a requisitos mínimos referentes à manutenção de potenciais de passo, de toque e transferido seguros para seres humanos. Isso sugere que medidas devam ser tomadas para assegurar a continuidade do condutor neutro em redes rurais que pressupõem o seu uso, ou, alternativamente, que os aterramentos dessas redes sejam devidamente aprimorados de forma a garantir a sua operação segura em situações adversas. Em particular, na expansão das redes rurais e na recomposição de condutores neutros furtados a CEMIG tem utilizado condutor de aço aluminizado, ação esta que tem reduzido significativamente as ocorrências de furto do neutro.

4. Referências bibliográficas

IEEE STD. 80. IEEE guide for safety in ac substation grounding, Substations Committee of the IEEE Power Engineering Society, 2000.

SILVA, M. R. Avaliação de alternativa para eletrificação rural no contexto dos programas de universalização do atendimento de energia no Brasil. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

VISACRO, S. Aterramentos Elétricos – Conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento. São Paulo, Ed. Artliber, 2002, 159 p.
