

# ATERRAMENTO DE INSTALAÇÕES DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA: ABORDAGEM SOB O PRISMA DA COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA CONDUZIDA

**Philippe Pereira** – philipe.mineiro@gmail.com

**Helder de Paula** – helder@cpdee.ufmg.br

**Braz de Jesus Cardoso Filho** – braz.cardoso@ieee.org

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Elétrica

**José Antônio de Souza Brito** - jbrito@coelba.com.br

Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia - COELBA

**Resumo.** Os estudos de aterramento de instalações elétricas geralmente levam em conta somente aspectos de proteção contra faltas; contudo, em sistemas que utilizam conversores eletrônicos de potência, as análises devem contemplar também a circulação de correntes de alta frequência pelo terra induzidas pelas rápidas variações de tensão resultantes do processo de chaveamento dos dispositivos eletrônicos. Neste contexto, o presente artigo expõe as principais questões que são pertinentes quando da decisão sobre quais pontos devem ser aterrados num sistema de geração fotovoltaica, com enfoque na avaliação dessas correntes de terra. Além da análise do aterramento de proteção, diferentes configurações para o aterramento funcional da instalação serão comparadas, orientando o projetista sobre como se evitar ou reduzir a circulação indesejada de tais correntes, sem comprometer o funcionamento da instalação.

**Palavras-chave:** Geração Fotovoltaica, Aterramento, Compatibilidade Eletromagnética.

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos pontos fundamentais a ser considerado no que tange os estudos de compatibilidade eletromagnética é o aterramento dos equipamentos que compõem o sistema.

A necessidade da inserção de um estágio de conversão de energia elétrica nas instalações de geração fotovoltaica, com a presença de conversores de frequência, resulta na geração de fenômenos de interferência eletromagnética conduzida ao longo dos circuitos elétricos da instalação.

Tais fenômenos estão relacionados essencialmente aos rápidos tempos de subida e descida das chaves empregadas nos conversores. Os elevados  $dv/dt$ 's da tensão de modo comum sintetizada pela ponte inversora (tanto em sistemas de conversão monofásicos quanto trifásicos) excitam as capacitâncias parasitas distribuídas ao longo do sistema, induzindo a circulação de correntes de alta frequência pelos caminhos de retorno pela terra.

Nos estudos de acionamentos elétricos com inversores, a presença das correntes de terra está relacionada a diversos problemas, tais como a atuação indevida de dispositivos de proteção e as interferências em outros dispositivos.

Isso também ocorre no caso de sistemas de geração fotovoltaica, sendo que o fenômeno da circulação de correntes de modo comum se dá principalmente pelo fato de que há uma capacitância parasita entre a parte ativa dos módulos fotovoltaicos e as suas carcaças. Uma vez que tais peças metálicas devem ser devidamente aterradas por questões de segurança, fecha-se um o circuito de modo comum, estabelecendo-se assim a circulação de correntes de deslocamento. O fluxo de correntes em toda a instalação fotovoltaica, isto é, envolvendo todos os equipamentos que a constituem, manifesta-se tal como ilustrado.

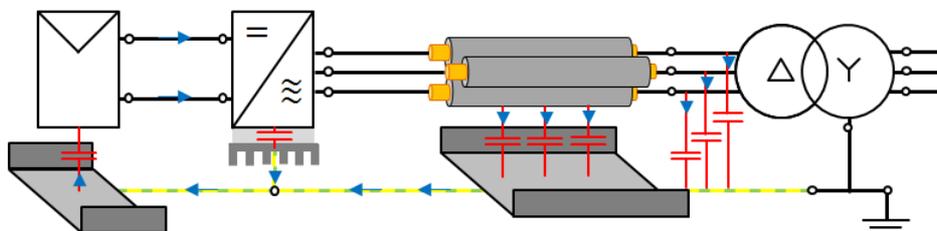


Figure 1 - Circulação de correntes de modo comum pela instalação fotovoltaica.

O valor de tais capacitâncias parasitas depende essencialmente da geometria do módulo fotovoltaico, sendo que há relatos na literatura de que há também uma dependência de outros fatores, tais como humidade, condições climáticas do local e presença de poeira ou sais cobrindo o painel (H. Schmidt 2003). Em particular, os módulos de filme fino apresentam valores elevados para essa capacitância devido ao fato de que neles há somente uma fina separação entre a parte ativa e o meio externo (SMA Solar Technology AG 2012).

A circulação de correntes de terra pelo circuito de modo comum pode ser confundida com a corrente que circula pelo terra nas condições de falta, de modo que os sistemas de proteção diferencial convencionais podem acabar atuando indevidamente ao detectarem essa corrente que inerentemente flui pelas placas. Alguns inversores contam com unidades de monitoramento de corrente residual (residual-current monitoring unit, RCMU) que utilizam diferentes estratégias para distinguir essas correntes que são induzidas por mecanismos diferentes (T. Tran-Quoc 2010).

Assim sendo, o aterramento de um componente pode alterar de maneira significativa o padrão de circulação do fluxo das correntes, de modo que se faz necessária uma análise dos efeitos decorrentes da mudança de configuração das conexões de aterramento.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é o de efetuar uma investigação sobre como tais correntes de modo-comum são alteradas para cada mudança nos pontos de aterramento e nas conexões do neutro. Isso será feito através de uma revisão bibliográfica preliminar e de uma série de estudos de casos computacionais envolvendo diversas possibilidades de conexões e aterramentos dos equipamentos, com ênfase no aterramento ativo dos polos das *strings*, no aterramento do neutro do filtro de saída do inversor e na conexão deste mesmo ponto ao ponto médio do barramento CC do conversor. A partir dos resultados obtidos, importantes conclusões sobre a operação do sistema e recomendações quanto a aspectos práticos da instalação da usina serão obtidas.

## 2. APLICABILIDADE DO ATERRAMENTO FUNCIONAL

### 2.1 Aterramento de sistemas de geração distribuída

A ligação à terra de um condutor vivo sistema, tal como o neutro, possibilita (ABNT 2004):

- Definir e estabilizar a tensão da instalação com relação ao terra durante seu funcionamento;
- Limitar as sobretensões de manobra, das descargas atmosféricas e de contatos acidentais com linhas de tensão mais elevada;
- Fornecer um caminho de retorno da corrente de curto-circuito monofásica ou bifásica à terra.

No caso em particular de sistema de geração distribuída de energia elétrica que utiliza máquinas elétricas rotativas, tem-se que o aterramento cumpre um papel fundamental na proteção do sistema contra sobretensões temporárias causadas por faltas para o terra.

Como exemplo, será feita a seguir a análise de uma falta para a terra do sistema da Fig. 1. Nele, a ocorrência da falta fez com que o disjuntor ‘A’ do alimentador na subestação da distribuidora seja aberto, o que leva ao ilhamento de algumas cargas e do sistema de geração, sendo que este, por sua vez, conta com um gerador síncrono.

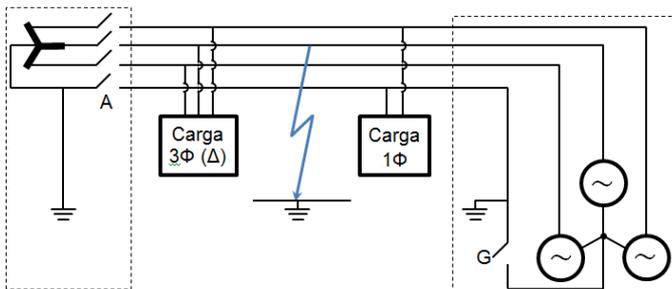


Figura 1 - Sistema de geração com uma máquina síncrona ilhada devido à ocorrência de uma falta.

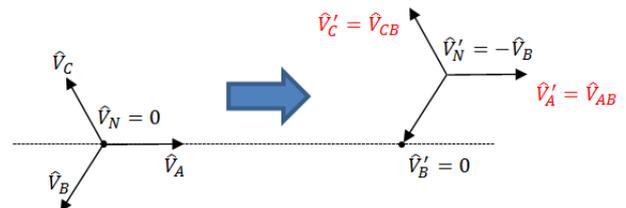


Figura 2 - Diagrama fasorial das tensões de fase antes e depois da falta.

Se o gerador estiver isolado (chave ‘G’ aberta), a circulação de corrente será reduzida, provavelmente não sendo suficiente para sensibilizar a proteção de sobrecorrente do gerador em tempo hábil, de modo que o sistema continuaria a operar por um certo período mesmo com a falta. Entretanto, a fase onde ocorreu a falta passa a ser a nova referência de tensão do sistema, o que faz com que haja o deslocamento do potencial do neutro, isto é, a tensão dos condutores de neutro com relação ao terra será diferente de zero. O diagrama fasorial da Fig. 2 ilustra essa situação.

Assim, as cargas do sistema que utilizam o neutro (e.g., monofásicas FN) estarão submetidas a um nível de tensão muito elevado (multiplicado por um fator que pode chegar a  $\sqrt{3}$ ) podendo assim ser severamente danificadas. Este fenômeno que causa uma sobretensão temporária durante as faltas para a terra é chamado de deslocamento da tensão de neutro (*derived neutral shift*).

Se a chave ‘G’ estivesse fechada (ou seja, se o gerador estivesse solidamente aterrado), o nível de tensão dos condutores de neutro quase não se alteraria ao ocorrer a falta, de modo que a sobretensão seria bem menor. Ou seja, o aterramento do gerador fez com que o problema de sobretensão fosse mitigado.

A norma IEEE considera que um sistema está “efetivamente aterrado” quando a sobretensão temporária no caso de uma falta para a terra não ultrapassa 38,6% (ANSI/IEEE C62.92-1987 - IEEE Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems. Part I - Introduction s.d.), e na prática isso pode ser obtido ao se cumprir com os seguintes critérios para a reatância e resistência de sequência zero (IEEE standard 142-2007 - IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems s.d.):

$$\frac{X_0}{X_1} < 3; \frac{R_0}{X_1} < 1 \quad (1)$$

Considere agora uma outra situação, em que no lugar do gerador síncrono houvesse um inversor solar fotovoltaico conectado à rede.

Os inversores comerciais devem ser certificados, sendo que a norma UL 1741 é amplamente aceita em todo mundo como referência dos critérios que devem ser cumpridos pelo equipamento. Nela, está indicado que o inversor deve satisfazer as exigências da norma do IEEE 1547, que diz respeito à geração distribuída. Por sua vez, esta norma indica que é não permitido que os geradores tenham “regulação ativa de tensão no ponto de conexão com a rede”, o que é interpretado pela maioria dos fabricantes que os inversores não devem se comportar como fontes de tensão constante. Portanto, a maioria dos sistemas de controle é projetada para que eles funcionem como fontes de corrente constante.

Assim, tem-se que ao se modelar o sistema com um inversor no lugar da máquina síncrona, este será incluído como uma fonte de corrente trifásica, assim como ilustrado na Fig. 3.

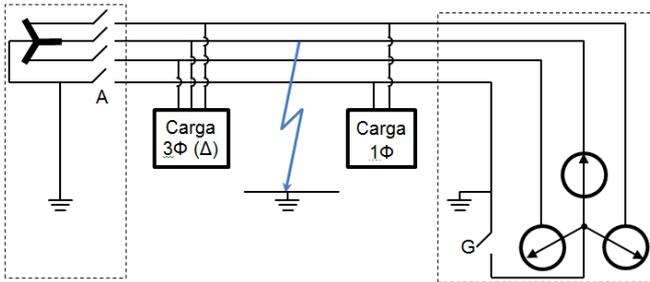


Figura 3 - Sistema de geração com um inversor ilhado devido à ocorrência de uma falta.

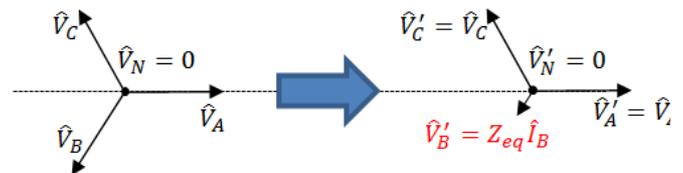


Figura 4 - Diagrama fasorial das tensões de fase antes e depois da falta, no caso de GD com inversor.

Durante a ocorrência da falta, o inversor não tem os meios de manter a tensão entre fases, de modo que a tensão na fase onde ocorreu a falta será o produto da corrente injetada na rede pela associação das impedâncias das cargas conectadas da fase para o terra, podendo assim variar em cada caso. O diagrama fasorial está indicado na Fig. 4.

Assim, no caso de sistemas de geração ou estocagem que utilizam inversores para efetuar a conexão com a rede, ao ocorrer uma falta para a terra, não é de se esperar que ocorra o fenômeno de deslocamento da tensão de neutro. Contudo, mesmo sem essa variação do potencial do neutro, observou-se em simulações e testes que há sim a ocorrência de sobretensões temporárias, porém causadas por outros mecanismos, sendo que o principal deles é baixa relação entre a carga e a geração: simulações mostram que quanto menores as cargas que continuam sendo alimentadas pelo inversor ilhado, maior é a sobretensão observada nos momentos que se seguem à desconexão do alimentador (Ropp, et al. 2012). Outros fenômenos que provocam tais sobretensões (principalmente nos instantes iniciais da falta, antes da atuação do disjuntor do alimentador) são a elevação do potencial de terra (devido à circulação de uma elevada corrente pela terra) e a indução magnética de correntes nos condutores que não estão em falta pela corrente do condutor que está.

As simulações e testes também indicam que, ao contrário do que acontece com as máquinas rotativas, a sobretensão não é mitigada ao se efetuar o aterramento efetivo do neutro do sistema de geração (Ropp, et al. 2012). Assim, foram desenvolvidas outras soluções para atenuar esse problema em sistema de geração com inversores; isso, porém, não constitui o escopo do presente artigo.

Desta maneira, conclui-se que não se pode contar com o aterramento efetivo para mitigar as sobretensões temporárias em sistemas de geração que utilizam conversores estáticos, pois estas, quando ocorrem, estão associadas a outros mecanismos que não a deslocamento da tensão de neutro. Dito de outra maneira, caso se planeje aterrar o neutro de um sistema de geração fotovoltaico, isso deve ser feito por alguma razão que não seja evitar os danos associados às sobretensões temporárias.

## 2.2 Conexão do neutro em inversores para geração fotovoltaica

Uma vez que os inversores são projetados para operem como fontes de corrente constante (assim como explicado na seção 2.1) e que, no caso de inversores trifásicos, estipula-se que essas fontes funcionem de forma balanceada, é de se esperar que a soma das correntes será igual a zero em todos os instantes de tempo em condições normais de operação. Assim, não há necessidade de um condutor de neutro em tais conversores, razão pela qual a maioria dos inversores comerciais existentes no mercado nem mesmo possui terminais que permitam acessar esse ponto (Neutral Connections and Effective Grounding 2013).

Na maioria dos casos, não há conexão entre o neutro do inversor e o neutro do transformador de isolamento; porém, nos casos em que tal conexão existe, insere-se um resistor em série com a finalidade de se limitar a corrente que passa por esse condutor. De fato, o principal motivo pelo qual não se estabelece uma sólida ligação com o neutro do inversor se deve ao fato de que a ponte inversora induz uma tensão de modo-comum que acaba por desbalancear as fases a cada período de chaveamento, tendo como resultado a circulação indesejada de correntes.

Assim, essa conexão do condutor do neutro induz a circulação de correntes que pode comprometer o desempenho do inversor no que concerne o nível de distorção harmônica das correntes em sua saída, podendo fazer com que o inversor deixe de cumprir com as exigências impostas pelas normas de certificação, tal como a UL 1741. Tal inconveniente faz com a maioria dos fabricantes não tenha interesse em disponibilizar um terminal do neutro do inversor que possa ser eventualmente aterrado.

Nos poucos casos onde o terminal de neutro é disponível, o mesmo pode ser obtido a partir do centro da estrela do transformador de isolamento instalado na saída da ponte inversora dentro do mesmo invólucro do conversor.

### 2.3 Aterramento efetivo

Algumas distribuidoras de energia elétrica exigem que os sistemas de geração com inversores sejam efetivamente aterrados (Effective Grounding of PV inverters 2014), para fins de coordenação da proteção de sobrecorrente; porém, nestes casos, elas eventualmente propõem valores para a impedância de sequência zero diferentes daqueles definidos pela equação (1). Isso se deve ao fato de que as máquinas rotativas possuem reatância de sequência positiva  $X_1$  relativamente elevada (uma vez que ela é constituída de inúmeras bobinas que envolvem materiais ferromagnéticos, o que faz com que sua indutância seja considerável) ao passo que a reatância dos inversores é praticamente nula (somente a indutância do filtro e a de dispersão do transformador de isolamento contribuem para o valor de  $X_1$ ) de modo que é praticamente inviável cumprir com o requisito da norma IEEE 142.

Assim como mencionado na seção precedente, os inversores disponíveis comercialmente raramente possuem um terminal de neutro que possa ser aterrado, de modo que a recomendação é que o aterramento efetivo se dê no transformador que faz a interface entre o sistema de geração e a rede de distribuição:

1. Com um transformador  $\Delta Y$ , com o delta voltado para o(s) inversor(es), pode-se aterrar apropriadamente o neutro da estrela, que está voltada para a rede;
2. Com o mesmo transformador  $\Delta Y$ , também com o delta voltado para o(s) inversor(es), pode-se deixar o neutro da estrela flutuante e se instalar um transformador de aterramento, de onde partiria o terminal de neutro a ser aterrado.

É de grande importância a determinação do valor da impedância de aterramento, pois é ela que determinará o valor da corrente que fluirá pelo transformador (de potência no primeiro caso, de aterramento no segundo) tanto na ocorrência de faltas quanto na presença de desequilíbrios e harmônicas, ou seja, limitar essa corrente permite reduzir perdas e o desgaste dos equipamentos.

## 3. ANÁLISE DO ATERRAMENTO DE DIFERENTES PONTOS

Há a possibilidade de conexão entre os diferentes pontos de neutro, ou seja, dos pontos do sistema onde, por razões de simetria, espera-se que o potencial seja nulo (embora em alguns casos não seja). Alguns desses pontos estão indicados na Fig. 5 e a relação completa é apresentada a seguir:

- Ponto médio do string obtido da associação em série dos módulos fotovoltaicos, quando houver;
- Ponto médio do barramento CC (divisor capacitivo do filtro de entrada da ponte inversora), indicada na figura pelo ponto  $N_1$ ;
- Centro da estrela do filtro capacitivo na saída do inversor, indicada na figura pelo ponto  $N_2$ ;
- Neutro do transformador de aterramento (caso houver);
- Centro da conexão em estrela de um dos lados do transformador de isolamento (caso houver).

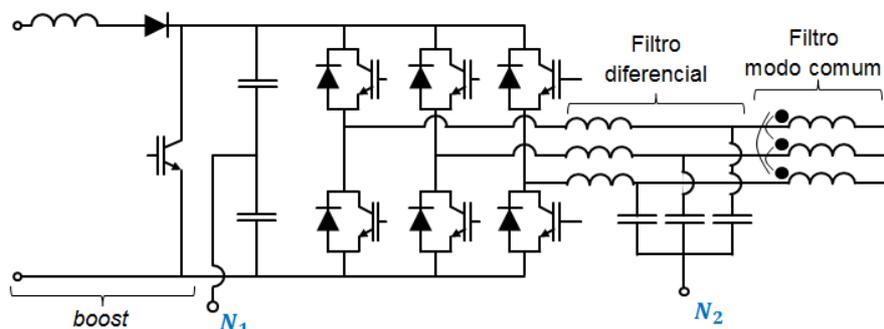


Figura 5 - Circuito elétrico de um inversor trifásico, com destaque aos pontos cuja conexão será avaliada.

### 3.1 Casos em que se faz necessário o aterramento ativo

Na sequência são apresentadas as situações onde o aterramento de um dos condutores ativos da fonte fotovoltaica pode se mostrar necessário.

- *Imposição normativa:* As normas vigentes em alguns países impõem que se faça o aterramento da fonte fotovoltaica, sendo que a principal justificativa para isso é a proteção do sistema contra faltas. Contudo, os painéis

fotovoltaicos possuem uma característica muito peculiar com relação à corrente máxima observada na ocorrência de um curto-circuito: tal corrente não é muito maior que aquela observada em condições normais, o que eventualmente não levaria à atuação dos sistemas de proteção de sobrecorrente usuais.

- *Limitação da tensão com relação ao terra:* A tensão dos condutores ativos da fonte de potência fotovoltaica pode atingir valores significativos quando inúmeros módulos são associados em série. Assim, pode-se recomendar o aterramento do ponto médio da fonte de tensão fotovoltaica, de modo que a tensão de isolamento a ser considerada nesses casos será metade da tensão entre os dois terminais do string da associação em série (NFPA 2014).

- *Limitação das oscilações da tensão nos módulos:* O sistema de conversão de energia provoca uma oscilação da tensão dos painéis, que por sua vez induz uma circulação de correntes pelo circuito de aterramento através das capacitâncias parasitas para a terra dos módulos fotovoltaicos. Ainda que a circulação de corrente seja reduzida com a inserção de uma isolamento galvânica entre o lado CC e CA, o aterramento de um dos condutores da fonte estabiliza tais oscilações, fixando o potencial das placas num dado patamar, de modo que se espera uma redução no valor de tais correntes parasitas.

- *Estabelecimento uma dada polaridade para evitar a degradação dos módulos:* Quando a unidade de geração é composta por módulos que utilizam certas tecnologias na sua construção, pode haver problemas de degradação causados pela aplicação por tempo prolongado dessas tensões. Tais problemas são genericamente designados como degradação induzida por tensão (Potencial, Induced Degradation, PID) e seus efeitos podem ser reversíveis ou não.

#### 4. SIMULAÇÕES

Um conjunto de simulações foi proposto de modo a avaliar o impacto causado ao se efetuar o aterramento funcional de diferentes pontos da fonte fotovoltaica. Os parâmetros do sistema a ser simulado estão indicados na Tab. 1.

**Tabela 1 - Parâmetros do sistema a ser simulado.**

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Tensão na saída da fonte fotovoltaica	612 V	Tensão de linha da rede	220 V <sub>ef</sub>
Tensão do barramento CC	800 V	Potência nominal	14,0 kW
Tensão eficaz na saída do inversor	400 V <sub>ef</sub>	Frequência de chaveamento	6,00 kHz

##### 4.1 Inserção do transformador de aterramento

A usina fotovoltaica considerada contará com um transformador de aterramento; contudo, o mesmo será instalado entre o inversor e o transformador de potência, junto aos terminais do último (nas recomendações encontradas na literatura (Effective Grounding of PV inverters 2014) (Hong, et al. 2013), geralmente o transformador é instalado voltado para a rede para se efetuar o aterramento efetivo da instalação). Dentre as grandezas a serem monitoradas, será incluída a corrente que flui pelo neutro do TA (que é igual à soma das correntes de fase subtraída da parcela necessária à magnetização). Os resultados da simulação serão comparados com aqueles obtidos para o sistema sem a inclusão deste equipamento.

#### Resultados

##### Variação da tensão nos terminais dos módulos em relação à terra

A Fig. 6 apresenta os gráficos da tensão do terminal positivo do módulo na extremidade de um dos strings com relação à sua carga aterrada.

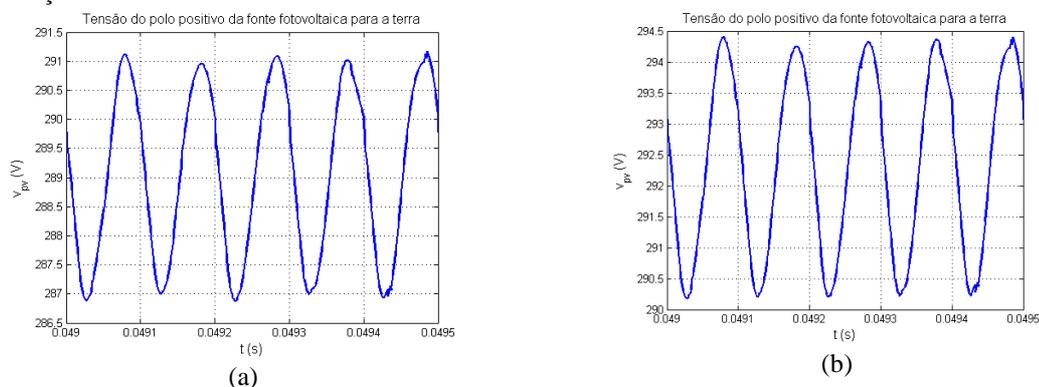


Figura 6 - Tensão do polo positivo da fonte fotovoltaica para a terra: (a) sem o TA; (b) com o TA.

##### Fluxo de corrente pelas capacitâncias parasitas das placas e pelo neutro do trafo de aterramento

A Fig. 7 apresenta os gráficos da corrente que circula pelas capacitâncias parasitas das placas. Tal corrente é a combinação das parcelas de corrente que derivam de todas as placas e se somam no condutor de aterramento. O valor eficaz das correntes para o caso sem o trafo de aterramento é de 0,87 A<sub>ef</sub>, enquanto que com o trafo ela é de 1,00 A<sub>ef</sub>. Já a Fig. 8 apresenta o gráfico da corrente que circula pelo neutro do transformador de aterramento.

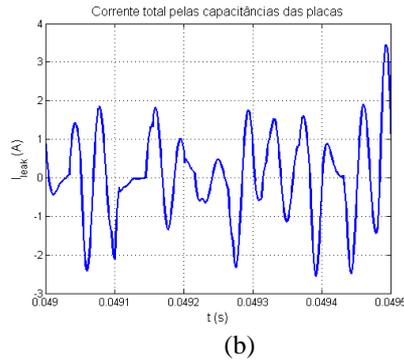
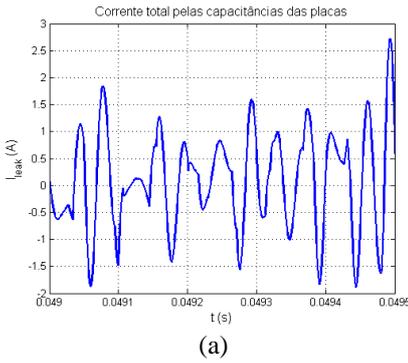


Figura 7 - Corrente total pelas capacitâncias parasitas das placas: (a) sem o TA; (b) com o TA.

Figura 8 - Corrente de neutro do trafo de aterramento.

A tensão nos terminais das placas sofreu uma pequena alteração, tendo sido deslocada de alguns volts (estes pequenos deslocamentos são frequentemente observados, não sendo portanto um fato que se deva chamar a atenção), enquanto que a amplitude das oscilações se manteve praticamente a mesma.

Com relações às correntes parasitas que passam pelas placas, estas tiveram um acréscimo, tanto em valor de pico (o que pode ser observado pelos gráficos da Fig. 7) quanto em valor eficaz, que pode ser explicado pela circulação de correntes de modo-comum que agora também se dá pelo transformador de aterramento.

#### 4.2 Aterramento de um dos condutores da fonte fotovoltaica

No estudo computacional a seguir, os polos negativos de cada um dos três strings da fonte de tensão fotovoltaica serão aterrados solidamente. Vale ressaltar que, ainda que não haja a inserção de uma resistência de aterramento, sempre haverá uma pequena impedância inerente aos cabos que fazem essa conexão, sendo que esta foi levada em conta nas simulações que se seguem, assim como ilustrado na Fig. 9.

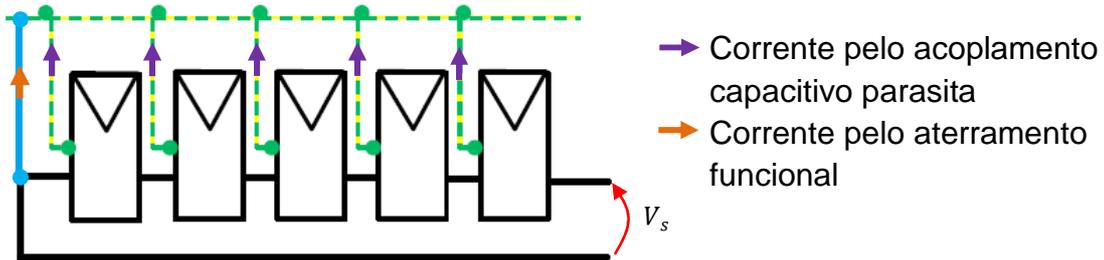


Figura 9 - Aterramento funcional do polo negativo de um string de módulos fotovoltaicos, com destaque para as correntes que circulam pelo condutor de terra.

Em todas as simulações feitas até aqui, media-se o valor das correntes que fluíam das capacitâncias parasitas das placas até o terra. Agora, essas correntes serão acrescidas da corrente que fluem pelo caminho condutivo.

Nesta simulação, porém houve a necessidade de se remover o transformador de aterramento: durante as simulações, foi observada circulação de uma corrente anormalmente elevada pelo condutor de aterramento das placas (assim como um comportamento inapropriado de todo o sistema de conversão), o que indica que a inclusão do TA junto com o aterramento funcional da fonte fotovoltaica levou à formação de um circuito de baixíssima impedância para as correntes de modo-comum. Assim, fica a recomendação de que não se pode aterrar um dos condutores do circuito CC quando houver um transformador de aterramento alocado entre o inversor e transformador de potência (essa ressalva é feita pois pode-se conectar o TA do lado voltado para a rede). Como consequência, os resultados da simulação a seguir serão comparados com aqueles obtidos para o sistema sem a inclusão do TA.

## Resultados

### Variação da tensão nos terminais dos módulos

A Fig. 10 apresenta os gráficos da tensão do terminal positivo do módulo na extremidade de um dos strings com relação à sua carcaça aterrada.

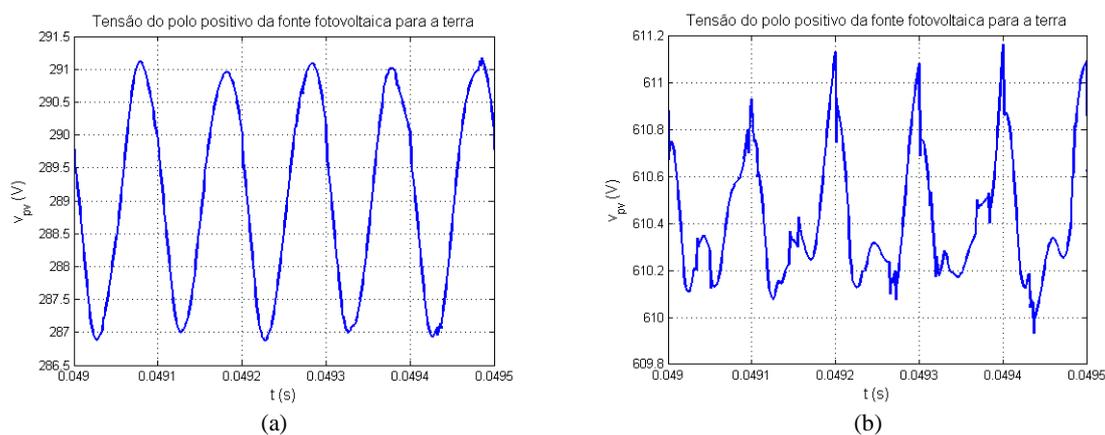


Figura 10 - Tensão do polo positivo da fonte fotovoltaica para a terra: (a) fonte flutuante; (b) fonte aterrada no pólo negativo.

#### Fluxo de corrente pelas capacitâncias parasitas das placas e pelo aterramento da fonte

A Fig. 11 apresenta os gráficos da corrente que circula pelo aterramento da fonte fotovoltaica (no caso onde o polo foi aterrado, essa corrente compreende aquela que flui pelas capacitâncias parasitas das placas e também aquela que flui pelo caminho condutivo do aterramento funcional, assim como ilustrado na Fig. 9). O valor eficaz das correntes para o caso sem o trafo de aterramento é de 0,87 Aef, enquanto que com o trafo ela é de 0,92 Aef.

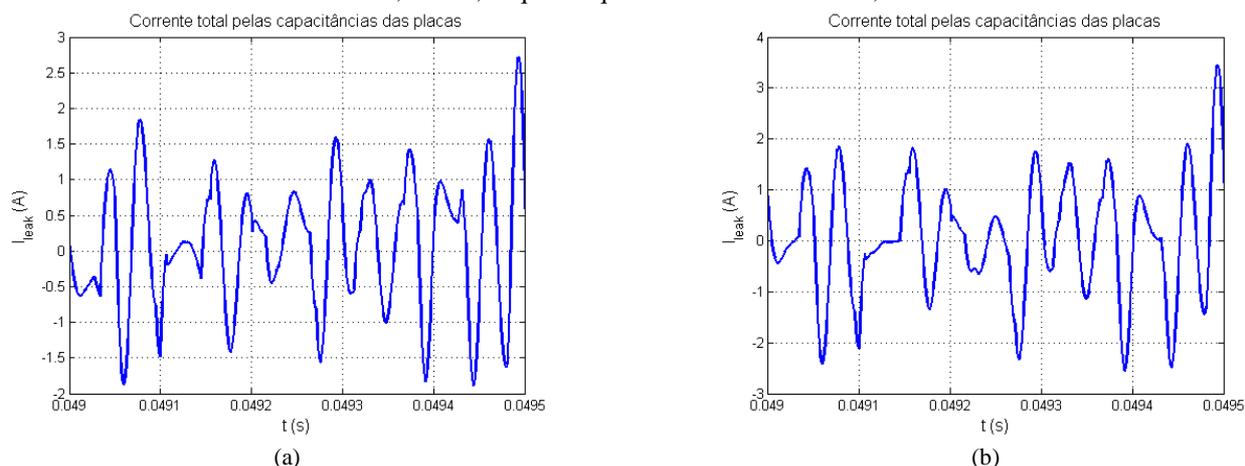


Figura 11 - Corrente total pelo aterramento da fonte fotovoltaica: (a) fonte flutuante; (b) fonte aterrada no pólo negativo.

A tensão nos terminais dos módulos sofreu uma grande variação, tanto quanto ao seu valor médio (que foi deslocado significativamente, o que já era esperado uma vez que ao se muda a referência de tensão ao longo do circuito CC ao se aterrar um de seus condutores) quanto na amplitude de sua oscilação (uma vez que a tensão de um dos condutores – aquele que foi aterrado – não sofre oscilações, a tensão de todos os demais passa a oscilar menos).

Quanto ao valor da corrente, esta sofre uma variação, tendo os seus valores eficaz e de pico aumentados. Isso pode ser explicado pelo fato de que, se por um lado as oscilações de tensão ao longo dos módulos sofrem uma redução, o que tem como consequência a diminuição da corrente pelas capacitâncias parasitas, por outro há a inclusão de um caminho condutivo de baixa impedância do circuito CC para o terra, sendo que, ao se combinar esse efeitos, tem-se como resultado uma singela variação positiva no valor das correntes.

## 5. CONCLUSÃO

Conclui-se, com o presente estudo, que ao se efetuar o aterramento funcional de certos pontos da instalação, pode-se modificar sensivelmente o comportamento de certas grandezas, tais como a tensão nos terminais das placas e a corrente que flui pelo terra (que além de já possuir uma componente significativa associada às correntes parasitas das capacitâncias dos módulos, passará-a a incluir também com aquelas que circulam pelo caminho condutivo do aterramento funcional). Alguns pontos que merecem destaque são:

- Não se deve aterrar um dos condutores do circuito CC quando houver um trafo de aterramento no circuito CA do primário do transformador de isolamento devido ao fato de que tal equipamento oferece um caminho de baixa impedância para a circulação das correntes de modo-comum;
- O aterramento de um dos condutores do circuito CC influencia a tensão nos terminais das placas, tanto deslocando o valor médio das tensões nos condutores quanto reduzindo suas oscilações. Porém, é estabelecido um

caminho condutivo para as correntes de modo comum no sistema, de modo que pode haver uma elevação na circulação de correntes pelo terra;

- Além dessas duas conexões efetuadas acima, há também a possibilidade de conexão do ponto médio do barramento CC ao terra do sistema e a conexão entre o ponto médio do barramento CC e neutro do filtro capacitivo em estrela. Porém, tais situações exigiriam que tivesse acesso a componentes dentro do conversor, de modo que a análise desses casos será desconsiderada, podendo ser feita em um estudo posterior.

Vale lembrar, entretanto, que não são somente as questões de compatibilidade eletromagnética que devem intervir no projeto do aterramento da instalação, sendo que, assim como foi discutido na introdução deste artigo, muitas questões associadas à proteção também devem ser levadas em conta. As simulações efetuadas foram feitas para a operação em regime permanente, sendo que a operação nos instantes transitórios e na ocorrência de contingências (tais como faltas) também devem ser levadas em conta no projeto da instalação.

### **Agradecimentos**

Este projeto é patrocinado pela COELBA através do programa de P&D “Chamada ANEEL: 013/2011”, Pesquisa número PD-0047-0060/2011.

### **REFERÊNCIAS**

- P. Pereira, H. de Paula et B. d. J. Cardoso Filho, «Caracterização das Tensões e Correntes de Modo Comum Geradas pelo Sistema de Condicionamento de Energia,» Belo Horizonte, 2015.
- ABNT, NBR5410 - Instalações Elétricas de Baixa Tensão, 2004.
- «ANSI/IEEE C62.92-1987 - IEEE Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems. Part I - Introduction».
- «IEEE standard 142-2007 - IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems».
- M. E. Ropp, M. Johnson, D. Schutz et S. Cozine, «Effective grounding of distributed generation inverters may not mitigate transient and temporary overvoltage,» 39th Annual Western Protective Relay Conference, October 2012.
- «Neutral Connections and Effective Grounding,» Advanced Energy Solar Energy, 2013. [on-line].
- «Effective Grounding of PV inverters,» Solectria Renewables, 2014. [on-line].
- NFPA, National Electrical Code NEC 70, 2014.
- E. Gúbia, P. Sanchis, A. Ursúa, J. López et L. Marroyo, «Ground Currents in Single-phase Transformerless Photovoltaic Systems,» Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2007.
- C. J. Wiles, Jr., «Photovoltaic System Grounding,» Solar America Board for Codes and Standards, 2012.
- C. A. Charalambous, A. Dimitriou et N. Kokkinos, «Impact of Photovoltaic Oriented DC Stray Current Corrosion on Large Scale Solar Farms’ Grounding and Third-Party Infrastructure: Modelling and Assessment,» IEEE Transactions on Industry Applications, 2015.
- F. Berba, D. Atkinson et M. Armstrong, «Minimisation of DC current component in transformerless Grid-connected PV inverter application,» 2011.
- S. Hong, I. D. Yoo, T. Bruno J.M. et M. Zuercher-Martinson, «Effective Grounding for PV Plants,» Solectria Renewables, 2013. [on-line].

### **GROUNDING PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEMS – APPROACH OF THE ASPECTS REGARDING THE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY**

**Abstract.** *The studies of grounding in electrical installations usually consider only the protection regarding fault issues; however, if the system comprises power electronic converters, such studies shall also contemplate the flow of currents through the ground induced by the fast variations of the voltage arising from the switching process. The present work addresses the main questions concerning the grounding aspects of a photovoltaic generation system, but focusing on the evaluation of the ground high-frequency current that naturally flows during the operation of this type of system, which is connected to the grid through a three-phase inverter. Aside from the protection issues, different configurations for the functional grounding are compared in order to guide the designer through the best way to avoid this undesirable current flow without compromising the system performance and conducted EMI requirements.*

**Key words:** *Photovoltaic generation, Grounding system, Electromagnetic compatibility.*