



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  
**Escola Politécnica**

## ATERRAMENTO E PROTEÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Bruno Monteiro Assaife

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários a obtenção de grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Walter Issamu Suemitsu

Rio de Janeiro  
Abril de 2013

# **Aterramento e Proteção de Sistemas Fotovoltaicos**

**Bruno Monteiro Assaife**

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovado por:

---

Prof. Walter Issamu Suemitsu, Dr. Ing.  
(Orientador)

---

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.

---

Emanuel Leonardus van Emmerik, M.Sc. Eng.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
ABRIL DE 2013

Assaife, Bruno Monteiro

Aterramento e Proteção de Sistemas Fotovoltaicos / Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica / Departamento de Engenharia Elétrica, 2013.

IX, 31 p.: il.; 29,7cm

Orientador: Walter Issamu Suemitsu

Projeto de Graduação – URFJ / Escola Politécnica / Departamento de Engenharia Elétrica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 30-31

1. Aterramento de Sistemas Fotovoltaicos. 2. Proteção de Falta à terra.

I. Suemitsu, Walter Issamu. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título

## **Dedicatória**

Dedico esse trabalho aos professores do curso de engenharia elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), que buscam sempre o melhor para os seus alunos e se dedicam ao máximo em seus projetos. Dedico especialmente ao professor Walter Suemitsu, que demonstrou ser, durante a faculdade, uma pessoa extremamente paciente e empenhada a ajudar todos os seus alunos.

Dedico sempre, e nunca em excesso, aos meus pais, Miguel Assaife Neto e Janine Monteiro Assaife, pessoas cujo ensino e companhia são indispensáveis, não esquecendo a minha irmã, Natália Monteiro Assaife.

Por fim, dedico aos meus honrados amigos beneditinos, sempre juntos e unidos, desde a infância, enfrentando essa vida maravilhosa.

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus pelo dom da vida, por me dar boa saúde, família e excelentes amigos.

Agradeço àqueles que, através de bons pensamentos, torcem por mim e pelo meu sucesso.

Termino aqui com uma famosa frase de Albert Einstein: “Os ideais que iluminam o meu caminho são a bondade, a beleza e a verdade”.

Resumo do Projeto apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

Sendo a geração fotovoltaica uma fonte de energia elétrica sustentável e limpa, inserida num contexto de economia verde e de baixo carbono, este trabalho traz alguns tópicos importantes relacionados ao tema. Baseado na *National Electrical Code* (NEC), ele analisa o aterramento e a proteção de sistemas fotovoltaicos (FV), discutindo as normas e padrões definidos, assim como possíveis omissões e falhas ainda existentes.

O aterramento pode ser dividido em dois tipos principais, a saber: aterramento do sistema ou funcional e aterramento de proteção das pessoas ou dos equipamentos. A monografia concentrar-se-á no aterramento do sistema, sintetizando os métodos e os conceitos mais utilizados nos EUA. Em seguida, são estudadas as formas de proteção de falta à terra dos arranjos FV, tendo sempre em pauta as normas e os requisitos citados na NEC.

Abstract of Undergraduate Project presented to Poli/UFRJ as a partial fulfillment of requirements for the Degree of Electrical Engineer.

As the photovoltaic generation system is a sustainable and clean source of electric energy, in a context of green and low carbon economy, this work presents some important topics related to this subject. Based in National Electrical code, it analyses the grounding and protection of Photovoltaic Systems (PV), discussing the defined norms and standards, as well as possible omissions and lacks still existing.

The grounding may be divided in two main types: functional or system grounding and grounding for protection of people or equipments. This dissertation will focus the system grounding, synthesizing the methods and concepts more utilized in USA. Following, they will be studied the methods of ground fault protection of PV arrays, considering always the standards and requirements presented in NEC.

## Glossário

<b>CA</b>	Corrente Alternada
<b>CC</b>	Corrente Contínua
<b>EE</b>	Energia Elétrica
<b>FV</b>	Fotovoltaico
<b>EGC</b>	Equipment Grounding Conductor
<b>GFPD</b>	Ground Fault Protection Device
<b>GEC</b>	Ground Electrode Conductor
<b>NEC</b>	National Electrical Code
<b>NFPA</b>	National Fire Protection Association
<b>OCPD</b>	Over Current Protection Device
<b>SE</b>	Sistema Elétrico
<b>Solar ABCs</b>	Solar America Board for Codes and Standards
<b>UL</b>	Underwriters Laboratories

## Sumário

<b>1 – Introdução.....</b>	01
<b>1.1 – Objetivo.....</b>	02
<b>1.2 – NEC (National Electrical Code) .....</b>	03
<b>1.3 – Conceitos e Definições .....</b>	04
<b>1.3.1 – Definições Gerais .....</b>	04
<b>1.3.2 – Conceitos FV.....</b>	05
<b>2 – Aterramento do Sistema .....</b>	08
<b>2.1 – Descrição.....</b>	09
<b>2.2 – Aterramentos do Sistema fotovoltaico.....</b>	09
<b>2.2.1 – Norma UL 1741.....</b>	09
<b>2.3 – Artigo 690.47 (C).....</b>	11
<b>2.4 – Artigo 640.47 (D).....</b>	14
<b>2.5 – Sistemas não Aterrados.....</b>	14
<b>3 – Proteção de Falta à terra.....</b>	16
<b>3.1 – Pontos Fundamentais.....</b>	16
<b>3.2 – Falta à terra.....</b>	17
<b>3.3 – Dispositivos de Proteção (GFPD).....</b>	20
<b>3.4 – Artigo 690.5.....</b>	21
<b>3.5 – Ponto Cego.....</b>	22
<b>4 – Conclusões.....</b>	28
<b>5 – Sugestões para Trabalhos Futuros.....</b>	29
<b>6 – Referências Bibliográficas.....</b>	30



## 1- Introdução

Com a crescente demanda por energia elétrica em todo o mundo e uma pressão intensa da sociedade e órgãos ambientais por fontes de energia limpa e sem grandes impactos ao meio ambiente, outras fontes de geração ganham, cada vez mais, espaço no sistema elétrico dos principais países consumidores de energia elétrica, entre eles, o Brasil.

A energia solar surge então como uma opção que satisfaz, no atual momento, as exigências da sociedade como um todo por um mundo sustentável. Seu aproveitamento pode ser realizado sob diversas formas, em pequenas ou grandes escalas. O sistema fotovoltaico pode estar conectado diretamente à rede elétrica de distribuição, ou também, operar de forma autônoma em edifícios e residências de consumidores que assim optarem. Entretanto, apesar da flexibilidade da implantação de sistemas fotovoltaicos (FV), que utilizam tecnologia avançada, os custos elevados, muitas vezes, dificultam sua ampla utilização. Além disso, alguns cuidados devem ser tomados no momento de sua concepção e instalação.

Sistemas FV são capazes de produzir tensões e correntes perigosas ao longo de anos. Dessa forma, a fim de garantir a segurança do público utilizador da tecnologia solar, dos instaladores e de profissionais que eventualmente venham a realizar a manutenção de equipamentos, assuntos relacionados ao aterramento de sistema FV ganharam destaque no setor elétrico. Além disso, como os equipamentos utilizados nos sistemas de geração fotovoltaica são caros, é necessário protegê-los contra descargas atmosféricas e outros fenômenos transitórios.

Este trabalho está divido em quatro seções principais, contando com esta introdução. No capítulo um, são analisados aspectos gerais de conteúdo relevante para o entendimento do assunto alvo, já no segundo discute-se os métodos de aterramento e, no terceiro, os sistemas de proteção. Por fim, chega-se a uma conclusão sobre tudo aquilo que foi debatido.

## 1.1 Objetivo

Este trabalho tem o objetivo de apresentar de forma direta e concisa os principais requisitos e métodos adotados nos Estados Unidos para o aterramento e proteção de sistemas FV, visto que, atualmente, no Brasil, ainda não existem normas ou regulamentos que abordam este importante tema, e, com isso, colaborar com discussões iniciais sobre o assunto no país.

Qualquer sistema elétrico está sujeito a condições de defeito, aos efeitos da exposição ao meio ambiente, como a deterioração das conexões elétricas e das instalações, a correntes de fuga, a dispositivos de proteção inadequados e a outros tipos de problemas que podem ser contornados ou evitados através de um aterramento qualificado, diminuindo, pois, riscos de choques e de incêndio.

Sistemas FV, como qualquer outro, podem apresentar as falhas e os problemas acima expostos e, portanto, também merecem uma atenção especial quanto ao aterramento e proteção, que depende dos critérios e normas considerados. São considerados aterrados quando um dos condutores de corrente contínua (CC) está conectado ao sistema de aterramento e, de acordo com a NEC, isto será necessário quando os circuitos de corrente contínua (CC) e de corrente alternada (CA) não apresentarem conexão direta entre os respectivos condutores aterrados.

Este trabalho está dividido em seis capítulos descritos a seguir.

O primeiro capítulo está destinado introdução e aos principais fundamentos teóricos e práticos.

O segundo capítulo trata do aterramento do sistema, o terceiro capítulo da proteção de falta à terra e o quarto capítulo do conceito de ponto cego.

O capítulo quatro apresenta as conclusões, o capítulo cinco as sugestões de trabalhos futuros e finalmente o capítulo 6 as referências bibliográficas.

## 1.2 NEC (National Electrical Code)

Este trabalho aborda as normas contidas no *National Electrical Code* (NEC), ou Código Elétrico Nacional, para o aterramento dos sistemas fotovoltaicos. Esta escolha foi feita tendo em vista que em muitos países, inclusive o Brasil, adotam-se as normas da NEC, ou nelas se baseiam para criar suas próprias normas.

A NEC, adotada em todos os cinquenta estados dos Estados Unidos, está disponível em um livro e serve como referência para a implantação de um projeto eletricamente seguro, que proteja pessoas e bens dos riscos elétricos. É publicado pela *National Fire Protection Association* (NFPA) e atualizado a cada três anos, sendo a NEC 2011 a última versão desenvolvida.

Ela abrange assuntos como a instalação de condutores elétricos, de equipamentos e de eletrodutos, incluindo, assim, os requisitos legais para a instalação de sistemas FV. A NEC exige que todos os equipamentos e circuitos FV expostos ou acessíveis sejam devidamente aterrados, utilizando equipamentos e métodos específicos. Circuitos de força em sistemas fotovoltaicos podem ser aterrados ou não aterrados como explicado a seguir.

Uma observação que deve ser feita é quanto à utilização de termos em Inglês. Neste trabalho, muito desses termos serão usados, pois não existem ainda termos adequados em Português. No entanto, o significado de cada termo será devidamente explicado.

## 1.3 Conceitos e Definições

A seguir serão apresentados alguns conceitos e definições fundamentais, alguns deles importados da NEC, a fim de proporcionar um melhor entendimento do trabalho proposto.

### 1.3.1 Definições Gerais

#### Condutor aterrado

Condutor do circuito elétrico que está ligado ao sistema de aterramento de proteção, que por sua vez está conectado à terra.

### Condutor de aterramento dos equipamentos / aterramento de proteção

É o responsável por formar um caminho condutivo que conecte entre si as partes metálicas dos equipamentos que estão expostas e normalmente não conduzem corrente.

A figura 01 abaixo apresenta uma situação de aterramento de proteção aplicada em sistemas FV.

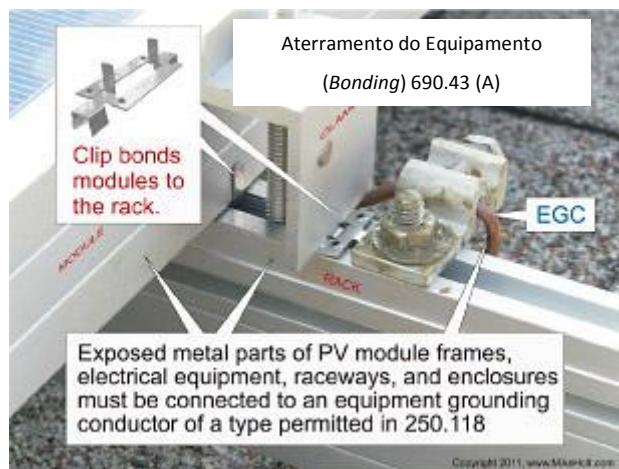


Figura 01 – Aterramento de um sistema FV [9]

### Jumper de ligação do sistema (system bonding jumper)

É o responsável pela conexão entre o condutor aterrado e o sistema de aterramento de proteção (aterramento dos equipamentos).

Observação: Somente um *jumper* de ligação estará presente em cada sistema elétrico isolado

### Sistema elétrico isolado (Separate electrical system)

Sistema elétrico cujo condutor aterrado está isolado dos condutores aterrados da fonte de energia ou dos outros sistemas.

### Dispositivo de Proteção de falta à terra (Ground Fault Protective Device – GFPD)

Na presença de um curto, estes dispositivos atuam de uma determinada maneira com intuito de evitar danos a equipamentos ou pessoas. Existem diversos deles, a saber: Fusíveis, relés, disjuntores, etc..

### Eletrodo de aterramento

Condutor metálico ou o conjunto de condutores interligados que estão em contato direto com a terra, com o solo.

### Condutor do Eletrodo de aterramento ou condutor de ligação (Grounding Electrode Conductor – GEC)

Condutor utilizado o qual conecta o objeto a ser aterrado ao eletrodo de aterramento ou liga dois ou mais eletrodos entre si. Ver figura 02.

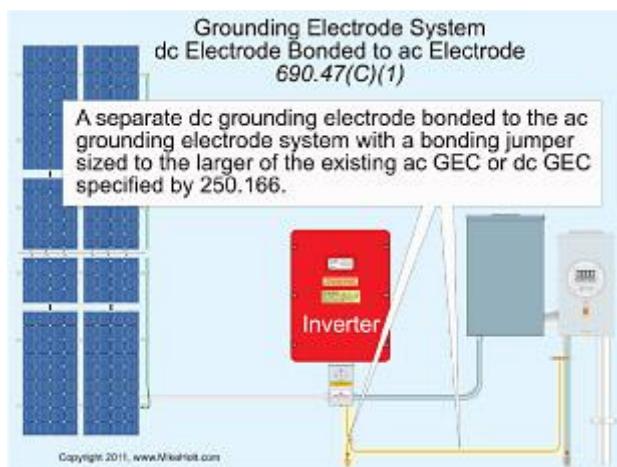


Figura 02 – Condutor do eletrodo de aterramento [9]

### **1.3.2 Conceitos FV**

#### Gerador FV

Corresponde a um conjunto de dispositivos capazes de transformar a luz solar em eletricidade. Esses dispositivos podem ser tanto células FV, módulos FV, quanto alguma combinação desses dois.

#### Células FV

Dispositivos efetivamente responsáveis pela conversão da energia solar em energia elétrica (EE), utilizando-se do efeito fotovoltaico. Podem ser feitas por diversos materiais semicondutores, entre eles o silício monocristalino e o silício policristalino.

### Módulo FV

Consiste na associação em série de células FV, além da sua devida proteção das intempéries, como, por exemplo, a umidade. Apenas uma única célula FV dificilmente serviria em alguma aplicação prática.

A figura 03 abaixo ilustra esse conceito. Para proporcionar maior rigidez mecânica e oferecer uma estrutura de suporte e fixação, uma moldura metálica, normalmente de alumínio anodizado, é muitas vezes utilizada.

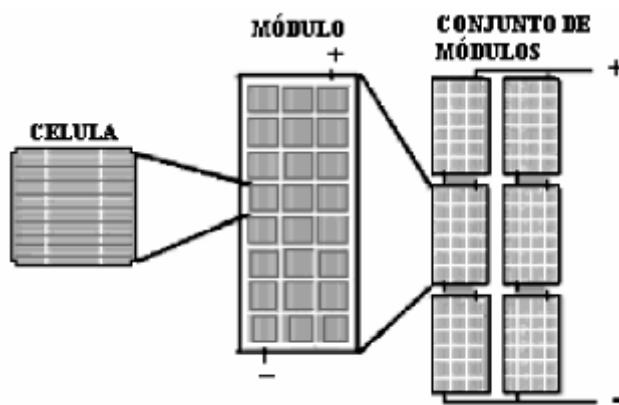


Figura 03 – Módulos fotovoltaicos [9]

### Sistemas Autônomos

São sistemas que não estão conectados à rede de distribuição de energia das concessionárias. Eles podem ou não conter acumuladores de energia, normalmente um banco de baterias, que são os responsáveis por acumulá-la e distribuí-la durante os períodos sem sol (noite, dias chuvosos,...). Obviamente, os sistemas sem acumuladores só funcionam durante as horas de sol.

### Sistemas Conectados à Rede de Energia

Sistemas que trabalham em paralelo com a rede de energia, podendo ser do tipo central fotovoltaico ou integrado a prédios urbanos. Dispensam os acumuladores, já que a própria rede exerce sua função, reduzindo os custos totais do sistema.

Nos sistemas FV residenciais conectados a rede elétrica comercial, quando a geração de energia pelos módulos for maior que o consumo, o excedente será injetado na rede. Caso contrário, a energia é extraída dela. Vide figura 04



Figura 04 – Sistemas Conectados à Rede [10]

## 2. Aterramento do Sistema

### 2.1 Descrição

A monografia, como já comentado, usará algumas definições e termos criados pela NEC, sem deixar de maneira alguma que surjam lacunas no entendimento da mesma.

Existem dois tipos principais de aterramento em qualquer SE, são eles: Aterramento dos Equipamentos - também conhecido como Aterramento de Proteção - e Aterramento do Sistema ou funcional.

No aterramento do sistema, ou aterramento funcional, como é conhecido em outras partes do mundo, um dos condutores do circuito, o condutor aterrado, está conectado ao sistema de aterramento dos equipamentos e também à terra. O *jumper* de ligação do sistema (*system bonding jumper*) é o responsável pela ligação entre o condutor aterrado e o sistema de aterramento dos equipamentos e somente um desses está presente em cada sistema elétrico isolado (*separately derived system*).

### 2.2 Aterramento do sistema fotovoltaico

Um sistema FV é definido como um sistema aterrado quando um dos condutores do circuito de corrente contínua (CC), positivo ou negativo, está ligado ao sistema de aterramento, que por sua vez está conectado à terra.

Para transformar energia solar em energia elétrica, um ou vários inversores convertem a corrente contínua (CC), a partir dos módulos fotovoltaicos, em corrente alternada (CA). Em sistemas aterrados, onde é necessário um isolamento galvânico entre o lado CC do sistema e o lado CA, utilizam-se inversores com um transformador interno que exercem tal função. O uso desse dispositivo, por outro lado, torna o inversor mais caro, pesado e volumoso, além de provocar uma perda na eficiência da conversão.

Antes da edição de 2005, a NEC exigia que todos os sistemas FV tivessem um dos condutores do circuito CC ligado à terra sempre que a tensão máxima do sistema fosse maior do que 50 Volts. Porém, mudanças feitas permitiram o não aterramento de sistemas que atendessem determinados requisitos. Essa mudança permitiu o uso de inversores conectados à rede sem transformadores internos, ajudando na redução de custos e no aumento de eficiência global.

### 2.2.1 Norma UL 1741

A ligação entre o condutor do circuito CC e o sistema de aterramento, em um arranjo FV, é feita geralmente através do dispositivo de proteção de falta à terra (*Ground Fault Protection Device – GFPD*) interno aos inversores conectados à rede, dessa forma, esse dispositivo exerce o papel do *jumper* de ligação do sistema. A presença desse *jumper* de ligação requer, de acordo com a norma *UL Standard 1741*, que inversores tenham terminais claramente identificados/marcados para a conexão do condutor do eletrodo de aterramento, mostrado na figura 05 abaixo:

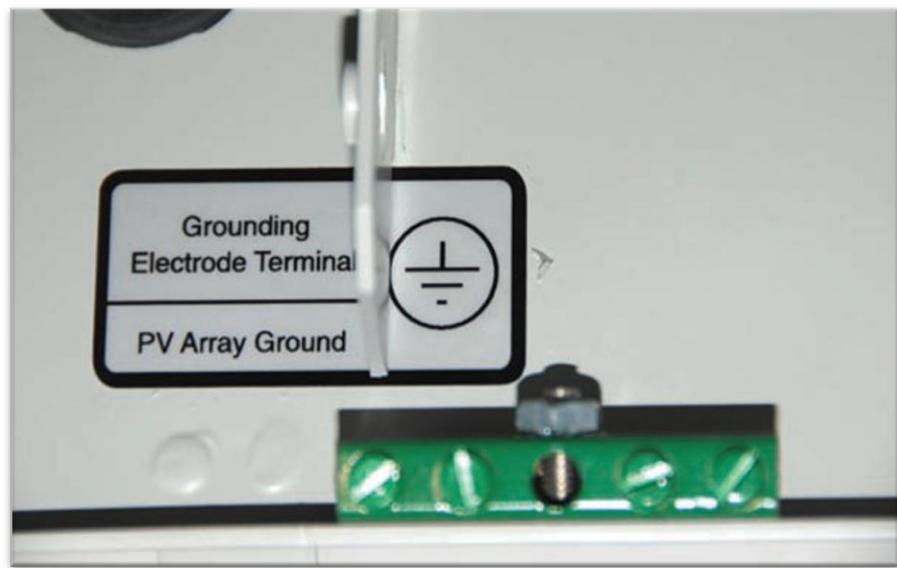


Figura 05 – Terminal do condutor do eletrodo de aterramento [4]

A UL 1741 exige também que a entrada CC (*input*) e a saída CA (*output*) nos inversores possuam terminais, fios ou outras disposições para aceitar condutores de aterramento dos equipamentos (*EGC*).

Estes requisitos de conexão de aterramento exigem que cada inversor tenha no mínimo três terminais disponíveis e que eles estejam eletricamente conectados entre si, juntamente com a carcaça do inversor, isso tudo em um barramento apropriado no próprio inversor.



Figura 06 – Terminais dos inversores [4]

Infelizmente, alguns fabricantes e suas agências de certificação ou listagem estão permitindo que inversores sem alguns requisitos atendidos cheguem ao mercado. Outros países com normas e padrões de aterramento diferentes da dos EUA, aceitam inversores sem um terminal do eletrodo de aterramento.

## 2.3 Artigo 690.47 (C)

Conectar corretamente um inversor ligado à rede de energia é fundamental para o funcionamento seguro, de longo prazo e de confiança do sistema de energia renovável inteiro. O devido aterramento do inversor irá minimizar a possibilidade de choque elétrico e danos a partir de correntes de curto. Embora complexo, é importante compreender e aplicar as exigências da Seção 690.47 (C) da NEC para as conexões de aterramento no inversor.

Com o passar do tempo, especificadamente nos anos 2005, 2008 e 2011, a NEC sofreu mudanças significativas no artigo que tange os métodos de aterramento. A NEC 2011 é mais fácil de entender e inclui todos os três métodos que envolvem as ligações do condutor do eletrodo de aterramento (*GEC*).

Devido a sua importância o artigo referido será resumido e comentado abaixo.

### 690.47 (C) Sistemas com Requisitos de Aterramento CC e CA

Sistemas fotovoltaicos com circuitos CC e CA sem conexão direta entre o condutor aterrado de cada circuito devem ter um sistema de aterramento do lado CC. O sistema CC de ligação à terra deve estar conectado ao sistema CA de aterramento através de um dos métodos abaixo – (1), (2), (3) :

Esta seção não se aplica ao lado CA.

Para sistemas conectados à rede de energia, as instalações de aterramento existentes funcionam como o sistema CA de aterramento.

- (1) Um eletrodo de aterramento deve ser instalado no lado CC e deve estar conectado diretamente ao eletrodo de aterramento do lado CA. Os condutores do eletrodo de aterramento CC ou as conexões para o eletrodo CA não devem ser utilizados como um substituto de qualquer condutor do aterramento de proteção exigido no lado CA.

(2) Um condutor do eletrodo de aterramento do lado CC de tamanho adequado deve sair do terminal marcado do eletrodo de aterramento no inversor (GEC) e ser ligado ao eletrodo de aterramento CA. Caso um eletrodo de aterramento CA não esteja acessível, o condutor do eletrodo de aterramento CC deve ser conectado ao condutor do eletrodo de aterramento CA. Esse condutor do eletrodo de aterramento CC não deve ser utilizado como um substituto de qualquer condutor de aterramento de proteção exigido no lado CA.

A figura 07 abaixo mostra, para maiores esclarecimentos, os dois primeiros métodos.

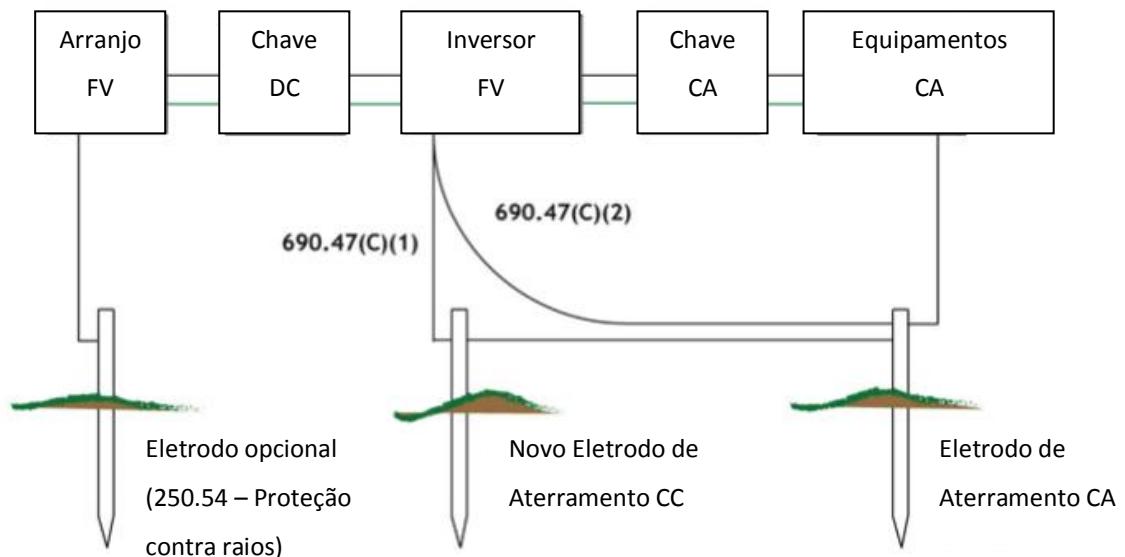


Figura 07 – Métodos 1 e 2 [2]

(3) Neste método, o condutor CC do eletrodo de aterramento estará combinado com o condutor CA de aterramento de proteção. O condutor, que não pode estar emendado, deverá sair do ponto *GEC* no inversor, passar pelo circuito CA e ser conectado a barra de aterramento no lado CA. Vide figura 08

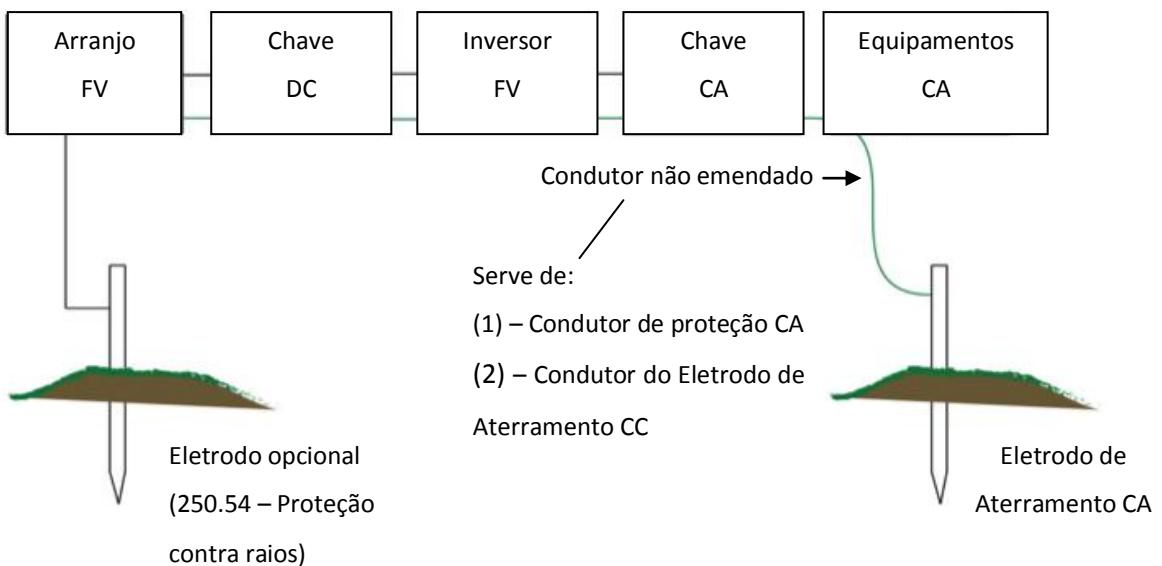


Figura 08 – Método 3 [2]

A escolha do método fica a critério dos instaladores, porém, cada um possui vantagens e desvantagens em relação aos outros, conforme destacado abaixo:

Método 1 – Tem a vantagem de encaminhar surtos provocados por raios que atingem o gerador FV e picos de correntes de uma forma mais direta à terra. Entretanto, uma vez que é necessário um condutor entre o novo eletrodo de aterramento CC e o eletrodo de aterramento CA, o tamanho, o caminho e o custo do condutor devem ser considerados.

Método 2 – Usa menos componentes do que o primeiro método – menor o custo- além de também conduzir os surtos para a terra sem chegar perto dos equipamentos do lado CA.

Método 3 – Como combina o condutor CA de aterramento dos equipamentos com o condutor CC do eletrodo de aterramento, economiza cobre no orçamento geral. Entretanto, qualquer surto no módulo será encaminhado diretamente para os equipamentos de serviço e maiores as chances que entre no sistema de fiação local do que quando os condutores são encaminhadas imediatamente à terra.

## 2.4 Artigo 640.47(D)

Uma seção da NEC 2008 que abrangia questões relacionadas a correntes de pico induzidas por raios nos geradores fotovoltaicos, com pontos mal esclarecidos.

Como a redução dos surtos não é propriamente uma questão de segurança, esta seção foi removida da NEC 2011. A intenção primária era que todos os arranjos FV montadas no chão tivessem um condutor do eletrodo de aterramento saindo das molduras metálicas dos painéis e encaminhado da forma mais rápida à terra, o que seria semelhante aos eletrodos auxiliares opcionais, permitido pelo artigo **250.54**, os quais não necessitam de estar ligados a qualquer outro eletrodo de aterramento. Para aqueles que desejam aumentar a longevidade do sistema por meio de técnicas de redução de surtos, a seção mencionada ainda está disponível.

## 2.5 Sistemas não aterrados

Quando atendidos alguns requisitos encontrados no artigo **690.35**, as instalações FV não precisarão de um aterramento funcional, aquele em que um dos condutores do sistema elétrico é aterrado, entra eles: proteção contra sobre correntes e dispositivos de desconexões em todos os condutores do circuito; proteção de falta à terra em todo o sistema; etiquetas de advertência complementares; inversores próprios para este uso. Isso lhes dá a possibilidade de usarem inversores sem transformadores - que não isolam a parte CC da CA – e sem terminais para a conexão do condutor do eletrodo de aterramento CC, o que certamente cortaria despesas.

Contudo, interpretações equivocadas da norma UL 1741 feitas pela NRTL e diversos fabricantes, fizeram que inversores isolados fossem colocados no mercado ainda com os terminais do eletrodo. A NEC dá a entender, em determinado trecho, a sua obrigatoriedade. Diante desse fato, cumpre ressaltar que, em sistemas não aterrados, o uso de condutores do eletrodo de aterramento, a princípio, não causaria nenhum tipo de dano, a não ser uma elevação do custo.

Ademais, nesse tipo de sistema, o condutor de proteção ou condutor de aterramento dos equipamentos do lado CC está conectado ao condutor de proteção do lado CA, descartando a necessidade de implantação de um eletrodo de aterramento no lado CC. Entretanto, mais uma vez, a NEC não deixa claro como proceder diante de tal situação.

### 3. Proteção de falta à terra

#### 3.1 Pontos fundamentais

Alguns SE estão expostos aos efeitos de raios e sujeitos a curto-circuitos, que originam altas correntes e, consequentemente, aumentam os riscos de incêndio e de danos aos aparelhos elétricos e humanos. Com a intenção de diminuir esses riscos, dispositivos de proteção de falta à terra são instalados nesses sistemas e, em esquemas FV, há certas particularidades que precisam ser bem analisadas.

Apesar de já mencionados anteriormente, é importante que certos detalhes sejam relembrados rapidamente, a saber:

- O transformador tem a função de isolar o circuito CC do circuito CA – isolação galvânica.
- O *jumper* de ligação conecta o condutor aterrado – na maioria das vezes, o negativo – ao ponto comum de aterramento, no qual o condutor de proteção dos equipamentos (*EGC*) e condutor do eletrodo de aterramento (*GEC*) se encontram.
- Conforme as normas estabelecidas pela NEC, somente um jumper é permitido por sistema, pois, caso contrário, surgiriam fluxos de corrente indesejados.
- Por fim, devido aos itens expostos acima, não haverá nenhuma corrente normalmente fluindo parra a terra, a não ser correntes de fuga.

De posse dessas informações relevantes, dar-se-á prosseguimento ao tema principal desta seção, a proteção de falta à terra.

### 3.2 Faltas à terra

Nos sistemas FV, uma falta à terra pode surgir quando qualquer condutor do circuito entrar em contato com um condutor de proteção (equipamentos) ou uma superfície aterrada.

A tabela 1 abaixo apresenta os possíveis contatos entre as partes do sistema. Em cada linha o (1) está em contato com o (2).

Tabela 1 – Contatos entre as partes do sistema

	(1)	(2)
<b>A</b>	Condutor Aterrado	Condutor de proteção (EGC)
<b>B</b>	Condutor Aterrado	Superfície Aterrada
<b>C</b>	Condutor não Aterrado	Condutor de proteção (EGC)
<b>D</b>	Condutor não Aterrado	Superfície Aterrada

Com o auxílio da tabela 1 percebe-se que, quando ocorre uma falta à terra, pelo menos uma das partes envolvidas está aterrada, por isso o nome falta à terra. Como será visto a seguir, em qualquer caso (A, B, C e D), a corrente de falta deve passar pelo *jumper* de ligação do sistema, característica que se mostrará fundamental mais adiante.

Por meio da análise das situações B (condutor aterrado em contato com uma superfície aterrada) e D (condutor não aterrado em contato com uma superfície aterrada) demonstrar-se-á que toda corrente de falta passa pelo jumper de ligação e quais são os caminhos percorridos por ela.

A figura 09 vai auxiliar tais análises. Cabe lembrar que, na maioria dos sistemas FV e não diferente no da figura abaixo, o condutor aterrado é o negativo e, por consequência, o não aterrado é o positivo.

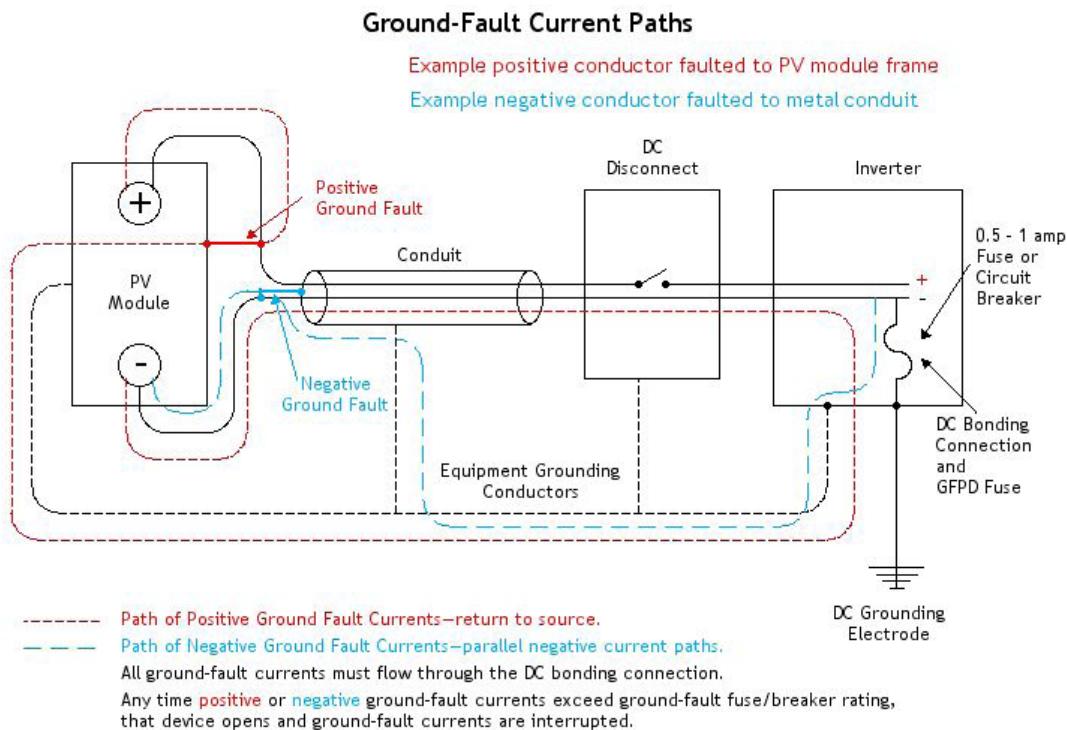


Figura 09 – Correntes de Curto [2]

Quando ocorre o curto entre o condutor não aterrado e a superfície metálica do módulo, situação D - representada pela cor vermelha -, a corrente flui pelos condutores de proteção e passam pelo *jumper*.

Quando o curto ocorre entre o condutor aterrado (o negativo) e o condutores metálico, situação B, a corrente enxerga dois caminhos paralelos para retornar à fonte. Um pelo próprio condutor e outro passando pelo *jumper* de ligação e o condutor de proteção. O valor de cada corrente é inversamente proporcional ao valor da resistência de cada caminho. Um modelo é mostrado a seguir na figura 10.

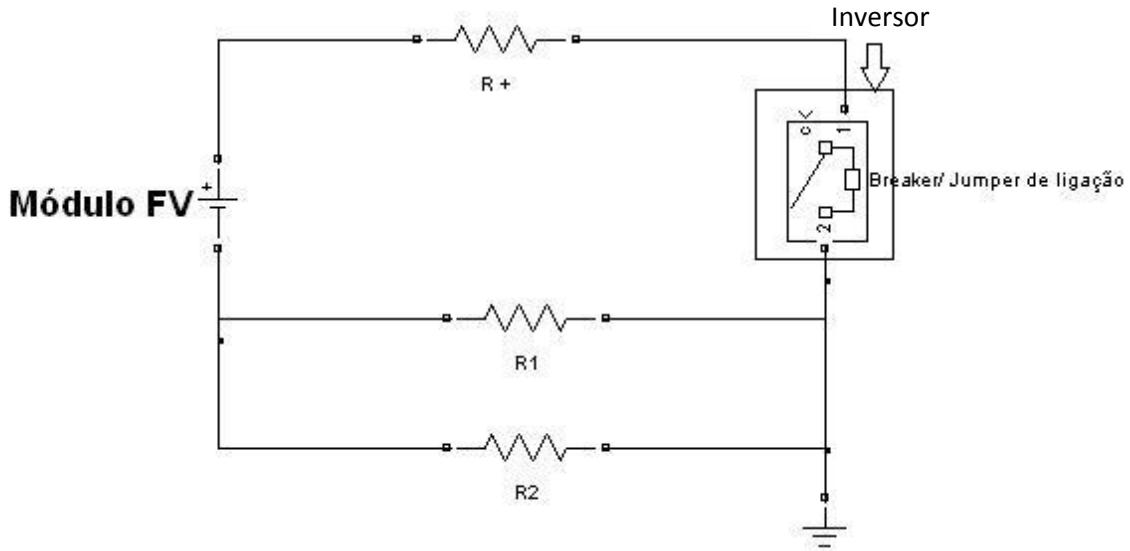


Figura 10 - Caminhos das Correntes

O R1 na figura representa a resistência do condutor negativo enquanto o R2, a do *EGC*.

O valor da corrente em cada segmento será inversamente proporcional ao valor da resistência e o mais importante, a corrente de curto sempre passará pelo *jumper* de ligação, justamente onde fica localizado o dispositivo de proteção de falta à terra, ou do inglês *Ground Fault Protection Device (GFPD)*. No exemplo acima, trata-se de um inverter de rede de distribuição, e, assim, tanto o *jumper* quanto o dispositivo de proteção encontram-se dentro dele.

### 3.3 Dispositivos de Proteção (GFPD)

Um dispositivo de proteção de falta à terra típico detecta excessiva corrente de falta e é capaz de interrompê-la. Na geração solar, este procedimento é feito através de um componente de proteção contra sobre corrente, localizado no condutor CC, ou um sensor de corrente que mede a diferença de corrente entre os condutores positivo e negativo.

Os dispositivos de proteção estão disponíveis tanto para serem adicionados nos sistemas autônomos quanto nos inversores conectadas à rede de energia. Alguns inversores que interagem com a rede de distribuição já vêm equipados com estes dispositivos de proteção, que servem como jumper de ligação e na presença de corrente de falta abrem a conexão. Caso estes dispositivos não exerçam o papel do jumper, eles simplesmente atuam desconectando os condutores de corrente (negativo e positivo) do circuito.

Em qualquer cenário de simples falta, como demonstrado acima pelas figuras 09 e 10, a corrente de curto passará pelo jumper. A localização deste (*jumper*), nos sistemas conectados à rede, é geralmente dentro dos inversores e, nos sistemas autônomos, é em um ponto central no lado CC, onde existe um acesso imediato ao condutor de aterramento do eletrodo, que pode ser dentro do inversor ou não. De qualquer maneira, o lugar mais lógico para a instalação do dispositivo de proteção é nesse ponto central nos sistemas autônomos e dentro do inversor nos sistemas conectados à rede de energia.

### 3.4 Artigo 690.5 (NEC)

Em 2008, os dispositivos de proteção (*GFPD*), que eram exigidos somente em circuitos ligados à rede, foram estendidos a todos os sistemas de energia solar, com raras exceções.

Com o intuito de abranger efetivamente todos os problemas de falta à terra nos circuitos CC, as obrigações estabelecidas pela NEC, regulamentada pelo artigo **690.5**, em relação aos dispositivos de proteção englobam os seguintes fatores:

- 1- Detectar a corrente de falta
- 2- Interromper a corrente de falta
- 3- Indicar a existência de uma falta
- 4- Abrir o condutor FV não aterrado ou induzir o inversor ou o controlador de carga a pararem de enviar energia

Há diversas formas de cumprir todos os itens. Por exemplo, no *jumper* de ligação, um dispositivo de sobre corrente pode ser instalado e, então, ele se abre quando necessário, interrompendo a corrente de falta – item nº1 e nº2. Se um disjuntor servir como dispositivo de sobre corrente, a posição do punho indica a existência da falta – item nº3. Se um fusível for utilizado, um circuito extra de monitoramento eletrônico dentro do inversor indica a existência da falta. A chave de desconexão CC é utilizada para desconectar os condutores não aterrados – item nº4.

De forma análoga a outros requisitos, não existe nenhuma menção na NEC a respeito de como implementar tais exigências. Não há requisitos quanto à localização nem os limites de corrente dos dispositivos.

### 3.5 Ponto Cego

Em qualquer arranjo FV, correntes de fuga são esperadas e fluem normalmente pelo condutor dos equipamentos, passando pelos dispositivos de proteção. Sua frequência aumenta com o envelhecimento dos sistemas e em ambientes chuvosos. Para que o sistema não fique desarmando desnecessariamente, o limite de sobre corrente destes dispositivos, que varia de acordo com o tamanho do sistema, deve permitir correntes de fuga até certos valores.

Situações de curto-circuito entre o condutor aterrado e o condutor de proteção podem criar correntes inferiores a esse limite estipulado e, dessa forma, passam despercebidas pelos dispositivos de sobre corrente. A partir desse momento, uma falta do condutor **não** aterrado tem o potencial de estabelecer o que é conhecido como ponto cego.

Analizando-se o incidente em Bakersfield e em Mount Holly nos EUA, em cujas cidades ocorreram casos graves de incêndio em arranjos fotovoltaicos, os especialistas – engenheiros elétricos- esclareceram a sua existência. Abaixo são discutidas as principais causas dos incêndios, explicando melhor o problema do ponto cego.

A figura 11, a qual retrata o caso de Mount Holly ocorrido em abril de 2011, mostra inicialmente um curto entre o condutor de aterramento e o condutor negativo aterrado. A corrente, como discutido mais acima, enxerga dois caminhos diferentes para retornar à fonte geradora. Observa-se que a corrente que passa pelo fusível – 2 amperes – não é capaz de acioná-lo, pois foi propositadamente dimensionado para valores acima de 5 A.

Cria-se, pois, uma situação em que a falta à terra do condutor aterrado não é interrompida pelo dispositivo de proteção. Algum período desconhecido após o primeiro evento, ocorre um curto entre o condutor **não** aterrado – o terminal positivo – e o condutor de aterramento dos equipamentos, indicado na figura 12. A corrente de curto criada por esse segundo evento é interrompida pelo dispositivo. Porém, como os dois curtos ainda prevalecem, uma altíssima corrente flui através de um condutor não preparado para suportá-la, e, então, inicia-se o incêndio.

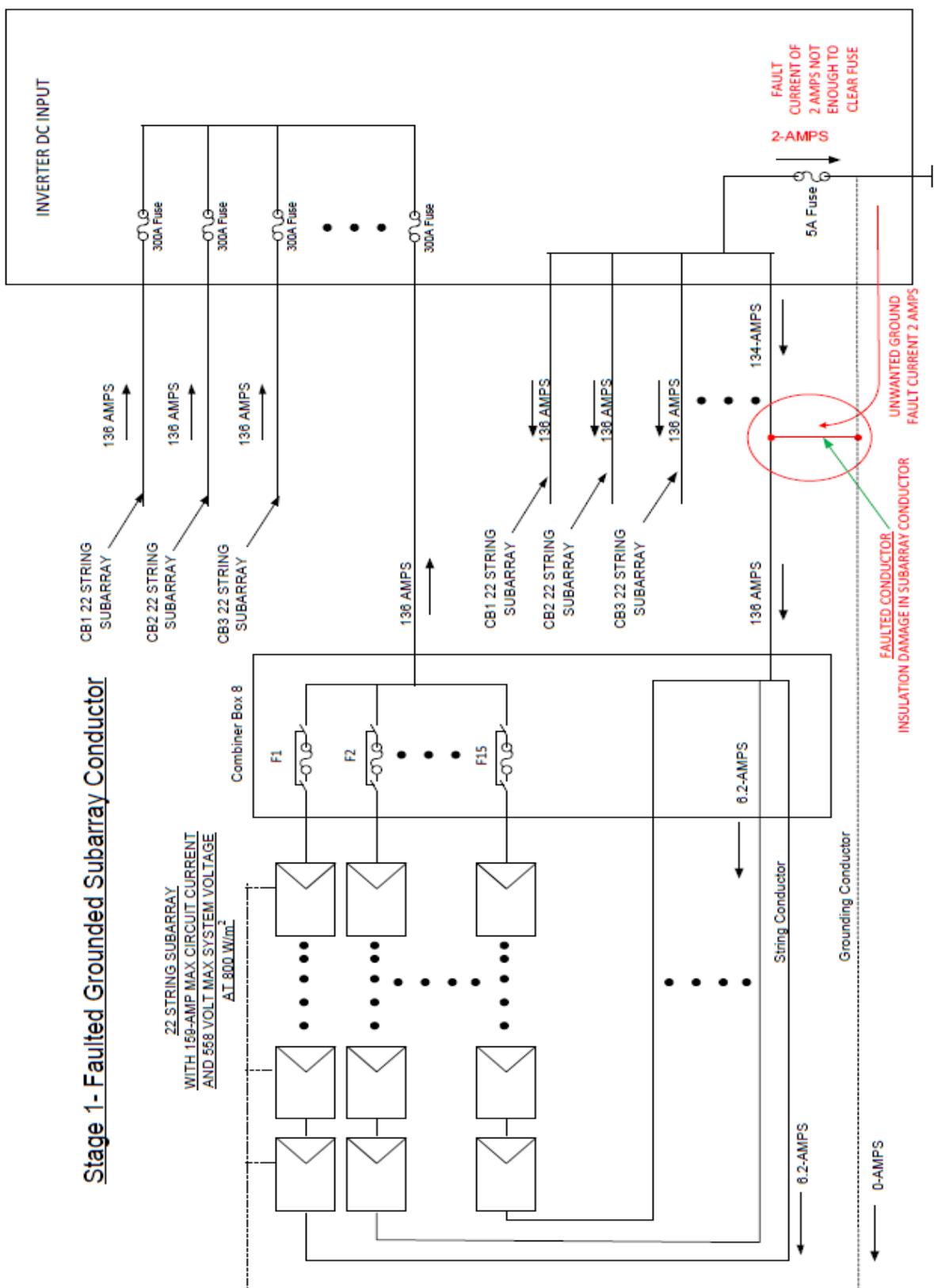


Figura 11 – Primeiro Curto em Mount Holly [3]

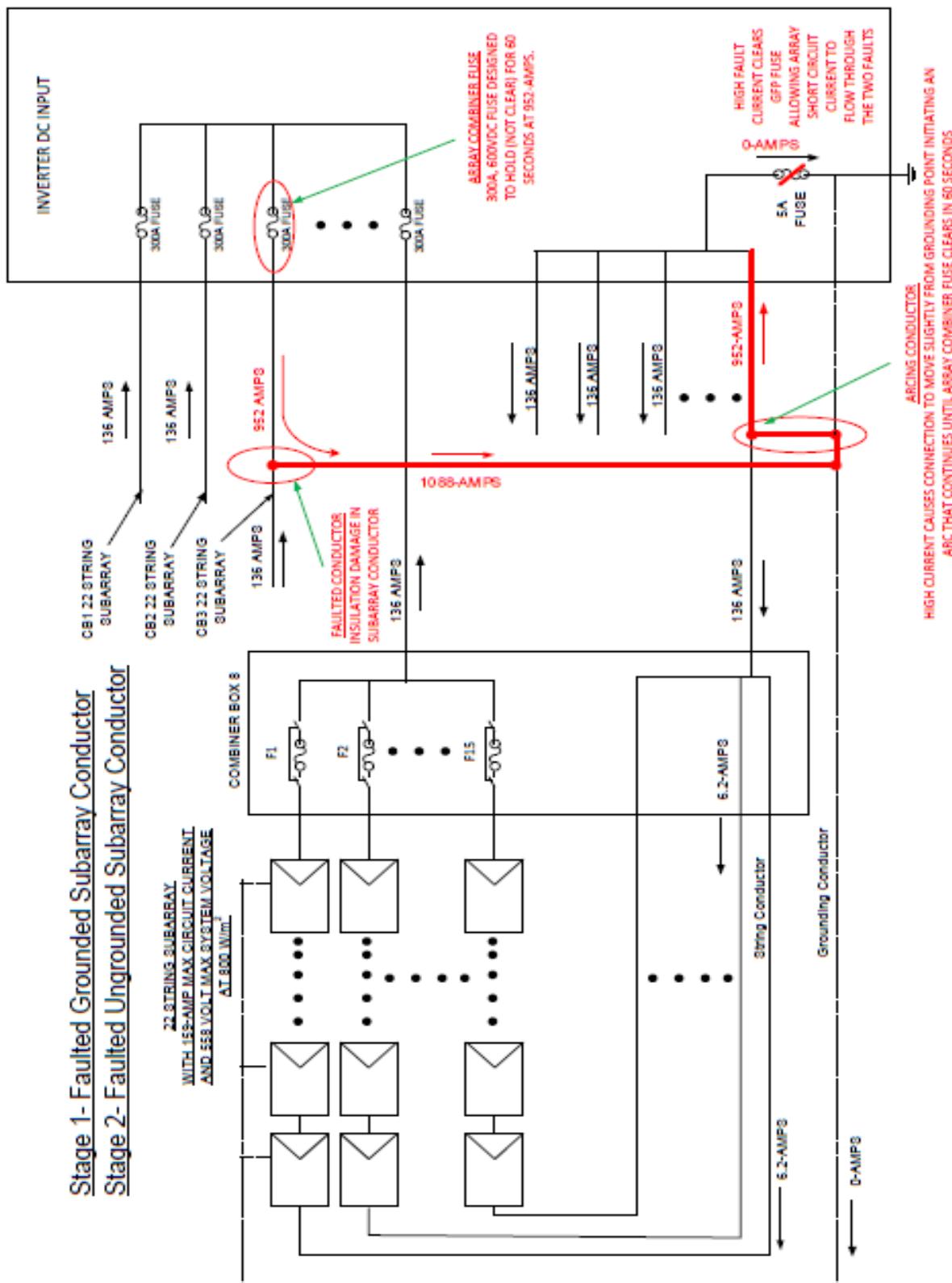


Figura 12 – Segundo Curto em Mount Holy [3]

Em 2009, na cidade de Baskerfield – Califórnia – ocorreu um incêndio por motivos semelhantes ao de Mount Holly, mudando apenas a localização e os valores das correntes de falta. As figuras 13 e 14 mostram o caso. De qualquer forma, em ambos, antes da falta à terra do condutor **não** aterrado, já existia uma corrente de curto, devido ao condutor aterrado, não identificado, fatos que somados caracterizam ponto cego.

A organização Solar ABCs (vide glossário) foi a responsável por elaborar os estudos e análises relativos aos incidentes acima citados. Ultimamente, têm trabalhado em projetos e pesquisas junto com as principais indústrias, com o objetivo de elaborar medidas estratégicas de mitigação dos efeitos ocasionados pelo ponto cego, além de outros aspectos considerados importantes.

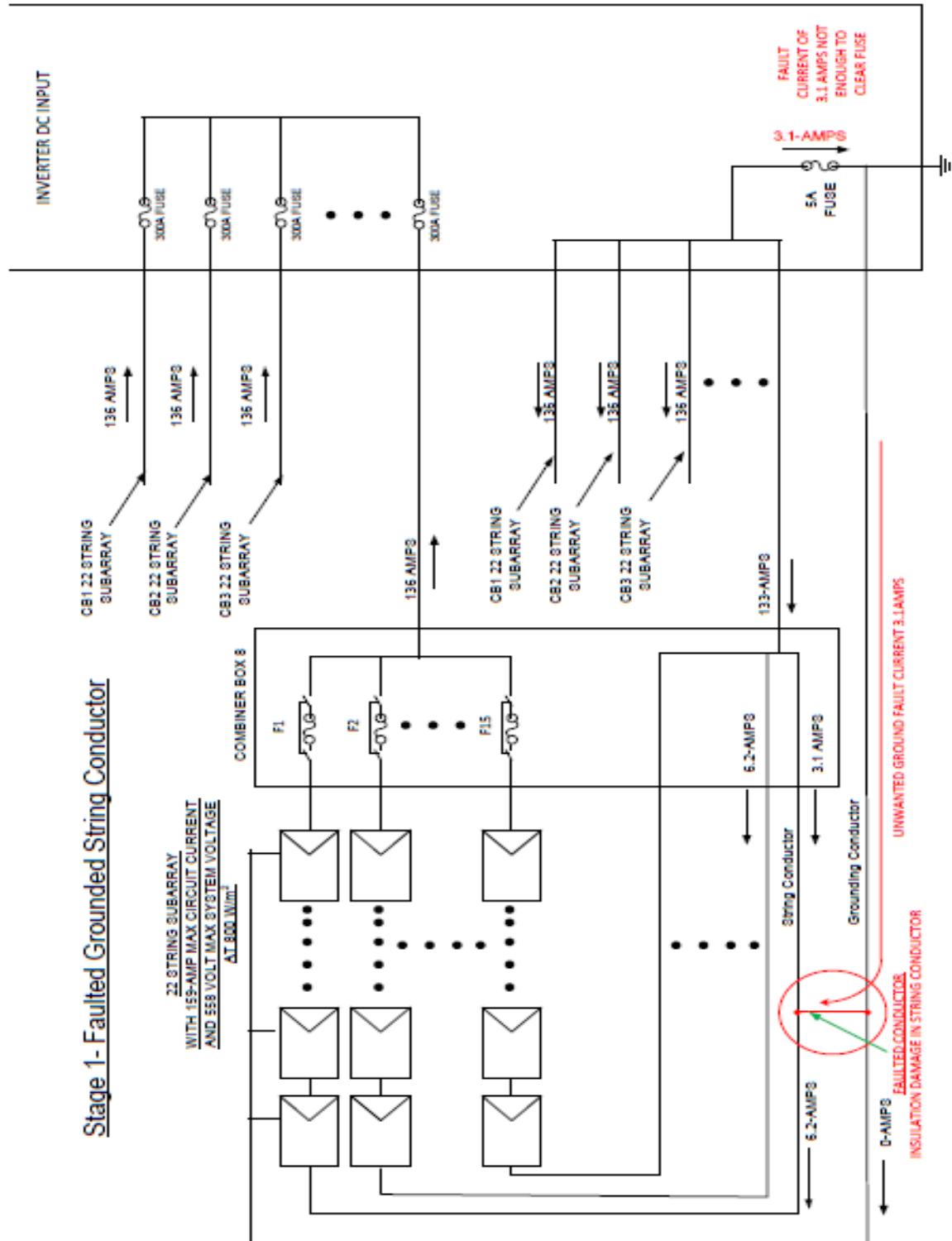


Figura 13 – Primeiro Curto em Baskerfield [3]

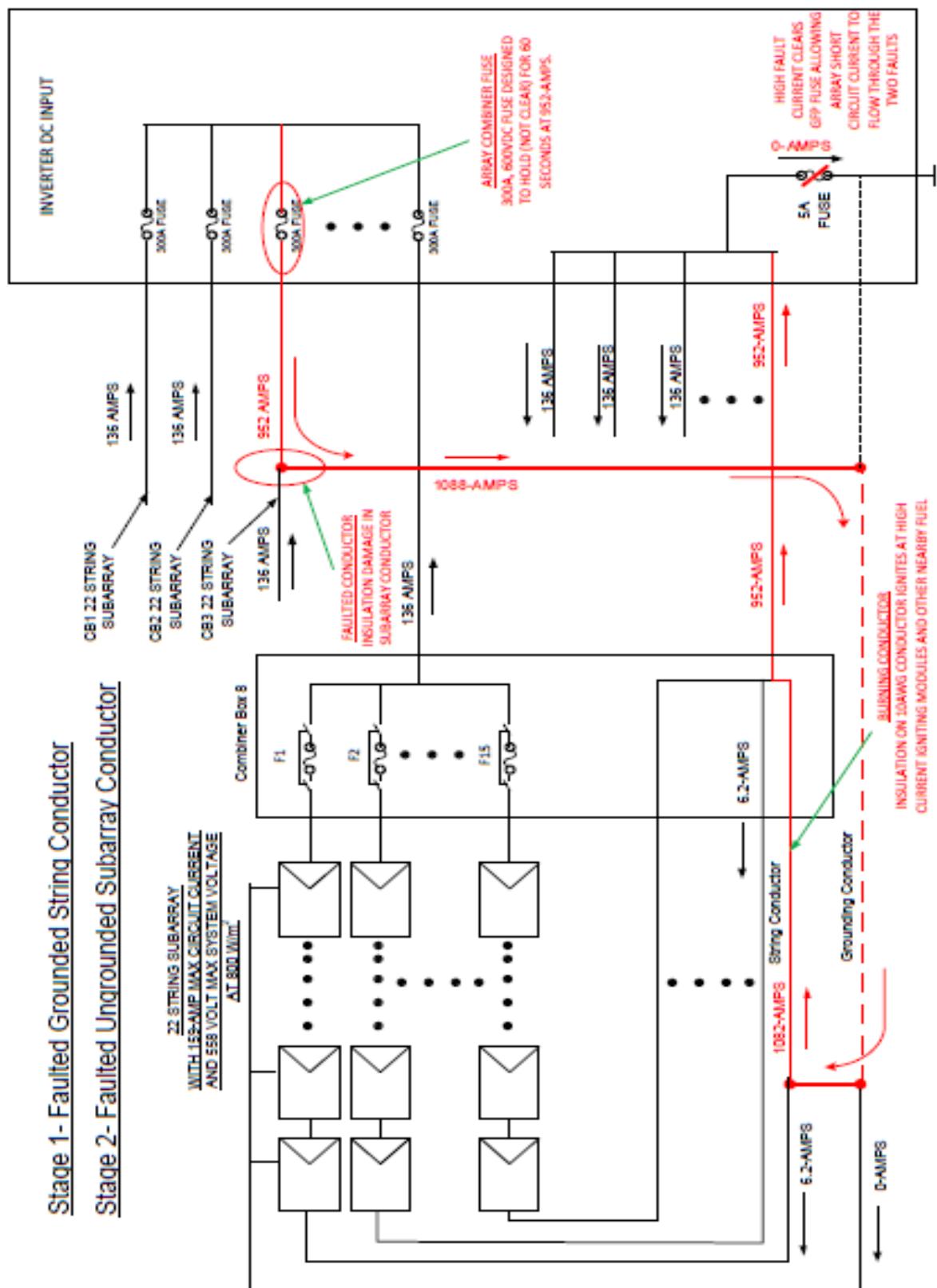


Figura 14 – Segundo Curto em Baskerville [3]

#### **4. Conclusões**

Ao longo desta monografia, foi feita a análise dos métodos de aterramento e proteção dos sistemas FV, segundo padrões e normas de instituições americanas. Conforme observado em alguns momentos do texto, ainda existem lacunas a serem preenchidas, uma vez que o principal agente regulamentador, NFPA, é evasivo ou mesmo omissivo em determinadas passagens – publicadas na NEC – no que tange ao assunto proposto.

Ao tentarem se enquadrar nos requisitos citados pela NEC, os agentes do mercado (indústria, empresas, geradores autônomos,...) encontram dificuldades em compreender e, por conseguinte, instalar e adaptar os sistemas aos melhores métodos de aterramento. Também se deparam com situações em que não é explicado de qual forma implantar certas obrigações. Por exemplo, a NEC exige que os dispositivos de proteção sejam capazes de identificar e interromper correntes de falta à terra, entretanto, nada diz a respeito dos procedimentos necessários para alcançá-los.

Por outro lado, quando comparado ao Brasil, o avanço da indústria de energia solar já estabelecido nos EUA é bem superior, e é através de discussões e futuros problemas que eles irão aperfeiçoando o setor.

## 5. Sugestões para trabalhos futuros

A seguir são apresentados trabalhos cujos temas poderão contribuir com o aperfeiçoamento deste trabalho.

- Estudo comparativo entre dispositivos de proteção que melhor atendem aos requisitos da NEC.
- Melhores formas para o aterramento dos equipamentos e superfícies metálicas em arranjos FV.
- Estratégias de mitigação dos riscos do ponto cego. (Atualmente, estudos da organização Solar ABCs estão em curso)

## 6. Referências Bibliográficas

- [1] Almeida, M.P. “Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede”. Dissertação de mestrado, USP, 2012.
- [2] Wiles, J.C. “Photovoltaic System Grounding”. College of Engineering, New Mexico State University. Outubro, 2012  
Texto disponível em: <http://www.solarabcs.org> (acessado em 11/01/2013 às 11:00h)
- [3] “Photovoltaic Module Grounding: Issue and Recommendations”. Solar ABCs – Solar America Board for Codes and Standards. 17 de Julho, 2012  
Texto disponível em: <http://www.solarabcs.org> (acessado em 25/11/2012 às 10:00h)
- [4] Wiles, J.C. “PV Grounding”. Outubro e Novembro, 2004.  
Texto disponível em: <http://www.nmsu.edu/> (acessado em 12/01/2013 às 9:00h)
- [5] Wiles, J.C. “Ground-Fault Protection is Expanding”. Fevereiro e Março, 2008.  
Texto disponível em: <http://www.nmsu.edu/> (acessado em 13/02/2013 às 9:00h)
- [6] Wiles, J.C. “Ungrounded PV Systems”. Outubro e Novembro, 2010.  
Texto disponível em: <http://www.nmsu.edu/> (acessado em 14/01/2013 às 10:00h)
- [7] Wiles, J.C. “Photovoltaic Power Systems And the 2005 National Electrical Code: Suggested Practices”. Fevereiro, 2005.
- [8] Wiles, J.C. “Ungrounded Electrical Systems!”. Setembro e Outubro, 2010.  
Texto disponível em: <http://www.nmsu.edu/> (acessado em 14/02/2013 às 11:00h)
- [9] Holt, M. “Solar Photovoltaic Systems – Part 2”. 20 de outubro, 2010.  
Texto disponível em: <http://ecmweb.com/> (acessado em 17/01/2013 às 9:00h)

[10] Andorka, F. “Installantion Practices: Keep Your PV System Well-Grounded”. 9 de abril, 2012.

Texto disponível em: <http://www.solarpowerworldonline.com/> (acessado em 22/01/2013 às 9:00h)

[11] Revista O Setor Elétrico;

Texto disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/> (acessado em 25/01/2013 às 9:00h)

[12] National Fire Protection Association

Texto disponível em: <http://www.nfpa.org/> (acessado em 27/01/2013 às 10:00h)

[13] “Photovoltaic system protection”

Texto disponível em: <http://www.saltek.eu/> (acessado em 15/03/2013 às 9:00h)

[14] “Soluções OBO para sistemas fotovoltaicos”

Texto disponível em: <http://www.obo.pt/> (acessado em 15/03/2013 às 10:00h)