

Câmara dos Deputados  
Comissão de Minas e Energia  
Audiência Pública - Requerimento 24/2022

# **Riscos de Incêndios em Instalações Fotovoltaicas**

Tecnologias para mitigação dos riscos

---

Prof. Dr. Leandro Michels  
Universidade Federal de Santa Maria / Instituto de Redes Inteligentes  
michels@inriufsm.com.br

1

# Expertise no tema

## Pesquisador e Instituição

# UFSM: Instituto de Redes Inteligentes



Instituto especializado em Recursos Energéticos Distribuídos

- FV / Eólica / Motor-gerador
- Redes inteligentes

Pesquisa & Desenvolvimento

- Industry funding
- Reconhecido pelo ICT - MCTI
- Financiamentos : ANEEL / ANATEL / Lei de Informática

Laboratórios de testes

- Energia Fotovoltaica
- Transformadores de Distribuição
- Energia Eólica

# UFSM: Laboratório de Ensaio Fotovoltaico

PBE INMETRO

**INVERSORES FV  
ON GRID**



até  
75 kW

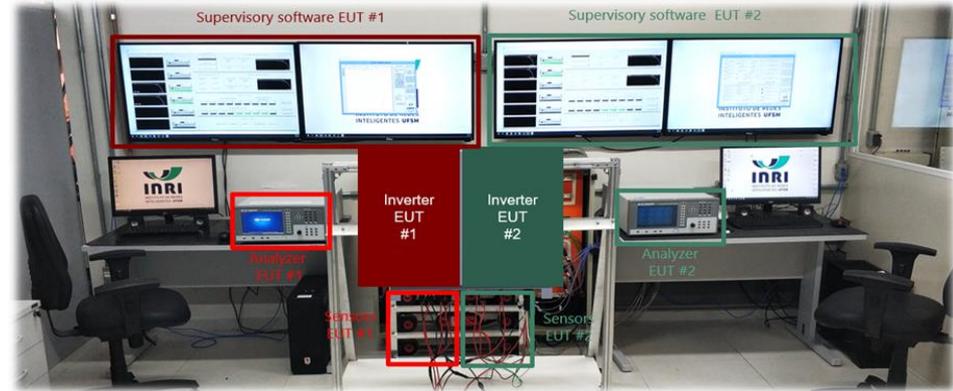
## Normas:

- Portaria INMETRO 004/2011 Anexo III, Parte 2
- ABNT NBR IEC 62116: 2012
- ABNT NBR 16149: 2013
- ABNT NBR 16150: 2013

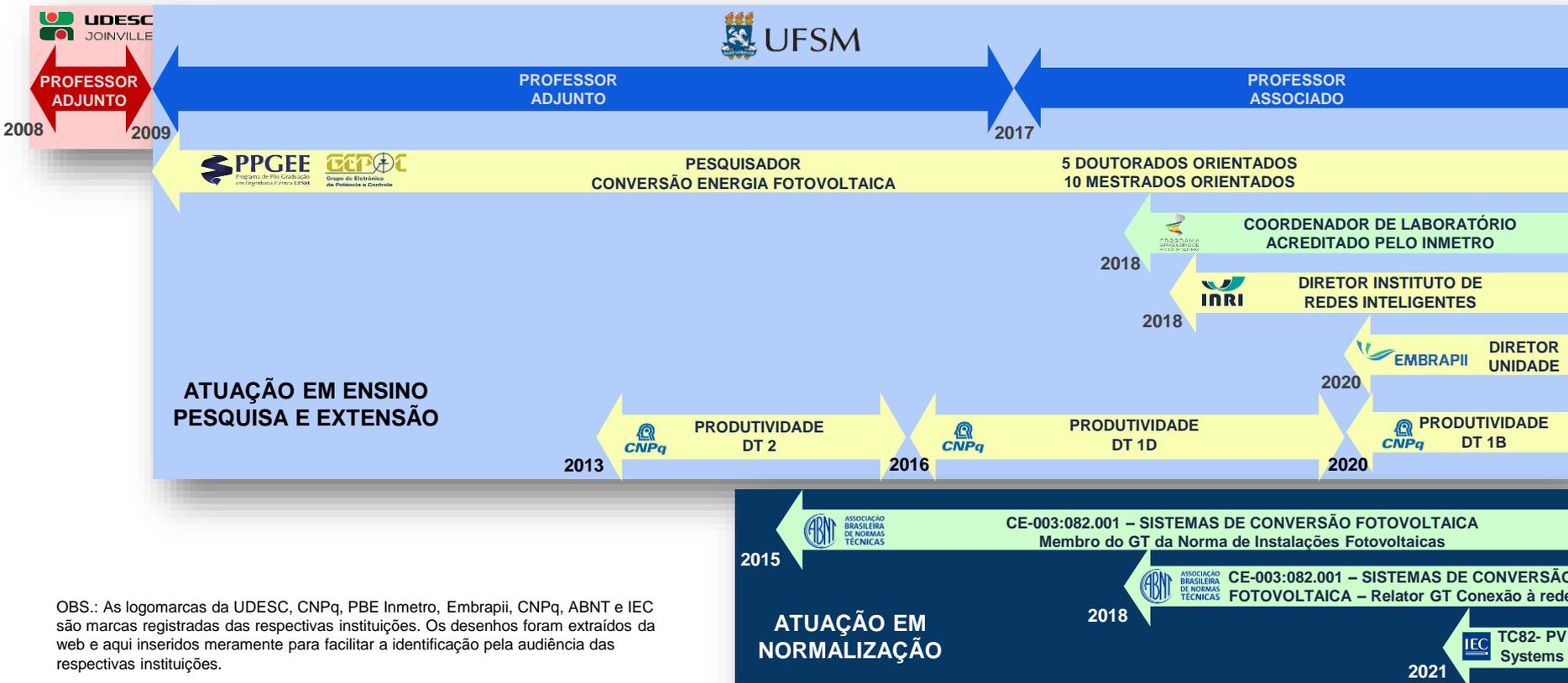
Participa do PBE  
desde 2017

Mais de 100  
ensaio realizados

Realiza ensaios de  
outros  
equipamentos de  
segurança para  
sistemas  
fotovoltaicos sob  
demanda



# Leandro Michels: trajetória profissional



OBS.: As logomarcas da UDESC, CNPq, PBE Inmetro, Embrapii, CNPq, ABNT e IEC são marcas registradas das respectivas instituições. Os desenhos foram extraídos da web e aqui inseridos meramente para facilitar a identificação pela audiência das respectivas instituições.

# 2

## Riscos de incêndio em SFV

Quais são as principais causas?

## Fatores intrínsecos (controláveis)

Fatores associados a eventos que tenham envolvimento dos elementos ou dos processos de fabricação e instalação do sistema fotovoltaico:

- Uso de equipamentos ou dispositivos inadequados
- Projeto inadequado
- Tecnologia inadequada

## Fatores extrínsecos (não controláveis)

Fatores associados a eventos externos que impactam no sistema fotovoltaico instalado:

- Fatores climáticos extremos (vendavais, granizo, raios, cinzas, etc)
- Acidentes não previsíveis
- Calor ou fogo de origem externa

# Risco de incêndio em SFV: Fatores intrínsecos (1)

## Arco Elétrico em Série

Risco

Arco elétrico gera elevado calor que provoca a combustão de elementos do SFV

Origem do problema

Execução / operação / componentes / eventos externos

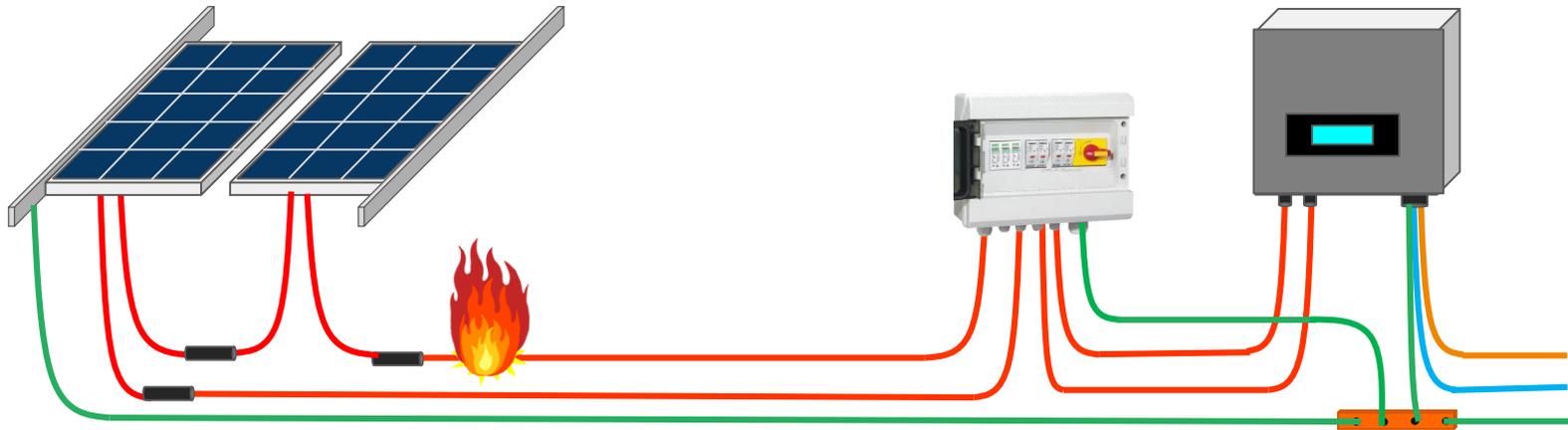
Local de incidência

Qualquer local do circuito c.c. (módulos, conectores, caixa de conexão, ...)

**1. Mal contato em conector ou caixa de conexão**

**2. Geração de arco elétrico**

**3. Geração de calor excessivo: dispositivos prendem fogo**



# Risco de incêndio em SFV: Fatores intrínsecos (1)

## Exemplo 1

Execução inadequada + dispositivo inadequado + falta de proteção → arco elétrico + fogo

Desconexão mecânica de cabo c.c. longo gera condições para o arco série



Fonte: ensaio INRI/UFMS

# Risco de incêndio em SFV: Fatores intrínsecos (2)

Corrente de fuga excessiva

Risco

Ignição de material combustível através de pontos quentes e/ou microarcos

Origem do problema

Inversor produz elevada corrente de fuga + acúmulo de sujeira

Local de incidência

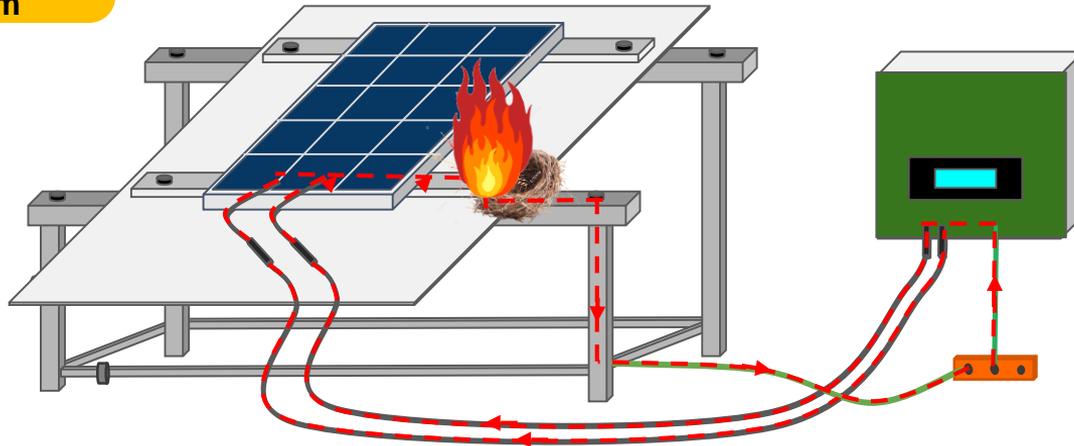
Interconexões do circuito de equipotencialização (estrutura de fixação)

1. Inversor intrinsecamente gera elevada corrente de modo comum

2. Acumulação de material combustível junto aos módulos

3. Pontos quente e/ou microarcos

4. Material combustível externo prende fogo



# Risco de incêndio em SFV: Fatores intrínsecos (2)

## Exemplo 2

Falha na manutenção + corrente de fuga → ponto quente + fogo

Ninhos de aves + excrementos =  
material combustível + corrosão



Foto meramente ilustrativa de ocorrência equivalente

Fonte: [www.sunbrushmobil.com/pt/areas-de-aplicacao/excrementos-de-aves-sobre-o-painel-solar](http://www.sunbrushmobil.com/pt/areas-de-aplicacao/excrementos-de-aves-sobre-o-painel-solar)

Corrente de fuga + mau contato =  
ponto quente



Foto meramente ilustrativa de ocorrência equivalente

Fonte: [ired.co.uk/thermal-imaging/electrical-survey/#!Lightbox/gallery\\_image\\_1/1](http://ired.co.uk/thermal-imaging/electrical-survey/#!Lightbox/gallery_image_1/1)

Ponto quente + material combustível  
= auto ignição e fogo



Foto meramente ilustrativa de ocorrência equivalente

Fonte: [www.org/research/firefighter-safety-and-photovoltaic-systems](http://www.org/research/firefighter-safety-and-photovoltaic-systems)

# Risco de incêndio em SFV: Fatores intrínsecos (3)

## Sobreaquecimento

Risco

Dispositivos prendem fogo por sobreaquecimento excessivo

Origem do problema

Dispositivos prendem fogo

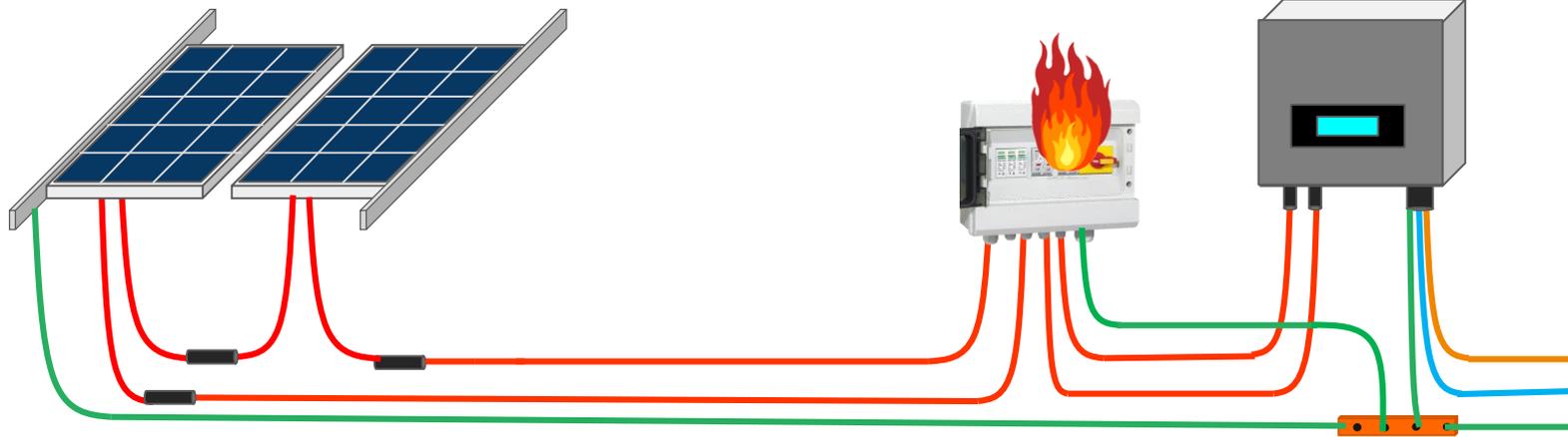
Local de incidência

Qualquer dispositivo do circuito c.c. ou c.a.

1. Sistema opera em condições limites (alta temperatura)

2. Dispositivos inadequados não suportam a condição operacional

3. Geração de calor excessivo ou arcos elétricos: dispositivos prendem fogo



# Risco de incêndio em SFV: Fatores intrínsecos (3)

## Exemplo 3

Projeto incorreto e/ou dispositivo inadequado → calor + fogo

Projeto inadequado sobrecarrega o dispositivo que prende fogo

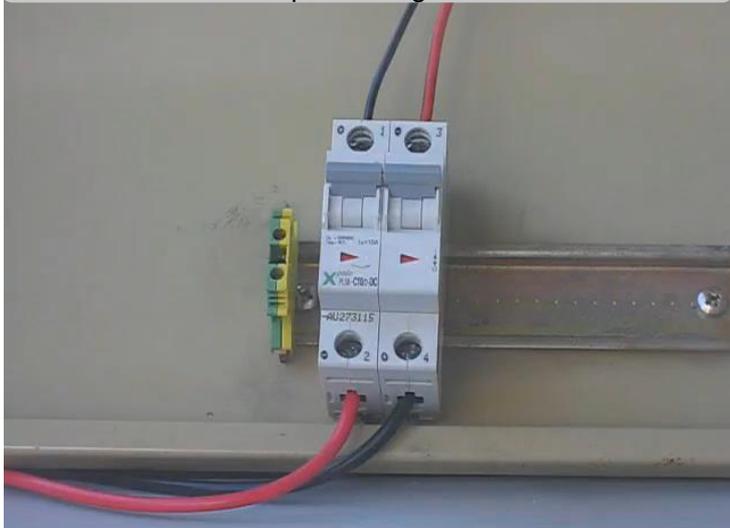


Foto meramente ilustrativa de ocorrência equivalente

Fonte: [www.youtube.com/watch?v=Cup5fMGaE2g](http://www.youtube.com/watch?v=Cup5fMGaE2g)

Fogo se propaga pelos dispositivos



Foto meramente ilustrativa de ocorrência equivalente

Fonte: [www.youtube.com/watch?v=Cup5fMGaE2g](http://www.youtube.com/watch?v=Cup5fMGaE2g)

# Risco de incêndio em SFV: Fatores extrínsecos (1)

Distúrbio  
eletromagnético  
externo

Risco

Energia do distúrbio danifica e causa arcos e curtos-circuitos produzindo fogo

Origem do problema

Descargas eletromagnéticas (raios) ou manobras de cargas indutivas

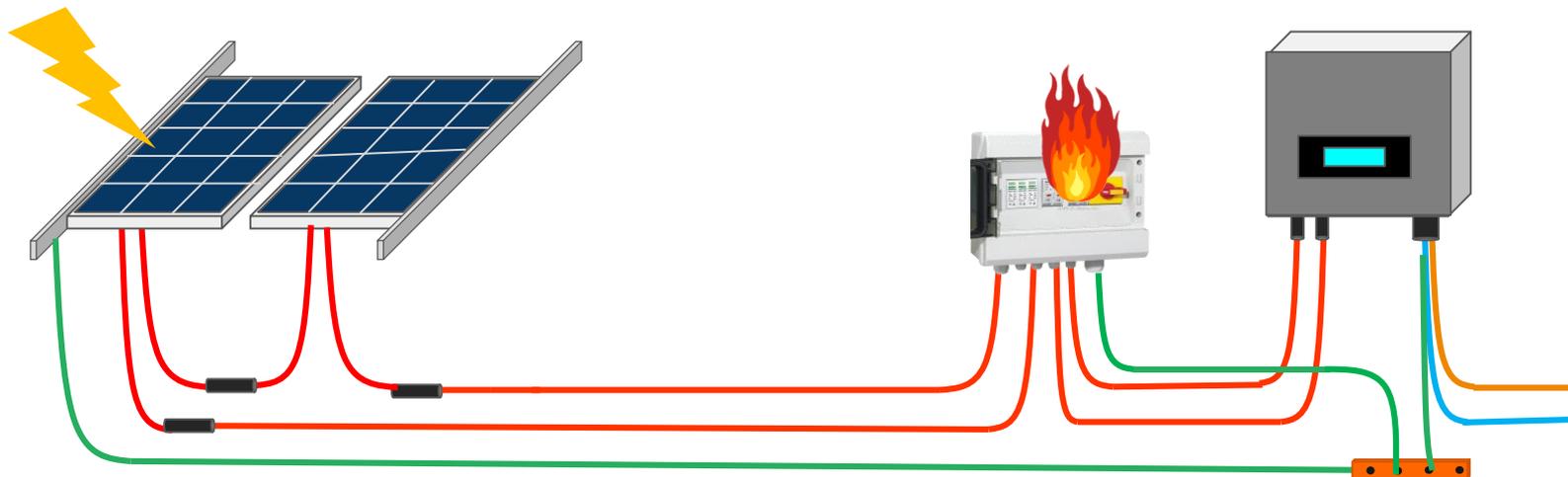
Local de incidência

Módulos atingido todos os dispositivos do circuito c.c. ou c.a.

1. Incidente externo  
(raios)

2. Dispositivo que deveria proteger  
não suporta o incidente

3. Geração de calor excessivo:  
dispositivos prendem fogo



# Risco de incêndio em SFV: Fatores intrínsecos (1)

## Exemplo 1

Energia excessiva do raio → arco elétrico + curto circuitos + fogo

Raio = grande impulso de energia de elevada corrente e tensão



Foto meramente ilustrativa de ocorrência equivalente

Fonte: <https://solartechadvisor.com/solar-panels-lightning/>

Geração de arcos elétricos e curtos-circuitos produz calor e fogo



Foto meramente ilustrativa de ocorrência equivalente

Fonte: <https://www.pveurope.eu/solar-modules/solar-saturday-club-9-tips-secure-your-pv-investment-against-lightning-and-hail>

Geração de arcos elétricos e curtos-circuitos produz calor e fogo



Foto meramente ilustrativa de ocorrência equivalente

Fonte: <https://strikecheck.com/2017/05/30/solar-energy-systems/>

# Risco de incêndio em SFV: Fatores extrínsecos (2)

Incidente mecânico  
ou térmico externo

Risco

Arco elétrico paralelo alimentado pelo SFV (durante o dia)

Origem do problema

Impacto externo ou fogo externo atingindo os dispositivos do SFV

Local de incidência

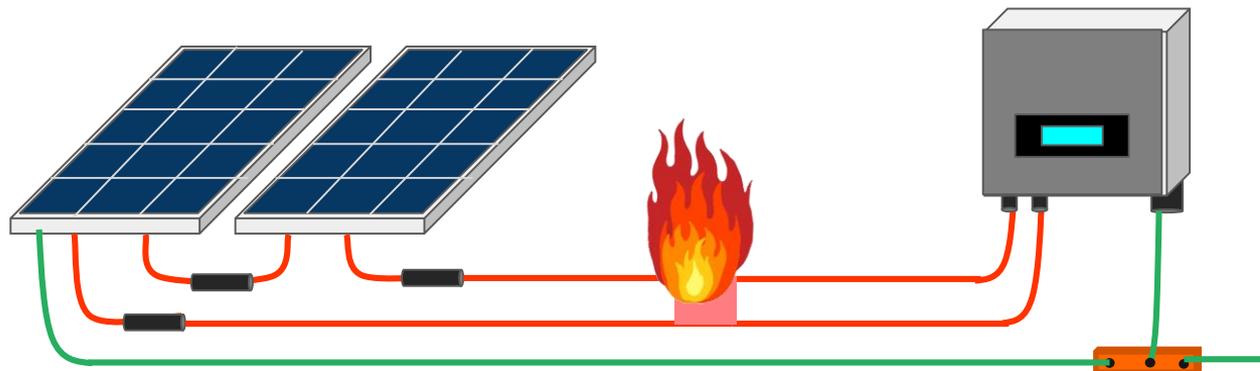
Em qualquer local do circuito c.c. que esteja sujeito ao fogo

1. Acidente corta ambos os  
cabos c.c. ou calor externo  
derrete os cabos (fogo externo)

2. Inicia um curto-  
circuito que produz  
calor

3. Cabos c.c. energizados são  
derretidos pelo incêndio e  
geram um arco paralelo

4. Energia do sol  
alimenta o fogo



# Risco de incêndio em SFV: Fatores extrínsecos (2)

## Exemplo 2

Danificação de ambos os cabos de uma string → arco elétrico paralelo + fogo

Energia gerada pelos módulos alimenta o fogo



# Risco de incêndio em SFV: Fatores extrínsecos (2)

2. BOMBEIRO  
Combate o fogo

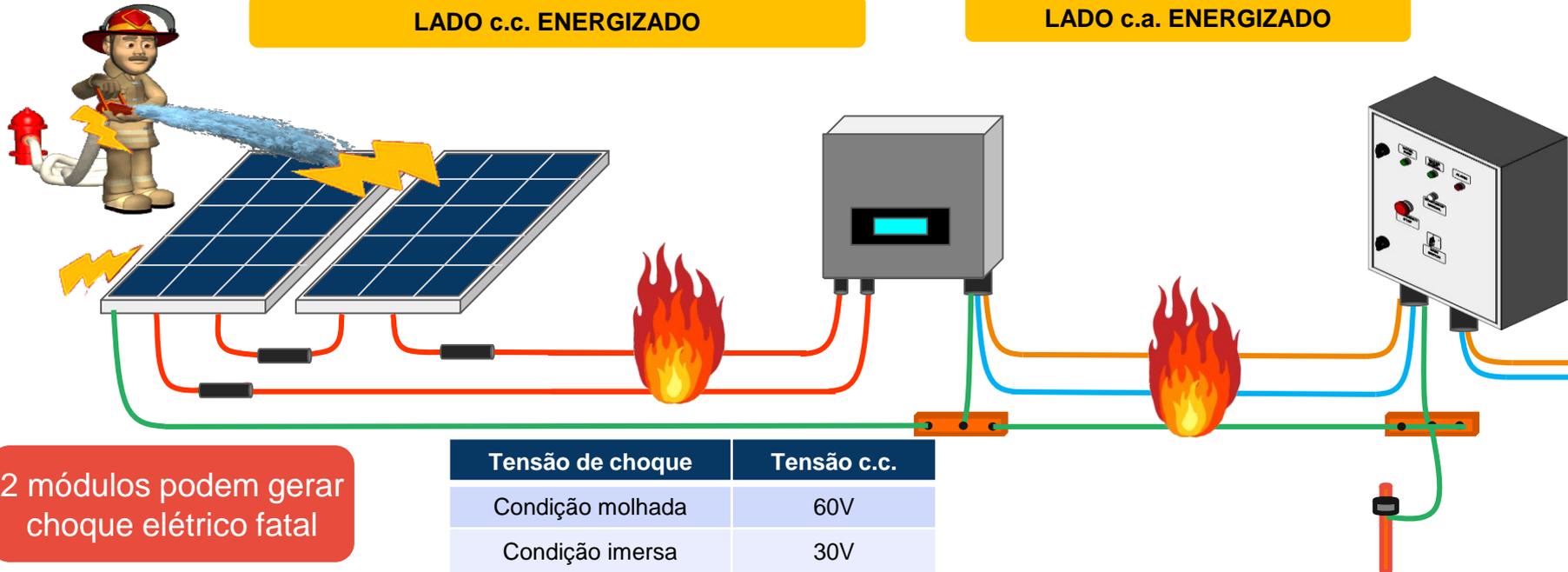
ENERGIA FV c.c.  
ALIMENTA O FOGO

1. BOMBEIRO  
Desliga chave geral

SEM ATERRAMENTO

LADO c.c. ENERGIZADO

LADO c.a. ENERGIZADO



# 3

## Mitigação dos principais riscos

Como se reduz significativamente os incêndios?

# Mitigação de riscos: Conceitos de tolerância a falhas

	Descrição	Ação requerida	Equipamentos FV	Equipamentos FV
Falhas críticas de segurança (sinistros)	São aquelas onde uma falha pode resultar em um resultado trágico, como perda de equipamento ou de vidas	Deve ter tolerância à falhas simples diante de riscos críticos de segurança	Equipamentos FV não podem causar incêndio ou choque letais em pessoas	Redundância nas proteções contra fogo e choque elétrico deve ser garantida para que uma única falha não cause morte ou fogo
Falhas críticas de missão (disponibilidade)	São aquelas que podem provocar a abordagem de uma operação, mas não apresentam riscos de segurança	Desejável manter a operação diante da ocorrência falhas de operação, mas não é obrigatório	Equipamentos FV normalmente* não possuem missão crítica, pois desligar ao detectar uma falha é uma opção sem grandes encargos	Não requer redundância para operação, podendo desligar o inversor caso se identifique uma falha e acionar alarme

\* Algumas aplicações off-grid ou com armazenamento podem ter missão crítica

Toda a tolerância a falhas baseia-se em estatística: não existe proteção 100% eficaz

Fonte: [https://www.cs.unc.edu/~anderson/teach/comp790/papers/fault\\_tolerance\\_avionics.pdf](https://www.cs.unc.edu/~anderson/teach/comp790/papers/fault_tolerance_avionics.pdf)

## Análise de riscos

Estudo de causa e efeito para avaliar as medidas mitigatórias necessárias (ex. FMEA)

- Falha: Perda de função quando ela é necessária.
- Modo de Falha: Como você observa o dano causado
- Efeito da falha: Resultado ou consequência da falha
- Ocorrência de falha: Quantas vezes isto acontece
- Severidade de falha: O quão grave é a falha quando ela ocorre?
- Detecção de falha: Posso encontrar a falha antes dela ocorrer?

## Medidas mitigatórias

Escolha baseadas em um grau de prioridade (ex.: Número de prioridade de Risco – análise FMEA):

- Proteção contra falhas simples / redundâncias
- Testes, ensaios e verificações
- Procedimentos e processos

FMEA: Ferramenta amplamente utilizada na indústria aeronáutica e automotiva para decisão sobre medidas mitigatórias quanto ao risco

# Processos envolvidos na mitigação de riscos



# Mitigação de riscos: fatores intrínsecos (1)

## Arco Elétrico em Série

- Proteção 1
- Proteção 2

- Detector e interruptor de arco elétrico série
- Garantia de componentes que não peguem fogo

- REGULAMENTAÇÃO
- Brasil
- RAC 2022 – Opcional com indicação
- EUA
- Europa
- UL1699B
- IEC 63027

EUA exige proteção AFCI em todas as instalações fotovoltaicas em edificações (NEC70)



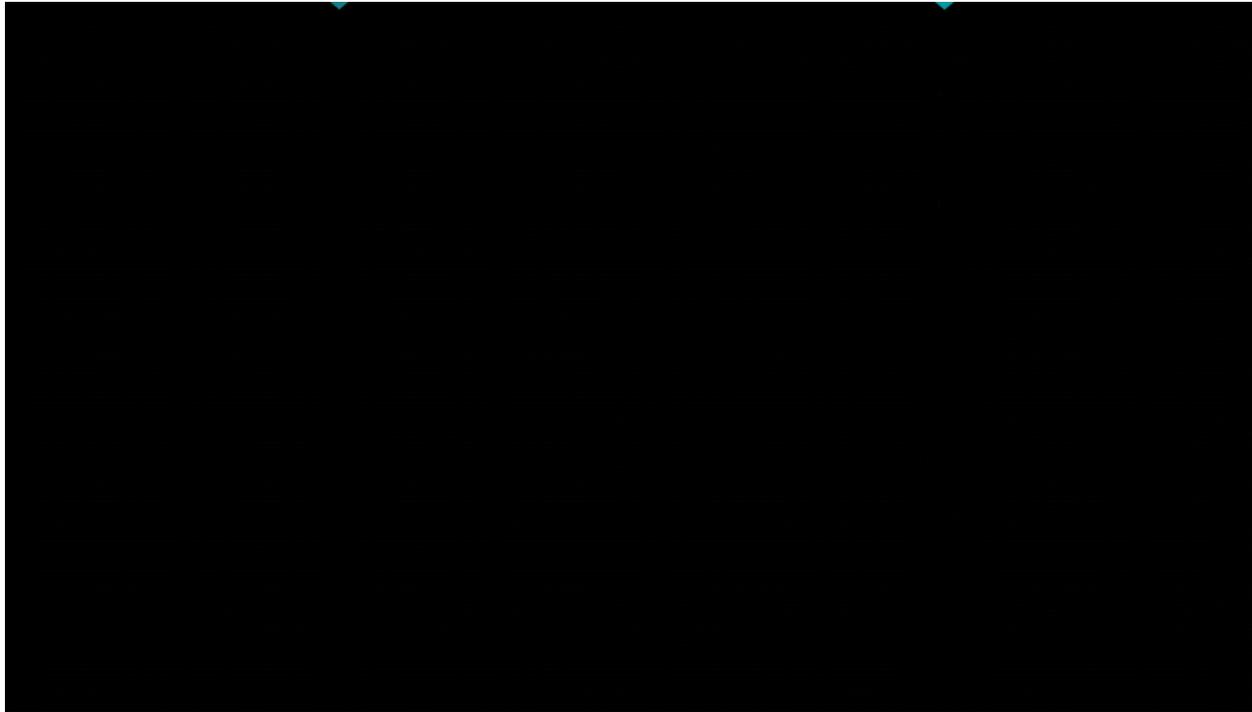
OBS.: AFCI instalado junto ao inversor protege contra arcos elétricos em todo o circuito c.c.

\* Em situações específicas pode ser dispensado

# Mitigação do riscos (2): arco elétrico série

## Exemplo 1

Abertura sob carga de cabo c.c. de uma string



Fonte: ensaio INRI/UFSM

# Mitigação de riscos: fatores intrínsecos (2)

Corrente de fuga excessiva

Proteção 1

Detector de perda da resistência de isolamento

Proteção 2

Detector e interruptor de corrente de fuga excessiva

REGULAMENTAÇÃO

Brasil

RAC 2022 – Obrigatório a partir de 2024

EUA

UL1741

Europa

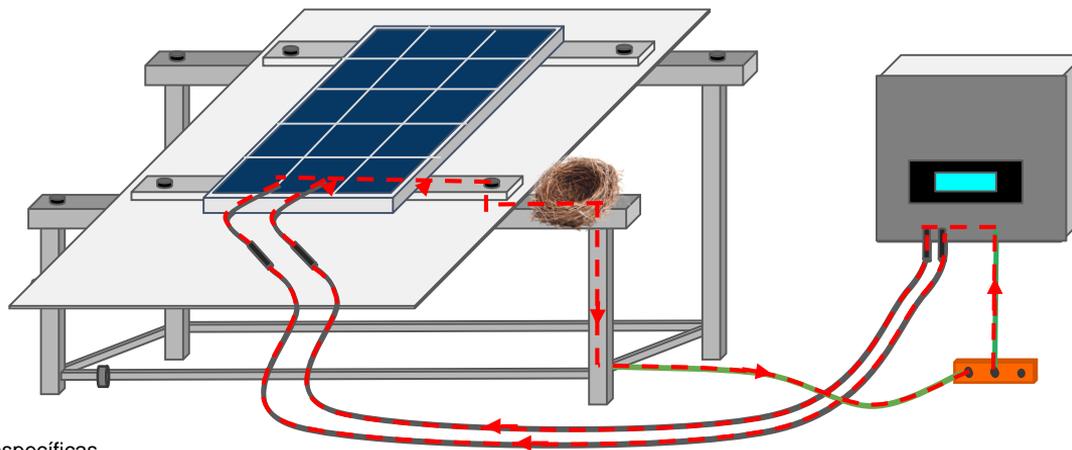
IEC 62109

EUA e Europa exigem proteção contra corrente de fuga desde 2011

1. Inversor intrinsecamente gera corrente de modo comum

2. Caso fatores externos resultem em valor maior que o crítico (300 mA)

3. Inversor desconecta e fuga de corrente é extinta



OBS.: O RCMU instalado junto ao inversor protege contra correntes de fuga e falhas de isolamento todo o circuito c.c.

\* Em situações específicas pode ser dispensado

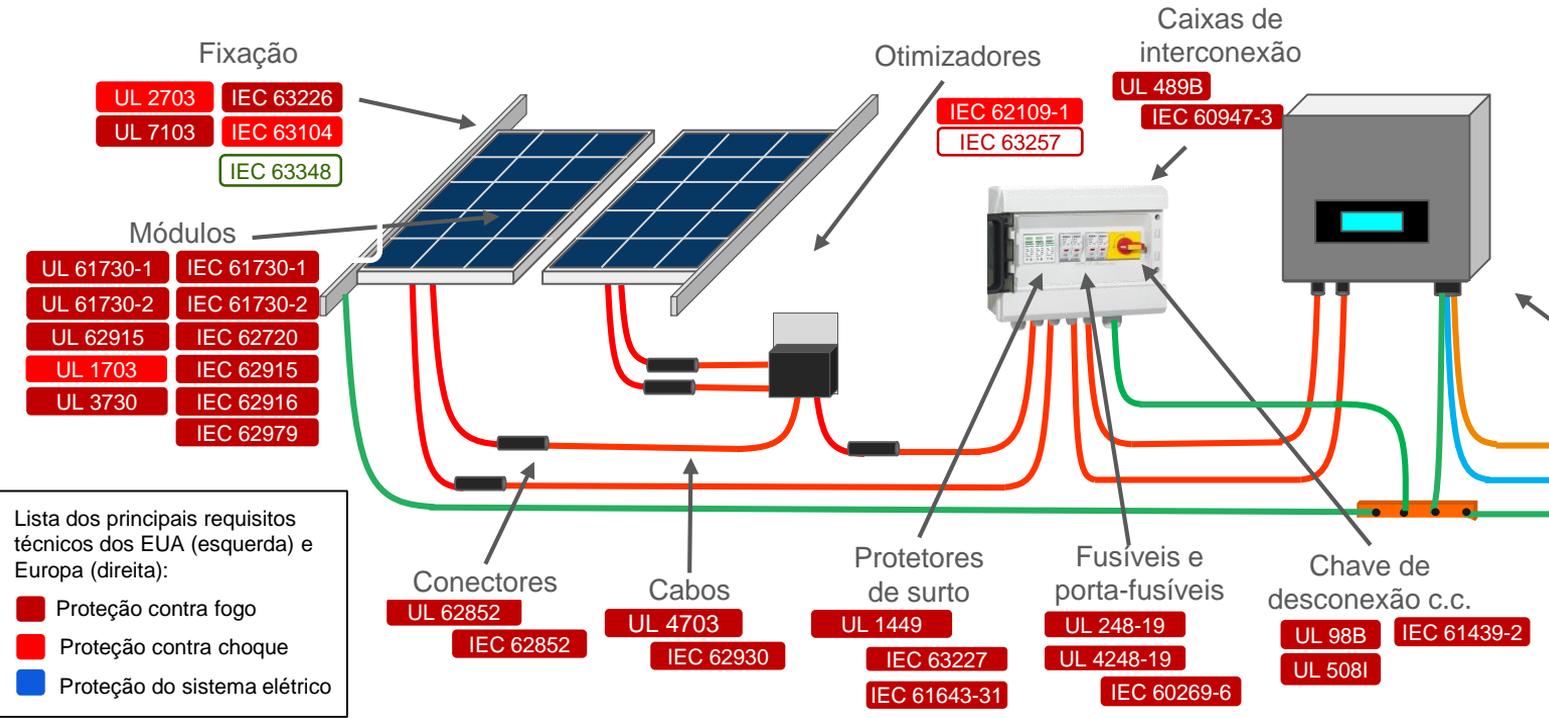
# Mitigação de riscos: fatores intrínsecos (3)

**Sobreaquecimento**

**Proteção 1**  
**Proteção 2**

Ensaio de verificação do atendimento das especificações  
Ensaio de inexistência de propagação de chama

**REGULAMENTAÇÃO**  
Brasil  
**RAC 2022 – Somente módulos (poucos testes)**  
EUA figura  
Europa figura  
EUA exige certificação obrigatória de todos os elementos por laboratório acreditado (NEC70)



**Inversores**  
UL 1699B IEC 63027  
UL 62109-1 IEC 62109-1  
UL 62109-2 IEC 62109-2  
IEC 63112  
IEC 62093  
EN 50549-1  
UL 1741 EN 50549-2  
IEC 62116

# Risco de incêndio em SFV: Fatores extrínsecos (1)

Distúrbio eletromagnético externo

Proteção 1

Proteções contra surto / equipotencialização / aterramento

Proteção 2

Imunidade a surge/burst em todos os dispositivos

REGULAMENTAÇÃO

Brasil

Sem regulamentação de dispositivos

EUA

UL1741

Europa

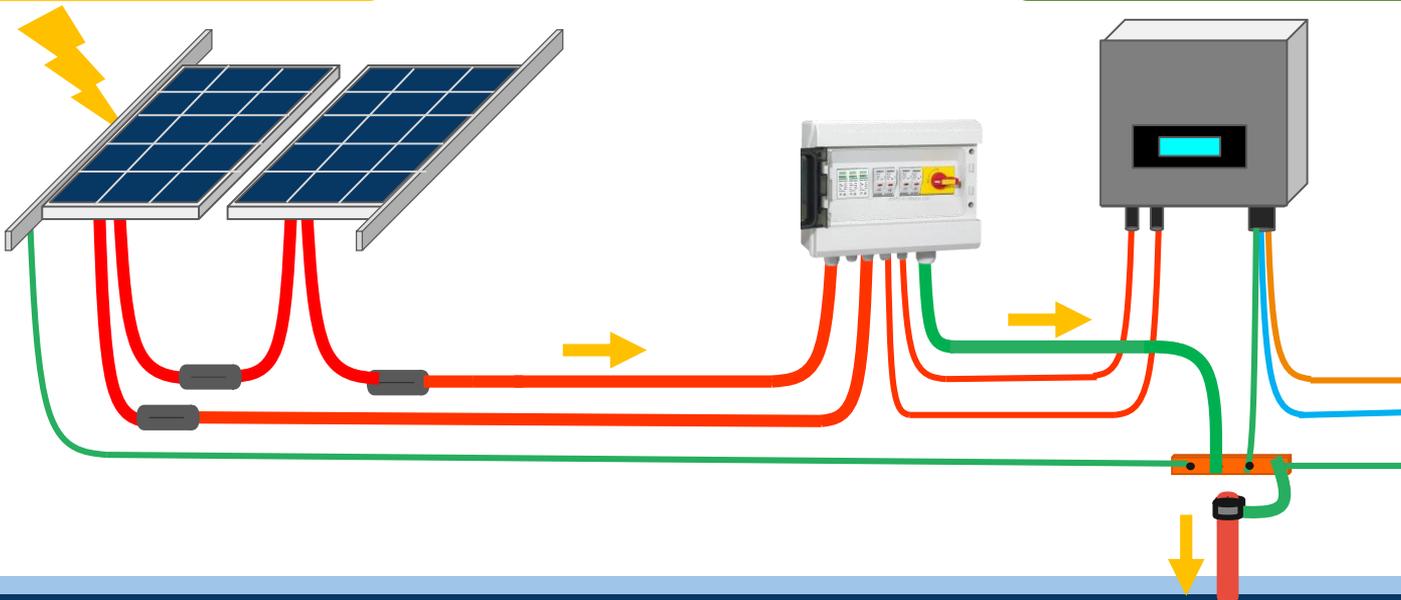
IEC 62920

EUA exige desde 1999 e Europa desde início dos anos 2000

1. Incidente externo (raio)

2. Dispositivos de proteção atuam e drenam a energia para a terra

3. Nenhum surto é propagado pela instalação elétrica



# Mitigação de riscos: fatores intrínsecos (2)

Incidente mecânico ou térmico externo

Proteção 1

Exigência de sistema de desligamento do lado c.c.

Proteção 2

Ensaio da tolerância a falhas do sistema de desligamento

REGULAMENTAÇÃO

Brasil

Sem regulamentação

EUA

NEC 70

Europa

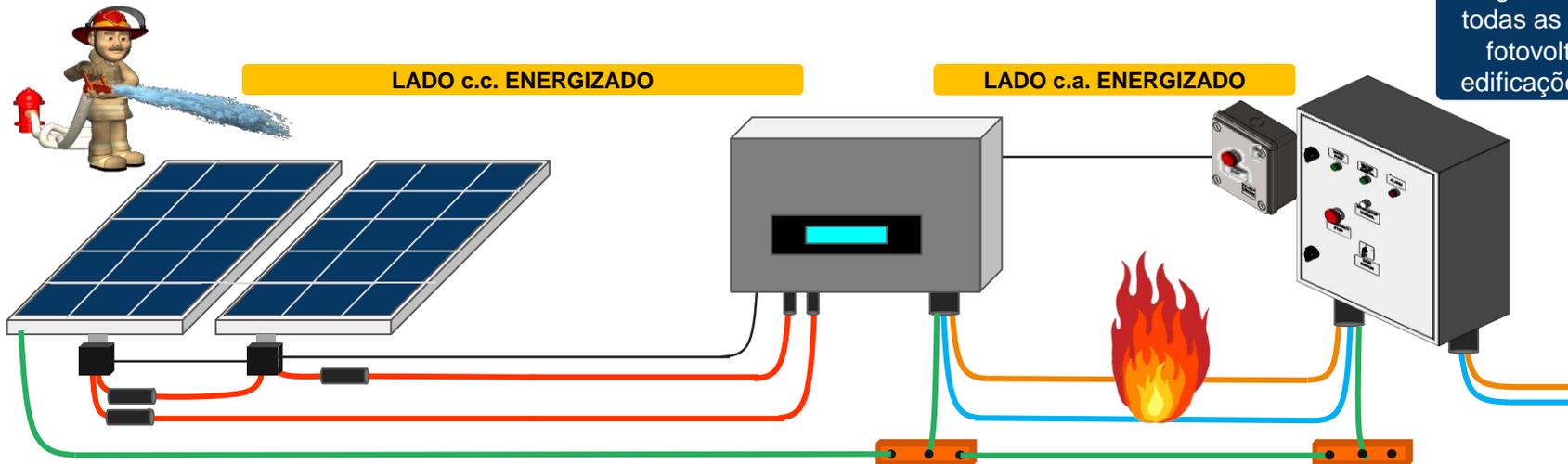
Por país

EUA exige sistema de desligamento rápido em todas as instalações fotovoltaicas em edificações (NEC70)

3. BOMBEIRO  
Combate o fogo c/ segurança

2. BOMBEIRO  
Desliga lado c.c. do SFV

1. BOMBEIRO  
Desliga chave geral



# Referências bibliográficas

---



International Energy Agency: Human Health Risk Assessment Methods for PV Part 1: Fire Risks

[https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/HHRA\\_Methods\\_for\\_PV\\_Part1\\_by\\_Task\\_12.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/HHRA_Methods_for_PV_Part1_by_Task_12.pdf)

International Energy Agency: Review of Failures of Photovoltaic Modules

[https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS\\_T13-01\\_2014\\_Review\\_of\\_Failures\\_of\\_Photovoltaic\\_Modules\\_Final.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS_T13-01_2014_Review_of_Failures_of_Photovoltaic_Modules_Final.pdf)

Sandia: Photovoltaic ground fault detection recommendations for array safety and operation

[https://www.researchgate.net/publication/309659363\\_Photosvoltaic\\_ground\\_fault\\_detection\\_recommendations\\_for\\_array\\_safety\\_and\\_operation](https://www.researchgate.net/publication/309659363_Photosvoltaic_ground_fault_detection_recommendations_for_array_safety_and_operation)

Câmara dos Deputados  
Comissão de Minas e Energia  
Audiência Pública - Requerimento 24/2022

# **Riscos de Incêndios em Instalações Fotovoltaicas**

Tecnologias para mitigação dos riscos

---

Prof. Dr. Leandro Michels  
Universidade Federal de Santa Maria / Instituto de Redes Inteligentes  
michels@inriufsm.com.br