

Arcos Elétricos em Sistemas Fotovoltaicos: Uma Análise Comparativa das Normas IEC 63027, UL 1699B e GB-t 39750

Josué Lopes Putzke

*Departamento de Processamento de Energia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Santa Maria - RS, Brasil
josue.labensaios@gepoc.ufsm.br*

Leandro Michels

*Departamento de Processamento de Energia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Santa Maria - RS, Brazil
michels@inriufsm.com.br*

Lucas Vizzotto Bellinaso

*Departamento de Processamento de Energia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Santa Maria - RS, Brazil
lucas@gepoc.ufsm.br*

Resumo—Os arcos elétricos tornaram-se uma preocupação crítica de segurança em sistemas fotovoltaicos. Para atender à necessidade de proteção contra arcos elétricos e procedimentos de teste para certificação de equipamentos de proteção, diversas normas foram desenvolvidas em todo o mundo. Este artigo apresenta uma análise abrangente de três normas regulatórias: IEC 63027, UL 1699B e GB-t 39750, que estabelecem requisitos e procedimentos de teste para equipamentos de detecção e proteção contra arcos elétricos em sistemas fotovoltaicos. Ao destacar semelhanças e diferenças entre essas normas, esta comparação ajuda a compreender as abordagens regulatórias adotadas por cada norma e fornece informações valiosas para fabricantes, reguladores e outros profissionais da indústria fotovoltaica. Além disso, essa análise pode servir de base para a formulação de uma norma brasileira para proteção contra arcos elétricos em usinas de geração de energia solar.

Palavras-chave—Fotovoltaico, Arco elétrico, Normas

I. INTRODUÇÃO

Com o crescente avanço da energia solar fotovoltaica como fonte de energia limpa e renovável, as preocupações com a segurança desses sistemas também estão aumentando. Arcos elétricos no lado de corrente contínua (c.c.) do inversor fotovoltaico surgem como uma das principais causas de incidentes de incêndio em unidades de geração solar [1]. Para mitigar os riscos associados a esse fenômeno, as normas de segurança IEC 63027 [2] (norma internacional), UL 1699B [3] (norma americana) e GB-t 39750 [4] (norma chinesa) foram desenvolvidas. Essas normas estabelecem requisitos para Equipamentos de Proteção contra Arcos Elétricos (*Arc-fault circuit interrupter* - AFCI) e incluem testes de laboratório para garantir que os mecanismos de detecção e proteção de arco funcionem eficazmente em várias condições possíveis do circuito fotovoltaico.

O objetivo deste artigo é explorar as semelhanças e diferenças entre as normas mencionadas para entender as abordagens regulatórias adotadas por cada uma delas. Ao

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento e Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001

identificar áreas em que essas normas convergem e divergem, podemos obter informações valiosas sobre as melhores práticas internacionais para proteção contra arcos elétricos gerados por sistemas fotovoltaicos.

Embora o Brasil seja signatário da IEC, não existem normas nacionais específicas para proteção contra arcos elétricos. Para auxiliar no processo de desenvolvimento de uma norma que estabeleça testes e requisitos para dispositivos de proteção contra arcos elétricos, é essencial analisar as normas em vigor em outros países onde a integração fotovoltaica é mais avançada. Nesse contexto, a análise das semelhanças e diferenças entre essas normas se torna uma ferramenta indispensável para o desenvolvimento das normas brasileiras.

II. NORMAS INTERNACIONAIS PARA PROTEÇÃO CONTRA ARCOS ELÉTRICOS

A. Norma UL 1699B (2018)

A norma UL 1699B (2018) é uma norma dos EUA que se concentra na proteção de sistemas fotovoltaicos contra arcos em série. Ela estabelece requisitos para dispositivos de proteção, incluindo testes, critérios e documentação. A norma enfatiza a prevenção de arcos em série e garante o cumprimento das regulamentações de segurança nos Estados Unidos.

B. Norma GB-t 39750 (2021)

A norma GB-t 39750 (2021) é uma norma chinesa que aborda tanto arcos em série quanto arcos em paralelo em sistemas fotovoltaicos. Embora não exija requisitos específicos de proteção para arcos em paralelo, a norma fornece diretrizes para testar e aprovar dispositivos de proteção. Seu objetivo é garantir a operação segura da geração de energia solar na China.

C. Norma IEC 63027 ed 1b (2023)

A norma IEC 63027 ed 1b (2023) é uma norma internacionalmente reconhecida publicada pela *International Electrotechnical Commission*. Ela se concentra na proteção de circuitos fotovoltaicos contra arcos em série. A norma estabelece

requisitos e diretrizes para dispositivos de proteção, incluindo testes, critérios e avaliações de desempenho. Ela fornece uma referência global para garantir a segurança e a confiabilidade de sistemas fotovoltaicos.

III. COMPARAÇÃO ENTRE NORMAS

As semelhanças e diferenças entre as normas foram comparadas. Um resumo da comparação está mostrado na Tabela I.

A. Similaridades

Tipo de Arco: todas as três normas apresentam requisitos de proteção e teste para arcos em série. A norma GB-t 39750 inclui métodos para extinguir arcos em paralelo, mas não exige proteção contra esse tipo de arco.

Tamanho Considerado para uma String: todas as normas consideram uma string de 80 metros para determinar a impedância da linha. No entanto, a UL 1699B considera um adicional de $0,7 \mu\text{H}$ por metro de indutância da linha, enquanto a IEC 63027 ed 1b e a GB-t 39750 consideram um adicional de $0,75 \mu\text{H}$ por metro.

Limiar de Proteção: todas as normas estabelecem os mesmos limites de proteção, com arcos de duração inferior a 2,5 s e energia inferior a 750 J. Isso garante uma base consistente para a proteção contra arcos elétricos em sistemas fotovoltaicos, independentemente da norma aplicada.

B. Diferenças

Localização da Falha: A norma UL 1699B requer que os testes de falha sejam realizados nos polos positivo e negativo, bem como no ponto médio da string, como mostrado na Figura 1. Por outro lado, tanto a norma IEC 63027 ed 1b quanto a GB-t 39750 especificam a inserção da falha apenas no polo positivo e no ponto médio da string. Em [5], diferenças significativas nas correntes de falha de arco foram observadas ao investigar diferentes locais para uma falha de arco em sistemas fotovoltaicos. Nesse caso, a UL1699B estipula uma abordagem mais segura.

Requisitos de Proteção: A IEC 63027 exige a instalação de dispositivos de proteção em sistemas de geração que possam produzir arcos com duração superior a 2,5 s ou energia superior a 750 J. Em contraste, as normas UL 1699B e GB-t 39750 apenas exigem a instalação de proteção quando a tensão máxima do sistema de geração fotovoltaica for igual ou superior a 80 V no lado c.c. Essa distinção é significativa porque arcos elétricos podem ocorrer em tensões abaixo de 80 V, dependendo de vários fatores, como magnitude da corrente, distanciamento dos condutores, orientação do fio e velocidade de separação [6]. Portanto, a norma IEC adota uma abordagem mais segura nesse aspecto. É importante observar, no entanto, que, de acordo com a IEC e a UL, se os arcos gerados durante os testes não excederem 200 J e 2,5 segundos, o equipamento testado não precisa sinalizar o arco nem incluí-lo na contagem de 5 detecções em 24 horas. Isso leva à conclusão de que, para sistemas de baixa tensão ou baixa corrente, nos quais os arcos elétricos naturalmente não excedem 200J e 2,5 segundos

nos testes especificados pela norma, os equipamentos podem ser certificados como seguros, mesmo sem dispositivos de detecção e interrupção de arco.

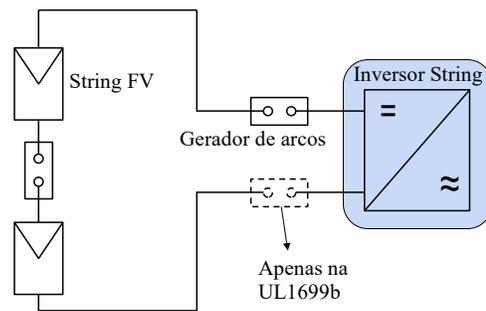


Fig. 1: Teste de falha de arco

Número de Testes: As normas UL 1699B, IEC 63027 ed 1b e GB-t 39750 diferem em seus requisitos quanto ao número de testes. Todas as três normas incluem 4 testes que são obrigatórios para todos os dispositivos, dependendo da corrente e das classificações de tensão. No entanto, a IEC e a norma GB-t têm um quinto teste adicional especificamente para inversores com correntes superiores a 24 A. A Tabela II indica todos os testes estipulados pelas normas.

Neste caso, a norma IEC e a norma chinesa apresentam uma abordagem mais inclusiva para inversores com correntes nominais mais elevadas.

Material do Eletrodo: A UL 1699B permite o uso de eletrodos de cobre ou tungstênio. A norma IEC 63027 especifica o uso de uma liga de tungstênio-níquel-cobre. A norma GB-t 39750 não possui requisitos quanto ao material dos eletrodos usados nos testes. O material dos eletrodos tem grande influência nas características do arco [7], no entanto, mais estudos são necessários para determinar o material de eletrodo mais realista para testes em sistemas fotovoltaicos.

Repetição de Testes: As normas têm requisitos variados para a repetição de testes de proteção contra arcos elétricos. A UL 1699B exige 5 repetições para dispositivos com reconexão automática e 3 repetições para dispositivos com reconexão manual. A IEC 63027 requer 2 repetições por teste, enquanto a GB-t 39750 estipula 3 repetições. Testes consistentes são cruciais para garantir proteção confiável contra falhas de arco, uma vez que os arcos são fenômenos imprevisíveis. Nesse aspecto, a norma UL 1699B oferece uma abordagem mais rigorosa, priorizando a segurança.

Teste Automático: As normas IEC 63027 e UL 1699B incluem requisitos para testes funcionais automáticos do dispositivo de proteção contra arcos. A norma IEC especifica testes a cada 24 horas de operação, enquanto a norma UL 1699B exige testes em cada inicialização do equipamento. A norma GB-t 39750 não menciona testes automáticos de funcionalidade. Esse aspecto é importante para garantir a funcionalidade dos dispositivos de proteção.

Configurações de Teste: Existem diferenças significativas nas configurações de teste exigidas pelas normas. A norma IEC

TABELA I: Comparação das Normas UL 1699B, IEC 63027 e GB-t 39750

Item	Norma UL 1699B - 2018	Norma IEC 63027 ed 1b	Norma GB-t 39750
Tipo de Arco	Arco em Série	Arco em Série	Arco em Série / Arco em Paralelo (sem requisitos obrigatórios)
Tamanho Considerado para uma String (Considerando Indutância do Condutor)	80 m (50 μ H + 0,7 μ H por metro acima de 80 m)	80 m (50 μ H + 0,75 μ H por metro acima de 80 m)	80 m (50 μ H + 0,75 μ H por metro acima de 80 m)
Limiar de Proteção	Duração do arco < 2,5 s; Energia do arco < 750 J	Duração do arco < 2,5 s; Energia do arco < 750 J	Duração do arco < 2,5 s; Energia do arco < 750 J
Métodos de Reconexão Permitidos após Detecção de Falha	a) Reconexão automática após um atraso de 5 minutos ou b) Reconexão manual; Se ocorrerem mais de cinco falhas de arco com mais de 200 J de energia em 24 horas, é necessária uma reconexão manual.	a) Reconexão automática após um atraso de 5 minutos, b) Reconexão manual ou c) Reconexão manual remota; Se ocorrerem mais de cinco falhas de arco com mais de 200 J de energia em 24 horas, é necessária uma reconexão manual.	a) Reconexão automática (O dispositivo de proteção se reconecta automaticamente após 3 minutos de operação. Quando o dispositivo de proteção precisa ser rearmado pela segunda vez, o tempo de rearme automático não deve ser inferior a 10 minutos. Quando o dispositivo de proteção se reconecta automaticamente 5 vezes em um dia, a sexta reconexão deve ser feita manualmente.), b) Reconexão manual ou c) Reconexão manual remota;
Localização da Falha	Polo positivo, polo negativo e meio da string.	Polo positivo e meio da string.	Polo positivo e meio da string.
Requisitos de Proteção	A proteção deve ser instalada quando a tensão máxima do sistema de geração de energia fotovoltaica for maior ou igual a 80 V no lado c.c.	A proteção deve ser instalada em sistemas de geração que possam produzir arcos com duração superior a 2,5 s ou energia superior a 750 J.	A proteção deve ser instalada quando a tensão máxima do sistema de geração de energia fotovoltaica for maior ou igual a 80 V no lado c.c.
Número de Testes	4 testes	5 testes	5 testes
Material do Eletrodo	Barras de cobre ou tungstênio	90% de tungstênio e 10% de liga de níquel-cobre	Sem menção de material
Repetição de Testes	Cada teste deve ser repetido 5 vezes para dispositivos com reconexão automática e 3 vezes para dispositivos com reconexão manual	Cada teste deve ser repetido 2 vezes	Os testes devem ser repetidos 3 vezes

TABELA II: Valores de Teste

Teste #	Imp (A)	Velocidade de Separação (mm/s)	Vmpp (V)	Voc (V)	Espaçamento (mm)
1	3,0	2,5	312,0	480,0	0,8
2	8,0	5,0	318,0	490,0	0,8
3	16,0	5,0	318,0	490,0	1,1
4	8,5	5,0	607,0	810,0	2,5
5	IpA*	5,0	318,0	490,0	2,5

Notas: IpA - corrente máxima por porta de entrada.

63027 inclui configurações adicionais que não são encontradas nas outras duas normas.

- Teste de inversor de string: A UL 1699B não inclui a inserção de arco antes da conexão em paralelo dos módulos. GB-t 39750 não inclui a inserção de arco após a conexão em paralelo. A Figura 2 apresenta as diferenças.
- Teste de microinversor: UL 1699B não inclui a conexão em paralelo de módulos ou a conexão em paralelo de módulos conectados em série. GB-t 39750 não considera módulos conectados em série para teste de microinversor e, na conexão em paralelo, não inclui a inserção de arco

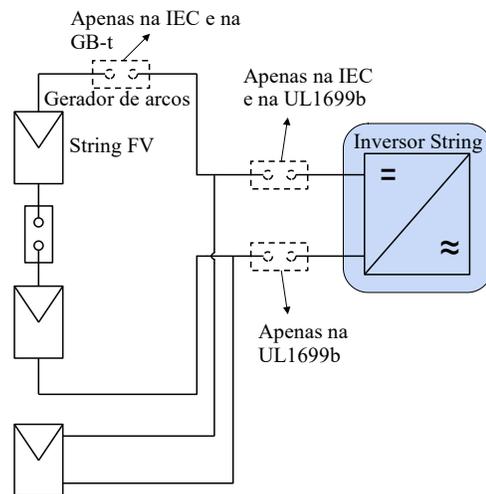


Fig. 2: Conexão paralela em teste de inversor string

após a conexão em paralelo. As Figuras 3 e 4 mostram as comparações.

- Teste de inversor com otimizadores c.c.: GB-t 39750 não

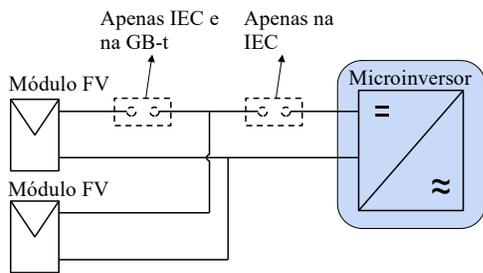


Fig. 3: Conexão em paralelo no teste de microinversor

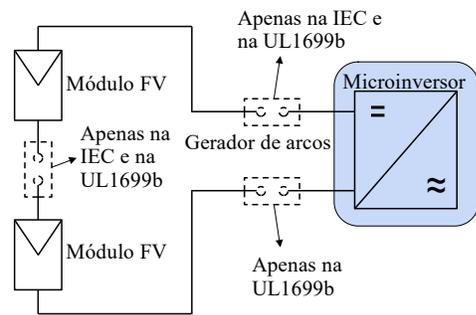


Fig. 4: Conexão em série no teste de microinversor

menciona testes com otimizadores c.c. A UL1699B não exige a conexão de dois módulos em paralelo, conexão em paralelo de módulos conectados em série ou conexão em paralelo de vários módulos antes do otimizador. A UL1699B não inclui a conexão em paralelo de múltiplas configurações de otimizadores. As Figuras 5 e 6 apresentam visualmente as diferenças.

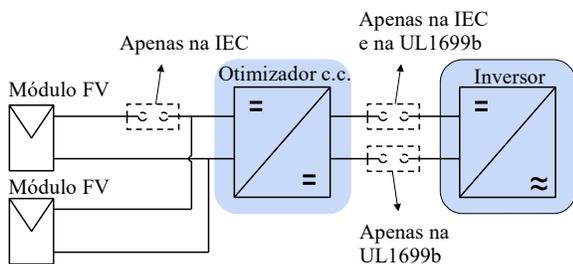


Fig. 5: Conexão em paralelo antes dos otimizadores c.c.

- Teste de inversor com caixa de combinação: UL 1699B e GB-t 39750 não incluem um cenário de teste específico com apenas uma string conectada à caixa de combinação. Além disso, nenhuma dessas normas exige a conexão em paralelo de módulos antes da caixa de combinação como parte dos requisitos de teste. A UL 1699B não especifica as configurações de saída nas configurações da caixa de combinação. Nem UL 1699B nem GB-t 39750 exigem a conexão em paralelo de múltiplas caixas de combinação. As Figuras 7 e 8 apresentam as diferenças.

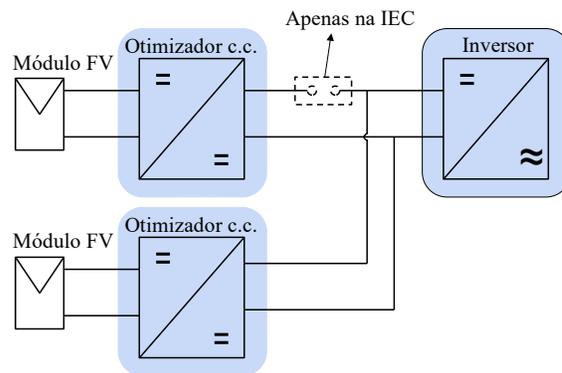


Fig. 6: Conexão em paralelo de otimizadores c.c.

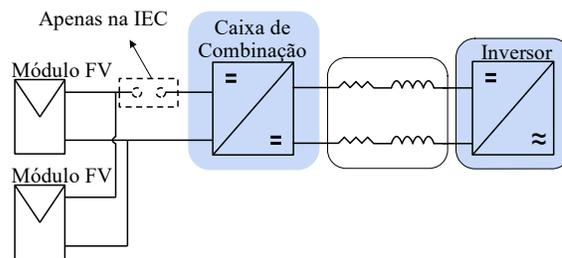


Fig. 7: Conexão em paralelo antes da caixa de combinação

A IEC propõe a abordagem mais segura neste item, considerando várias configurações de teste que as outras normas não abordam. Como mencionado anteriormente, diferentes locais para a falha de arco na string PV podem dificultar a detecção pelo dispositivo de proteção.

IV. CONCLUSÃO

A análise abrangente das normas internacionais IEC 63027, UL 1699B e GB-t 39750 revelou tanto suas semelhanças quanto suas diferenças em relação à proteção contra arcos elétricos em sistemas fotovoltaicos. Essas normas desempenham um papel crucial na garantia da segurança e proteção tanto das pessoas quanto dos equipamentos envolvidos nesses sistemas.

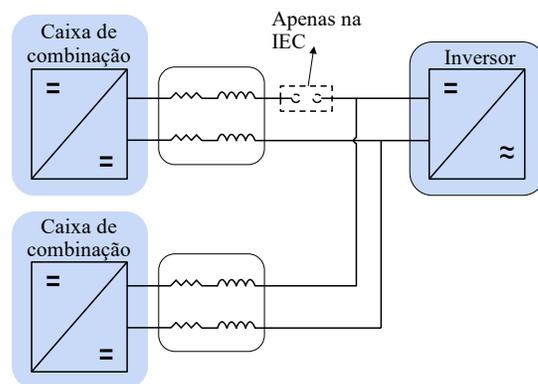


Fig. 8: Conexão em paralelo de caixas de combinação

É importante destacar que a IEC 63027 adota uma abordagem mais ampla, com uma variedade maior de configurações de teste, requisitos de proteção e número de testes em comparação com as outras normas. Por outro lado, a UL 1699B tem um requisito único para testar o polo negativo do lado PV, que as outras duas normas não incluem. Essas diferenças nas configurações de teste entre as normas podem ter um impacto na condução dos testes de falha de arco e devem ser consideradas ao desenvolver normas nacionais específicas.

A comparação dessas normas permite uma compreensão mais profunda das abordagens regulatórias adotadas por diferentes países e organizações. O conhecimento das normas internacionais de proteção contra arcos elétricos não apenas contribui para o desenvolvimento de produtos seguros e compatíveis, mas também fornece uma base sólida para a formulação de normas nacionais específicas, como as normas brasileiras para proteção contra arcos elétricos em sistemas fotovoltaicos.

REFERÊNCIAS

- [1] H. Laukamp, G. Bopp, R. Grab, C. Wittwer, H. Häberlin, B. Heeckeren, S. Phillip, F. Reil, H. Schmidt, A. Sepanski *et al.*, “Pv fire hazard-analysis and assessment of fire incidents,” in *28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris*, 2013.
- [2] *IEC 63027 ed. 1b - Photovoltaic power systems – DC arc detection and interruption*, International Electrotechnical Commission Std., 2023.
- [3] *UL 1699B - Standard For Photovoltaic (PV) DC Arc-Fault Circuit Protection*, Underwriters Laboratories Std., 2018.
- [4] *GB/T 39750-2021 - Technology requirements of DC arc-fault circuit protection for photovoltaic power system*, National Standard of the People’s Republic of China Std., 2021.
- [5] C. Wu, Y. Zheng, F. Wang, and Z. Li, “Simulation study on the impact of microgrids on dc arc,” in *2020 5th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, 2020, pp. 272–277.
- [6] R. F. Ammerman, T. Gammon, P. Sen, and J. P. Nelson, “Dc arc models and incident energy calculations,” in *2009 Record of Conference Papers - Industry Applications Society 56th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*, 2009, pp. 1–13.
- [7] V. Psaras, Y. Seferi, M. H. Syed, R. Munro, P. J. Norman, G. M. Burt, R. Compton, K. Grover, and J. Collins, “Review of dc series arc fault testing methods and capability assessment of test platforms for more-electric aircraft,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 4, pp. 4654–4667, 2022.