

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

SERGIO ROBERTO SILVA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DAS CARACTERÍSTICAS  
ELÉTRICAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DEVIDO A  
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS INDIRETAS**

SÃO PAULO

2023

SERGIO ROBERTO SILVA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DAS CARACTERÍSTICAS  
ELÉTRICAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DEVIDO A  
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS INDIRETAS**

**Versão Corrigida**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia, do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, como requisito necessário para obtenção do título de Mestre em Energia.

Área de Concentração: Tecnologia da Energia

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Piantini

SÃO PAULO

2023

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

### FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, Sergio Roberto Silva.

Avaliação da alteração das características elétricas de módulos fotovoltaicos devido a descargas atmosféricas indiretas. / Sergio Roberto Silva Santos; orientador: Alexandre Piantini. – São Paulo, 2023.

106 f.: il; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1. Descargas atmosféricas - proteção. 2. Sistemas fotovoltaicos. 3. Módulos fotovoltaicos. I. Título.

Elaborado por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

Nome: SANTOS, Sergio Roberto Silva dos.

Título: Avaliação da alteração das características elétricas de módulos fotovoltaicos devido a descargas atmosféricas indiretas.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE/USP) para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: 08/11/2023

Banca Examinadora

Prof. Dr. Alexandre Piantini

Instituição: IEE-USP

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Arnaldo Gakiya Kanashiro

Instituição: IEE-USP

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Roberto Zilles

Instituição: IEE-USP

Julgamento: Aprovado

Profª. Dra. Michele de Nazaré Novaes Santos

Instituição: UNIFAP

Julgamento: Aprovado

*Dedico este trabalho aos meus pais, Victorino Neves dos Santos Filho e Marly Silva dos Santos pelo investimento em minha educação, e à minha esposa Vera Lúcia de Souza Silva dos Santos pelo apoio constante.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, o professor Doutor Alexandre Piantini pela sua orientação, fundamental para a elaboração desta dissertação e pelo meu crescimento profissional decorrente desse trabalho. Foi um privilégio tê-lo como meu orientador. A ele o meu muito obrigado.

Minha gratidão aos doutores Hélio Sueta e Miltom Shigihara, professor Danilo Ferreira de Souza e ao engenheiro Givaldo dos Reis, pela convivência, paciência e apoio durante todo o trabalho.

Agradeço a todos os professores, funcionários e alunos do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo. Um grupo de pessoas comprometidas com o ensino e a pesquisa de alto nível. Gostaria de registrar especialmente meu muito obrigado a André Ricardo Mocelin, Raphael Caio Alvarez Diegues, Cleber Rogério Fiori, Clovis Yoshio Kodaira, Samuel da Silva, Tadeu Osano de Oliveira e Teddy Arturo Flores Melendez.

“O que é bom é custoso. Requer tempo, requer paciência, e não há um fim para isso”

Carl Gustav Jung.

## RESUMO

SANTOS. Sergio Roberto Silva. **Avaliação da Alteração das Características Elétricas de Módulos Fotovoltaicos Devido a Descargas Atmosféricas Indiretas.** 2023. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2023.

A partir do século 21, a energia solar fotovoltaica se tornou relevante na matriz energética mundial. Entretanto, devido às suas características construtivas, os sistemas de geração de energia solar fotovoltaica são vulneráveis às descargas atmosféricas diretas e indiretas, que causam falhas, definitivas ou temporárias, nesses sistemas, sendo necessário utilizar técnicas de proteção contra descargas atmosféricas para tornar os sistemas fotovoltaicos mais confiáveis, seguros e economicamente atrativos. Apesar do conhecimento existente sobre as descargas atmosféricas e os surtos de tensão, esses são fenômenos naturais complexos, que ao transferir parte da sua energia para os sistemas fotovoltaicos podem causar inúmeros danos, inclusive para os seus módulos, formados por materiais semicondutores, sensíveis aos aumentos de tensão ou corrente. Devido a esses fatores, este trabalho de pesquisa procura analisar os efeitos das descargas atmosféricas na progressiva alteração dos parâmetros elétricos dos módulos fotovoltaicos, o que pode causar a redução da sua vida útil, levando a uma substituição prematura, antes do que seria necessário caso essa alteração não existisse ou fosse pouco significativa. Para alcançar tal objetivo, a etapa experimental desenvolvida no presente trabalho envolve a aplicação de séries de impulsos de tensão e corrente com o objetivo de simular os efeitos de descargas atmosféricas indiretas em módulos fotovoltaicos. Antes e após cada aplicação da série de impulsos são realizadas medições de parâmetros pré-definidos para os módulos, para verificação da ocorrência de redução da sua eficiência e eventual indicação da existência de alterações significativas no seu desempenho. Os resultados dessa dissertação fornecem subsídios para uma melhor avaliação dos efeitos das descargas atmosféricas em sistemas fotovoltaicos, bem como das medidas necessárias para protegê-los.

Palavras-chave: módulos fotovoltaicos, descargas atmosféricas indiretas, alteração de parâmetros elétricos.

## ABSTRACT

SANTOS. Sergio Roberto Silva. **Evaluation of Degradation of Photovoltaic Modules Due to Indirect Atmospheric Discharges.** 2023. Dissertation (Master's) – Graduate Program in Energy, University of São Paulo. São Paulo. 2021.

From the 21<sup>st</sup> century onwards, photovoltaic solar energy has become relevant in the global energy matrix. However, due to their constructive characteristics, photovoltaic solar energy systems are vulnerable to direct and indirect lightning strokes, which cause permanent or temporary failures in these systems, making it necessary to use lightning protection techniques to make photovoltaic systems more reliable, safe, and economically attractive. Despite the existing knowledge about lightning and the corresponding surges, these are complex natural phenomena that, when transferring part of their energy to photovoltaic systems, can cause numerous damages, including to their modules, which are formed by semiconductor material, sensitive to increases in voltage or electrical current. Due to these factors, this research work aims to analyze the effects of indirect lightning on the progressive alteration of the electrical parameters of the photovoltaic modules, which may reduce their useful life, leading to a premature replacement, before what would be necessary if this alteration did not exist or was of little significance. To achieve this objective, the experimental stage developed in the present work involves the application of series of voltage and current impulses with the objective of simulating the effects of indirect lightning in photovoltaic modules. Before and after each application of the series of impulses, measurements are made of predefined parameters for the modules, in order to verify if there is a reduction in their efficiency and possible indication of the occurrence of degradation or significant changes in their performance. The results of this dissertation provide subsidies for a better evaluation of the effects of indirect lightning on photovoltaic systems, as well as the necessary measures to protect them.

Keywords: photovoltaic modules, indirect lightning, change of electrical parameters.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura e princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica.....	27
Figura 2 - Estrutura básica de um módulo fotovoltaico. ....	28
Figura 3 - Estrutura de um módulo fotovoltaico. ....	28
Figura 4 - Circuito equivalente de uma célula fotoelétrica. Modelo de um diodo.....	29
Figura 5 - Efeito da resistência série no comportamento da curva I-V. ....	32
Figura 6 - Efeito da resistência em paralelo no comportamento da curva I-V.....	32
Figura 7 - Efeito da resistência em paralelo na curva I-V .....	33
Figura 8 - Ilustração dos diversos tipos existentes de descargas atmosféricas.....	35
Figura 9 - Sombreamento de módulos fotovoltaicos devido aos captores do SPDA.....	38
Figura 10 - SPDA isolado.....	38
Figura 11 - SPDA não isolado.....	39
Figura 12 - Exemplo de laço de indução formado por condutores ativos. ....	40
Figura 13 - Efeito da área formada pelos laços de indução no valor da tensão induzida.....	40
Figura 14 - Fluxograma dos ensaios de tensão.....	43
Figura 15 - Módulo fotovoltaico utilizado nos ensaios. ....	44
Figura 16 - Módulo fotovoltaico número 3, frente.....	46
Figura 17 - Módulo fotovoltaico número 3, verso.....	47
Figura 18 - Gerador de onda combinada. ....	48
Figura 19 - Diagrama da aplicação dos impulsos de tensão.....	49
Figura 20 - diagrama funcional do simulador solar.....	50
Figura 21 - Obtenção da curva I-V no simulador solar. ....	50
Figura 22 – Registro de dados para obtenção da curva I-V.....	51
Figura 23 - Módulo sem o diodo de by-pass. ....	52
Figura 24 – Arranjo para obtenção da curva I-V sob sol real.....	53
Figura 25 – Corrente de impulso número 27, relacionada na tabela 18. ....	61
Figura 26 – Circuito da aplicação de impulsos de corrente.....	61
Figura 27 – Posicionamento do módulo em relação ao gerador de impulsos. ....	62
Figura 28 – Gerador de impulsos do Laboratório de Alta Tensão do IEE/USP.....	63
Figura 29 – Detalhes do circuito utilizado para os ensaios de impulso de corrente.....	64
Figura 30 – Detalhes adicionais do circuito utilizado para os ensaios de impulso de corrente. .....	65

Figura 31 - Evolução dos parâmetros do módulo 1: (Pm, Vmp, Imp). .....	68
Figura 32 - Evolução dos parâmetros do módulo 1 (Voc, Isc, $\eta$ , FF).....	69
Figura 33 - Evolução dos parâmetros do módulo 2 (Vmp, Imp, Pm). .....	71
Figura 34 - Evolução dos parâmetros do módulo 2 (Voc, FF, Isc, $\eta$ ).....	71
Figura 35 - Evolução dos parâmetros do módulo 3 (Vmp, Imp, Pm). .....	74
Figura 36 - Evolução dos parâmetros do módulo 3 (Voc, FF, Isc, $\eta$ ).....	75
Figura 37 - Evolução dos parâmetros do módulo 4 (Vmp, Imp, Pm). .....	76
Figura 38 - Evolução dos parâmetros do módulo 4 (FF, Voc, Isc, $\eta$ ).....	77
Figura 39 - Evolução dos parâmetros do módulo 5 (Vmp, Imp, Pm). .....	78
Figura 40 - Evolução dos parâmetros do módulo 5 (Voc, FF, Isc, $\eta$ ).....	79
Figura 41 - Evolução dos parâmetros do módulo 6 (Imp, Pm, Vmp). .....	80
Figura 42 - Evolução dos parâmetros do módulo 6 (FF, Voc, $\eta$ , Isc).....	81
Figura 43 - Diodos de by-pass. ....	83
Figura 44 – Medição (tensão induzida) TEK 01. Intensidade da corrente de 20 kA. ....	86
Figura 45 – Medição (tensão induzida) TEK 02. Intensidade da corrente de 20 kA. ....	87
Figura 46 - Medição (tensão induzida) TEK 05. Intensidade da corrente de 16 kA. ....	88
Figura 47 – Medição (tensão induzida) TEK 09. Intensidade da corrente de 7,9 kA. ....	88
Figura 48 – Medição (corrente induzida) TEK 08, impulso 9/20 $\mu$ s. Intensidade da corrente de 16 kA. ....	89
Figura 49– Medição (corrente induzida) TEK 32, impulso 16/34 $\mu$ s. Intensidade da corrente de 16 kA. ....	90
Figura 50 - Medição (tensão induzida) TEK 33, d = 1,0 m. Intensidade da corrente de 16 kA. ....	90
Figura 51 - Medição (tensão induzida) TEK 15, d = 0,5 m. Intensidade da corrente de 16 kA. ....	91
Figura 52 - Medição (corrente induzida) TEK 34, d = 1,0 m. Intensidade da corrente de 16 kA. ....	92
Figura 53 – Medição (corrente induzida) TEK 16, d = 0,5 m. Intensidade da corrente de 16 kA. ....	92
Figura 54 – Medição (tensão induzida) TEK 03, polaridade positiva. Intensidade da corrente de 7,8 kA. ....	93
Figura 55 – Medição (tensão induzida) TEK 04, polaridade negativa. Intensidade da corrente de 7,8 kA. ....	94

Figura 56 – Medição (corrente induzida) TEK 16, polaridade positiva. Intensidade da corrente de 16 kA. ....	94
Figura 57 – Medição (corrente induzida) TEK 18, polaridade negativa. Intensidade da corrente de 16 kA. ....	95

### LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições Padrão de Ensaio (STC).....	30
Tabela 2 - Valores típicos de eficiência de células fotovoltaicas. ....	31
Tabela 3 - Tensões aplicadas no módulo 1.....	55
Tabela 4 - Tensões aplicadas no módulo 2.....	57
Tabela 5 - Tensões aplicadas no módulo 3.....	58
Tabela 6 - Tensões aplicadas no módulo 4.....	59
Tabela 7 - Tensões aplicadas no módulo 5.....	59
Tabela 8 - Parâmetros do módulo 1: SV145D12 10175668.....	66
Tabela 9 - Parâmetros do módulo 1: SV145D12 10175668. Sol real .....	68
Tabela 10 - Parâmetros do módulo 2: UP-M155P UP021525171023791184 .....	70
Tabela 11 - Parâmetros do módulo 2: UP-M155P UP021525171023791184 Sol Real.....	71
Tabela 12 - Parâmetros do módulo 3: HG-140P-140HG-A1403210001 .....	73
Tabela 13 - Parâmetros do módulo 4: YL-145-17b Yngli 133929080100001.....	76
Tabela 14 - Parâmetros do módulo 4: YL-145-17b Yngli 133929080100001 Sol Real.....	76
Tabela 15 - Parâmetros do módulo 5: H-140P-140HG-A1403210003.....	78
Tabela 16 - Parâmetros do módulo 6: JKM 140P-36 4541104180000405400 .....	80
Tabela 17 - Magnitude da sobretensão que causou falha no módulo.....	83
Tabela 18 - Parâmetros dos ensaios efetuados. ....	85

## LISTA DE ABREVIATURA E SIMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

c-Si – Silício Cristalino

C - Capacitor

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Continua

CH – Canal

CSV – Comma Separated Value

D - Distância

DPS – Dispositivo de Proteção contra Surtos

Ed - Edição

EMTDC – Electromagnetic Transient Direct Current

EMTP – Electromagnetic Transients Program

FF - Fill Factor

FR – Fator de redução

FV – Fotovoltaico

GR - Gerenciamento de Risco

IEC – International Electrotechnical Commission

IEE – Instituto de Energia e Ambiente

Imp – Corrente no Ponto de Máxima Potência

I<sub>ph</sub> – Corrente fotogerada Circuit Current

I<sub>sc</sub> – Short

IVT – Impulse Voltage Test.

kW<sub>p</sub> – Quilowatt-pico

LEMP – Lightning Electromagnetic Pulse

Máx – Máximo

MOF – Moving Average Filter

MPS – Medida de Proteção contra Surtos

MPP- Maximum Power Point

MQT – Module Qualification Test

ms – Milissegundos

NBR – Norma Brasileira

NOTC – Nominal Operation Cell Temperature

pc-Si – Silício Policristalino  
PDA – Proteção contra Descargas Atmosféricas  
P.ex – Por exemplo  
Pk – Pico  
Ppk – Peak Power  
Pm – Potência Máxima  
PMAS - Probability Modulated Attractive Space  
PSCAD – Power System Computer Aided Diagram  
P.U.- Por Unidade  
Rs – Resistência em série  
Rsh – Resistência shunt  
RV – Restructured Version  
Rx - Receptor  
SFV – Sistema Fotovoltaico  
SPDA - Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas  
STC - Standard Test Conditions  
SWC – Surge Withstand Capability  
Tx - Transmissor  
UFV – Usina Fotovoltaica  
USP – Universidade de São Paulo  
Vcc – Volts em corrente contínua  
Vmp - Tensão no Ponto de Máxima Potência  
Voc – Open Circuit Voltage  
ZnO – Óxido de zinco.  
ZPR – Zona de Proteção contra Raios  
 $\Delta$ pk – Variação do valor de pico  
 $\eta$  - Eficiência

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 Objetivos .....	17
1.2 Estrutura do trabalho .....	18
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
2.1 Descargas atmosféricas em sistemas fotovoltaicos.....	19
2.2 Quantificação dos efeitos das descargas atmosféricas em SFV .....	20
2.3 O efeito das descargas atmosféricas em células e módulos fotovoltaicos .....	23
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>26</b>
3.1 Células e módulos Fotovoltaicos .....	26
3.2 Descargas Atmosféricas.....	33
3.3 Descargas atmosféricas em SFV .....	36
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>42</b>
4.1 Ensaios de impulsos de tensão .....	42
4.2 Ensaios de impulso de corrente .....	60
<b>5 RESULTADOS E ANÁLISE.....</b>	<b>66</b>
5.1 Ensaios de impulsos de tensão .....	66
5.1.1 Falhas apresentadas em diodos de by-pass .....	82
5.2 Ensaios de impulso de corrente .....	84
5.2.1 Intensidade da corrente.....	87
5.2.2 Forma do impulso de corrente aplicado .....	89
5.2.3 Distância entre o módulo e o ponto de aplicação da corrente (d) .....	90
5.2.4 Polaridade da corrente aplicada.....	93
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>96</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>99</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A geração solar fotovoltaica é obtida pela conversão da radiação solar, energia transmitida através dos seus fótons, em energia elétrica (ALMEIDA, 2012; SOUZA, 2012). Para isso são utilizadas células fotovoltaicas, fabricadas predominantemente com silício semicondutor formando junções PN, distribuídas sobre uma superfície, que constitui o módulo fotovoltaico. Quanto maior a área desse módulo, mais capacidade ele terá em converter energia (DANTAS; POMPERMAYER, 2018), mas também será maior a sua exposição às descargas atmosféricas (MARTZLOFF, 1989), uma das mais significativas ameaças à integridade dos Sistemas Fotovoltaicos (SFV). Segundo Nasir *et al.* (2019), 26% dos danos em sistemas fotovoltaicos na Alemanha são causados por descargas atmosféricas.

A viabilidade econômica de um sistema de geração solar fotovoltaica depende da manutenção de níveis mínimos de eficiência ao longo de um determinado período, possibilitando assim o retorno financeiro em seu investimento. Entre os fatores que comprometem a eficiência desses sistemas está a alteração das características elétricas dos seus componentes (AKRAM *et al.*, 2022), o que inevitavelmente ocorre ao longo do tempo, mas que pode ser acelerada, entre outros fatores, pelo efeito das sobretensões transitórias provocadas pelas descargas atmosféricas diretas, cujo ponto de impacto é o SFV, ou indiretas, cujo ponto de impacto não é o SFV. Embora existam diversos estudos sobre falhas em SFV provocadas por descargas atmosféricas (MARTZLOFF, 1989; HAEBERLIN, 2011; COETZER, 2019; FORMISANO *et al.*, 2021) é necessário conhecer mais detalhadamente os efeitos das descargas atmosféricas indiretas na progressiva alteração dos parâmetros elétricos dos componentes dos SFV. Isso porque uma instalação elétrica é atingida com mais frequência pelas descargas atmosféricas indiretas do que pelas descargas diretas, sendo imperioso saber o que acontece com os módulos fotovoltaicos pela sua exposição às tensões induzidas pelas descargas atmosféricas indiretas ao longo da sua vida útil. Como uma fonte de perturbações elétricas, as descargas atmosféricas indiretas transferem parte da sua energia para um SFV devido ao campo eletromagnético gerado pela corrente da descarga (LEMP – *Lightning Electromagnetic Pulse*) (HERNÁNDEZ; VIDAL; JURADO, 2008; CHRISTODOULOU *et al.*, 2015). É portanto necessário analisar os mecanismos envolvidos nessa transferência de energia, para que seja possível proteger adequadamente os SFV também contra os efeitos das descargas atmosféricas indiretas.

Qual a vulnerabilidade dos módulos fotovoltaicos às descargas atmosféricas indiretas é a pergunta formulada neste trabalho, estando ela relacionada aos conceitos de degradação, falha e defeito (PARHAMI, 1997; PHAM, 2003), aqui associados aos módulos fotovoltaicos. A degradação pode ser definida como a perda progressiva, ao longo do tempo, de capacidade de um dispositivo, equipamento ou processo. Em relação à falha, em engenharia esse termo significa a interrupção de uma função ou processo, temporária ou permanentemente (PHAM, 2003; AKRAM *et al.*, 2022). Segundo esse significado, a falha de um módulo fotovoltaico pode ser considerada o resultado irreversível da degradação de sua potência, porque não é possível recuperá-la ao seu valor inicial, revertendo essa degradação através da operação normal desse módulo (JORDAN *et al.*, 2017). Além da perda de potência, falhas também estão associadas a problemas com a segurança dos módulos fotovoltaicos. Já o terceiro conceito, defeito, possui um sentido mais amplo, correspondendo a qualquer característica de um módulo fotovoltaico que não esteja prevista em seu projeto inicial. Como um defeito em um módulo fotovoltaico não necessariamente conduz a sua falha, o termo defeito possui uma abrangência muito maior do que falha, não implicando obrigatoriamente em perda de potência ou redução na segurança de um módulo fotovoltaico, mas sim indicando que ele, ou parte dele, difere do que seria esse mesmo módulo caso estivesse em perfeitas condições. Como exemplo, alterações em aspectos visuais dos módulos fotovoltaicos, sem consequências para a sua potência fornecida, não são consideradas falhas, mas sim defeitos.

Embora as descargas atmosféricas sejam normalmente associadas a falhas, principalmente pela destruição de estruturas e outros componentes de instalações elétricas, segundo Köntges (2014), problemas causados pelas descargas atmosféricas em módulos fotovoltaicos não podem ser considerados falhas, porque sua origem, a energia da descarga atmosférica, não é algo intrínseco ao módulo fotovoltaico, não sendo obrigação de seu fabricante reduzir a sua vulnerabilidade às descargas atmosféricas. Apesar de existir aqui uma questão conceitual, existem diversos estudos sobre como evitar falhas causadas por descargas atmosféricas em módulos fotovoltaicos através da instalação do Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) e das Medidas de Proteção contra Surtos (MPS) (HERNÁNDEZ; VIDAL; JURADO, 2008; KOKKINOS; CHHRISTOFIDES; CHARALAMBOUS, 2012; PONS; TOMMASINI, 2013). Mesmo sendo esses estudos necessários, eles ainda não são suficientes, já que as descargas atmosféricas também são fontes de degradação, especialmente de componentes eletrônicos como os semicondutores, o que justifica a realização de outros estudos, sobre os seus efeitos na alteração das características

elétricas dos módulos fotovoltaicos, para que sejam especificadas medidas de proteção adequadas, que podem não ser as mesmas para as falhas e as degradações. Estudos são necessários para que se possa responder às seguintes perguntas:

- 1) Qual a vulnerabilidade dos módulos fotovoltaicos às sobretensões transitórias?
- 2) Como eles se comportam em relação às sobretensões transitórias de modo comum e diferencial?
- 3) Qual a magnitude da tensão máxima que eles suportam e quais os efeitos da exposição continuada deles às sobretensões de magnitudes relativamente baixas?

As respostas para essas questões são essenciais para assegurar uma baixa vulnerabilidade dos SFV às descargas atmosféricas.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desta dissertação é estudar os efeitos das descargas atmosféricas indiretas sobre os SFV, contribuindo para aumentar o conhecimento sobre o impacto das descargas atmosféricas na vulnerabilidade dos módulos fotovoltaicos. Tem-se como meta contribuir para o aumento do conhecimento sobre os efeitos das descargas atmosféricas indiretas no comportamento dos módulos fotovoltaicos, através da proposição de metodologia, realização de experimentos em laboratório envolvendo a aplicação de impulsos de alta tensão e de alta corrente e análise dos resultados. Para alcançar esse propósito foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1. analisar as possíveis alterações em parâmetros elétricos específicos de módulos fotovoltaicos (Ponto de máxima potência, tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, tensão no ponto de máxima potência, corrente no ponto de máxima potência e fator de forma) após neles ser aplicadas tensões de impulso atmosférico com a forma de onda normalizada;
2. medir e analisar tensões e correntes induzidas nos terminais de módulos fotovoltaicos causadas por correntes impulsivas com pontos de impacto próximos aos módulos;
3. avaliar os resultados obtidos e compará-los, quando possível, com resultados de outros estudos sobre os efeitos de descargas atmosféricas indiretas em módulos fotovoltaicos.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, incluindo sua introdução, seguida da revisão bibliográfica, referencial teórico, metodologia, resultados e conclusões. O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o tema proposto, dos primeiros artigos que se dedicaram aos efeitos das descargas atmosféricas em SFV, passando pelos trabalhos que estudaram o comportamento das tensões e correntes induzidas em SFV por estas descargas, apresentando modelos matemáticos, simulações e ensaios de laboratório sobre correntes e tensões em SFV originadas pelas descargas atmosféricas. Ele termina analisando com maior profundidade os artigos científicos diretamente envolvidos no tema dessa pesquisa, que avaliam os efeitos das descargas atmosféricas na alteração das características elétricas dos módulos fotovoltaicos.

O terceiro capítulo apresenta o referencial teórico do trabalho, iniciando com a apresentação dos aspectos essenciais das células e módulos fotovoltaicos, principalmente aqueles relacionados à perda da sua eficiência. A seguir ele trata das descargas atmosféricas, especialmente dos seus mecanismos de transferência de energia, e discute os seus efeitos nos SFV e os métodos de proteção contra tais efeitos.

O quarto capítulo apresenta a metodologia desenvolvida para a análise e os procedimentos adotados na etapa experimental que engloba ensaios para verificação das características dos módulos e testes de aplicação de impulsos de tensão e corrente. São também discutidas as limitações da etapa experimental.

O quinto capítulo é dedicado à apresentação e análise dos resultados obtidos nos testes.

O sexto capítulo apresenta as principais conclusões obtidas ao longo da pesquisa desenvolvida.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo contém uma apresentação dos primeiros estudos sobre os efeitos das descargas atmosféricas em sistemas fotovoltaicos, seguido daqueles que simularam esses efeitos e validaram suas simulações, quantificando a relação entre as descargas atmosféricas e as tensões e correntes, conduzidas ou induzidas, em SFV, principalmente em seus módulos. Finalizando o capítulo são apresentados os estudos sobre os efeitos das descargas atmosféricas na alteração dos parâmetros elétricos dos módulos fotovoltaicos, tema diretamente relacionado ao objetivo dessa dissertação.

### 2.1 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Em um dos primeiros estudos sobre os efeitos das descargas atmosféricas em Usinas Fotovoltaicas (UFV), Martzloff (1989) visitou duas instalações Fotovoltaicas (FV) atingidas por descargas atmosféricas, na ilha de Vulcano no norte da Sicília e na ilha de Cítnos no mar Egeu, analisando os danos ocorridos. Embora as evidências tenham sido insuficientes para concluir que todas as falhas ocorreram devido às descargas atmosféricas, foram relacionados todos os danos e sugerido como conduzir futuras averiguações, o que se tornou referência para investigações posteriores.

Kokkinos, Christofides e Charalambous (2012) estudaram a PDA em uma UFV na Grécia, com 180 inversores solares de 11 kW, 800Vcc e 7300 módulos solares de 270Wp, ocupando uma área de 115000m<sup>2</sup>. O objetivo do estudo foi estabelecer através de ensaios em laboratório, requisitos básicos para a PDA dessa usina, para que eles servissem de parâmetros para projetos de PDA de outras UFV. Em 2014, os mesmos autores apresentaram uma metodologia para o projeto do SPDA externo, incluindo o sistema de aterramento, para UFV de grandes dimensões, comparando o desempenho de SPDA isolados e não isolados, e auxiliando na especificação dos Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS) (CHARALAMBOUS, KOKKINOS e CHRISTOFIDES, 2014).

No artigo de Fallah *et al.* (2013) são apresentados os requisitos básicos para projetos de proteção contra descargas atmosféricas diretas e indiretas, de edifícios residenciais que possuem módulos fotovoltaicos em seus telhados, a partir da análise de vários projetos já

realizados na Malásia. Entre esses requisitos estão o posicionamento dos captosres para a proteção dos módulos contra o impacto direto das descargas atmosféricas e a especificação de medidas para reduzir o campo magnético e as correntes de surto. Segundo o artigo, em edifícios com SFV em seus telhados apenas a especificação dos captosres não é suficiente para a PDA, sendo necessário também proteger a instalação contra as correntes de surto, através do posicionamento mais adequado dos componentes do SFV e a blindagem de seus condutores. O artigo também relaciona à vulnerabilidade dos SFV às descargas atmosféricas em função do nível isocerâmico local e à altura da edificação onde eles se encontram.

Christodoulo *et al.* (2015) estudaram o projeto da PDA para SFV, com ênfase nas principais medidas de proteção contra os impactos diretos das descargas atmosféricas e os efeitos dos surtos de tensão e corrente, incluindo o Gerenciamento de Risco (GR), as Zonas de Proteção contra Raios (ZPR), os SPDA externo e interno, o posicionamento dos DPS e o sistema de aterramento. Foram levados em consideração nesse estudo normas técnicas, trabalhos acadêmicos e práticas conhecidas de PDA.

Ahmad *et al.* (2018) apresentaram uma visão geral sobre a PDA de SFV, descrevendo tanto os princípios básicos da geração fotovoltaica, quanto os das descargas atmosféricas, incluindo a PDA. O artigo apresenta os principais componentes dos SFV, conhecimentos básicos sobre as descargas atmosféricas e indicações de leitura. Através de uma abordagem vertical sobre o tema, ele qualifica tecnicamente o leitor do artigo, possibilitando a aquisição dos conhecimentos necessários para o aprofundamento nesse tema.

## 2.2 QUANTIFICAÇÃO DOS EFEITOS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM SFV

Os efeitos das descargas atmosféricas em um painel FV, através da simulação e aplicação de correntes de impulso, de diferentes formas de onda e pontos de impacto, foram estudados por Besenova *et al.* (2012). O estudo observou que as dimensões do módulo, a forma de onda da corrente de impulso e a localização do ponto de impacto são os principais responsáveis pela magnitude das sobretensões induzidas nos terminais de módulos FV. Os resultados das simulações foram confirmados por medições feitas após a aplicação de correntes impulsivas, que também comprovaram os efeitos destrutivos de correntes de impulso com tempos de frente muito curtos, como as correntes subsequentes das descargas atmosféricas. Correntes com a forma de onda  $0,25/100\mu\text{s}$ , mesmo com intensidade máxima de 50kA, inferior

aos 200kA da intensidade máxima da corrente do primeiro impulso, provocam os maiores valores de sobretensões induzidas. Esse estudo ainda observou a importância do sistema de aterramento para a redução das tensões induzidas.

Zaini *et al.* (2017) estudaram os efeitos das descargas atmosféricas em UFV de potência elevada, modelando o sistema através do software *Power System Computer Aided Diagram/Electromagnetic Transient Direct Current* (PSCAD/EMTDC). O desempenho do SFV em relação aos efeitos das descargas atmosféricas foi comparado entre correntes impulsivas de diferentes intensidades e formas de onda, com o objetivo de oferecer diretrizes para projetos de SPDA de UFV. A pesquisa concluiu que descargas atmosféricas produzem surtos de tensão e corrente que podem danificar módulos fotovoltaicos e outros componentes dos SFV, como os seus inversores. Segundo ele, correntes de descargas atmosféricas com alta intensidade e tempo de cauda curto aumentam consideravelmente os valores máximos das tensões e correntes de surto, que mesmo não atingindo diretamente os módulos ou inversores podem se propagar pelos condutores e lhes causar danos. Em função da localização do SFV é possível através dos sistemas de detecção de descargas atmosféricas obter informações sobre a intensidade das correntes das descargas atmosféricas no local, utilizando os resultados obtidos para projetar a PDA mais adequada. Embora o estudo não especifique valores exatos para os DPS que devem ser instalados, ele apresenta parâmetros para que tais valores sejam obtidos.

Bokoro e Doorsamy (2018) investigaram as consequências das descargas atmosféricas indiretas em uma UFV de médio porte, para analisar os efeitos de surtos na própria usina e nos sistemas interconectados a ela, possibilitando uma maior compreensão dos riscos associados às descargas atmosféricas e o desenvolvimento de soluções de PDA para proteger as UFV. Foi investigada uma usina com quatro arranjos, cada um formado por 2500 módulos, conectados em configurações série-paralelo com inversores cujas saídas alimentam quatro transformadores de 750kVA, 0,3/22kV, conectados a uma rede de alta tensão através de um transformador de 22/132kV. A investigação utilizou o software EMTP-RV para analisar os efeitos de descargas atmosféricas indiretas em SFV conectados à rede e fornecer aos projetistas de SFV ferramentas eficientes para os seus projetos. Os resultados do estudo demonstraram um aumento de tensão de 7,4% no lado CC e 1,2 p.u no lado CA da UFV analisada. O estudo concluiu também que uma proteção eficaz contra surtos induzidos por descargas atmosféricas indiretas próximas à usina pode ser obtida através da instalação de DPS nos lados CA e CC coordenados entre si.

As tensões induzidas em modo comum e diferencial em módulos fotovoltaicos, devido às descargas atmosféricas próximas a eles foram avaliadas por Formisano *et al.* (2019). O

trabalho utilizou um método tridimensional (3D) semi-analítico para estudar os transitórios eletromagnéticos causados pelas descargas atmosféricas indiretas, baseando-se na decomposição do canal da descarga em um determinado número de dipolos hertzianos. Através do método proposto pelo trabalho é possível calcular sobretensões transitórias de modo comum e diferencial em módulos fotovoltaicos, considerando acoplamentos indutivos e capacitivos entre os circuitos elétricos internos do módulo e as suas molduras metálicas. No trabalho os módulos foram modelados através de estruturas formadas por fios metálicos finos, que se apresentaram adequadas, segundo os autores, para os objetivos desse estudo. Ao final do trabalho, os resultados obtidos pelo método proposto se mostraram mais precisos, abrangendo as sobretensões de modo comum e diferencial, possibilitando uma melhor especificação de DPS para SFV. O trabalho analisou ainda o impacto da complexidade do canal da descarga atmosférica através de análise estatística baseada no modelo de Monte Carlo das prováveis geometrias seguidas pela descarga atmosféricas até o solo.

Damianaki *et al.* (2020) estimaram a elevação de potencial causada por descargas atmosféricas em um SFV de 100 kWp, utilizando um software de simulação. Através dessa ferramenta foi possível avaliar três configurações de SPDA, um conectado e dois isolados com diferentes configurações, além de diferentes tipos de solo e sistemas de aterramento. O trabalho apresentou os valores de elevação de potencial para diferentes distâncias entre os SPDA isolados e os SFV, assim como para diferentes tipos de isoladores utilizados. O resultado indicou a influência de diferentes fatores, como a configuração do SPDA externo, a distância de separação, os materiais dos isoladores, o sistema de aterramento e a resistividade do solo, na magnitude das tensões de passo e toque. Segundo os resultados, o aumento da distância de separação reduz a elevação de potencial, em solos com maior resistividade em sua primeira camada. Além disso, quanto menor a resistência do isolador menores serão as magnitudes das sobretensões, e ainda, as características do aterramento do perímetro influenciam as tensões de contato que surgem em partes do SFV, podendo melhorar a distribuição das correntes das descargas atmosféricas.

Zhang; Chen e Du (2019, 2020) simularam os efeitos das descargas atmosféricas em um SFV, modelando de forma apropriada o efeito pelicular e as propriedades ferromagnéticas da infraestrutura metálica do sistema, obtendo com isso informações precisas sobre como o desenho da infraestrutura dos SFV pode contribuir para que eles sejam mais bem protegidos contra os efeitos das descargas atmosféricas diretas e indiretas.

Tóth *et al.* (2021) analisaram a necessidade do SPDA para UFV em função das suas dimensões e as características de seus componentes. Os cálculos realizados no estudo utilizaram a teoria do Volume Atrativo Modulado por Probabilidade (*Probability Modulated Attractive Space* (PMAS)), considerada pelos autores adequada para calcular probabilidades do impacto direto de descargas atmosféricas em estruturas complexas de grande extensão como UFV de potências elevadas. Segundo o trabalho, estruturas auxiliares de uma UFV, como cercas de segurança e postes para câmeras de vigilância e iluminação, com dimensões apropriadas, devem ser consideradas partes dos SPDA, reduzindo o seu nível de proteção de III para IV, o que seria o nível mais indicado para a maioria dos SPDA de UFV. O trabalho também concluiu que UFV cujas dimensões ou potência fornecida estiverem abaixo de determinados limites, calculados através do PMAS, não necessitam de um SPDA.

### 2.3 O EFEITO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A vulnerabilidade dos diodos de by-pass foi observada no estudo de Haerberlin (2001), onde vários desses diodos foram danificados por sobretensões transitórias ou correntes de surto. Após a aplicação de tensões reversas os diodos de by-pass, danificados mais frequentemente, se tornaram permanentemente curto-circuitados. Segundo esse autor, devem ser utilizados em SFV diodos de by-pass com tensão reversa não inferior a 1000V.

Sueta *et al.* (2012, 2013) estudaram o comportamento de módulos fotovoltaicos submetidos a impulsos de corrente simulando o efeito de descargas atmosféricas diretas. Através dos ensaios foi possível verificar que mesmo submetidos a descargas diretas os SFV continuaram a gerar energia, mas não foram avaliadas as consequências da perda de potência e eficiência para a viabilidade técnica-econômica de SFV ao longo do tempo. Um dos trabalhos apresentou também sistemas de proteção contra descargas atmosféricas de dois SFV de diferentes potências instalados na região amazônica, avaliando os impactos econômicos das soluções apresentadas.

Alterações na eficiência de módulos fotovoltaicos submetidos a impulsos de tensão foram estudadas por Naxakis; Perraki e Pyrgioti (2014). Nesse trabalho foram utilizadas as recomendações da versão em vigor da norma técnica IEC 61730-2 para estudar a resposta dos módulos fotovoltaicos aos impulsos de tensão com a forma de onda 1,2/50  $\mu$ s, com magnitudes

superiores ao indicado na norma. Os resultados demonstraram que os módulos ensaiados ainda poderiam operar, mas possivelmente houve alterações em suas curvas características. Essas alterações foram percebidas em torno do ponto de máxima potência (MPP), enquanto os valores de tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) praticamente não se alteraram. Através das curvas obtidas, foi evidenciado que as características elétricas básicas dos módulos FV não foram comprometidas, mas seus desempenhos podem ter sido reduzidos. A impossibilidade de conclusões mais seguras, deveu-se ao fato dos módulos estarem instalados, submetidos a condições ambientais, que inseriram incertezas aos ensaios. Nesse caso mesmo com as correções necessárias para as condições padrão de teste (STC – *Standard Test Conditions*), não foi possível determinar se as alterações, que não foram tão significativas assim, nos parâmetros elétricos dos módulos, deveram-se às sobretensões, fatores ambientais, ou imprecisões nas medições.

Jiang (2014) estudou a degradação das propriedades elétricas de módulos fotovoltaicos de silício policristalino. Inicialmente foram aplicados impulsos de tensão de polaridade positiva a diferentes grupos de módulos, sendo todas as aplicações nas mesmas condições experimentais, mas com o valor da tensão aplicada crescente. Após as aplicações foram medidas e registradas a potência máxima fornecida e outros parâmetros obtidos através da curva I-V. Os resultados indicaram que mesmo tensões de impulso de valores medianos causaram degradações nos módulos ensaiados. Foi analisada a relação entre a potência máxima de saída dos módulos e o número de impulsos aplicados para diferentes níveis de tensão, sendo analisadas as alterações nas propriedades elétricas dos módulos causadas por esses impulsos. Um segundo ensaio envolveu um grupo de amostras aos quais foram aplicados impulsos de tensão de polaridade negativa, sendo os resultados comparados com aqueles obtidos anteriormente, o que demonstrou que a polaridade dos impulsos de tensão influencia o grau de degradação e causa diferentes alterações nas propriedades elétricas dos módulos. Finalmente, foram analisados os efeitos dos impulsos de tensão em módulos previamente estressados por outros fatores, não relacionados às descargas atmosféricas, chegando-se a conclusão de que a degradação causada pelos impulsos de tensão é consideravelmente acelerada em módulos já degradados por fatores ambientais, como aqueles que apresentam bolhas e delaminações. Através da comparação dos resultados obtidos entre seus diferentes ensaios o trabalho conclui que a presença de múltiplos fatores de estresses nos módulos aumenta a probabilidade de comprometimento de suas características elétricas devido às descargas atmosféricas. Consequentemente, impulsos de tensão em módulos não degradados por outros fatores não lhes

causam alterações tão significativas, enquanto o comprometimento total do isolamento do módulo só irá acontecer através de uma combinação de múltiplos fatores de estresse, entre eles também os impulsos de tensão.

Motivado também por falhas em diodos de by-pass instalados em módulos fotovoltaicos, após a ocorrência de descargas atmosféricas indiretas, Coetzer (2019) examinou os mecanismos pelos quais correntes elétricas são induzidas em instalações fotovoltaicas. O estudo inicialmente utilizou cálculos e simulações para em seguida realizar ensaios em um laboratório de alta tensão. O seu objetivo foi encontrar meios para minimizar a intensidade das correntes induzidas em instalações fotovoltaicas. Foi constatado que deficiências nas linhas elétricas que interligam os módulos, e não suas conexões internas, são diretamente proporcionais à magnitude das tensões induzidas na instalação, sendo necessário melhorar o desenho dessas linhas para reduzir significativamente essas magnitudes. O trabalho também concluiu que módulos fotovoltaicos que possuem molduras metálicas são muito menos vulneráveis às tensões induzidas por descargas atmosféricas.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Os efeitos das descargas atmosféricas em um determinado objeto dependem da interação entre as leis da física que governam as descargas atmosféricas e as características elétricas do objeto estudado. Por esse motivo, este capítulo apresenta os aspectos básicos das células e módulos fotovoltaicos, principalmente aqueles relacionados aos seus principais parâmetros elétricos, seguido por uma visão geral das descargas atmosféricas e seus efeitos sobre SFV, mais especificamente nos módulos fotovoltaicos, com ênfase nas UFV.

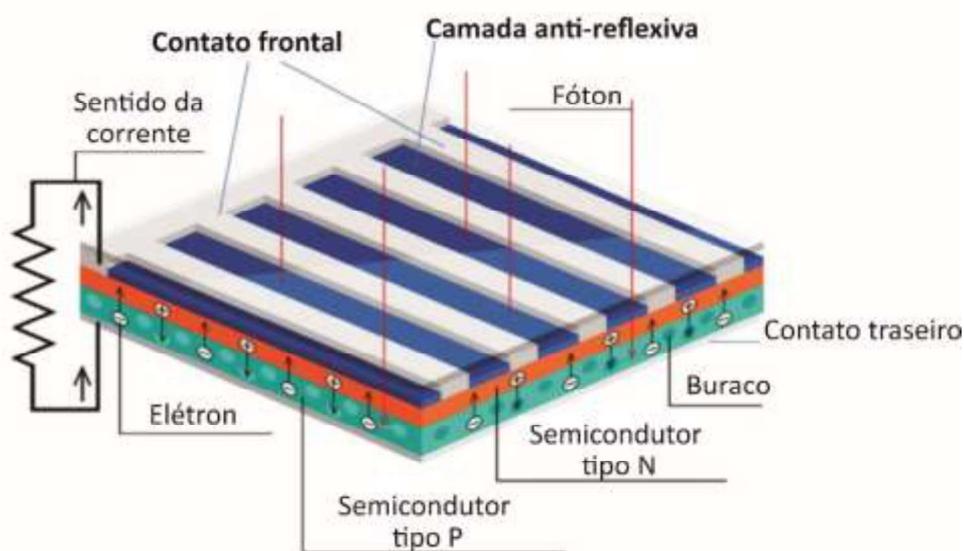
#### 3.1 CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Segundo definição da norma técnica ABNT NBR 10899:2020 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020), responsável pelos termos relativos à energia solar fotovoltaica, uma célula fotovoltaica é um “dispositivo elementar especificamente desenvolvido para realizar a conversão direta de energia solar em energia elétrica”. Essas células utilizam materiais semicondutores fotossensíveis, que convertem a radiação solar em diferença de potencial elétrico. Para a fabricação das células fotovoltaicas tem sido utilizado como matéria prima desde o início da sua produção preferencialmente o silício cristalino como matéria prima, graças ao conhecimento adquirido pela indústria eletrônica, que o utiliza na fabricação de diodos, transistores e circuitos integrados, fornecendo os processos básicos utilizados na fabricação das células solares (SAMPAIO, J. A. *et al.*, 2019). O silício é um material não tóxico, abundante na Terra, sendo um semicondutor com características químicas, físicas e eletrônicas adequadas para conversão da energia solar em eletricidade, permanecendo estável sob diferentes condições de processamento (GREEN, 2001; ROEDERN, 2004).

As células fotovoltaicas mais utilizadas são fabricadas de forma plana, sem possuírem partes móveis, não emitindo ruídos e gases durante a conversão de energia, além de necessitarem pouca manutenção (STRACHAN, 2004; RAMOS, 2006; PINHO; GALDINO, 2014). Segundo Satpathy e Pamuru (2021) uma célula fotovoltaica funciona devido ao efeito fotovoltaico, que corresponde à absorção da energia da radiação solar através da incidência dos fótons em um material semicondutor, sendo atualmente o mais utilizado o silício.

Além dos componentes semicondutores, as células fotovoltaicas consistem em duas grades metálicas ou contatos elétricos, sendo um colocado acima do material semicondutor e o outro abaixo dele. Enquanto a grade ou contato superior coleta os elétrons do semicondutor e os transfere para a carga externa, a camada de contato posterior é conectada para completar o circuito elétrico (DOBRZANSKI; DRYGALA; JANUSKA, 2013), conforme pode ser visto na figura 1.

Figura 1 – Estrutura e princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica.



Fonte: (SATPATHY; PAMURU, 2021, adaptação do autor).

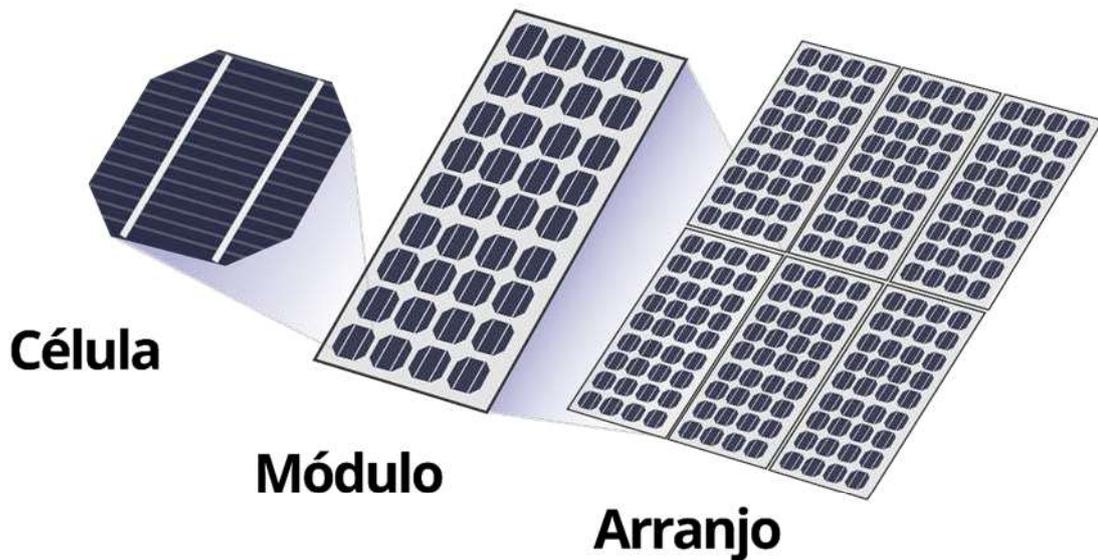
São utilizados principalmente dois tipos de silício na fabricação de células fotovoltaicas, o silício monocristalino e o silício policristalino, que juntos responderam até metade da década de 2010 por aproximadamente 90% dos módulos fotovoltaicos instalados no mundo (ZAINI *et al.*, 2016), o que justificou a utilização de módulos de silício cristalino neste e na maioria dos estudos sobre os efeitos das descargas atmosféricas em módulos fotovoltaicos<sup>1</sup>.

Devido às características intrínsecas de uma célula fotovoltaica, cuja sua junção PN apresenta uma tensão normalmente de 0,5V, elas são invariavelmente conectadas em série, para a obtenção dos valores desejados de tensão, necessários para alimentação dos mais diversos circuitos elétricos, sendo fornecidas interconectadas entre si dentro um invólucro à prova de intempéries, com face de vidro, conhecido como módulo fotovoltaico, conforme mostram as

<sup>1</sup> A partir desse ponto, o termo "módulos fotovoltaicos" se refere a módulos de silício cristalino.

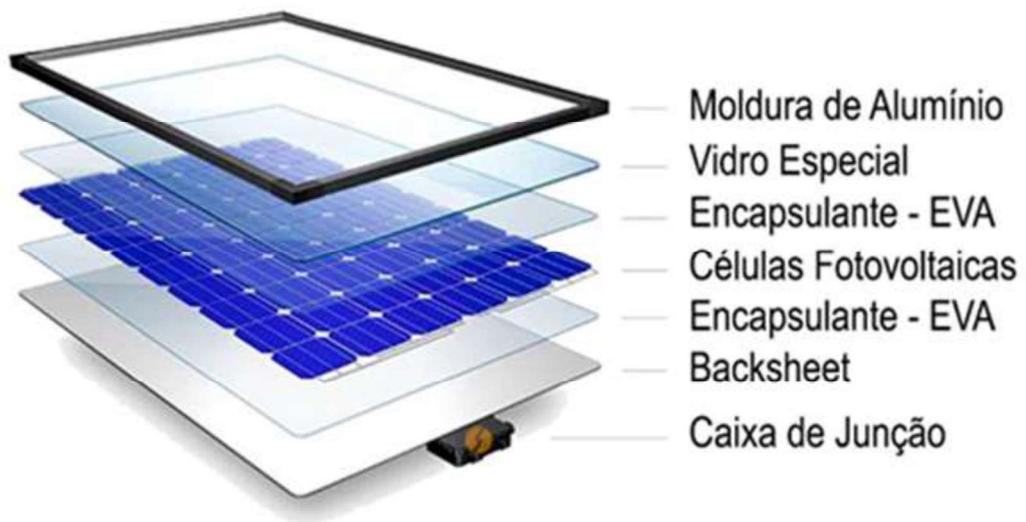
figuras 2 e 3, onde cada modelo de módulo contém um determinado número de células, o que determinará a sua potência de saída. A confiabilidade e tempo de operação dos módulos são fundamentais para a viabilidade econômica dos SFV, pontos diretamente relacionados ao prazo de retorno do investimento e custo da energia fornecida por eles (KIM *et al.*, 2014; MA *et al.*, 2022).

Figura 2 - Estrutura básica de um módulo fotovoltaico.



Fonte: (JIANG, 2014, adaptação do autor).

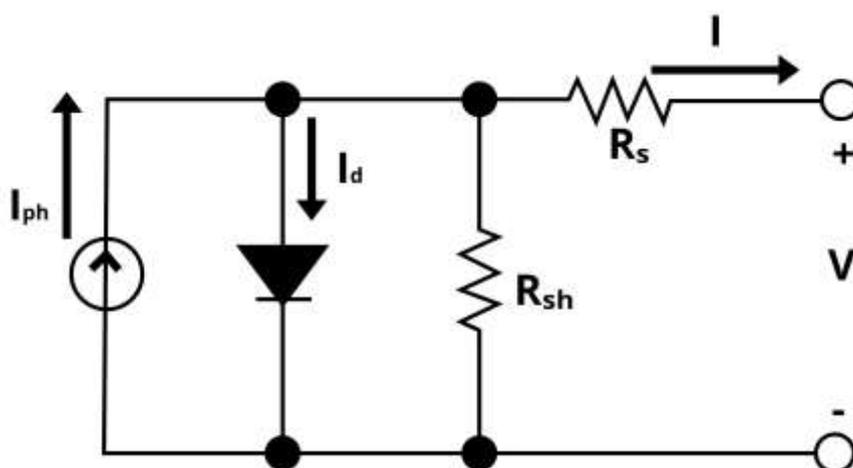
Figura 3 - Estrutura de um módulo fotovoltaico.



Fonte: (MENEZES Jr.; RODRIGUEZ., 2017, adaptação do autor)

O desempenho de uma célula fotovoltaica pode ser obtido através da análise de seu circuito elétrico equivalente, apresentado na figura 4. Nesse modelo, a corrente fotogerada varia linearmente com a radiação solar incidente, sendo por isso representada pela fonte de corrente  $I_{ph}$ , que corresponde à corrente gerada pela interação fóton-elétron, sem perdas ôhmicas. Neste circuito o diodo é o elemento que representa as propriedades semicondutoras da célula, estando ele em antiparalelo com a fonte de corrente  $I_{ph}$  (GREEN, 1992; MESSENGER; VENTRE, 2004; LABOURET; VILLOZ, 2010). Ainda, células fotovoltaicas são representadas por uma resistência em série ( $R_s$ ) e uma resistência em paralelo ( $R_{sh}$ ).  $R_s$  representa a resistência do semicondutor da célula, a resistência do contatos metálico e interconexões, e a resistência de contato entre o semicondutor e os condutores metálicos. Já  $R_{sh}$  corresponde às correntes de fuga na junção p-n e outra fugas de corrente devido a falhas e imperfeições do material. (GREEN, 1992; TAYYAN, 2013). Por esse motivo, os valores de ambas as resistências influenciam a curva I-V, que nos informa sobre os principais parâmetros elétricos das células e módulos fotovoltaicos, e deve ser obtida nas STC, apresentadas na tabela 1, estabelecidas para padronizar e permitir a comparação de valores obtidos em diferentes ocasiões e lugares.

Figura 4 - Circuito equivalente de uma célula fotoelétrica. Modelo de um diodo.



Fonte: (JIANG, 2014, adaptação do autor)

Tabela 1 – Condições Padrão de Ensaio (STC).

Parâmetro	Valor
Espectro de massa de ar	1,5
Irradiância (W/m <sup>2</sup> )	1000
Temperatura (°C)	25

**Fonte:** Autor.

Para que seja avaliado o desempenho das células fotovoltaicas em conjunto, correspondendo a um módulo fotovoltaico, devem ser medidos os seus principais parâmetros, relacionados entre si, que estão descritos a seguir:

**Ponto de Máxima Potência (MPP):** Potência máxima fornecida pelo módulo fotovoltaico. Encontra-se no ponto de inflexão da curva I-V e no pico da curva P-V.

**Tensão de Circuito Aberto (Voc):** Valor máximo da tensão que um módulo pode fornecer a uma carga nas STC, correspondendo a uma circulação de corrente nula e consequentemente potência também nula.

**Corrente de curto-circuito (Isc):** O valor da corrente máxima que um módulo pode fornecer a uma carga nas STC, em um valor de tensão nula e consequentemente potência nula.

**Tensão no Ponto de Máxima Potência (Vmp) :** Tensão nos terminais do módulo quando ele opera no seu ponto de máxima potência.

**Corrente no Ponto de Máxima Potência (Imp):** Corrente elétrica fornecida pelo módulo quando ele opera no seu ponto de máxima potência.

**Fator de Forma (FF – *Fill Factor*):** É a grandeza que expressa o quanto a curva característica de uma célula fotovoltaica se aproxima de um retângulo. Quanto maior a qualidade da célula, maior será o seu FF.

Os módulos fotovoltaicos são considerados componentes com alta confiabilidade, permitindo aos seus fabricantes estimar uma eficiência mínima de 90% em relação ao seu valor inicial após 10 anos de uso, e de 80% do seu valor inicial após 20 ou 25 anos de uso, conforme pode ser visto na tabela 2, dependendo de seu fabricante (MUNOZ *et al.*, 2011; PINHO; GALDINO, 2014; ZANESCO *et al.*, 2014). A eficiência é um critério importante para qualificação de módulo fotovoltaicos, já que através dela é possível comparar módulos com as mesmas características (potência, tensão de entrada etc.) (PINHO; ZILLES; ALMEIDA, 2011).

Tabela 2 - Valores típicos de eficiência de células fotovoltaicas.

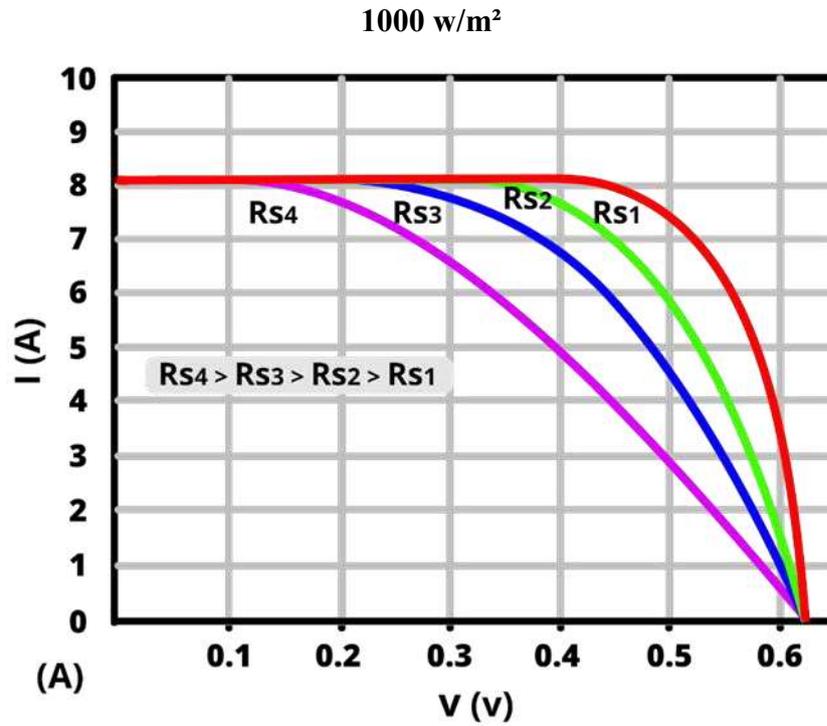
Fonte: Autor.

Material	Tecnologia	Eficiência (%)
Silício	Monocristalino	25,0
	Policristalino	20,4
	Filmes Finos	20,1

Fonte: Autor.

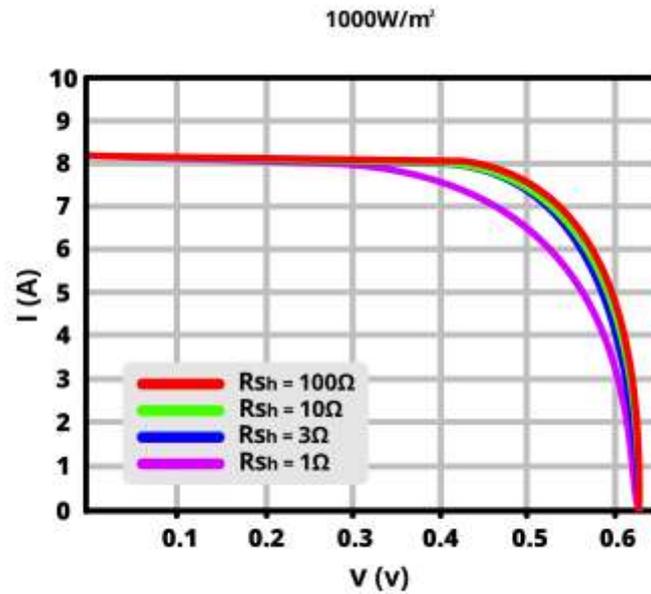
A eficiência das células fotovoltaicas pode ser comprometida por diferentes mecanismos de perdas, como perdas ópticas, térmicas ou elétricas, nesse caso principalmente pela dissipação de energia em suas resistências internas (NDIAYE *et al.*, 2013; GUERRA *et al.*, 2019) Essas resistências parasitas podem ser modeladas através dos valores de  $R_s$  e  $R_{sh}$  (LABOURET; VILLOZ, 2010; MESSENGER; VENTRE, 2004), já apresentadas anteriormente na figura 4. Alterações nos valores de  $R_s$  e  $R_{sh}$  alteram o fator de forma, sendo que variações em  $R_s$  provocam alterações mais significativas neste fator, do que variações em  $R_{sh}$  (SATPATHY; PAMURU, 2021). Em uma célula fotoelétrica ideal a resistência em série com a fonte de corrente deveria ser zero, eliminando as quedas de tensão na própria célula. Já a resistência em paralelo deveria ser infinita, não possibilitando caminhos alternativos à corrente fotogerada. Em sentido contrário, o aumento de  $R_s$  e a diminuição de  $R_{sh}$  irão reduzir o fator de forma e a potência máxima fornecida pelo módulo, conforme mostram as figuras 5, 6 e 7: (SATPATHY; PAMURU, 2021).

Figura 5 - Efeito da resistência série no comportamento da curva I-V.



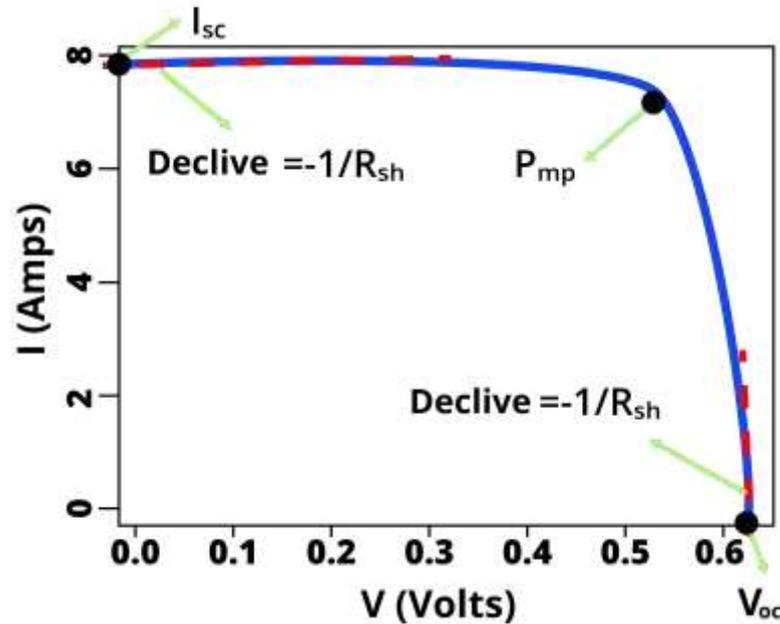
Fonte: (SATPATHY; PAMURU, 2021, adaptação do autor).

Figura 6 - Efeito da resistência em paralelo no comportamento da curva I-V.



Fonte: (SATPATHY; PAMURU, 2021, adaptação do autor).

Figura 7 - Efeito da resistência em paralelo na curva I-V



Fonte: (SATPATHY; PAMURU, 2021, adaptação do autor).

Dessa forma, a perda progressiva de eficiência em células fotovoltaicas está associada à redução do valor da sua resistência em paralelo e/ou aumento do seu valor de resistência em série, o que pode ser causado, sob certas circunstâncias, por descargas atmosféricas (JIANG, 2014), e através de medições de vários parâmetros será investigado nesta pesquisa.

### 3.2 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

As descargas atmosféricas são fenômenos elétricos naturais, originando-se normalmente na atmosfera pelo acúmulo de cargas elétricas, possuindo curtíssima duração mas produzindo correntes elétricas de milhares de amperes (RAKOV; UMAN, 2003). Mais conhecidas como raios, elas podem atingir objetos a quilômetros da sua origem e induzir tensões e correntes até 2 quilômetros de distância do seu ponto de impacto, através dos pulsos eletromagnéticos emitidos (LEMP) (HASSE; WIESINGER, 1993). Ocorrem no mundo entre 30 e 100 descargas atmosféricas por segundo, correspondendo a 9 milhões de descargas atmosféricas diárias ou a uma densidade de descargas atmosféricas para a terra ( $N_G$ ) de 6

descargas atmosféricas  $/(km^2 \times ano)$  sobre a superfície total do planeta (DWYER; UMAN, 2014).

As descargas atmosféricas podem ser classificadas pela sua origem e polaridade das cargas transferidas pela nuvem em (COOREY, 2010):

1) Descargas intranuvem, as mais comuns, que ocorrem totalmente no interior de uma única nuvem;

2) Descargas entre nuvens, que acontecem entre duas ou mais nuvens separadas, sem que alguma corrente elétrica atinja o solo;

3) Descargas nuvem-ar, quando a descarga sai da nuvem em direção a um ponto qualquer na atmosfera, sem atingir outra nuvem ou o solo;

4) Descargas nuvem-solo negativas, que se iniciam na nuvem se dirigindo para o solo, equivalendo ao transporte de cargas negativas, elétrons, de uma região carregada negativamente no interior da nuvem para o solo;

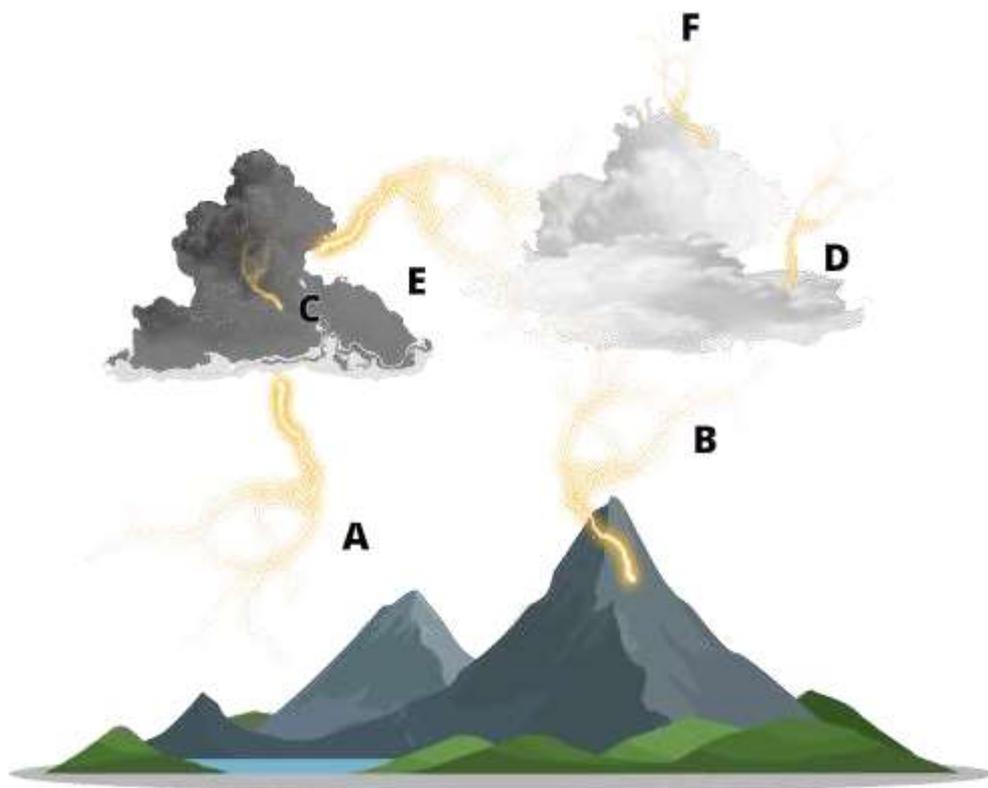
5) Descargas nuvem-solo positivas, que se iniciam na nuvem se dirigindo para o solo, transferindo elétrons do solo para a nuvem, equivalendo ao transporte de cargas positivas de uma região carregada positivamente no interior da nuvem para o solo;

6) Descargas solo-nuvem negativas, que se iniciam no solo e se dirigem para uma nuvem, transferindo cargas negativas dela para o solo, equivalendo ao transporte de cargas positivas do solo para a nuvem;

7) Descargas solo-nuvem positivas, que se iniciam no solo e se dirigem para uma nuvem, equivalendo ao transporte de cargas negativas, elétrons, do solo para a nuvem.

A figura 8, a seguir, ilustra os diferentes tipos de descargas atmosféricas encontradas na natureza, respectivamente: (a) nuvem-solo; (b) solo-nuvem; (c) intranuvem; (d) nuvem-ar; (e) entre nuvens; (f) nuvem-ar.

Figura 8 - Ilustração dos diversos tipos existentes de descargas atmosféricas.



Fonte: (SHIGIHARA, 2005, adaptação do autor).

Embora as descargas atmosféricas mais comuns sejam as intranuvem, descargas atmosféricas nuvem-solo, apesar de proporcionalmente menos frequentes, aproximadamente 25% do total, são as mais importantes para a engenharia, porque são as que mais causam prejuízos à sociedade, ocasionando mortes, incêndios e falhas em sistemas eletroeletrônicos (PIANTINI *et al.*, 2008; PINTO Jr.; PINTO, 2000; COORAY, 2010). Como exemplo, as descargas atmosféricas causam mais perdas de vidas nos Estados Unidos do que qualquer outro fenômeno natural (SEIDL, 2006) e são as maiores responsáveis por falhas em SFV em todo o mundo (NASIR *et al.*, 2019). Além dos riscos para a vida, descargas atmosféricas nuvem solo geram campos eletromagnéticos variando no tempo que podem induzir sobretensões transitórias em condutores alcançados por eles, causando inúmeros prejuízos, seja por danos em equipamentos, ou pela interrupção de processos ou serviços. (RAHIM; BAHARUDIN; OTHMAN, 2013).

### 3.3 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM SFV

Um surto elétrico pode ser descrito como um aumento repentino da intensidade da tensão ou corrente em um circuito elétrico, podendo se originar externa ou internamente. Entre as fontes externas de surtos elétricos encontram-se as descargas atmosféricas, diretas ou indiretas. Correntes de surto podem fluir em circuitos elétricos em dois modos: Modo comum e modo diferencial. Enquanto no modo comum a corrente elétrica é conduzida pelos condutores normalmente energizados para o sistema de aterramento, no modo diferencial a corrente é conduzida através dos condutores normalmente energizados (Fase/fase, fase/neutro, +/-, Tx/Rx, p.ex.) (SMIT, 2021; DONG, 2021), sendo os surtos de modo comum geralmente causados apenas por descargas atmosféricas diretas e os surtos de modo diferencial também por descargas atmosféricas diretas, mas principalmente pelas indiretas (DONG, 2021).

Segundo Mosamane e Gomes (2022), os principais fatores que influenciam a magnitude das sobretensões induzidas por descargas atmosféricas em um condutor são a intensidade da corrente da descarga, a sua forma de onda e a distância entre o condutor e o ponto de impacto da descarga atmosférica (COOREY, 2010), sendo que alguns estudos indicam que as sobretensões induzidas de modo diferencial têm menor magnitude do que as sobretensões induzidas de modo comum (FORMISANO *et al.*, 2019), o que indica uma maior vulnerabilidade dos SFV em geral, e os módulos fotovoltaicos em particular, às sobretensões induzidas de modo comum.

Os SFV são vulneráveis às descargas atmosféricas diretas ou indiretas, pelo posicionamento dos seus módulos em áreas abertas, pela relação diretamente proporcional entre a área coberta pelos módulos e a potência que eles geram, e pelo trajeto dos seus cabos de energia e sinal formando laços de indução (HERNÁNDEZ; VIDAL; JURADO, 2008; CHRISTODOULO *et al.*, 2015). A PDA de um SFV deve considerar como parte da proteção o posicionamento dos módulos, o trajeto dos cabos e a localização de quadros, inversores e equipamentos auxiliares, sem o que não serão aproveitadas as características construtivas do SFV para protegê-lo contra as descargas atmosféricas diretas e indiretas (FALLAH *et al.*, 2013; CHARALAMBOS; KOKKINOS; CHRISTOFIDES, 2014; SUN, 2014). Embora a instalação do SPDA seja necessária, ela não é suficiente, porque a condução da corrente da descarga atmosférica para o solo através dos captadores do SPDA, não elimina sobretensões transitórias e correntes de surto, causadas pelos acoplamentos galvânico, indutivo e capacitivo entre a

corrente elétrica da descarga atmosférica e o SFV (HERNÁNDEZ; VIDAL; JURADO, 2008; CHRISTODOULO *et al.*, 2015). Por isso, torna-se necessária a utilização das MPS. Enquanto o SPDA protege os componentes dos SFV contra os efeitos das descargas atmosféricas diretas, as MPS protegem as instalações elétricas, de energia e sinal, contra as sobretensões transitórias e correntes de surto, causadas por descargas atmosféricas e chaveamento de circuitos elétricos.

Como os módulos fotovoltaicos são vulneráveis às descargas atmosféricas diretas e indiretas, devem ser protegidos contra ambas. Embora Labouret e Viloz (2010) afirmem que os módulos fotovoltaicos sejam raramente afetados pelas descargas atmosféricas, sendo os diodos de by-pass, diodos de bloqueio e as caixas de junção os componentes normalmente danificados, vários artigos enfatizam a vulnerabilidade dos módulos e a necessidade de protegê-los, mesmo concordando quanto a maior vulnerabilidade dos diodos de by-pass (HERNÁNDEZ; VIDAL; JURADO, 2008; HABERLIN, 2021).

Devido à sua área e ao fato de serem instalados em ambientes abertos, os módulos fotovoltaicos devem ser protegidos contra o impacto direto das descargas atmosféricas, através da instalação de captosres, colocando esses módulos dentro da ZPR 0B (HETITA *et al.*, 2022). A especificação de captosres para módulos fotovoltaicos, deve levar em consideração dois aspectos, o sombreamento provocado nos módulos pelos captosres, e o efeito da condução das correntes impulsivas pelas molduras metálicas desses módulos. Enquanto o primeiro aspecto deve ser evitado pelo posicionamento dos captosres, conforme a figura 9, o segundo não acontecerá quando o SPDA estiver isolado e afastado por ao menos 0,5 metros da estrutura metálica do SFV, conforme as figuras 10 e 11 (DEHN, 2014; INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2020).

Figura 9 - Sombreamento de módulos fotovoltaicos devido aos captor do SPDA.



Fonte: (DEHN, 2014, adaptação pelo autor).

Figura 10 - SPDA isolado.



Fonte: (DEHN, 2014, adaptação pelo autor).

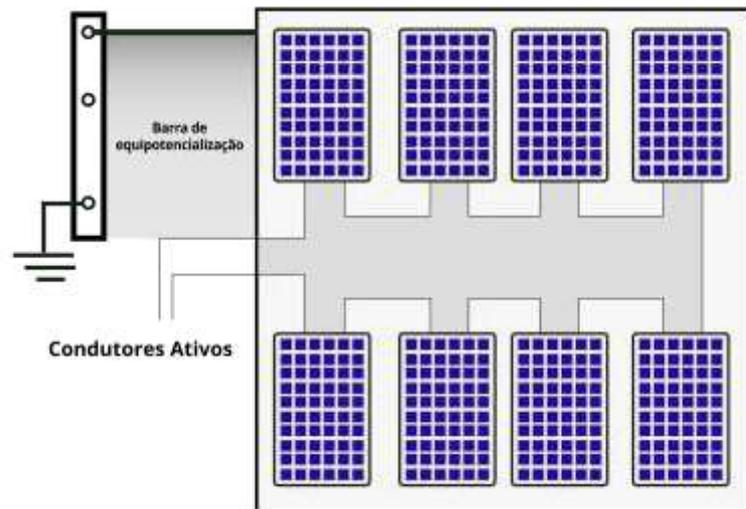
Figura 11 - SPDA não isolado.



**Fonte:** (DEHN, 2014, adaptação pelo autor).

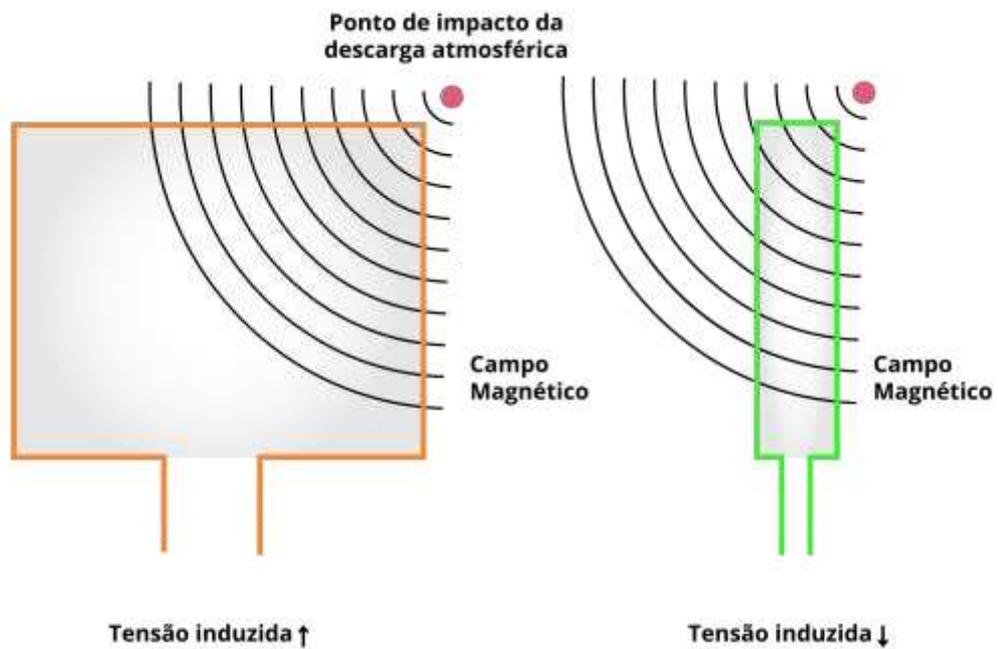
Em relação ao roteamento de cabos, estudos sobre tensões induzidas em módulos fotovoltaicos demonstram que as suas magnitudes são determinadas pelos laços de indução, área formada pelos seus condutores (fios e cabos), que interligam os módulos, entre si e aos outros componentes do SFV. A redução da área formada pelos laços, limitando a magnitude das tensões induzidas, reduz a vulnerabilidade dos SFV às descargas atmosféricas indiretas (HERNÁNDEZ; VIDAL; JURADO, 2008; CHRISTODOULO *et al.*, 2015), conforme apresentam as figuras 12 e 13, onde na última, o laço representado em verde, pela sua menor área, apresenta uma situação mais favorável, menores valores de tensão induzida.

Figura 12 - Exemplo de laço de indução formado por condutores ativos.



Fonte: Autor.

Figura 13 - Efeito da área formada pelos laços de indução no valor da tensão induzida.



Fonte: Autor

A utilização de blindagens eletromagnéticas é uma outra MPS, associada ao roteamento de cabos. Seu objetivo é evitar a indução de sobretensões transitórias nos condutores elétricos de SFV, evitando que elas alcancem componentes de menor suportabilidade do sistema, como os módulos fotovoltaicos. A utilização de condutos elétricos metálicos fechados é um exemplo de blindagem, sendo que no caso dos módulos fotovoltaicos, molduras metálicas e folhas de alumínio em sua parte traseira reduzem significativamente às tensões induzidas, respectivamente por um fator de redução (FR) respectivamente entre 3 e 7, e 7 e 10 (HERNÁNDEZ; VIDAL; JURADO, 2008).

Uma medida da capacidade de um dispositivo suportar transientes elétricos de alta tensão ou alta frequência sem se danificar é o valor da sua tensão suportável ao impulso (SWC - *Surge Withstand Capability*), que para módulos FV é definida através do teste de impulso de tensão (IVT - *Impulse Voltage Test*) com valor máximo de 8 kV conforme a norma técnica IEC 61730-2 (2016b), em função da tensão máxima do sistema onde o módulo será instalado e sua classificação como módulos A, B ou C, relacionada aos riscos associados ao sistema (JAECKEL, 2014). O valor de SWC informa a magnitude das sobretensões induzidas por descargas atmosféricas diretas ou indiretas que a rigidez dielétrica de um módulo fotovoltaico pode resistir sem se danificar (FORMISANO *et al.*, 2019). Para reduzir o número de surtos de tensão nos módulos fotovoltaicos, limitando a magnitude daqueles que ocorrerem ao valor da SWC do módulo, são utilizadas as MPS. Embora a SWC seja o principal parâmetro para definir a vulnerabilidade dos componentes de instalações elétricas, ela avalia os efeitos de um único impulso de tensão, sem informar os efeitos cumulativos de impulsos recorrentes cuja magnitude seja inferior ao valor da SWC de determinado componente.

## 4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada em cada uma das duas partes experimentais desta pesquisa. Na primeira foram utilizados o Laboratório de Modelos Reduzidos e o Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (LSF) do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE/USP), para avaliar os efeitos das tensões impulsivas em modo diferencial na eventual alteração dos parâmetros elétricos dos módulos fotovoltaicos.

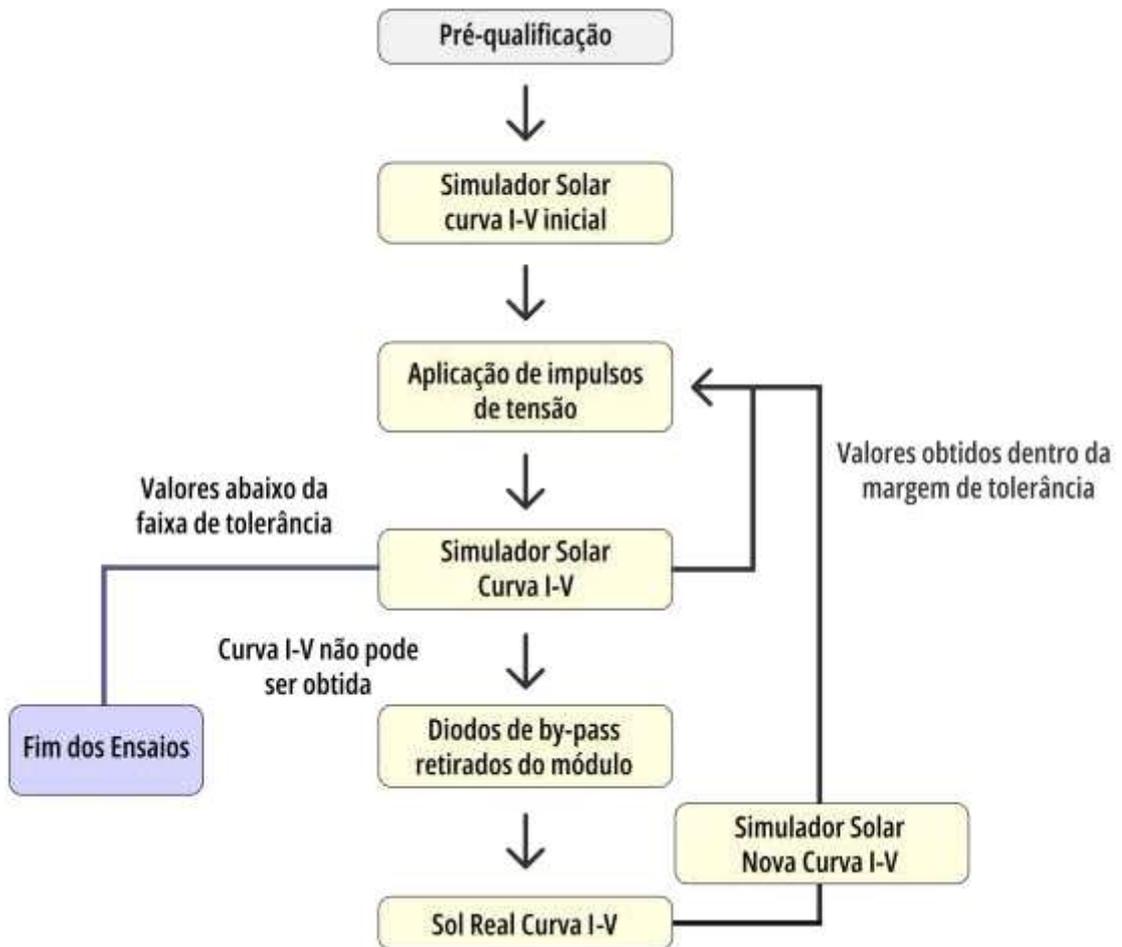
Na segunda parte experimental da pesquisa foi utilizado o Laboratório de Alta Tensão do IEE/USP. Essa parte teve como meta realizar uma investigação preliminar sobre as características das tensões e correntes induzidas nos terminais de um módulo fotovoltaico quando da incidência de impulsos de corrente em suas proximidades. Para isso nos ensaios utilizou-se duas formas de onda de corrente, três intensidade, duas polaridades e duas distâncias entre o gerador e o módulo. O objetivo aqui foi simular a ocorrência de descargas indiretas e comparar as tensões induzidas no módulo com a tensão de impulso atmosférico normalizada (impulso  $1,2/50\mu\text{s}$ ).

### 4.1 ENSAIOS DE IMPULSOS DE TENSÃO

Os ensaios de impulsos de tensão seguiram o fluxograma apresentado na figura 14, sendo detalhados a seguir.

Para o início dos ensaios, oito módulos fotovoltaicos de silício policristalino com características semelhantes, cedidos pelo LSF, foram escolhidos para uma pré-qualificação, visando garantir que antes que recebessem os impulsos de tensão eles estivessem bem conservados, sem a existência de defeitos ou falhas (JIANG; GRZYBOWSKI, 2013, 2014); NAXAKIS *et al.*, 2017; DHOKE; SHARMA; SAHA, 2018). Os módulos utilizados possuíam 36 células fotovoltaicas em série, conforme a figura 15, e valores semelhantes do Ponto de Máxima Potência (Pm), Tensão de Circuito Aberto (Voc), Corrente de Curto-Circuito (Isc), Tensão no Ponto de Máxima Potência (Vmp) e Corrente no Ponto de Máxima Potência (Imp).

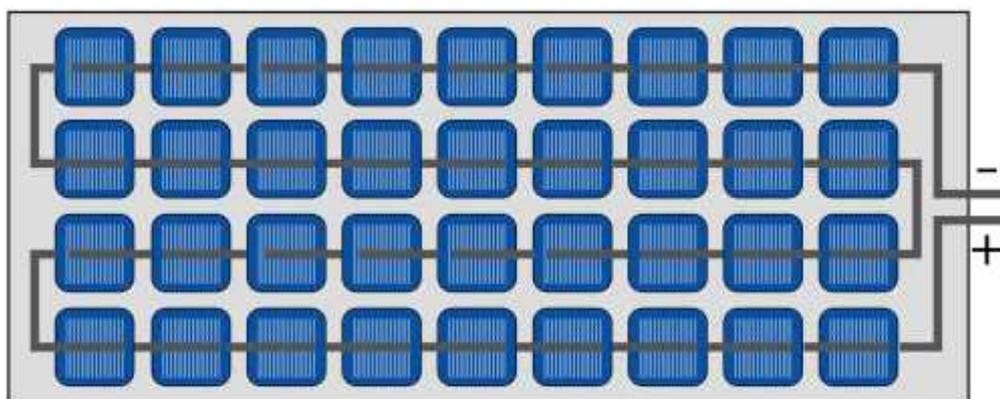
Figura 14 - Fluxograma dos ensaios de tensão.



Fonte: Autor.

Figura 15 - Módulo fotovoltaico utilizado nos ensaios.

**Esquema típico módulo 36 células em série**



Fonte: Autor.

Os módulos escolhidos permaneceram guardados em ambientes fechados, sem exposição a fatores ambientais como chuva, incidência da radiação solar e temperaturas elevadas. Tal precaução foi necessária porque outros estudos indicaram que módulos envelhecidos, já degradados por fatores ambientais, são mais vulneráveis aos efeitos das descargas atmosféricas (JIANG; GRZYBOWSKI, 2013, 2014; NAXAKIS; PERRAKI; PYRGIOTI, 2014). Os procedimentos utilizados para avaliação dos módulos, na sua maioria indicados nas normas técnicas IEC 61215-1:2021 (IEC, 2021a), IEC 61215-2:2021 (IEC, 2021b), IEC 61730-1:2016 (IEC, 2016a) e IEC 61730-2:2016 (IEC, 2016b), foram os seguintes:

**Inspeção visual:** A detecção visual de possíveis defeitos nos módulos foi efetuada conforme os procedimentos descritos no item 10.1 da norma IEC 61215-2 (IEC, 2021b). Os módulos foram inspecionados sob uma iluminação não inferior a 1000 lux para que fossem identificadas as seguintes condições: superfícies externas rachadas, que não se encontrassem em linha reta ou estivessem desalinhadas, células quebradas, interconexões com defeito, células tocando em outras ou nas molduras, falhas nos materiais adesivos, bolhas ou delaminações formando um caminho contínuo entre uma célula e a borda do módulo, superfícies de plástico mal produzidas, terminações defeituosas ou partes elétricas expostas e quaisquer outros problemas que pudessem afetar o desempenho dos módulos. Durante essa inspeção seria anotada ou fotografada a existência e a posição de qualquer trinca, bolha ou delaminação etc.

que pudessem afetar negativamente o desempenho do módulo nos testes subsequentes. Foram aprovados os módulos que não apresentaram evidências de algum defeito importante.

**Determinação da potência máxima**, para verificar as características elétricas do módulo nas STC, tendo sido efetuado conforme os procedimentos descritos no item 10.2 da norma IEC 61215-2 (IEC, 2021b). Neste teste, a potência máxima do módulo deveria estar entre -5% e 10% da potência indicada nos dados técnicos apresentados pelo fabricante ou fornecedor do módulo.

**Isolamento elétrico dos módulos**, para verificar o isolamento elétrico entre os terminais elétricos positivo (+) e negativo (-) do módulo e sua moldura metálica, tendo sido realizado conforme especificado no item 10.3 da norma IEC 61215-2 (IEC, 2021b).

**Resistência de isolamento em condições de umidade**, para verificar o isolamento elétrico entre os terminais elétricos positivo (+) e negativo (-) do módulo e sua moldura metálica em condições de umidade, tendo sido realizado conforme especificado no item 10.15 da norma IEC 61215-2 (IEC, 2021b).

Como última etapa dessa avaliação foi realizada a **eletroluminescência** dos módulos, um método não invasivo e não destrutivo para identificação de defeitos nas células e módulos fotovoltaicos que poderiam não ser percebidos através da inspeção visual.

Após todos os módulos passarem pelas mesmas etapas, sete deles foram aprovados, um dos quais apresentado nas figuras 16 e 17, sendo então obtidas as suas curvas I-V, através do simulador solar apresentado na sequência. O oitavo módulo foi rejeitado por apresentar microfissuras, identificadas no ensaio de eletroluminescência. Foram registrados os seguintes parâmetros elétricos de cada um dos sete módulos:  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $P_m$ ,  $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ , FF e eficiência ( $\eta$ ). Para aplicação dos impulsos de tensão, primeira parte da pesquisa, foram selecionados aleatoriamente os módulos 1, 2, 3, 4, 5 e 6, sendo que o módulo 6 foi utilizado apenas como referência, não recebendo impulsos de tensão, sendo que ao final dos ensaios foi levantada a sua curva I-V para comparação de possíveis variações de seus parâmetros com aquelas que ocorreram nos módulos que de fato receberam impulsos de tensão. O módulo 7 foi reservado para os ensaios de impulso de corrente, correspondentes à segunda parte desta pesquisa.

Figura 16 - Módulo fotovoltaico número 3, frente.



**Fonte:** Autor.

Figura 17 - Módulo fotovoltaico número 3, verso.



**Fonte:** Autor.

A seguir foram aplicados nos módulos 1, 2, 3, 4 e 5 uma sequência de 100 impulsos de tensão, 50 de polaridade negativa e em seguida 50 de polaridade positiva, com um intervalo entre cada impulso de 10 segundos, através do gerador de onda combinada apresentado nas figuras 18 e 19. Aplicou-se o impulso atmosférico de tensão normalizado (impulso 1,2/50  $\mu$ s). Embora as tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas não tenham necessariamente as mesmas características do impulso de tensão normalizado, o impulso utilizado nos ensaios é referência para ensaios de suportabilidade elétrica, tendo também sido utilizado em outros estudos sobre o mesmo tema (DECHTHUMMARONG *et al.*, 2012; JIANG; GRZYBOWSKI ,2013, 2014; NAXAKIS *et al.*, 2017).

Inicialmente foi estabelecido o nível mais baixo do impulso de tensão a ser aplicado, 200 V. Outros valores, mais elevados, foram posteriormente estabelecidos em função dos resultados que eram progressivamente obtidos. A magnitude da tensão aplicada ao primeiro módulo ensaiado foi relativamente baixa para que fosse possível verificar as menores alterações possíveis no parâmetros que seriam avaliados, já que o objetivo do trabalho não foi verificar

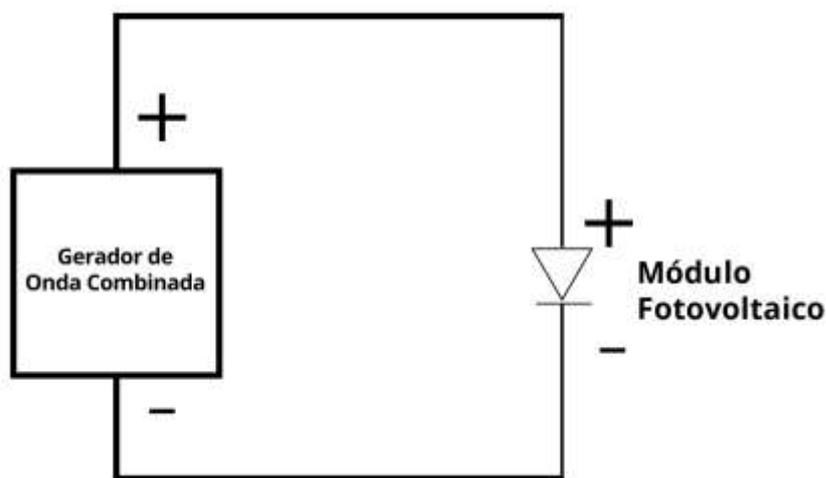
qual valor de tensão danificaria o módulo. A medida em que os ensaios foram realizados, outras sequências de impulsos de tensão, iniciando-se em magnitudes mais altas, ou com intervalos de magnitude maiores, foram aplicadas, o que explica porque as sequências de impulsos de tensões aplicadas aos módulos não foram idênticas.

Figura 18 - Gerador de onda combinada.



Fonte: Autor.

Figura 19 - Diagrama da aplicação dos impulsos de tensão.

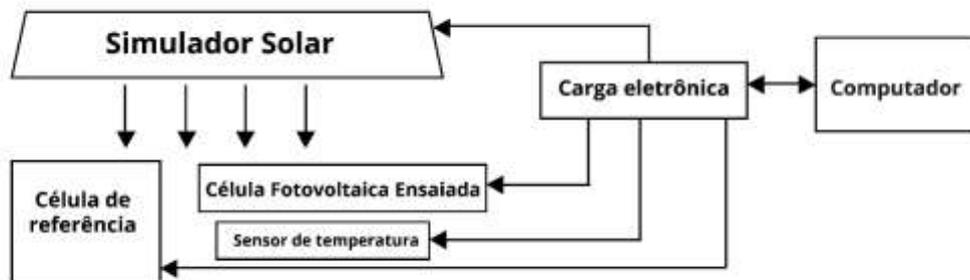


Fonte: Autor.

Ao final de cada aplicação de impulsos de tensão, os módulos retornavam ao LSF para obtenção de uma nova curva I-V em condições de luminosidade, através do simulador solar Pasan, apresentado nas figuras 20, 21 e 22 (SANTOS *et al.*, 2017). A confiabilidade das curvas obtidas foi assegurada pelo fato do LSF ser um laboratório credenciado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), para avaliação de módulos fotovoltaicos no Brasil, tendo as medições feitas nesta pesquisa seguido os mesmos padrões técnicos utilizados nos serviços prestados pelo LSF. O simulador solar utilizou uma fonte de radiação constituída por uma lâmpada Xênon, espectralmente filtrada para o espectro AM 1,5 global, sendo a sua intensidade ajustada para atingir uma irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  em um módulo fotovoltaico posicionado a 5,0 m dessa lâmpada. As dimensões do módulo testado poderiam atingir até 2 m x 2 m e a uniformidade espacial da irradiância nessa área de  $4 \text{ m}^2$  é maior ou igual a 98%. Durante um período de aproximadamente 20 ms (flash plateau) a irradiância da lâmpada Xenon no plano do módulo fotovoltaico mantém o valor de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Durante o processo, a medição, controle, comunicação e visualização dos resultados dos ensaios realizados pelo simulador solar foram comandados por um microcomputador conectado a carga eletrônica, conforme apresentado na figura 20. Através do software de operação do simulador foi possível transferir as curvas I-V medidas para as STC. A correção da curva I-V do módulo foi realizada levando-se em consideração a irradiância e as temperaturas do módulo, do

ambiente e da célula de referência, existentes no laboratório, seguindo os procedimentos da norma IEC 60891:2021 (IEC, 2021c).

Figura 20 - diagrama funcional do simulador solar.



Fonte: (SANTOS et al., 2017, adaptação do autor).

Figura 21 - Obtenção da curva I-V no simulador solar.



Fonte: Autor.

Figura 22 – Registro de dados para obtenção da curva I-V.



**Fonte:** Autor.

Se os resultados obtidos pela curva I-V não indicassem alguma alteração significativa em algum dos parâmetros, além da margem de tolerância da medição, novas aplicações de impulso seriam realizadas na expectativa de que após a aplicação de uma série de impulsos com determinada magnitude os parâmetros seriam alterados. A margem de tolerância foi estabelecida em 3% para todos os parâmetros medidos, em função da incerteza das medições, informada nos manuais da instrumentação utilizada, mesmo que essa incerteza não fosse a mesma para todos esses parâmetros, para que fosse possível verificar a progressividade dessas alterações, não interrompendo o ensaio quando apenas um dos parâmetros variasse acima da sua incerteza específica.

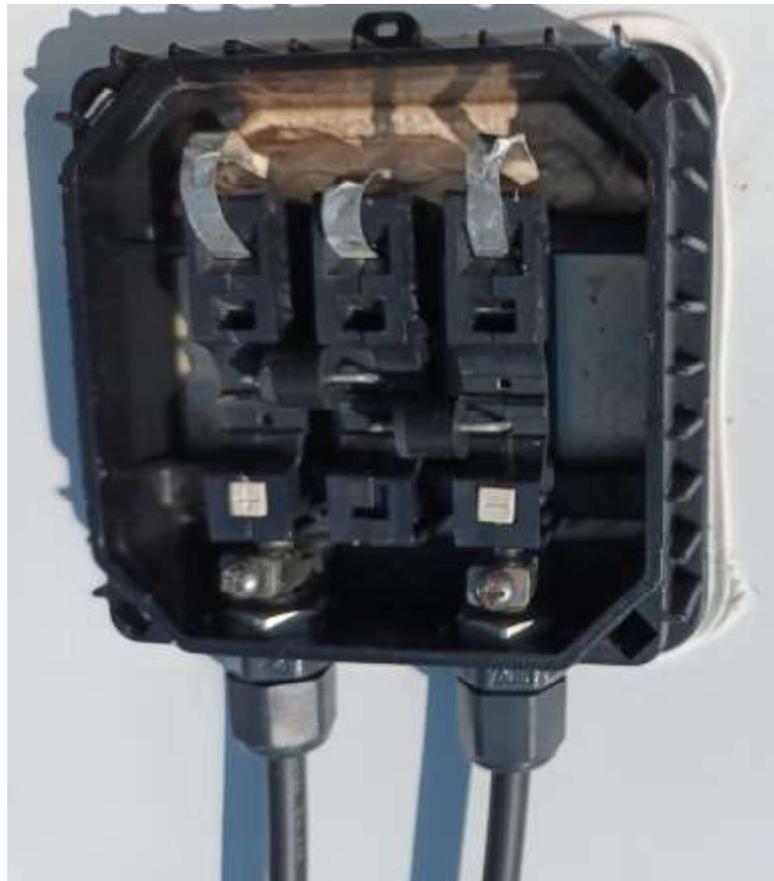
Caso os resultados obtidos pela curva I-V indicassem alguma alteração significativa, o ensaio neste módulo seria interrompido, sendo investigadas então quais as razões e as consequências de tais alterações.

Quando pela primeira vez, após as aplicações dos impulsos de tensão, não foi possível obter a curva I-V do módulo ensaiado, foram pesquisados possíveis motivos, tendo-se

concluído que os diodos de by-pass haviam sido danificados (TRETER; MICHELS, 2018).

Após a retirada deles, conforme visualizado na figura 23, foi necessário estabelecer novos parâmetros para serem inseridos no simulador solar, que foram obtidos através de medições no módulo sob sol real, conforme pode ser visualizado na figura 24. A partir desse momento foi decidido iniciar ensaios de impulsos de tensão nos módulos 3 e 5, retirando deles os diodos de by-pass, para verificar se nesta condição os parâmetros dos módulos seriam alterados, e, se fossem, em que magnitude de tensão.

Figura 23 - Módulo sem o diodo de by-pass.



Fonte: Autor.

Figura 24 – Arranjo para obtenção da curva I-V sob sol real.



Fonte: Autor.

Todas as informações dos módulos ensaiados segundo os dados fornecidos pelos seus fabricantes, escritos nos próprios módulos, estão apresentadas a seguir.

- 1) Fabricante: Tecnometal DYA Energia Solar  
Modelo: SV145D12  
Número de série: 10175668
  
- 2) Fabricante: UP Solar  
Modelo UP-M155P  
Número de série: UP021525171023791184  
Pm: 155Wp 0-3%  
Vmp: 18,06V  
Imp: 8,49A  
Voc: 23,2V  
Corrente de curto-circuito (Isc): 8,77A  
Tensão máxima do sistema: 1000V, Classe de aplicação: A
  
- 3) Fabricante: Hinin PV  
Modelo: HG-140P  
Número de série: 140HG-A1403210001  
Pm: 140 W  
Voc: 22,1 V  
Isc: 8,22 A

Vmp: 18,2 V  
Imp: 7,70 A  
Tolerância na potência de saída: 0-3%  
Tensão máxima do sistema: 1000 vcc  
Peso 11,7 Kg  
Dimensões (mm): 1482 x 676 x 35 mm  
Classe de aplicação: A

- 4) Fabricante: Yingli Solar  
Modelo: YL 145P-17b  
Nº de série: 13392908010001  
Pm: 140W  
Voc: 22,1V  
Isc: 8,22A
  
- 5) Fabricante: Hinin PV.  
Modelo: HG-140P.  
Número de série: 140HG-A1403210003  
Pm: 140W  
Voc: 22,1V  
Isc: 8,22A  
Vmp: 18,2V  
Imp: 7,70A  
Tolerância na potência de saída: 0-3%  
Tensão máxima do sistema: 1000vcc  
Peso: 11,7kg  
Dimensões (mm): 1482x676x35mm  
Classe de aplicação: A
  
- 6) Fabricante: Jinko Solar  
Modelo: JKM 140P-36  
Número de série: 140HGA1403210001  
Pm: 140W (tolerância de 3%)  
Voc: 22,2V  
Isc: 8,36A  
Vmp: 18,0V  
Imp: 7,78A  
Temperatura de operação nominal da célula (NOCT): 45+/-2°C  
Máxima tensão de operação de sistema: 1000Vcc  
Valor máximo dos fusíveis em série: 15A  
Faixa de temperatura de operação: -40°C/+85°C  
Classe da aplicação: A  
Peso: 11,5kg  
Dimensões: 1478x676x35mm

- 7) Fabricante: Yingli Solar  
 Modelo: YL 145P-17b  
 N° de série: 13392908010002  
 Pm: 140W  
 Voc: 22,5V  
 Isc: 8,47A  
 Vmp: 18,2V  
 Imp: 7,99A

As sequências de aplicação dos impulsos de tensão, registradas nas tabelas 3, 4, 5, 6 e 7 são apresentadas a seguir. Como os módulos não estavam alimentados, não foi necessário sincronizar o gerador à rede de alimentação do módulo (sincronização assíncrona).

Tabela 3 - Tensões aplicadas no módulo 1.

Data	Tensão (V)	Impedância Interna Gerador ( $\Omega$ )	Intervalo (s)	Número de Pulsos	Sincronização
02/02/2022	200	2	10	100	Assíncrona
10/02/2022	200	2	10	100	Assíncrona
15/03/2022	200	2	10	100	Assíncrona
15/03/2022	200	2	10	100	Assíncrona
22/03/2022	200	2	10	100	Assíncrona
22/03/2022	200	2	10	100	Assíncrona
22/03/2022	200	2	10	100	Assíncrona
29/03/2022	200	2	10	100	Assíncrona
31/03/2022	200	2	10	100	Assíncrona
31/03/2022	200	2	10	100	Assíncrona
04/04/2022	200	2	10	100	Assíncrona
04/04/2022	200	2	10	100	Assíncrona
04/04/2022	200	2	10	100	Assíncrona
07/04/2022	200	2	10	100	Assíncrona
07/04/2022	200	2	10	100	Assíncrona
05/05/2022	200	2	10	100	Assíncrona
05/05/2022	200	2	10	100	Assíncrona
11/05/2022	200	2	10	100	Assíncrona
19/05/2022	200	2	10	100	Assíncrona
19/05/2022	200	2	10	100	Assíncrona
25/05/2022	200	2	10	100	Assíncrona
25/05/2022	200	2	10	100	Assíncrona
05/07/2022	200	2	10	100	Assíncrona
05/07/2022	200	2	10	100	Assíncrona
14/07/2022	200	2	10	100	Assíncrona
14/07/2022	200	2	10	100	Assíncrona
22/06/2022	200	2	10	100	Assíncrona
22/07/2022	200	2	10	100	Assíncrona
22/07/2022	200	2	10	100	Assíncrona

Continuação próxima pg.

Tabela 3 - Tensões aplicadas no módulo 1.- continuação

Data	Tensão (V)	Impedância Interna Gerador ( $\Omega$ )	Intervalo (s)	Número de Pulsos	Sincronização
12/08/2022	200	2	10	100	Assíncrona
19/08/2022	200	2	10	100	Assíncrona
02/09/2022	200	2	10	100	Assíncrona
02/09/2022	200	2	10	100	Assíncrona
06/09/2022	200	2	10	100	Assíncrona
06/09/2022	200	2	10	100	Assíncrona
19/09/2022	200	2	10	100	Assíncrona
19/09/2022	200	2	10	100	Assíncrona
23/09/2022	200	2	10	100	Assíncrona
23/09/2022	200	2	10	100	Assíncrona
14/10/2022	200	2	10	100	Assíncrona
14/10/2022	200	2	10	100	Assíncrona
14/10/2022	200	2	10	100	Assíncrona
14/10/2022	200	2	10	100	Assíncrona
18/10/2022	200	2	10	100	Assíncrona
18/10/2022	200	2	10	100	Assíncrona
18/10/2022	200	2	10	100	Assíncrona
26/10/2022	200	2	10	100	Assíncrona
26/10/2022	200	2	10	100	Assíncrona
26/10/2022	200	2	10	100	Assíncrona
01/12/2022	200	2	10	100	Assíncrona
14/12/2022	200	2	10	100	Assíncrona
14/12/2022	200	2	10	100	Assíncrona
21/12/2022	200	2	10	100	Assíncrona
21/12/2022	200	2	10	100	Assíncrona
21/12/2022	200	2	10	100	Assíncrona
04/01/2023	200	2	10	100	Assíncrona
04/01/2023	200	2	10	100	Assíncrona
04/01/2023	200	2	10	100	Assíncrona
01/02/2023	200	2	10	100	Assíncrona
01/02/2023	200	2	10	100	Assíncrona
16/02/2023	200	2	10	100	Assíncrona
16/02/2023	200	2	10	100	Assíncrona
16/03/2023	200	2	10	100	Assíncrona
29/03/2023	200	2	10	100	Assíncrona
29/03/2023	200	2	10	100	Assíncrona
29/03/2023	200	2	10	100	Assíncrona
13/04/2023	1000	2	10	1000	Assíncrona
19/04/2023	1400	2	10	100	Assíncrona

Fonte: Autor.

Tabela 4 - Tensões aplicadas no módulo 2.

Data	Tensão (V)	Impedância Interna Gerador ( $\Omega$ )	Intervalo (s)	Número de Pulsos	Sincronização
02/02/2022	220	2	10	100	Assíncrona
10/02/2022	240	2	10	100	Assíncrona
15/03/2022	260	2	10	100	Assíncrona
15/03/2022	280	2	10	100	Assíncrona
22/03/2022	300	2	10	100	Assíncrona
22/03/2022	350	2	10	100	Assíncrona
22/03/2022	400	2	10	100	Assíncrona
29/03/2022	450	2	10	100	Assíncrona
31/03/2022	500	2	10	100	Assíncrona
31/03/2022	550	2	10	100	Assíncrona
04/04/2022	600	2	10	100	Assíncrona
04/04/2022	650	2	10	100	Assíncrona
04/04/2022	700	2	10	100	Assíncrona
07/04/2022	750	2	10	100	Assíncrona
07/04/2022	800	2	10	100	Assíncrona
14/04/2022	850	2	10	100	Assíncrona
05/05/2022	900	2	10	100	Assíncrona
05/05/2022	950	2	10	100	Assíncrona
11/05/2022	1000	2	10	100	Assíncrona
19/05/2022	1100	2	10	100	Assíncrona
19/05/2022	1200	2	10	100	Assíncrona
25/05/2022	1300	2	10	100	Assíncrona
25/05/2022	1400	2	10	100	Assíncrona
22/06/2022	1500	2	10	100	Assíncrona
05/07/2022	1750	2	10	100	Assíncrona
04/05/2023	1850	2	10	100	Assíncrona
04/05/2023	1950	2	10	100	Assíncrona
11/05/2023	2050	2	10	100	Assíncrona
11/05/2023	2150	2	10	100	Assíncrona
18/05/2023	2250	2	10	100	Assíncrona
18/05/2025	2350	2	10	100	Assíncrona
14/06/2023	2450	2	10	100	Assíncrona
22/06/2023	2550	2	10	100	Assíncrona
22/06/2023	2650	2	10	100	Assíncrona
27/06/2023	2750	2	10	100	Assíncrona

Fonte: Autor.

Tabela 5 - Tensões aplicadas no módulo 3.

Data	Tensão (V)	Impedância Interna Gerador ( $\Omega$ )	Intervalo (s)	Número de Pulsos	Sincronização
05/07/2022	200	2	10	100	Assíncrona
05/07/2022	250	2	10	100	Assíncrona
14/07/2022	300	2	10	100	Assíncrona
14/07/2022	350	2	10	100	Assíncrona
22/07/2022	400	2	10	100	Assíncrona
22/07/2022	450	2	10	100	Assíncrona
12/08/2022	500	2	10	100	Assíncrona
19/08/2022	550	2	10	100	Assíncrona
02/09/2022	600	2	10	100	Assíncrona
02/09/2022	650	2	10	100	Assíncrona
06/09/2022	700	2	10	100	Assíncrona
06/09/2022	750	2	10	100	Assíncrona
19/09/2022	800	2	10	100	Assíncrona
19/09/2022	850	2	10	100	Assíncrona
23/09/2022	900	2	10	100	Assíncrona
23/09/2022	950	2	10	100	Assíncrona
14/10/2022	1000	2	10	100	Assíncrona
14/10/2022	1050	2	10	100	Assíncrona
14/10/2022	1100	2	10	100	Assíncrona
14/10/2022	1150	2	10	100	Assíncrona
18/10/2022	1200	2	10	100	Assíncrona
18/10/2022	1250	2	10	100	Assíncrona
18/10/2022	1300	2	10	100	Assíncrona
26/10/2022	1350	2	10	100	Assíncrona
26/10/2022	1400	2	10	100	Assíncrona
26/10/2022	1450	2	10	100	Assíncrona
01/12/2022	1500	2	10	100	Assíncrona
14/12/2022	1550	2	10	100	Assíncrona
14/12/2022	1600	2	10	100	Assíncrona
21/12/2022	1650	2	10	100	Assíncrona
21/12/2022	1700	2	10	100	Assíncrona
21/12/2022	1750	2	10	100	Assíncrona
04/01/2023	1800	2	10	100	Assíncrona
04/01/2023	1850	2	10	100	Assíncrona
04/01/2023	1900	2	10	100	Assíncrona
01/02/2023	1950	2	10	100	Assíncrona
01/02/2023	2000	2	10	100	Assíncrona
16/02/2023	2050	2	10	100	Assíncrona
16/02/2023	2100	2	10	100	Assíncrona
16/03/2023	2150	2	10	100	Assíncrona
29/03/2023	2200	2	10	100	Assíncrona

Continuação próxima pg.

Tabela 5 - Tensões aplicadas no módulo 3. - continuação

Data	Tensão (V)	Impedância Interna Gerador ( $\Omega$ )	Intervalo (s)	Número de Pulsos	Sincronização
29/03/2023	2250	2	10	100	Assíncrona
29/03/2023	2300	2	10	100	Assíncrona
13/04/2023	2400	2	10	100	Assíncrona
19/04/2023	2500	2	10	100	Assíncrona
04/05/2023	2600	2	10	100	Assíncrona
04/05/2023	2700	2	10	100	Assíncrona
11/05/2023	2800	2	10	100	Assíncrona
11/05/2023	2900	2	10	100	Assíncrona
18/05/2023	3000	2	10	100	Assíncrona
18/05/2023	3100	2	10	100	Assíncrona
14/06/2023	3200	2	10	100	Assíncrona
22/06/2023	3300	2	10	100	Assíncrona
22/06/2023	3400	2	10	100	Assíncrona
27/06/2023	3500	2	10	100	Assíncrona

Fonte: Autor.

Tabela 6 - Tensões aplicadas no módulo 4.

Data	Tensão (V)	Impedância Interna do Gerador ( $\Omega$ )	Intervalo (s)	Número de Pulsos	Sincronização
19/04/2023	1200	2	10	100	Assíncrona
04/05/2023	1300	2	10	100	Assíncrona
04/05/2023	1400	2	10	100	Assíncrona
11/05/2023	1500	2	10	100	Assíncrona

Fonte: Autor.

Tabela 7 - Tensões aplicadas no módulo 5.

Data	Tensão (V)	Impedância Interna Gerador ( $\Omega$ )	Intervalo (s)	Número de Pulsos	Sincronização
19/04/2023	1200	2	10	100	Assíncrona
04/05/2023	1300	2	10	100	Assíncrona
04/05/2023	1400	2	10	100	Assíncrona
11/05/2023	1500	2	10	100	Assíncrona
11/05/2023	1600	2	10	100	Assíncrona
18/05/2023	1700	2	10	100	Assíncrona
18/05/2023	1800	2	10	100	Assíncrona
14/06/2023	1900	2	10	100	Assíncrona
22/06/2023	2000	2	10	100	Assíncrona
22/06/2023	2100	2	10	100	Assíncrona
27/06/2023	2200	2	10	100	Assíncrona

Fonte: Autor.

## 4.2 ENSAIOS DE IMPULSO DE CORRENTE

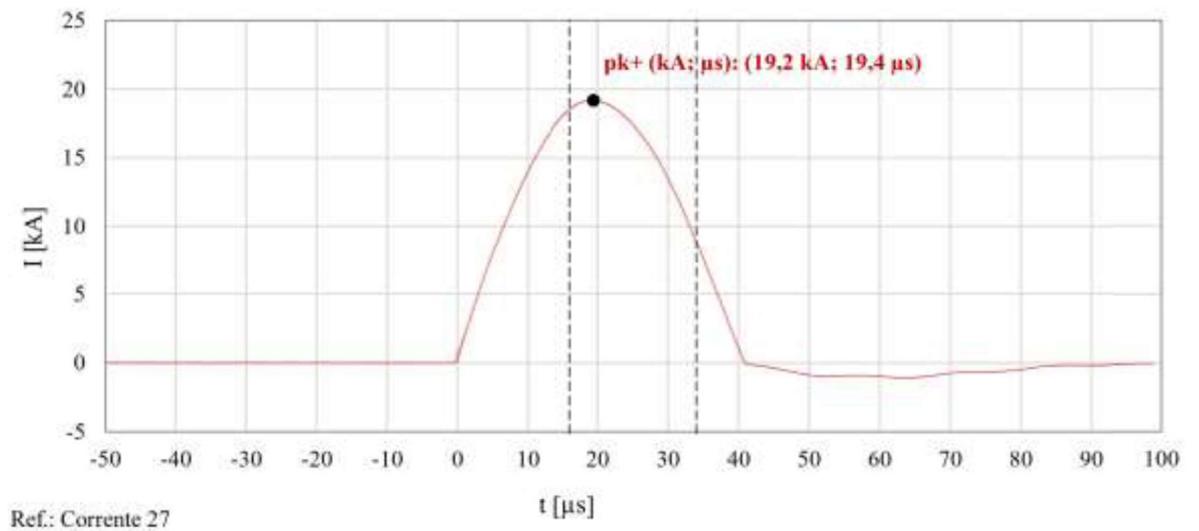
Os ensaios de impulso de corrente tiveram por objetivo analisar as tensões e correntes induzidas nos terminais do módulo fotovoltaico quando da aplicação de correntes impulsivas nas suas proximidades.

Neste ensaio foi utilizado um gerador de impulsos, conhecido como circuito de Marx, com bancos de capacitores de 15 estágios, carregados em paralelo e descarregados em série. Cada estágio tem capacitância de  $0,750 \mu\text{F}$  e pode ser carregado com tensão máxima de 200 kV. Duas configurações foram utilizadas: a primeira com 5 estágios, para gerar o impulso  $9/20 \mu\text{s}$ , e a segunda com 6 estágios, para gerar o impulso  $16/34 \mu\text{s}$ , tendo sido nessa inserido um indutor de  $0,38 \mu\text{H}$  em série na saída do gerador. Como o objetivo inicial era utilizar a onda normalizada  $8/20\mu\text{s}$  e comparar os resultados com aqueles obtidos com impulsos mais lentos e outros mais rápidos, para verificação da influência da forma de onda nos valores das tensões induzidas, foram utilizadas as formas de onda anteriormente apresentadas, sendo elas, dadas as possibilidades do laboratório, as que mais se aproximaram da finalidade desta parte do trabalho.

Para medição e registro das correntes do gerador de impulso e no módulo fotovoltaico, foram utilizadas como transdutores duas bobinas de Pearson, sendo que a tensão e a corrente no módulo foram obtidas através dos canais CH1 e CH2 do osciloscópio digital Tektronix TDS 3014C, e registradas em arquivos com valores separados por curvas (CSV – *Comma Separated Values*) para que posteriormente fossem obtidas as suas respectivas curvas e as suas características analisadas.

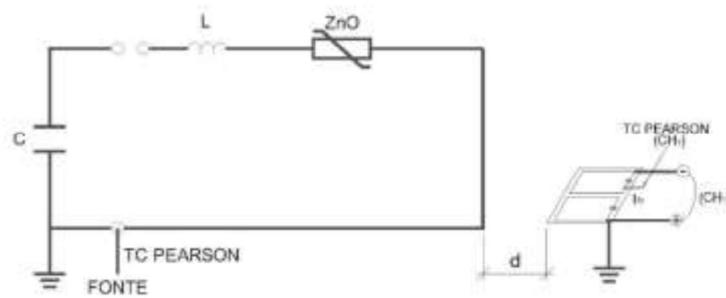
Os impulsos de corrente, com valores de pico de 7,9 kA, 11,8 kA, 13 kA, 16 kA e 20 kA e formas de onda de  $9/20 \mu\text{s}$  e  $16/34 \mu\text{s}$  foram aplicados às distâncias de 0,5 m e 1,0 m do módulo. A figura 25 ilustra o impulso  $16/34 \mu\text{s}$  e as figuras 26 e 27 apresentam informações sobre o circuito de teste.

Figura 25 – Corrente de impulso número 27, relacionada na tabela 18.



Fonte: Autor.

Figura 26 – Circuito da aplicação de impulsos de corrente.



Fonte: Autor.

C:

Impulso 9/20 = 5 x 0,750  $\mu$ F.

Impulso 16/34 = 6 x 0,750  $\mu$ F.

L:

Onda 9/20 = 0,00  $\mu$ H.

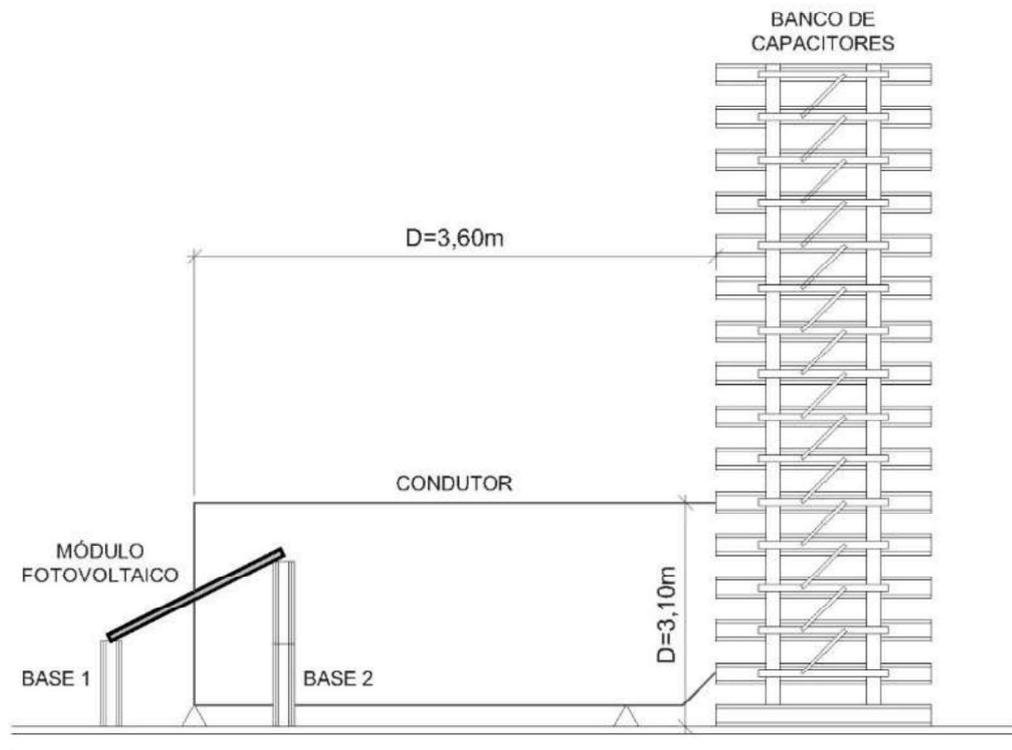
Onda 16/34 = 0,38  $\mu$ H.

d: distância entre o condutor vertical e a moldura do módulo, como indicado na figura 26 (os testes realizados com distâncias de 0,5 m e 1,0 m).

CH1 e CH2, canais do osciloscópio.

Para-raios de óxido de zinco (ZnO) = 2 x 4 kV.

Figura 27 – Posicionamento do módulo em relação ao gerador de impulsos.



Fonte: Autor.

Os testes realizados no Laboratório de Alta Tensão do IEE/USP utilizaram o gerador de impulsos mostrado na figura 28, utilizando o módulo 7, visualizado nas figuras 29 e 30, que não havia sido submetido anteriormente em nenhum teste com aplicação de tensão.

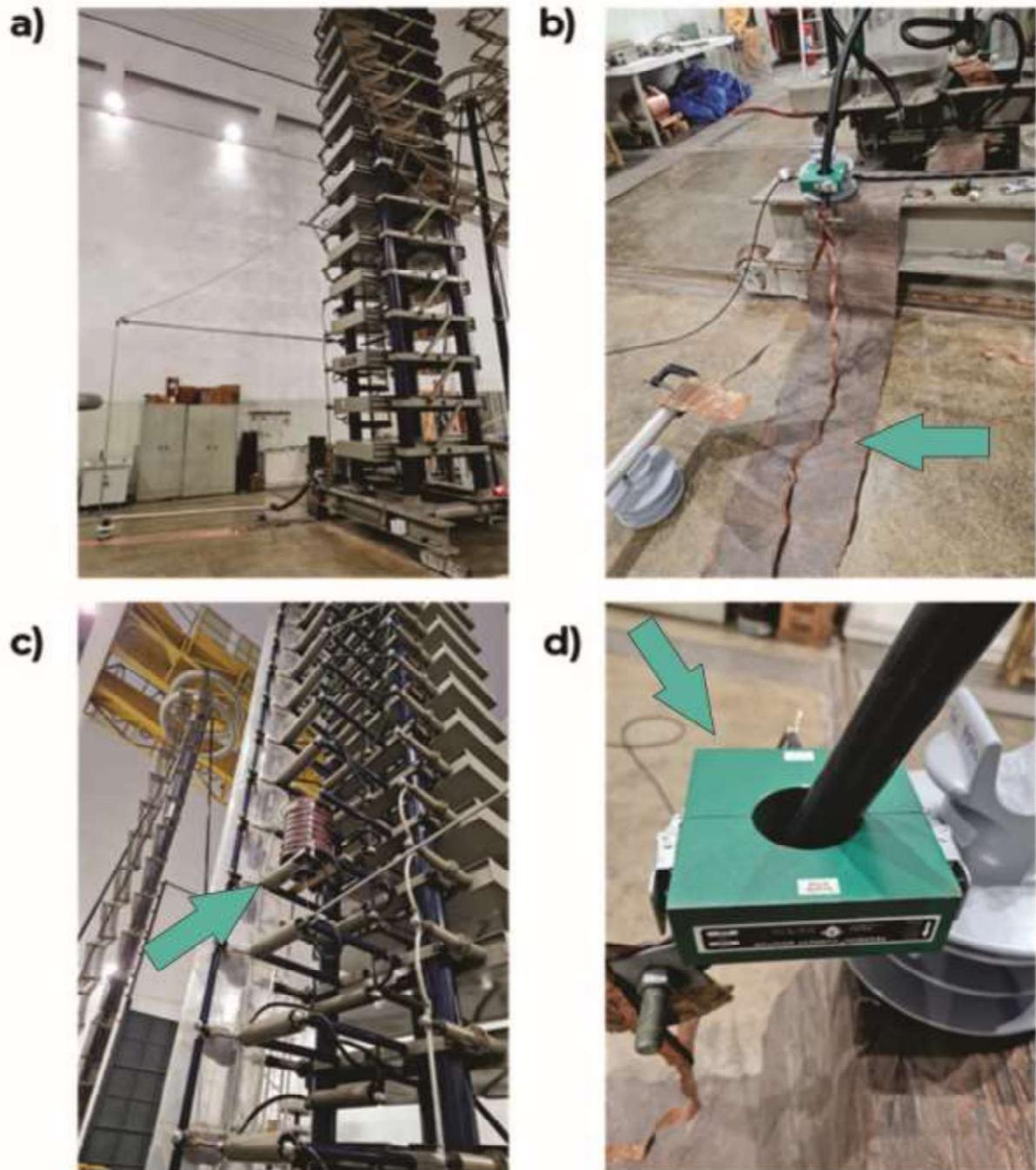
Figura 28 – Gerador de impulsos do Laboratório de Alta Tensão do IEE/USP.



**Fonte:** Autor.

Figura 29 – Detalhes do circuito utilizado para os ensaios de impulso de corrente.

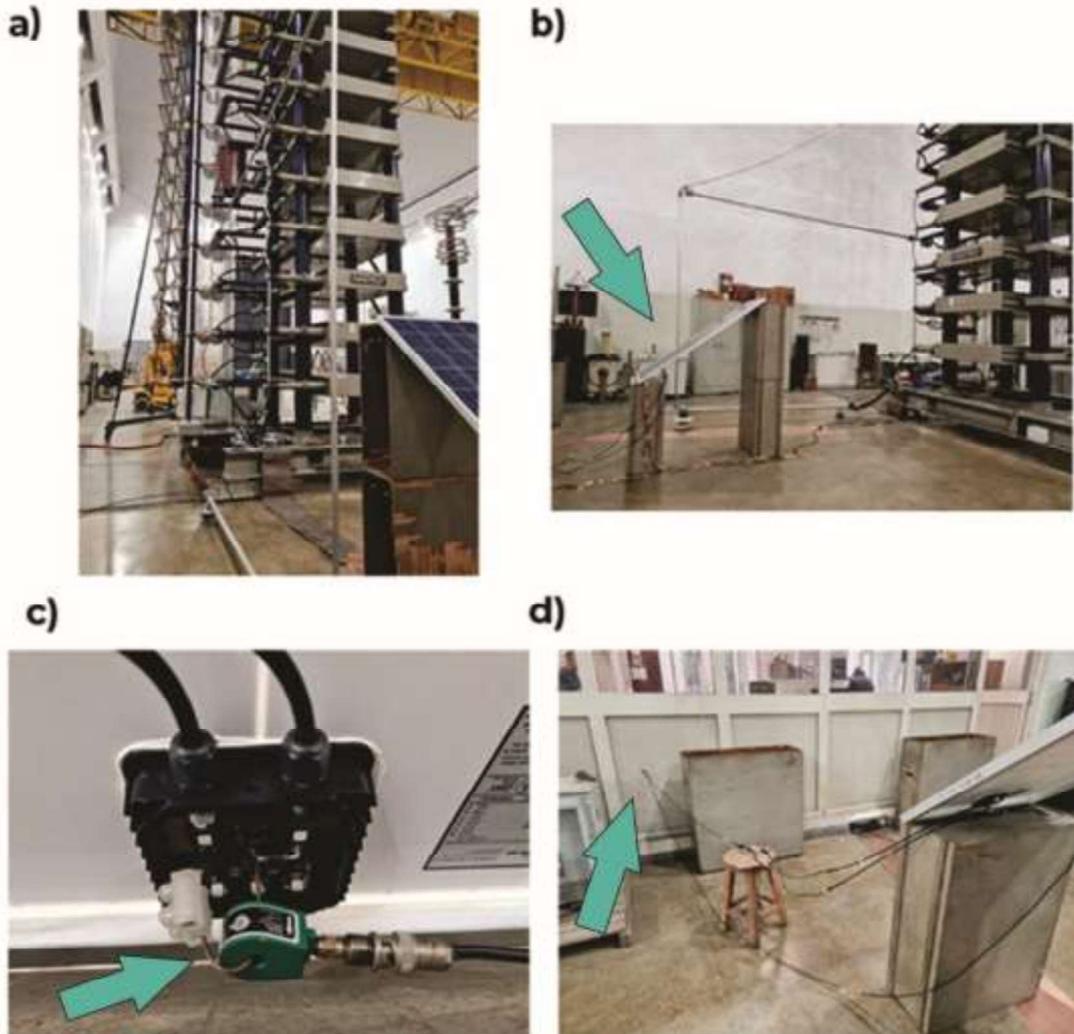
- a) Circuito de teste, b) Condutor de retorno da corrente de impulso, c) Indutor, d) TC de Pearson utilizado para medição da corrente



Fonte: Autor.

Figura 30 – Detalhes adicionais do circuito utilizado para os ensaios de impulso de corrente.

a) Circuito do gerador, b) Posicionamento do módulo, c) Medição da corrente em um laço do módulo, através de um TC de Pearson no diodo de bypass, d) Cabos de medição do osciloscópio.



Fonte: Autor.

Como os resultados obtidos nas medições registraram alto nível de ruídos devido às conexões do circuito do gerador de impulsos, foi utilizado para eliminação desses ruídos um Filtro de Média Móvel (MOF - *Moving Average Filter*) para estimação dos valores de pico da onda e reconstrução da sua componente fundamental (MENDONÇA, 2015).

## 5 RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados. Inicialmente são discutidos os resultados obtidos pela aplicação dos impulsos de tensão nos terminais dos módulos, com foco em eventuais alterações dos parâmetros elétricos. Em seguida são apresentadas e discutidas as medições das correntes e tensões induzidas pelos impulsos de corrente aplicados nas proximidades do módulo.

### 5.1 ENSAIOS DE IMPULSOS DE TENSÃO

São apresentados neste item os resultados obtidos nos cinco módulos ensaiados com séries de impulsos de tensão, ou seja, os módulos 1, 2, 3, 4 e 5, e o módulo 6, que não recebeu estes impulsos, mas foi utilizado como referência em relação a possíveis variações dos parâmetros elétricos analisados. Enquanto os resultados obtidos através das curvas I-V foram fornecidos pelos seus valores expressos no Sistema Internacional de unidades, os gráficos apresentam valores no sistema Por Unidade (P.U) para facilitar a visualização dos resultados obtidos e melhor compreensão das informações que eles apresentam.

As tabelas 8 e 9 apresentam os resultados dos parâmetros do **módulo 1**, obtidos através da curva I-V, nos ensaios de impulsos de tensão. As figuras 31 e 32 apresentam a evolução destes parâmetros ao longo das medições, em

Tabela 8 - Parâmetros do módulo 1: SV145D12 10175668

Data /hora	Pm (Wp)	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	FF	$\eta$
26/10/2021	142,54	22,27	8,42	17,94	7,95	75,99	16,27
27/01/2022	143,35	22,46	8,42	18,06	7,94	75,83	16,37
02/02/2022	142,55	22,46	8,44	17,94	7,94	75,23	16,28
10/02/2022	141,10	22,46	8,42	17,83	7,91	74,66	16,11
24/02/2022	144,52	22,58	8,44	18,18	7,95	75,88	16,50
15/03/2022	143,65	22,47	8,44	18,06	7,95	75,78	16,40
15/03/2022	143,79	22,50	8,42	18,10	7,95	75,88	16,42
22/03/2022	143,34	22,44	8,42	18,05	7,94	75,89	16,37
22/03/2022	142,50	22,38	8,41	17,96	7,93	75,69	16,27
29/03/2022	143,46	22,44	8,43	18,05	7,95	75,87	16,38

Continuação próxima pg.

Tabela 8 - Parâmetros do módulo 1: SV145D12 10175668 – continuação

Data /hora	Pm (Wp)	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	FF	$\eta$
29/03/2022	142,91	22,47	8,42	18,01	7,93	75,57	16,32
29/03/2022	142,78	22,47	8,42	17,98	7,94	75,42	16,30
31/03/2022	142,11	22,41	8,43	17,90	7,94	75,21	16,22
31/03/2022	141,02	22,44	8,43	17,79	7,93	74,52	16,10
04/04/2022	140,55	22,38	8,42	17,74	7,92	74,59	16,05
04/04/2022	139,23	22,39	8,42	17,63	7,90	73,90	15,90
04/04/2022	142,42	22,43	8,42	17,94	7,94	75,38	16,26
07/04/2022	144,03	22,56	8,43	18,12	7,95	75,78	16,44
07/04/2022	142,95	22,49	8,41	18,02	7,93	75,56	16,32
05/05/2022	144,07	22,48	8,42	18,11	7,96	76,08	16,45
05/05/2022	143,78	22,46	8,42	18,08	7,95	76,00	16,42
11/05/2022	143,77	22,46	8,43	18,07	7,96	75,94	16,41
19/05/2022	144,40	22,53	8,41	18,17	7,95	76,23	16,49
20/05/2022	144,18	22,48	8,42	18,13	7,95	76,18	16,46
25/05/2022	143,82	22,46	8,42	18,09	7,95	76,10	16,42
25/05/2022	144,51	22,57	8,40	18,20	7,94	76,19	16,50
22/06/2022	144,28	22,54	8,40	18,17	7,94	76,17	16,47
05/07/2022	145,13	22,61	8,41	18,25	7,95	76,35	16,57
14/07/2022	143,31	22,41	8,42	18,04	7,95	75,99	16,36
22/07/2022	142,62	22,36	8,41	17,96	7,94	75,81	16,28
12/08/2023	144,09	22,50	8,42	18,12	7,95	76,02	16,45
12/08/2022	143,09	22,42	8,41	18,03	7,94	75,87	16,34
02/09/2022	144,67	22,55	8,42	18,17	7,96	76,16	16,52
06/09/2022	143,97	22,46	8,42	18,09	7,96	76,09	16,44
06/09/2022	143,15	22,40	8,41	18,03	7,94	75,95	16,34
06/09/2022	142,75	22,28	8,42	17,96	7,95	76,13	16,30
19/09/2022	143,97	22,45	8,43	18,09	7,96	76,12	16,44
19/09/2022	142,67	22,38	8,42	17,93	7,94	75,74	16,29
23/09/2022	143,70	22,45	8,42	18,08	7,95	76,01	16,41
23/09/2022	143,13	22,42	8,41	18,03	7,94	75,88	16,34
14/10/2022	143,37	22,48	8,41	18,07	7,94	75,82	16,37
14/10/2022	143,60	22,47	8,42	18,08	7,94	75,96	16,39
14/10/2022	143,72	22,47	8,42	18,08	7,95	75,97	16,41
18/10/2022	143,57	22,45	8,43	18,07	7,95	75,88	16,39
18/10/2022	143,92	22,44	8,43	18,08	7,96	76,08	16,43
18/10/2022	143,78	22,45	8,43	18,06	7,96	75,98	16,42
26/10/2022	143,33	22,45	8,42	18,04	7,94	75,82	16,36
26/10/2022	143,88	22,52	8,43	18,10	7,95	75,84	16,43
26/10/2022	143,93	22,53	8,42	18,11	7,95	75,87	16,43
14/12/2022	143,81	22,50	8,42	18,10	7,95	75,92	16,42

Continuação próxima pg.

Tabela 8 - Parâmetros do módulo 1: SV145D12 10175668 – continuação

Data /hora	Pm (Wp)	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	FF	$\eta$
14/12/2022	143,99	22,50	8,43	18,08	7,96	75,91	16,44
21/12/2022	143,27	22,42	8,43	18,01	7,95	75,80	16,36
21/12/2022	143,46	22,46	8,42	18,06	7,94	75,82	16,38
26/01/2023	143,25	22,40	8,43	18,00	7,96	75,82	16,35
16/02/2023	142,94	22,42	8,44	17,97	7,96	75,58	16,32
16/02/2023	143,60	22,47	8,43	18,04	7,96	75,78	16,39
01/03/2023	143,31	22,43	8,44	18,00	7,96	75,70	16,36
29/03/2023	143,11	22,43	8,43	18,00	7,95	75,68	16,34
29/03/2023	142,80	22,43	8,43	17,97	7,95	75,51	16,30
29/03/2023	142,78	22,47	8,42	17,98	7,94	75,42	16,30
29/03/2023	142,87	22,44	8,44	17,96	7,95	75,47	16,31
31/03/2023	142,11	22,41	8,43	17,90	7,94	75,21	16,22
31/03/2023	141,02	22,42	8,43	17,79	7,93	74,52	16,10
19/04/2023	142,97	22,42	8,44	17,97	7,96	75,56	16,32
19/04/2023	Não foi possível traçar a curva I-V						
07/07/2023	140,71	22,38	8,34	17,94	7,85	75,39	16,07

Fonte: Autor.

Tabela 9 - Parâmetros do módulo 1: SV145D12 10175668. Sol real

Data	Ppk (Wp)	Ppk máx. (Wp)	Ppk min (Wp)	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)
07/07/2023	138,2	145,2	131,3	22,2	8,48	17,70	7,83

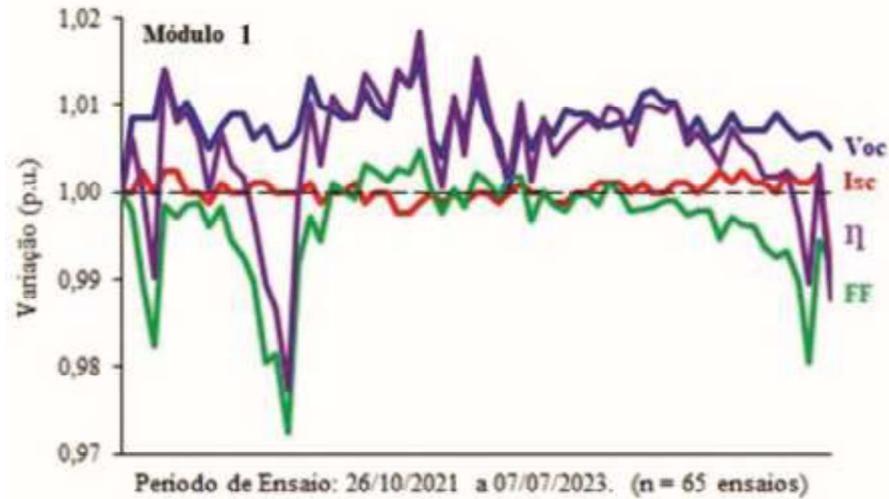
Fonte: Autor.

Figura 31 - Evolução dos parâmetros do módulo 1: (Pm, Vmp, Imp).



Fonte: Autor.

Figura 32 - Evolução dos parâmetros do módulo 1 (Voc, Isc,  $\eta$ , FF).



Fonte: Autor.

Após 69 sequências de 100 impulsos de tensão de 200 V e 1 sequência de 1000 impulsos de tensão de 1000 V, constatou-se que os parâmetros medidos dos módulos não se alteraram além da margem de tolerância adotada. Uma nova sequência de 100 impulsos de tensão de 1400 V foi realizada, o que provocou o curto-circuito dos 2 diodos de by-pass desse módulo, impossibilitando a obtenção da sua curva I-V. Após a retirada dos 2 diodos, uma nova curva I-V foi obtida e os ensaios prosseguiram. Os resultados obtidos indicam que os parâmetros medidos dos módulos não se alteraram além da margem de tolerância após nenhuma das sequências de impulsos, e nem ao final dos ensaios. Os desvios padrões de Pm, FF e  $\eta$  foram, respectivamente, 1,04, 0,45 e 0,12, indicando que os valores obtidos apresentaram baixa dispersão, ou seja eles variaram pouco de seu valor inicial.

As tabelas 10 e 11 apresentam os valores dos parâmetros do **módulo 2**, obtidos através da sua curva I-V, nos ensaios de impulsos de tensão. As figuras 33 e 34 apresentam a evolução destes parâmetros ao longo das medições.

Tabela 10 - Parâmetros do módulo 2: UP-M155P UP021525171023791184

Data	Pm (Wp)	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	FF	$\eta$
26/10/2021	151,14	22,74	8,67	18,52	8,16	76,67	17,26
02/02/2022	150,99	22,72	8,69	18,48	8,17	76,49	17,24
10/02/2022	150,57	22,72	8,67	18,46	8,16	76,39	17,19
15/03/2022	150,82	22,73	8,68	18,47	8,16	76,43	17,22
15/03/2022	150,38	22,70	8,68	18,42	8,16	76,32	17,17
22/03/2022	150,56	22,73	8,67	18,47	8,15	76,39	17,19
22/03/2022	150,52	22,71	8,68	18,45	8,16	76,39	17,18
29/03/2022	150,70	22,75	8,67	18,47	8,16	76,40	17,20
29/03/2022	147,97	22,55	8,67	18,19	8,14	75,73	16,89
31/03/2022	150,41	22,74	8,67	18,45	8,15	76,34	17,17
31/03/2022	150,65	22,74	8,68	18,46	8,16	76,36	17,20
04/04/2022	150,28	22,71	8,67	18,42	8,16	76,29	17,16
04/04/2022	149,58	22,64	8,68	18,35	8,15	76,17	17,08
04/04/2022	149,65	22,65	8,67	18,35	8,15	76,20	17,09
07/04/2022	151,21	22,84	8,66	18,56	8,15	76,43	17,26
07/04/2022	150,38	22,76	8,67	18,45	8,15	76,25	17,17
14/04/2022	150,79	22,75	8,61	18,47	8,17	76,36	17,22
05/05/2022	151,08	22,77	8,68	18,50	8,17	76,39	17,25
05/05/2022	151,02	22,75	8,69	18,49	8,17	76,40	17,24
11/05/2022	151,22	22,80	8,69	18,51	8,17	76,39	17,26
19/05/2022	151,48	22,78	8,68	18,54	8,17	76,61	17,29
19/05/2022	151,15	22,76	8,68	18,51	8,16	76,54	17,26
20/05/2022	151,48	22,78	8,68	18,54	8,17	76,61	17,29
25/05/2022	151,78	22,83	8,68	18,59	8,17	76,63	17,33
25/05/2022	152,27	22,91	8,67	18,66	8,16	76,68	17,38
22/06/2022	151,74	22,83	8,68	18,58	8,17	76,60	17,32
05/07/2022	Não foi possível obter a curva I-V						
04/05/2023	149,44	22,72	8,64	18,40	8,12	76,08	17,06
04/05/2023	149,40	22,69	8,66	18,36	8,14	76,03	17,06
04/05/2023	149,46	22,72	8,66	18,37	8,14	76,00	17,06
11/05/2023	150,26	22,75	8,66	18,44	8,15	76,21	17,15
11/05/2023	149,49	22,71	8,66	18,37	8,14	76,01	17,07
18/05/2023	149,73	22,73	8,65	18,40	8,14	76,12	17,10
18/05/2023	150,26	22,75	8,66	18,44	8,15	76,24	17,16
22/06/2023	148,59	22,69	8,59	18,39	8,08	76,22	16,96
22/06/2023	149,57	22,77	8,59	18,50	8,09	76,45	17,08
27/06/2023	149,31	22,70	8,62	18,42	8,11	76,35	17,05
07/07/2023	149,32	22,72	8,61	18,43	8,10	76,31	17,05

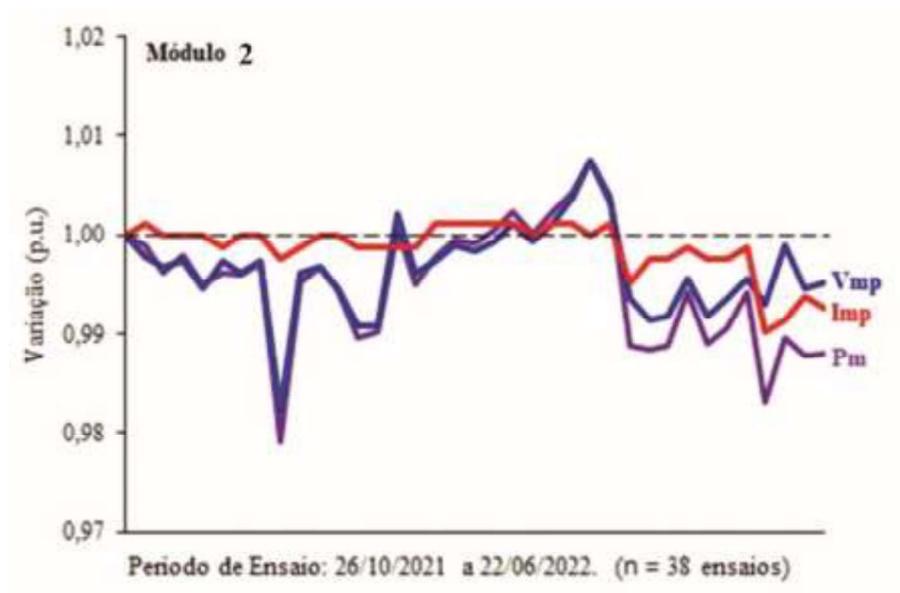
Fonte: Autor.

Tabela 11 - Parâmetros do módulo 2: UP-M155P UP021525171023791184 Sol Real

Data	Ppk (Wp)	Ppk máx. (Wp)	Ppk min (Wp)	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)
05/04/2023	150,1	157,6	142,6	22,6	8,84	18,40	8,16

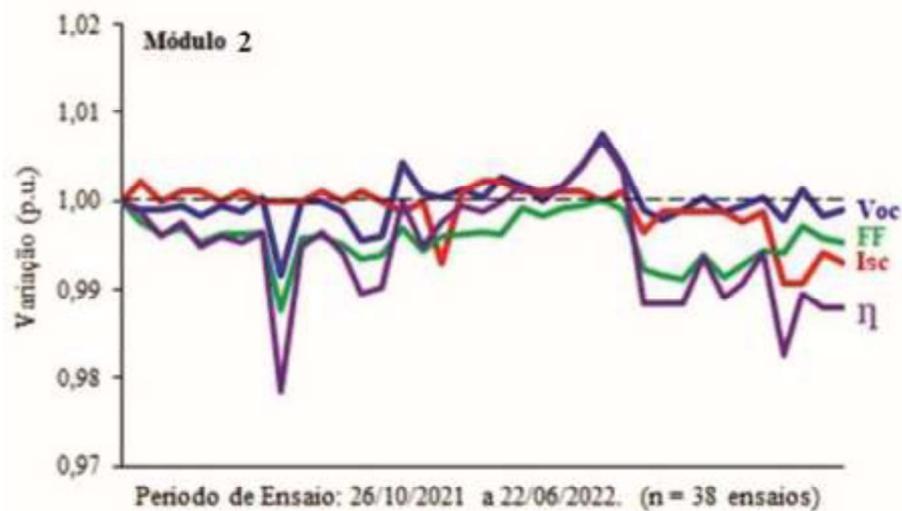
Fonte: Autor.

Figura 33 - Evolução dos parâmetros do módulo 2 (Vmp, Imp, Pm).



Fonte: Autor.

Figura 34 - Evolução dos parâmetros do módulo 2 (Voc, FF, Isc,  $\eta$ ).



Fonte: Autor.

Foram aplicadas trinta e cinco sequências de impulsos de tensão no módulo. A partir do valor inicial de 200 V, foram realizadas mais 5 séries com valor incremental de 20 V, seguidas por 14 séries com valor incremental de 50 V para cada nova aplicação, até o valor de 1000 V. A seguir foram realizadas 5 séries com valor incremental de 100 V, seguidas de um aumento de 250 V, finalizando com mais 10 séries com aumento de 100 V entre elas. Desde a primeira aplicação nenhuma alteração foi observada nos parâmetros elétricos do módulo, obtidos a partir da sua curva I-V. Após a aplicação de impulsos de tensão com o valor de 1750 V, não foi possível obter a sua curva I-V devido à ocorrência de curto-circuito em seus dois diodos de bypass. Após a remoção dos diodos, foram obtidos novos parâmetros do módulo através da aquisição da sua curva I-V em sol real. Novas sequências foram aplicadas até o nível de 2750 V sem que fosse observada nenhuma alteração dos valores dos principais parâmetros elétricos acima da margem de tolerância. Os desvios padrões de  $P_m$ , FF e  $\eta$  foram respectivamente 0,92, 0,20 e 0,30, indicando que os valores obtidos apresentaram baixa dispersão, ou seja eles variaram pouco de seu valor inicial.

Neste módulo, quando da impossibilidade de obtenção da curva I-V para o nível de 1750 V, foi realizado um novo ensaio de isolamento que não apontou falha na isolamento do módulo.

A tabela 12 apresenta os valores dos parâmetros obtidos no **módulo 3**, sem diodo de bypass, através da curva I-V nos ensaios de impulso de tensão. As figuras 35 e 36 apresentam a evolução destes parâmetros ao longo das medições.

Tabela 12 - Parâmetros do módulo 3: HG-140P-140HG-A1403210001

Data	Pm (Wp)	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	FF	$\eta$
26/10/2021	147,94	22,65	8,65	18,18	8,14	75,55	16,89
05/07/2022	147,78	22,67	8,64	18,18	8,13	75,44	16,87
14/07/2022	147,48	22,67	8,64	18,18	8,13	75,49	16,87
22/07/2022	145,71	22,51	8,60	18,00	8,09	75,24	16,63
12/08/2022	147,52	22,67	8,60	18,18	8,11	75,53	16,84
12/08/2022	147,02	22,65	8,61	18,15	8,10	75,41	16,78
02/09/2022	147,70	22,69	8,62	18,19	8,12	75,48	16,86
06/09/2022	147,51	22,66	8,62	18,16	8,12	75,48	16,84
06/09/2022	147,09	22,63	8,62	18,14	8,11	75,43	16,79
06/09/2022	148,02	22,69	8,62	18,22	8,12	75,68	16,90
19/09/2022	147,65	22,68	8,63	18,18	8,12	75,46	16,85
19/09/2022	148,14	22,75	8,61	18,26	8,11	75,61	16,91
23/09/2022	147,03	22,64	8,61	18,14	8,11	75,39	16,78
23/09/2022	147,71	22,70	8,62	18,21	8,11	75,52	16,86
14/10/2022	147,33	22,70	8,62	18,17	8,11	75,38	16,82
14/10/2022	147,49	22,68	8,62	18,18	8,11	75,44	16,83
14/10/2022	147,61	22,70	8,62	18,20	8,11	75,45	16,85
18/10/2022	147,43	22,65	8,63	18,15	8,12	75,46	16,83
18/10/2022	148,14	22,73	8,62	18,25	8,12	75,62	16,91
18/10/2022	147,40	22,66	8,63	18,15	8,12	75,40	16,82
26/10/2022	146,94	22,63	8,62	18,12	8,11	75,33	16,77
26/10/2022	146,61	22,65	8,61	18,11	8,10	75,16	16,73
26/10/2022	146,66	22,62	8,62	18,09	8,11	75,23	16,74
01/12/2022	146,89	22,63	8,63	18,11	8,11	75,28	16,77
14/12/2022	147,34	22,67	8,62	18,16	8,11	75,40	16,82
14/12/2022	147,75	22,70	8,62	18,20	8,12	75,46	16,86
21/12/2022	147,32	22,64	8,63	18,14	8,12	75,40	16,82
21/12/2022	147,18	22,65	8,63	18,14	8,11	75,33	16,80
26/01/2023	147,18	22,63	8,62	18,13	8,12	75,43	16,80
16/02/2023	147,35	22,64	8,63	18,13	8,13	75,39	16,82
16/02/2023	147,48	22,66	8,64	18,15	8,13	75,36	16,83
01/03/2023	147,21	22,61	8,64	18,10	8,13	75,32	16,80
29/03/2023	146,89	22,64	8,64	18,08	8,12	75,12	16,77
29/03/2023	145,89	22,58	8,63	17,99	8,11	74,86	16,65
29/03/2023	147,02	22,67	8,63	18,11	8,12	75,15	16,78
29/03/2023	147,00	22,62	8,64	18,09	8,12	75,22	16,78
19/04/2023	146,78	22,63	8,64	18,06	8,13	75,06	16,75
19/04/2023	147,04	22,64	8,63	18,10	8,13	75,23	16,78

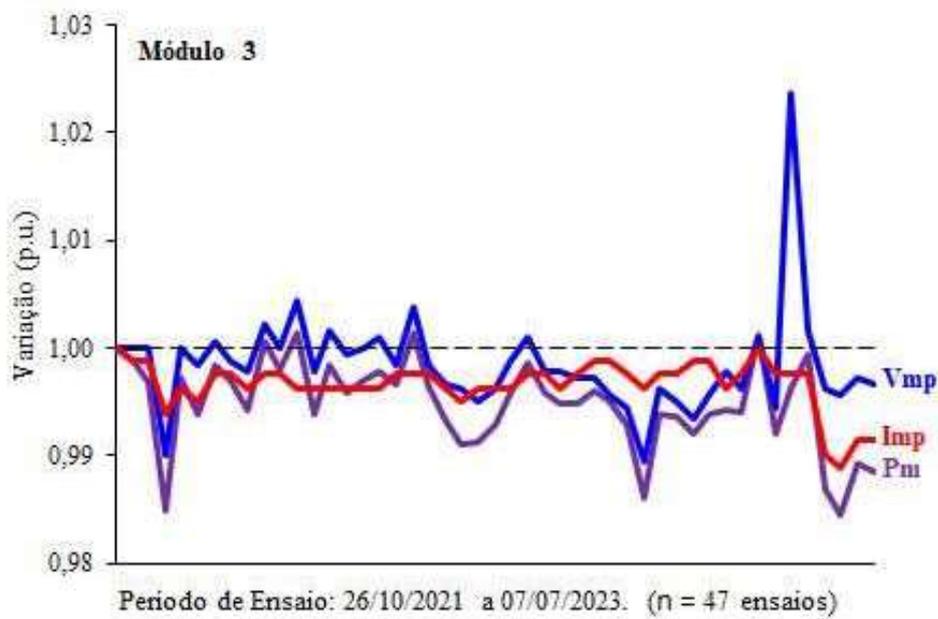
Continua na próxima pg

Tabela 12 - Parâmetros do módulo 3: HG-140P-140HG-A1403210001 continuação.

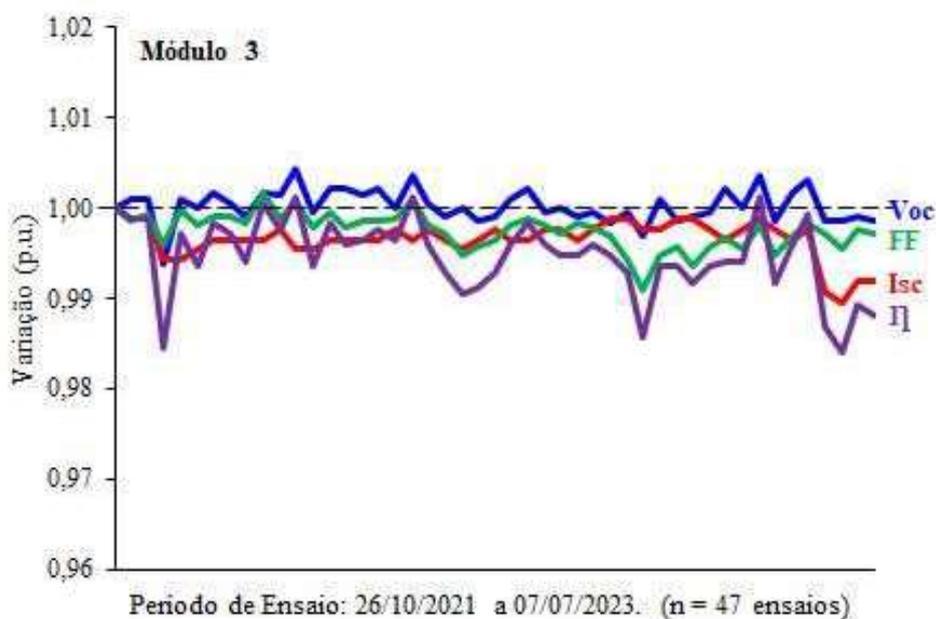
Data	Pm (Wp)	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	FF	$\eta$
04/05/2023	147,08	22,70	8,62	18,14	8,11	75,30	16,79
04/05/2023	147,06	22,65	8,63	18,11	8,12	75,20	16,79
11/05/2023	148,13	22,73	8,64	18,20	8,14	75,41	16,91
11/05/2023	146,78	22,62	8,63	18,08	8,12	75,15	16,75
18/05/2023	147,38	22,69	8,62	18,61	8,12	75,31	16,82
18/05/2023	147,86	22,72	8,63	18,21	8,12	75,43	16,88
22/06/2023	146,01	22,62	8,57	18,11	8,06	75,34	16,67
22/06/2023	145,64	22,62	8,56	18,10	8,05	75,21	16,62
27/06/2023	146,36	22,63	8,58	18,13	8,07	75,37	16,71
07/07/2023	146,24	22,62	8,58	18,12	8,07	75,34	16,69

Fonte: Autor.

Figura 35 - Evolução dos parâmetros do módulo 3 (Vmp, Imp, Pm).



Fonte: Autor.

Figura 36 - Evolução dos parâmetros do módulo 3 (Voc, FF, Isc,  $\eta$ ).

Fonte: Autor.

As seqüências de impulsos de tensão aplicadas no módulo iniciaram no nível de 200 V. Os níveis de tensão foram elevados com passo de 50 V, até alcançar 2300 V. A partir desse nível o passo foi aumentado para 100 V, até atingir o nível de 3500 V, sendo esta a magnitude de tensão mais elevada aplicada a um módulo. Após cada uma dessas seqüências, nenhum dos parâmetros variou além da margem de tolerância das medições. Os desvios padrões de  $P_m$ , FF e  $\eta$  foram, respectivamente, 0,60, 0,15 e 0,07, indicando que os valores obtidos apresentaram pouca dispersão, o que novamente demonstra uma estabilidade desses parâmetros ao longo dos ensaios. O valor final da magnitude do impulso de tensão de 3500 V foi o mais alto alcançado, sendo que o valor final de FF foi de 75,34, muito próximo aos outros valores obtidos anteriormente, correspondendo a 99,72% do seu valor inicial.

As tabelas 13 e 14 apresentam os resultados dos parâmetros do **módulo 4**, obtidos através da curva I-V. As figuras 37 e 38 apresentam a evolução destes parâmetros ao longo das medições.

Tabela 13 - Parâmetros do módulo 4: YL-145-17b Yngli 133929080100001

Data	Pm (Wp)	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	FF	$\eta$
26/10/2021	143,80	22,45	8,62	17,73	8,11	74,30	16,41
04/05/2023	142,69	22,48	8,58	17,70	8,06	73,95	16,29
04/05/2023	143,70	22,50	8,63	17,73	8,10	74,03	16,40
11/05/2023	Não foi possível traçar a curva I-V						
07/07/2023	141,45	22,43	8,54	17,66	8,01	73,83	16,15

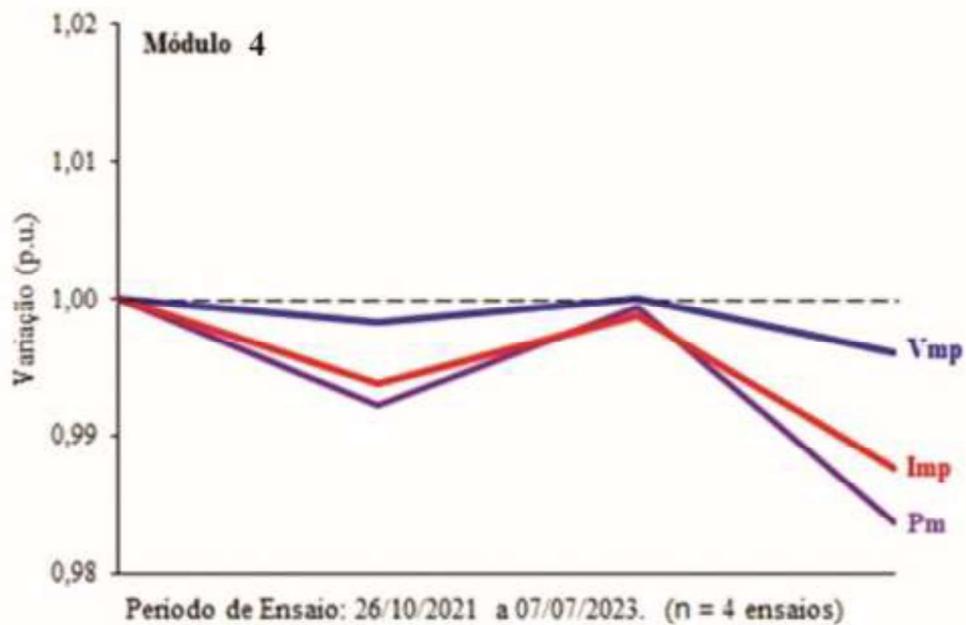
Fonte: Autor.

Tabela 14 - Parâmetros do módulo 4: YL-145-17b Yngli 133929080100001 Sol Real

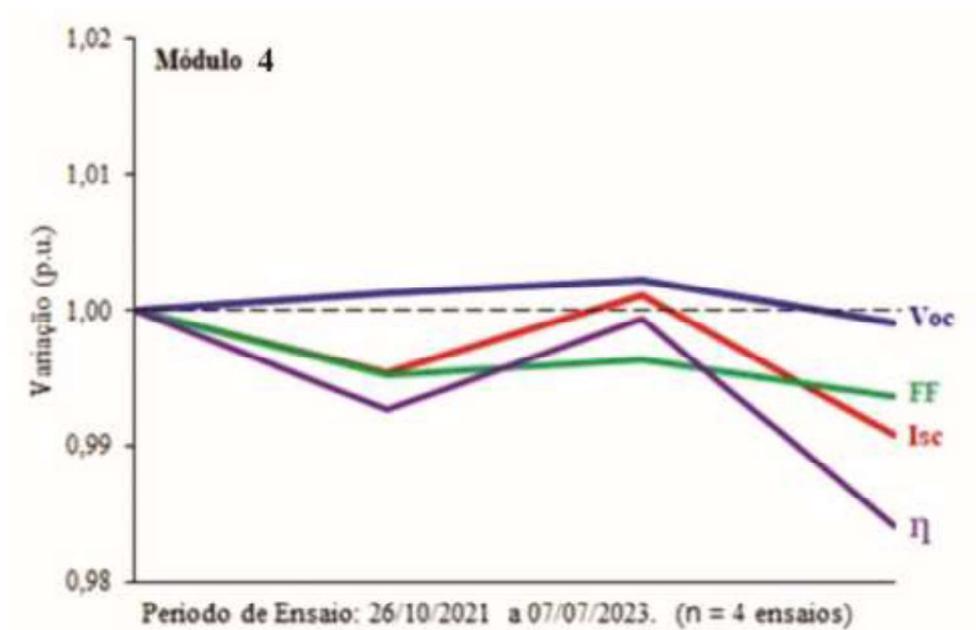
Data	Ppk (Wp)	Ppk máx. (Wp)	Ppk min (Wp)	Voc (V)	Isc (A)	Vmp(V)	Imp(A)
07/07/2023	135,4	142,2	128,7	21,8	8,68	16,9	8,03

Fonte: Autor.

Figura 37 - Evolução dos parâmetros do módulo 4 (Vmp, Imp, Pm).



Fonte: Autor.

Figura 38 - Evolução dos parâmetros do módulo 4 (FF, Voc, Isc,  $\eta$ ).

Fonte: Autor.

Analisando as tabelas 13 e 14 e as figuras 37 e 38, observa-se que após duas sequências de 100 impulsos de 1200 V e 1300 V não houve alterações significativas nos valores dos parâmetros elétricos do módulo. Entretanto, após a terceira sequência, de 1400 V, os diodos de by-pass foram curto-circuitados, não sendo possível gerar uma nova curva I-V. Constatado esse fato, os diodos de by-pass foram removidos, sendo obtidos novos parâmetros elétricos do módulo através da obtenção da sua curva I-V sob sol real. Em seguida foram realizados novos ensaios e após uma sequência de impulsos de tensão de 1500 V os parâmetros elétricos do módulo não foram alterados além da margem de tolerância das medições. Os desvios padrões dos parâmetros Pm, FF e  $\eta$  foram respectivamente 0,95, 0,17 e 0,1, ou seja, desvios padrões nas casas decimais das medições, indicando que os valores obtidos apresentaram baixa dispersão, ou seja eles variaram pouco de seu valor inicial.

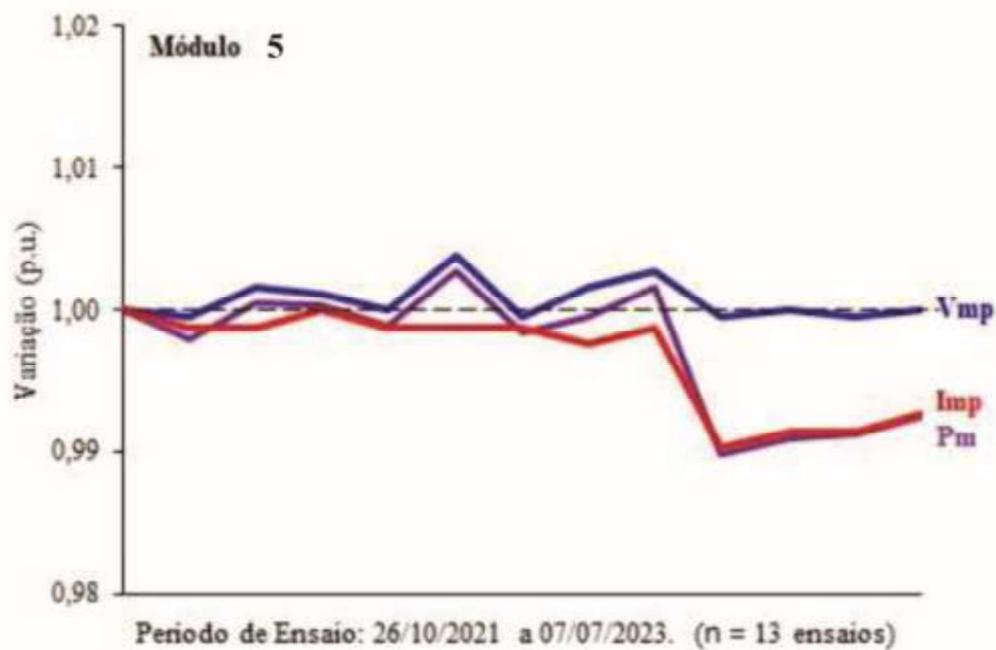
A tabela 15 apresenta os resultados dos parâmetros do **módulo 5**, obtidos através da curva I-V, nos ensaios de impulsos de tensão. As figuras 38 e 39 apresentam a evolução destes parâmetros ao longo das medições.

Tabela 15 - Parâmetros do módulo 5: H-140P-140HG-A1403210003

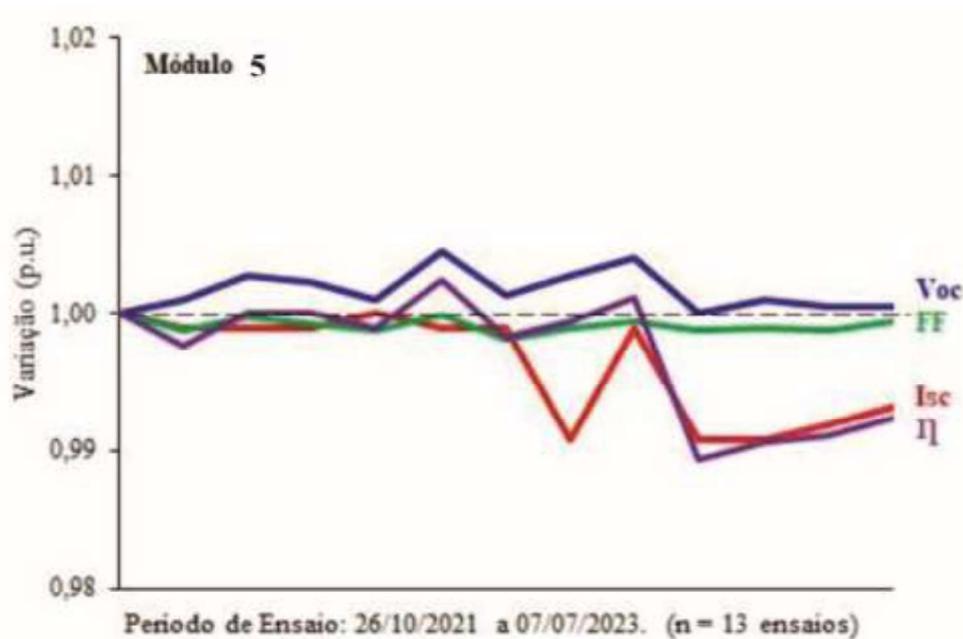
Data	Pm (Wp)	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	FF	$\eta$
26/10/2021	148,47	22,63	8,7	18,15	8,18	75,41	16,95
19/04/2023	148,17	22,65	8,69	18,14	8,17	75,31	16,91
04/05/2023	148,54	22,69	8,69	18,18	8,17	75,38	16,95
04/05/2023	148,51	22,68	8,69	18,17	8,18	75,35	16,95
04/05/2023	148,30	22,65	8,70	18,15	8,17	75,31	016,93
11/05/2023	148,88	22,73	8,69	18,22	8,17	75,40	16,99
11/05/2023	148,24	22,66	8,69	18,14	8,17	75,27	16,92
18/05/2023	148,40	22,69	8,62	18,18	8,16	75,33	16,94
18/05/2023	148,71	22,72	8,69	18,20	8,17	75,36	16,97
22/06/2023	146,95	22,63	8,62	18,14	8,10	75,31	16,77
22/06/2023	147,12	22,65	8,62	18,15	8,11	75,32	16,79
27/06/2023	147,18	22,64	8,63	18,14	8,11	75,31	16,80
07/07/2023	147,37	22,64	8,64	18,15	8,12	75,36	16,82

Fonte: Autor.

Figura 39 - Evolução dos parâmetros do módulo 5 (Vmp, Imp, Pm).



Fonte: Autor.

Figura 40 - Evolução dos parâmetros do módulo 5 (Voc, FF, Isc,  $\eta$ ).

Fonte: Autor.

Analisando a tabela 15 e as figuras 39 e 40, observa-se que ao final da aplicação de 1100 impulsos no total, com magnitudes superiores a 1000 V, nenhum dos valores dos parâmetros elétricos do módulo variou além da margem de tolerância das medições. Os desvios padrões de Pm, FF e  $\eta$  foram, respectivamente, 0,64, 0,04 e 0,07, desvios padrões nas casas decimais das medições, indicando que os valores obtidos apresentaram baixa dispersão, ou seja eles variaram pouco de seu valor inicial.

Como esse módulo foi ensaiado sem diodos de by-pass instalados, pode ser observado que a inexistência de diodos de by-pass não tornou as células dos módulo mais vulneráveis às sobretensões transitórias de modo diferencial, embora como os diodos são componentes indispensáveis para os módulos, esses como um todo são vulneráveis de fato às sobretensões transitórias de modo diferencial.

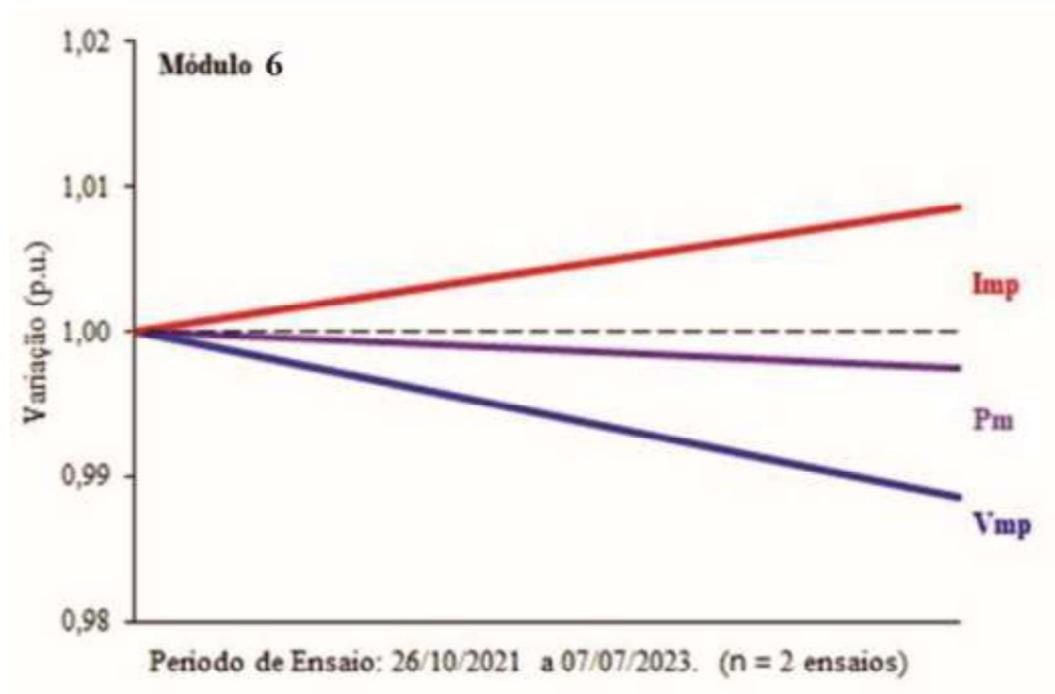
A tabela 16 apresenta os resultados dos parâmetros, obtidos através da curva I-V, no módulo 6, que não recebeu impulsos de tensão. As figuras 41 e 42 apresentam as medições destes parâmetros no início e ao final do conjunto de ensaios nos outros 5 módulos, sendo os valores obtidos analisados a seguir.

Tabela 16 - Parâmetros do módulo 6: JKM 140P-36 4541104180000405400

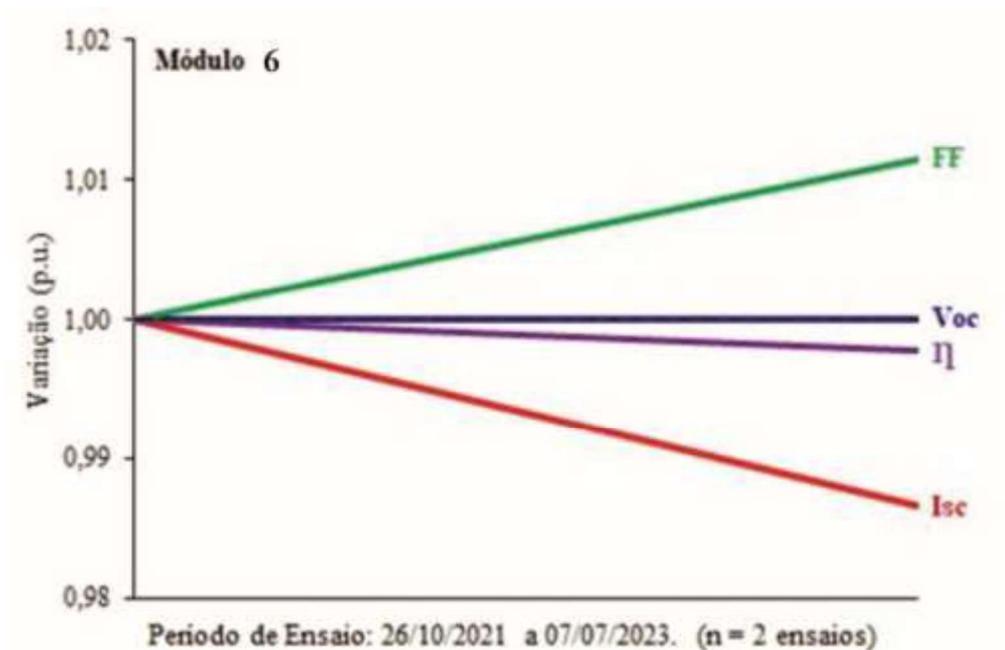
Data	Pm (Wp)	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	FF	$\eta$
26/10/2021 (12:08)	121,99	22,32	8,26	17,39	7,02	66,14	13,92
07/07/2023 (15:44)	121,68	22,32	8,15	17,19	7,08	66,90	13,89

Fonte: Autor.

Figura 41 - Evolução dos parâmetros do módulo 6 (Imp, Pm, Vmp).



Fonte: Autor.

Figura 42 - Evolução dos parâmetros do módulo 6 (FF, Voc,  $\eta$ , Isc).

Fonte: Autor.

Analisando a tabela 16 e as figuras 41 e 42, relativas ao **módulo 6**, no qual não foram aplicados impulsos de tensão, observa-se que os valores iniciais e finais de seus parâmetros servem como referência para comparação com os outros módulos, já que as variações registradas entre a primeira e a última medição foram praticamente as mesmas.

Quando analisados em conjunto os resultados de todos os módulos, após a aplicação de diversas séries de impulsos de tensão, é possível concluir que as sobretensões de modo diferencial não alteraram os parâmetros elétricos dos módulos fotovoltaicos dentro da margem de tolerância das medições.

Entre os parâmetros elétricos dos módulos fotovoltaicos que foram avaliados, a potência máxima fornecida ( $P_m$ ) foi aquele que mais variou, por ser o parâmetro mais influenciado pelas condições em que se realizou cada medição. Já as variações de Voc, Isc,  $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ , FF e  $\eta$  se mantiveram mais baixas. Embora cumulativamente essas variações possam representar, ao longo de anos, uma perda de eficiência nos módulos, ela não seria significativa, porque nota-se pelos resultados obtidos a inexistência de variações progressivas, cumulativas.

Os resultados mais significativos dessa ausência de alterações nos parâmetros dos módulos são os obtidos para o valor de FF, já que o fator de forma é influenciado pelos valores

de  $R_s$  e  $R_{sh}$ , o que indica que em nenhum dos módulos ensaiados ocorreram alterações significativas nas características destas duas resistências equivalentes, que estão representadas no modelo elétrico apresentado na figura 4.

Os resultados obtidos estão de acordo com aqueles apresentados por Naxakis *et al.* (2017), que indicaram que os módulos ensaiados ainda poderiam operar, sem alteração nos valores de  $V_{oc}$  e  $I_{sc}$ , porém com alterações no ponto de máxima potência, em função da alteração do fator de forma. Este trabalho concluiu que as características elétricas básicas dos módulos FV não foram comprometidas, embora o desempenho possa ter sido reduzido. O trabalho em questão não foi conclusivo pelo fato de os módulos ensaiados encontrarem-se instalados e, portanto, submetidos às condições ambientais, que inseriram incertezas às medições. Por outro lado, os resultados obtidos no presente trabalho se devem exclusivamente aos efeitos dos impulsos de tensão aplicados, sem a influência de fatores ambientais.

Em relação às conclusões de Jiang (2014), pode-se atribuir as maiores variações dos parâmetros lá encontradas ao valor da tensão aplicada e ao número de impulsos em cada sequência. Foram aplicados impulsos de tensão variando entre 2,5 e 167 vezes o valor de  $V_{mp}$  do módulo ensaiado (6 V), com sequências variando de 500 até 3000 impulsos. Desta forma, as condições expostas foram mais severas do que aquelas utilizadas neste trabalho, o que explica as maiores variações dos parâmetros encontradas no trabalho de Jiang (2014), possivelmente em condições mais distantes da realidade do que aquelas utilizadas no presente estudo.

#### 5.1.1 Falhas apresentadas em diodos de by-pass

Embora tenham sido realizados ensaios em módulos fotovoltaicos em que foram retirados os diodos de by-pass, do ponto de vista prático, esta situação não seria razoável, já que esses diodos são parte integrante dos módulos fotovoltaicos, devendo ser substituídos sempre que eles forem danificados. Neste caso, o objetivo da retirada do diodo foi verificar os efeitos das sobretensões induzidas nos semicondutores, células, e não nos módulos em si.

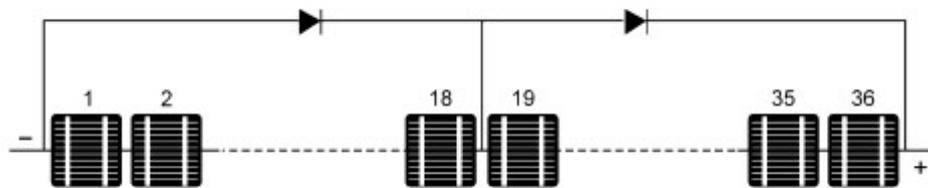
A função dos diodos de by-pass é reduzir os efeitos do sombreamento nos módulos fotovoltaicos, curto-circuitando células sombreadas, evitando que elas formem pontos quentes (*hotspots*) e se danifiquem. Quando um diodo de by-pass falha em situação de curto-circuito permanente, a célula que ele protege deixa de gerar energia, porque a corrente elétrica passa a

circular através do diodo de by-pass curto-circuitado (COETZER; WIID; RIX, 2019). A presença dos diodos de by-pass também irá influenciar a não-linearidade da impedância dos módulos fotovoltaicos em relação aos impulsos de tensão e corrente.

Os módulos utilizados nessa pesquisa possuíam dois diodos de by-pass, cada um protegendo 18 células, conforme mostra a figura 43. Foi observado nos ensaios que os diodos de by-pass instalados nos módulos entraram em curto-circuito após a aplicação de impulsos com os valores apresentados na tabela 17. Isto aconteceu nos três módulos que possuíam diodos de by-pass, sendo que nesses casos os dois diodos entraram em curto-circuito. Provavelmente os diodos se danificaram quando foram polarizados reversamente, mas devido à aplicação de impulsos de tensão nas duas polaridades, não é possível confirmar tal fato.

Este trabalho indicou que os diodos de by-pass apresentam alta vulnerabilidade às sobretensões induzidas, devendo ser tomadas medidas de proteção apropriadas, para que eles não sejam danificados, deixando os módulos desprotegidos contra os efeitos do sombreamento.

Figura 43 - Diodos de by-pass.



Fonte: Autor.

Tabela 17 - Magnitude da sobretensão que causou falha no módulo.

Módulo	Tensão (V)
1	1400
2	1750
4	1500

Fonte: Autor.

Observou-se a redução dos valores dos parâmetros Pm e FF após o curto-circuito dos diodos, ainda que tais reduções tenham ficado dentro da margem de tolerância das medições.

Como os parâmetros dos módulos que não possuíam diodos de by-pass não apresentaram alterações em seus valores e os módulos suportaram impulsos de tensão com amplitudes mais elevadas, pode-se concluir que a presença desses diodos deve ser levada em consideração na avaliação da vulnerabilidade dos SFV às sobretensões transitórias. Esta conclusão confirma observações de outros estudos (HABERLIN, 2021; KÖNTGES, 2014; WIID; RIX, 2019), que também apontaram que os diodos de by-pass são mais vulneráveis às sobretensões transitórias do que as células fotovoltaicas.

## 5.2 ENSAIOS DE IMPULSO DE CORRENTE

Como mencionado no Capítulo 4, os ensaios de impulso de corrente objetivaram uma investigação inicial sobre as características das tensões induzidas nos terminais dos módulos fotovoltaicos por descargas atmosféricas indiretas. Trata-se de uma investigação preliminar, uma vez que os testes em laboratório não reproduzem as condições reais, em que o campo eletromagnético produzido pela corrente que se propaga ao longo do canal da descarga, com comprimento da ordem de alguns quilômetros, induz tensões e correntes nos terminais do módulo. Esse campo varia de acordo com as características da corrente, os parâmetros elétricos do solo, a distância entre o local de incidência da descarga e o módulo e a impedância de entrada do módulo. Apesar das limitações dos experimentos, que poderão ser aprimorados em estudos subsequentes, entende-se que este primeiro passo pode representar uma pequena contribuição quanto ao conhecimento das características básicas das tensões induzidas nos terminais de módulos fotovoltaicos por correntes impulsivas.

Como os testes iniciais, realizados com os inversores conectados aos módulos, apresentaram valores muito baixos de tensão induzida nos terminais dos módulos, foram realizados novos ensaios, sem a presença dos inversores.

Os parâmetros da corrente aplicada e a grandeza medida nos ensaios estão apresentados na tabela 18, sendo resumidamente os seguintes:

- 1) distância entre o módulo e o eletrodo de corrente (figura 26): 0,5 m e 1,0 m;

- 2) forma de onda do impulso de corrente aplicado: 9/20  $\mu$ s e 16/34  $\mu$ s;
- 3) intensidade da corrente aplicada: 7,9 kA, 11,8 kA, 16 kA e 20 kA;
- 4) polaridades: positiva e negativa.

Tabela 18 - Parâmetros dos ensaios efetuados.

Medição	Valor de pico (kA)	Forma de onda	Distância (m)	Polaridade	Medição
TEK 01	20	9/20	1,0	+	tensão
TEK 02	20	9/20	1,0	-	tensão
TEK 03	7,8	9/20	1,0	+	tensão
TEK 04	7,8	9/20	1,0	-	tensão
TEK 05	16	9/20	1,0	+	tensão
TEK 08	16	9/20	1,0	-	corrente
TEK 09	7,9	9/20	1,0	+	tensão
TEK 14	11,8	9/20	0,5	+	corrente
TEK 15	16	16/34	0,5	+	tensão
TEK 16	16	16/34	0,5	+	corrente
TEK 18	16	16/34	0,5	-	corrente
TEK 32	16	16/34	1,0	-	corrente
TEK 33	16	16/34	1,0	+	tensão
TEK 34	16	16/34	1,0	+	corrente

Fonte: Autor.

As ondas obtidas nesses ensaios, com os respectivos valores das tensões e correntes induzidas nos módulos, são apresentadas nas figuras 44 a 57. Como citado no final do Capítulo 4, os resultados obtidos nas medições registraram alto nível de ruído, de modo que nas figuras são apresentadas tanto as ondas originais (em cor mais clara) como aquelas filtradas após a aplicação de um filtro de média móvel (em cor mais escura). As discussões realizadas se referem às ondas filtradas e a análise é essencialmente qualitativa.

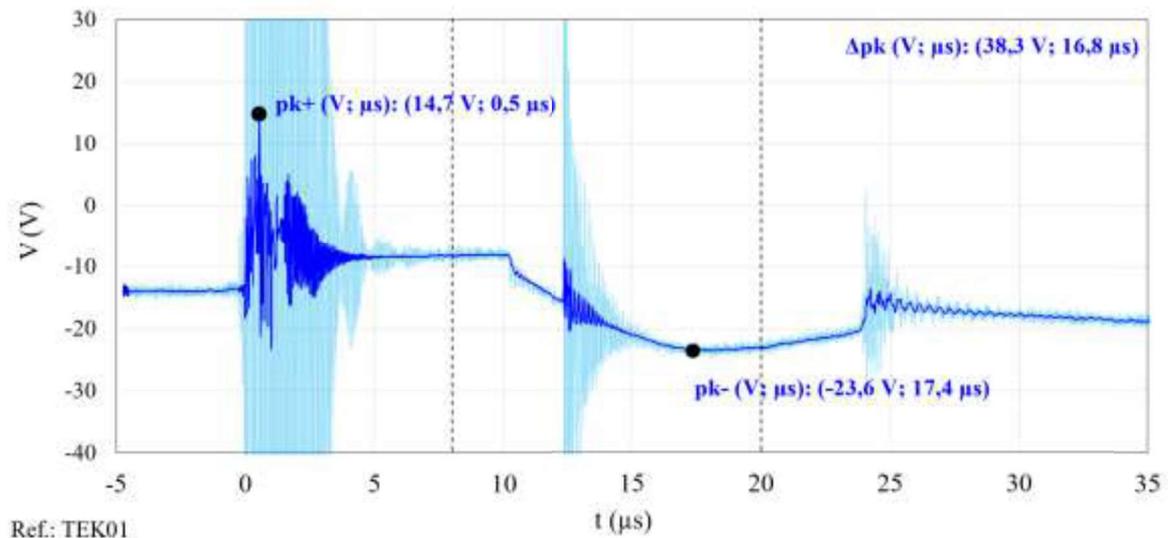
Convém também ressaltar a existência de um nível de tensão em corrente contínua no módulo (offset), que deslocou as ondas das tensões induzidas em relação ao "zero".

As condições de iluminação no laboratório não eram constantes e por isso não foram registradas. Entretanto, os objetivos do teste não foram comprometidos, já que para o módulo ensaiado o valor de  $V_{oc}$  indicado pelo fabricante era de 22,5 V nas STC, ou seja, da mesma ordem de grandeza dos valores das tensões induzidas que foram medidas.

As medições realizadas com a corrente de valor mais elevado (20 kA) indicaram que, independentemente da polaridade, o valor de pico da tensão nos terminais do módulo não é elevado, conforme mostram as figuras 44 e 45. As amplitudes das tensões induzidas, definidas como a diferença entre os valores dos picos positivo e negativo, mantiveram-se abaixo de 60 V em todas as aplicações, indicando que os valores de tensão aplicados na primeira etapa da parte experimental (item 5.1) foram muito superiores às amplitudes das tensões medidas nos ensaios de impulso de corrente.

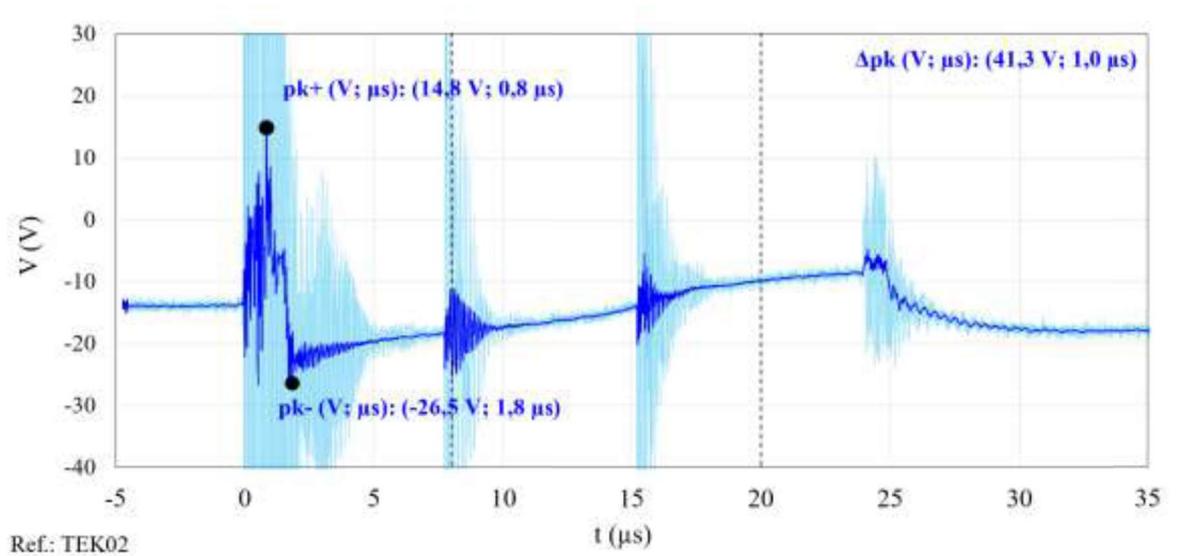
Verifica-se que as tensões induzidas chegam ao nível de zero volts (fazendo-se a correção devida ao offset) em aproximadamente 25  $\mu\text{s}$ , tempo ligeiramente superior ao tempo de cauda do impulso de corrente aplicado (9/20  $\mu\text{s}$ ).

Figura 44 – Medição (tensão induzida) TEK 01. Intensidade da corrente de 20 kA.



Fonte: Autor.

Figura 45 – Medição (tensão induzida) TEK 02. Intensidade da corrente de 20 kA.



Fonte: Autor.

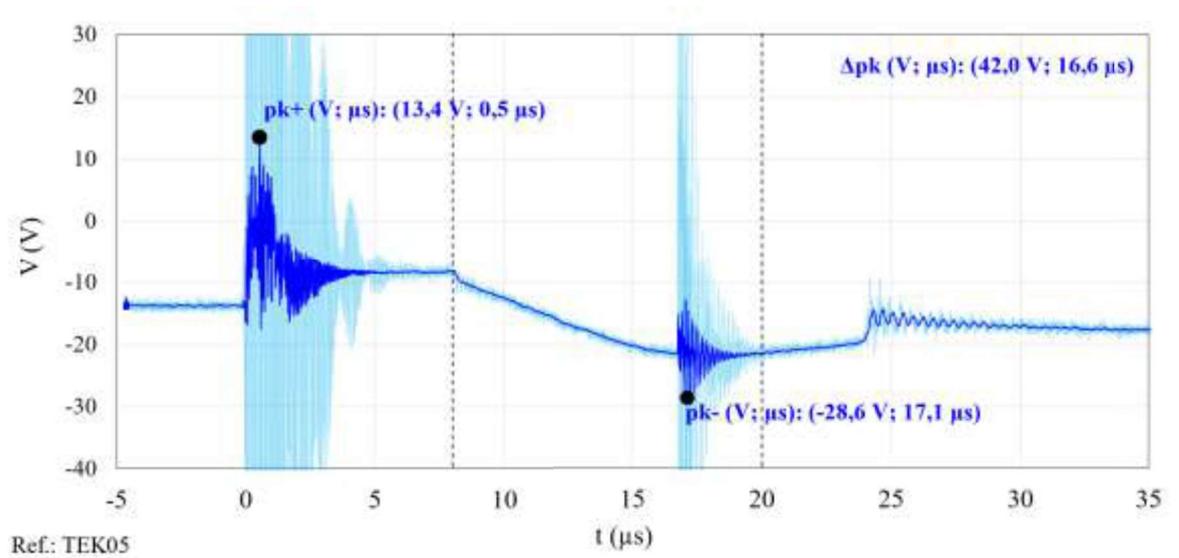
Nos itens subsequentes são avaliados os efeitos da intensidade e da forma de onda do impulso aplicado, da distância entre o módulo e o ponto de injeção da corrente e da polaridade da corrente nos surtos induzidos nos terminais do módulo.

### 5.2.1 Intensidade da corrente

As figuras 44, 46 e 47 mostram as tensões induzidas nos terminais do módulo para correntes aplicadas com amplitudes de 20 kA, 16 kA e 7,9 kA, respectivamente, e polaridade positiva. Nos três casos a distância entre o módulo e o ponto de injeção da corrente foi de 1,0 m.

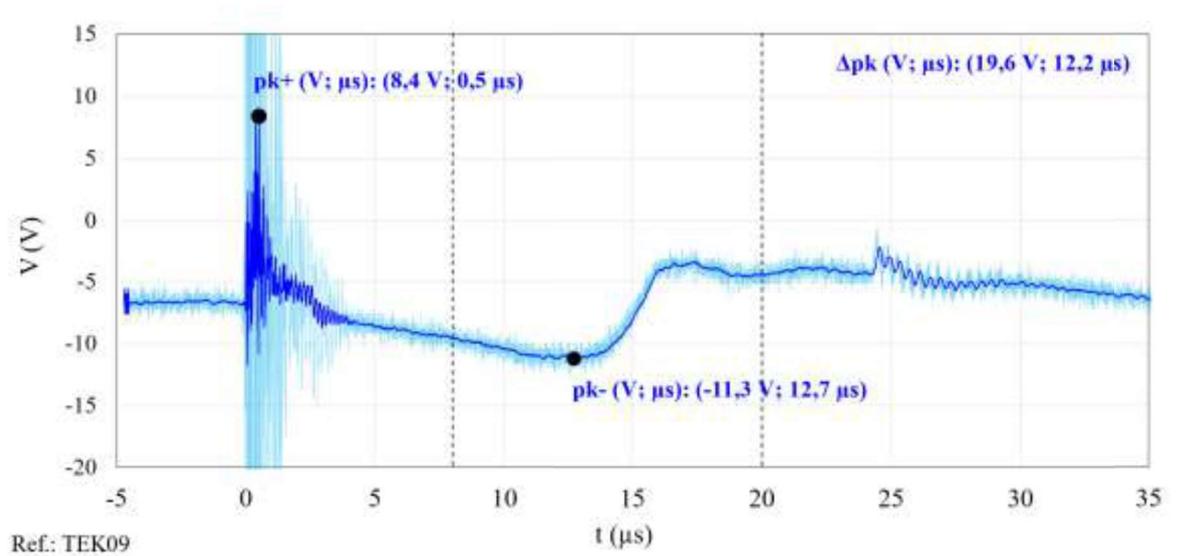
Quando são comparadas as tensões induzidas nos terminais do módulo para os três valores de pico da corrente de impulso (20 kA, 7,9 kA e 16 kA), observa-se pequena variação no valor de pico da tensão. Tal fato pode ser relacionado à não linearidade da impedância de entrada do módulo e também ao elevado valor das oscilações existentes nos instantes iniciais, associadas aos centelhamentos provocados pelo circuito do gerador de impulsos.

Figura 46 - Medição (tensão induzida) TEK 05. Intensidade da corrente de 16 kA.



Fonte: Autor.

Figura 47 – Medição (tensão induzida) TEK 09. Intensidade da corrente de 7,9 kA.



Fonte: Autor.

No estudo realizado por Besenova *et al.* (2012) foi aplicada uma corrente de impulso com valor de pico de 50 kA, na forma 8/20  $\mu$ s, em dois pontos distintos da moldura do módulo fotovoltaico, sem a presença de células. Dois arranjos de aterramento foram considerados: um em um único ponto no meio da moldura e um outro em três pontos igualmente espaçados. As tensões foram medidas nas extremidades de dois laços, um na parte frontal do módulo e outro

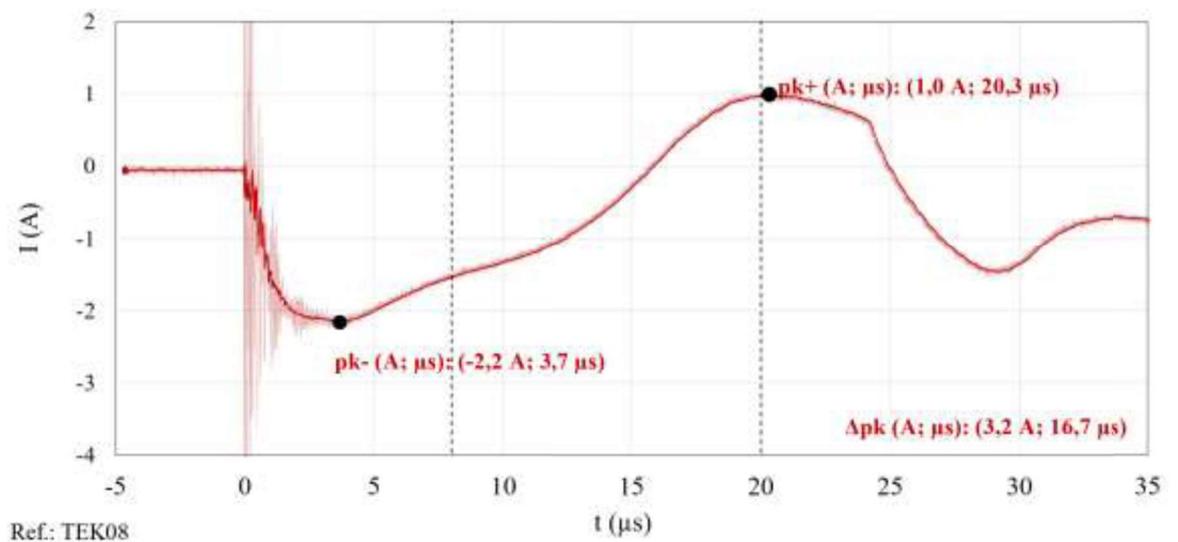
na sua parte traseira. Embora no estudo não tenha sido utilizado o laço formado pelas células fotovoltaicas, mas sim o laço formado pelas molduras dos módulos, os valores obtidos variaram entre 73 V e 185 V. Tais valores são bastante inferiores àqueles utilizados nos ensaios de aplicação de impulsos de tensão do presente trabalho (item 5.1).

### 5.2.2 Forma do impulso de corrente aplicado

As figuras 48 e 49 mostram as correntes induzidas em um laço interno do módulo para correntes aplicadas com as duas correntes de impulso com a mesma amplitude (16 kA), polaridade negativa e distância entre o módulo e o ponto de injeção da corrente de 1,0 m.

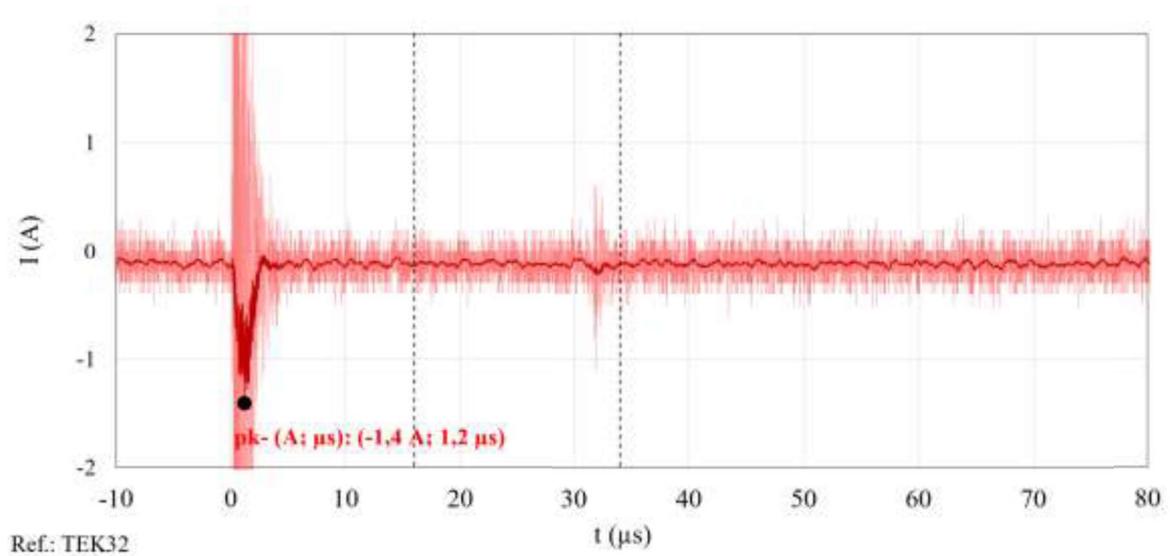
Observa-se, como esperado, que a corrente induzida com maior amplitude corresponde à corrente aplicada com menor tempo de frente (impulso 9/20  $\mu\text{s}$ , TEK 08, figura 48), uma vez que essa corrente apresenta maior taxa de variação no tempo.

Figura 48 – Medição (corrente induzida) TEK 08, impulso 9/20  $\mu\text{s}$ . Intensidade da corrente de 16 kA.



Fonte: Autor.

Figura 49– Medição (corrente induzida) TEK 32, impulso 16/34  $\mu\text{s}$ . Intensidade da corrente de 16 kA.

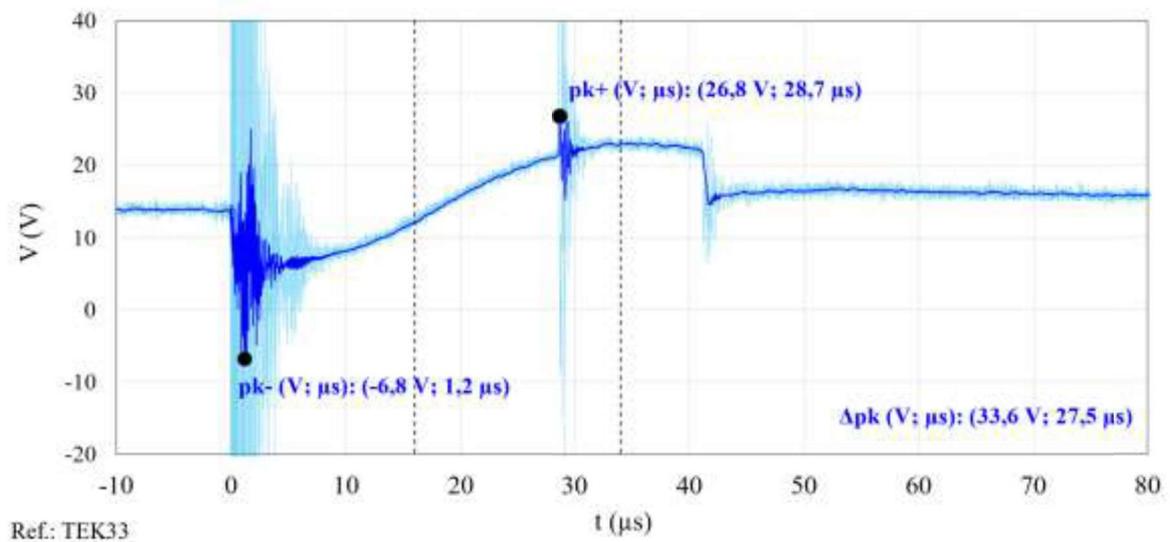


Fonte: Autor.

### 5.2.3 Distância entre o módulo e o ponto de aplicação da corrente (d)

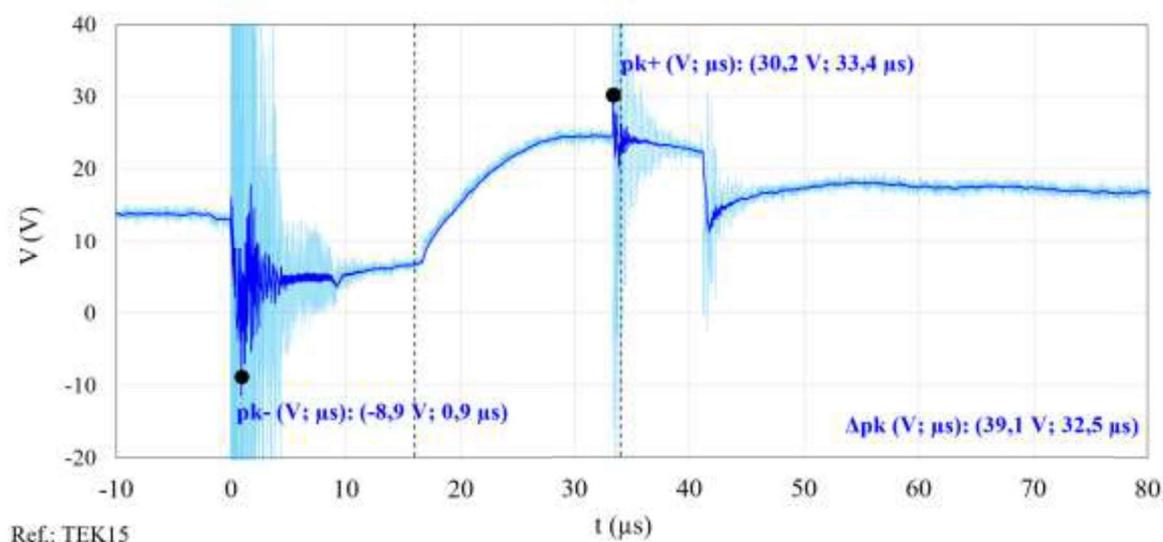
As figuras 50 e 51 mostram as tensões induzidas nos terminais do módulo para uma corrente aplicada com amplitude de 16 kA, forma de impulso 16/34  $\mu\text{s}$ , polaridade positiva e a distâncias entre o módulo e o ponto de injeção da corrente de 1,0 m e 0,5 m, respectivamente.

Figura 50 - Medição (tensão induzida) TEK 33,  $d = 1,0$  m. Intensidade da corrente de 16 kA.



Fonte: Autor.

Figura 51 - Medição (tensão induzida) TEK 15,  $d = 0,5$  m. Intensidade da corrente de 16 kA.

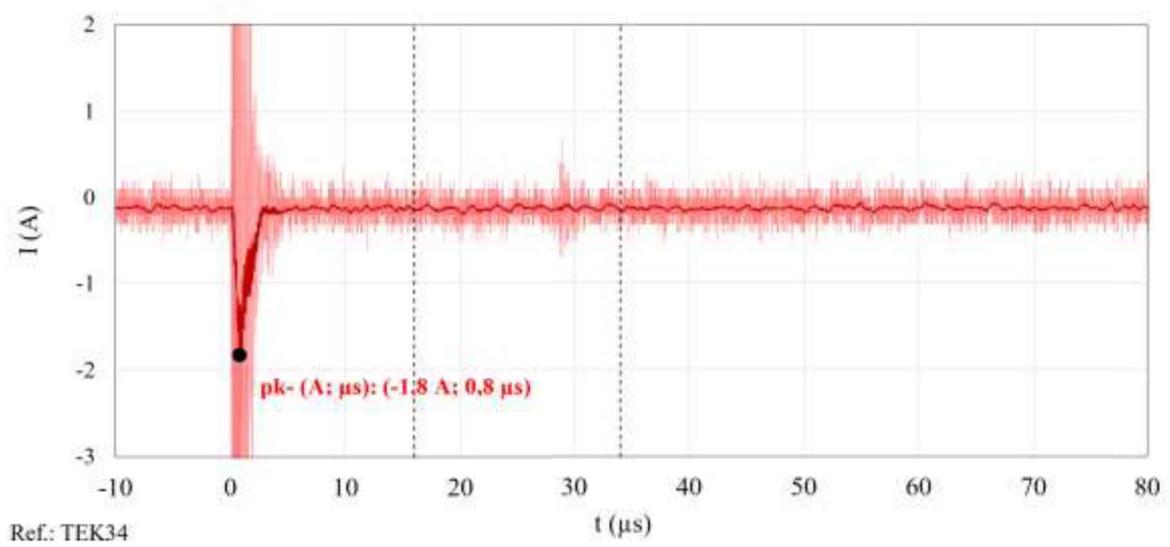


Fonte: Autor.

Quando são comparadas as tensões induzidas para as duas distâncias entre o módulo e o ponto de injeção da corrente, observa-se que a redução da distância resulta em tensão com maior amplitude (maior diferença entre os picos positivo e negativo): 33,6 V para  $d = 1,0$  m e 39,1 V para  $d = 0,5$  m. Esse era um resultado esperado, pois à medida que o ponto de aplicação da corrente se aproxima do módulo, aumenta a intensidade do campo eletromagnético gerado pela corrente e conseqüentemente as tensões induzidas serão mais elevadas.

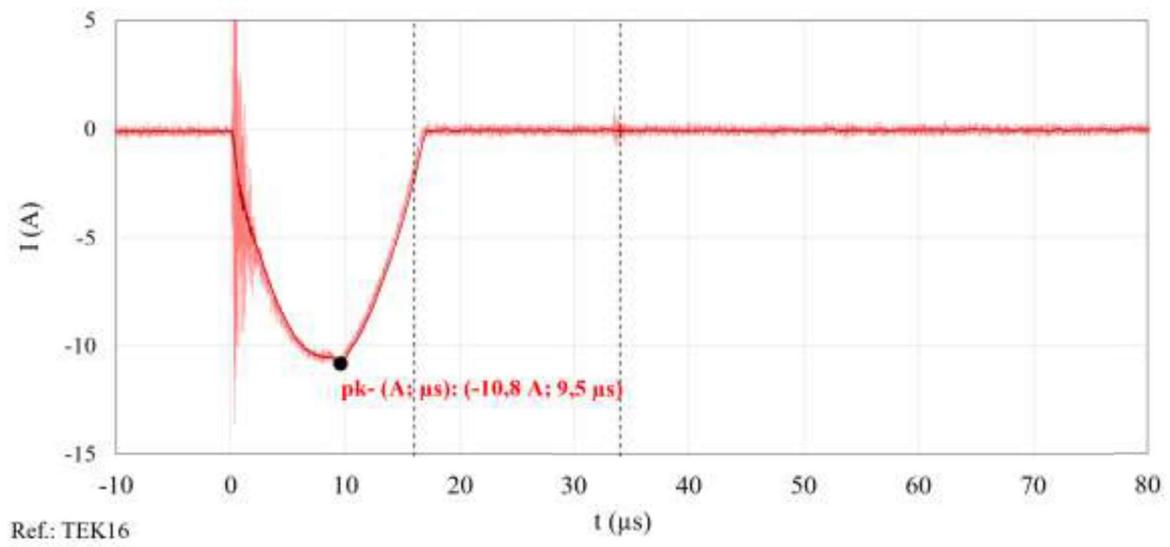
O mesmo comportamento é verificado em relação às correntes induzidas. As figuras 52 e 53 mostram as correntes induzidas em um laço interno do módulo para correntes aplicadas com amplitude de 16 kA, polaridade positiva, forma de impulso de 16/34  $\mu$ s e distâncias entre o módulo e o ponto de injeção da corrente de 1,0 m e 0,5 m, respectivamente. Os valores absolutos dos picos das correntes registrados nas duas situações foram 1,8 A (para  $d = 1,0$  m) e 10,8 A (para  $d = 0,5$  m). A explicação é exatamente a mesma apresentada para o caso das tensões induzidas, ou seja, quanto mais próximo do módulo o ponto de aplicação da corrente, maior o campo eletromagnético gerado pela corrente e maiores as correntes induzidas.

Figura 52 - Medição (corrente induzida) TEK 34,  $d = 1,0$  m. Intensidade da corrente de 16 kA.



Fonte: Autor.

Figura 53 – Medição (corrente induzida) TEK 16,  $d = 0,5$  m. Intensidade da corrente de 16 kA.



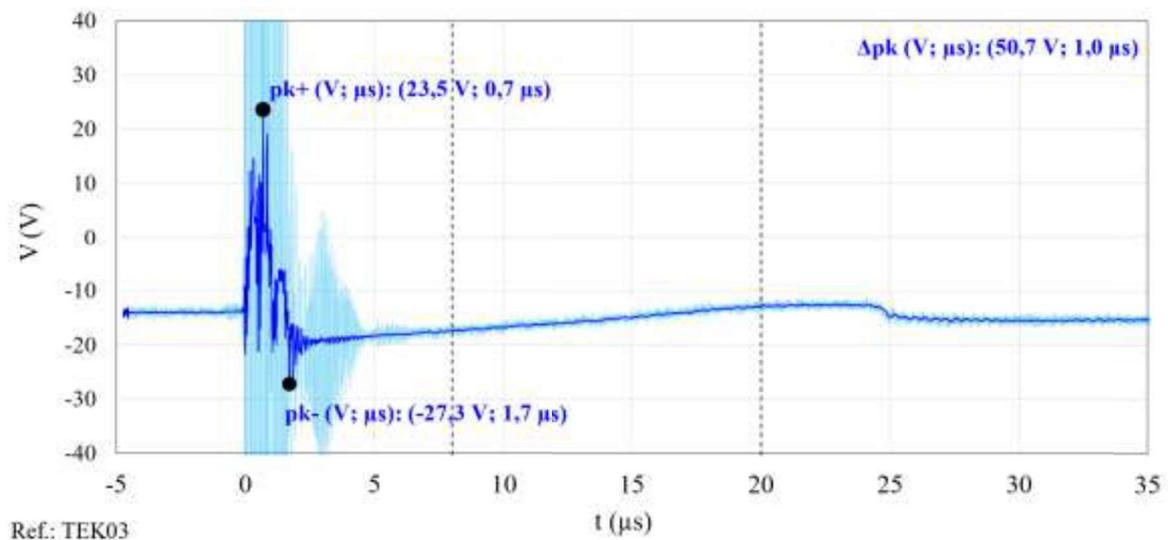
Fonte: Autor.

### 5.2.4 Polaridade da corrente aplicada

As figuras 54 e 55 mostram as tensões induzidas nos terminais do módulo para correntes aplicadas com amplitude de 7,8 kA, forma de onda 9/20  $\mu\text{s}$ , distância entre o módulo e o ponto de injeção da corrente de 1,0 m e polaridades positiva e negativa, respectivamente. Notam-se os diferentes comportamentos das tensões a partir de aproximadamente 2,5  $\mu\text{s}$ : a tensão induzida aumenta no caso da corrente com polaridade positiva (figura 54), e diminui no caso da corrente com polaridade negativa (figura 55).

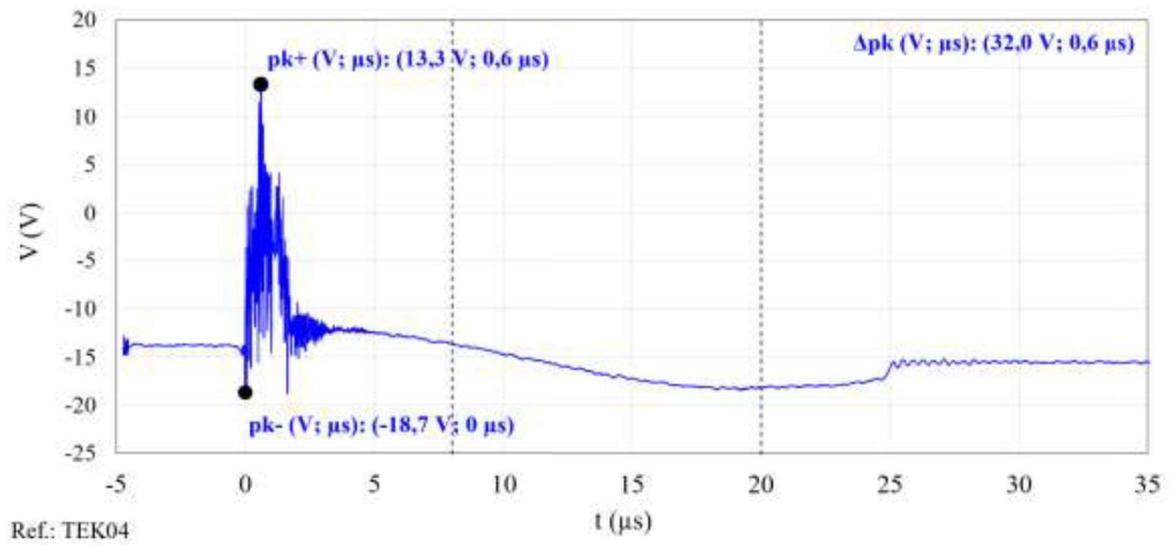
As figuras 56 e 57 mostram as correntes induzidas em um laço interno do módulo para correntes aplicadas com a forma de onda de 16/34  $\mu\text{s}$ , com amplitude de 16 kA, distância entre o módulo e o ponto de injeção da corrente de 0,5 m e polaridades positiva e negativa, respectivamente. Não se observa variação significativa no valor de pico da corrente, mas a condução da corrente induzida acontece em períodos diferentes, devido à polarização dos diodos de by-pass.

Figura 54 – Medição (tensão induzida) TEK 03, polaridade positiva. Intensidade da corrente de 7,8 kA.



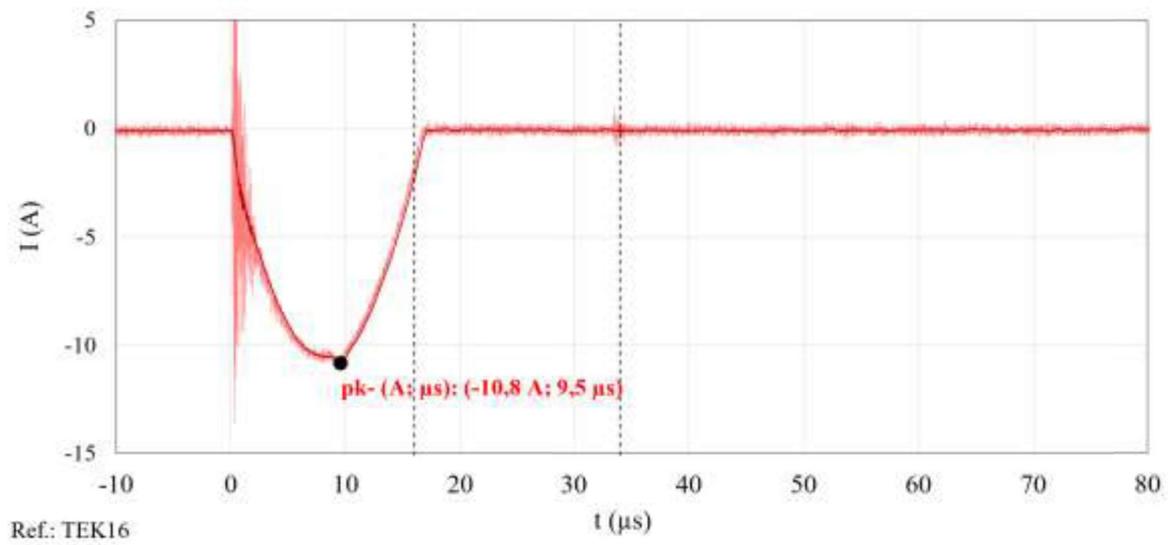
Fonte: Autor.

Figura 55 – Medição (tensão induzida) TEK 04, polaridade negativa. Intensidade da corrente de 7,8 kA.



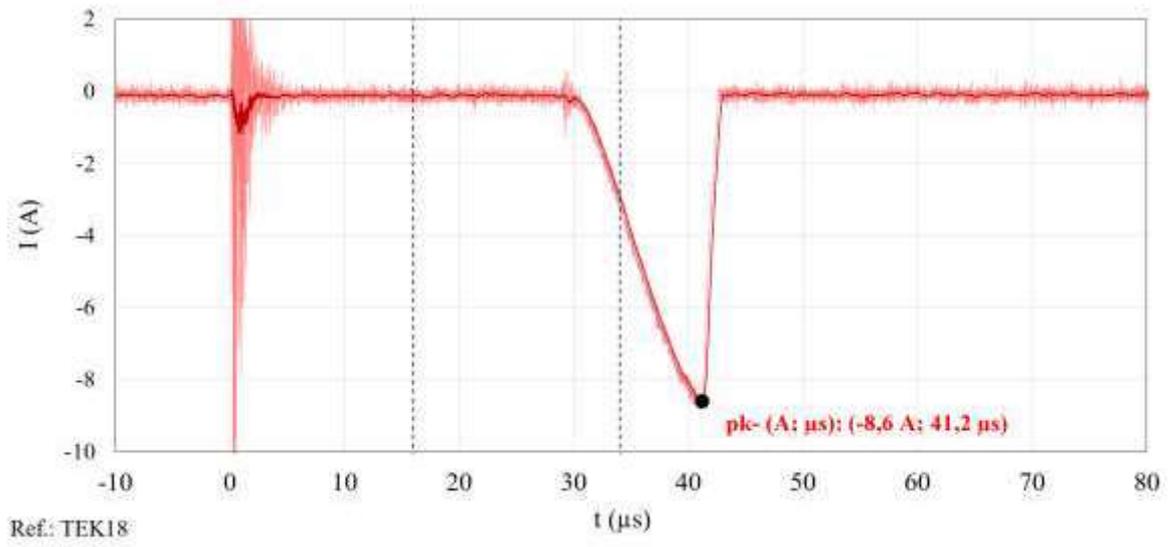
Fonte: Autor.

Figura 56 – Medição (corrente induzida) TEK 16, polaridade positiva. Intensidade da corrente de 16 kA.



Fonte: Autor.

Figura 57 – Medição (corrente induzida) TEK 18, polaridade negativa. Intensidade da corrente de 16 kA.



Fonte: Autor.

## 6 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as principais conclusões obtidas nesta pesquisa, incluindo suas limitações e possíveis trabalhos que possam complementá-la.

Os resultados obtidos indicaram a não existência de alterações significativas nos parâmetros elétricos avaliados nos módulos fotovoltaicos após a aplicação de impulsos de tensão em modo diferencial até um determinado valor. Os resultados apresentados pelas curvas I-V após uma ou várias sequências de 100 impulsos, mantendo ou aumentando a magnitude da tensão, permaneceram praticamente os mesmos, levando-se em consideração a margem de tolerância das medições. Esses resultados indicam que os módulos submetidos às séries de impulsos de tensão continuam a operar com aproximadamente o mesmo fator de forma e a mesma eficiência. Os ensaios mostraram que a partir de um determinado valor da tensão aplicada, os diodos de by-pass entram em curto-circuito, impedindo a obtenção da curva I-V. A curva foi obtida após a retirada dos diodos curto-circuitados, com a obtenção de novos parâmetros do módulo através da medição sob sol real. Verificou-se que as células fotovoltaicas dos módulos não foram danificadas pelas sobretensões aplicadas, independentemente da presença dos diodos de by-pass.

Estes resultados convergem parcialmente com aqueles obtidos em outros estudos realizados sobre o tema, nos quais os módulos fotovoltaicos tiveram os seus parâmetros alterados quando submetidos a sobretensões de modo diferencial de magnitude elevada, mas o mesmo não ocorreu quando da aplicação de sobretensões repetidas com valores inferiores. Ou seja, a magnitude da sobretensão é o que causou a alteração dos parâmetros dos módulos, e não a frequência com que tais sobretensões foram aplicadas. Tal fato se deve às características semicondutoras das próprias células e principalmente de seus diodos de by-pass. Estes atuam como DPS intrínsecos, desviando diretamente para os terminais dos módulos as sobrecorrentes transitórias que passariam pelas células, limitando assim as magnitudes das sobretensões em cada célula. Ressalta-se que os DPS tipo 3, em muitas aplicações, utilizam justamente diodos como seu elemento de proteção, e nessas aplicações os diodos também não alteram suas características, embora sejam danificados quando conduzem correntes de intensidade mais elevada do que aquelas para as quais foram projetados.

Outro aspecto que essa pesquisa ajuda a compreender é a associação entre fatores de degradação e danos causados por descargas atmosféricas. Enquanto em outros estudos não foi possível dissociar esses elementos, nesta pesquisa os módulos não estiveram expostos ao

tempo, o que possibilitou a análise do efeito das sobretensões isoladamente, isto é, sem a "contaminação" da degradação decorrente da exposição ao tempo. Por esse motivo, fica mais evidente que a Proteção contra Descargas Atmosféricas (PDA) também tem a função de evitar danos estruturais nos módulos fotovoltaicos, como trincas e delaminações, que potencializam a ação de outras formas de degradação que podem evoluir para a destruição do módulo.

Os módulos fotovoltaicos de silício policristalino ensaiados apresentaram baixa vulnerabilidade às séries de impulsos de tensão aplicados. Com base nas tensões induzidas medidas nos ensaios de impulso de corrente, acredita-se que os impulsos de tensão aplicados sejam superiores às amplitudes das tensões induzidas por descargas atmosféricas ao longo da operação desses módulos. Os valores máximos aplicados aos módulos chegaram a 3500 V, sem que se tenham registradas alterações significativas em suas características elétricas. Em um dos ensaios foi aplicada uma sequência de 1000 impulsos com magnitude de 1000 V sem que os parâmetros avaliados sofressem alterações significativas

Uma investigação inicial sobre as características das tensões induzidas nos terminais dos módulos fotovoltaicos por descargas atmosféricas indiretas foi realizada a partir de ensaios com aplicação de impulsos de corrente nas proximidades do módulo. Embora trate-se de uma investigação preliminar, uma vez que os testes em laboratório não reproduzem as condições reais, em que o campo eletromagnético produzido pela corrente que se propaga ao longo do canal da descarga, que tem comprimento da ordem de alguns quilômetros, induz tensões e correntes nos terminais do módulo. Em uma situação real esse campo varia de acordo com as características da corrente da descarga, da resistividade e da permissividade do solo, da distância do local de incidência da descarga ao módulo e da impedância de entrada do módulo. Apesar de suas limitações, os experimentos representam uma contribuição no sentido de que possibilitaram a obtenção de informações sobre as influências de parâmetros como a amplitude, polaridade e forma do impulso da corrente aplicada e da distância do ponto de aplicação da corrente ao módulo nas tensões induzidas nos seus terminais.

Os resultados obtidos através das aplicações dos impulsos de corrente também indicam que os valores das tensões e correntes induzidas em um módulo fotovoltaico são relativamente baixos, bem abaixo da suportabilidade dos módulos. Os valores de pico das tensões induzidas medidas nos terminais dos módulos fotovoltaicos variaram na faixa de aproximadamente 20 V a 50 V, valores bastante inferiores às tensões impulsivas aplicadas aos módulos.

A presença de diodos de by-pass e as características semicondutoras das células fotovoltaicas definem o comportamento da impedância dos módulos, o que afeta as amplitudes

das tensões e correntes induzidas nos sistemas fotovoltaicos. Assim, a não linearidade da impedância dos módulos deve ser levada em consideração em simulações para estimativa de tensões e correntes induzidas em módulos fotovoltaicos.

Uma questão importante e que merece investigação mais profunda é se as tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas apresentam características semelhantes à da tensão de impulso atmosférico normalizada (impulso 1,2/50  $\mu$ s), que é a tensão utilizada para testar o comportamento de equipamentos elétricos quanto a sobretensões atmosféricas. Em que pese o nível de ruído observado nos ensaios realizados, as tensões induzidas medidas apresentaram características distintas do impulso 1,2/50  $\mu$ s. O estudo das características das tensões induzidas em módulos fotovoltaicos envolvendo experimentos e simulações computacionais seria de grande valia para um melhor entendimento do impacto das descargas atmosféricas em sistemas fotovoltaicos.

Esta pesquisa reforça a compreensão de um princípio básico da proteção contra surtos, a de que proteger um componente, neste caso um módulo fotovoltaico, é proteger os condutores a ele ligados, pois são esses condutores que transmitem a energia da descarga atmosférica, direta ou indireta, para o módulo. Caso o módulo não estivesse conectado ao inversor fotovoltaico, a tensão induzida em seus terminais, em modo comum ou diferencial, teria magnitudes abaixo da sua suportabilidade, não comprometendo a integridade desses módulos.

Considera-se que os resultados alcançados nesta pesquisa contribuiriam para ampliar o conhecimento sobre os efeitos das descargas atmosféricas indiretas nos módulos fotovoltaicos. Esse conhecimento é essencial para que técnicas mais eficazes de proteção sejam desenvolvidas, permitindo uma operação mais segura e eficiente desses sistemas.

Como propostas de continuidade desta pesquisa, são sugeridos os seguintes estudos:

Como continuação dessa pesquisa, podem ser sugeridos os seguintes trabalhos:

- 1) estudo das características das tensões induzidas em módulos fotovoltaicos envolvendo simulações computacionais e experimentos, eventualmente em modelo reduzido;
- 2) estudo do comportamento de módulos fotovoltaicos e diodos de by-pass quando submetidos a tensões impulsivas com forma diferente da tensão de impulso atmosférico normalizada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, N. I. ; AB-KADIR, M.Z.A.; IZADI, M.; AZIS, N.; RADZI, M.A.M.; ZAINI, N.H.; NASIR, M.S.M. Lightning protection on photovoltaic systems: A review on current and recommended practices. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v. 82, p. 1. P. 1611–1619, 2018.

AKRAM, M. W.; LI, G. ; JIN, Y. ; CHEN, X. Failures of Photovoltaic modules end their Detection: A Review. *Applied Energy*. 12 de março de 2022.

ALMEIDA, M. P.; **Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. . São Paulo, 2012, 171p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Energia (EP/FEA/IEE/IF), Universidade de São Paulo. São Paulo. Maio de 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10899**. Energia solar fotovoltaica - Terminologia. Rio de Janeiro, 2020. 104 p. 11p.

BESENOVA, Z.; HALLER, R.; BIRKL, J.; ZAHLMANN, P. Overvoltages in Photovoltaic Systems Induced by Lightning Strikes. In: International Conference on Lightning Protection, 2012. **Proceedings. 31<sup>th</sup>. ICLP**. Viena. 2012.

BOKORO, P; DOORSAMY, W. **Investigation of lightning surge effects on a grid-connect PV plant**. 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), pp.1-4. Setembro 2018.

CHARALAMBOS, C. A.; KOKKINOS, N. D.; CHRISTOFIDES, N. External Lightning Protection and Grounding in Large-Scale Photovoltaic Applications. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**. Volume 65. N. 2, 2014.

CHRISTODOULO, C. A. ; EKONOMOU, L.; GONOS, I. F.; PAPANIKOLAOU, N. P. Lightning protection of PV systems. **Energy Systems**. 2015.

COETZER, K. M. **Investigating PV module failure mechanisms caused by indirect lightning strikes**. Stellenbosch, 2019, 195p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia, Universidade de Stellenbosch. Stellenbosch. Abril de 2019.

COETZER, K. M.; WIID, P. G. ; RIX, A. J. Investigating Lightning Induced Currents in Photovoltaic Modules. In. International Symposium on Electromagnetic Compatibility. **Proceedings**. Barcelona. 2019.

COOREY, V. (Ed). **Lightning Protection**. The Institution of Engineering and Technology. Londres. 2010.

DAMIANAKI, K.; CHRISTODOULOU, C. KOKALIS, C. C. A. ; KYRITSIS, A. ; ELLINAS, E. D.; VITA, V.; GONOS, I. F. **Lightning Protection of Photovoltaic Systems: Computation of the Developed Potentials**. *Applied Sciences*. Dezembro de 2020.

DANTAS S. G.; POMPERMAYER, F. M.; **Viabilidade Econômica de Sistemas Fotovoltaicos no Brasil e Possíveis Efeitos no Setor Elétrico**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão. Rio de Janeiro. Maio de 2018. Disponível

em: <[https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com\\_content&view=article&id=33431:td-2388-viabilidade-economica-de-sistemas-fotovoltaicos-no-brasil-e-possiveis-efeitos-no-setor-eletrico&catid=411:2018&directory=1](https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=33431:td-2388-viabilidade-economica-de-sistemas-fotovoltaicos-no-brasil-e-possiveis-efeitos-no-setor-eletrico&catid=411:2018&directory=1)>. Acesso em: 11 de abril de 2020.

DECHTHUMMARONG, C.; THEPA, S.; CHENVIDHYA, D.; JIVACATE, C.; KIRTIKARA, K.; DECHTHUMMARONG, C.; THONGPRON, J. Lightning Impulse Test of Field-Aged PV Modules and Simulation Partial Discharge Within MATLAB. 2012 In. International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, Phetchaburi, 2012, p. 1-4.

DEHN+SÖHNE. **Lightning Protection Guide 3<sup>rd</sup> updated edition**. Neumarkt, Alemanha. Dezembro, 2014. ISBN 9783981377019.

DHOKE, A.; SHARMA, R.; SAHA, T. K. **PV module degradation analysis and impact on settings of overcurrent protection devices**. Solar Energy, volume 160. Janeiro de 2018, p. 360-367.

DWYER, J. D.; UMAN, M. A.; The physics of lightning. **Physics Reports**. Volume 534. 30 de Janeiro de 2014. p. 147-241.

DOBRZANSKI, L.A.; DRYGALA, A.; JANUSKA, A. Electrical properties mono-and polycrystalline silicon solar cells. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**. Volume 59, edição 2. Agosto de 2013.

FALLAH, N. ; GOMES, C. ; KADIR, M. Z. A. Ab. ; NOURIRAD, G. ; BAOJAHMADI, M. ; AHMED, R. J. **Lightning Protection Techniques for Roof-Top PV Systems**. 2013 IEEE 7<sup>th</sup> International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO 2013), Langkawi, Malásia, Junho de 2013.

FORMISANO, A. ; PETRACA, C. ; HERNANDEZ, J. C.; RODRIGUEZ, F. J. M. ; Assessment of induced voltages in common and differential-mode for a PV module due to nearby lightning strikes. The Intituion of Engineering and Technology. IET Renewable Power Generation. Março, 2019.

FORMISANO, A; HERNÁNDEZ, J. C. ; PETRACA, C. ; SUTIL, F. S. Modeling of PV Module and DC/DC Converter Assembly for the Analysis of Induced Transient Response Due to Nearby Lightning Strike. **Electronics**, Janeiro de 2021.

GUERRA, N. ; ARIAS, C. P. ; GUEVARA, M. ; CRUPI, F. Operation and physics of photovoltaic solar cells: an overview. **Revista de I+D Tecnológico**. Dezembro de 2018.

GREEN, M. A. **Solar cells: Operational principles, technology and system applications**. New South Wales: The University of South Wales, 1992. 274p.

HAEBERLIN, Interference Voltages induced by Magnetic Fields of Simulated Lightning Currents in Photovoltaic Modules and Arrays. In: **European Photovoltaic Solar Energy Conference**, 2001. Munique, 2001.

HASSE. P.; WIESINGER. J. **EMV Blitz-Schutzzonen-Konzept**. Munique. Alemanha. Pflaum Verlag.1993.

HERNÁNDEZ, J. C.; VIDAL, P. G.; JURADO, F. Lightning and Surge Protection in Photovoltaic Installations. **IEEE Transactions on power delivery**, Vol. 23, N°. 4, Outubro de 2008.

HETITA, I. ; ZALHAF, A. S. ; MANSOUR, D. E. A. ; HAN, Y. ; YANG, P. ; WANG, C. Modeling and protection of photovoltaic systems during lightning strikes: A review. **Renewable Energy** v. 184, P. 134–148, 2022.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61215-1:2021 **Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 1: Test requirements**. Genebra. Fevereiro 2021.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61215-2:2021 **Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 2: Test procedures**. Genebra. Fevereiro 2021.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61730-1:2016 **Photovoltaic (PV) module safety qualification – Part 1 : Requirements for testing**. Genebra. 2016.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61730-2:2016 **Photovoltaic (PV) module safety qualification – Part 2 : Requirements for testing**. Genebra. 2016.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC/TR 63227:2020**. **Lightning and surge voltage protection (PV) power supply systems**. Genebra. 2020.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60891:2021**. Photovoltaic devices - Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics. Genebra. 2021.

JAECKEL, B. ; SEIDEL, P. ; KLEISS, G. ; BECK, M. Safety of photovoltaic modules – an overview of the significant changes resulting from maintenance of IEC 61730 series. In: **EU PVsec**. Amsterdam, 2014. Setembro 2014.

JIANG, T.; GRZIBOWSKI, S. Impact of Lightning Impulse Voltage on Polycrystalline Silicon Photovoltaic Modules. In: International Symposium on Lightning Protection. 2013, Belo Horizonte. **Proceedings**. Belo Horizonte. 2013.

JIANG, T.; GRZYBOWSKI, S. Electrical Degradation of Photovoltaic Modules Caused by Lightning Induced Voltage. In: **Electrical Insulation Conference**. Pensilvânia. 2014.

JIANG, T. **Electrical properties degradation of Photovoltaic modules caused by lightning induced voltage**. Mississippi, 2014, 105 p. Dissertação (Mestrado) - Mississippi State University. Mississippi. 2014.

JORDAN, D. C. ; SILVERMANN, T. J. ; WOHLGEMUTH, J. H. ; KURTZ, S. R. ; VANSANT, K. T. **Photovoltaic failure and degradation modes**: PV failure and degradation modes. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. Abril de 2017. P. 318-326.

KIM J. ; RABELO, M. ; PARVATHI, P. S. ; YOUSUF, H. ; CHO, E. C. ; YI, J. A review of the degradation of photovoltaic modules for life expectancy Energies 2021.

KOKKINOS, N.; CHRISTOFIDES, N.; CHARALAMBOUS, C. Lightning Protection Practice for Large-Extended Photovoltaic Installations. In: International Conference on Lightning Protection, 2012. **Proceedings. 31<sup>th</sup>. ICLP**. Viena. 2012.

KÖNTGES, M. ; KURTZ, S. ; PACKARD, C. ; JAHN, U. ; BERGER, K. A. ; KATO, K. ; FRIESEN, T. ; LIU, H. ; ISEGHEM, M. V. Review of Failures of Photovoltaic Modules. International Energy Agency. Março de 2014.

LABOURET, A.; VILLOZ, M., **Solar Photovoltaic Energy**. The Institution of Engineering and Technology. 2010.

LUNA, M.L.M; CARVALHO, P.C.M. Desenvolvimento e validação de traçador de curva IxV para módulos fotovoltaicos usando o método de carga eletrônica. **Revista Brasileira de Energia Solar** Ano 8, volume VIII, número 2. Dezembro, 2017 p.88-99.

MA, M. ; MA, J. ; WANG, H. ; MA, W. ; ZHANG, R. PV module life prediction based on coupled failure model. **Microelectronics Reliability**. N°138, 2022.

MARTZLOFF, F. D. Lightning and Surge Protection of Photovoltaic Installations. National Institute of Standards. U.S Department of Commerce. Junho de 1989. Disponível em: <<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir89-4113.pdf>>. Acesso em 15 de outubro de 2019.

MENDONÇA, T. R. F. **Filtro Hanning Modificado com Tamanho de Janela Variável para Estimação de Amplitude do Sinal da Rede Elétricas**. Juiz de Fora, 2015. 84f. Dissertação de mestrado \_ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora. 2005.

MENEZES Jr., F. V.; RODRIGUEZ, J. L. M. Comparison among different software for photovoltaic plant projects: Case study. In. **Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications**. E. 11. V. 3. 2017.

MESSENGER, R. A.; VENTRE, J. **Photovoltaic Systems Engineering**. CRC Press, 2004.

MOCELIN, A.R. ; REIS, G. ; OLIVEIRA, T. O. ; ZILLES, R. Avaliação de conformidade de módulos fotovoltaicos: aplicação da portaria Inmetro 004/2011. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belo Horizonte, Brasil. Abril, 2016.

MOSAMANE; S.; GOMES; C. **Lightning-induced Voltages Risk for Microinverters in Photovoltaic Installations**. SAUPEC Conference, Durban, África do Sul, Janeiro, 25-27. 2022

MUNOZ, M. A. ; GARCÍA, M. C. A. ; VELA, N. ; CHENNLO, F. Early degradation of silicon PV modules and guaranty conditions. **Solar Energy**, n. 85, Julho de 2011. p. 2264-2274.

NAXAKIS, I.A.; PYRGIOTI, E.; PERRAKI, V. Efficiency of a photovoltaic module after stresses by impulse voltage. *In: 9<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion.*

NAXAKIS, I. ; PYRGIOTI, E. ; PERRAKI, V. ; TSELEPIS, E. Studying the effect of the impulse voltage application on sc-Si PV modules. **Solar Energy**, n. 14. Fevereiro de 2017. p. 721-728. Atenas, Grécia. Novembro, 2017.

NDIAYE, A.; KÉBE, C. M. F.; KOBİ, A. Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review. **Solar Energy**. n. 96, Oct. 2013, pp. 14-151.

PARHAMI, B. Defect, Fault, Error,...,or Failure? IEEE Transactions on Reliability, Vol. 46, nº 4, dezembro de 1997, pp. 450-451.

PHAM, H. (Ed). Handbook of Reliability Engineering. Springer-Verlag London. Londres. 2003.

PIANTINI, A. "Lightning protection of overhead power distribution lines," In. International Conference on Lightning Protection, 2008. **Proceedings. 29<sup>th</sup> ICLP**. Uppsala, 2008 (invited lecture).

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A (Org.). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Rio de Janeiro. 520 p. 2014.

PINTO, P.; ZILLES, R.; ALMEIDA, M. Eficiência Brasileira de Inversores Para Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede. *Avances em Energías |Renovables y Medio Ambiente*. v. 15, 2011.

PINTO Jr.; PINTO, I. R. A. C. **Tempestades e relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos: INPE, 194p., 2000.

PONS, E.; TOMMASINI, R. Lightning Protection of PV Systems. In. **International Youth Conference on Energy**. Siófok, 2013, pp. 1-5.

RAHIM, N. H. A.; BAHARUDIN, Z. A.; OTHMAN, M. N. Investigation of Wave Propagation to PV-Solar Panel Due to Induced Overvoltage Generated by Lightning Impulse Generator. **Advanced Science and Technology Letters**. V. 38. 15-22. 2013.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: physics and effects**. Cambridge University press, 2003.

RAMOS, C. M. **Procedimentos para Caracterização e Qualificação de Módulo Fotovoltaicos**. São Paulo, 2006, 140p. Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (Escola Politécnica / Faculdade de Economia e Administração / Instituto de Eletrotécnica e Energia / Instituto de Física), Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006.

ROEDERN, B. Photovoltaic Materials, Physics of. **Encyclopedia of Energy**, 2004, p. 823-839.

ROMERO, F. **Avaliação do Comportamento dos Campos Eletromagnéticos Gerados por Descargas Atmosféricas Nuvem-Terra**. São Paulo, 2007, 155p. Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (Escola Politécnica / Faculdade de Economia e Administração / Instituto de Eletrotécnica e Energia / Instituto de Física), Universidade de São Paulo. São Paulo. 2007.

SAMPAIO, J. A. ; AMADO, R. S. ; MARQUES, P. S. G. ; SOARES, L. G. L. **Série Rochas e Minerais Industriais. Silício Grau Solar – Uma Revisão das Tecnologias de Produção**. Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). Rio de Janeiro. Brasil. 2019.

SANTOS, G. Processo de degradação acelerada aplicada no estudo de células solares orgânicas de heterojunção invertidas. Revista Brasileira de Energia Solar, ano 8, volume III, número 2. Dezembro, 2017. P.67-72.

SATPATHY, R.; PAMURU, V. Making of crystalline silicon solar cells. In Solar PV Power: Design, Manufacturing and Applications from Sand to Systems. 2021, pgs 71-134, dezembro, 2020. Academic Press, ISBN 978012817626-9

SEIDL, S. Pathological Features of Death From Lightning Strike. In: Tsokos M. (Ed). **Forensic Pathology Reviews**, v. 4. C. 1 Humana Press, 2006. p. 3- 23.

SHIGIHARA, M. **Avaliação de correntes de descargas atmosféricas através de medições diretas em estruturas altas**. São Paulo, 2005, 138p. Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (Instituto de Física, Faculdade de Economia, Administração e Ciências Contábeis, Escola Politécnica, Instituto de Eletrotécnica e Energia), Universidade de São Paulo. São Paulo. 2005.

SMIT, H. C. **Investigating surge protection and earthing designs used for utility-scale PV plants**. Stellenbosch, 2021, 107p. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Elétrica e Eletrônica da Faculdade de Engenharia da Universidade de Stellenbosch.

SOUZA, M. E. M. Impactos da Geração Distribuída nas Redes de Baixa Tensão. Belo Horizonte, 2012, 48 p. Monografia (Especialização) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 16 de julho de 2012.

STRACHAN, N. **Distributed Energy, Overview**. Encyclopedia of Energy, 2004, p. 823-839.

- SUETA, H. E. ; ZILLES, R. ; MOCELIN, A. ; SANTOS, S. ; BOEMISEL, E. Experimental Verifications in Photovoltaic Modules Subject To Current Impulses For Simulation of Lightning Discharges. In: International Conference on Grounding and Earthing & 5<sup>th</sup> International Conference on Lightning Physics and Effects, 2012. Bonito, Brasil. 2012.
- SUETA, H. E. ; MOCELIN, A. ; ZILLES, R. ; OBASE, P. F. ; BOEMEISEL, E. Protection of Photovoltaic Systems Against Lightning. In: International Symposium on Lightning Protection, 2013, Belo Horizonte. **Proceedings**. Belo Horizonte, 2013.
- SUN, Q. ; HUANG, L. ; ZHONG, X. ; YANG, J. ; ZHONG, L. ; CHEN, S. ; JIN, H. Influence of photovoltaic support on lightning transient under direct lightning strike. **Electric Power Systems Research**. Outubro de 2023.
- TAYYAN, A. A. E. A simple method to extract the parameters of the single-diode model of a PV system. Turkish Journal of Physics. Março 2013.
- TÓTH, Z. ; KISS, I. ; NÉMETH, B. ; BERTA, I. Lightning Protection of High-performance Photovoltaic Power Plants: Issues of Parts to Be Covered by the Lightning Protection System. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, 65(1), pp. 20–28, 2021.
- TRETER, M. E.; MICHELS, L. Métodos de Aquisição Experimental de Curvas I-V de Arranjos Fotovoltaicos: Uma Revisão. 11th Power Electronics Seminar, 2018, Santa Maria. Proceedings of 11th Seminar on Power Electronics and Control, 2018.
- ZAINI, N. H. ; KADIR M. Z. A. A. ; RADZI, M. A. M. ; IZADI, M. ; AZIS, N. ; AHMAD, N. I. ; NASIR, M. S. M. **Lightning Surge Analysis on a Large Scale Grid-Connected Solar Photovoltaic System**. *Energies*. 2017.
- ZAINI, N.H. ; KADIR, M. Z. A. A. ; IZADI, M. ; AHMAD, N. I. ; RADZI, M.A.M ; AZIS, N. ; HASAN, W. Z. W. On the effect of lightning on a solar photovoltaic system. In: International Conference on Lightning Protection, 2016. Proceedings. **33<sup>th</sup>. ICLP**. Estoril. 2016.
- ZANESCO, I. ; GARCIA, S. B. ; MOEHLECKE, A. ; VALDIVIA, H. B. ; LIMA, N. W. Análise da degradação de módulos fotovoltaicos fabricados com diferentes células solares. **Revista Brasileira de Energia Solar**. v. V. n. 2. 2014. p. 101-108.
- ZHANG, Y.; CHEN, H.; DU, Y. Lightning Protection Design of Solar Photovoltaic Systems: Methodology and Guidelines. **Electric Power Systems Research**. Junho de 2019.
- ZHANG, Y.; CHEN, H.; DU, Y. Considerations of Photovoltaic System Structure Design for Effective Lightning Protection. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**. Maio de 2020.
- ZHONG, X. ; SUN, Q. ; CHEN, D. ; YUAN, J. ; WANG, F. ; CHEN, S. ; ZHONG, L. Effect of Eddy Current for Photovoltaic Module on Lightning-Induced Overvoltage Caused by Electromagnetic Coupling. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. Volume XX. N.2, 2023.