

LUCAS MATTOS DE FREITAS

Estudo da importância e do funcionamento de DPSs em projetos fotovoltaicos

Lucas Mattos de Freitas

Estudo da importância e do funcionamento de DPSs em projetos fotovoltaicos

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

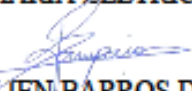
Orientador: Prof. Dr. Rubens Alves Dias

F866	<p>Freitas, Lucas Mattos de Estudo da importância e do funcionamento de DPSs em projetos fotovoltaicos / Lucas Mattos de Freitas – Guaratinguetá, 2021. 61 f : il. Bibliografia: f. 53-54</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021. Orientador: Prof. Dr. Rubens Alves Dias</p> <p>1. Sistemas de energia fotovoltaica. 2. Descarga atmosférica. 3. Equipamentos de proteção. I. Título.</p>
	CDU 537.529


LUCAS MATTOS DE FREITAS


ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"


APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA


Prof. Dr. DANIEL JULIÁN BARROS DA SILVA SAMPAIO
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. RUBENS ALVES DIAS
Orientador/UNESP – FEG


Prof. Dr. SAMUEL EUZÉDICE DE LUCENA
UNESP – FEG


Prof. Dr. DANIEL JULIÁN BARROS DA SILVA SAMPAIO
UNESP – FEG

Março 2021

De modo especial, dedico este trabalho aos meus pais por terem me apoiado e inspirado para me manter sempre perseverante. Dedico, também, aos amigos que sempre estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter sempre estado ao meu lado e me permitir encontrar pessoas incríveis e inspiradoras em minha vida;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rubens Alves Dias pela orientação e apoio na elaboração deste trabalho, agradeço pela paciência e ajuda no desenvolvimento do meu aprendizado;

Ao Prof. Dr. Daniel Julien Barros da Silva Sampaio pelo auxílio e orientações em momentos importantes durante minha vida acadêmica;

Aos meus pais, Eva Regina e Rosabir César, que sempre me apoiaram, nos bons e maus momentos. Agradeço por serem uma fonte de inspiração em minha vida;

Aos meus amigos, Eduardo e Fernando, pelos conselhos dados e pelo apoio incondicional que tornaram este período de faculdade inesquecível;

Ao doutor Alex Mello e ao doutor Vinícius Neves pelas palavras de incentivo e pelo apoio dado, certamente fizeram com que o caminho trilhado fosse mais tranquilo;

Aos meus amigos de república e de curso pelo apoio e momentos que passamos juntos;

RESUMO

Em uma instalação elétrica, devido às descargas atmosféricas e manobras na rede elétrica, pode ser necessário o uso de dispositivos de proteção contra surtos de tensão (DPS). Este trabalho apresenta de maneira objetiva a necessidade do uso destes dispositivos, assim como funcionamento e suas vantagens. O foco principal é na aplicação destes dispositivos em sistemas fotovoltaicos, tanto do lado da corrente contínua quanto da corrente alternada, abordando um estudo das normas brasileiras para os sistemas de proteção contra descargas elétricas, instalações elétricas de baixa tensão e projetos fotovoltaicos. Por fim, apresenta a análise de um projeto fotovoltaico residencial de acordo com as normas vigentes.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema fotovoltaico. Surtos de tensão. Descargas atmosféricas. Dispositivos de proteção.

ABSTRACT

In an electrical installation due to lightning and electrical switching in the power grid, it may be necessary to use protective devices against surges. This work presents in a objective way the need to use these devices, as well as their operation and advantages. The main focus is on the application of these devices in photovoltaic systems, both on the side of direct current and alternating current, addressing a study of Brazilian standards for protection systems against electrical discharges, low voltage electrical installations and photovoltaic projects. Finally, it presents the analysis of a residential photovoltaic project according to current regulations.

KEYWORDS: Photovoltaic system. Voltage surge. Lightning strikes. Surge protection device.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de aterramento TN-S	19
Figura 2– Tipos de ligação do DPS em esquemas de aterramento TN-S.....	22
Figura 3– Forma da Onda de Impulso	23
Figura 4 – DPS do tipo Classe I.	26
Figura 5 – Comprimento máximo dos condutores do DPS	27
Figura 6 – Tipos de posicionamento do dispositivo de proteção contra sobrecorrentes para o DPS.....	28
Figura 7 – Queda de tensão indutiva nos condutores e sobretensão induzida.....	30
Figura 8 – Disposição dos DPS no arranjo fotovoltaico	39
Figura 9 – Foto do padrão de entrada da instalação fotovoltaica	42
Figura 10 – Fotografia superior da residência onde foi executado o projeto	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Suportabilidade a impulso exigido nos componentes da instalação	21
Tabela 2 – Valor de pico de corrente (primeiro impulso positivo)	33
Tabela 3 – Valores de impedâncias convencionais de aterramento Z e Z_1 em função da resistividade do solo	35
Tabela 4 – Surtos de correntes devido às descargas atmosféricas previstos em sistemas de baixa tensão	37
Tabela 5 – Suportabilidade em função da máxima tensão do sistema fotovoltaico	41
Tabela 6 – Corrente nominais e de impulso mínimas para DPS a serem utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados com o SPDA	41
Tabela 7 – Parâmetros do DPS utilizado na entrada da instalação.....	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	DPSs EM ARRANJOS FOTOVOLTAICOS	11
1.2	OBJETIVO DO TRABALHO	11
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	12
2	DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO CONTRA SURTOS DE TENSÃO (DPS)	13
2.1	VISÃO GERAL DO USO DO DPS NO ÂMBITO INTERNACIONAL	14
2.2	O PANORAMA DO USO DO DPS NO BRASIL	16
3	ASPECTOS CONCEITUAIS	18
3.1	O ATERRAMENTO	18
3.1.1	Esquema de aterramento TN-S	18
3.1.2	Normas e orientações sobre o aterramento elétrico	19
3.2	DPS: NORMAS E CARACTERÍSTICAS	20
3.2.1	Suportabilidade a impulso necessária do DPS	20
3.2.2	Localização do DPS principal na instalação	21
3.2.3	Tipo de ligação do DPS na entrada ou no quadro de distribuição principal	22
3.2.4	Parâmetros importantes do DPS	22
3.2.5	Nível de proteção (U_p)	23
3.2.6	Máxima tensão de operação contínua (U_c)	23
3.2.7	Corrente nominal de descarga (I_n)	24
3.2.8	Corrente de impulso (I_{imp})	24
3.2.9	Corrente máxima ($I_{máx}$)	25
3.2.10	Capacidade de corrente de descarga subsequente (I_{fi})	25
3.2.11	DPS: Classe I	25
3.2.12	DPS: Classe II	26
3.2.13	Condutores de conexão do DPS	26
3.2.14	Falha do DPS e proteção contra sobrecorrentes	27
3.2.15	Fatores de risco	28
3.3	COORDENAÇÃO DO DPS	28
3.3.1	Zonas de proteção	29
3.3.2	Localização do DPS	29
3.4	TENSÃO DE PROTEÇÃO	29
3.5	CORRENTES I_{IMP} E I_N DO DPS NA FRONTEIRA DA ZPR1	32

3.5.1	Surtos devido à descargas diretas na estrutura	33
3.5.2	Surtos devido à descarga direta na linha	36
3.5.3	Surtos indiretos na linha	36
3.6	CORRENTES I_n DO DPS NOS LIMITES DA ZPR2	36
3.7	PROCEDIMENTO PARA CORRETA COORDENAÇÃO DO DPS	37
3.7.1	DPS da ZPR1	38
3.7.2	DPS na ZPR2	38
3.8	O USO DE DPS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	38
3.8.1	Proteção contra tensões transitórias	38
3.8.2	Aterramento	39
3.8.3	Disposição dos dispositivos de proteção contra surtos no arranjo fotovoltaico .	39
3.8.4	Especificações do DPS em projetos fotovoltaicos	40
4	DIMENSIONAMENTO DO DPS E SEUS CONDUTORES PARA UM SISTEMA FOTOVOLTAICO	42
4.1	DPS DA ENTRADA DA INSTALAÇÃO	43
4.1.1	Tensão de proteção	44
4.1.2	Tensão de operação contínua	44
4.1.3	Corrente nominal de descarga do DPS (I_n)	45
4.1.4	Corrente de impulso do DPS (I_{imp})	45
4.2	CONDUTORES DE CONEXÃO DO PROJETO	46
4.3	DPS NA PARTE CA DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA	46
4.4	DPS UTILIZADO NA PARTE CC DO ARRANJO FOTOVOLTAICO	47
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
	REFERÊNCIAS	50
	ANEXO A	52
	ANEXO B	54
	ANEXO C	55

1 INTRODUÇÃO

Embora não muito recorrente nas instalações elétricas de residências no Brasil, os dispositivos de proteção contra surtos de tensão (DPS) assumem grande importância nos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, transferindo de maneira segura a descarga elétrica para o sistema de aterramento da instalação a qual este dispositivo tem como por objetivo proteger. Embora isto por si só seja um argumento válido para a utilização destes dispositivos, esta ideia ganha mais importância uma vez que se percebe que não apenas as descargas elétricas produzem surtos de tensão, mas também manobras na rede elétrica, como, por exemplo, o acionamento e desacionamento de motores elétricos conectados à rede elétrica. Considerando estas informações e o fato de que seja obrigatório o uso de DPS em instalações que possuam um sistema de proteção contra descargas atmosféricas (ABNT, 2015), tem-se como fundamental o estudo das normas para a aplicação destes dispositivos.

1.1 DPSs EM ARRANJOS FOTOVOLTAICOS

O Brasil é um país com alta incidência de irradiação solar, assumindo grande vantagem em relação a países europeus que aproveitam melhor este recurso natural. A tendência de que nos próximos anos a exploração de energia solar cresça permite que se observe a importância do DPS, uma vez que o Brasil possui um dos maiores índices de descargas atmosféricas do em seu território em relação com o resto do mundo. Dentro deste contexto, observa-se que a normalização dos projetos fotovoltaicos é recente no país com o lançamento da NBR 16690 (ABNT, 2019) e, portanto, é fundamental que seja feita uma clara interpretação desta norma, juntamente com as normas que antecedem esta.

1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é definir a importância da proteção contra descargas elétricas e surtos de tensão, bem como suas origens e implicações, e neste sentido, abordar as consequências da negligência dos dispositivos de proteção nas instalações elétricas, os quais são recomendados pela NBR 5410, mas ainda assim pouco utilizados no país. Pretende-se apresentar uma análise das normas requeridas para a escolha de dispositivos de proteção contra surtos de tensão (DPS) nas instalações elétricas, visando à proteção dos bens materiais e da vida humana. Tem-se também como objetivo apresentar os parâmetros requeridos para a

escolha dos dispositivos de proteção contra surtos de tensão em sistemas fotovoltaicos, tanto na parte de corrente contínua (CC) quanto na parte de corrente alternada (CA). Por fim, aplicar as informações apresentadas em um projeto real de um sistema fotovoltaico em uma residência.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é dividido em cinco capítulos, no qual o Capítulo 2 apresenta uma visão geral das origens e implicações dos surtos de tensão que podem causar prejuízos e a importância do uso de DPS nos sistemas fotovoltaicos no Brasil e no Mundo.

O capítulo 3 é composto por uma análise de critérios importantes e obrigatórios para a escolha de um DPSs em uma instalação elétrica em geral e para um arranjo fotovoltaico. Ele possui uma análise voltada à NBR 5410 (ABNT, 2004), à NBR 5419 (ABNT, 2015) e à NBR 19690 (ABNT, 2019). O capítulo 4 apresenta uma análise de um sistema fotovoltaico localizado no município de Mairinque-SP, de acordo com o que foi apresentado no capítulo 3. E, finalmente, no capítulo 5 são realizadas considerações finais sobre o estudo desenvolvido.

2 DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO CONTRA SURTOS DE TENSÃO (DPS)

Os surtos de tensão na rede elétrica ocorrem devido às descargas atmosféricas e manobras nos circuitos elétricos da rede. As descargas atmosféricas podem causar surtos de forma direta na rede elétrica ou de forma indireta, através da indução eletromagnética (SILVA NETO, 2004) causada pelas correntes elétricas geradas pela descarga. As manobras elétricas são mudanças na rede elétrica que promovem os surtos de tensão.

A descarga atmosférica é uma conversão de energia eletrostática em energia eletromagnética, térmica e acústica, assume grande valores de campo elétrico nos arredores da nuvem, próximos de 10 kV/m, aproximadamente 100 vezes maior do que em condições normais. A corrente elétrica em uma descarga elétrica corresponde por pulsos com valor de pico na ordem de 1 kA, com duração de 1 ms espaçados por intervalos de 20 a 50 ms, o que produz uma corrente média de centenas de Amperes (CREDER, 2016).

Dado as características de uma descarga atmosféricas, observa-se a importância de métodos de proteção, o primeiro modelo criado foi o de um para-raios, dispositivo que é considerado como invenção de Benjamim Franklin, cientista e político americano, que em 1752, estima-se que tenha utilizado um fio metálico em uma pipa e realizou a observação de uma descarga atmosférica através do fio, evento este que na época comprovou que os raios são uma corrente elétrica em grandes proporções. Este episódio da pipa é considerado por muitos apenas como um ensaio mental de Franklin, uma vez que este experimento poderia ter custado sua vida. Ele observou que hastes posicionadas próximas a prédios absorviam as descargas atmosféricas e protegiam os prédios, estava então projetada a primeira ideia de um para-raios que anos mais tarde foi implementado na Europa. O princípio de funcionamento do dispositivo é absorção da descarga pela terra, deste princípio partem os estudos de projeto, tanto de para-raios como de outros dispositivos de proteção contra surto. Destaca-se, portanto, a importância do aterramento (HEINISCH, 2019).

As manobras do circuito elétrico geralmente estão relacionadas à ativação e desativação de grande quantidade de cargas que armazenam energia indutiva ou capacitiva na rede elétrica (SAMARAS, K. et al., 2005). Esta variação de cargas pode ser causada, por exemplo, por acionamentos de motores elétricos e acoplamento e desacoplamentos de transformadores nas redes elétricas.

Descargas elétricas e manobras elétricas causam nas instalações elétricas prejuízos na ordem de milhões de reais por ano no Brasil (RODRIGUES, 2017), fator que torna os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA), muito importantes em projetos

de instalações elétricas residenciais, comerciais e industriais. De maneira geral, o SPDA tem como objetivo proteger a instalação elétrica de uma edificação por intermédio da captação e direcionamento da corrente elétrica proveniente das descargas atmosféricas para o sistema de aterramento, o qual é dividido em sistema externo e interno, sendo o externo, os para-raios, uma composição de captadores, condutores de descida e aterramento, e o interno é composto por dispositivos de proteção contra surtos elétricos (DPS) que reduzem efeitos indesejáveis das descargas atmosféricas e das manobras elétricas na instalação elétrica (SOUZA, 2012). O DPS é constituído de um varistor, material que apresenta resistência elétrica variável em função da tensão elétrica aplicada sobre ele. Portanto, através de um aterramento elétrico consistente, o uso de DPSs é fundamental para a proteção contra descargas elétricas naturais e sobretensões transitórias causadas por manobras em circuitos elétricos.

Para locais onde haja incidência de raios próximos ou diretamente na instalação é necessário o uso de mecanismos de proteção, que proteja a edificação contra os surtos diretos e indiretos, sendo os surtos diretos caracterizados como uma situação em que a descarga atmosférica atinge diretamente a edificação, submetendo-a elevados níveis de tensão que gerarão altas correntes que circularão pela estrutura e, inclusive, pela instalação elétrica. Pode, ainda, haver ainda valores consideráveis de tensão entre aterramentos diferenciados, podendo prejudicar os equipamentos que os utilizam, fato que torna necessário a utilização de um aterramento único.

2.1 VISÃO GERAL DO USO DO DPS NO ÂMBITO INTERNACIONAL

De acordo com Mueller e Graff (1998), em 1995, nos Estados Unidos, 30% da energia gerada era controlada por eletrônica de potência, e em 1998, a projeção para o ano 2000 era de que se alcançasse entre 60 e 70% da dependência da eletrônica de potência, o que torna o sistema, como um todo, mais sensível aos surtos de tensão. Além disso, surtos de tensão de valor maior que o dobro da tensão nominal de microprocessadores pode comprometer o funcionamento do mesmo. Surtos de valor menor do que o dobro da tensão nominal podem ainda causar efeitos ruins para o sistema, mesmo assim. Observa-se que filtros para grandes cargas não são recomendados devido ao fato de que para altas correntes seria necessário grande número de filtros, o que torna o procedimento muito caro. Por outro lado, o uso de DPSs em paralelo não é dimensionado para uma corrente ou carga específica, e são mais econômicos para proteger uma carga em específico.

Em um projeto de implementação do DPS, faz-se muito importante a presença de um aterramento adequado, sendo que 80% dos problemas de qualidade de energia são devido ao aterramento irregular. Faz-se importante também o uso de DPSs além de rede elétrica, como nas instalações telefônicas, antenas de televisão e similares. Por fim, Mueller e Graff (1998) observam que o uso de DPS deve ser coordenado. Isto é, a utilização de apenas um DPS na entrada de uma instalação pode resultar em ruídos de tensão capazes de causar danos a equipamentos mais sensíveis, portanto, torna-se necessário o uso de DPS, mais sensíveis a estes ruídos, dentro da construção que se deseja proteger.

Nas instalações elétricas industriais foi observado que condutores elétricos torcidos entre si resultam em uma menor autoindutância, e isto faz com que a tensão de passagem do DPS seja menor. Em condutores de 3 pés de comprimento (Aproximadamente 0,9144m), quando torcidos houve uma redução de 23% da tensão de passagem, que na condição normal era em torno de 900V. Porém, observou-se que a redução do comprimento dos condutores elétricos fez com que a tensão de passagem fosse 75% menor, o que possibilita concluir que o comprimento é um dos parâmetros mais importantes. Uma vez que a indutância ocorre devido ao efeito pelicular, pouca influência é obtida pela variação da secção do condutor, não sendo, portanto, pertinente executar variações neste parâmetro em um projeto devido somente a autoindutância. A supressão de corrente por fase em uma instalação elétrica deve ser de no máximo 250kA por fase, e em instalações de grande altura, este valor pode ser reduzido devido a presença de mais caminhos para a dispersão da descarga elétrica. Observa-se, portanto, que o uso de DPSs com corrente de supressão maior do que 250 kA é desnecessário e injustificável economicamente.

Os DPSs ganham grande importância também nas fazendas de energia solar, locais estes que por serem grandes campos abertos estão sujeitos a descargas atmosféricas que podem causar grande prejuízo nestas fazendas, uma vez que o equipamento é caro e sensível a surtos de tensão. Isto é fator de muita preocupação em muitos países, principalmente em países com alta incidência de raios por ano, como é o caso da Malásia e, portanto, devido ao interesse pela proteção dos sistemas fotovoltaicos observou-se que, conforme descrito anteriormente, o comprimento dos condutores que conectam o painel solar, o inversor de frequência e os transformadores (parte em corrente alternada – CA) impacta na tensão induzida em um ensaio de descarga elétrica, porém não de modo tão significativo. Neste mesmo estudo, define-se como uma medida segura o uso de um DPS adicional entre a parte em corrente contínua – CC (placa solar e inversor) e, se necessário, outro adicional entre a parte CA (inversor e transformador), caso o comprimento dos condutores seja maior do que 10 metros. A avaliação

é individual, se apenas um lado exceder 10 metros, apenas este necessitará de um DPS a mais. Na parte CC, o primeiro DPS é instalado nas proximidades da placa solar e o outro no terminal do inversor, e na parte CA, o primeiro é instalado nas proximidades do transformador e o segundo no inversor (ZAINI, N. H. *et al.*, 2018).

Conclui-se que será necessária a adição de outras classes de DPS, isto é, que se comportam de maneira diferente em relação ao surto elétrico, com a intenção de garantir uma proteção com qualidade e confiabilidade.

2.2 O PANORAMA DO USO DO DPS NO BRASIL

No Brasil, um país com altíssimas taxas de descargas atmosféricas por ano, principalmente por se tratar de um país tropical, o uso do DPS é muito importante, porém muitas vezes negligenciado e apesar de requerer conhecimento específico e profissional qualificado na escolha do DPS para se garantir o dimensionamento correto de um projeto que contenha este dispositivo, o uso de DPS deveria ser mais popularizado. Conforme já mencionado, os surtos de tensão são causados por descargas atmosféricas e por manobras na rede, como, por exemplo, em um prédio onde a partida frequente do motor de um elevador pode causar picos de tensão na rede e, portanto, em longo prazo pode prejudicar os circuitos e equipamentos elétricos dos moradores do mesmo, bem como das redondezas.

É importante observar que em prédios em que se esteja projetando o uso de para raios estruturais torna-se fundamental o uso de DPS, uma vez que estes para raios podem receber descargas atmosféricas que poderão induzir tensões nas redes elétricas, primária e secundária, ao redor do prédio (SILVA NETO, 2004). A análise dos riscos e orientação sobre a necessidade de DPS em um projeto elétrico, no Brasil, é regulamentada e orientada pela NBR 5419-3, assim como a análise do uso de DPS para equipamentos eletrônicos mais sensíveis e a devida coordenação entre diferentes tipos de classe de DPS é tratada pela 4ª parte desta norma, a NBR 5419-4 (ABNT, 2015).

De acordo com Stilpen e Cheng (2015), o Brasil é um dos países do mundo com maior irradiação solar, aproximadamente entre 1500 e 2500 kWh/m², enquanto países europeus com índices de irradiação solar menores, como por exemplo, a Alemanha apresentando entre 900 e 1250 kWh/m², a Espanha entre 1200 e 1850 kWh/m² e a França entre 900 e 1650 kWh/m², tem melhor aproveitamento deste recurso natural. A potência instalada em território nacional é de aproximadamente 15 MWp¹, enquanto Alemanha, Espanha e França, têm, respectivamente, 35700, 5350 e 4670 MWp. Apesar destas informações, este cenário poderá

mudar nos próximos anos, com a evolução da tecnologia e redução dos custos de projetos fotovoltaicos, aumento da energia elétrica proveniente de outras fontes e incentivo político-ambiental para redução da /poluição causada pela produção de energia elétrica, comum nos sistemas convencionais, estima-se que a energia fotovoltaica seja mais explorada no Brasil, uma vez que o país tem este recurso em abundância.

3 ASPECTOS CONCEITUAIS

No desenvolvimento de projetos com a presença de DPS, é necessário o prévio conhecimento sobre determinados conceitos básicos de eletricidade e conceitos um pouco mais elaborados, como a importância e funcionamento do aterramento elétrico, elemento fundamental e indispensável em um projeto com DPS, assim como é responsável pela segurança de instalações elétricas em geral. É necessário também conhecimentos sobre tensões transitórias e indução eletromagnética, com a intenção de se compreender as razões dos surtos de tensão e como neutralizá-los da maneira mais eficaz e segura possível. Por último, é importante a noção do funcionamento dos DPS, suas características e classes, assim como é fundamental saber quais exigências e orientações as normas regentes, NBR 5419 (ABNT, 2015) e NBR 5410 (ABNT, 2004) oferecem em relação a projetos e instalações envolvendo o uso de DPS.

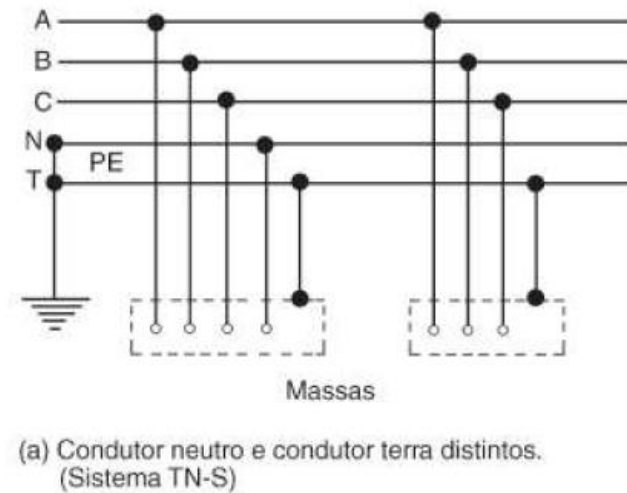
3.1 ATERRAMENTO

O aterramento é a ligação das estruturas e a instalação com a terra, com o objetivo de criar uma referência para a rede elétrica e permite que correntes de diversas naturezas sejam conduzidas para a terra e, portanto, o aterramento é de fundamental importância para os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, tanto Para-Raios quanto DPS. Há dois tipos de aterramentos, o aterramento que visa a funcionalidade da instalação ao conectar o condutor neutro à terra e o aterramento que visa a proteção, por meio da conexão à terra de todo material condutor que não pertença a instalação, promovendo assim a proteção contra choques elétricos (CREDER, 2016).

3.1.1 Esquema de aterramento TN-S

O aterramento do tipo TN tem como principal característica o fato de ter um ponto de alimentação diretamente aterrado, sendo as massas da instalação conectadas a este ponto por condutores de proteção. Na configuração TN-S, tem-se o neutro aterrado na entrada da instalação elétrica, junto com um condutor de proteção, estes serão tratados a partir deste ponto de forma separada, tendo apenas conexão neste ponto. O esquema é representado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema de aterramento TN-S



Fonte: Creder (2016).

3.1.2 Normas e orientações sobre o aterramento elétrico

O aterramento elétrico é item obrigatório em um projeto de instalação elétrica, pois garante a segurança e proteção contra choques elétricos e descargas elétricas e, portanto, está diretamente relacionado com os sistemas de proteção contra surtos elétricos. É indispensável que o SPDA da instalação esteja conectado ao sistema de aterramento da mesma e isso está relacionado com a equipotencialização¹, a qual é uma característica muito importante em um sistema de aterramento. Na entrada da alimentação deve haver o barramento de equipotencialização principal (BEP) e nele deve conter um barramento de aterramento que será considerado o principal, isto é, todos os elementos, a seguir, devem ser conectados direta ou indiretamente a ele:

- Armadura de concreto armado e quaisquer outras estruturas metálicas da edificação;
- Tubulações de água, gás combustível, de esgoto, de sistemas de ar-condicionado, de gases industriais, de ar comprimido, de vapor, assim como, qualquer estrutura metálica conectada a estas tubulações.
- Condutores metálicos de energia e sinal que entram e, ou, saem na instalação;
- Condutores de interligação que sejam de outros eletrodos de aterramento;

¹ A equipotencialização é a união das partes condutoras do sistema de aterramento de modo que em todas as partes tenham o mesmo potencial elétrico. Esta característica é fundamental em um sistema de aterramento.

- Condutores de interligação que sejam de eletrodos de aterramento de edificações vizinhas, no caso desta interligação for recomendável ou necessária;
- O condutor neutro da alimentação elétrica, a não ser que ele não exista ou, caso a edificação seja alimentada em esquema TT ou IT;

3.2 DPS: NORMAS E CARACTERÍSTICAS

Se a instalação elétrica for alimentada por uma linha aérea ou, ela possuir uma linha aérea, e se situar em uma região sob condição de influência externa do tipo AQ2 (região com mais de 25 dias de trovoadas por ano) ela deverá possuir proteção contra sobretensão. Caso a descrição anterior não seja verdadeira, deverá ser levado em consideração se a instalação está em uma condição de influência externa do tipo AQ3 (exposição dos componentes da instalação), neste caso, devido à elevação do risco, torna-se necessário também a utilização de métodos de proteção contra sobretensão. Nos demais casos não é obrigatória a utilização de métodos de proteção (SIEMENS, 2017).

3.2.1 Suportabilidade a impulso necessária do DPS

O DPS deve possuir uma suportabilidade a impulso de sobretensão que varia de acordo com a tensão elétrica da instalação e a função do DPS. Por exemplo, o DPS que é utilizado na entrada da instalação é o que há de sofrer maior impacto da sobretensão, por isso sua suportabilidade deve ser a maior, porém em ramos terminais este valor diminui e o DPS de uso específico a redução é menor ainda. Os valores mínimos deste parâmetro extremamente importante para a correta escolha do DPS são descritos na Tabela 1. Por fim, estes valores menores conforme adentro da instalação se justificam, de acordo com a NBR 5410 (ABNT, 2004), pela tensão residual que o primeiro DPS de maior suportabilidade deixa passar.

A Tabela 1 reporta-se à suportabilidade a impulso da tensão aplicada, conforme a categoria do produto, sendo: os produtos da categoria I (produtos especialmente protegidos) são equipamentos que possuem uma proteção específica externa. Os produtos de categoria II (equipamentos de utilização) são os produtos que serão conectados diretamente a linha elétrica da edificação e são os eletrodomésticos em geral. Os produtos da categoria III (produto a ser utilizado em circuitos de distribuição e circuitos terminais) são os equipamentos da instalação propriamente dita, como por exemplo, disjuntores, quadros de

distribuição, bem como, equipamentos de uso industrial, como motores elétricos unidos fixamente à instalação. Por último, os produtos da categoria IV (produto a ser utilizado na entrada da instalação) são os medidores de energia, dispositivos gerais de seccionamento e proteção, entre outros.

Tabela 1 – Suportabilidade a impulso exigido nos componentes da instalação

Tensão nominal da instalação (V)		Tensão de impulso suportável requerida (kV)			
		Categoria do Produto			
Sistemas trifásicos	Sistemas monofásicos com neutro	Produto a ser utilizado na entrada da instalação	Produto a ser utilizado em circuitos de distribuição e circuitos terminais	Equipamentos de utilização	Produtos especialmente protegidos
		Categoria de suportabilidade a impulsos			
		IV	III	II	I
120/208 127/220	115-230 120-230 127-254	4	2,5	1,5	0,8
220/380, 230/400, 277/480	---	6	4	2,5	1,5
400/690	---	8	6	4	2,5

Fonte: ABNT (2004).

3.2.2 Localização do DPS principal na instalação

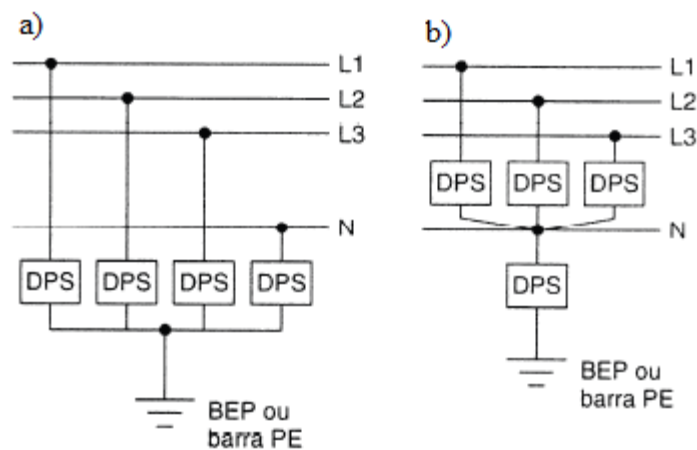
Quando a instalação está sujeita a descargas atmosféricas por meio da linha externa ou sobretensões causadas por manobras na rede, o DPS deverá estar na entrada principal da instalação ou no quadro de distribuição mais próximo da entrada. Caso o DPS esteja sujeito a descargas atmosféricas diretas na edificação ou nas suas proximidades, deverá ser instalado o DPS principal na entrada da instalação (ABNT, 2004). Vale lembrar que o DPS principal é o

responsável por atenuar mais efetivamente as sobretensões, o que ele deixa passar são ruídos que serão tratados por DPS de outras classes, se necessário.

3.2.3 Tipo de ligação do DPS na entrada ou no quadro de distribuição principal

Quando a instalação tiver o condutor neutro aterrado no padrão de entrada, a configuração dos DPS deverá ser apenas entre as fases e o barramento de proteção. Em esquemas TN-S, a configuração dos DPS deverá ser conforme a Figura 2.

Figura 2 – Tipos de ligação do DPS em esquemas de aterramento TN-S



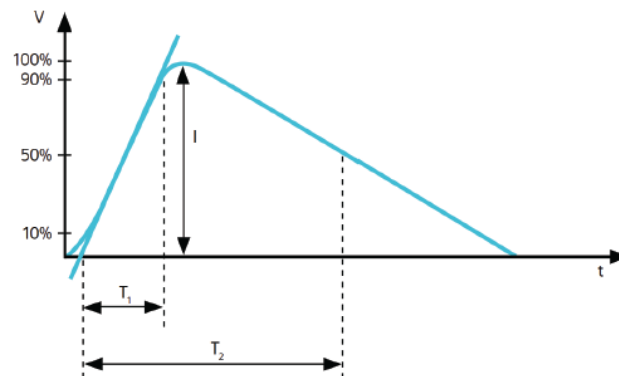
Fonte: ABNT (2004).

3.2.4 Parâmetros importantes do DPS

O comportamento das descargas atmosféricas diretas geralmente tem um formato do tipo 10/350 μ s, já as descargas indiretas (causadas por manobras elétricas e tensões induzidas na rede) tem o formato do tipo 8/20 μ s, isto é, o primeiro número refere-se ao tempo de subida para atingir o pico da tensão e o segundo número refere-se ao tempo para que durante a queda da tensão atinja-se 50% da tensão de pico. Conforme mostrado na Figura 3, onde “T1” é o tempo de subida, “T2” o tempo que leva para que a partir do valor de pico se atinja 50% do mesmo e I é o valor de pico (SIEMENS, 2017).

Dado que os valores de pico das descargas diretas são consideravelmente maiores do que os valores das descargas indiretas, e adicionando-se esta informação de como é realizada a descarga ao longo do tempo, percebe-se que as descargas diretas, mesmo que menos incidentes tem potencial para causar enormes prejuízos se não forem tratadas adequadamente.

Figura 3 – Forma da Onda de Impulso



Fonte: SIEMENS (2017).

3.2.5 Nível de proteção (U_p)

O primeiro parâmetro do DPS que a NBR 5410 trata é o nível de proteção, este item refere-se ao nível de tensão que o DPS deixa passar e está relacionado com a tensão de impulso suportável, discutida na sessão 3.2.1 deste trabalho. Em uma instalação com tensão de impulso suportável de 1,5 kV, por exemplo, o nível de proteção do DPS não poderá ser maior do que este valor, caso contrário, a instalação estaria sujeita a tensões maiores que a suportável. Caso não seja possível alcançar o nível de proteção desejável, poderá ser usado DPS suplementares, desde que estejam coordenados.

3.2.6 Máxima tensão de operação contínua (U_c)

É a máxima tensão eficaz de operação contínua que pode ser atribuída aos terminais do DPS (SIEMENS, 2017). Por exemplo, em uma instalação elétrica trifásica com tensão de fase de 127 V, o DPS a ser utilizado deverá ser superior à máxima tensão de operação contínua. e a norma brasileira NBR5410 regula o valor mínimo desta tensão. Para um DPS conectado em um aterramento do tipo TN-S, a tensão de operação contínua em dispositivos conectados entre fase-neutro, fase-terra deverá ser 10% maior do que a tensão de fase da instalação, já entre neutro-terra, deverá ser superior ao valor de fase da instalação.

Portanto, deve-se adotar um DPS que possua tensão máxima de operação contínua superior ou igual ao valor exigido pela NBR 5410, valor este que dependerá da conexão a ser utilizada e do aterramento. Como antes citado, por exemplo, no esquema TN-S, o DPS que é localizado entre o condutor neutro e o condutor de proteção possuirá valor de U_c igual à

tensão de fase da instalação, enquanto a U_c dos DPSs que são localizados entre condutores de fase e neutro ou entre condutores de fase e condutores de proteção deverão possuir no mínimo uma U_c 10% maior do que a tensão de fase da instalação.

3.2.7 Corrente nominal de descarga (I_n)

A corrente nominal de descarga está relacionada à qualidade com que o DPS reage a descargas indiretas e, portanto, assume significativa importância em tais dispositivos de classe II ou classe I e II, isto é, DPS combinado que desempenha dupla função (SIEMENS, 2017). Adiante será discutido mais sobre as diferenças das classes de DPS, mas por enquanto basta o entendimento que a classe II está ligada a proteção de descargas indiretas e sobretensões causadas por manobras na rede elétrica, enquanto a classe I está relacionada e destinada à proteção de descargas diretas. Esta forma de onda geralmente é do formato 8/20 μ s, e o DPS é projetado para que suporte no mínimo 15 sobretensões que atinjam o valor de I_n .

Quando o DPS for destinado a, e somente a, proteger a instalação elétrica de sobretensões provenientes da linha externa ou causadas por manobras, a corrente nominal de sobrecarga deverá ser maior ou igual a 5 kA em cada DPS. Caso o DPS seja usado entre o condutor PE e o condutor neutro, I_n deverá ser igual ou superior a 20 kA em redes trifásicas ou 10 kA em redes monofásicas, conforme é exigido e orientado pela NBR5410 (ABNT, 2004).

3.2.8 Corrente de impulso (I_{imp})

A corrente de impulso é um dos parâmetros relacionados às descargas diretas que o DPS estará sujeito, o formato de onda que uma sobretensão deste tipo causa geralmente é do tipo 10/350 μ s. A corrente de impulso deverá ser determinada pela norma internacional da IEC (*International Electrotechnical Commission*), mais precisamente a IEC 61312-1, mas caso não seja possível determiná-la por este meio, a corrente de impulso não deverá ser inferior a 12,5 kA para cada DPS. Caso a ligação do DPS seja realizada conforme a Figura 2, item b, deverá ser também determinada pela norma da IEC supracitada, porém não sendo possível, a corrente de impulso nesta situação não deverá ser inferior a 50 kA em uma rede trifásica ou 25 kA em uma rede monofásica (ABNT, 2004).

Caso o DPS seja utilizado com dupla função, isto é, com a intenção de proteger contra descargas indiretas, surtos de tensão causados por manobras na rede e descargas diretas, as exigências de cada situação deverão ser atendidas simultaneamente.

3.2.9 Corrente máxima ($I_{m\acute{a}x}$)

Corresponde ao máximo valor de corrente causada por sobretensões indiretas que o dispositivo deverá suportar, sendo uma vez atingida o dispositivo normalmente não funcionará mais (SIEMENS, 2017).

3.2.10 Capacidade de corrente de descarga subsequente (I_{fi})

É o nível de corrente elétrica ideal que garante o correto funcionamento de DPS do tipo I ou tipo I e II (integrado). A NBR 5410 recomenda que esta característica seja maior que a corrente de curto-circuito presumida no ponto da instalação em que o DPS será instalado, porém mais especificamente para DPS usados entre condutores neutro e condutores de proteção, a corrente de descarga subsequente deverá ser maior do que 100A.

3.2.11 DPS: Classe I

A classe I do DPS é destinada para a proteção contra descarga diretas e a instalação deste tipo é feita na entrada da instalação. Este modelo é mais adequado para grandes descargas de corrente, são muito utilizados em indústrias e comércios.

Os principais parâmetros para a determinação de um DPS classe I são: corrente de impulso (I_{imp}), tensão máxima de operação contínua (U_c) e tensão nominal de rede (U_n) (SIEMENS, 2017).

Figura 4 – DPS do tipo Classe I.



Fonte: SIEMENS (2017).

3.2.12 DPS: Classe II

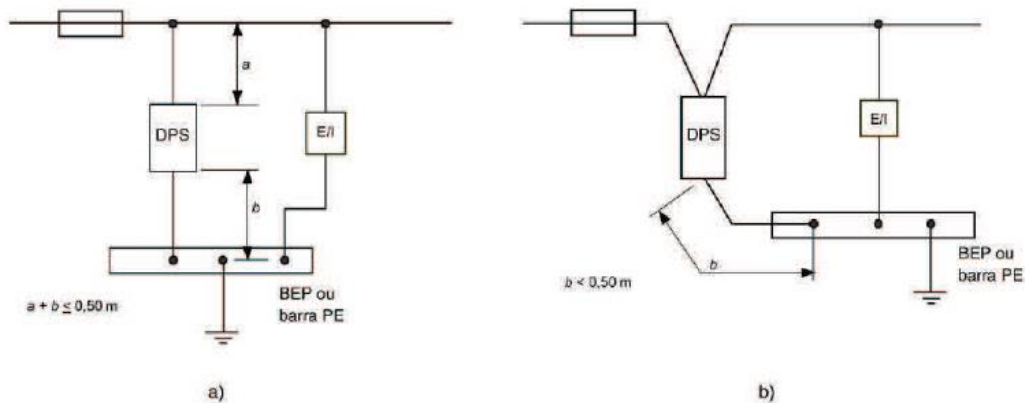
A classe II do DPS é destinada para a proteção contra as descargas indiretas e manobras na rede elétrica que podem gerar surtos de tensão na instalação. Este modelo é mais utilizado em residências e pequenos imóveis comerciais e de serviço. Em estabelecimentos sujeitos às descargas diretas que possuam DPS classe I, este será complementado pelo DPS classe II.

Os principais parâmetros para a determinação de um DPS classe II são: corrente nominal (I_n), corrente máxima ($I_{máx}$), tensão nominal (U_n) e tensão máxima de operação contínua (U_c) (SIEMENS, 2017).

3.2.13 Condutores de conexão do DPS

Nesta parte do processo de instalação do DPS deve-se usar o menor comprimento possível em cada condutor de conexão entre os condutores (fase, neutro e de proteção) da rede e o DPS no local da instalação do DPS (Na entrada da instalação ou no quadro de distribuição principal.). Mais especificamente este valor não deverá exceder 0,5 m no total (Figura 5-a), para uma conexão onde os condutores da instalação não sejam modificados, caso este valor exceda, se poderá usar um método alternativo (Figura 5-b), onde os condutores fase e neutro são levados a conexão com o DPS e apenas um condutor é usado para conectar o DPS ao barramento de proteção, neste caso deverá ser menor do que 0,5 m. Estas situações estão descritas na Figura 5.

Figura 5 – Comprimento máximo dos condutores do DPS



Fonte: ABNT (2004).

De acordo com a NBR 5419, parte 4, os condutores de aterramento dos DPS devem ser no mínimo: 16 mm² para DPS classe I, 6 mm² para DPS classe II e 1 mm² para DPS classe III.

3.2.14 Falha do DPS e proteção contra sobrecorrentes

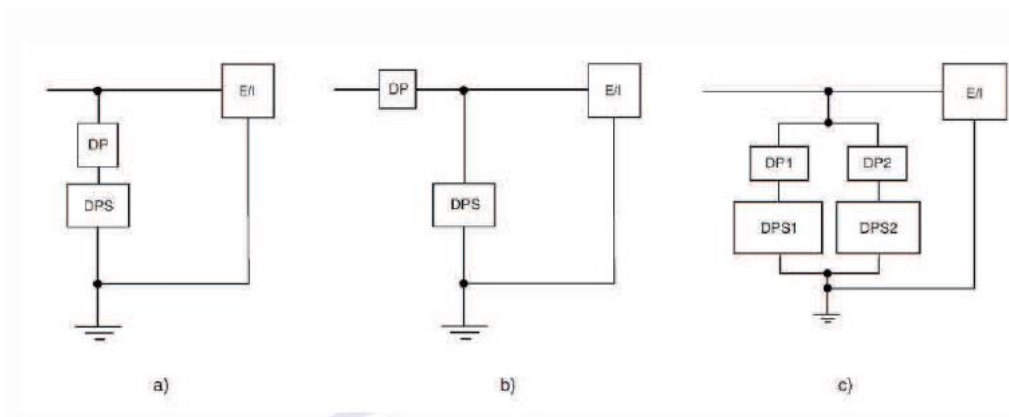
O DPS está sujeito a falhas e, portanto, deve-se projetá-lo de maneira que em caso de curto-circuito o sistema possua mecanismos de proteção. Existem conexões possíveis de acordo com a NBR 5410 para efetuar esta proteção, a primeira é a possibilidade de conectar um dispositivo de proteção contra sobrecorrentes² (DP) ao ramo do DPS, sendo assim, quando ele falhar, ele é desconectado da instalação. A desvantagem deste modelo é que uma vez desconectado a instalação perde a proteção contra sobretensões. Outra conexão possível é conectar o DP da própria instalação para proteger o DPS de eventuais falhas. Nesta situação, caso o DPS falhe, toda a instalação será desconectada com a rede elétrica externa, eliminando qualquer sobretensão proveniente da mesma e mantendo a instalação protegida.

As duas situações anteriormente descritas diferem no aspecto da continuidade da instalação. Em uma situação em que não seja conveniente a desabilitação da alimentação elétrica da instalação, a NBR 5410 permite que se use uma terceira configuração, cuja estrutura é semelhante à primeira situação, isto é, com o DP do DPS apenas desabilitando-o e não alterando a conexão da instalação com a rede elétrica. Porém, nesta situação se usará dois DPS em paralelo com seus respectivos dispositivos de proteção (DP). Esta configuração

² Disjuntor geral próprio da instalação ou adicional, conforme a configuração adotada.

garante maior confiabilidade, pois a chance de os dois dispositivos falharem no mesmo instante é menor, e torna-se viável que seja feita manutenção sem ter que desabilitar toda a instalação. Estas situações encontram-se na Figura 6.

Figura 6 – Tipos de posicionamento do dispositivo de proteção contra sobrecorrentes para o DPS.



- Proteção que não desconecta instalação ou equipamento da rede quando o DPS falha.
- Proteção que desconecta instalação ou equipamento da rede quando o DPS falha.
- Proteção semelhante a do tipo a), porém com redundância e maior confiabilidade.

Fonte: ABNT (2004).

3.2.15 Fatores de risco

A NBR-5419 trata sobre os fatores de risco e, resumidamente, informa que quando os riscos aos seres vivos ou o risco de danos físicos devido a descargas atmosféricas nas estruturas ou nas linhas de transmissão forem menores que o tolerável, poderá ser utilizado apenas o DPS como medidas de proteção contra descargas atmosféricas.

3.3 COORDENAÇÃO DO DPS

A parte 4 da NBR 5419 (ABNT, 2015), trata sobre a coordenação de DPS em um projeto SPDA, dentre muitos fatores importantes, a norma inicialmente trata sobre a questão de o uso de DPS não ser suficiente caso seja necessária uma blindagem eletromagnética, isto é, em sistemas sensíveis a perturbações magnéticas poderá ser necessário um projeto mais elaborado, com o uso de condutores blindados.

3.3.1 Zonas de proteção

As zonas de proteção em um sistema SPDA são extremamente importantes, e em um projeto de proteção contra surtos elas também possuem grande importância. As zonas de proteção contra raios são divididas em duas partes, as externas e as internas, as zonas externas são divididas em ZPR 0_A, onde os sistemas internos estão sujeitos às descargas diretas e influência do campo eletromagnético gerado e, portanto, podem receber correntes de surto na sua totalidade, e ZPR 0_B, em que os sistemas internos estão sujeitos à influência gerada pelo campo eletromagnético, portanto são correntes de surto parciais.

As zonas internas, que são protegidas contra descargas diretas, são divididas em dois grupos, a ZPR 1, onde a corrente de surto é atenuada pela distribuição de DPS e blindagens instaladas nas fronteiras das zonas, e a zona ZPR 2, região em que os efeitos das descargas elétricas podem ser mais atenuados, seja pelo uso de DPS adicional ou por maior nível de isolamento (ABNT, 2015).

3.3.2 Localização do DPS

De uma maneira objetiva, quanto mais próximo o DPS estiver da linha de entrada mais equipamentos protegerá e quanto mais próximo ele estiver do equipamento a ser protegido mais eficaz será sua proteção. Esta distância importa tanto que será decisiva para determinar algumas características do DPS a ser escolhido.

3.4 TENSÃO DE PROTEÇÃO

A tensão de proteção do DPS é definida de acordo com a tensão de impulso suportada pelo equipamento (U_w) e pela distância dos condutores de conexão do DPS e do circuito que conecta o DPS ao equipamento a ser protegido.

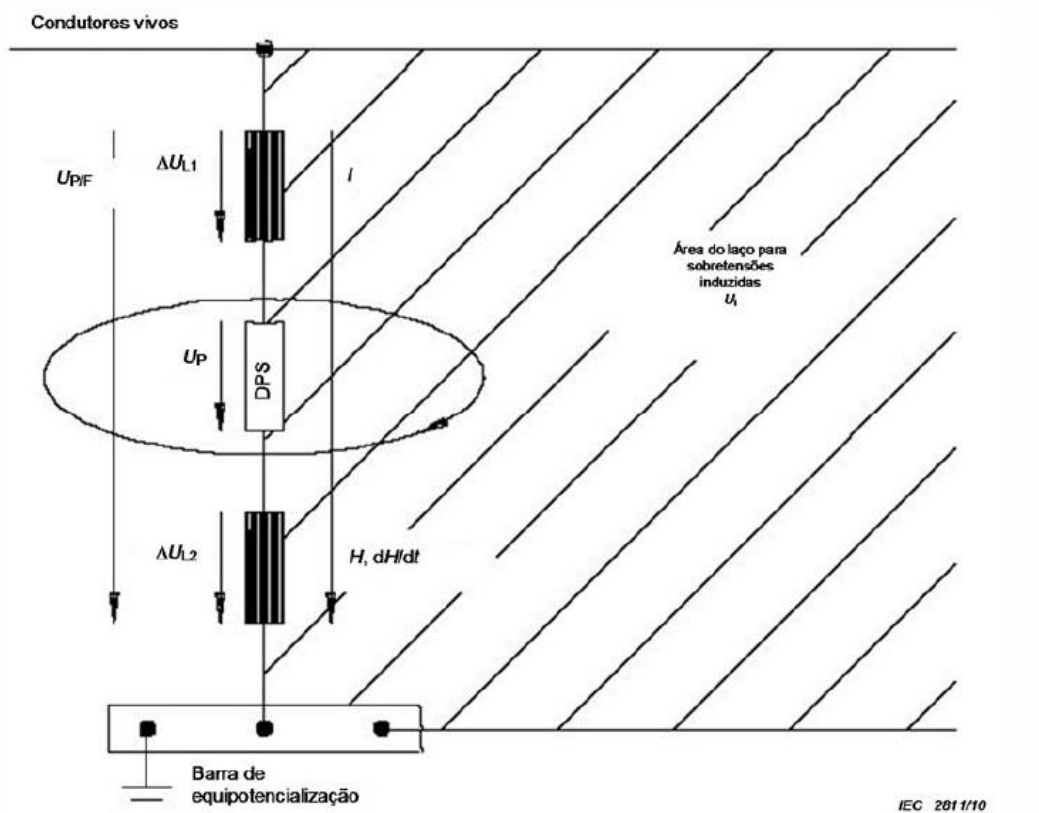
A tensão de proteção final ($U_{P/F}$) que é de fato a tensão que o DPS fará com que aja sobre o equipamento é definida pela soma de U_p do DPS com a queda de tensão indutiva nos condutores do DPS (ΔU).

A escolha de um DPS com U_p menor que U_w fará com que a probabilidade de falha do equipamento diminua e prolongue sua vida útil.

A tensão U_w que o equipamento pode suportar deve ser informada pelo fabricante e estar de acordo com a norma do produto, ou seja, deverá ser maior ou igual (ABNT, 5410).

Quando o DPS é utilizado na entrada da linha, assume-se um ΔU proporcional ao comprimento dos condutores do DPS que o conectam ao condutor vivo e ao barramento de proteção.

Figura 7 – Queda de tensão indutiva nos condutores e sobretensão induzida



Fonte: ABNT (2015).

A queda de tensão indutiva nos condutores neste caso é medida pela soma de ΔU_{L1} e ΔU_{L2} , conforme representados na Figura 7. Conforme a NBR-5419, parte 4, (ABNT, 2015) esta tensão na entrada na linha será 1kV/m de comprimento dos condutores que conectam o DPS ao BEP e ao condutor vivo. Porém, para linhas elétricas com 5 metros ou menos de comprimento, será adotada a equação (1).

$$U_{P/F} = 1,2 \cdot U_P \quad (1)$$

sendo:

$U_{P/F}$: tensão de proteção final [V];

U_P : tensão de proteção do DPS [V];

Quando o DPS for projetado para surtos indiretos, ΔU será desprezado. Em linhas muito longas a sobretensão no terminal do equipamento poderá atingir valores de até o dobro de $U_{P/F}$, isto é, mesmo sendo bem dimensionado o valor de U_P , poderá haver falha no equipamento.

A sobretensão induzida (U_I) é causada pela descarga atmosférica que incide sobre a estrutura, tem correlação com o formato da estrutura da edificação, distanciamento de PE e condutores vivos, dentre outros parâmetros. Esta sobretensão é tratada pelo Anexo A da NBR 5419 (ABNT, 2015) e assumirá importância no caso de circuitos (entre o DPS e o equipamento a ser protegido) com mais de 10 metros de comprimento.

A primeira situação é aquela em que o comprimento do circuito for negligenciável, isto é, pode-se usar o DPS nos terminais do equipamento. Nesta situação a equação (2) deverá ser satisfeita.

$$U_{P/F} \leq U_W \quad (2)$$

sendo:

$U_{P/F}$: tensão de proteção final [V];

U_W : tensão de impulso suportada pelo equipamento protegido [V];

Quando o circuito tiver comprimento menor do que 10 metros, isto é, geralmente instalado em um quadro secundário ou na tomada de energia, a equação (3) deverá ser satisfeita.

$$U_{P/F} \leq 0,8 \cdot U_W \quad (3)$$

sendo:

$U_{P/F}$: tensão de proteção final [V];

U_W : tensão de impulso suportada pelo equipamento protegido [V];

Porém, em casos em que danos no sistema interno possam implicar em risco de perda de vida humana ou a perda de serviço público (ABNT, 2015), deverá ser considerada a duplicação da tensão devido à oscilação e a equação (4) deverá ser satisfeita.

$$U_{P/F} \leq \frac{U_W}{2} \quad (4)$$

sendo:

$U_{P/F}$: tensão de proteção final [V];

U_w : tensão de impulso suportada pelo equipamento protegido [V];

Em situações em que o comprimento do circuito for maior do que 10 metros, isto é, geralmente instalado na entrada da linha ou até mesmo no quadro de distribuição secundário, a equação (5) deverá ser satisfeita.

$$U_{P/F} \leq \frac{U_w - U_I}{2} \quad (5)$$

sendo:

$U_{P/F}$: tensão de proteção final [V];

U_w : tensão de impulso suportada pelo equipamento protegido [V];

U_I : sobretensão induzida [V];

Nesta equação entra a sobretensão induzida, que é tratada no anexo A da NBR 5419, parte 4. Além disso, o fator duplicador devido a oscilação em linhas longas é considerado. Para efeito prático e de projeto, U_I e o fator da oscilação colaboram para que $U_{P/F}$ seja cada vez menor, e isto no projeto implicará que tenha-se que escolher um DPS mais seletivo em relação ao seu nível de proteção.

É importante lembrar que a sobretensão induzida é normalmente desprezível nos casos em que:

- Houver blindagem em forma de grade na estrutura da edificação ou da sala a ser protegida.
- Houver uso de linhas blindadas, isto é, uso de cabos blindados ou dutos metálicos blindados.

3.5 CORRENTES I_{IMP} E I_N DO DPS NA FRONTEIRA DA ZPR1

A corrente da descarga atmosférica esperada deverá ser suportada pelo DPS e ela variará de acordo com a função do DPS e sua localização. DPS que estão localizados na entrada da linha e desempenham papel de proteção contra descargas diretas (fonte de dano

S1) devem atender o item 3.2.8 deste trabalho, ou então devem ter sua corrente de impulso calculada conforme o item E.2 da NBR 5419 1 (ABNT, 2015).

O anexo B da NBR 5419 1 introduz a equação da corrente atmosférica em função do tempo, e nela utiliza o valor da corrente de impulso para descargas do tipo 10/350 μ s, isto é, descargas diretas. A Tabela 2 mostra o valor da corrente de primeiro impulso positivo esperada de acordo com o nível de proteção (NP) do DPS.

Tabela 2 – Valor de pico de corrente (primeiro impulso positivo)

Parâmetro de ensaio	NP			
	I	II	III-IV	Tolerância (%)
Valor de pico da corrente (kA)	200	150	100	10

Fonte: ABNT (2015).

3.5.1 Surtos devido à descargas diretas na estrutura

Para DPS instalados na fronteira da ZPR1 de uma estrutura (geralmente quadro de distribuição principal), a corrente de descarga atmosférica é dividida entre o sistema de aterramento, as partes condutoras externas e as linhas externas, diretamente ou pelo DPS (ABNT, 2015). A parcela de cada parte condutora ou linha externa (I_F) é determinada pela equação (6), em que K_e é uma variável que depende do número de caminhos paralelos, as impedâncias convencionais de aterramento das linhas aéreas e enterradas, bem como a impedância convencional do subsistema de aterramento e a corrente I é a corrente de descarga atmosférica pertinente ao nível de proteção (NP) considerado para o DPS.

$$I_F = I \cdot K_e \quad (6)$$

sendo:

I_F : parcela da corrente de cada parte condutora ou linha externa [A];

I : corrente de descarga atmosférica pertinente ao nível de proteção [A];

K_e : variável que depende do número de caminhos paralelos;

A equação (7) é utilizada para o cálculo de K_e em sistemas com a instalação subterrânea e a equação (8) para sistemas com a instalação aérea, sendo que Z é a impedância convencional do subsistema de aterramento, Z_1 é a impedância convencional de aterramento das partes externas ou linhas externas instaladas enterradas, Z_2 é a resistência de terra do

arranjo de aterramento que conecta a linha aérea à terra. Caso Z_2 não seja conhecida, pode-se utilizar o valor de Z_1 , de acordo com a resistividade do solo. Tanto Z_1 , Z , quanto Z_2 (no caso em que não se conhece a resistência de terra do arranjo de aterramento) podem ser determinados pela Tabela 3, em função da resistividade do solo. E n_1 é o número de partes externas ou linhas enterradas e n_2 é o número de partes externas ou linhas aéreas. É importante salientar que este método é adequado para situações em que o K_e seja o mesmo em cada ponto de aterramento, caso não seja, deverão ser usadas equações mais complexas (ABNT, 2015).

$$K_e = \frac{Z}{Z_1 + Z \cdot (n_1 + n_2 \cdot \frac{Z_1}{Z_2})} \quad (7)$$

sendo:

Z : impedância convencional do subsistema de aterramento;

Z_1 : impedância convencional de aterramento das partes externas ou linhas externas instaladas enterradas;

Z_2 : resistência de terra do arranjo de aterramento que conecta a linha aérea à terra;

n_1 : número de partes externas ou linhas enterradas;

n_2 : número de partes externas ou linhas aéreas;

K_e : variável que depende do número de caminhos paralelos, utilizada em instalações subterrâneas nesta equação;

$$K_e = \frac{Z}{Z_2 + Z \cdot (n_2 + n_1 \cdot \frac{Z_2}{Z_1})} \quad (8)$$

sendo:

Z : impedância convencional do subsistema de aterramento;

Z_1 : impedância convencional de aterramento das partes externas ou linhas externas instaladas enterradas;

Z_2 : resistência de terra do arranjo de aterramento que conecta a linha aérea à terra;

n_1 : número de partes externas ou linhas enterradas;

n_2 : número de partes externas ou linhas aéreas;

K_e : variável que depende do número de caminhos paralelos, utilizada em instalações aéreas nesta equação;

Tabela 3 – Valores de impedâncias convencionais de aterramento Z e Z_1 em função da resistividade do solo

ρ (Ω .m)	Z_1 (Ω) ¹	Impedância convencional de aterramento relativa ao tipo de SPDA - Z (Ω)		
		I	II	III-IV
≤ 100	8	4	4	4
200	11	6	6	6
500	16	10	10	10
1000	22	10	15	20
2000	28	10	15	40
3000	35	10	15	60

¹ - Valores referentes a partes externas com comprimento acima de 100 m. Para comprimentos menores do que 100 m em solos com resistividade maior do que 500Ω .m, Z_1 poderá ser o dobro.

Fonte: ABNT (2015).

Uma aproximação que poder feita é considerar que metade da corrente da descarga atmosférica flui no subsistema de aterramento e, portanto, K_e pode ser definida pela equação (9).

$$K_e = \frac{0,5}{n_1 + n_2} \quad (9)$$

sendo:

n_1 : número de partes externas ou linhas enterradas;

n_2 : número de partes externas ou linhas aéreas;

K_e : variável que depende do número de caminhos paralelos;

O cálculo de K_e' para cada condutor da linha é dividido em dois tipos:

- Cálculo para linhas elétricas ou de sinal não blindadas e em condutos não metálicos;
- Cálculo para linhas elétricas ou de sinal blindadas;

Para linhas não blindadas e condutos não metálicos o cálculo de K_e' é feito através da equação (10), enquanto para linhas blindadas o cálculo é feito através da equação (11).

$$K_{e'} = \frac{K_e}{n'} \quad (10)$$

$$K_{e'} = \frac{K_e \cdot R_s}{n' \cdot R_s + R_C} \quad (11)$$

Sendo:

n' – número de condutores na linha;

R_S – resistência ôhmica por unidade de comprimento da blindagem;

R_C – resistência ôhmica por unidade de comprimento do condutor interno;

K_e' : variável utilizada para determinar o valor da corrente de impulso em cada condutor;

Por fim, a corrente de impulso esperada para o DPS pode ser calculada através da multiplicação de K_e' pela corrente de descarga atmosférica esperada.

3.5.2 Surtos devido à descarga direta na linha

Da mesma forma que no item anterior, para um DPS instalado na fronteira da ZPR1, e sujeito à fonte de dano do tipo S3 (descargas diretas na linha) a corrente de impulso (I_{imp}) do DPS será calculada com base na Tabela 4 de acordo com a classe do DPS. Esta tabela será utilizada também na definição da corrente nominal de um DPS classe II futuramente.

3.5.3 Surtos indiretos na linha

Para DPS instalados na fronteira da ZPR1 sujeitos a descargas indiretas, isto é, quando as linhas que adentram a edificação estão inteiramente dentro da ZPR 0_B, isto é, sujeita a descargas parciais, ou quando a probabilidade de danos devido a fontes de danos S1 e S3 podem ser desprezadas, define-se a corrente nominal do DPS (neste caso, um DPS classe II) de acordo com a Tabela 4 considerando fonte de danos S4.

3.6 CORRENTES I_n DO DPS NOS LIMITES DA ZPR2

Para DPS instalados em quadro de distribuição geral secundário ou tomada de energia se assume os efeitos causados pelas fontes de danos S2 (descargas atmosféricas nas imediações) ou S1 (descargas diretas fluindo no SPDA externo ou em uma blindagem espacial da ZPR1). Esta forma de onda é do tipo 8/20 μ s. A corrente I_n do DPS será determinada de acordo com o nível de proteção do mesmo e a fonte de dano, por meio da Tabela 4.

Nota-se que as correntes nominais para fonte de danos S1 e S2 são bem distintas, o que sugere a importância de definir o tipo de dano em que a estrutura, bem como os equipamentos estão sujeitos em um projeto de SPDA.

Tabela 4 – Surtos de correntes devido às descargas atmosféricas previstos em sistemas de baixa tensão

NP (Classe)	Sistemas de baixa tensão			
	Descargas atmosféricas diretas e indiretas na linha		Descargas atmosféricas perto da estrutura	Descargas atmosféricas na estrutura
	Fonte de danos S3 (descarga atmosférica direta) Forma de onda da corrente: 10/350 μ s (kA)	Fonte de danos S4 (descarga atmosférica indireta) Forma de onda da corrente: 8/20 μ s (kA)	Fonte de danos S2 (corrente induzida) Forma de onda da corrente: 8/20 μ s (kA)	Fonte de danos S1 (corrente induzida) Forma de onda da corrente: 8/20 μ s (kA)
III-IV	5	2,5	0,1	5
II	7,5	3,75	0,15	7,5
I	10	5	0,2	10

Nota: Para fonte de danos S4, os valores são referidos a linhas aéreas. Para linhas enterradas, os valores podem ser a metade.

Fonte: ABNT (2015).

Neste local da instalação (Periferia da ZPR2), pode-se usar um DPS com características de classe I e II, e que atenda às características necessária de U_p e I_{imp} para a classe I e às características de I_n para a classe II.

3.7 PROCEDIMENTO PARA CORRETA COORDENAÇÃO DO DPS

Os DPS devem ser instalados o mais próximo possível da linha entrante, pois isto garante maior proteção em relação ao número de equipamentos protegidos, e devem também estar o mais próximo possível do equipamento a ser protegido, sendo que quanto mais próximo mais eficaz é a proteção. As escolhas das características dos DPS, bem como a classe serão decididas de acordo com o tipo de dano que a estrutura está sujeita, conforme visto anteriormente, isto é, fonte de danos S1 (descarga atmosférica direta na estrutura), S2

(descarga nos arredores da estrutura), S3 (descarga direta na linha de energia que alimenta a estrutura) e S4 (descargas nos arredores da linha).

3.7.1 DPS da ZPR1

O DPS utilizado na ZPR1 deverá ter sua classe estabelecida de acordo com a fonte de danos. Sua tensão de proteção deverá atender o item 3.4 deste trabalho conforme sua classe, como um todo. Deverá se determinar a suportabilidade a impulso U_w do sistema que se pretende proteger. Esta suportabilidade variará de acordo com os equipamentos que se esteja utilizando. Por fim, determinar a tensão de proteção U_p do DPS e verificar se a corrente de impulso, caso seja um DPS classe I, ou a corrente nominal, caso seja um DPS classe II, estejam compatíveis com o requerido.

3.7.2 DPS na ZPR2

Se todas as condições do item anterior forem possíveis e atendidas, os equipamentos estarão protegidos, mas caso não, então será necessário instalar um segundo DPS na ZPR2, isto é, no quadro de distribuição secundário ou na tomada de energia. Os parâmetros de tensão e corrente deverão ser atendidos, caso não sejam, será necessário a instalação de um DPS adicional no ponto de tomada cumprindo os mesmos requisitos, conforme a classe do mesmo.

3.8 O USO DE DPS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A norma brasileira NBR 16690 (ABNT, 2019) estabelece os requisitos de projetos fotovoltaicos, inclui todas as partes até, não incluindo, os dispositivos de armazenamento de energia. Tem como objetivo especificar os requisitos que surgem particularmente em sistemas fotovoltaicos.

3.8.1 Proteção contra tensões transitórias

Segundo a NBR 16690 (ABNT, 2019), quando o cabo principal do arranjo ultrapassar 50 m convém que seja utilizado DPS para a proteção ou então, que seja utilizado condutos metálicos aterrados, ou seja, diretamente aterrados, ou possuam proteção mecânica que ofereça blindagem. Dentro desta questão é importante que todos os condutores vivos

(condutor positivos e negativos) estejam agrupados a fim de que não se crie laços no sistema que favoreçam a indução de tensões transitórias causadas por descargas atmosféricas.

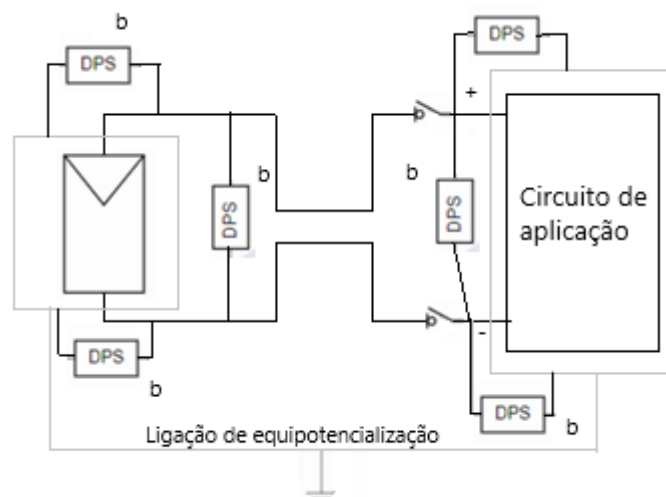
3.8.2 Aterramento

O aterramento segue conforme a NBR 5410 (ABNT, 2004) até a parte da equipotencialização, a qual haverá uma mudança na escolha da seção do condutor de equipotencialização de aterramento exposto do arranjo fotovoltaico. Caso seja necessário aterrar as partes condutoras expostas do arranjo devido à incidência de descargas atmosféricas, conforme a NBR 5419-2 e NBR 5419-3 (2019), a seção do condutor de equipotencialização deverá ser de no mínimo 16 mm², caso não esteja sujeito a descargas atmosférica, a seção deverá ser de no mínimo 6 mm². O aterramento de um condutor vivo (positivo ou negativo) do arranjo fotovoltaico não é permitido (ABNT, 2019).

3.8.3 Disposição dos dispositivos de proteção contra surtos no arranjo fotovoltaico

Deverá ser utilizado um DPS entre os condutores vivos e entre o condutor de aterramento e cada condutor vivo, individualmente, conforme a Figura 8.

Figura 8 – Disposição dos DPS no arranjo fotovoltaico



- Os condutores de equipotencialização devem ser instalados o mais próximo possível dos condutores vivo, para que seja evitado laços nos condutores.
- Os DPS devem ser instalados o mais próximo possível dos dispositivos os quais protegem, isto é, o circuito de aplicação e o arranjo fotovoltaico.

Fonte: ABNT (2019).

Conforme mencionado no capítulo 2, quando o comprimento dos condutores entre o arranjo fotovoltaico e o inversor for maior do que 10 m deverá ser utilizado um DPS na saída do arranjo fotovoltaico e outro na parte de corrente contínua do inversor de frequência a fim de que se atenuem tensões induzidas devido ao comprimento do condutor (ZAINI, N. H. *et al.*, 2018), o mesmo vale pela parte de corrente contínua, em relação aos condutores que conectam o inversor de frequência (parte de corrente alternada). Recomenda-se que quando o comprimento for maior do que 50 m seja adotado medidas que blindem eletromagneticamente os condutores (ABNT, 2019).

3.8.4 Especificações do DPS em projetos fotovoltaicos

As especificações do DPS devem atender os requisitos da NBR 5419-3, conforme foram apresentados neste capítulo. Outro ponto importante é que o dispositivo a ser usado na parte CC deverá ser específico para esta função.

A tensão de proteção do DPS deverá ser menor ou igual à tensão de suportabilidade do painel fotovoltaico e dos demais equipamentos que o dispositivo estiver operando.

A máxima tensão de operação contínua da série fotovoltaica será definida pela soma da máxima tensão de operação contínua individual de cada placa, a qual deverá ser a mesma. Esta soma não poderá ser maior que a máxima tensão de operação contínua do DPS.

A tensão de suportabilidade (U_w) de cada componente do sistema fotovoltaico pode ser definida em função da máxima tensão do sistema fotovoltaico em corrente contínua, conforme a Tabela 5 (CLAMPER, s.d.).

A escolha da classe do DPS, bem como corrente de impulso e corrente nominal serão definidos de acordo com o tipo de situação que se tiver. Na mais simples, em uma residência, onde não houver presença de SPDA, os DPS indicados serão de classe II, com corrente nominal de 10 kA, na presença de um SPDA, porém com o sistema fotovoltaico não conectado com o SPDA, se usará um DPS classe I/II na parte CA no quadro de distribuição geral, lembrando que se usará dois DPS nesta parte se a distância entre o quadro de distribuição e o inversor for maior do que 10 metros. A corrente nominal dos DPS será de no mínimo 10 kA, entretanto é indicado para o DPS classe I/II uma corrente nominal de 30 kA (CLAMPER, s.d.).

Quando o sistema fotovoltaico for conectado com o SPDA, é recomendado a utilização de DPS de classe I/II tanto na parte CA, como na parte CC.

Tabela 5 – Suportabilidade em função da máxima tensão do sistema fotovoltaico.

$U_{oc\ máx}$ (V)	suportabilidade a tensões impulsivas – U_w (kV)			
	Módulo Classe B Isolação básica	Inversor	Outros equipamentos	Módulo Classe A Isolação reforçada
100	0,8	2,5	0,8	1,5
155	1,5	2,5	1,5	2,5
300	2,5	2,5	2,5	4
424	4	2,5	4	4
600	4	4	4	6
800	5	4	5	6
849	6	4	6	8
1000	6	6	6	8
1500	8	8	8	12

Fonte: Clamper (s.d.).

Para definir a corrente nominal e a corrente de impulso mínimas na situação em que o sistema fotovoltaico é conectado ao SPDS é utilizada a Tabela 6, onde é levado em conta o nível de proteção

Tabela 6 – Corrente nominais e de impulso mínimas para DPS a serem utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados com o SPDA.

Nível de proteção do SPDA	Condutores de descida			
	<4		≥ 4	
	I_n (kA)	I_{imp} (kA)	I_n (kA)	I_{imp} (kA)
I (200 kA)	17	10	10	5
II (150 kA)	12,5	7,5	7,5	3,75
III e IV (100 kA)	8,5	5	5	3,5

Fonte: Clamper (s.d.).

É importante observar que no mercado, fabricantes como, por exemplo, a Siemens, Schneider e Clamper oferecem DPS para aplicação em corrente contínua destinados a sistemas fotovoltaicos que abrangem os requisitos mínimos. Requer atenção para situações em que o número de condutores de descida do sistema SPDA for menor do que quatro, nestas situações a corrente nominal mínima do DPS ficam em 17 kA e a corrente de impulso fica em 10 kA, valores muito maiores em situações com número igual ou superior a quatro condutores de descida.

4 DIMENSIONAMENTO DO DPS E SEUS CONDUTORES PARA UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

A partir da análise de um sistema fotovoltaico são avaliadas quais medidas que devem ser adotadas em relação à parte de proteção contra surtos de tensão elétrica. Este projeto foi executado no município de Mairinque - SP, onde foi instalado duas *strings* (associação em série) de painéis fotovoltaicos com nove módulos cada. O padrão de entrada da residência possui condutores com seção transversal de 35 mm², disjuntor tripolar de 100 A, atendendo às especificações da concessionária local que é a CPFL – Piratininga. Na Figura 9 tem-se o registro do quadro do padrão de entrada da residência, na Figura 10 têm-se a imagem do local onde foi executado o projeto, na Tabela 6, tem-se os dados do DPS utilizado no padrão de entrada.

Figura 9 – Foto do padrão de entrada da instalação fotovoltaica



Fonte: Eletrobidu (2021).³

³ Dados concedidos pelo Engenheiro Filipe Julio Cardoso, representante da empresa Eletrobidu, localizada na cidade de Mogi das Cruzes-SP.

Figura 10 – Fotografia superior da residência onde foi executado o projeto



Fonte: Eletrobidu (2021).⁴

Tabela 7 – Parâmetros do DPS utilizado na entrada da instalação

Parâmetros do DPS	
Uc	275 V
Imáx	60 kA
In	30 kA
Iimp	12,5 kA
Up	<1,3 kV
Classe	I+II

Fonte: Eletrobidu (2021).⁴

4.1 DPS DA ENTRADA DA INSTALAÇÃO

Caso a instalação esteja sujeita a surtos de tensão por descargas atmosféricas, deve-se optar por um DPS classe I, neste projeto foi adotado no padrão de entrada DPS do tipo I+II, o qual, além de executar a função exigida, executará a função da classe II, isto é, protegerá de descargas indiretas também.

⁴ Dados concedidos pelo Engenheiro Filipe Julio Cardoso, representante da empresa Eletrobidu, localizada na cidade de Mogi das Cruzes-SP.

4.1.1 Tensão de proteção

De acordo com a seção 3.2.1, a suportabilidade a impulsos de produtos de categoria I, isto é, equipamentos especialmente protegidos, para uma rede trifásica do tipo 220/380 é 1,5 kV, e como a tensão de proteção deste DPS (U_p) na entrada da instalação é menor do que 1,3 kV (Tabela 7), portanto está de acordo com o necessário. Outro ponto que pode ser observado é que a tensão de suportabilidade para o inversor adotado neste projeto é de 4 kV, de acordo com a Tabela 5 e com a máxima tensão de operação contínua do inversor. No Anexo 1, tem-se o *datasheet* do inversor utilizado, Huawei SUN2000-5KTL-L1.

A aplicação da equação (5) serve para definir a tensão de proteção final ($U_{P/F}$) exigida, uma vez que o padrão de entrada se encontra a mais de 10 metros de distância do inversor.

$$U_{P/F} \leq \frac{U_W - U_I}{2} = \frac{4 - U_I}{2}$$

Levando em consideração que a sobretensão induzida (U_I) refere-se aos parâmetros físicos, podem-se tomar medidas com o objetivo de reduzir esta sobretensão, como, por exemplo, o uso de eletrodutos metálicos que forneçam blindagem eletromagnética. Portanto, no melhor caso, a tensão de proteção deverá ser menor ou igual a 2 kV.

Conforme o item 3.4, sendo utilizado condutores com comprimento menor do que 0,5 m entre o DPS e o BEP, espera-se uma tensão induzida nos condutores de 0,5 kV, portanto, a tensão de operação máxima do DPS, no melhor caso, seria de 1,5 kV. Para o pior caso, no qual se assume uma sobretensão induzida considerável devido a descargas atmosféricas diretas ou nas proximidades da instalação, a NBR 5419 deverá ser analisada com mais detalhes. Por fim, a tensão de operação para o padrão de entrada é considerada eficaz para proteger a parte CA do sistema fotovoltaica.

4.1.2 Tensão de operação contínua

No sistema de aterramento do tipo TN-S, conforme abordado no Capítulo 3, a tensão de operação contínua (U_c) deverá ser 10% maior do que a tensão de fase da instalação em DPS conectados entre fase-neutro e fase-terra e maior do que a tensão de fase em DPS conectado entre neutro-terra. Portanto, em um caso mais pessimista a tensão de operação contínua terá

de ser maior do que 242 V e, portanto, o DPS escolhido para este padrão de entrada satisfaz esta condição.

4.1.3 Corrente nominal de descarga do DPS (I_n)

De acordo com o item 3.8.4, a corrente nominal do DPS utilizado em um projeto fotovoltaico deverá ser de no mínimo 10 kA (Classe II) se não houver SPDA na instalação. Porém, havendo SPDA, a corrente nominal deverá ser no mínimo de 30 kA (classe I+II). Além destes detalhes, é recomendado sempre usar uma corrente nominal de 30 kA sempre que for utilizar um DPS classe I+II. Portanto, este parâmetro é respeitado no projeto em análise.

4.1.4 Corrente de impulso do DPS (I_{imp})

A corrente de impulso é uma característica importante para a classe I e está diretamente ligada aos surtos devido à descargas diretas na linha, se houvesse um sistema SPDA na casa, o método apresentado no item 3.5.1 deveria ser aplicado, e realizando um cálculo mais pessimista se chegaria a uma corrente de impulso de 25 kA, utilizando a equação (9) e a equação (10), supondo-se que a linha não possui blindagem eletromagnética.

$$K_e = \frac{0,5}{n_1 + n_2} = \frac{0,5}{1}$$

$$K_{e'} = \frac{K_e}{n'} = \frac{0,5}{4} = 0,125$$

Utilizando a equação (6), e assumindo a corrente de pico para o nível de proteção I, conforme a Tabela 2, obtém-se o valor pessimista de 25 kA para a corrente de impulso necessária para o DPS.

$$I_F = I \cdot K_{e'} = 200 \cdot 0,125 = 25 \text{ kA}$$

Porém, nesta residência, não é assumida a fonte de dano do tipo S1 (descargas diretas na instalação) em grande parte pela ausência de um SPDA. Portanto, pode-se adotar as orientações da NBR 5410 que são, inclusive, ligeiramente mais rigorosas que as orientações obtidas na NBR 5419, ou seja, a corrente de impulso mínima para o DPS será de 12,5 kV.

4.2 CONDUTORES DE CONEXÃO DO PROJETO

De acordo com o Anexo 2, os condutores de aterramento dos DPSs no padrão de entrada são de 16 mm², respeitando o valor mínimo exigido pela NBR 5419 quando o DPS absorve a totalidade ou a maior parte do surto de tensão. No DPS da parte CA do inversor de frequência foi utilizado um condutor de 4 mm² entre os DPSs e o aterramento. No item 3.2.13 citou-se que a NBR 5419 - 4 recomendava que para um DPS classe II a seção mínima fosse de 6 mm², embora este DPS seja do tipo I+II, poderia ser adotado um classe II, e portanto, a seção mínima para os condutores de aterramento seria de 6 mm². Entretanto, o recomendado é que seja feito contato com o fabricante do DPS para definir qual o condutor ideal a ser utilizado, assim como a própria NBR 16690 informa.

No condutor que fica entre os DPSs e o aterramento no arranjo fotovoltaico a seção de 6 mm² satisfaz a NBR 16690, uma vez que os módulos fotovoltaicos não estão sujeitos a descargas diretas.

4.3 DPS NA PARTE CA DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Sendo que não há presença de um SPDA na residência onde foi executado o projeto fotovoltaico, poderia ter sido utilizado um DPS classe II, porém, por escolha do projetista, optou-se por um DPS classe I+II, o qual tem os mesmos parâmetros dos DPSs utilizados no padrão de entrada, e, portanto, fornecem segurança ao inversor de frequência. A corrente nominal mínima (I_n) recomendada de 30 kA é respeitada. Além disso vale observar que este DPS adicional é requerido uma vez que a distância entre o padrão de entrada e o inversor de frequência é maior do que 10 m.

Utilizando a equação (3), pode-se determinar a tensão de proteção final máxima do DPS em função da tensão de suportabilidade do inversor de frequência, sendo U_w igual a 4 kV para o inversor utilizado (CLAMPER, s.d.). Na equação (13) são substituídos os valores encontrados.

$$U_{P/F} \leq 0,8 \cdot U_W = 0,8 \cdot 4$$

$$U_{P/F} \leq 3,2 \text{ kV}$$

Portanto, a tensão de proteção final deverá ser menor do que 3,2 kV, e como a linha que este DPS está protegendo possui menos de 5 metros de comprimento, uma vez que é conectado ao lado do inversor, a equação (1) será utilizada para determinar a tensão de proteção do DPS. Na equação (14) é calculado o valor de U_P .

$$U_P = \frac{U_{P/F}}{1,2} = \frac{3,2}{1,2} = 2,67 \text{ kV}$$

Portanto a tensão de proteção deste DPS deverá ser de no máximo 2,67 kV, e como o DPS do projeto é o mesmo do padrão de entrada, está de acordo.

4.4 DPS UTILIZADO NA PARTE CC DO ARRANJO FOTOVOLTAICO

Consultando o Anexo 3, verifica-se que a máxima tensão de operação do módulo fotovoltaico é de 40,5 V, para o modelo de 405 Wp e, portanto, conforme a Tabela 5, a tensão de suportabilidade do módulo é de 1,5 kW e, desta forma, deve ser utilizado um DPS com tensão de proteção menor ou igual a este valor obtido.

Ao analisar o projeto em estudo, observa-se que o inversor de frequência adotado possui sistema de proteção contra surtos internos, os quais estão de acordo com a norma internacional EN/IEC 61643-11, norma esta que é utilizada como referência na NBR 5419.

Em uma situação na qual não se tenha DPS integrado no inversor, deve-se utilizar um que contenha corrente nominal maior ou igual a 10 kA se não houver SPDA na instalação. Caso o projetista escolha um DPS classe I+II, a corrente nominal é recomendada é de no mínimo 30 kA.

Por fim, se a distância entre o inversor de frequência e os módulos fotovoltaicos fosse maior do que 10 m deveria ser utilizado DPS tanto na parte de CC do inversor quanto em um local o mais próximo possível dos módulos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O crescimento do desenvolvimento e aplicação de projetos fotovoltaicos exige que o conhecimento pertinente a este setor seja cada vez mais explorado e estudado, a respeito das diversas características para estes projetos, destaca-se neste trabalho configurações que permitam proteção contra surtos de tensão.

O Brasil é um país com alta incidência de descargas atmosféricas, o que aumenta o grau de importância do estudo e desenvolvimento correto de projetos de SPDA em geral. Neste trabalho, voltado à análise das normas e utilização de DPSs em projetos fotovoltaicos, isto é, tanto em sua parte de corrente contínua (CC), quanto em sua parte de corrente alternada (CA), destaca-se que ao proteger um equipamento contra surtos de tensão é importante considerar a tensão de suportabilidade do equipamento (U_w), pois é a partir dela que é feita a análise da tensão de proteção do DPS que será usado. Outro parâmetro importante é a localização do DPS na instalação elétrica, uma vez que quando se tem distâncias consideráveis, a tensão de proteção do DPS deverá ser maior, pois se considera um potencial de indução nos condutores da instalação por descargas elétricas próximas ou diretas, devido ao enlace criado. Esta situação é observada no Capítulo 2, no qual menciona-se a influência dos condutores na indução de sobretensões na rede.

O estudo das normas relacionadas ao uso de DPSs em instalações elétricas de modo geral e em projetos fotovoltaicos foi fundamental para a elaboração de uma análise adequada e segura sobre o uso dos dispositivos de proteção, e neste sentido, é importante mencionar que foi um desafio ler três normas diferentes e que foram escritas em períodos diferentes, exigiu constante revisão e comparação entre as normas, e devido a estes desafios houveram momentos em que foi necessário fazer considerações em função de quão recente e específica era a norma. Em determinado momento, observou-se que a NBR 5419 recomendava uma seção mínima de 6 mm² em cobre para os condutores usados entre um DPS classe II e o aterramento da instalação, enquanto a NBR 5410 recomenda para seções de fase menores ou iguais a 16 mm², um condutor de proteção de mesmo material e mesma seção. Em relação a esta questão, optou-se por adotar as recomendações da NBR 5419, por esta ser mais recente. Outro fator importante para esta consideração é o de que ao adotar um condutor de seção maior, isto não implicará em problemas de condutividade, a qual será maior neste condutor.

É importante observar que, em situações em que a instalação esteja sujeita às descargas diretas ou próximas, a sobretensão induzida (U_I) ganha importância, e em situações em que

ela seja necessária é recomendada uma análise mais específica sobre este parâmetro na NBR 5419, por meio dos métodos indicados.

Este estudo é, portanto, uma análise de normas relativamente recentes, as quais podem estar sujeitas às mudanças e adequações futuras. Isto se deve ao fato de a normalização de projetos fotovoltaicos ser algo que ainda está em contínuo estudo e desenvolvimento. Por fim, apesar dos esclarecimentos trazidos por este trabalho, o constante estudo das normas mencionadas e acompanhamento do seu desenvolvimento é extremamente importante e apropriado.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16690**: instalação de arranjos fotovoltaicos: requisitos de projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410**: instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419**: proteção contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

CLAMPER. **Guia de aplicação para a proteção de sistemas fotovoltaicos**: dispositivos de proteção contra surtos elétricos. Disponível em: <https://www.clamper.com.br/pt/multimedia/impressos/>. Acesso em: 11 fev. 2021.

COTRIM, A. A. M. B. **Instalações elétricas**. 5. ed. São Paulo: Person Prentice Hall, 2009. 496 p.

CPFL ENERGIA. **Fornecimento em tensão secundária de distribuição**. 2020. Disponível em: <http://sites.cpfl.com.br/documentos-tecnicos/GED-13.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2021.

CREDER, H. **Instalações elétricas**. 16. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 494 p.

HEINISCH, C. 1752: Benjamin Franklin inventa o para-raios. **Deutsche Welle**, 2019. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/1752-benjamin-franklin-inventa-o-para-raios/a-314478>. Acesso em: 15 maio 2020.

HUAWEI. **Smart energy controller**. 2020. Disponível em: <https://solar.huawei.com/fr-FR/download?p=%2F-%2Fmedia%2FSolar%2Fattachment%2Fpdf%2Fla%2Fdatasheet%2FSUN2000-2-6KTL-L1.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2021.

JOHNSON, W. P. Transient voltage sources and effect on electrical equipment. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. IA-9, n. 3. maio/jun. 1973. 332 p. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4158401>. Acesso em: 10 março 2021.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 914 p.

MUELLER, T.; GRAFF, D. The Use of SPD's in the petroleum/petrochemical industry. **IEEE Transactions On Industry Applications**, v. 34, n. 6, nov./dez. 1998. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/739021>. Acesso em: 16 maio 2020.

RODRIGUES, D. Brasil registra 77,8 milhões de raios por ano e prejuízo de R\$ 100 milhões. **Poder 360**, Brasília, 2017. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/noticias/elat.na.midia.php?elatMidia=896>. Acesso em: 4 maio 2020.

SAMARAS, K. *et al.* Surge protection devices for industrial facilities: a tutorial review. *In: RECORD OF CONFERENCE PAPERS INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY ANNUAL PETROLEUM AND CHEMICAL INDUSTRY CONFERENCE*, 54., 2008, Denver. **Proceedings** [...]. Denver: IEEE, 2008. p. 165-175. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1524552>. Acesso em: 31 maio 2020.

SIEMENS. **Dispositivo de proteção contra surtos – DPS 5SD7**: a solução contra raios e tensões transitórias. São Paulo, 2017. 16 p. Disponível em: [https://w3.siemens.com.br/automation/br/pt/downloads-bt/Documents/Dispositivos%20de%20Prote%C3%A7%C3%A3o%20contra%20Surtos%20\(DPS\)/Cat%C3%A1logo/Catalogo-DPS_SET17.pdf](https://w3.siemens.com.br/automation/br/pt/downloads-bt/Documents/Dispositivos%20de%20Prote%C3%A7%C3%A3o%20contra%20Surtos%20(DPS)/Cat%C3%A1logo/Catalogo-DPS_SET17.pdf). Acesso em: 12 nov. 2019.

SILVA NETO, A. **Tensões induzidas por descargas atmosféricas em redes de distribuição de baixa tensão**. 2004. 140 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Potência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-16112004-162658/pt-br.php>. Acesso em: 10 maio 2021.

SOUZA, A. N. *et al.* **SPDA**: sistemas de proteção contra descargas atmosféricas: teoria, prática e legislação. São Paulo: Érica, 2012. 192 p.

STILPEN, D. V. S.; CHENG, V. Solar photovoltaics in Brazil: a promising renewable energy market. *In: INTERNATIONAL RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY CONFERENCE (IRSEC)*, 3., 2015, Marrakech, **Proceedings** [...]. Marrakech: IEEE, 2015. p. 1-5. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7455077>. Acesso em: 31 maio 2020.

TRINA SOLAR. **The Tallmax**: framed 72-cell module. 2017. Disponível em: https://www.trinasolar.com/sites/default/files/Tallmax%20PD14%20Feb2017_A.pdf. Acesso em: 12 fev. 2021.

ZAINI, N. H. *et al.* On the effect of surge protection devices (SPDs) placement for grid-connected solar PV farm. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP)*, 34., 2018, Rzeszow, **Proceedings** [...]. Rzeszow: IEEE, 2018. p. 1351-1358. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8503273>. Acesso em: 16 maio 2020.

ANEXO A – DATASHEET DO INVERSOR

Smart Energy Center



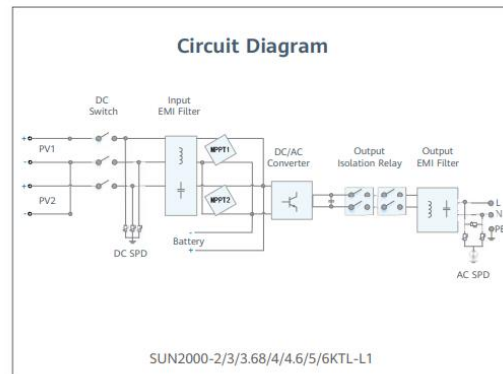
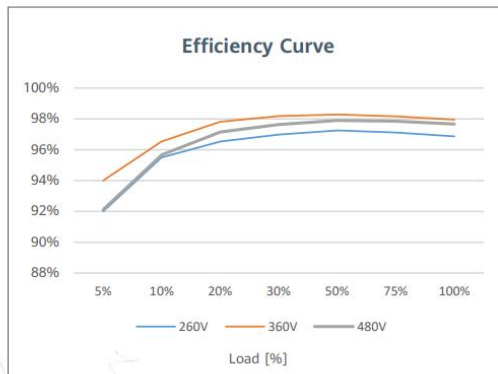
Active Safety
AI Powered
Active Arcing Protection



Higher Yields
Up to 30% More
Energy with Optimizer



2x POWER Battery Ready
5KW AC Output plus
5KW Battery Charge



SUN2000-2/3/4/5/6KTL-L1
Technical Specification

Technical Specification	SUN2000 -2KTL-L1	SUN2000 -3KTL-L1	SUN2000 -4KTL-L1	SUN2000 -5KTL-L1	SUN2000 -6KTL-L1 ¹
Efficiency					
Max. efficiency	98.2 %	98.3 %	98.4 %	98.4 %	98.4 %
European weighted efficiency	96.7 %	97.3 %	97.5 %	97.8 %	97.8 %
Input (PV)					
Recommended max. PV power ²	3,000 Wp	4,500 Wp	6,000 Wp	7,500 Wp	9,000 Wp
Max. input voltage	600 V ³				
Start-up voltage	100 V				
MPPT operating voltage range	90 V – 560 V ³				
Rated input voltage	360 V				
Max. input current per MPPT	12.5 A				
Max. short-circuit current	18 A				
Number of MPP trackers	2				
Max. number of inputs	2				
Input (DC Battery)					
Compatible Battery	LG Chem RESU 7H_R / 10H_R				
Operating voltage range	350 ~ 450 Vdc				
Max operating current	10 A @7H_R / 15 A @10H_R				
Max charge power	3,500 W @7H_R / 5,000 W @10H_R				
Max discharge Power @7H_R	2,200 W	3,300 W	3,500 W	3,500 W	3,500 W
Max discharge Power @10H_R	2,200 W	3,300 W	4,400 W	5,000 W	5,000 W
Compatible Battery	HUAWEI PowerMate ESS Battery 5kWh – 30kWh ¹				
Operating voltage range	350 ~ 560 Vdc				
Max operating current	15 A				
Max charge / discharge Power	5,000 W ⁴				
Output					
Grid connection	Single phase				
Rated output power	2,000 W	3,000 W	4,000 W	5,000 W ⁵	6,000 W
Max. apparent power	2,200 VA	3,300 VA	4,400 VA	5,500 VA ⁶	6,000 VA
Rated output voltage	220 V / 230 V / 240 V				
Rated AC grid frequency	50 Hz / 60 Hz				
Max. output current	10 A	15 A	20 A	25 A ⁷	27 A
Adjustable power factor	0.8 leading ... 0.8 lagging				
Max. total harmonic distortion	≤ 3 %				
Backup power output	Yes (via Backup Box-5000 ¹)				
Protection & Feature					
Anti-Islanding protection	Yes				
DC reverse polarity protection	Yes				
Insulation monitoring	Yes				
DC surge protection	Yes, compatible with TYPE II protection class according to EN/IEC 61643-11				
AC surge protection	Yes, compatible with TYPE II protection class according to EN/IEC 61643-11				
Residual current monitoring	Yes				
AC overcurrent protection	Yes				
AC short-circuit protection	Yes				
AC overvoltage protection	Yes				
Over-heat protection	Yes				
Arc fault protection	Yes				
Battery reverse charging from grid	Yes				
General Data					
Operating temperature range	-25 ~ +60 °C (Derating above 45°C @ Rated output power)				
Relative operating humidity	0 %RH ~ 100 %RH				
Operating altitude	0 ~ 4,000 m (Derating above 2,000 m)				
Cooling	Natural convection				
Display	LED indicators; integrated WLAN + FusionSolar APP				
Communication	RS485, WLAN via inverter built-in WLAN module				
Weight (incl. mounting bracket)	Ethernet via Smart Dongle-WLAN-FE (Optional); 4G / 3G / 2G via Smart Dongle-4G (Optional)				
Dimension (incl. mounting bracket)	12.3 kg (27.1 lb)				
Degree of protection	365mm * 365mm * 140 mm (14.4 x 14.4 x 5.5 inch)				
	IP65				
Optimizer Compatibility					
DC MBUS compatible optimizer	SUN2000-450W-P				
Standard Compliance (more available upon request)					
Safety	EN/IEC 62109-1, EN/IEC 62109-2				
Grid connection standards	G98, G99, EN 50549-1, CEI 0-21, VDE-AR-N-4105, AS 4777, C10/11, ABNT, UTE C15-712, RD 1699, TOR D4, IEC61727, IEC62116				

¹ Available in 2020 Q3.

² Inverter max input PV power is 10,000 Wp when long strings are designed and fully connected with SUN2000-450W-P power optimizers.

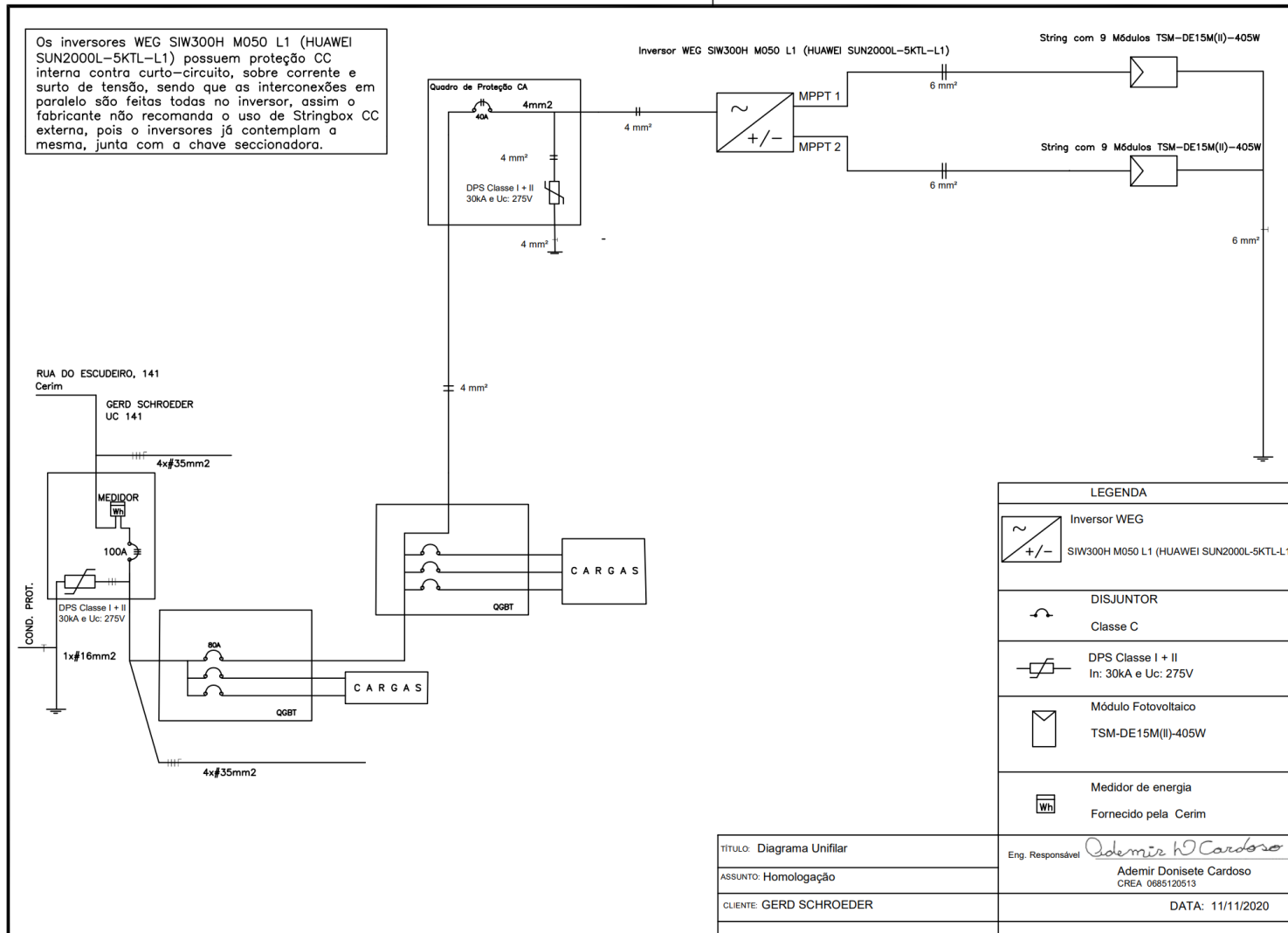
³ The maximum input voltage and operating voltage upper limit will be reduced to 495 V when inverter connects and works with LG battery.

⁴ 2,500 W @ 5kWh HUAWEI ESS battery

⁵ VDE-AR-N 4105: 4600VA / AS4777: 4990VA. ⁶ AS4777: 4990VA. ⁷ AS4777: 21.7A.

Version No.-03-(20200409)

ANEXO B – DRIAGRAMA UNIFILAR DO PROJETO



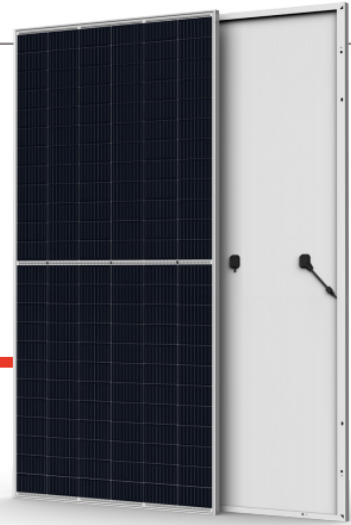
Fonte: Eletrobidu (2021).⁵

⁵ Dados concedidos pelo Engenheiro Filipe Julio Cardoso, representante da empresa Eletrobidu, localizada na cidade de Mogi das Cruzes-SP.

ANEXO C – DATASHEET DO MÓDULO FOTOVOLTAICO DO PROJETO

Mono Multi Solutions

THE TALLMAX^M FRAMED 72 LAYOUT MODULE



72 LAYOUT
MONOCRYSTALLINE MODULE

390-415W
POWER OUTPUT RANGE

20.4%
MAXIMUM EFFICIENCY

0~+5W
POSITIVE POWER TOLERANCE

PRODUCTS | POWER RANGE
TSM-DE15M(II) | 390-415W

Founded in 1997, Trina Solar is the world's leading total solution provider for solar energy. With local presence around the globe, Trina Solar is able to provide exceptional service to each customer in each market and deliver our innovative, reliable products with the backing of Trina as a strong, bankable brand. Trina Solar now distributes its PV products to over 100 countries all over the world. We are committed to building strategic, mutually beneficial collaborations with installers, developers, distributors and other partners in driving smart energy together.

Comprehensive Products and System Certificates

IEC61215/IEC61730/IEC61701/IEC62716
ISO 9001: Quality Management System
ISO 14001: Environmental Management System
ISO14064: Greenhouse Gases Emissions Verification
OHSAS18001: Occupation Health and Safety Management System



High power

- Up to 415W front power and 20.4% module efficiency with half-cut and MBB (Multi Busbar) technology bringing more BOS savings
- Lower resistance of half-cut and good reflection effect of MBB ensure high power



High reliability

- Ensured PID resistance through cell process and module material control
- Resistant to salt, acid and ammonia
- Certified to 5400 Pa positive load and 2400 Pa negative load

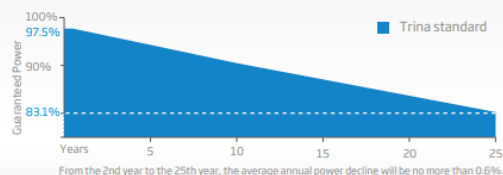


High energy generation

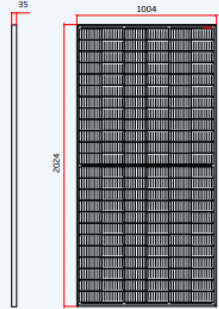
- Excellent IAM and low light performance validated by 3rd party with cell process and module material optimization
- Lower temp coefficient (-0.36%) and NMOT bring more energy leading to lower LCOE
- Better anti-shading performance and lower operating temperature

PERFORMANCE WARRANTY

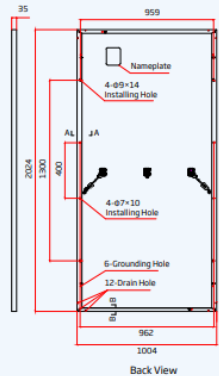
10 Year Product Warranty · 25 Year Power Warranty



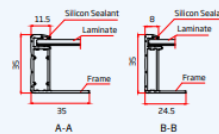
DIMENSIONS OF PV MODULE(mm)



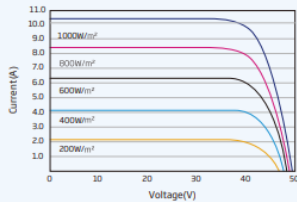
Front View



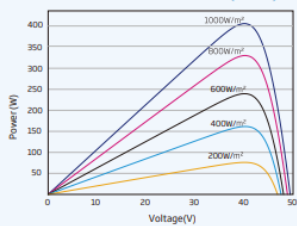
Back View



I-V CURVES OF PV MODULE(405W)



P-V CURVES OF PV MODULE(405W)



ELECTRICAL DATA (STC)

Peak Power Watts- P_{MAX} (Wp)*	390	395	400	405	410	415
Power Output Tolerance- P_{MAX} (W)	0 ~ +5					
Maximum Power Voltage- V_{MPP} (V)	40.0	40.1	40.3	40.5	40.7	40.9
Maximum Power Current- I_{MPP} (A)	9.75	9.86	9.92	10.0	10.07	10.15
Open Circuit Voltage- V_{OC} (V)	48.5	48.7	49.0	49.2	49.4	49.6
Short Circuit Current- I_{SC} (A)	10.30	10.37	10.45	10.52	10.59	10.66
Module Efficiency η_m (%)	19.2	19.4	19.7	19.9	20.2	20.4

STC: Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5.
*Measuring tolerance: ±3%.

ELECTRICAL DATA (NMOT)

Maximum Power- P_{MAX} (Wp)	295	299	302	306	310	314
Maximum Power Voltage- V_{MPP} (V)	37.6	37.8	38.0	38.2	38.4	38.6
Maximum Power Current- I_{MPP} (A)	7.84	7.90	7.95	8.01	8.07	8.13
Open Circuit Voltage- V_{OC} (V)	45.7	45.9	46.2	46.4	46.6	46.8
Short Circuit Current- I_{SC} (A)	8.30	8.35	8.42	8.47	8.53	8.58

NMOT: Irradiance at 800W/m², Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1m/s.

MECHANICAL DATA

Solar Cells	Monocrystalline
Cell Orientation	144 cells (6 × 24)
Module Dimensions	2024 × 1004 × 35 mm (79.69 × 39.53 × 1.38 inches)
Weight	22.8kg (50.3lb)
Glass	3.2 mm (0.13 inches), High Transmission, AR Coated Heat Strengthened Glass
Encapsulant Material	EVA
Backsheet	White
Frame	35 mm (inches) Anodized Aluminium Alloy
J-Box	IP 6B rated
Cables	Photovoltaic Technology Cable 4.0mm ² (0.006 inches ²), Portrait: N 140mm/P 285mm(5.51/11.22inches) Landscape: N 1400 mm /P 1400 mm (55.12/55.12 inches)
Connector	MC4 EVO2 / TS4*

*Please refer to regional datasheet for specified connector.

TEMPERATURE RATINGS

NMOT (Nominal Module Operating Temperature)	41 C (±3 C)
Temperature Coefficient of P_{MAX}	- 0.36%/ C
Temperature Coefficient of V_{OC}	- 0.26%/ C
Temperature Coefficient of I_{SC}	0.04%/ C

MAXIMUM RATINGS

Operational Temperature	-40 ~ +85 C
Maximum System Voltage	1500V DC (IEC) 1500V DC (UL)
Max Series Fuse Rating	20A

(Do not connect Fuse in Combiner Box with two or more strings in parallel connection)

WARRANTY

10 year Product Workmanship Warranty
25 year Power Warranty

(Please refer to product warranty for details)

PACKAGING CONFIGURATION

Modules per box: 30 pieces
Modules per 40' container: 660 pieces