



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**IGOR RODRIGUES DE NARDI**

**PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS  
ELÉTRICOS CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

DM: 14/02

**BELÉM-PARÁ**

**UFPA/2022**



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**IGOR RODRIGUES DE NARDI**

**PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS  
ELÉTRICOS CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

DM: 14/02

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE – da Universidade Federal do Pará – UFPA – como requisito para a obtenção do Grau de MESTRE em Engenharia Elétrica. Orientado pelo Prof. Dr. Adônis Ferreira Raiol Leal.

**BELÉM-PARÁ**

**UFPA/2022**

## **“PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS”**

**AUTOR: IGOR RODRIGUES DE NARDI**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM: 13/06/2022

### **BANCA EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Adonis Ferreira Raiol Leal**  
(Orientador – PPGEE/UFPA)

---

**Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra**  
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

---

**Prof. Dr. Edson Ortiz de Matos**  
(Avaliador Externo ao Programa – FEEB/UFPA)

---

**Prof. Dr. Anderson Ricardo Justo de Araújo**  
(Avaliador Externo – UNICAMP)

---

**José Pissolato Filho**  
(Avaliador Externo – UNICAMP)

**VISTO:**

---

**Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Júnior**  
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

## **DEDICATÓRIA**

*Dedicado a todos aqueles que me ajudaram de alguma forma na realização desse trabalho.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que de alguma forma me ajudaram a concluir essa difícil dissertação, seja como instruções técnicas, incentivo, apoio moral.

Nessa situação incluo meu orientador Adônis Leal por todo o excelente auxílio e orientação no desenvolvimento e por me incluir no LPDA, agradecimento aos colegas e a todo o corpo que constitui o LPDA, ao professor Thiago Soares por me ajudar a medir a resistência da malha de aterramento, a professora Maria Emília por permitir que eu tivesse acesso aos arquivos privados de projeto e ao ambiente do CEAMAZON, bem como à Norte Energia S.A e ao projeto SIMA.

Agradeço também ao atualmente aluno de doutorado William Assis por me passar inúmeros arquivos e artigos importantíssimos para o desenrolar do trabalho, além de me ajudar a compreender a utilização de alguns *softwares*.

Agradeço ao doutor Anderson Justo e ao professor doutor José Pissolato Filho, ambos da UNICAMP, por me auxiliarem de todo bom grado na pesquisa e na elaboração de um dos artigos que serviram de base para esse trabalho.

Agradeço aos meus familiares próximos, minha mãe Ieda, e meu irmão Acáz e minha irmã Dani pela convivência e por me aturarem há tanto tempo, e também as minhas irmãs que não moram mais aqui no estado (Marcia e Patrícia), por formarem meu caráter e ser humano que hoje sou. Agradeço à minha companheira Brenda, por aguentar com muito amor e carinho meu estresse a minha chatice durante esse processo, que não foi pouca.

Agradeço muito também àqueles indivíduos que simplesmente não atrapalharam, não se intrometeram e não me desestimularam, pois assim já ajudaram a beça.

Agradeço sobretudo a Deus pela inspiração, energia e força para chegar até o final. Muito obrigado a todos, de coração!

## RESUMO

À medida que os veículos elétricos e as energias renováveis se expandem, surge também a necessidade de investigar novos métodos de proteção contra raios para essas novas tecnologias. Esse trabalho tem como objetivo avaliar a performance de sistemas de carregamento de veículos elétricos frente às descargas atmosféricas durante seu regime transitório. Modelos de duas estações de carregamento, uma conectada à rede de energia CA e a outra desconectada, foram utilizados nas análises. Além disso, um modelo impulso de tensão proveniente de descargas atmosféricas foi usado. Os resultados deste trabalho demonstraram as alterações nas formas de onda de tensão na entrada e na saída dos circuitos, sendo possível avaliar quais pontos são mais vulneráveis, necessitando de maior proteção. Além disso, foi avaliado se dois eletropostos do Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia – CEAMAZON – estão adequadamente protegidos contra descargas atmosféricas. Para isso, tomou-se como base os estudos realizados na Ásia, Europa, além da norma brasileira. Constatou-se que, apesar do prédio do CEAMAZON possuir um SPDA adequado, os eletropostos podem estar susceptíveis a danos, sobretudo devido aos efeitos indiretos causados pela ocorrência de descargas atmosféricas nas proximidades dos eletropostos.

**Palavras-chave:** Descargas Atmosféricas; SPDA; Eletroposto; Análise de Transiente; Sobretensão Atmosférica.

## ABSTRACT

As electric vehicles and renewable energy expand, there is also a need to investigate new methods of lightning protection for these new technologies. This work aims to evaluate the performance of electric vehicle charging systems against lightning during their transitory regime. Models of two charging stations, one connected to the AC power network and the other disconnected, were used for the analysis. Additionally, a voltage surge model caused by lightning were used. The results of this paper showed the changes in the voltage waveforms at the input and output of the circuits, making it possible to assess which points are more vulnerable, requiring a better protection. In addition, this work evaluates if two electric vehicle charging stations of the Center of Excellence in Energy Efficiency of the Amazon – CEAMAZON – are adequately protected against atmospheric discharges. For this, it was based on studies carried out in Asia, Europe and the Brazilian standard. It was found that, despite the CEAMAZON building having an adequate LPS, the electric vehicle charging stations may be susceptible to damage, mainly due to the indirect effects caused by lightning strikes in the vicinity of them.

**Keywords:** Lightning; LPS; Charging Station; Transient Analysis; Atmospheric Overvoltage.

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Experimento de Benjamin Franklin -----	20
Fig. 2.2 - Mecanismo graupel-gelo -----	21
Fig. 2.3 - Modelo tripolar de carregamento da nuvem -----	22
Fig. 2.4 - Tipos de DA -----	22
Fig. 2.5 - Tipos de DA nuvem-solo -----	23
Fig. 2.6 - O processo de conexão dos canais ascendente e descendente (attachment) com o salto final -----	24
Fig. 2.7 - Descarga de retorno -----	24
Fig. 2.8 - Forma de onda de uma descarga atmosférica -----	25
Fig. 2.9 - ZPR definido por SPDA -----	31
Fig. 3.1 - Modelo de HEV -----	33
Fig. 3.2 - Modelo de PHEV -----	34
Fig. 3.3 – VEB -----	35
Fig. 3.4 – FCEV -----	35
Fig. 3.5 - VE conectado à rede. -----	36
Fig. 3.6 - Fluxograma de controle em VEs -----	37
Fig. 3.7 - Diagrama de blocos do carregamento de veículos elétricos-----	38
Fig. 3.8 - Posto de carregamento de VE -----	39
Fig. 3.9 - Tipo de conexão de carregamento modelo SAE J1772 tipo 1 -----	40
Fig. 3.10 - Tipo de conexão de carregamento modelo IEC 62196 tipo 2 -----	41
Fig. 3.11 - Ônibus Elétrico do projeto SIMA -----	41
Fig. 4.1 - Implementação da fonte de sobretensão impulsiva -----	43
Fig. 4.2 - Sobretensão impulsiva de amplitude 10 kV -----	43
Fig. 4.3 - Aplicação de sobretensão impulsiva induzida em circuito com carga R -----	44
Fig. 4.4 - Forma de onda do impulso no circuito com carga R -----	44
Fig. 4.5 - Diagrama de carregamento de veículos elétricos usando painéis fotovoltaicos. Sistema isolado da rede -----	44
Fig. 4.6 - Circuito de carregamento de baterias isolado da rede. Os raios indicam o ponto do circuito no qual o impulso atmosférico foi aplicado -----	45
Fig. 4.7 - Diagrama do modelo de carregamento de veículos elétricos conectado à rede-----	45
Fig. 4.8 - Carregamento de veículos elétricos conectado à rede. O raio amarelo indica o ponto do circuito no qual o impulso atmosférico foi aplicado -----	46

Fig. 5.1- Forma de onda da tensão na entrada do conversor com sobretensão impulsiva de 1 kV -----	47
Fig. 5.2 - Forma de onda da tensão na saída (bateria) com sobretensão impulsiva de 1 kV-----	48
Fig. 5.3 - Forma de onda da tensão na entrada do conversor com sobretensão de 10 kV-----	48
Fig. 5.4 - Forma de onda da tensão na saída (bateria) com sobretensão de 10 kV -----	48
Fig. 5.5 - Forma de onda da tensão na entrada do conversor, com sobretensão de 10 kV aplicada na saída -----	49
Fig. 5.6 - Forma de onda da tensão na saída (bateria) com transiente aplicado na saída -----	49
Fig. 5.7 - Forma de onda da corrente na saída (bateria) com transiente aplicado na saída -----	49
Fig. 5.8 - Transiente atmosférico na fase R -----	51
Fig. 5.9 - Transiente atmosférico na fase S -----	51
Fig. 5.10 - Transiente atmosférico na fase T -----	51
Fig. 5.11 - Forma de onda da tensão na saída do retificador devido ao transiente atmosférico na fase R -----	52
Fig. 5.12 - Aterramento ideal adicionado no lado DC do retificador -----	52
Fig. 5.13 - Forma de onda na saída do retificador com a inclusão do aterramento -----	53
Fig. 5.14 - Modelos de hastes de aterramento verticais -----	53
Fig. 5.15 - Sobretensão na saída do retificador com aterramento R para $\rho$ igual a 10 $\Omega$ -m. Tensão de pico: 802 V -----	55
Fig. 5.16 - Sobretensão na saída do retificador com aterramento R para $\rho$ igual a 50 $\Omega$ -m. Tensão de pico: 1167 V -----	55
Fig. 5.18 - Sobretensão na saída do retificador com aterramento R para $\rho$ igual a 500 $\Omega$ -m. Tensão de pico: 2994 V -----	56
Fig. 5.19 - Sobretensão na saída do retificador com aterramento RLC para $\rho$ igual a 10 $\Omega$ -m. Tensão de pico: 803,8 V -----	56
Fig. 5.20 - Sobretensão na saída do retificador com aterramento RLC para $\rho$ igual a 50 $\Omega$ -m. Tensão de pico: 1167 V -----	56
Fig. 5.21 - Sobretensão na saída do retificador com aterramento RLC para $\rho$ igual a 100 $\Omega$ -m. Tensão de pico: 1459,5 V -----	57
Fig. 5.22 - Sobretensão na saída do retificador com aterramento RLC para $\rho$ igual a 500 $\Omega$ -m. Tensão de pico: 3028V -----	57

Fig. 6.1 - Fontes de danos para a infraestrutura de carregamento-----	59
Fig. 6.2 - Eletroposto na ZPR 0B -----	60
Fig. 6.3 - Descarga atmosférica ocorrendo em um poste de luz próximo a um eletroposto ---	61
Fig. 6.4 - Esquema de ligação de DPSs -----	61
Fig. 6.5. Eletroposto de 22 kW de saída AC-----	63
Fig. 6.6 Eletroposto de 80 kW de saída AC-----	64
Fig. 6.7 Subestação de 112,5 kVA -----	65
Fig 6.8 Quadro de força dos eletropostos -----	65
Fig. 6.9 Linhas de transmissão em média tensão -----	66
Fig. 6.10. Método da esfera rolante. Fonte: NBR 5416-3 -----	67
Fig. 6.11. Vista superior do CEAMAZON. -----	68
Fig. 6.12. Verificação do método da esfera rolante para o eletroposto de 80 kW -----	69
Fig. 6.13. Verificação do método da esfera rolante para o eletroposto de 22 kW -----	69
Fig. 6.14. Subestação aérea e poste servem como captores, criando uma zona de proteção contra descargas atmosféricas diretas aos eletropostos próximos -----	70
Fig. 6.15. Quadro principal de distribuição -----	72
Fig. 6.16. Quadro secundário do eletroposto de 80 kW -----	72
Fig. 6.17. Circuito simplificado de como o sistema deveria estar protegido contra descargas indiretas via coordenação de DPS -----	73
Fig. 6.18 Haste de medição da resistência da malha de aterramento do CEAMAZON -----	75
Fig. 6.19. Formação de Laços de Indução -----	76
Fig. 6.20. Reduzindo a área dos laços de indução por meio do roteamento adequado das linhas. -----	76
Fig. 6.21. Esquemático da instalação elétrica e roteamento dos fios-----	77

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 - Relação entre Fonte de Dano, Tipo de Dano e Tipo de Perda -----	28
Tabela 4.1 - Valores para os components do circuito de carregamento de veículos elétricos isolado da rede -----	45
Tabela 4.2 - Valores para os components do circuito de carregamento de veículos elétricos conectado à rede-----	46
Tabela 5.1 - Modelagem da haste de aterramento vertical para diferentes resistividades do solo -----	54
Tabela 6.1 - Relação entre a Classe do SPDA e o Raio da esfera rolante R (m) -----	68

## **LISTA DE SIGLAS**

CEAMAZON – Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia

DA – Descarga Atmosférica

IEC – ‘International Elechrotechnical Comission’

LEMP – ‘Lightning Electromagnetic Pulse’

NBR – Norma Brasileira

SPDA – Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas

TR – Temperatura de Reversão

UFPA – Universidade Federal do Pará

VE – Veículo Elétrico

VEH – Veículo Elétrico Híbrido

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Contribuições	16
1.2 Objetivos	17
1.1.1 Objetivos Gerais	17
1.1.2 Objetivos específicos	17
1.3 Organização do trabalho	17
2. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	17
2.1 Histórico	19
2.2 Formação das nuvens eletricamente carregadas	19
2.3 Tipos de descargas atmosféricas	22
2.4 Característica das descargas atmosféricas	24
2.5 Danos causados por descargas atmosféricas	25
2.6 Danos e Perdas	26
2.7 Riscos	29
2.8 Zonas de Proteção	30
3. VEÍCULOS ELÉTRICOS	32
3.1 Histórico	32
3.2 Tipos de Veículos Elétricos	33
3.3 Acionamentos Elétricos	36
3.4 Conversores	37
3.5 Carregamento de Baterias de VEs	39
3.6 Projeto SIMA	41
4. MODELAGEM DA FONTE DE SOBRETENÇÃO IMPULSIVA E DOS SISTEMAS DE CARREGAMENTO DE CARROS ELÉTRICOS ON E OFF GRID	42
4.1 Modelagem da fonte de sobretensão impulsiva	42
4.2 Modelos de sistemas de carregamento de baterias	44
5. ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES	47
5.1 Aplicação do transiente no sistema de carregamento de veículos elétricos isolado da rede	47
5.2 Aplicação do transiente no sistema de carregamento de veículos elétricos conectado à rede	50

5.3 Influência de modelos de aterramento no sistema de carregamento de veículos elétricos conectado à rede-----	53
6. PROTEÇÃO DE ELETROPOSTOS CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS-----	58
6.1 Fontes de danos-----	59
6.2 Proteção contra descargas diretas-----	59
6.3 Proteção contra descargas indiretas-----	60
6.4 Aterramento-----	62
6.5 Blindagem e Roteamento-----	62
6.6 Avaliação Local-----	63
6.7 Avaliação de descargas diretas sobre os eletropostos a partir do método da esfera rolante-----	66
6.8. Avaliação de descargas indiretas sobre os eletropostos-----	71
6.9 Avaliação do aterramento-----	74
6.10 Blindagem e roteamento-----	75
7. CONCLUSÕES -----	78
REFERÊNCIAS-----	80

## 1. INTRODUÇÃO

Sistemas de carregamento de baterias, geralmente, estão muito vulneráveis a induções eletromagnéticas provenientes de descargas atmosféricas. No geral, esse tipo de sistema se encontra muito exposto, por vezes havendo longos trechos de cabeamento entre a fonte principal (módulos fotovoltaicos, rede elétrica, etc) e o sistema de carregamento (conversores, controlador de carga, bateria, etc). Em muitos casos estão localizados em espaços sem cobertura, tornando-se um alvo fácil para incidência direta e indireta de raios. Isso se torna preocupante, uma vez que esses sistemas possuem muitos componentes sensíveis, como microprocessadores e circuitos integrados de alta precisão que podem ser facilmente danificados (Zhao *et al.* 2016).

Outra preocupação é a rápida expansão do mercado de carros elétricos no Brasil e no mundo, demandando assim mais estações de carregamento. Em 2020, havia cerca de 5 milhões de veículos elétricos nas ruas, e esse número tende a crescer ano após ano. Essa demanda precisa ser protegida contra sobretensões e transientes provenientes de descargas atmosféricas (Raycap. 2020).

As descargas atmosféricas podem ocorrer diretamente sobre a fonte principal ou linhas de transmissão, o que resulta na propagação de surtos no sistema. Curtos circuitos e falhas no aterramento também podem ser contadas como possíveis fontes de danos. Ademais, qualquer outra falha no sistema de proteção pode acarretar na indução de grandes correntes nos circuitos de carregamento. Isso motiva os pesquisadores a buscar entendimento acerca dos impactos, propondo sempre novos métodos e simulações para análise (Mariut *et al.* 2014).

Khurshid e Gomes (2021) realizaram um estudo no qual investigaram um sistema fotovoltaico de 400 kW conectado à rede, simulando descargas atmosféricas tanto do lado AC quanto do lado DC do inversor, variando os valores de resistência de aterramento. Os resultados mostraram que quando os lados AC e DC são aterrados separadamente para valores de resistência diferentes de zero, os potenciais de linha chegam a valores muito altos, que representam um risco grave para a ocorrência de arcos. Situação é pior quando o raio atinge o lado DC e quando a resistência de aterramento do lado DC tem valores altos. A situação melhora significativamente quando os sistemas de aterramento são equipotencializados. Eles aconselharam atingir uma resistência à terra abaixo de  $5 \Omega$  para o sistema de aterramento integrado. Os pontos do circuito onde os autores aplicaram as descargas atmosférica serviram de referência para o presente trabalho.

Zaini et. al (2016) modelaram um sistema solar fotovoltaico, estudando a aplicação de descargas atmosféricas em diferentes pontos do circuito, considerando diferentes magnitudes e formas de onda de corrente. O objetivo do estudo seria observar os transientes de corrente e tensão que aparecem quando o sistema solar fotovoltaico é atingido por uma descarga atmosférica. Concluíram que um transiente de corrente aparece no ponto mais próximo da descarga atmosférica, tendo o valor igual ao da corrente da descarga atmosférica. O transiente de tensão apareceu do lado CA do inversor, dessa forma causando danos ao equipamento.

Mohamed et. al (2018) analisaram os efeitos de transientes atmosféricos em um sistema de geração híbrido. O sistema modelado consistiu em um parque fotovoltaico de 2 MW, um parque eólico de 2,1 MW, um sistema de armazenamento de energia e a carga. Todo o sistema modelado está integrado à rede. Dois pontos foram selecionados para a injeção de corrente. O primeiro ponto foi o lado DC dos módulos fotovoltaicos, enquanto que o segundo foi a turbina eólica. Foi observado que, em amplitudes maiores, tempos de subida menores e larguras de pulso mais longas de corrente, o impacto será mais grave.

Impactos diretos de raios são extremamente difíceis de proteger, devido à magnitude da sobrecorrente. Todavia, os maiores problemas para dispositivos eletrônicos dos eletropostos vêm do surto elétrico resultante das descargas atmosféricas de maneira indireta. Além disso, todos os dispositivos elétricos que estão do lado da rede são fontes de perigo para os dispositivos eletrônicos, uma vez que podem receber surtos e conduzi-los aos equipamentos de carregamento. Curtos circuitos e falhas no aterramento também são citadas como possíveis fontes de danos, assim como todas as operações de comutação elétrica do lado da rede que estão conectados à rede (Raycap. 2020).

Dessa forma, deve ser fornecido um sistema completo de proteção contra raios para infraestrutura de carregamento de veículos elétricos, incluindo para-raios, ligação equipotencial, aterramento, blindagem, roteamento e instalação de dispositivos de proteção contra surto –DPSs. As medidas de proteção contra raios diretos e contra impulsos eletromagnéticos de raios – LEMP –devem ser integrados para fornecer melhores resultados de proteção. (Zhao *et al.* 2016).

### *1.1 Contribuições*

Este trabalho contribui para a comunidade acadêmica, tecnológica e empresarial, uma vez que apresenta resultados interessantes acerca efeito do impacto de descargas atmosféricas indiretas em eletropostos, bem como discute, de forma prática, qual a maneira mais adequada

de protegê-los. Espera-se que os pontos discutidos nesse trabalho possam contribuir para que os danos de descargas atmosféricas em eletropostos sejam melhor avaliados, discutidos e mitigados.

## *1.2 Objetivos*

### *1.2.1 Objetivos Gerais*

O primeiro objetivo dessa dissertação é investigar o efeito de descargas atmosféricas próximas à sistemas de carregamento de baterias.

O segundo objetivo é avaliar a qualidade da proteção dos eletropostos presentes no Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia – CEAMAZON -, localizado no Parque de Ciência e Tecnologia Guamá.

### *1.2.2 Objetivos específicos*

- Realizar a modelagem de um sistema de carregamento de baterias isolado da rede, um sistema de carregamento de baterias conectado à rede e uma fonte de tensão impulsiva.
- Aplicar testes de sobretensão, observando o comportamento das formas de onda de saída.
- Modelar o aterramento e verificar a influência do mesmo nas simulações.
- Analisar e comparar os resultados obtidos nas formas de onda.
- Avaliar o cenário ao qual os eletropostos do CEAMAZON estão submetidos.
- Verificar se, na prática, os eletropostos estão protegidos contra descargas atmosféricas utilizando-se conceitos técnicos dos trabalhos Zhao *et al* (2016) e Raycap (2020), além da norma técnica brasileira para proteção contra descargas atmosféricas NBR 5419.
- Fazer observações e ponderações acerca da proteção existente nos eletropostos.

## *1.3 Organização do trabalho*

No Capítulo 1 é feita a introdução do trabalho, explanando de maneira geral as bases e conceitos que serão explorados no decorrer do trabalho, atentando para os objetivos almejados.

No Capítulo 2 é feita a apresentação das bases e conceitos que serão explorados no decorrer do trabalho, incluindo aspectos históricos de descargas atmosféricas, conceitos, formação e sistemas de proteção.

No Capítulos 3 são abordados os veículos elétricos – VEs’ – compreendendo os aspectos históricos, tipos de veículos elétricos e conceitos básicos dos elementos constituintes em estações de carregamento.

No Capítulo 4 é explicada a modelagem de fontes impulsivas, bem como a modelagem de sistemas de carregamento de veículos elétricos conectado e isolado da rede elétrica. Nesse capítulo, também é abordado os pontos de aplicação do impulso de sobretensão atmosférica, bem como os pontos de medição de tensão.

No Capítulo 5 são mostrados os resultados provenientes das simulações, avaliando as formas de onda de sobretensão nos pontos explorados no Capítulo 4. Além disso, é feita a avaliação de tensão na saída do conversor para diferentes resistividades do solo, considerando modelos de aterramento.

No Capítulo 6 avalia-se métodos de proteção de eletropostos contra descargas atmosféricas, baseados nos artigos de Zhao, Raycap, e na norma NBR 5419. É feita a avaliação se os eletropostos do CEAMAZON estão protegidos contra descargas atmosféricas, a partir do que foi explicado no decorrer da seção.

No Capítulo 7 conclui-se o trabalho, apontando os principais pontos e resultados do trabalho desenvolvido.

## 2. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

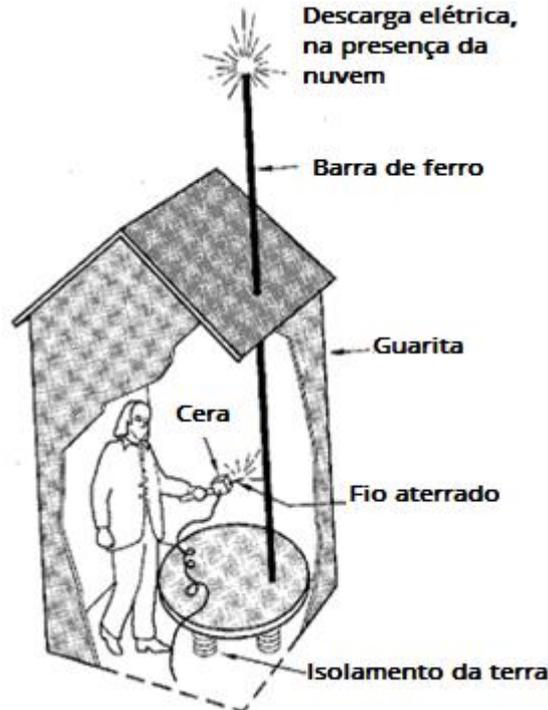
Este capítulo irá introduzir conceitos de descargas atmosféricas, incluindo aspectos históricos, formação de nuvens e características das descargas atmosféricas. São também abordadas as medidas de proteção, de acordo com a NBR 5419.

### 2.1 Histórico

Relâmpagos e trovões preocupam os seres humanos há muitos séculos. Há, ainda hoje, comunidades e tribos que acreditam na natureza mística das descargas atmosféricas, atribuindo o fenômeno à vontade dos deuses. Há cerca de 300 anos atrás, as descargas atmosféricas começaram a ser cientificamente estudadas. A atenção estava principalmente na compreensão a natureza do relâmpago e as formas de evitar que os relâmpagos danifiquem suas propriedades. Com o tempo, esse foco foi deslocado para a proteção dos seres humanos e gado, protegendo linhas de energia que se estendem por centenas de quilômetros ao longo da terra altamente exposta, para a proteção de sistemas de defesa e eletrônica e para sistemas de comunicação (Rakov. 2003).

Por volta de 1748, Franklin desenvolveu estudos relacionados à eletricidade, o que o ocuparia juntamente com a vida política e de negócios, até sua morte em 1790. Ele desenvolveu a descoberta das cargas positivas e negativas da eletricidade, que lhe renderiam uma reputação internacional (Isaacson. 2015).

Em julho de 1750, Franklin propôs que a eletricidade poderia ser drenada de uma nuvem por um mastro metálico. Se este mastro estivesse isolado da terra e aproximássemos algum objeto metálico que estivesse aterrado, um arco voltaico (ou uma faísca) saltaria da haste metálica para esse objeto aterrado, caso uma nuvem eletrificada estivesse por perto (Leal. 2014). A Fig. 2.1 mostra o experimento de Benjamin Franklin.



**Fig. 2.1.** Experimento de Benjamin Franklin. Fonte: Adaptado de Morales. 2013.

A partir de então, surgiram pesquisas e desenvolvimentos sobre descargas atmosféricas, hoje contando com tecnologias de ponta para proteção, monitoramento, etc.

## 2.2 Formação das nuvens eletricamente carregadas

A fonte primária de raios é um tipo de nuvem denominado *cumulonimbus*. Ela se desenvolve a partir de uma nuvem, chamada *cumulus*. Essa nuvem se forma quando parcelas de ar quente e úmido sobem e resfriam por expansão adiabática (Rakov. 2003).

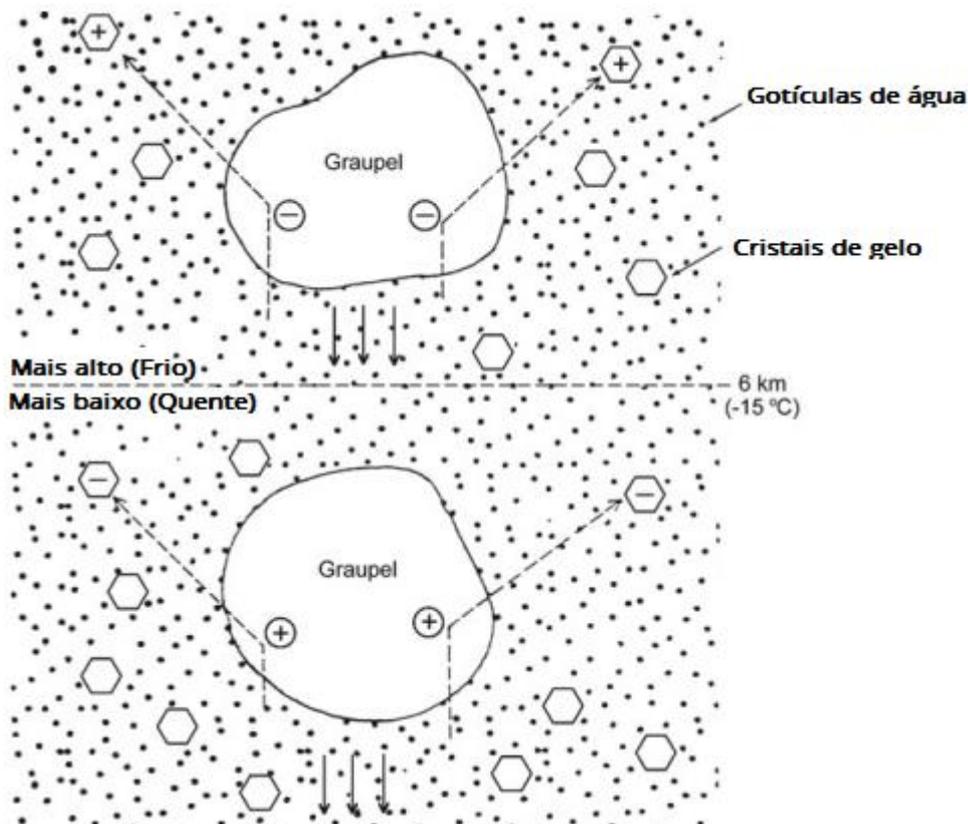
Quando a umidade relativa na subida e no resfriamento excede a saturação, a umidade se condensa no material particulado no ar para formar as muitas pequenas partículas de água que constituem a nuvem visível (Rakov. 2003).

Acerca do processo de eletrificação das nuvens, muitas teorias foram propostas. Está crescendo consenso de que o chamado mecanismo graupel-gelo é o dominante, pelo menos nos estágios iniciais de eletrificação da nuvem. Nesse mecanismo, as cargas elétricas são produzidas por colisões entre graupel (pequenos esferóides de gelo) e pequenos cristais de gelo na presença de gotículas de água. A separação de partículas carregadas é feita pela ação da gravidade (Rakov. 2003).

A Fig. 2.2 mostra esse mecanismo. As partículas pesadas de graupel caem através de uma suspensão de cristais de gelo menores (hexágonos) e gotas de água super-resfriadas (pontos) (Rakov. 2003).

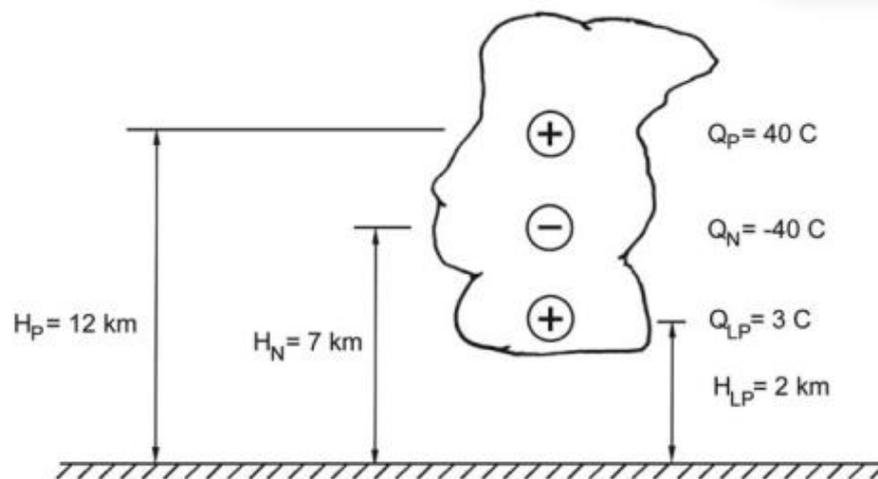
Quando a temperatura está abaixo de um valor crítico, chamado de temperatura de reversão – TR -, as partículas de graupel em queda adquirem uma carga negativa em colisões com os cristais de gelo (Rakov. 2003).

Em temperaturas acima de TR, as partículas de graupel adquirem uma carga positiva. A temperatura de reversão do sinal de carga TR é geralmente considerada entre -10 e -20 °C, faixa de temperatura característica da região negativa encontrada em nuvens carregadas. O graupel que adquire carga positiva quando cai abaixo da altitude de TR poderia explicar a existência da região inferior de carga positiva na nuvem. Acredita-se que a polaridade da carga que é separada em colisões de gelo-graupel é determinada pelas taxas em que o gelo e superfícies de graupel estão crescendo. A superfície que cresce mais rapidamente adquire uma carga positiva.



**Fig. 2.2.** Mecanismo graupel-gelo. Fonte: Adaptado de Rakov. 2003.

Esse mecanismo é capaz de explicar o modelo tripolar de nuvem carregada, o qual está mostrado na Fig. 2.3.

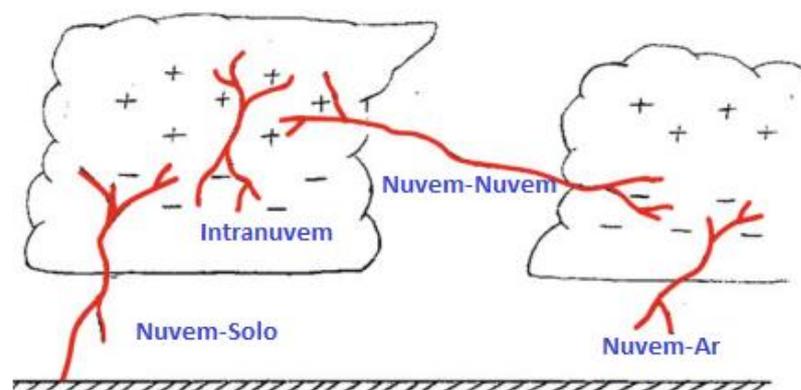


**Fig. 2.3.** Modelo tripolar de carregamento da nuvem. Fonte: Rakov. 2003.

As magnitudes das principais cargas positivas e negativas (superior e meio) são de algumas dezenas de coulombs, enquanto que a carga positiva inferior é provavelmente cerca de 10 C ou menos (Rakov. 2003).

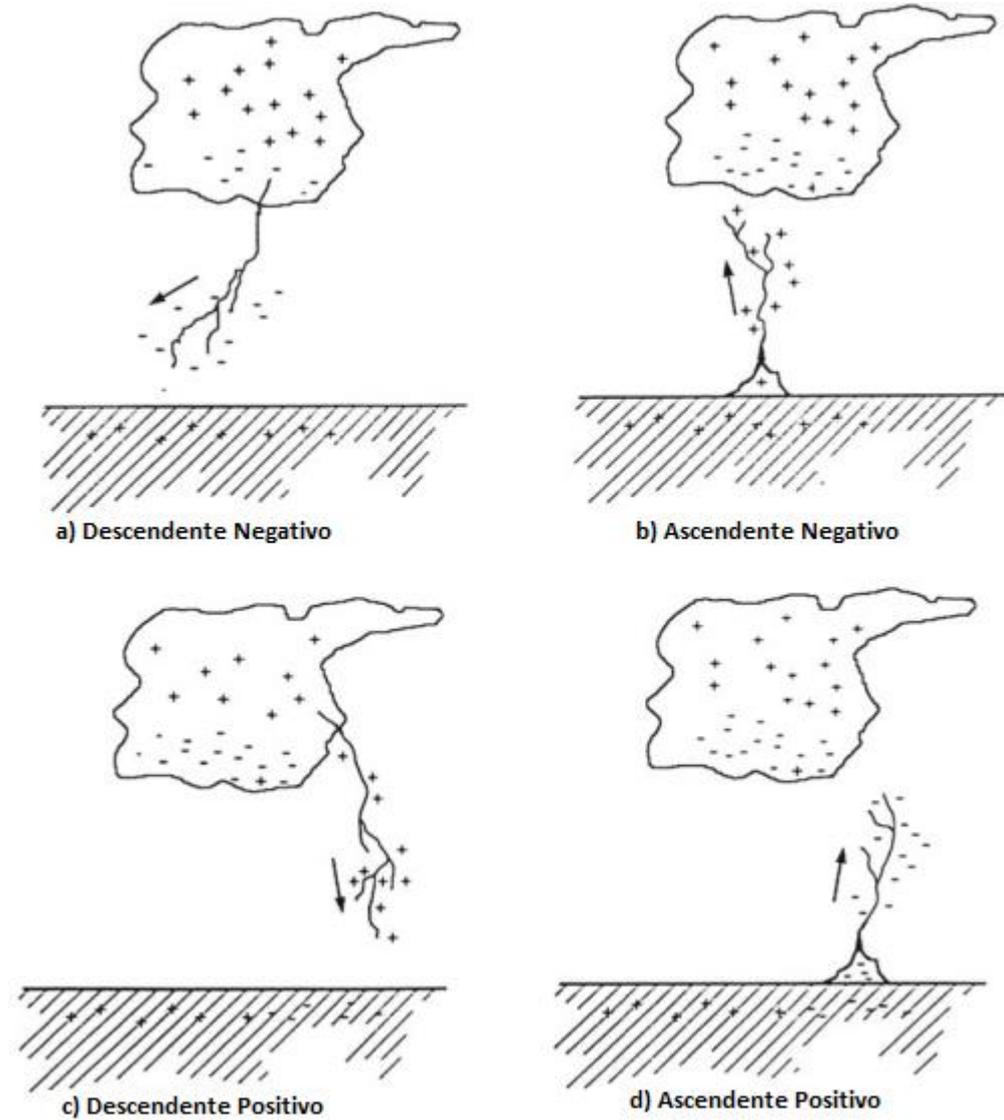
### 2.3 Tipos de descargas atmosféricas

Cerca de 75% das descargas atmosféricas não envolvem o solo. Elas incluem descargas intranuvem, internuvem e nuvem-ar. Descargas entre a nuvem e a Terra são denominadas de descargas nuvem-solo. Estes últimos constituem cerca de 25% das descargas atmosféricas. A Fig. 2.4 mostra os tipos de descarga atmosférica existentes.



**Fig. 2.4.** Tipos de DA. Fonte: Adaptado de Rakov. 2003.

Os quatro principais tipos de descarga atmosférica nuvem-solo são: descendente negativo, ascendente negativo, descendente positivo, ascendente positivo. Estão ilustradas na Fig. 2.5.



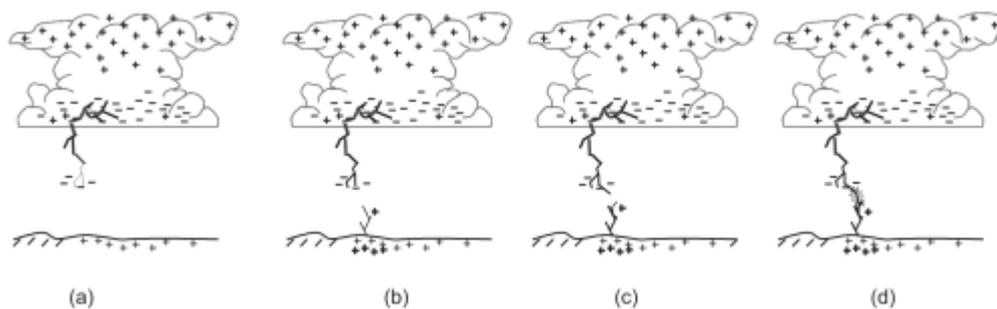
**Fig. 2.5.** Tipos de DA nuvem-solo. Fonte: Adaptado de Rakov. 2003.

Cerca de 90% das descargas nuvem-solo são descendente negativo (Rakov. 2003).

#### 2.4 Característica das descargas atmosféricas nuvem-solo

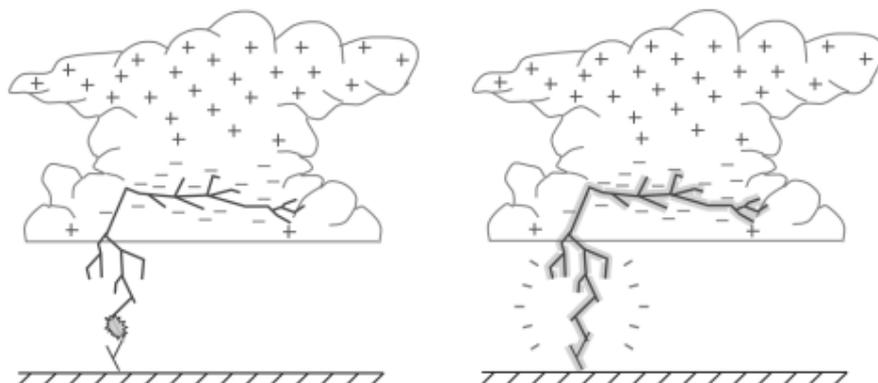
A descarga atmosférica, independentemente de atingir o solo ou não, geralmente é chamada de “flash”. Um termo bastante utilizado para uma descarga atmosférica é “raio”, apesar de não ser um termo técnico (Rakov. 2003).

Quando o líder descendente alcança uma distância de poucas centenas de metros do solo, o campo elétrico no solo se torna tão intenso que pode originar líderes ascendentes. Estes líderes podem ter extensão de várias dezenas de metros e seguem aproximadamente a direção do campo elétrico médio local, que aponta para cima. O processo de conexão é denominado de *attachment* (Visacro. 2019).



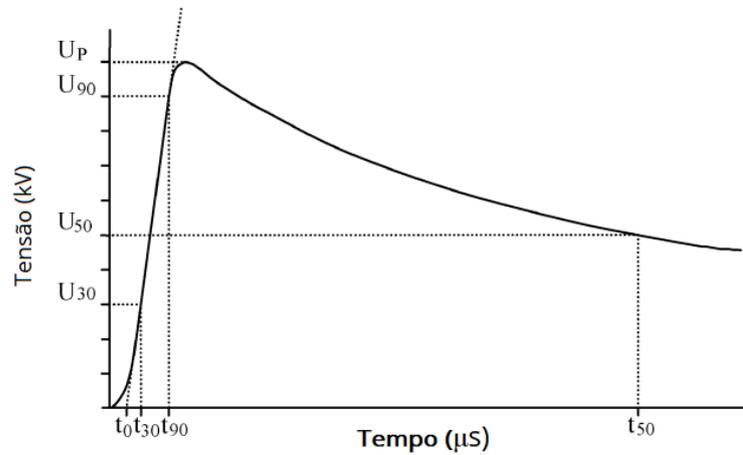
**Fig. 2.6.** O processo de conexão dos canais ascendente e descendente (*attachment*) com o salto final. Fonte: Visacro. 2019.

No momento em que ocorre a conexão do canal entre nuvem e o solo, é estabelecida a corrente de retorno (*return stroke current*). Essa corrente se propaga pelo canal, a partir do ponto de conexão dos canais ascendente e descendente. As cargas ali acumuladas são neutralizadas, e origina-se uma onda de corrente na base do canal (Visacro. 2019). A Figura 2.7 ilustra a descarga de retorno.



**Fig. 2.7.** Descarga de retorno. Fonte: Visacro. 2019.

As correntes de descargas atmosféricas possuem polaridade unidirecional (MARTINS, 2017). A forma de onda de tensão típica de uma descarga atmosférica está ilustrada na Fig. 2.8.



**Fig. 2.8.** Forma de onda de tensão uma DA. Fonte: Adaptado de Lewis, 2008.

Uma forma de onda de tensão de impulso típica é mostrada na Fig. 2.8. Esta forma de onda é geralmente descrita usando-se três parâmetros, que são: a tensão de pico, o tempo de frente, e o tempo de cauda (Lewis, 2008).

O método padrão para determinar o tempo de frente é medindo o tempo no qual a forma de onda de tensão impulsiva aumenta de 30% para 90% do seu valor de pico, multiplicado por 1,67 (Lewis, 2008). Isso pode ser visto na Eq. 2.1:

$$T_1 = 1,67 \cdot (t_{90} - t_{30}) \quad 0,84 < T_1 < 1,56 \mu\text{s} \quad \text{Eq. 2.1}$$

A norma internacional IEC 60060-1 exige que para que a forma de onda seja aceitável para fins de teste, o tempo de frente deve estar dentro de  $\pm 30\%$  do tempo de frente nominal, que é de **1,2**  $\mu\text{s}$  (Lewis, 2008).

Para o cálculo do tempo de cauda, é necessária a definição da origem ( $t_0$ ). A origem pode ser encontrada a partir dos valores de 30% e 90% de tensões e tempos (Lewis, 2008), conforme a Eq. 2.2:

$$t_0 = t_{30} - \frac{U_{30}}{U_{90} - U_{30}} (t_{90} - t_{30}) \quad \text{Eq. 2.2}$$

O tempo de cauda é calculado pela diferença de tempo entre o tempo necessário para a forma de onda decair para 50% da tensão de pico e a origem  $t_0$ , conforme a Eq. 2.3:

$$T_2 = (t_{50} - t_0) \quad 0,4 < T_2 < 0,6 \mu s \quad \text{Eq. 2.3}$$

Neste caso, o padrão define que a forma de onda aceitável é aquela cujo tempo de cauda está dentro de 20% do valor nominal. O valor nominal do tempo de cauda é de **50  $\mu s$**  (Lewis, 2008).

### 2.5 Danos causados por descargas atmosféricas

As descargas atmosféricas podem causar danos mecânicos às estruturas, causando fogo ou explosões. Podem causar sobreaquecimento de condutores que, devido à corrente do raio, e podem gerar centelhamentos pelas sobretensões em acoplamentos indutivos e resistivos. Podem causar danos às pessoas devido às tensões de passo e de toque, ou falhas ou danos em equipamentos de sistemas internos devido à interferência de ondas eletromagnéticas geradas pelas descargas atmosféricas. Essas ondas eletromagnéticas são conhecidas como LEMP (Lightning Electromagnetic Pulse). Quando uma descarga atmosférica atinge um ponto próximo à estrutura, podem ocorrer falhas ou mal funcionamento de equipamentos devido às LEMP's (Waltrick. 2018).

A descarga elétrica, ao atingir uma estrutura, pode provocar danos ao seu interior, aos ocupantes e à própria estrutura, podendo causar falhas aos sistemas internos. A gravidade dos danos varia de acordo com alguns fatores associados à estrutura, como tipo de construção, função da estrutura, linhas elétricas e tubulações metálicas. Uma descarga atmosférica pode causar prejuízos mesmo que uma estrutura não seja atingida diretamente (Martins. 2017)..

Existem algumas situações diferentes nas quais as descargas atmosféricas ocorrem e provocam danos, segundo a NBR 5419. Essas fontes de danos são definidas entre S1 e S4, sendo:

- S1: descargas atmosféricas diretamente sobre a própria estrutura;
- S2: descargas atmosféricas próximas à estrutura;
- S3: descargas atmosféricas diretamente sobre linhas elétricas e tubulações metálicas que entram na estrutura;

- S4: descargas atmosféricas próximas às linhas elétricas e tubulações metálicas que entram na estrutura.

S1 é a situação que pode causar estragos em maior proporção à estrutura, conteúdo e aos ocupantes, seguida de S3, S2 e S4. Já em S2, S3 e S4, são verificadas apenas falhas no funcionamento dos sistemas elétricos, sem risco à vida humana (Martins, 2017).

## 2.6 Danos e Perdas

Os danos, por sua vez, segundo a NBR 5419-1, são divididos em três categorias (D1, D2 e D3), e cada uma destas produz no máximo quatro perdas diferentes (L1, L2, L3 e L4).

- D1: a seres humanos devido aos choques elétricos;
- D2: danos físicos (fogo, explosão, destruição mecânica) devido aos efeitos das correntes as descargas atmosféricas, inclusive centelhamento;
- D3: falhas de sistemas internos em função de LEMP's;

Para as perdas:

- L1: perda de vida humana (incluindo danos permanentes);
- L2: perda de serviço ao público;
- L3: perda de patrimônio cultural;
- L4: perda de valor econômico.

A Tabela 2.1 abaixo, descreve a relação entre fonte de dano, tipo de dano e tipo de perda.

**Tabela 2.1.** Relação entre Fonte de Dano, Tipo de Dano e Tipo de Perda. Fonte: Adaptado de NBR 5419.

Local de impacto	Fonte de dano	Tipo de dano	Tipo de perda
Estrutura	S1	D1	L1, L4 <sup>1</sup>
		D2	L1, L2, L3 e L4
		D3	L1 <sup>2</sup> , L2, L4
Próximo à estrutura	S2	D3	L1 <sup>2</sup> , L2, L4
Linhas elétricas ou tubulações metálicas conectadas a estrutura	S3	D1	L1, L4 <sup>1</sup>
		D2	L1, L2, L3 e L4
		D3	L1 <sup>2</sup> , L2, L4
Próximo a linhas elétricas ou tubulações metálicas conectadas à estrutura	S4	D3	L1 <sup>2</sup> , L2, L4
<sup>1</sup> somente propriedades com perda de animais			
<sup>2</sup> somente para estruturas com risco de explosão, hospitais			

Para reduzir os danos, segundo a NBR 5419-1, pode-se utilizar as seguintes medidas de proteção:

D1 (dano às pessoas devido aos choques elétricos):

- Isolar partes condutoras que estão expostas adequadamente.
- Equipotencialização por meio de um sistema de aterramento em malha.
- Restrições físicas e avisos.
- Ligação equipotencial para descargas atmosféricas.

D2 (danos físicos):

- Subsistema de captação;
- Subsistema de descida;
- Subsistema de aterramento;
- Equipotencialização para descargas atmosféricas;
- Isolação elétrica (e daí a distância de segurança).

Dano D3 (falhas dos sistemas eletroeletrônicos):

- Aterramento e equipotencialização;
- Blindagem;
- Roteamento da fiação;
- Interfaces isolantes;
- Coordenação de DPSs.

## 2.7 Riscos

Apesar de as descargas atmosféricas serem fenômenos naturais, medidas de proteção devem ser tomadas para que se evite danos causados por elas. Todavia, nem todas as estruturas que precisam de um SPDA. É preciso analisar algumas variáveis e fazer o estudo de cada caso para se confirmar a necessidade de instalação de SPDA (Martins. 2017).

Quatro riscos a serem levados em consideração, segundo a NBR 5419, são:

- R1: risco de perdas ou danos permanentes em vidas humanas;

- R2: risco de perdas ao serviço público;
- R3: risco de perdas do patrimônio cultural;
- R4: risco de perdas de valor econômico.

Cada critério de risco tem um valor tolerável. Se o risco estiver acima de seu limite tolerável, então é necessário um SPDA (Martins. 2017).

O SPDA possui um sistema de proteção interno e um sistema de proteção externo. O sistema interno inclui subsistema de captação – para interceptar a descarga atmosférica -, o subsistema de descida – escoando a corrente da descarga atmosférica para a terra – e o sistema de aterramento - dispersa a corrente da descarga atmosférica na terra.

Por sua vez, o sistema interno corresponde à distância segura e ligação equipotencial. Assim, evita-se que haja centelhamento na estrutura (Martins. 2017).

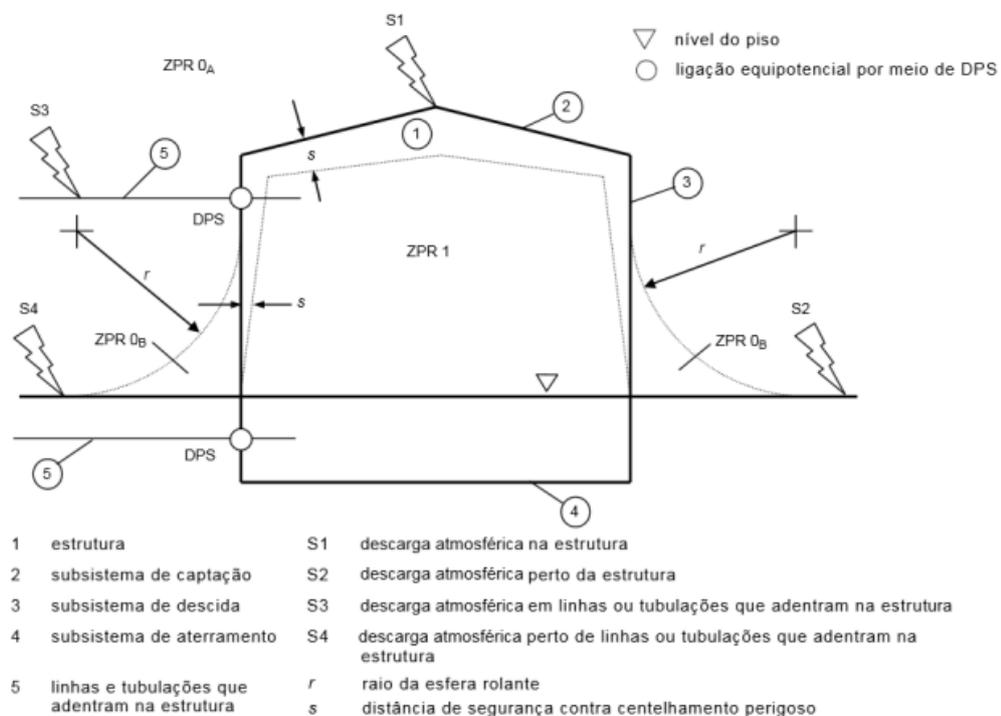
## 2.8 Zonas de Proteção

São definidas as zonas de proteção que vão atuar contra as descargas atmosféricas utilizando medidas de proteção como SPDA, condutores de blindagem, blindagens magnéticas e DPS para determinar a (ZPR). Essas zonas juntamente com as medidas de proteção podem reduzir consideravelmente os danos causados pelas LEMP. As ZPR estão definidas conforme a norma 5419-1.

- ZPR 0A: zona onde a ameaça é devido à queda direta e ao campo eletromagnético total da descarga atmosférica. Os sistemas internos podem estar sujeitos à corrente total ou parcial da descarga atmosférica;
- ZPR 0B: zona protegida contra queda direta, mas onde a ameaça é o campo eletromagnético total da descarga atmosférica. Os sistemas internos podem estar sujeitos à corrente parcial da descarga atmosférica;

- ZPR 1: zona onde a corrente de surto é limitada por uma divisão da corrente da descarga atmosférica e pela aplicação de interfaces isolantes e/ou DPS na fronteira. Uma blindagem espacial pode atenuar o campo eletromagnético da descarga atmosférica
- ZPR 2, ..., n: zona onde a corrente de surto pode ser ainda mais limitada por uma divisão da corrente da descarga atmosférica e pela aplicação de interfaces isolantes e/ou de DPS adicionais na fronteira. Uma blindagem espacial adicional pode ser usada para atenuar ainda mais o campo eletromagnético da descarga atmosférica.

Segundo a NBR5419, quanto maior a zona de proteção, menor serão os parâmetros de efeito do meio eletromagnético. Para que uma estrutura seja protegida, ela deve estar adequada em uma ZPR que cuja a característica de proteção seja equivalente para evitar possíveis danos (danos físicos ou falhas dos sistemas elétricos e eletrônicos devido aos surtos de sobretensões). Na Fig. 2.9, é mostrada a definição de ZPR pelo SPDA.



**Fig. 2.9.** - ZPR definido por SPDA. Fonte: NBR 5419.

### 3. VEÍCULOS ELÉTRICOS

Este capítulo aborda aspectos históricos de veículos elétricos, bem como os tipos de veículos, mecanismos de retificação, conversão e carregamento.

#### 3.1 Histórico

Veículos elétricos (VEs) são veículos que utilizam motores elétricos para propulsão. O combustível dos veículos elétricos é a eletricidade, que pode ser obtida de diferentes maneiras: conectando diretamente à fonte externa de eletricidade, por meio de *plugin*, ou utilizando cabos aéreos, recorrendo ao sistema de indução eletromagnética (Antunes. 2018)

Os carros elétricos foram introduzidos no mercado automobilístico há mais de 100 anos. No início do século XX, pesquisadores criaram alguns dos primeiros carros elétricos. No mesmo período, o inventor britânico Robert Anderson desenvolveu a primeira carruagem elétrica. Em meados do século XIX, os inventores franceses e ingleses começaram a construir os primeiros modelos de carros elétricos práticos (Hoyer. 2008).

Em 1908 foi introduzido no mercado o modelo T. Corresponde a um automóvel a gasolina produzido por Henry Ford. Esse fato inviabilizou a competitividade dos veículos elétricos no mercado, uma vez que esse modelo era muito mais barato do que um veículo elétrico. Além disso, outra novidade do modelo de Henry Ford foi a partida elétrica, substituindo o uso de manivela. Sendo assim, devido à necessidade crescente de locomoção em maior distância e com o combustível relativamente barato, os veículos elétricos perderam espaço (Matulka. 2014).

Devido à recente preocupação com questões ambientais e leis mais rigorosas em relação à emissão de gases tóxicos como o CO<sub>2</sub>, os veículos elétricos voltaram à tona como uma alternativa mais sustentável. Em 1997 foi lançado o Prius, que se tornou o primeiro carro híbrido produzido em massa (Matulka. 2014).

Em 2006, uma pequena empresa do Vale do silício, chamada de Tesla Motors, começaria a produzir um carro esportivo elétrico de luxo que poderia percorrer mais de 320 quilômetros com uma única carga. Em 2010, a Tesla recebeu um empréstimo de US \$ 465 milhões do departamento de programas de empréstimo de energia. Desde então, a Tesla se tornou a maior empresa automobilística da Califórnia e tem produzido carros cada vez mais modernos, tecnológicos e eficientes (Matulka. 2014).

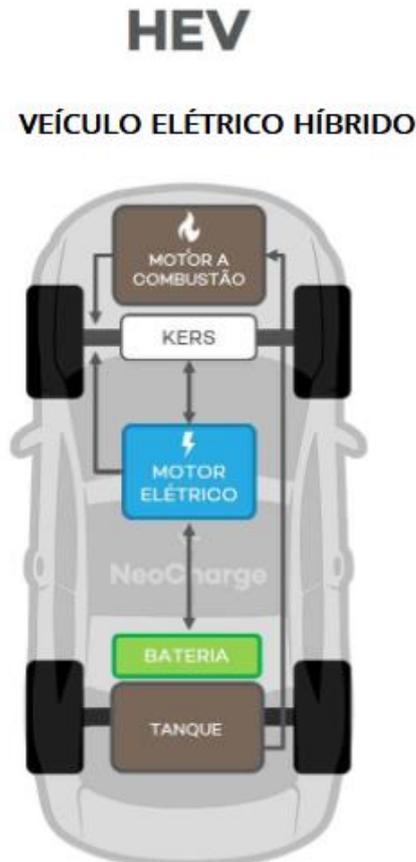
### 3.2 Tipos de Veículos Elétricos

Veículos elétricos (VE), segundo a Neocharge (2021), possuem basicamente três tipos básicos. São eles: totalmente elétricos, híbridos e híbridos plug-ins.

- Veículos elétricos híbridos (HEVs):

Utilizam gasolina/álcool ou diesel como alimento para o motor a combustão, possuindo também um motor a bateria. Utilizando ambos os motores, os veículos elétricos híbridos apresentam uma eficiência melhor do uso do combustível, além de poluírem menos, uma vez que o motor elétrico complementa a atividade do motor a combustão (Neocharge. 2021).

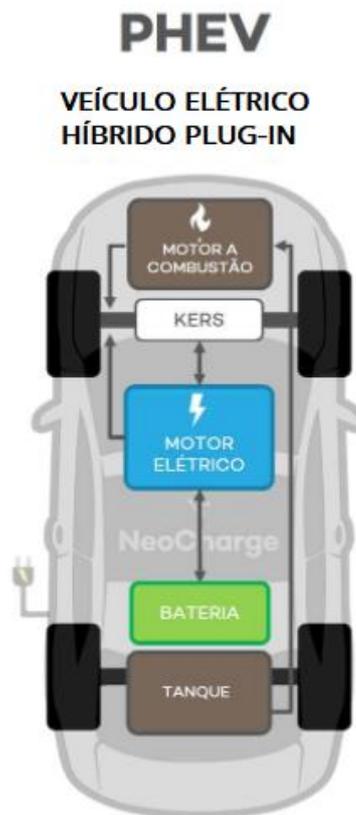
Além disso, o próprio carro, por meio da frenagem regenerativa, aproveita o calor que seria dissipado como forma de gerar energia elétrica para armazenar nas baterias. Esse processo ocorre quando é acionado o freio. Quando é preciso de uma alta potência, acionam o motor a combustão. Esse processo é todo automatizado e controlado pelos circuitos internos. Na Fig. 3.1, é ilustrado um modelo de VE híbrido (Neocharge. 2021).



**Fig. 3.1.** Modelo de HEV. Fonte: Neocharge. 2021.

- Veículos elétrico híbridos plug-in (PHEVs):

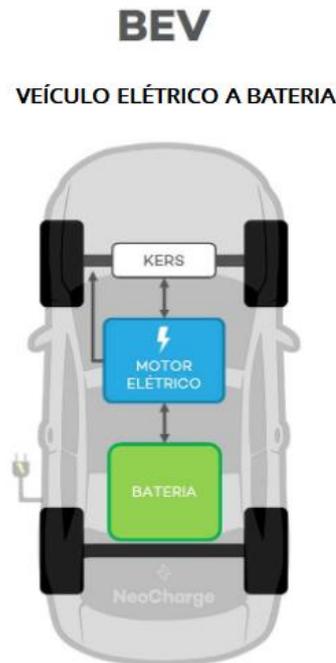
PHEV significa veículo elétrico *plug-in*. Além de possuir dois motores (um elétrico e outro a combustão), os PHEVs possuem banco de baterias recarregável. Podem, portanto, ter sua bateria recarregada tanto pela frenagem regenerativa como por um cabo alimentado por uma fonte externa. Quando a bateria acaba, o veículo funciona como um veículo a combustão normal (Neocharge. 2021). Na Fig. 3.2 é ilustrado um modelo de PHEVs.



**Fig. 3.2.** Modelo de PHEV. Fonte: Neocharge. 2021.

- Veículos elétricos a bateria (BEVs):

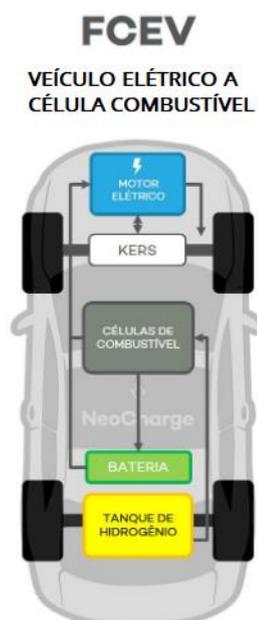
Os VEBs são veículos que usam apenas motor elétrico, sendo então considerados 100% elétricos. A bateria, quando esgotada, pode ser recarregada tanto por meio da frenagem regenerativa como por via da rede elétrica externa. Não emitem nenhum gás poluente ou de efeito estufa, sendo, portanto mais sustentáveis (Neocharge. 2021). Na Fig. 3.3, está ilustrado um BEV.



**Fig. 3.3.** VEB. Fonte: Neocharge. 2021.

- VE a célula combustível (FCEV).

Utilizam gás hidrogênio como principal fonte de energia. Também possuem a frenagem regenerativa como meio de carregamento de baterias. Combinam hidrogênio e oxigênio para produzir eletricidade, sendo, portanto, 100% elétricos. Ainda estão entrando no mercado (Neocharge. 2021). Na Fig. 3.4, está ilustrado um FCEV.



**Fig. 3.4.** FCEV Fonte: Neocharge. 2021.

- VE conectado à rede ou Trólebus:

Geralmente, esse tipo de VE é usado no transporte urbano. A energia é advinda da rede de distribuição. São utilizadas hastes para fazer a conexão entre a rede e o VE. No Brasil tem-se esse tipo de VE no estado de São Paulo. Na Fig. 3.5, está ilustrado um VE conectado à rede (INEE. 2010).

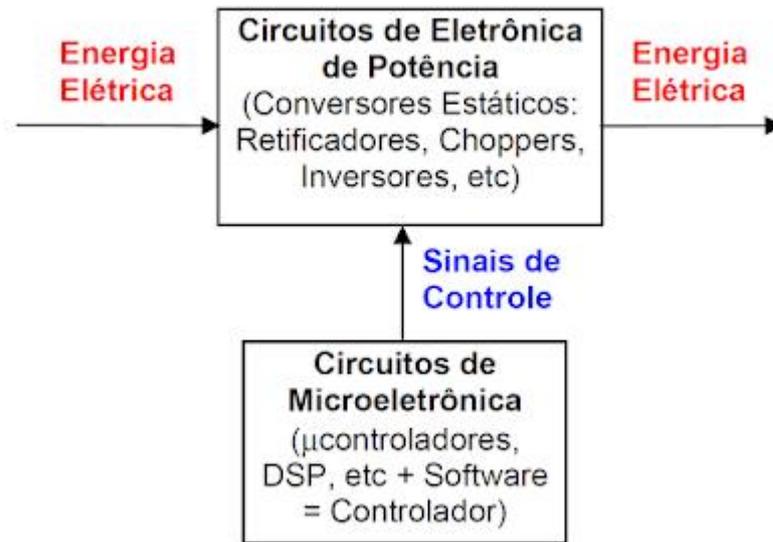


**Fig. 3.5.** VE conectado à rede. Fonte: Diário do Transporte. 2017.

### 3.3 Acionamentos Elétricos

Existem basicamente três tipos de acionamentos elétricos para VEs: inversores, conversores e ainda os retificadores. São classificados como conversores estáticos, uma vez que são circuitos de Eletrônica de Potência que controlam o fluxo de energia elétrica entre uma fonte e um consumidor, operando na mudança do valor da tensão (Lenz. 2013).

Os inversores e conversores são dispositivos distintos e independentes, sendo adequadamente combinados a fim de operarem no gerenciamento da energia. Esse processo é feito tanto para realizar a tração das rodas, quanto para realizar a recarga de baterias (Lenz (2013). Nesse trabalho, será focado nos mecanismos de acionamento para a recarga da bateria de VEs. A Fig. 3.6 mostra um fluxograma desse processo.



**Fig. 3.6.** Fluxograma de controle em VEs. Fonte: Lenz. 2013.

### 3.4 Conversores

Um conversor DC/DC altera o nível da tensão elétrica, a fim de elevar ou reduzir. São aplicáveis onde a fonte de alimentação disponível é DC. Essa fonte pode ser, por exemplo, um retificador AC/DC sem controle dotado apenas de diodos, ou de um banco de baterias. Se a carga necessita de uma tensão DC diferente daquela fornecida pela fonte, o uso de conversor pode realizar esta regulagem (Lenz (2013) apud Antunes (2018)).

A maneira mais eficiente de se manipular valores elevados de potência em DC é através do uso de interruptores estáticos. Os elementos desses arranjos operam em comutação (chaveamento). Por meio de técnicas de Modulação de Largura de Pulso (PWM), a tensão DC fixa pode ser convertida em uma tensão DC variável ou regulada, através de pulsos que comandam elementos de chaveamento (Lenz. 2013).

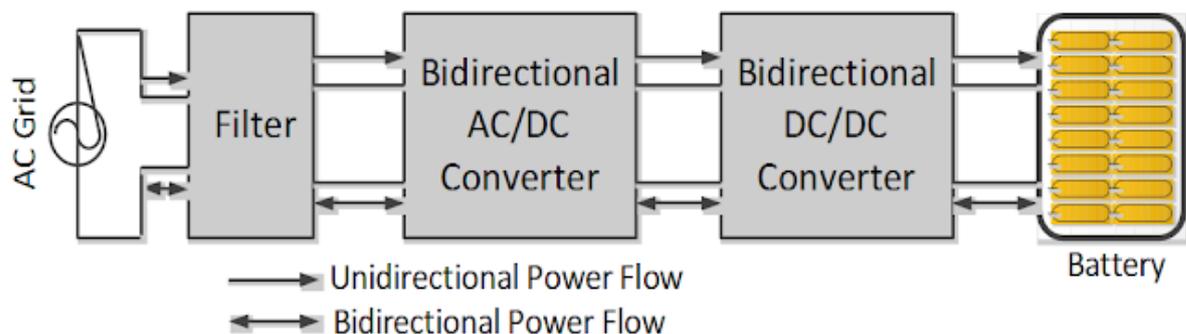
Segundo Lenz (2013), existem alguns diferentes tipos de conversores de tensão. Dentre eles três são mais comuns:

- Conversor abaixador ou conversor buck (step-down), que diminui a tensão;
- Conversor elevador ou conversor boost (step-up), que aumenta a tensão;
- Conversor abaixador-elevador ou conversor buck-boost combinado;

A forma mais comum de utilizar um conversor de tensão DC/DC é elevar a tensão de uma fonte relativamente baixa, alimentando na saída cargas com um consumo de energia mais elevado. Além disso, também podem operar de forma bidirecional, ou seja, sendo também utilizados no sentido inverso, para reduzir a tensão. (Lenz. 2013).

Mesmo considerando o emprego de carregamentos domésticos, tem-se como requerimentos básicos que os equipamentos de carregamento de veículo elétrico devam minimizar o seu impacto sobre qualidade de energia, consumindo sempre corrente com alto fator de potência (Lenz. 2013).

Por isso, emprega-se topologias de correção de fator de potência ativa, por meio de Conversores DC-DC Boost (que aumenta a tensão que é entregue pelo retificador do carregador embarcado), enquanto que a topologia de intercalamento (AC/DC + DC/DC) pode reduzir a ondulação e o tamanho dos indutores necessários. Na Fig. 3.7, vemos o como funciona o sistema de carregamento das baterias e onde entram em ação os conversores (Lenz. 2013).



**Fig. 3.7.** Diagrama de blocos do carregamento de veículos elétricos. Fonte: Lenz. 2013.

Além disso, nos circuitos retificadores PWM empregados nos carregadores embarcados dos VEs, os chaveadores de potência são comutados em frequências muito maiores do que a frequência da rede de CA, permitindo a comutação instantânea e a correção do fator de potência. Estes retificadores PWM, são conhecidos como "buck-boost" PWM (Lenz. 2013).

### 3.5 Carregamento de Baterias de VEs

Em automóveis totalmente elétricos, precisa-se de uma fonte externa para carregar as baterias. No geral, os carros elétricos precisam de um tempo longo para carregar a bateria totalmente, sendo esse um dos grandes problemas a serem enfrentados. Como exemplo, pode-se citar o carro produzido pela Tesla motors, o *model S*. Esse automóvel tem duas versões, com bateria de 60 e 85 KWh. Esse veículo pode ser carregado em 127V e 220V. Em uma 127 V, o modelo de bateria 60KWh pode demorar 46 horas. Para o modelo com bateria de 85 kWh, esse tempo é de 52 horas. Quando ligado em 220 V, esse tempo é reduzido drasticamente. No modelo com bateria 85 kWh, o tempo de carga total é atingido em 9,5 horas (Antunes. 2018).

A montadora Tesla apresenta também os carregadores ‘supercharger’. Correspondem às estações de carregamento super-rápidas. Nela, é possível carregar a bateria do model S em somente 1 hora. Na Figura 3.8, pode-se ver esse posto de carregamento (Antunes. 2018).



**Fig. 3.8.** Posto de carregamento de VE. Fonte: Climainfo. 2017.

Segundo Antunes (2018), o carregamento das baterias de automóveis, pode ser classificado em 3 níveis. São:

- Nível 1: utiliza 127 ou 220 Vca; Possui saída monofásica; Possui 3 pinos (dois para tensão e um para aterramento). A carga total pode demorar entre 8 a 14 horas.

- Nível 2: usa 220 ou 230 Vca. Possui saída monofásica; carga total entre 4 a 8 horas.
- Nível 3: são os carregadores super-rápidos. Nos postos de carga, utilizam a entrada de 480 Vca. A saída para o usuário é de 300 a 400Vcc. Pode-se carregar 80% da bateria em apenas 15 minutos.

Para cada um dos níveis, há um tipo de conector de carregamento. Uma vez que o tipo de conexão varia conforme o fabricante, ainda não existe uma conexão universal. Todavia, há uma tendência, como a conexão tipo 1 SAE J1772 e a conexão Tipo 2 IEC 62196, mostradas na Fig. 3.9 e 3.10, respectivamente (Lugenergy. 2018).



**Fig 3.9.** Conector de carregamento modelo SAE J1772 tipo 1. Fonte: Lugenergy. 2018.

A conexão tipo 1 SAE J1772 é uma das mais utilizadas mundialmente, sendo bastante adotada sobretudo por fabricantes asiáticos e americanos. Muitos carros fabricados antes de 2017 usam esse tipo de conexão. Já a conexão IEC 62196 tipo 2 é considerado um padrão europeu. Apresentada pela empresa alemã Mennekes (Lugenergy. 2018).



**Fig. 3.10.** Conector de carregamento modelo IEC 62196 tipo 2. Fonte: Lugenergy. 2018.

### 3.6 Projeto SIMA

O Sistema Inteligente Multimodal da Amazonia – SIMA – é um projeto que visa melhorar a eficiência energética da Universidade Federal do Pará – UFPA -, Campus Belém. Esse projeto prevê-se a criação de uma usina fotovoltaica, uso de ônibus e barcos elétricos, sistema de armazenamento a baterias, e eletropostos de abastecimento com a energia gerada dentro da universidade. A UFPA já recebeu o primeiro ônibus previsto no projeto (UFPA, 2020).

O projeto é uma parceria entre a Norte Energia, o CPqD – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações; as empresas ABB e BYD; e a UFPA. Com a coordenação da professora Maria Emília Tostes, do Centro de Eficiência Energética da Amazônia – CEAMAZON-, através de um projeto de P&D ANEEL, pretende-se viabilizar a sustentabilidade na UFPA Campus Universitário Guamá “José da Silveira Neto” e Castanhal (UFPA, 2020). A Fig. 3.10 mostra o ônibus elétrico do projeto SIMA.



**Fig 3.11.** Ônibus Elétrico do projeto SIMA. Fonte: adaptado de OLIBERAL. 2022.

De acordo com o site oficial da UFPA, o Sistema de Transporte Inteligente - SIMA, será estruturado em seis subsistemas interligados. Entre os serviços ofertados, estão a implantação de um sistema piloto de Mobilidade Elétrica Urbana composto pelos modais (transportes) ônibus elétrico e barco elétrico; um projeto e construção de um barco movido a energia solar fotovoltaica, com sistema de armazenamento; implantação de um Sistema Fotovoltaico de Geração de Energia Elétrica de apoio aos veículos elétricos; um Sistema de Armazenamento de Energia Elétrica; um sistema de abastecimento com eletropostos para atender aos veículos elétricos; desenvolvimento de um sistema de gestão inteligente com comunicação wireless e armazenamento e processamento em nuvem e um modelo de negócio visando inserir os produtos gerados no mercado (UFPA, 2020).

## 4. MODELAGEM DA FONTE DE SOBRETENÇÃO IMPULSIVA E DOS SISTEMAS DE CARREGAMENTO DE CARROS ELÉTRICOS ON E OFF GRID.

Esta seção do trabalho visa detalhar a modelagem da fonte de sobretensão impulsiva e dos sistemas de carregamento de veículos elétricos ligado e desligado da rede, além explicar a metodologia que será utilizada para as simulações em cima desses modelos.

### 4.1 Modelagem da fonte de sobretensão impulsiva

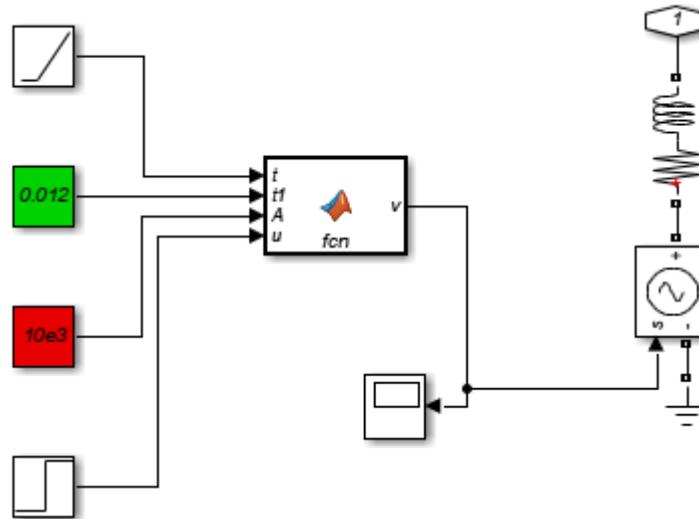
Para avaliar os efeitos do impacto de um raio, pode-se utilizar modelos de fontes de sobretensão impulsiva, de modo a representar o efeito de uma descarga atmosférica padronizada quando esta atinge um ponto próximo aonde o sistema está localizado. Assim, avalia-se o efeito de tensões induzidas no sistema por campos magnéticos externos (Tan *et al.* 2015).

Foi utilizado o circuito proposto por Tan *et al.* (2015). Esse circuito reproduz uma sobretensão padrão de 1.2/50  $\mu$ s. Isso significa que o tempo de frente de onda ocorre em 1,2  $\mu$ s  $\pm$  30%. O valor de pico de tensão decai em 50% após 50  $\mu$ s  $\pm$  20% do tempo de origem, conforme especificado no Tópico 2.4. Na Eq. 4.1, é descrito o comportamento do impulso produzido.

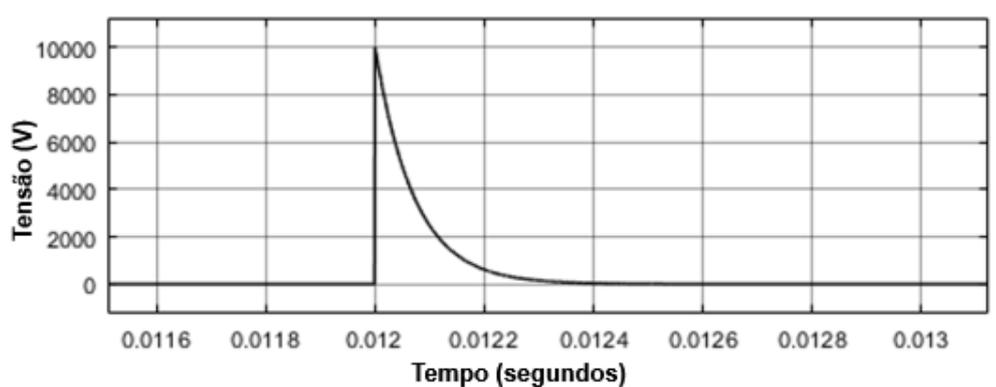
$$V(t) = Ae^{-\alpha(t-t_1)}.u(t - t_1) \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Onde ‘A’ é a amplitude da tensão impulsiva, ‘ $\alpha$ ’ é o fator de amortecimento, ‘t1’ é o tempo que o impulso inicia, ‘u’ é a função degrau.

Essa função foi implementada no software Simulink, conforme mostra o circuito mostrado na Fig. 4.1. Sua forma de onda é mostrada na Fig. 4.2, para A igual à 10000,  $\alpha$  igual à 14000 e t1 igual à 0,012. O bloco *fcn* reproduz a Eq. 4.1 a partir das variáveis de entrada.



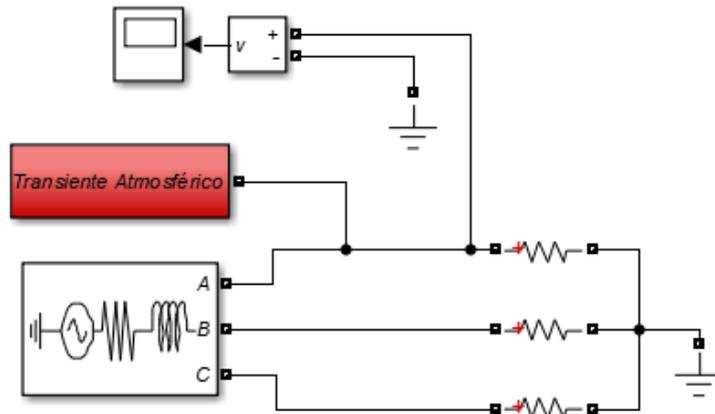
**Fig. 4.1.** Implementação da fonte de sobretensão impulsiva. Adaptado de Tan *et al.* (2015).



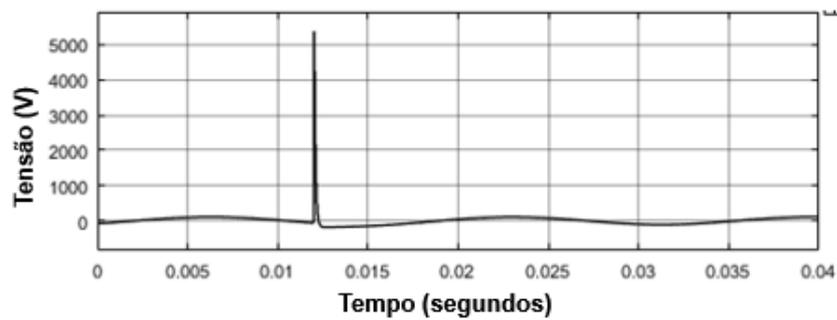
**Fig. 4.2.** Sobretensão impulsiva de amplitude 10 kV.

A impedância de acoplamento na saída do modelo, por sua vez, está relacionada com a distância a qual o impacto ocorreu, uma vez que determina a magnitude da forma de onda impulsiva. Quanto menor for essa impedância, mais próxima é a ocorrência do impacto em relação ao objeto (Tan *et al.* 2015).

A Fig. 4.3 mostra a aplicação do impulso atmosférico de 10 kV em uma fase de um circuito trifásico 220 V com carga puramente resistiva de 11.5  $\Omega$ . Para essa simulação, foi usada resistência de acoplamento igual a 10  $\Omega$  e indutância de acoplamento igual a 1  $\mu\text{H}$ . A sobretensão é recebida pelo circuito em 't' igual a 0,012s. Na Fig. 4.4 pode-se observar a forma de onda de tensão obtida com a perturbação. Uma vez que se está simulando uma descarga atmosférica ocorrendo próxima ao sistema, para a impedância de acoplamento simulada, a tensão de pico na carga foi de aproximadamente 5,3 kV.



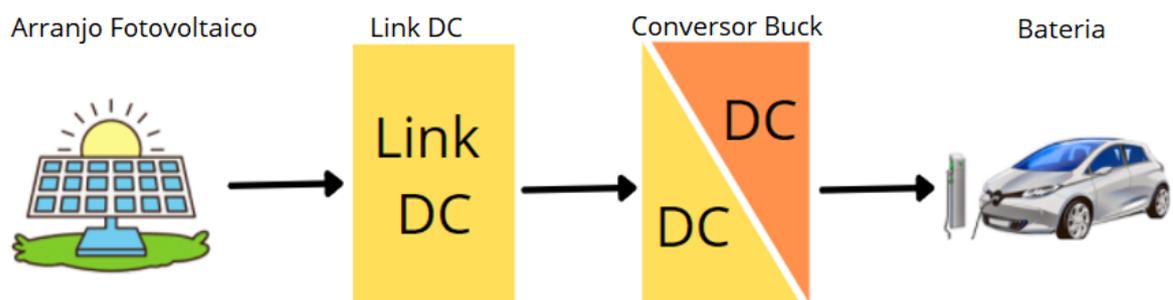
**Fig. 4.3.** Aplicação de sobretensão impulsiva induzida em circuito com carga R.



**Fig. 4.4.** Forma de onda do impulso no circuito com carga R.

#### 4.2 Modelos de sistemas de carregamento de baterias

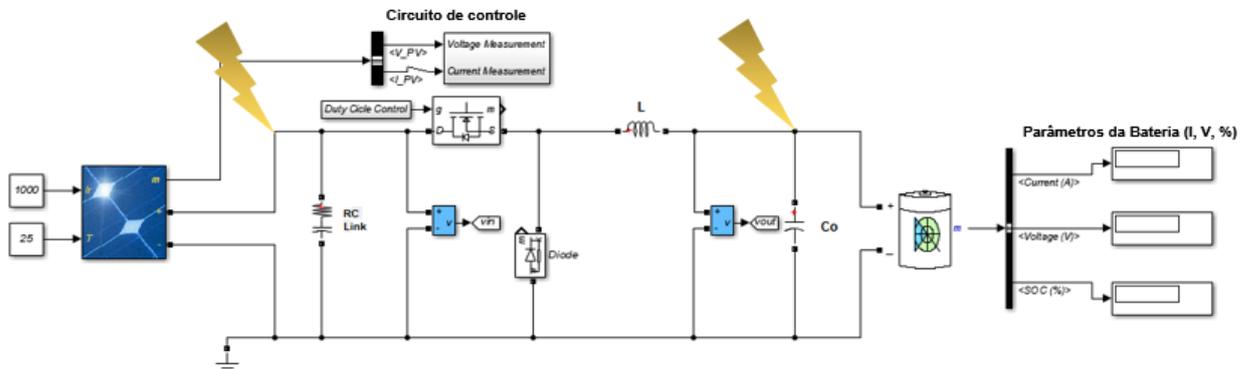
A fim de avaliar o impacto de sobretensões induzidas em sistemas de carregamento de baterias, foi desenvolvido um sistema de carregamento de baterias isolado da rede baseado em no modelo proposto por Durgaprasad (2021) e um modelo de carregamento de baterias conectado à rede baseado em no modelo adaptado de Lee *et al.* (2011). O primeiro modelo consiste em um arranjo fotovoltaico, Link DC, um conversor Buck e bateria, conforme o diagrama mostrado na Fig. 4.5.



**Fig. 4.5.** Diagrama de carregamento de veículos elétricos usando painéis fotovoltaicos.

Sistema isolado da rede.

O circuito implementado no software *Simulink* está mostrado na Fig. 4.6, bem como os pontos onde serão aplicados os transientes de sobretensão.



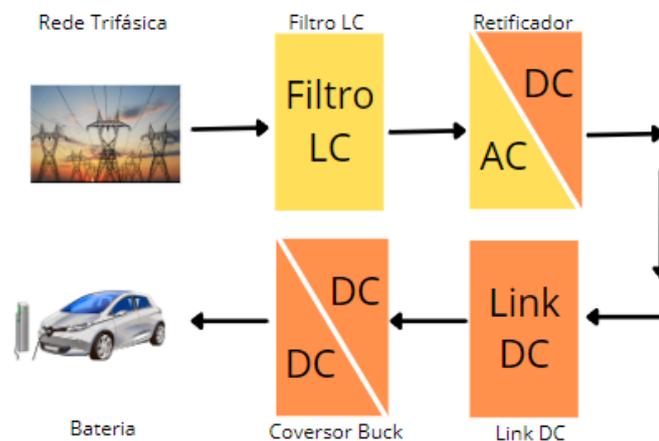
**Fig. 4.6.** Circuito de carregamento de baterias isolado da rede. Os raios amarelos indicam os pontos do circuito nos quais o impulso atmosférico foi aplicado.

Os valores para os componentes deste circuito estão descritos na Tabela 4.1, conforme calculado pelo autor Durgaprasad (2021).

**Tabela 4.1. Valores para os components do circuito de carregamento de veículos elétricos isolado da rede.**

L	Co	Rlink	Clink	Painel FV	Bateria
0.8653 mH	369.79 $\mu$ F	1 m $\Omega$	1000 $\mu$ F	212 $W_p$	12 $V_{cc}$ // 100 Ah

Já o sistema de carregamento conectado à rede consiste em uma rede trifásica 220V, com filtro LC na entrada do retificador AC-DC, um link DC e um conversor DC-DC conectado à carga, conforme indicado no diagrama da Fig. 4.7. Este sistema é adaptado de Lee *et al* (2011).

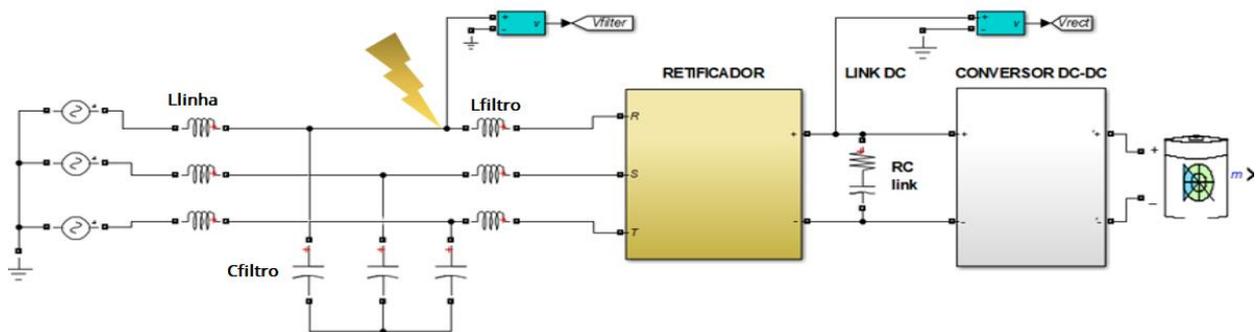


**Fig. 4.7** Diagrama do modelo de carregamento de veículos elétricos conectado à rede

A Tabela 4.2 mostra os valores calculados por Lee *et al* (2011) para os componentes do modelo. O objetivo deste modelo é investigar qual seria a interferência de transitórios atmosféricos de tensão impulsiva na entrada do filtro LC, nas fases e na saída do retificador AC-DC. Na Fig. 4.8 é também indicado onde será aplicado o transitório de sobretensão atmosférica para a realização das simulações.

**Tabela 4.2. Valores para os componentes do circuito de carregamento de veículos elétricos conectado à rede.**

Llinha	Lfiltro	Cfiltro	Rlink	Clink
281 $\mu\text{H}$	2.7 mH	10 $\mu\text{F}$	1 $\text{m}\Omega$	1000 $\mu\text{F}$



**Fig. 4.8** Carregamento de veículos elétricos conectado à rede. O raio indica o ponto do circuito no qual o impulso atmosférico foi aplicado.

Quanto ao tipo de bateria, foi utilizado o modelo de bateria de Íon de Lítio. Esse tipo de bateria é mais comumente utilizado em veículos elétricos, devido à fatores como tamanho, capacidade de recarga e ciclos de vida (Antunes. 2018).

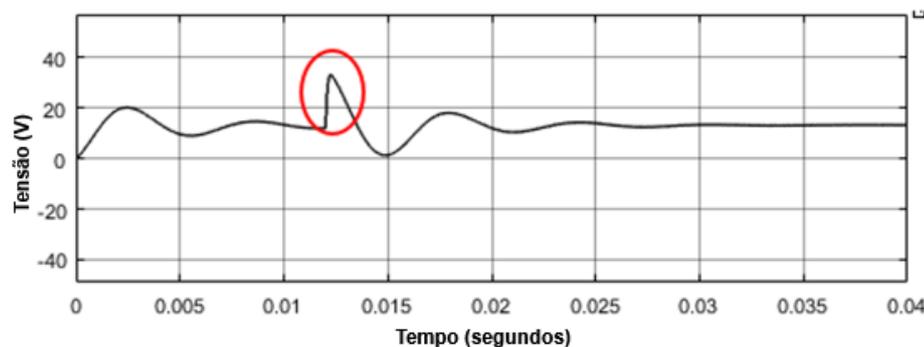
## 5. ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES

Neste capítulo, serão mostrados os resultados das simulações feitas sobre os modelos definidos no Capítulo 4, mostrando o comportamento das formas de onda de tensão em determinados pontos do circuito.

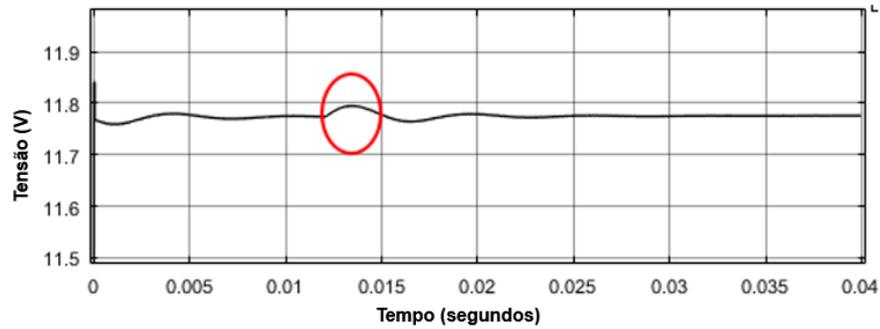
### 5.1 Aplicação do transiente no sistema de carregamento de veículos elétricos isolado da rede

Para o circuito do sistema de carregamento isolado da rede, primeiramente foi aplicado um transiente na entrada do sistema, conforme indicado na Fig. 4.6. Essa simulação representa um campo eletromagnético externo induzindo uma sobretensão impulsiva na entrada do circuito de conversão Buck. Para isso, foi utilizada uma impedância de acoplamento com R igual a  $3 \Omega$  e L igual a  $1 \mu\text{H}$ .

O tempo de impacto está em 0,012 segundo. Dessa forma, o sistema de carregamento ainda estará passando pelo regime transitório enquanto recebe impacto impulsivo. Primeiramente foi utilizada uma amplitude de sobretensão 1 kV. O resultado da leitura de tensão na entrada do conversor é mostrado na Fig. 5.1. A Fig. 5.2 mostra a leitura de tensão na saída do conversor.

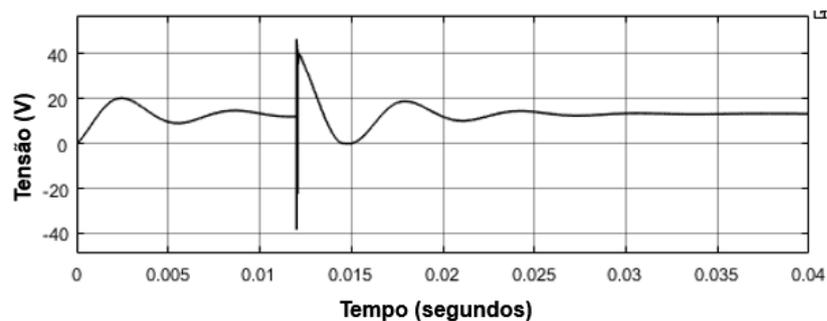


**Fig. 5.1** Forma de onda da tensão na entrada do conversor com sobretensão impulsiva de 1 kV.

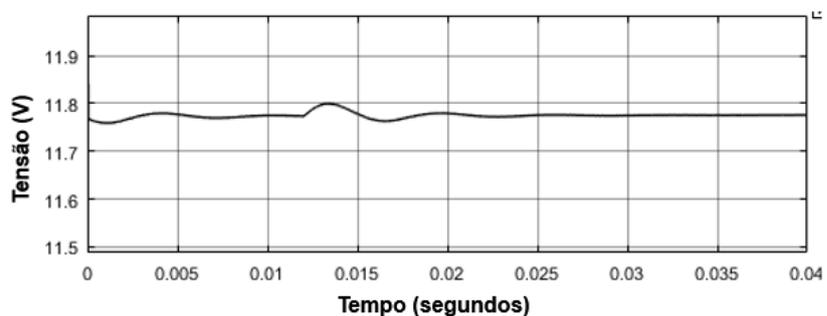


**Fig. 5.2** Forma de onda da tensão na saída (bateria) com sobretensão impulsiva de 1 kV.

Pela Fig. 5.1 e Fig. 5.2, percebe-se que a sobretensão de amplitude 1 kV teve um pequeno impacto na entrada do circuito, com uma pequena oscilação na saída. Isso se deve à presença dos elementos indutivos e capacitivos no conversor Buck, que nesse caso também estão atuando como filtros passivos, fazendo com que essa variação seja bastante atenuada na saída do circuito. Repetiu-se então a simulação para uma amplitude de 10 kV, mantendo-se os demais parâmetros do transiente. Os resultados estão mostrados na Fig. 5.3 e Fig. 5.4.



**Fig. 5.3** Forma de onda da tensão na entrada do conversor com sobretensão de 10 kV

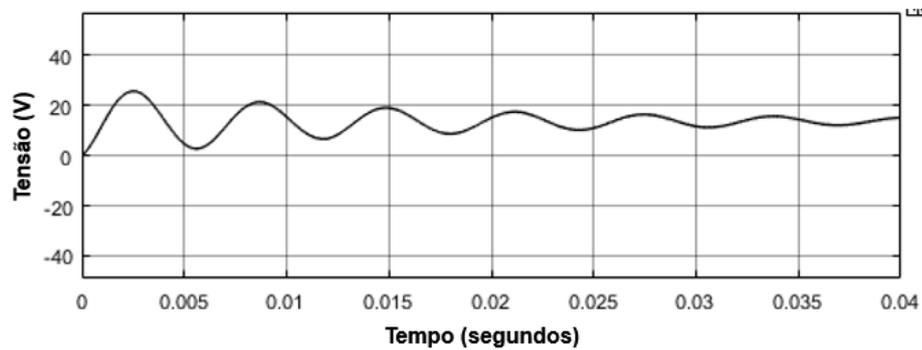


**Fig. 5.4** Forma de onda da tensão na saída (bateria) com sobretensão de 10 kV.

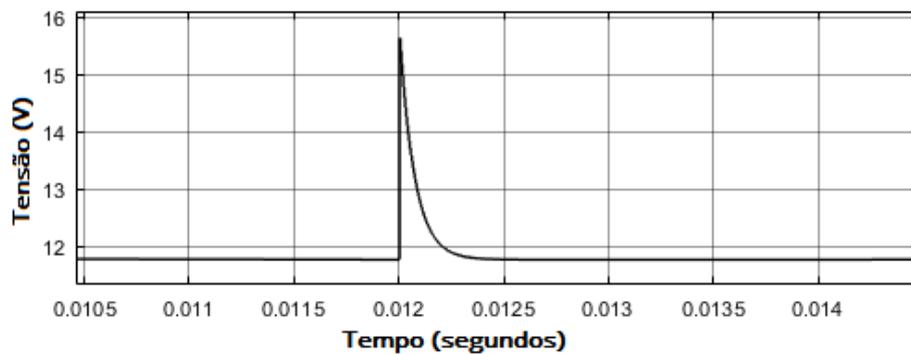
Com o aumento da amplitude da sobretensão, é possível observar uma maior oscilação na tensão de entrada, porém, assim como na simulação com transiente de 1 kV, as oscilações na tensão de saída não foram tão significativas. Nesse caso, constatou-se uma vulnerabilidade

maior a elementos ligados diretamente à entrada do conversor do que nas baterias. Como por exemplo, pode-se citar controladores de carga, circuitos de rastreamento, entre outros.

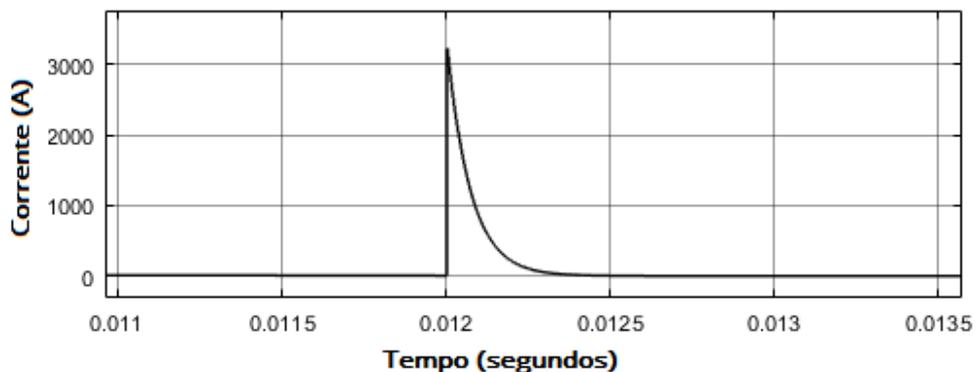
Esse ponto do circuito se mostrou mais vulnerável e com maior possibilidade de causar danos a diversos elementos, sendo então justificada a instalação de dispositivo de proteção contra surto – DPS. Aplicou-se também o transiente atmosférico de 10 kV na saída do circuito, após o indutor L, conforme indicado na Fig. 4.6. Os resultados estão mostrados na Fig. 5.5, Fig. 5.6 e Fig. 5.7.



**Fig. 5.5** Forma de onda da tensão na entrada do conversor, com sobretensão de 10 kV aplicada na saída.



**Fig. 5.6.** Forma de onda da tensão na saída (bateria) com transiente aplicado na saída.



**Fig. 5.7.** Forma de onda da corrente na saída (bateria) com transiente aplicado na saída.

Nota-se que a entrada do circuito realiza o regime transitório normalmente, ao passo que a saída do circuito apresenta um pico de tensão e um grande pico de corrente. Uma vez que o sinal de sobretensão foi aplicada na saída do conversor, a ação de filtro não pode ser percebida pela bateria, que por sua vez absorve o impacto. Esse cenário é possível de ocorrer na prática, devido aos trechos de cabeamento existentes entre o controlador de carga e a bateria.

Caso não haja o isolamento adequado, estes condutores podem sofrer induções de corrente devido ao campo magnético externo, acarretando em sobretensões e sobrecorrentes na carga. Todavia, o cenário mais provável é a ocorrência de transientes no trecho de entrada do conversor, uma vez que pode receber os impactos provenientes da fonte ou de condutores associados a ela. Dessa forma, se justifica a instalação de DPSs justamente no trecho de saída da fonte de tensão, a fim de proteger os componentes eletrônicos que estejam ali conectados.

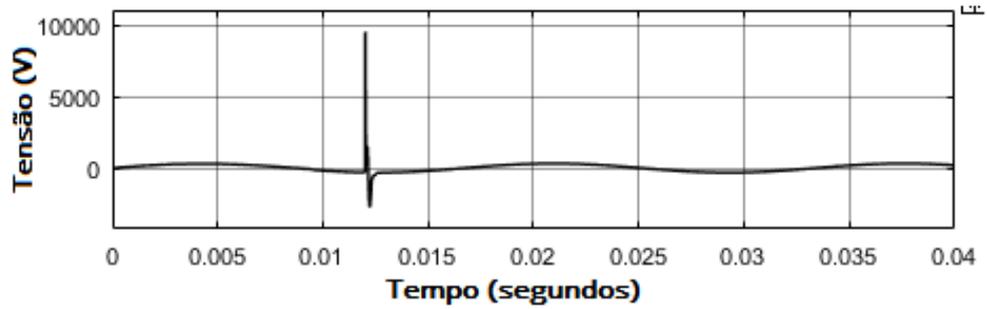
Conforme mostrado na Fig. 4.6, foi considerado um aterramento ideal de impedância nula nas simulações. Esse aterramento não estava incluído no modelo inicial proposto por Durgaprasad (2021). Foi necessário o incluir, uma vez que sem a presença dele no modelo proposto por Durgaprasad (2021), e também, devido às características construtivas do modelo proposto por Tan (2015), o circuito se mostraria como um circuito aberto em relação ao circuito de carregamento, não apresentando efeito algum na simulação.

## 5.2 Aplicação do transiente no sistema de carregamento de veículos elétricos conectado à rede.

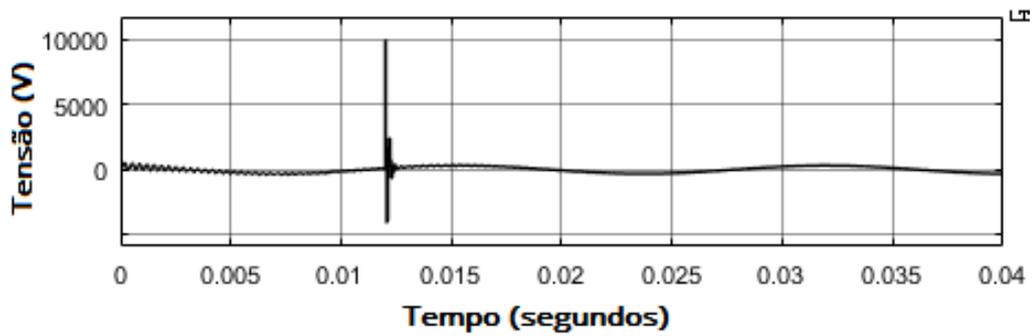
Foram realizadas simulações para o modelo adaptado de Lee *et al* (2011). Aplicou-se transientes atmosféricos na entrada do filtro LC do retificador, observando a ação das tensões na entrada e na saída do retificador, uma vez que são considerados pontos vulneráveis do circuito. Transientes atmosféricos podem se propagar a partir linha de transmissão, atingindo o circuito do retificador e causando variações de tensão e corrente tanto na entrada como na saída do circuito.

Assim, componentes eletrônicos sensíveis conectados podem ser danificados. Para essas simulações, foi utilizada uma resistência de acoplamento igual à  $3 \Omega$  e indutância de acoplamento igual à  $1 \mu\text{H}$ . A amplitude do surto é de 10 kV e o tempo de início está em 0,012 segundos.

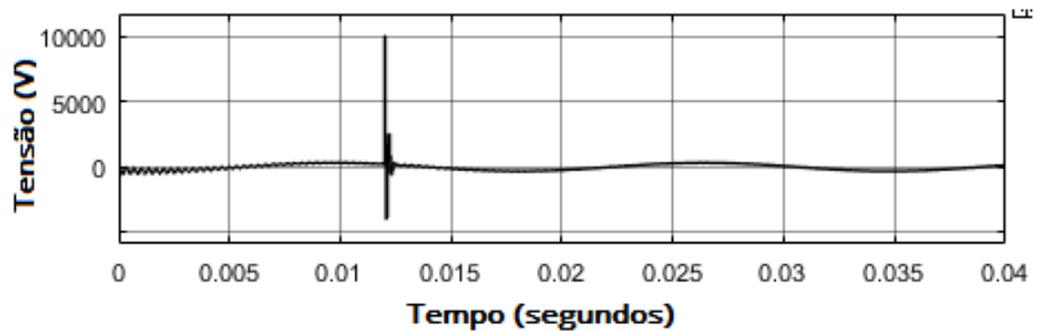
Nessa simulação, a sobretensão está sendo aplicada na fase R, conforme a Fig. 4.8. Na Fig. 5.8, Fig. 5.9 e Fig. 5.10 são mostradas as formas de onda nas três fases do circuito de entrada, respectivamente R, S e T.



**Fig. 5.8** Transiente atmosférico na fase R

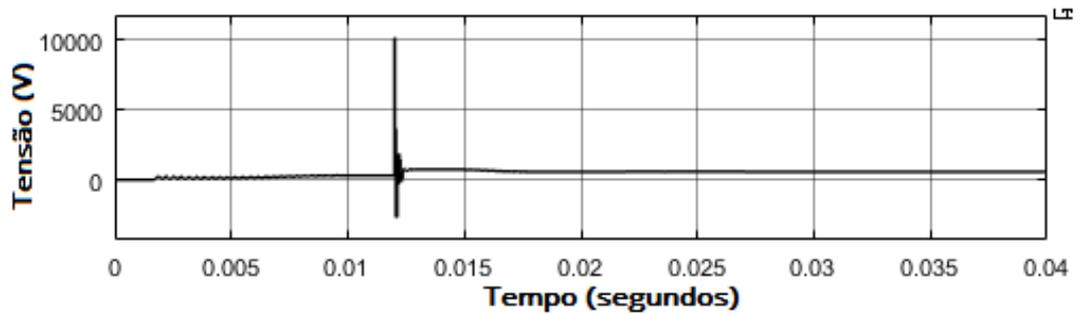


**Fig. 5.9** Transiente atmosférico na fase S.



**Fig. 5.10.** Transiente atmosférico na fase T.

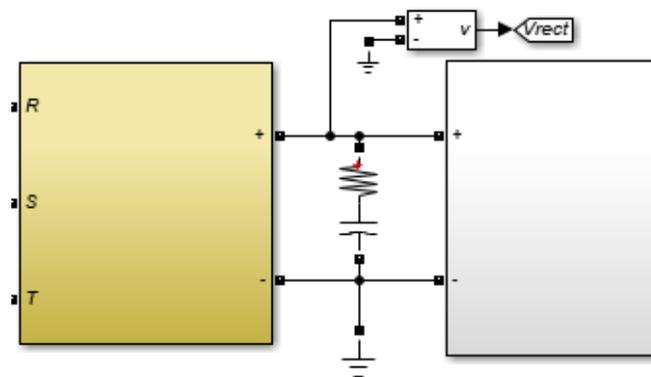
Observa-se que as demais fases (S e T) sofrem ação da tensão induzida na fase R. Esse comportamento se justifica pela presença dos capacitores de filtro, que interligam as fases. A Fig. 5.11 mostra o comportamento da forma de onda de tensão na saída do retificador.



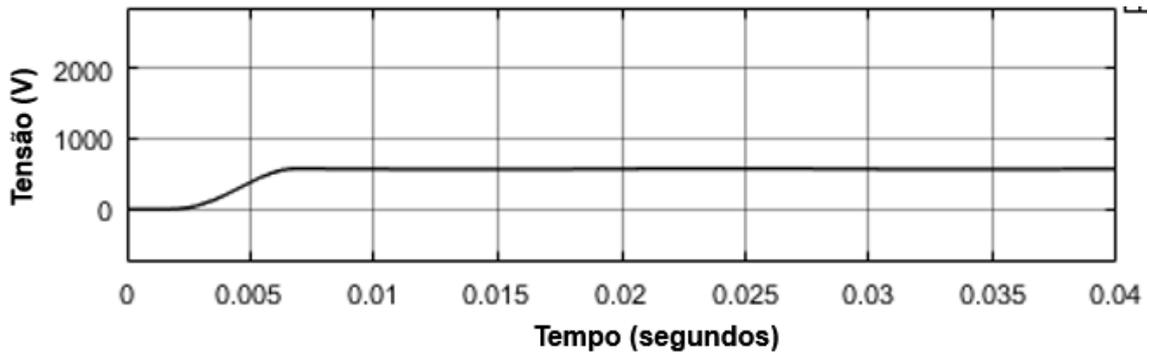
**Fig. 5.11.** Forma de onda da tensão na saída do retificador devido ao transiente atmosférico na fase R.

É possível observar um pico de tensão na saída do retificador. Essa oscilação pode ser bastante nociva para os elementos eletrônicos. Dessa forma, recomenda-se que esse seja um dos pontos que devam ser protegidos com DPSs, assim como a entrada.

É importante levar em conta que o modelo adaptado de Lee *et al.* (2011) originalmente não considera a presença de qualquer aterramento antes ou depois do retificador. Sendo assim, com intuito de avaliar a ação do aterramento nessa parte do circuito, foi incluído um aterramento ideal, conforme mostrado na Fig. 5.12. Na Fig. 5.13, é possível verificar que essa medida foi capaz de mitigar completamente o fenômeno de sobretensão na saída do circuito. Isso indica que a presença desse elemento especialmente na saída da retificador é imprescindível para a proteção adequada do circuito.



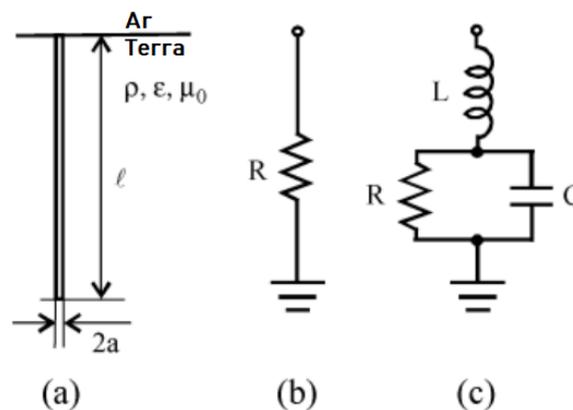
**Fig. 5.12.** Aterramento ideal adicionado no lado DC do retificador.



**Fig. 5.13** Forma de onda na saída do retificador com a inclusão do aterramento. Tensão de regime permanente: 578,5 V.

### 5.3 Influência de modelos de aterramento no sistema de carregamento de veículos elétricos conectado à rede

A inclusão de aterramento ideal nas simulações torna as formas de onda de saída ideais e muito comportadas, muitas vezes divergentes da realidade. Pode-se avaliar a atuação do aterramento a partir de modelos de hastes verticais aterradas. Segundo Grcev *et al.* (2005), pode-se representar o aterramento por meio de uma simples resistância em baixa frequência. Em altas frequências, pode-se representar por um circuito RLC. Os modelos estão mostrados na Fig. 5.14.



**Fig. 5.14** Modelos de hastes de aterramento verticais. a) situação física; b) circuito equivalente em baixas frequências; c) circuito equivalente em altas frequências. Adaptado de Grcev *et al.* (2005).

Os parâmetros R, L e C são calculados por:

$$R = \frac{\rho}{2\pi\ell} \ln \left[ \frac{4\ell}{a} - 1 \right] \quad (2)$$

$$C = 2\pi\epsilon\ell \left[ \ln \frac{4\ell}{a} - 1 \right] \quad (3)$$

$$L = \frac{\mu_0\ell}{2\pi} \left[ \ln \frac{2\ell}{a} - 1 \right] \quad (4)$$

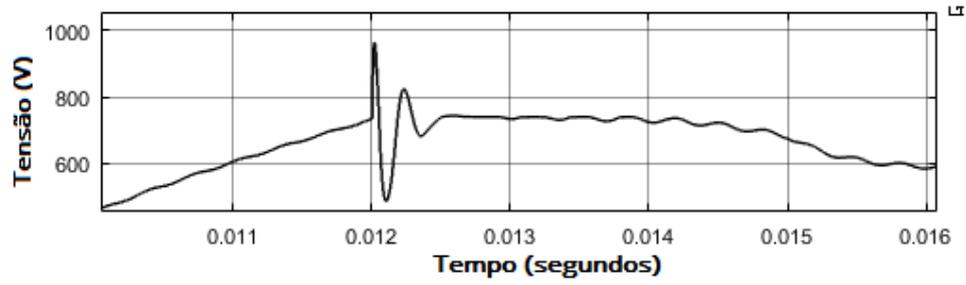
Onde  $\epsilon$  é a permissividade elétrica do solo, considerada como  $10 \times 8,854 \times 10^{-12}$  F/m, e  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo, de  $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  H/m,  $\ell$  é o comprimento da haste,  $a$  é o seu raio e  $\rho$  é a resistividade do solo em  $\Omega$ -m.

A partir de (2), (3) e (4), calculou-se os valores de R, L e C para valores de  $\rho$  iguais a 10  $\Omega$ -m, 50  $\Omega$ -m, 100  $\Omega$ -m e 500  $\Omega$ -m. Considerou-se uma haste de comprimento  $\ell$  igual a 3 m e o raio  $a$  igual a 7,1 mm. Os valores de R, L e C encontrados estão na Tabela 5.1.

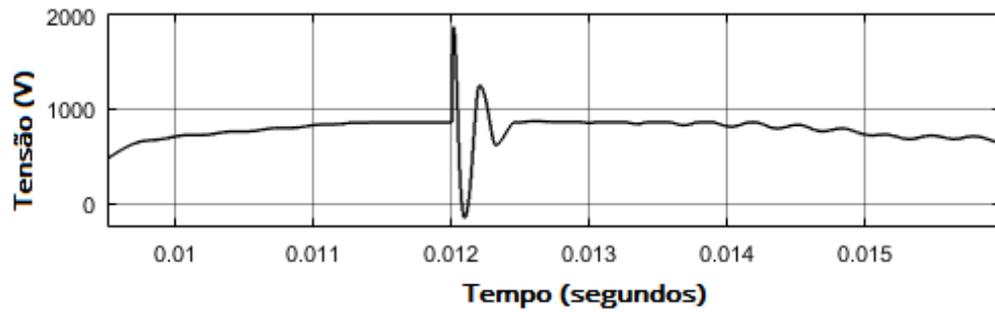
**Tabela 5.1. Modelagem da haste de aterramento vertical para diferentes resistividades do solo.**

$\rho(\Omega\text{-m})$	R ( $\Omega$ )	L (uH)	C (nF)
10	3,41	3,44	10,7
50	17,06	3,44	10,7
100	34,12	3,44	10,7
500	170,62	3,44	10,7

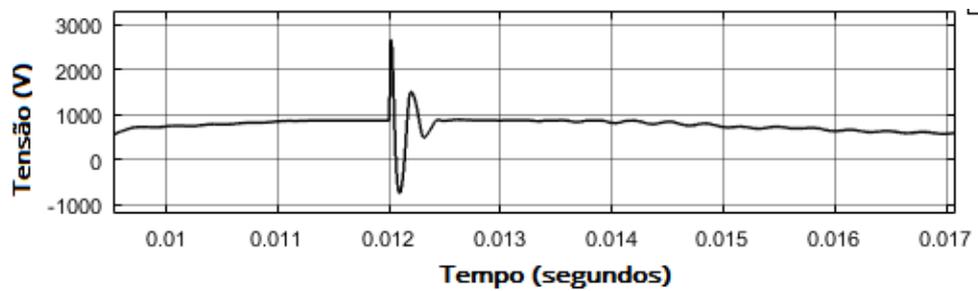
Com isso, foram realizadas simulações considerando tanto o modelo de aterramento R como também o modelo RLC. Para isso, considerou-se o modelo de carregamento de baterias de veículos elétricos ligada à rede, sob uma sobretensão impulsiva de 10 kV. Os valores de impedância de acoplamento são os mesmos das simulações anteriormente realizadas. Os resultados das simulações considerando o modelo R para os três valores de  $\rho$  estão na Fig. 5.15, Fig. 5.16, Fig. 5.17 e Fig. 5.18



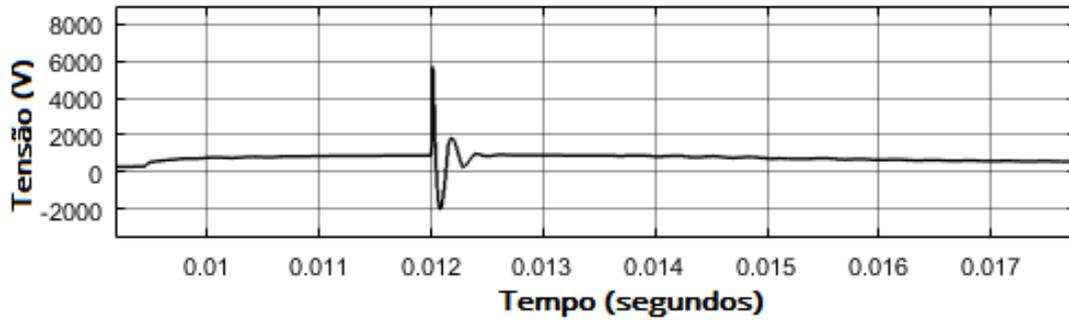
**Fig. 5.15** Sobretensão na saída do retificador com aterramento R para  $\rho$  igual a 10  $\Omega$ -m.  
Tensão de pico: 965 V.



**Fig. 5.16** Sobretensão na saída do retificador com aterramento R para  $\rho$  igual a 50  $\Omega$ -m.  
Tensão de pico: 1873 V.



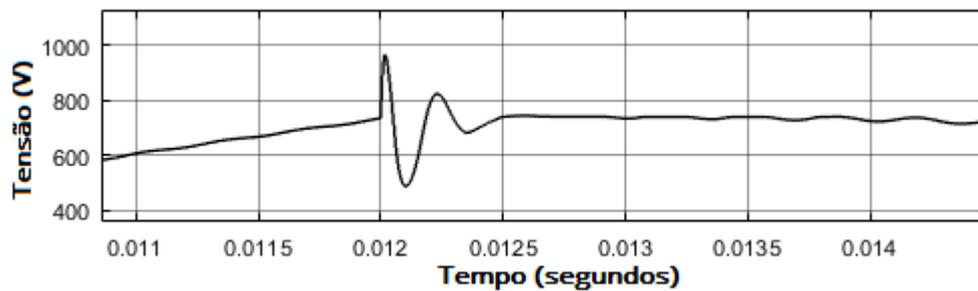
**Fig. 5.17** Sobretensão na saída do retificador com aterramento R para  $\rho$  igual a 100  $\Omega$ -m.  
Tensão de pico: 2670 V.



**Fig. 5.18** Sobretensão na saída do retificador com aterramento R para  $\rho$  igual a 500  $\Omega$ -m.

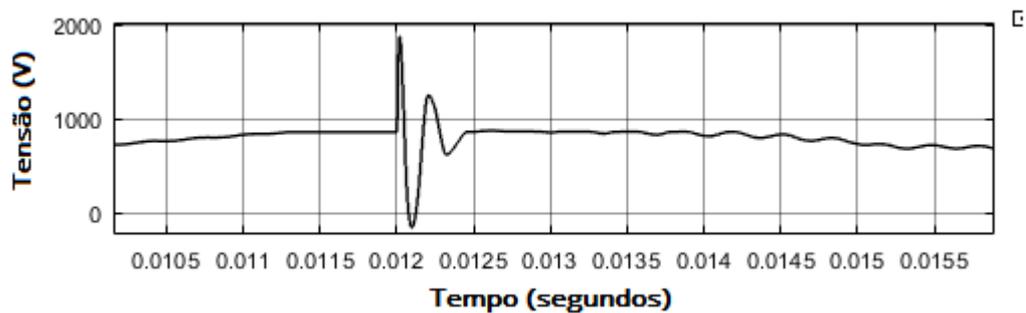
Tensão de pico: 5718 V.

Já para o modelo RLC, tem-se resultados mostrados na Fig. 5.19, Fig. 5.20, Fig. 5.21 e Fig. 5.22.



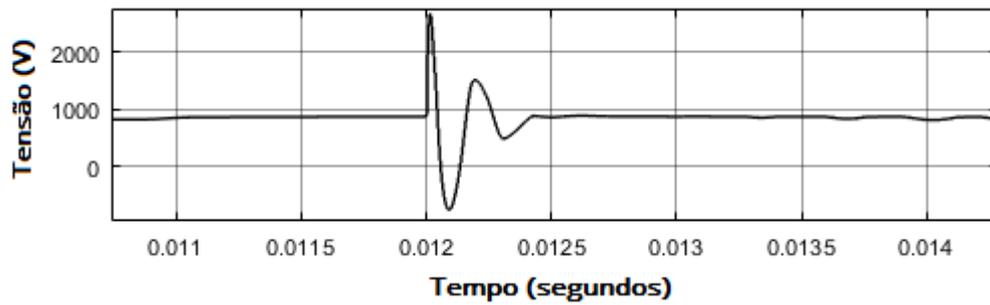
**Fig. 5.19** Sobretensão na saída do retificador com aterramento RLC para  $\rho$  igual a 10  $\Omega$ -m.

Tensão de pico: 964,5 V.



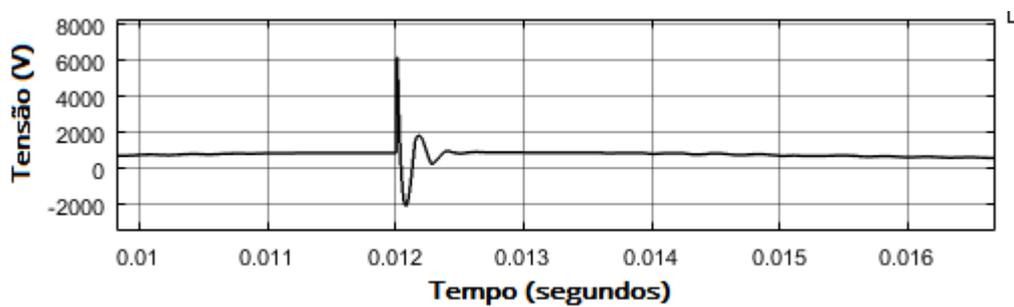
**Fig. 5.20** Sobretensão na saída do retificador com aterramento RLC para  $\rho$  igual a 50  $\Omega$ -m.

Tensão de pico: 1872,3 V.



**Fig. 5.21** Sobretensão na saída do retificador com aterramento RLC para  $\rho$  igual a 100  $\Omega$ -m.

Tensão de pico: 2677,5 V.



**Fig. 5.22** Sobretensão na saída do retificador com aterramento RLC para  $\rho$  igual a 500  $\Omega$ -m.

Tensão de pico: 6186 V.

Observa-se que, com o aumento da resistividade do solo  $\rho$ , as tensões de pico medidas são cada vez maiores. Não foram observadas diferenças tão significativas entre o modelo de haste R e o modelo RLC para essa aplicação. Isso se deve às relativas baixas frequências à qual o sistema está exposto.

Nota-se ainda que a variação da resistência de aterramento R afetou diretamente os valores de tensão na saída do regime transitório, bem como as curvas de subida e inclinação do regime transitório.

## 6. PROTEÇÃO DE ELETROPOSTOS CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Nesta seção do trabalho, avalia-se se duas estações de carregamento de veículos elétricos do Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia – CEAMAZON – estão adequadamente protegidas contra descargas atmosféricas. Para isso, tomou-se como base os estudos realizados na Ásia, Europa, além da norma brasileira NBR 5419.

À medida que as energias renováveis se difundem, a necessidade de se investir em novas tecnologias que sejam capazes de evitar danos e perdas aumenta na mesma proporção. Em 2020, por exemplo, haviam cerca de 5 milhões de veículos elétricos – VEs – no mundo, e esse número tende a crescer ano após ano (Raycap. 2020). Isso também promove um aumento no número de estações de carregamento de VEs a serem instaladas. Esses eletropostos, por sua vez, precisam ser bastante protegidos contra sobretensões e transientes provenientes de descargas atmosféricas, uma vez que se encontram muitas vezes em áreas expostas a danos (Raycap. 2020).

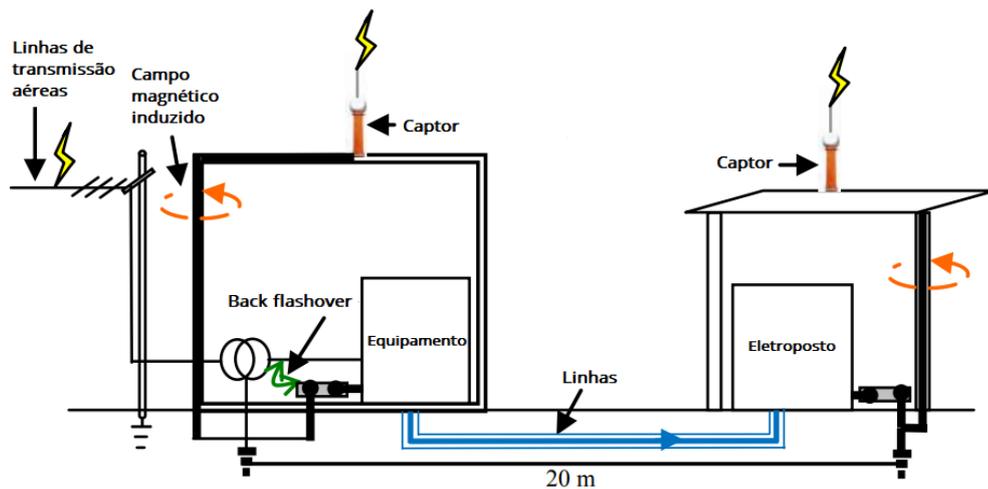
Essa proteção deve ser ainda mais solicitada em regiões do globo onde existe alta densidade de descargas atmosféricas, como é o caso da Amazônia. A proteção na Amazônia torna-se ainda mais necessária tendo em vista a ocorrência de raios caracterizados por correntes de elevadas amplitudes, da ordem de kA (Almeida *et al.* (2012), Cooray *et al.* (2020), Leal *et al.* (2021)). Segundo Raycap (2020), impactos diretos de raios são extremamente difíceis de proteger, devido à magnitude da sobre corrente.

Todavia, os maiores problemas para dispositivos eletrônicos dos eletropostos vêm do surto elétrico resultante das descargas atmosféricas de maneira indireta. Além disso, todos os dispositivos elétricos que estão do lado da rede são fontes de perigo para os dispositivos eletrônicos, uma vez que podem receber surtos e conduzi-los aos equipamentos de carregamento. Dessa forma, deve ser fornecido um sistema completo de proteção contra raios para infraestrutura de carregamento de veículos elétricos, incluindo para raios, ligação equipotencial, aterramento, blindagem, roteamento e instalação de dispositivos de proteção contra surto –DPSs. As medidas de proteção contra raios diretos e contra impulsos eletromagnéticos de raios – LEMP –devem ser integrados para fornecer melhores resultados de proteção (Zhao *et al.* 2016).

### 6.1 Fontes de danos

De acordo com Zhao *et al.* (2016) existem principalmente três caminhos para a ocorrência de danos nas infraestruturas de carregamento, mostradas na Fig. 6.1:

- Linhas de transmissão: pois estão sujeitas às descargas diretas. Os surtos podem atingir o sistema de alimentação por meio de transformadores auxiliares e serem conduzidos para os circuitos de carregamento, causando grandes danos.
- Backflashover em para-raios: descargas diretas em para-raios podem causar aumento do potencial do sistema de aterramento, o que pode resultar no backflashover para o sistema de carregamento interligado.
- Descargas indiretas: podem induzir grandes surtos em linhas metálicas sem a proteção adequada, como linhas de transmissão, alimentação, linhas de sinal, etc. Esses surtos podem atingir dezenas de kV, provocando danos aos componentes eletrônicos.

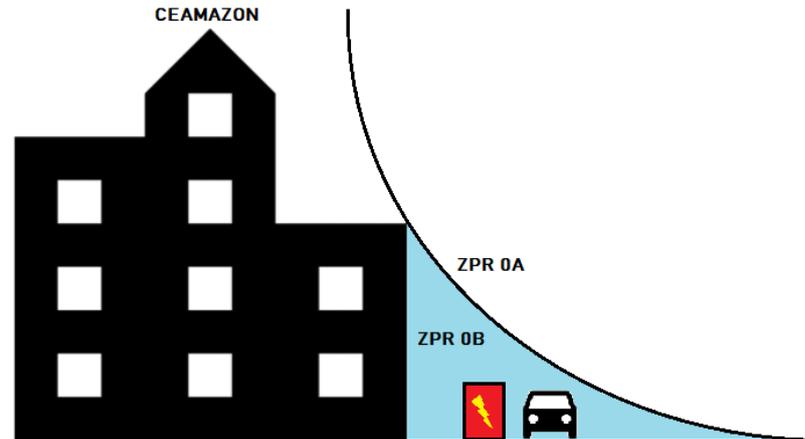


**Fig. 6.1** Fontes de danos para a infraestrutura de carregamento. Fonte: Adaptado de Zhao *et al.* (2016).

### 6.2 Proteção contra descargas diretas

Zhao *et al.* (2016) e Raycap (2019) ressaltam também a importância de proteger os eletropostos contra descargas diretas por meio da colocação equipamento sobre uma Zona

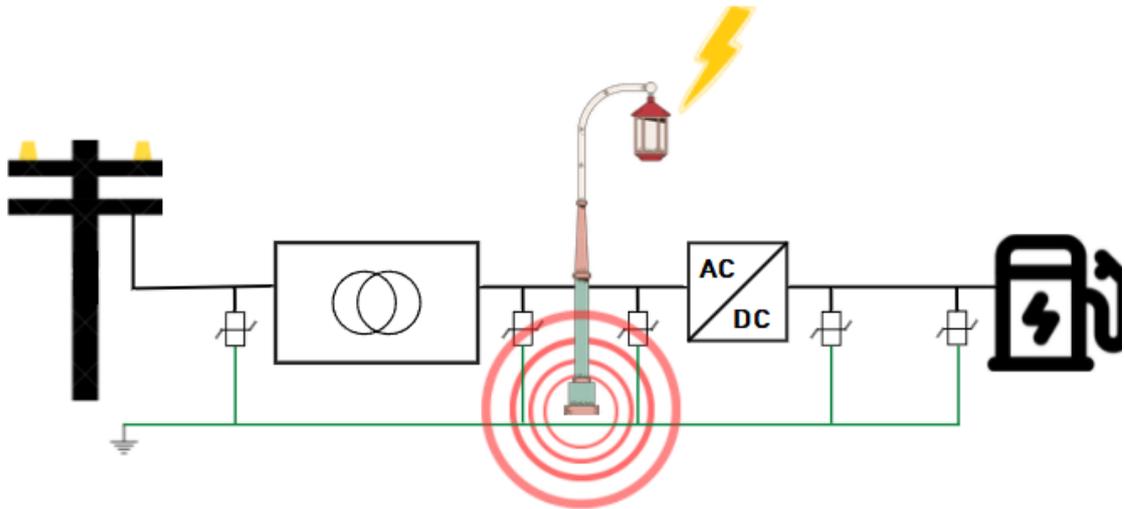
Proteção contra Raios (ZPR) de nível pelo menos 0b. Essa zona é definida pela área de cobertura externa pelo raio da esfera rolante. Dessa forma, os autores ressaltam a importância de construir eletropostos dentro de zonas definidas anteriormente pelo SPDA de estruturas próximas. A Fig. 6.2 mostra uma situação na qual os eletropostos estão dentro da zona de proteção ZPR0B.



**Fig. 6.2.** Eletroposto na ZPR 0B.

### 6.3. Proteção contra descargas indiretas

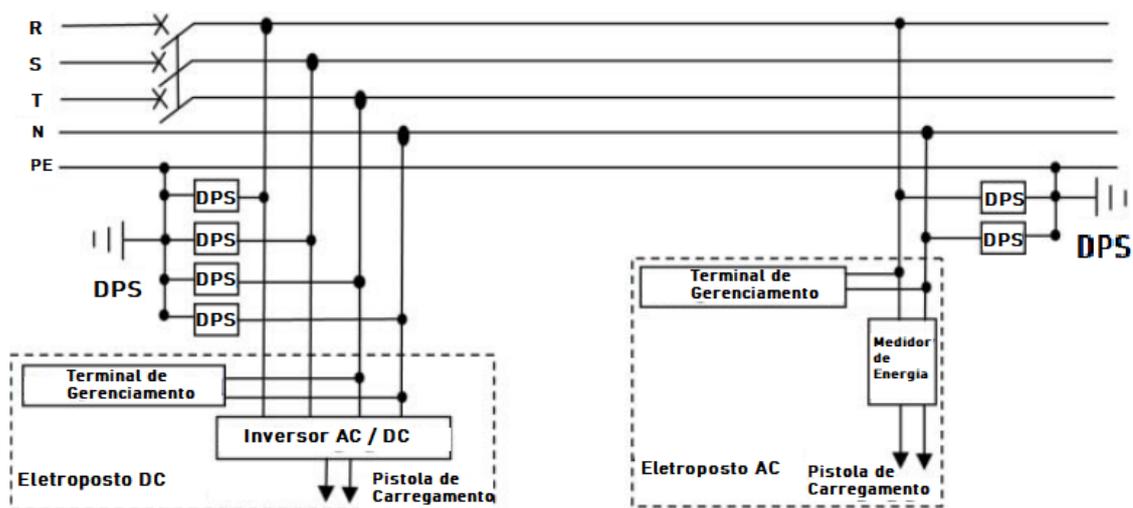
Zhao *et al.* (2016) e Raycap (2019) também ressaltam a necessidade de instalar dispositivos de proteção contra surto – DPS - em pontos estratégicos, bem como realizar o roteamento de linhas, o aterramento e a equipotencialização do sistema. Esse último método é importante, sobretudo para evitar diferenças de potencial provenientes de descargas atmosféricas. A Fig. 6.3 ilustra a propagação da tensão de passo no solo a partir da ocorrência de uma descarga atmosférica sobre um poste de luz próximo à um eletroposto. Dessa forma, uma equipotencialização adequada é capaz de amenizar essas diferenças de potencial.



**Fig. 6.3** Descarga atmosférica ocorrendo em um poste de luz próximo a um eletroposto. Os círculos vermelhos indicam a ação dos campos eletromagnéticos intensos nas proximidades do local de ocorrência da descarga atmosférica.

Além disso, é necessário avaliar a resistência de aterramento e as condições de aterramento do sistema completo. Nas simulações realizadas no Capítulo 5, concluiu-se que a resistividade do solo possui grande impacto nos surtos do sistema no momento de uma descarga atmosférica.

Ainda, Zhao *et al.* (2016) recomenda a instalação de DPSs para evitar a propagação de surtos em circuitos internos. Os DPSs, devem ser de corrente de descarga nominal de 20kA ou superior na entrada de energia do carregador AC integrado, assim como nos terminais de medição, conforme mostrado na Fig. 6.4.



**Fig. 6.4.** Esquema de ligação de DPSs. Fonte: Adaptado de Zhao *et al* (2016).

De acordo com Raycap (2020), recomenda-se que seja adotado um nível de proteção de nível III/IV para a proteção do sistema interno. A NBR 5419, bem como a IEC 62305, descrevem esse nível de proteção como se fosse esperado que uma descarga impulsiva máxima de 50 kA para a carga a ser protegida.

#### 6.4 Aterramento

Sobre o aterramento, Zhao *et al* (2016) ressalta que o retificador e a caixa de distribuição devem possuir barramento equipotencial (BEP). Para isso, pode-se usar a barra de cobre com área de seção transversal não inferior a 50mm<sup>2</sup>. O cabo PE, cabo de aterramento do DPS, a carcaça de metal do eletroposto deve ser confiavelmente conectado ao parafuso de aterramento equipotencial.

Deve ser usado fio de cobre isolado com a área da seção transversal não inferior a 16mm<sup>2</sup> para conectar a placa de aterramento equipotencial e o parafuso com sistema de aterramento. Considerando que a subestação, a distribuição de energia de baixa tensão e os eletropostos estão localizadas nas proximidades, é melhor usar um sistema comum de aterramento. A resistência de aterramento não deve ser maior que 4Ω. Eletrodos de aterramento natural do edifício (estrutura), como fundação do edifício deve ser usado corretamente como sistema de aterramento. Uma vez que a distância entre o malha de terra do abrigo e malha de terra do construção de subestação/distribuição/monitoramento é geralmente menor que 20 metros, a fim de formar um sistema comum de aterramento, pelo menos dois aços planos com a área da seção transversal não inferior que 4mm x 40mm devem ser usados para conectá-los (Zhao *et al.* 2016).

#### 6.5 Blindagem e Roteamento

Segundo Zhao *et al.* (2016), a blindagem deve primeiro fazer uso de blindagem espacial fornecida por estruturas. O reforço de aço no edifício do sistema de carregamento constitui um grande escudo primário, desde que seus componentes metálicos sejam eletricamente contínuos, o que pode efetivamente atenuar o campo magnético.

Como a corrente da descarga atmosférica pode ser desviada para a terra através de barras de reforço de aço na periferia das colunas, quanto mais distantes das colunas estiverem os equipamentos, mais fraco o magnetismo do campo será. Dessa forma, é aconselhável que os equipamentos estejam localizados na área central do edifício para obter melhores efeitos de

blindagem.

Os cabos devem evitar grande loop para reduzir o efeito do LEMP. Todos os tubos e linhas de metal no edifício da estação de carregamento, incluindo linhas de alimentação e linhas de comunicação, de preferência devem entrar no mesmo local e devem ser seguramente conectados com a placa de ligação terminal.

### 6.6 Avaliação Local

O espaço do CEAMAZON está localizado dentro do Parque de Ciência e Tecnologia Guamá, na cidade de Belém, e dentro da região Amazônica. Nele, atuam pesquisadores de diversas áreas visando eficiência energética. A sua estrutura corresponde à um grande prédio, protegido por um SPDA próprio. Do lado externo se encontram outras estruturas, como um grande gerador fotovoltaico de 80 kWp, além de dois eletropostos de carregamento AC, que são os objetos principais de nosso estudo (Tabora *et al.* 2021). Um dos eletropostos possui 22 kW de saída AC, e está mostrado na Fig. 6.5. O outro possui saída de 80 kW, sendo mostrado na Fig. 6.6.



**Fig. 6.5.** Eletroposto de 22 kW de saída AC.



**Fig. 6.6** Eletroposto de 80 kW de saída AC.

Esses eletropostos fazem parte do Sistema Inteligente Multimodal da Amazônia – SIMA. Esse projeto tem como meta o atendimento da população que frequenta os campus de Belém e Castanhal. Essa iniciativa visa dar um primeiro passo na inserção de transportes renováveis na UFPA, viabilizando estudos científicos sobre eles. Esses transportes correspondem aos ônibus e barcos elétricos que funcionam a partir de energia armazenada em baterias (UFPA, 2020).

Os eletropostos estão sendo alimentados por uma subestação 112,5 kVA. Os eletropostos se encontram abrigados sob uma estrutura de concreto criadas especificamente para esse intuito. Essas estruturas estão situadas logo abaixo do transformador, bem como, junto ao poste do transformador, há um quadro de cargas também sob uma estrutura semelhante. Na Fig. 6.7 é mostrado o transformador da subestação.



**Fig. 6.7** Subestação de 112,5 kVA.

Abaixo da subestação, há o quadro de força, que possui os disjuntores de proteção e desligamento dos eletropostos, mostrado na Fig. 6.8. Já a Fig 6.9, mostra as linhas de média tensão que alimentam a subestação. Essa linha pode ser uma das fontes de surtos para danos de componentes internos, como já descrito.



**Fig 6.8** Quadro de força dos eletropostos.

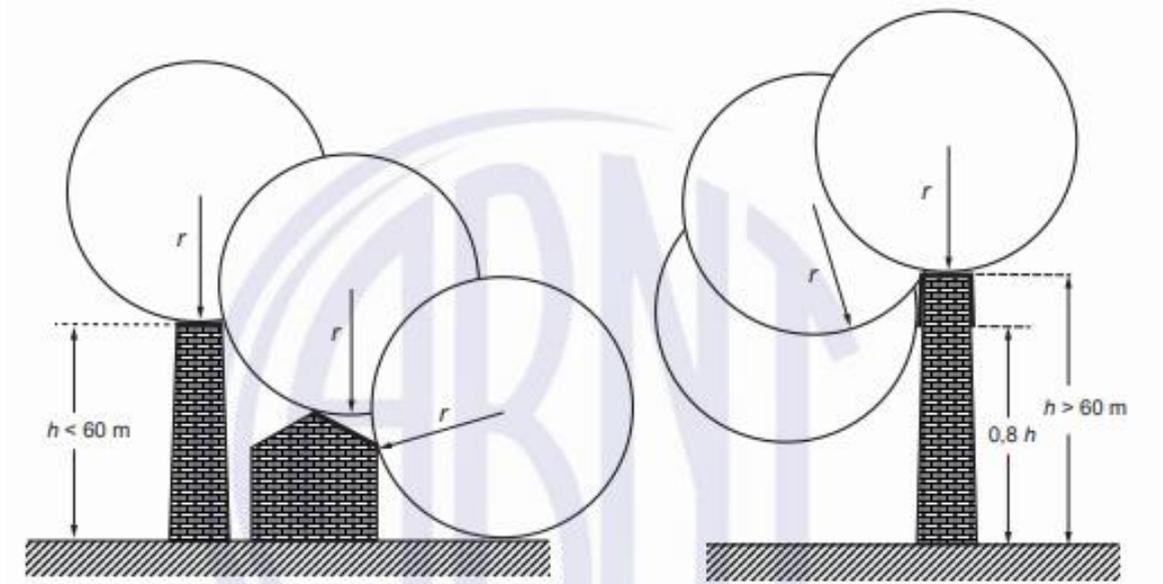


**Fig. 6.9** Linhas de transmissão em média tensão.

A estrutura do prédio do CEAMAZON possui um projeto de SPDA instalado na mesma. Nela, há captadores tipo Franklin, bem como terminais aéreos preenchendo todas as partes extremidades da estrutura.

#### *6.7 Avaliação de descargas diretas sobre os eletropostos a partir do método da esfera rolante*

Segundo a NBR 5419 e IEC 62305, o método da esfera rolante define as zonas que são protegidas pelo subsistema de captação contra descargas diretas. Componentes do subsistema de captação instalados na estrutura devem ser posicionados nos cantos salientes, pontas expostas e nas beiradas. Dessa forma, a movimentação de uma esfera rolante de raio 'r' sobre essas beiradas define as fronteiras geométricas de áreas protegidas contra descargas atmosféricas diretas. Essa situação está ilustrada na Figura 6.10, da NBR 5419-3.



**Fig. 6.10.** Método da esfera rolante. Fonte: NBR 5416-3.

Para avaliar a possibilidade de descargas diretas sobre a estrutura, pode-se fazer a avaliação proposta por Zhao *et al* (2016) e Raycap (2019), no Tópico 6.2. É sugerido que os eletropostos estejam situados sob a região LPZ 0b. Para fazer essa avaliação, foi verificado se os eletropostos do CEAMAZON estão dentro da região definida pelo método da esfera rolante.

A Fig. 6.11 mostra a vista superior do CEAMAZON. Nela, é possível identificar a posição dos eletropostos em relação à estrutura. Está identificada também a menor distância entre os eletropostos e a estrutura do CEAMAZON. Essa estrutura tem um projeto de SPDA, com terminais aéreos nas extremidades e captadores tipo Franklin centralizados em determinados pontos.



**Fig. 6.11.** Vista superior do CEAMAZON. Os traços vermelhos indicam a distância entre os eletropostos e os terminais aéreos mais próximos de cada eletroposto Fonte: Adaptado do Google Maps.

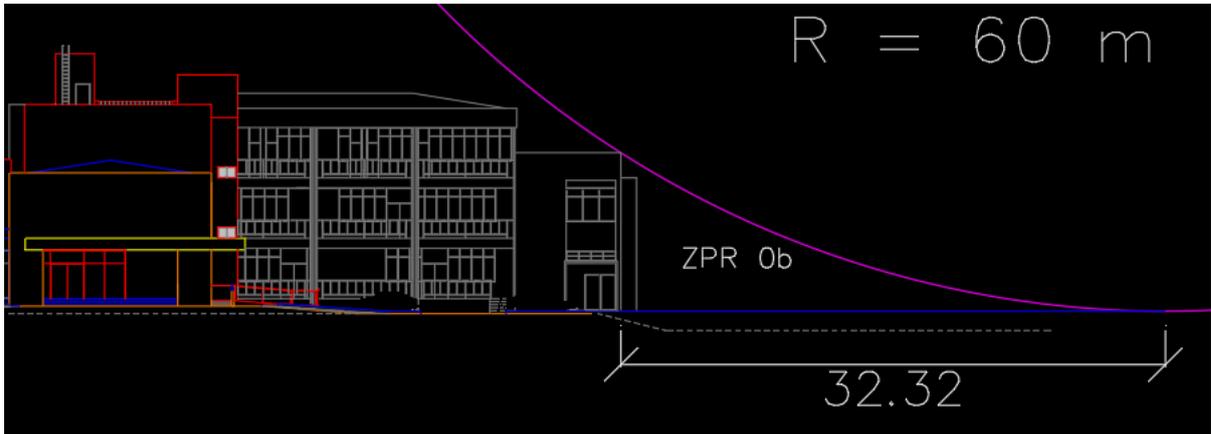
Conforme a NBR 5419.3 (2015) e a IEC 62305, o raio da esfera rolante a ser considerado para a proteção é definido a partir da Classe do SPDA. A Tabela 6.1 mostra essa relação.

**Tabela 6.1. Relação entre a Classe do SPDA e o Raio da esfera rolante R (m).**

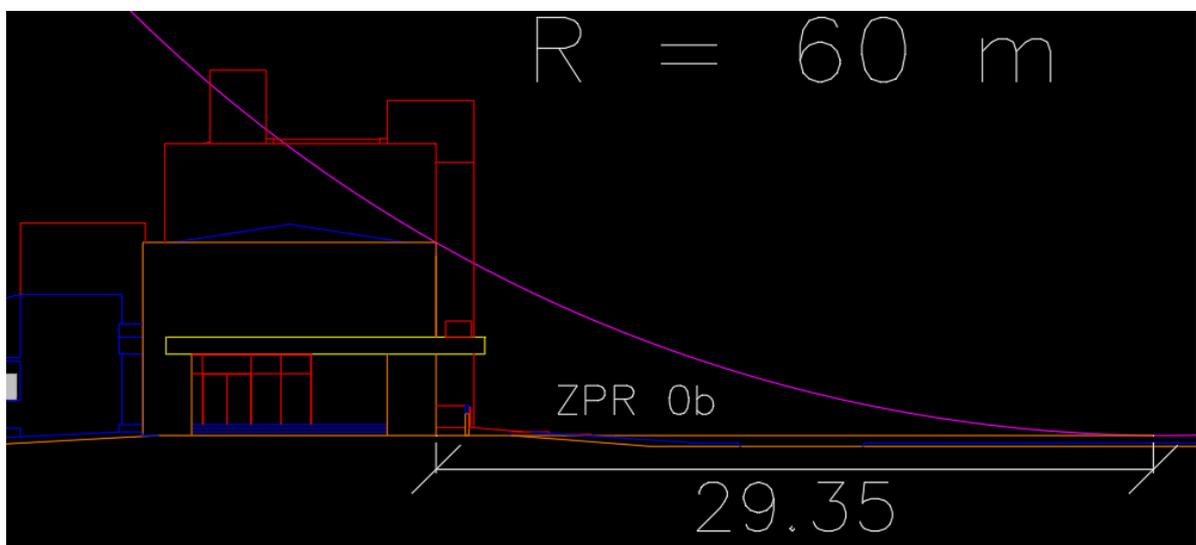
Classe do SPDA	Raio da esfera rolante – R (m)
I	20
II	30
III	45
IV	60

Considerando, portanto, que a classe do SPDA é III/IV, o raio da esfera rolante a ser considerado para a proteção dos eletropostos deve estar na faixa de 45 a 60 metros. A Fig. 6.12 e 6.13 mostram a aplicação do método da esfera rolante de R igual a 60 metros sobre cada uma das extremidades do SPDA na estrutura, mostrada na Figura 6.11. A esfera rolante está

representada pela linha roxa, e a região de proteção contra descargas diretas está designada pela ZPR 0b. Observa-se que, em ambos os casos, os eletropostos estão a uma distância maior do que a região preenchida pelo raio da esfera rolante (ZPR 0b).



**Fig. 6.12.** Verificação do método da esfera rolante para o eletroposto de 80 kW. O traço roxo indica a esfera rolante de raio igual a 60 m, e a região coberta por ela é de 32,32, enquanto que o eletroposto de 80 kW está a uma distância de 45,2 m.



**Fig. 6.13.** Verificação do método da esfera rolante para o eletroposto de 22 kW. O traço roxo indica a esfera rolante de raio igual a 60 m, e a região coberta por ela é de 29,35 m, enquanto que o eletroposto está a uma distância de 33,4 m.

Conforme a Fig. 6.11, nota-se que os raios estão à distância mínima de 33,4 m do eletroposto de 22 kW e de 45,2 m do eletroposto de 80 kW.

Analisando a Tabela 6.1, pode-se então definir que, tanto o eletroposto de 22 kW como o eletroposto de 80 kW não estão protegidos pelo SPDA do prédio, considerando-se uma classe de SPDA nível IV, o menor nível.

Sendo assim, o SPDA do prédio não é capaz de fornecer uma proteção adequada contra descargas diretas sobre os eletropostos. Todavia, pode-se avaliar a presença de outras estruturas que funcionem como captores, como, por exemplo, a presença de uma subestação aérea que está muito próxima aos eletropostos, mostrada na Fig. 6.14. Essa subestação funciona como um captor, uma vez que é uma estrutura alta e condutora, criando, portanto, uma zona de proteção. Além disso, existem outras estruturas altas nas redondezas, como vegetações, que podem ser consideradas como captores.



**Fig. 6.14.** Subestação aérea e poste servem como captores, criando uma zona de proteção contra descargas atmosféricas diretas aos eletropostos próximos.

### 6.8. Avaliação de descargas indiretas sobre os eletropostos

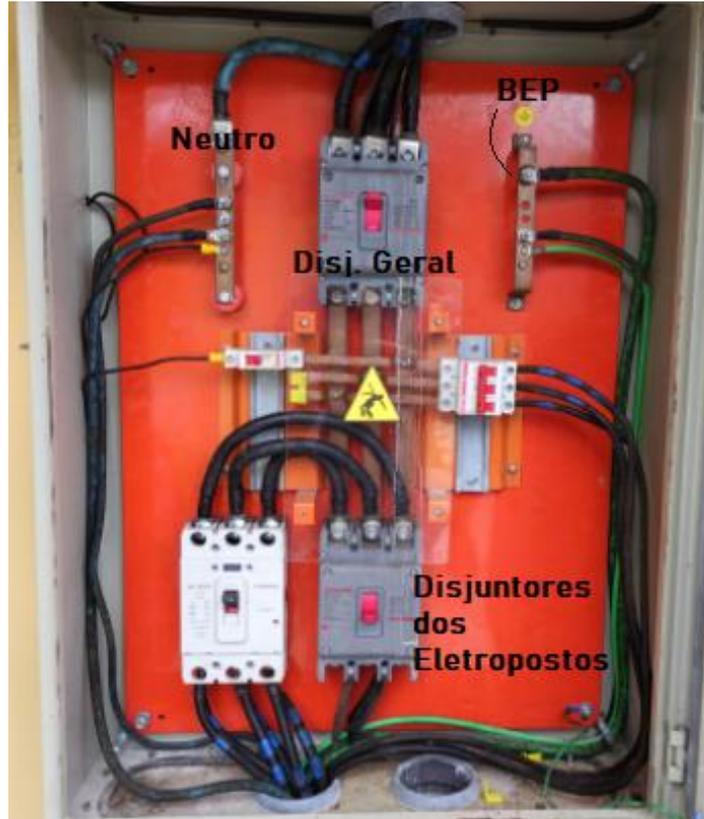
Existem muitas estruturas altas próximas aos eletropostos, que inviabilizariam que um impacto ocorresse diretamente sobre os dispositivos. Dentre essas, a principal estrutura, é a subestação aérea, mostrada na Fig. 6.14. Uma descarga atmosférica pode atingir tanto diretamente o transformador como uma linha de transmissão, ocasionando surtos nos dispositivos. Da mesma forma, uma descarga atmosférica pode atingir uma árvore ou poste próximo aos eletropostos, criando assim um campo eletromagnético nocivo aos componentes eletrônicos, tal como mostrado na Fig. 6.3.

Portanto, deve-se avaliar a existência das proteções por meio de DPSs, a fim de proteger os circuitos contra sobretensões provenientes das linhas, bem como a presença de um aterramento próximo ao ideal para reduzir diferenças de potencial e evitar o fenômeno de backflashover.

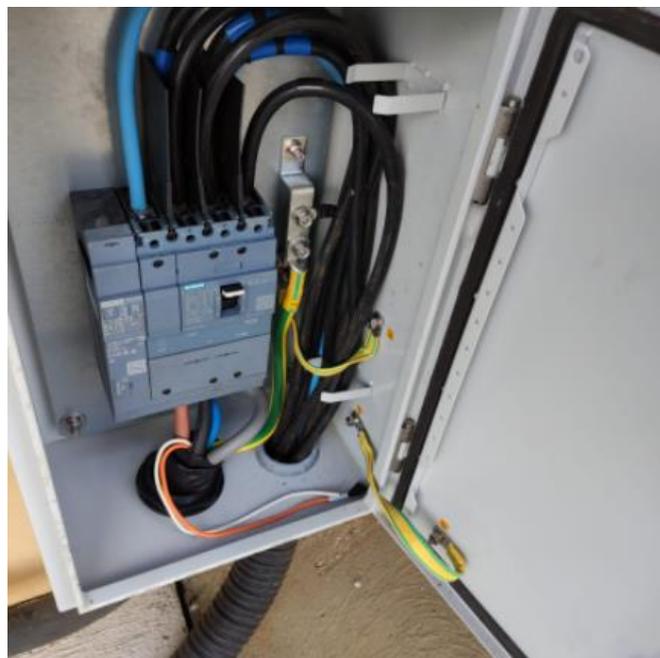
Zhao *et al.* (2016), recomendam que a proteção por DPSs de eletropostos deva ser realizada considerando-se, no geral, três estágios. No primeiro estágio, são instalados DPSs com descarga nominal de corrente de 50kA ou superior no lado de baixa tensão do transformador. Para carregadores AC, os demais estágios devem ser possuir DPS na entrada do quadro de distribuição com descarga nominal corrente de 20kA ou superior.

Na prática, a coordenação de DPSs pode seguir outros caminhos, não necessariamente havendo três estágios ou havendo mais de três estágios. Tudo irá depender da quantidade de quadros secundários e de como o sistema foi projetado inicialmente. Contudo, deve-se sempre avaliar a qualidade da proteção como fator primordial.

Para a avaliação da proteção dos equipamentos contra surtos provenientes da subestação, foi verificado se há ou não a presença de DPSs no quadro principal abaixo da subestação, mostrado na Fig. 6.15. O eletroposto de 80 kW possui um quadro secundário, mostrado na Fig. 6.16. O eletroposto de 22 kW, por sua vez, não possui um quadro secundário, sendo alimentada diretamente pelo quadro principal. Dessa forma, para esse último, os estágios primário e secundário podem ser considerados como o mesmo estágio, ao passo que para o eletroposto de 80 kW pode-se avaliar a presença ou não de pelo menos dois estágios.



**Fig. 6.15.** Quadro principal de distribuição.

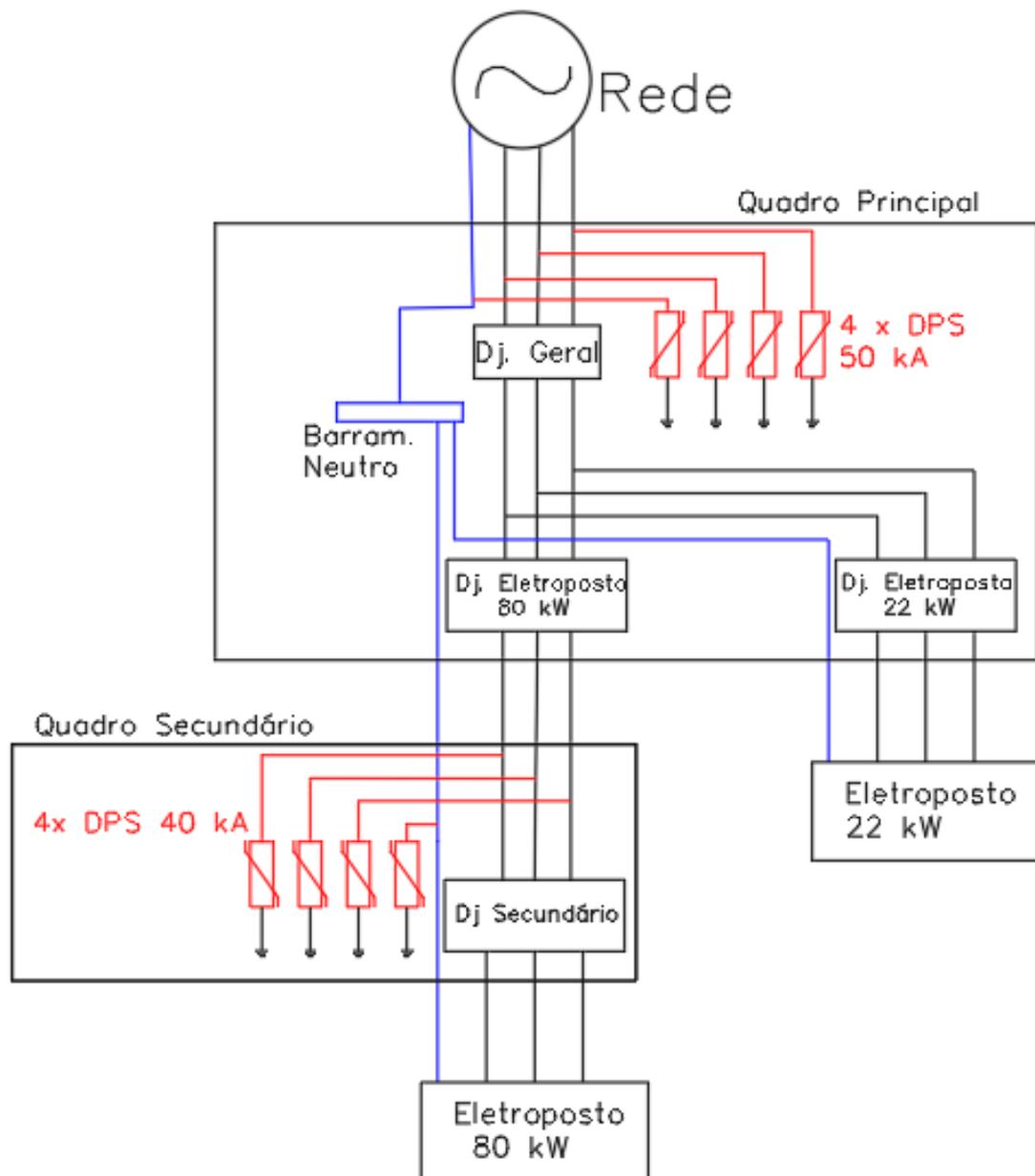


**Fig. 6.16.** Quadro secundário do eletroposto de 80 kW.

Observa-se, na Fig. 6.15, que não existe qualquer DPS na entrada do quadro principal de distribuição, inexistindo o primeiro estágio de proteção para ambos eletropostos. Para o

eletroposto de 80 kW, a Fig. 6.16 mostra que também não existe DPS no quadro secundário, logo, não havendo o segundo estágio de proteção.

Conforme descrito por (Almeida *et al.* (2012), Cooray *et al.* (2020), Leal *et al.* (2021)), a Amazônia é uma região caracterizada por descargas atmosféricas de elevadas amplitudes de corrente. Dessa maneira, para o caso estudado, decidiu-se adotar DPSs de 50 kA de corrente nominal para o primeiro estágio, e DPSs de 40 kA de corrente nominal para o segundo estágio. A Fig. 6.17 mostra um circuito simplificado de como deveria ser feita a instalação dos DPSs em cada um dos quadros. Os DPSs estão marcados em vermelho.



**Fig. 6.17.** Circuito simplificado de como o sistema deveria estar protegido contra descargas indiretas via coordenação de DPS.

Os eletropostos estão, portanto, vulneráveis a surtos provenientes da linha de transmissão ou ainda do transformador. Recomenda-se, portanto, a instalação de DPSs no primeiro estágio, de corrente nominal de 50 kA. Para o segundo estágio, devem ser colocados DPSs de corrente nominal de 20 kA, conforme a Fig. 6.17.

### 6.9 Avaliação do aterramento

Foi constatado que o aterramento dos eletropostos compartilha o mesmo aterramento da subestação, estando ambos ligados no aterramento do SPDA do prédio.

De acordo com Zhao *et al.* (2016), para uma proteção adequada, a resistência de aterramento do sistema de terra compartilhado não deve ser superior a  $4 \Omega$ , e o cabo de cobre deve possuir área da seção transversal menor ou igual a  $16 \text{ mm}^2$ .

Para averiguar a proteção, realizou-se medições da malha de aterramento, por meio de um terrômetro compensador de frequência. A malha de terra do sistema todo apresentou uma resistência na faixa de  $3,3 \Omega$ . A Fig 6.18 mostra uma haste fincada para a medição da resistência de aterramento do local. Essa malha de aterramento, portanto, está de acordo com a resistência proposta por Zhao *et al.* (2016).

Além disso, todos os condutores de aterramento encontrados nos quadros de distribuição possuem bitola igual ou superior a  $16 \text{ mm}^2$ , estando também em concordância com o que propõe o autor Zhao *et al.* (2016).

Nas simulações do Capítulo 5, constatou-se que com o aumento da impedância de aterramento, ocorre um aumento significativo das tensões na saída dos retificadores de eletropostos durante os transientes atmosféricos, em especial seus valores de pico. Como isso, proteções mais robustas devem ser projetadas para esse tipo de circuito frente às descargas atmosféricas durante o regime transitório.

Zhao *et al.* (2016) também reforça que é necessário integrar as malhas de aterramento do eletroposto com a malha de aterramento da estrutura. Pelo menos dois condutores de aço com a área da seção transversal não inferior a  $4 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  devem ser usados para conectar a malha de aterramento dos eletropostos à malha de terra de edifício ou da estrutura próxima.

Acerca disso, há uma integração entre os sistemas de aterramento. O aterramento dos eletropostos, assim como o aterramento da subestação aérea, estão diretamente conectados com o aterramento do SPDA do prédio.

Pode-se, então, atestar que a malha de está adequada para a proteção dos eletropostos, devido às baixas impedâncias encontradas nas medições. O que colabora com uma diminuição

das diferenças de potencial durante surtos e prevenindo fenômeno de backflashover.



**Fig. 6.18** Haste de medição da resistência da malha de aterramento do CEAMAZON.

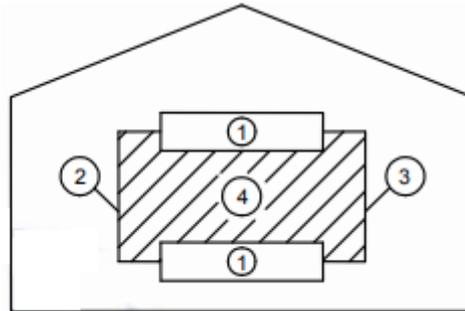
### 6.10 Blindagem e roteamento

Zhao *et al.* (2016) reforça que a blindagem deve primeiramente ser feita a partir da própria blindagem espacial fornecida pelas estruturas que abrigam os eletropostos.

Acerca disso, nos eletropostos do CEAMAZON há poucos recursos que podem ser utilizados como blindagem espacial, uma vez que eles estão ao ar livre, conforme mostrado na Fig. 6.5 e Fig. 6.6. A única blindagem possível pode ser a carcaça metálica dos equipamentos e quadros, que por sua vez estão aterradas. Porém, não há uma blindagem estrutural que possa ser de fato considerada para a realização da proteção.

Acerca do roteamento, a NBR 5419 recomenda que se evite a formação de laços de indução no caminho dos fios condutores. A formação de laços de indução está mostrada na Fig. 6.19. Pode-se reduzir o campo magnético interno por meio de blindagem externa (espacial) ou blindagem dos eletrodutos.

**Legenda**  
 1 equipamento  
 2 cabo de sinal  
 3 cabo de energia  
 4 laço de indução

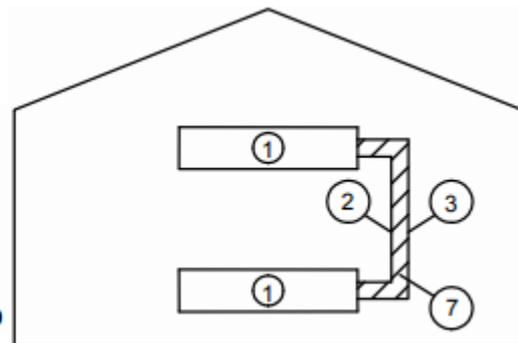


**Fig. 6.19.** Formação de Laços de Indução. Fonte: Adaptado de NBR 5419-4.

A área do laço de indução pode também ser reduzida pelo roteamento adequado das linhas, conforme mostrado na Fig. 6.20.

**Legenda**

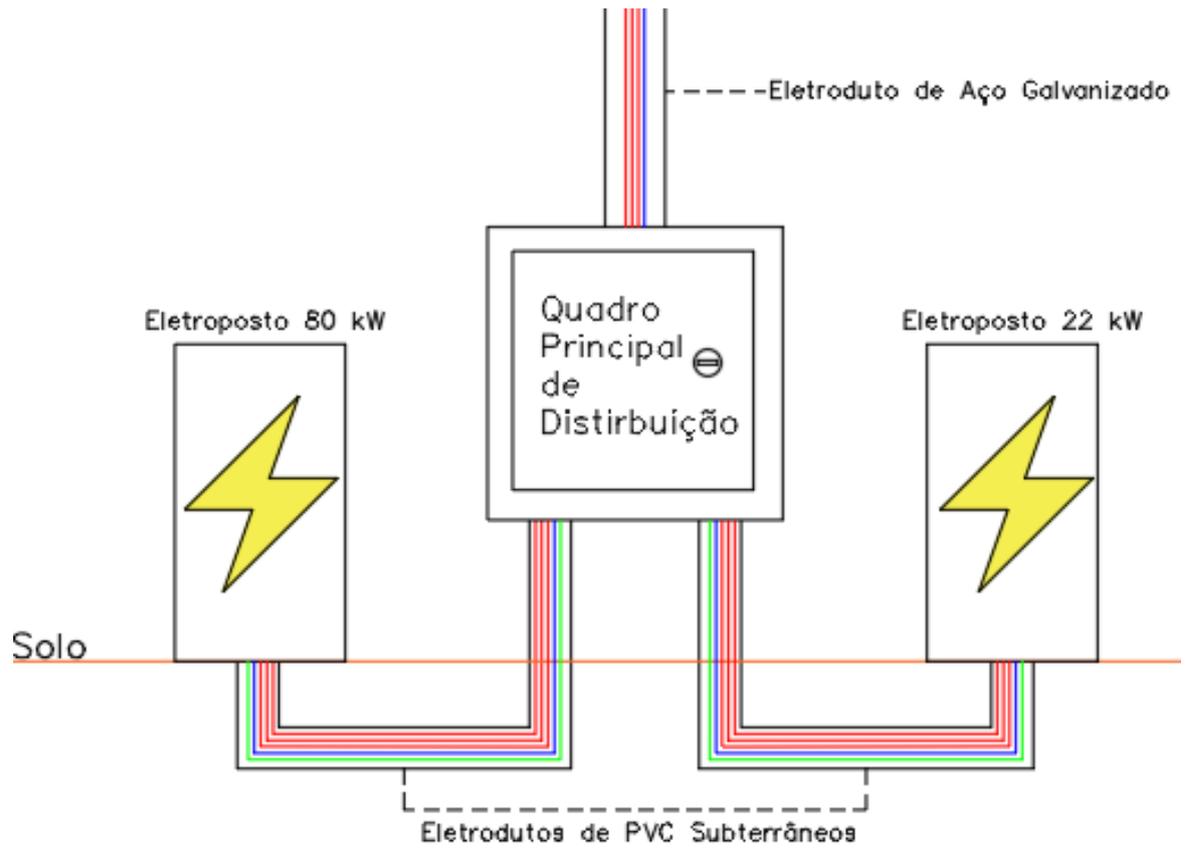
1 equipamento  
 2 cabo de sinal  
 3 cabo de energia  
 7 redução da área do laço de indução



**Fig. 6.20.** Reduzindo a área dos laços de indução por meio do roteamento adequado das linhas. Fonte: Adaptado de NBR 5419-4.

No caso dos eletropostos do CEAMAZON, é possível observar pelas Fig. 6.5 e 6.8 que os eletrodutos que carregam os fios de energia dos eletropostos são de PVC, o que certamente não garante uma redução do campo magnético interno.

Contudo, observou-se que o caminho percorrido pelos condutores está adequadamente roteado. Dessa forma, diminuindo-se a área dos laços de indução. Para performance mais adequada, os eletrodutos deveriam ser de aço galvanizado, pois além da proteção advinda do roteamento, haveria também blindagem das linhas. A Fig. 6.21 ilustra o roteamento das linhas da instalação do Ceamazon. As linhas vermelhas representam fios de fase, azul neutro e verde aterramento.



**Fig. 6.21.** Esquemático da instalação elétrica e roteamento dos fios.

## 7. CONCLUSÕES

A primeira parte desse trabalho (Capítulos 4 e 5), analisou os transientes desenvolvidos frente às descargas atmosféricas em sistemas de carregamento de bateria. Verificou-se a forma de onda da tensão em diferentes pontos dos circuitos para diferentes aplicações de distúrbios impulsivos de frente rápida. O modelo para estudo de transientes proposto se mostrou adequado para o estudo das tensões induzidas desenvolvidas por um campo magnético externo.

Quando o distúrbio foi aplicado no modelo proposto por Durgaprasad (2021), na entrada conversor Buck, observou-se que a saída não se mostrou tão afetada, ao passo que a entrada apresentou sobretensões. Essa situação é bastante provável de acontecer, uma vez que esse lado do circuito está mais próximo da fonte de tensão. Surtos induzidos na fonte podem se propagar até a entrada do circuito do conversor, prejudicando componentes eletrônicos associados. É, portanto, recomendada uma proteção maior por meio de DPSs nesse ponto.

Nas simulações realizadas sobre o modelo adaptado de Lee (2011), observa-se que os transientes presentes na entrada do retificador, na fase R, apresenta efeitos em outras fases, devido aos capacitores de filtro. A parte DC do retificador (saída) apresentou também oscilações de tensão. Com a aplicação do aterramento ideal no Link DC, verifica-se que o transiente foi completamente mitigado, o que denota a importância de bons aterramentos para prevenir os danos causados por esses surtos.

Contudo, com o aumento da resistividade do solo, e por consequência da resistência de aterramento nos modelos elétricos das hastes verticais, nota-se que ocorre um aumento significativo das tensões, em especial seus valores de pico. Como isso, proteções mais robustas devem ser projetadas para esse tipo de circuito frente às descargas atmosféricas durante o regime transitório

Acerca da análise de proteção dos eletropostos do CEAMAZON (Capítulo 6), buscou-se utilizar as metodologias propostas por Zhao *et al.* (2016), Raycap (2019) e NBR 5419 e IEC 62305 para a verificação da proteção contra descargas atmosféricas, tema esse que tende a se tornar mais frequente com o aumento dos veículos elétricos na sociedade moderna, especialmente com o incentivo crescente ao uso de energias renováveis.

Foi estudada a proteção contra descargas atmosféricas de dois eletropostos do CEAMAZON, um de 22 kW e outro de 80 kW, que estão próximos ao prédio e compartilham a malha de terra do mesmo.

Quanto à proteção a descargas diretas, verificou-se que, mesmo se for considerado um SPDA de nível IV, tanto o eletroposto de 22 kW como o eletroposto de 80 kW não estão

protegidos pelo SPDA do prédio, mas estão relativamente protegidos contra descargas diretas devido à presença de estruturas altas próximas, em especial a subestação aérea que se encontra logo acima dos eletropostos.

Com relação às descargas indiretas, verificou-se que não há nenhum DPS no quadro principal dos eletropostos, como também não há no quadro secundário, do eletroposto de 80 kW. Dessa forma, seguindo as recomendações de Zhao *et al* (2016), os equipamentos não adequadamente protegidos, estando vulneráveis a danos provenientes de distúrbios nas linhas. Recomenda-se, então, que sejam adicionados DPSs, tanto no primeiro estágio (50 kA) como no segundo estágio (20 kA).

Quanto ao aterramento, verificou-se que a resistência da malha está abaixo de  $4 \Omega$ , além de que todos os condutores se apresentam acima de  $16 \text{ mm}^2$ . O aterramento dos eletropostos, da subestação e do SPDA do prédio estão interligados e equipotencializados. Dessa forma, conclui-se que o aterramento está adequado para a proteção contra descargas atmosféricas, seguindo os critérios definidos por Zhao *et al.* (2016).

Quanto à blindagem, constatou-se que não está adequada segundo a NBR 5419 e Zhao *et al.* (2016). Isso se deve à ausência de uma blindagem estrutural, bem como à presença de eletrodutos de PVC ao invés de eletrodutos de aço galvanizado. Esse fato favorece a criação de laços de indução internas. Contudo, o roteamento de linhas está adequado, o que favorece com que a área desse laço seja diminuída. Portanto, uma solução barata para uma melhor proteção é que seja feita a troca dos eletrodutos de PVC por eletrodutos de aço galvanizado.

Para trabalhos futuros, propõe-se:

- Utilizar modelos de impulso atmosférico de corrente, como a fonte de Heidler, aplicando diretamente em diferentes pontos do circuito. Nesse caso, simularia-se a queda direta do raio sobre determinado ponto do circuito.
- Refazer as simulações no software ATP, e comparar os resultados com o Matlab Simulink.

## REFERÊNCIAS

- Almeida, Arthur C.; Rocha, Brígida R. P.; Souza, José Ricardo S.; Sá, José Alverto S., & Filho, José A. Pissolato (2012). Cloud-to-ground lightning observations over the eastern Amazon Region. *Atmospheric Research*, 117, 86–90. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.08.015>.
- Antunes, Paulo Donizete Ribeiro (2018). ‘Veículos elétricos. Funcionamento e seus benefícios’. Trabalho de Conclusão de Curso. UNIFACVEST.
- Climainfo. (2017). 'Cresce a infraestrutura de carga para veículos elétricos'. Disponível em:<<http://climainfo.org.br/2017/09/25/cresce-infraestrutura-de-carga-para-veiculos-eletricos/>>. Acesso em: 05/05/2022.
- Cooray, V., Rubinstein, M., & Rachidi, F. (2020). Latitude and topographical dependence of lightning return stroke peak current in natural and tower-initiated negative ground flashes. *Atmosphere*, 11(6), 560. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11060560>.
- Diário do Transporte (2017). 'Trólebus é considerado modelo para novos projetos'. Fonte: <<https://www.abcdoabc.com.br/caderno/trolebus-considerado-modelo-novos-projetos-51316>>. Acessado em 17/04/2022.
- Durgaprasad, Sankarshan. (2021) ‘Charging of Battery Using Buck Converter powered by PV MPPT’. *Mathworks*. Matlab Central File Exchange. Available in: [https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/91410-charging-of-battery-using-buck-converter-powered-by-pv-mppt?s\\_tid=prof\\_contriblnk](https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/91410-charging-of-battery-using-buck-converter-powered-by-pv-mppt?s_tid=prof_contriblnk). Access in: 29/11/2021.
- Gomes, Chandima (2021). ‘Lightning Science, Engineering, and Economic Implications for Developing Countries’. Volume 780. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-16-3440-6>.
- Grcev, Leonid, and Popov, Marjan. (2005). ‘On High Frequency Circuit Equivalents of a Vertical Ground Rod’. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Volume 20. 1598-1603.
- Hoyer, K. G. 2008. 'The History of Alternative Fuels in Transportation: The Case of electric and Hybrid Cars'. *Utilities Policy*. S/I: Elsevier.
- IEC 62305-3. (2010). ‘Protection Against Lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard’. *International Standard*.
- INEE. (2010). ‘Sobre Veículos Elétricos’. Disponível no site: [http://www.inee.org.br/veh\\_sobre.asp?Cat=veh](http://www.inee.org.br/veh_sobre.asp?Cat=veh) . Acessado em 18/04/2022.
- Isaacson, Walter. Benjamin Franklin: uma vida americana, tradução Pedro Maia Soares. 1ª ed. — São Paulo, Companhia das Letras, 2015.
- Khurshid, Z.M., and Gomes, C. (2021). Impacts of Earthing Arrangement on Lightning Protection Efficiency of Grid Connected PV System. *35rd International Conference on Lightning Protection*. Sri Lanka.

Leal, Adonis Ferreira Raiol; Matos, Wendler L. N.; Ferreira, Eduardo R.; Ferreira, Gabriel A. V. S.; Lopes, Marcio N. G.; Rocha, Brígida. (2021). 'Characteristics of Negative Cloud-To-Ground Flashes Observed in the Brazilian Amazon Region'. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2020JD034492. <https://doi.org/10.1029/2020JD034492>.

Lee, Jung-Hyo; Moon, Jung-Song; Lee, Yong Seok; Kim, Young-Real; Won, Chung-Yuen. (2011). 'Fast Charging Technique for EV Battery Charger using three-phase AC-DC Boost Convert'; *37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Societyer*, IECON. Melbourne, Australia.

Lenz, André Luis. 'O Básico sobre o sistema de tração de veículos elétricos, 15 de março de 2013'. Disponível no site: <<http://automoveiseletricos.blogspot.com/2013/03/o-basico-sobre-sistema-de-tracao-de.html>>. Acessado em 25/04/2022.

Lewis, Paul. L.; Tran, Trung N.; Swaffield, David J.; Hällström, Jari K. (2008) 'Zero-Phase Filtering for Lightning Impulse Evaluation: A K-factor Filter for the Revision of IEC60060-1 and - 2'; *IEEE transactions on power delivery*, vol. 23, no. 1.

Lugenergy. Tipos de conexões VEs. Disponível no site: <<https://www.lugenergy.pt/tipos-de-conectores-ves/>>. Acessado em: 24/04/2022.

Mamede Filho, J. (2005). *Manual de Equipamentos Elétricos*. 3th ed. LTC – Livros Tecnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, RJ.

Mariut, Larisa, and Helerea, Elena. (2014). 'Electromagnetic Analysis – Application Lightning Surge Phenomena on Power Lines'. 2014 International Simposium on of Electrical Engineering. University Politechnica of Bucharest; Romenia.

Martins, Fábio de Moura (2017). 'Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas'. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Uberlândia.

Matulka, Rebecca.(2014). 'The History of the Electric Car'. ENERGY.GOV. 15 setembro de 2014. Disponível no site: <<https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>>. Acessado em: 18/04/2022.

Mohamed, Z Hizam, H. Gomes, C. (2018). *Analysis of Lightning Transient Effects on Hybrid Renewable Energy Sources*. 34th International Conference on Lightning Protection – ICLP. Rzeszow. Polônia.

Morales, C. A. R. Notas de aula. Disponível em:< <http://www.storm-t.iag.usp.br/pub/ACA0330/>> Acesso em: 05/05/2022.

Nardi, Igor R.; Leal, Adonis Ferreira Raiol; Araujo, Anderson Ricardo Justo; Filho, José Pissolato; (2022). 'Simulação e Análise de Transientes Atmosféricos em Sistemas de Carregamento de Veículos Elétricos'. *IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE*. Em revisão.

NBR 5419 (2015). 'Proteção contra descargas atmosféricas' Parte 1, Parte 2, Parte 3 e Parte 4. Associação Brasileira de Normas Tecnicas – ABNT.

NeoCharge. (2021). ‘Conheça os Tipos de Carros Elétricos’. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/tipos-veiculos-eletricos>. Acesso em: 28/04/2022.

OLiberal. (2022). ‘Com apoio da UFPA, Pará ganha primeiro “corredor verde” de mobilidade elétrica; veja como funciona’. Disponível em: <https://www.oliberal.com/para/com-apoio-da-ufpa-para-ganha-primeiro-corredor-verde-de-mobilidade-eletrica-veja-como-funciona-1.522138>>. Acesso em: 24/06/2022.

Rakov. Vladimir A., University of Florida, LIGHTNING PHENOMENOLOGY AND PARAMETERS IMPORTANT FOR LIGHTNING PROTECTION, IX International Symposium on Lightning Protection, 2007.

Rakov, Vladimir A.; Uman Martin A. (2003) Lightning: Physics and effects. Cambridge, New York, 687 p

Raycap (2020). ‘Overvoltage Protection of Electric Vehicle (EV) Charging Infrastructures Globally’. Raycap Manual. Available at: [www.raycap.com/wp-content/uploads/2021/06/EV-Charger-Global-Application-paper\\_EN.pdf](http://www.raycap.com/wp-content/uploads/2021/06/EV-Charger-Global-Application-paper_EN.pdf) >. Access in: 24/12/2021.

Raycap. (2019). Overvoltage Protection of Electric Vehicle (EV) Charging Infrastructures Globally. *Raycap Article*. Available in: [https://www.raycap.com/wp-content/uploads/EV-Charger-Global-Application-paper\\_EN.pdf](https://www.raycap.com/wp-content/uploads/EV-Charger-Global-Application-paper_EN.pdf). Access in: 21/11/2021.

Tabora, Jonathan Muñoz; Júnior, Ulisses Carvalho Paixão; Rodrigues, Carlos Eduardo Moreira; Bezerra, Ubiratan Holanda; Tostes, Maria Emília de Lima; Albuquerque, Bruno S.; Matos, Edson Ortiz; Nascimento, Andréia Antlógica. (2021) ‘Hybrid system assessment in on-grid and off-grid conditions: A technical and economical approach’, *Energies*, 14(17).

Tan, Rodney H. G., and Ramachandaramurty, Vigna K. (2015). A Comprehensive Modeling and Simulation of Power Quality Disturbances Using Matlab/Simulink. *INTECH Open Book*. Available in: [www.intechopen.com/chapters/48982](http://www.intechopen.com/chapters/48982). Access in: 21/11/2021.

Tesla. Site da montadora tesla motors. Disponível no site: [https://www.tesla.com/pt\\_PT/models](https://www.tesla.com/pt_PT/models)>. Acessado em 24/04/2022.

UFPA. (2020). ‘Sistema Inteligente Multimodal da Amazônia recebe ônibus elétrico’. Available at: <https://portal.ufpa.br/index.php/ultimas-noticias2/11907-sistema-inteligente-multimodal-da-amazonia-recebe-onibus-eletrico>. Access in: 14/01/2022.

Visacro, Silvério. (2005) ‘Descargas atmosféricas. Uma abordagem de engenharia’. Artliber Editora LTDA. São Paulo. São Paulo.

Waltrick, Paulo Vinícius Valentini (2018). Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA). Estudo de caso em uma estrutura predial. Trabalho de Conclusão de Curso. UNIFACVEST.

Zaini, N. H.; Ab-Kadir; M. Z. A; Izadi, M.; Ahmad, N. I.; Radzi, M. A. M.; Azis, M.; Hasan, W. Z. Wan. (2016). ‘On the Effect of Lightning on a Solar Photovoltaic System’. *33rd International Conference on Lightning Protection*. Estoril, Portugal.

Zhao, J., Zhang, H., Lu, Q., Xu, C., and Yang, G. (2016). Lightning Protection of Electric Vehicle Charging Infrastructure. *33rd International Conference on Lightning Protection*. Estoril, Portugal.

# ANEXOS

## Anexo 1: Função do Bloco *fcn*

```
function v = fcn(t,t1,A,u)
alpha = 14000;
v = A*exp(-alpha*abs(t-t1))*u;
```

## Anexo 2: Parâmetros do painel fotovoltaico utilizado

Block Parameters: PV Array

Implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series. Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module.

Input 1 = Sun irradiance, in W/m2, and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters **Advanced**

Array data

Parallel strings: 1

Series-connected modules per string: 1

Module data

Module: User-defined

Maximum Power (W)	213.15	Cells per module (Ncell)	60
Open circuit voltage Voc (V)	36.3	Short-circuit current Isc (A)	7.84
Voltage at maximum power point Vmp (V)	29	Current at maximum power point Imp (A)	7.35
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	-0.36099	Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)	0.102

Display I-V and P-V characteristics of ...

array @ 1000 W/m2 & specified temperatures

T\_cell (deg. C) [ 45 25 ]

Plot

Model parameters

Light-generated current IL (A)	7.8654
Diode saturation current I0 (A)	2.9273e-10
Diode ideality factor	0.98119
Shunt resistance Rsh (ohms)	313.0553
Series resistance Rs (ohms)	0.39381

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: PV Array

Implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series. Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module.

Input 1 = Sun irradiance, in W/m2, and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

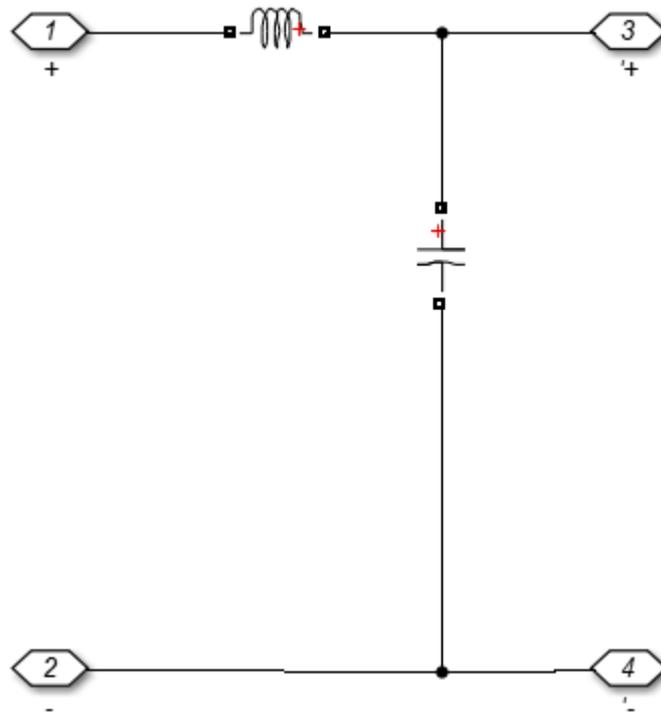
Parameters **Advanced**

Break algebraic loop in internal model

Measurement Filter

- Disabled

OK Cancel Help Apply

**Anexo 3: Conversor DC/DC utilizado no sistema de carregamento conectado à rede****Valores utilizados:**

$$L = 1 \mu\text{H}$$

$$C = 10 \mu\text{F}$$

## Anexo 4: Retificador AC/DC

