



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Igor Hasparyk Alvim

**ESTUDO DE COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO DE
UMA SUBESTAÇÃO DE USINA FOTOVOLTAICA
UTILIZANDO O SOFTWARE ATP/ATPDRAW**

Uberlândia

2023

Igor Hasparyk Alvim

**ESTUDO DE COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO DE
UMA SUBESTAÇÃO DE USINA FOTOVOLTAICA
UTILIZANDO O SOFTWARE ATP/ATPDRAW**

Monografia apresentada como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Thales Lima Oliveira

Uberlândia

2023

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ANEEL - Agencia nacional de Energia Elétrica
- NBR - Norma técnica Brasileira
- ATP - Alternative Transients Program
- UFU - Universidade Federal de Uberlândia
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Mapa Isoceráunico do território brasileiro	(9)
Figura 2	- Forma de onda normalizada para sobretensões de frente rápida	(10)
Figura 3	- Característica V x I para os resistores não lineares a carboneto de silício e óxido metálico	(15)
Figura 4	- Para-raios com caixa de borracha de silicone e design de gaiola	(16)
Figura 5	- Diagrama unifilar da subestação	(17)
Figura 6	- Janela de dados do transformador no ATP Draw	(21)
Figura 7	- Modelo de Linha aérea utilizado para realizar a simulação	(21)
Figura 8	- Modelo de Linha aérea utilizado para realizar a simulação	(22)
Figura 9	- Modelo de Linha aérea utilizado para realizar a simulação	(22)
Figura 10	- Modelagem da subestação sem para raios	(24)
Figura 11	- Gráfico das tensões pelo tempo	(24)
Figura 12	- Modelagem da subestação com 2 conjuntos de para raios destacando os para raios	(27)
Figura 13	- Gráfico das tensões pelo tempo	(27)
Figura 14	- Gráfico das tensões pelo tempo	(28)
Figura 15	- Gráfico da energia dissipada pelo tempo	(28)
Figura 16	- Gráfico das tensões pelo tempo	(29)
Figura 17	- Gráfico da energia dissipada pelo tempo	(30)
Figura 18	- Gráfico da tensão pelo tempo	(31)
Figura 19	- Gráfico da tensão pelo tempo	(31)

RESUMO

O presente trabalho foca na coordenação de isolamento em subestações de usinas fotovoltaicas, destacando a importância de proteger essas infraestruturas contra descargas atmosféricas, um desafio particularmente relevante no Brasil devido à alta incidência de tempestades elétricas. Examina-se a relação entre a segurança operacional das subestações e a conformidade com normas técnicas, como a ABNT NBR 6939:2018, utilizando uma metodologia que combina a análise de dados de uma usina solar específica com simulações de impacto de descargas atmosféricas no *software* ATP/ATP-Draw.

A pesquisa aborda as consequências das sobretensões induzidas por descargas atmosféricas, que podem exceder a capacidade de isolamento dos equipamentos, levando a falhas catastróficas e interrupções no fornecimento de energia. Foram analisados quatro casos, o primeiro com a subestação totalmente desprotegida, que mostrou ser um risco grande aos equipamentos e os operadores, o segundo caso consistiu na proteção da subestação com dois conjuntos de para raios, que obteve o melhor resultado para mitigar danos e riscos, já no terceiro caso a análise demonstrou que não basta ter apenas os para raios mais também um aterramento adequado para que a proteção seja feita de forma completa, no quarto caso foi analisada a possibilidade de usar apenas um conjunto de para raios para a proteção, mostrando ser uma opção mais econômica, porém menos conservadora visto que os níveis de tensão se elevaram.

Finalmente, ressalta-se a importância estratégica da coordenação de isolamento, que vai além da conformidade técnica, tornando-se um elemento chave na gestão financeira e operacional das usinas solares. A proteção eficiente contra descargas atmosféricas é vital não apenas para a integridade física das subestações, mas também para a viabilidade econômica e a sustentabilidade a longo prazo das instalações de energia solar.

Palavras-Chave – Coordenação de Isolamento; Subestação; Descargas Atmosféricas; ATP Draw.

ABSTRACT

The present work focuses on insulation coordination in photovoltaic power plant substations, highlighting the importance of protecting these infrastructures against atmospheric discharges, which is a particularly relevant challenge in Brazil due to the high incidence of electrical storms. The relationship between the operational safety of substations and compliance with technical standards, such as ABNT NBR 6939:2018, is examined using a methodology that combines data analysis from a specific solar plant with simulations of the impact of atmospheric discharges in the ATP/ATP-Draw software.

The research addresses the consequences of overvoltages induced by atmospheric discharges, which can exceed the insulation capacity of equipment, leading to catastrophic failures and interruptions in energy supply. Four cases were analyzed: the first case involved a completely unprotected substation, which proved to be a significant risk to equipment and operators. The second case consisted of protecting the substation with two sets of lightning rods, which yielded the best result in mitigating damages and risks. In the third case, the analysis showed that it is not enough to have only lightning rods; proper grounding is also necessary for complete protection. The fourth case examined the possibility of using only one set of lightning rods for protection, demonstrating it to be a more economical option but less conservative, as the voltage levels increased.

The document concludes by emphasizing the strategic importance of insulation coordination, which goes beyond technical compliance and becomes a key element in the financial and operational management of solar power plants. Efficient protection against atmospheric discharges is vital not only for the physical integrity of substations but also for the long-term economic viability and sustainability of solar energy facilities.

Keywords - Insulation Coordination; Substation; Atmospheric Discharges; ATP Draw.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Níveis de isolamento normalizados para a faixa 1 ($1\text{ Kv} < Um \leq 245\text{kV}$)	(18)
Tabela 2	- Resistência dos cabos	(24)
Tabela 3	- Para-raios de média tensão	(25)

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	2
LISTA DE FIGURAS.....	3
RESUMO	4
ABSTRACT	5
LISTA DE TABELAS.....	6
1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Contextualização	8
1.2 Problematização	8
1.2.1 Descargas atmosféricas	9
1.2.2 Sobretensões por Descargas Atmosféricas.....	10
1.3 Objetivos do trabalho.....	11
1.3.1 Objetivos específicos	11
1.4 Metodologia	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO	13
2.1 Coordenação de Isolamento.....	13
2.1.1 Equipamento de proteção	14
2.1.2 Níveis de Isolamento	15
3 MODELAGEM DA SUBESTAÇÃO NO ATP/ATPDRAW	17
3.1 Modelagem dos Transformadores	17
3.2 Modelagem das Linhas e Cabos.....	20
3.3 Modelagem dos Para-raios	22
3.4 Modelagem Descarga Atmosférica	24
4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS	26
4.1 Simulações com os parâmetros calculados.....	26
5 CONCLUSÃO.....	33
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Nos últimos anos, o cenário energético global tem sido marcado por uma crescente adoção de fontes renováveis, como a energia solar. As usinas solares, em particular, têm ganhado destaque como uma solução sustentável para atender à crescente demanda por eletricidade [1]. No entanto, apesar dos vários benefícios, esses sistemas não estão isentos de desafios, especialmente quando se trata da proteção de suas infraestruturas cruciais, como as subestações. O presente estudo se concentra em uma análise profunda da coordenação de isolamento de uma subestação de uma usina solar, com o objetivo de verificar se as proteções implementadas estão em conformidade com as normas vigentes.

A subestação, como ponto central de transmissão e distribuição, assume uma posição crítica no funcionamento contínuo do sistema. O desafio aqui é duplo: garantir não apenas o desempenho eficiente da subestação, mas também proteger o investimento financeiro significativo feito na usina. Uma das ameaças mais prementes é a possibilidade de descargas atmosféricas danificarem o sistema, principalmente pela localização, que em sua maior parte está em zona rural [1]. Além dos danos físicos aos equipamentos, as interrupções no fornecimento de energia acarretam custos financeiros substanciais, destacando a necessidade crítica de uma coordenação de isolamento robusta e eficaz.

1.2 Problematização

No Brasil, um país com vastos territórios e uma alta incidência de descargas atmosféricas, especialmente em áreas rurais dedicadas à produção de energia solar, a necessidade de uma coordenação de isolamento eficaz é ainda mais crítica. A frequente ocorrência de tempestades elétricas nessas regiões eleva o risco para as instalações elétricas, incluindo subestações [2].

Com isso este estudo se aprofunda na complexa relação entre a segurança operacional e conformidade com as normas ABNT NBR 6939:2018[3] e ABNT NBR 8186:2021[4], que tratam a respeito da coordenação de isolamento dos equipamentos elétricos. A coordenação de isolamento em subestações, especialmente quando se considera a proteção contra ameaças como descargas atmosféricas, transcende a mera conformidade técnica, tornando-se um pilar estratégico na gestão financeira e operacional de uma usina.

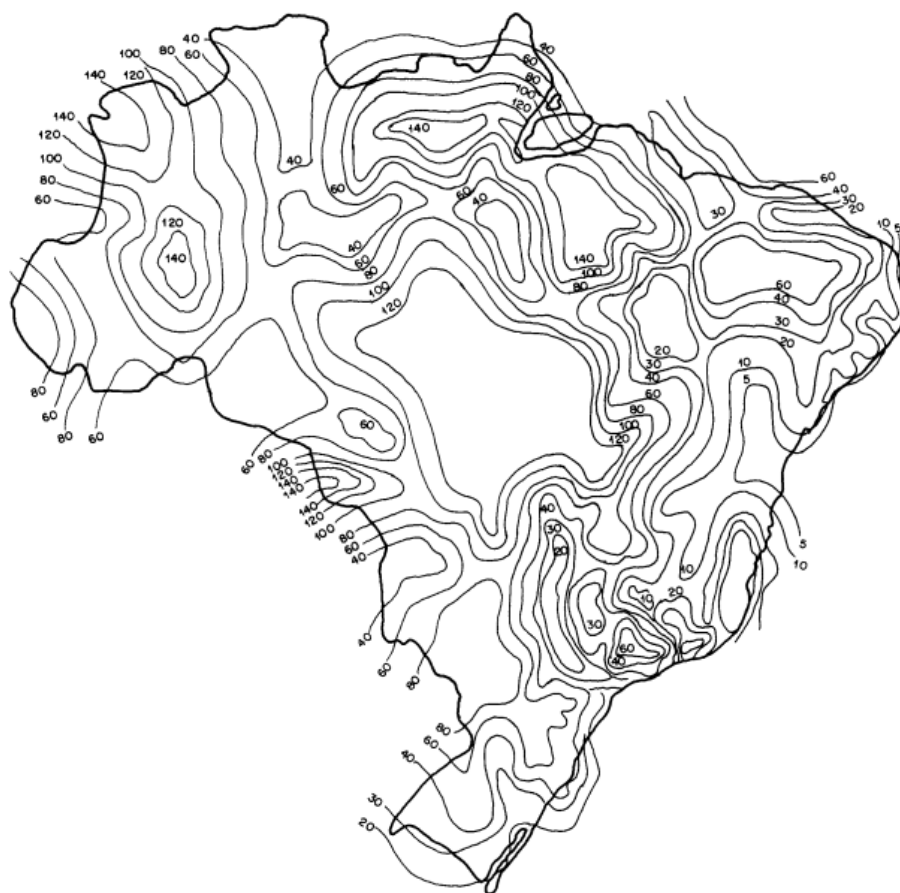
O investimento em usinas solares é significativo, e qualquer falha ou interrupção no fornecimento de energia, especialmente aquelas causadas por inadequações na proteção contra descargas atmosféricas, pode resultar em perdas financeiras expressivas. O verdadeiro desafio,

portanto, é harmonizar as exigências operacionais e normativas, assegurando que as estratégias de proteção adotadas sejam não apenas tecnicamente robustas, mas também economicamente otimizadas.

1.2.1 Descargas atmosféricas

Descargas atmosféricas são fenômenos elétricos naturais gerados por descargas elétricas entre nuvens ou entre uma nuvem e a terra, possuem uma magnitude considerável que repercute significativamente nas infraestruturas elétricas. O Brasil, com sua extensa área territorial e variabilidade climática, está entre os países com maior incidência de raios no mundo, registrando anualmente entre 50 a 70 milhões de descargas atmosféricas. A Região Amazônica, marcada por clima quente e úmido, lidera em incidência, mas o Centro-Oeste durante a estação chuvosa de outubro a março, e o Sudeste, especialmente em estados como São Paulo e Minas Gerais, também apresentam elevadas taxas de ocorrência como mostrado na Figura 1. O número médio de dias de trovoadas por ano no Brasil, também conhecido como mapa isoceráunico [5][6].

Figura 1: Mapa Isoceráunico do território brasileiro



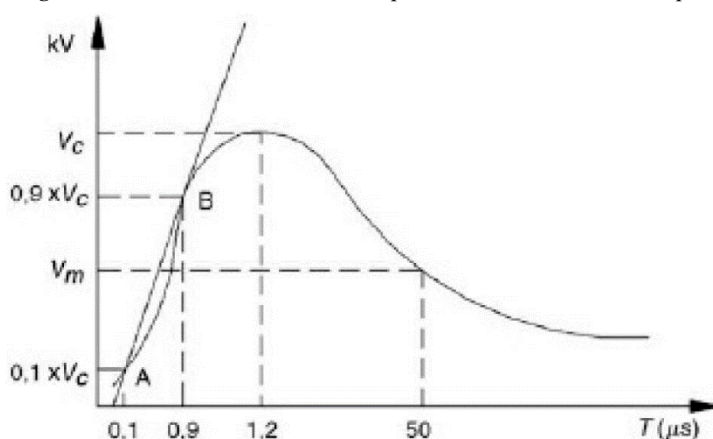
Fonte: NBR-5.419 Figura B.1 pg.22.[6]

Esses fenômenos podem afetar gravemente as redes elétricas, provocando interrupções no fornecimento de energia, danos a equipamentos e sobretensões transitórias que comprometem componentes da rede. Usinas solares enfrentam desafios ainda maiores, visto que os raios podem danificar painéis solares, causar falhas em inversores e outros equipamentos, além de interromper a geração de energia. A proteção adequada contra descargas atmosféricas é crucial para mitigar esses danos. A falta dela em subestações, por exemplo, pode resultar em danos extensos aos equipamentos, altos custos de reparo e substituição, e interrupções prolongadas no fornecimento de energia.

1.2.2 Sobretensões por Descargas Atmosféricas

As descargas atmosféricas, ou raios, ao incidirem direta ou indiretamente em linhas de transmissão, podem induzir sobretensões transitórias extremamente elevadas, e rápidas superando em muito os valores de tensão nominal dessas linhas como mostrado na Figura 2, que contém uma onda que tem seu pico acontecendo em $1,2\mu\text{s}$ e sua tensão que corresponde ao valor médio da cauda acontece em $50\mu\text{s}$ [7]. Essas sobretensões são causadas pelo rápido aumento de corrente elétrica associado à descarga, que pode alcançar dezenas ou até centenas de quilômetros. O campo eletromagnético gerado pela corrente do raio interage com as linhas de transmissão e pode induzir tensões adicionais por meio do acoplamento eletromagnético, mesmo sem um contato direto. Quando tais sobretensões ocorrem, elas podem exceder a rigidez dielétrica do ar e dos materiais isolantes, conduzindo a falhas que podem danificar os componentes da subestação e comprometer a distribuição de energia elétrica [2].

Figura 2: Forma de onda normalizada para sobretensões de frente rápida



Fonte: Notas de aula da disciplina de Usinas e Subestações - UFU [7]

Além disso, o impacto de um raio pode ser tão intenso que a isolação das linhas de transmissão não consiga contê-lo, resultando em descargas disruptivas. Isso pode levar a falhas catastróficas, como a formação de arcos elétricos entre isoladores, ou descargas superficiais que podem percorrer a superfície dos isoladores e propagar-se ao longo das linhas,

potencialmente causando curtos-circuitos entre fases ou entre fase e terra. Tais eventos podem acarretar danos significativos aos equipamentos, interrupções prolongadas no fornecimento de energia e custos elevados com manutenção e reparos [6][7].

Por fim, a eficiência dos sistemas de proteção, como para-raios e isoladores de alta performance, é crucial para mitigar os efeitos das sobretensões. Um sistema de proteção bem projetado deve ser capaz de limitar a sobretensão a níveis que os equipamentos possam suportar sem danos e garantir a condução das correntes induzidas para a terra, dissipando a energia do raio de forma segura. No entanto, sistemas inadequados ou mal dimensionados podem não apenas falhar em proteger a infraestrutura de transmissão e distribuição, mas também agravar os danos ao permitir que as sobretensões ultrapassem os limites dos equipamentos ou ao não conseguir dissipar a corrente de forma eficaz, aumentando o risco de falhas operacionais e de danos aos equipamentos conectados à rede [8].

1.3 Objetivos do trabalho

O objetivo principal do trabalho é realizar um estudo de coordenação de isolamento em uma subestação de uma usina fotovoltaica, analisando o impacto de uma descarga atmosférica na sobretensão imposta aos equipamentos elétricos em diferentes situações.

1.3.1 Objetivos específicos

Como objetivos específicos do trabalho, pode-se destacar:

- Destaque à necessidade de estudos de coordenação de isolamento em subestações de usinas fotovoltaicas;
- Levantamento bibliográfico a respeito do estudo de coordenação de isolamento, nível de isolamento e dos para-raios; necessários para embasar o trabalho realizado;
- Modelagem dos componentes da subestação da usina fotovoltaica, além de outros equipamentos e distúrbios da rede, necessários para o estudo de coordenação de isolamento no *software* ATP/ATPDraw;
- Realização do estudo de coordenação de isolamento em diferentes cenários, com destaque à análise do nível de isolamento e energia dissipada nos para-raios.

1.4 Metodologia

Primeiramente, serão apresentados os dados de uma usina exemplo com todos os parâmetros da rede, transformadores, inversores, geradores, seccionadoras, para-raios, e a rede

de conexão segundo o diagrama unifilar. Será usado os dados elétricos conforme o modelo de planta e assim ser possível simular no programa gratuito e largamente utilizado no setor elétrico ATP/ATPDraw (*Alternative Transient Program*).

A segunda parte será constituída por simulações de quatro casos, sendo o primeiro caso a análise de uma subestação sem proteção, o segundo será com uma proteção constituída por dois conjuntos de para raios, posteriormente a terceira será analisada para uma resistência de aterramento elevada já a quarta será feito a remoção de um dos conjuntos de para raio.

Além disso, será determinado o que essa sobretensão poderia prejudicar quanto aos componentes da instalação. Dessa maneira, será possível definir a área de vulnerabilidade da usina, que consiste em determinar os locais com maior probabilidade de risco e avaliando suas conformidades com a norma.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO

2.1 Coordenação de Isolamento

A avaliação da influência das descargas atmosféricas é um aspecto crucial para ser possível proteger os equipamentos e as linhas de transmissão de possíveis danos. As descargas atmosféricas podem induzir tensões transitórias perigosas nos sistemas elétricos, que podem exceder a capacidade de isolação dos equipamentos. Uma coordenação de isolação inadequada pode resultar em falhas catastróficas dos equipamentos, interrupções no fornecimento de energia e potenciais danos físicos. Além disso, as consequências econômicas de uma falha de isolação podem ser severas, incluindo custos de reparo ou substituição de equipamentos, perda de receita devido a interrupções de energia e potenciais responsabilidades legais [8].

A metodologia de cálculo para a coordenação de isolação envolve a determinação dos níveis de tensão transitória que a subestação pode enfrentar, e a seleção de equipamentos de isolação que podem suportar essas tensões com uma margem de segurança adequada. A norma NBR 8186:2021 descreve dois tipos de estudos, o método analítico (ou convencional), que será usado para as simulações e o estatístico (ou probabilístico).

O método analítico é mais simples e se baseia no uso de um fator de segurança (FS) sobre o valor máximo de sobretensão que o isolamento pode ser submetido. Esse fator de segurança é usualmente estipulado em 1,15 para surtos de manobra e 1,25 para surtos atmosféricos. Este método é apropriado para isolamentos não auto recuperativos, que são materiais que têm a capacidade de se reparar automaticamente após sofrerem danos, sem a necessidade de intervenção humana [9]. A tensão mínima de suportabilidade do isolamento deve ser igual ou maior que o valor máximo de sobretensão considerado, acrescido do fator de segurança. Esta abordagem é determinística, pois não considera o risco de falha do isolamento, mas simplesmente proporciona uma margem segura acima das sobretensões esperadas [2].

No método estatístico, por outro lado, considera a natureza aleatória das sobretensões e a probabilidade de falha do isolamento. Neste método, utiliza-se a análise da distribuição cumulativa da suportabilidade do isolamento e das sobretensões esperadas. A suportabilidade do isolamento é geralmente representada por uma distribuição gaussiana, com um valor médio e um desvio padrão, que indica a variabilidade da suportabilidade. Da mesma forma, as sobretensões também são representadas por uma distribuição gaussiana, caracterizada por um valor médio e um desvio padrão [1].

O método estatístico é especialmente útil para isolamentos auto recuperativos, nos quais uma falha temporária não resulta em danos permanentes. A partir das distribuições estatísticas, calcula-se o risco de falha do isolamento, considerando todos os eventos que possam causar sobretensões e afetar o isolamento. É importante que as sobretensões consideradas sejam estatisticamente homogêneas em termos de localização, causa, polaridade e forma de onda para a análise ser válida [10].

Os estudos de coordenação de isolamento especificam os equipamentos quanto à sua capacidade de suportar descargas disruptivas. Tais estudos são fundamentais na fase de projeto para avaliar as solicitações dielétricas nos equipamentos e sua suportabilidade. Em subestações, os estudos consideram sobretensões originadas tanto internamente, por manobras do sistema, quanto externamente, por surtos atmosféricos.

Em resumo, enquanto o método analítico é mais simples e conservador, adequado para isolamentos não auto recuperativos, o método estatístico é mais complexo e preciso, ideal para isolamentos que podem se recuperar de falhas temporárias. A escolha entre os métodos dependerá das características específicas do sistema e dos equipamentos envolvidos, bem como das condições operacionais e ambientais da subestação [10].

2.1.1 Equipamento de proteção

Diversos equipamentos de proteção são empregados para garantir a segurança, a confiabilidade e a eficiência operacional das subestações. Entre esses equipamentos, os para-raios desempenham um papel fundamental.

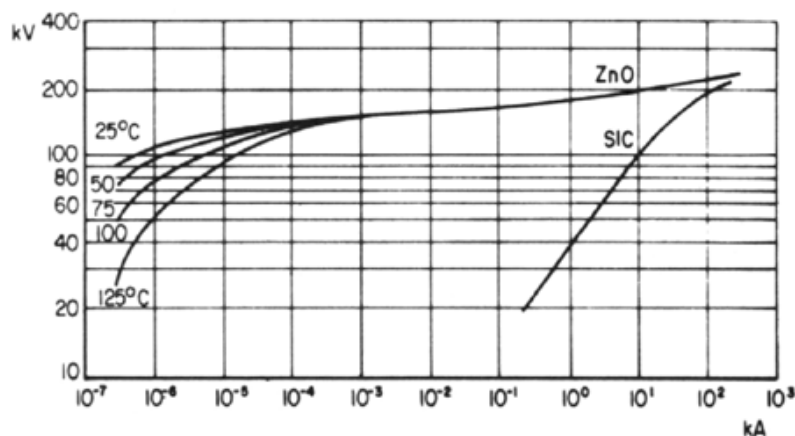
O principal objetivo dos para-raios é proteger a subestação e seus componentes contra surtos de tensão transitória, geralmente causados por descargas atmosféricas ou operações de comutação. Eles atuam fornecendo um caminho de baixa impedância para o solo, desviando as correntes de surto e limitando as tensões transitórias a níveis seguros [11].

Os primeiros para-raios foram os centelhadores, que eram dispositivos no qual possuíam uma série de gaps ou espaçamentos aéreos que, ao ionizarem-se durante uma condição de sobretensão, permitiam a passagem da descarga elétrica. Eles foram usados para proteger sistemas contra sobretensões de alta energia, mas tinham a desvantagem de serem menos confiáveis e precisarem de manutenção regular para garantir sua funcionalidade [7].

Com o desenvolvimento da tecnologia de materiais, surgiram para-raios que consistiam em um conjunto de resistores não lineares em série com um centelhador, mitigando algumas desvantagens dos centelhadores convencionais, chamados de centelhadores ativos, que como princípio de funcionamento são baseados no alongamento do arco elétrico dentro de câmaras com o auxílio de um campo magnético, também eram usados [7].

Atualmente com os varistores de ZnO, a proteção contra sobretensões foi significativamente aprimorada como mostra a Figura 3 comparando a curva característica entre os carbonetos de silício (SiC) usados em centelhadores e resistores. Estes dispositivos aproveitam as propriedades não lineares do óxido de zinco, que tem uma resistência que aumenta exponencialmente com a diminuição da tensão, proporcionando uma proteção eficaz contra sobretensões sem a necessidade de partes móveis ou centelhadores como mostra a Figura 4.

Figura 3: Característica $V \times I$ para os resistores não lineares a carboneto de silício e óxido metálico



Fonte: Notas de aula da disciplina de Usinas e Subestações - UFU [7]

Figura 4: Para-raios com caixa de borracha de silicone e design de gaiola



Fonte: SIEMENS ENERGY, High voltage surge arresters- Product guide, pg.33[12]

2.1.2 Níveis de Isolamento

A seleção dos níveis de isolamento normalizados é baseada em associações de tensões suportáveis nominais normalizadas, que são definidas para diferentes faixas de tensão máxima do equipamento. Estas associações são estabelecidas de forma a garantir a adequada coordenação do isolamento em sistemas elétricos.

Para a faixa 1, que cobre tensões máximas do equipamento de 1 kV até 245 kV, os níveis de isolamento normalizados são apresentados na Tabela 1. A Tabela especifica as tensões

suportáveis nominais normalizadas de frequência fundamental de curta duração e de impulso atmosférico para diferentes valores de tensão máxima do equipamento.

Tabela 1: Níveis de isolamento normalizados para a faixa 1 ($1 \text{ Kv} < U_m \leq 245 \text{kv}$)

Tensão máxima do equipamento U_m kV (eficaz)	Tensão suportável nominal normalizada de frequência fundamental de curta duração kV (eficaz)	Tensão suportável nominal normalizada de impulso atmosférico kV (crista)
0,6 ^a	4 ^c	-
1,2 ^c	10	30 ^c
3,6	10	20 40
7,2	20	40 60
12	28	60 75 95
15 ^c	34 ^c	95 110 ^c
17,5	38	75 95
24	50	95 125 145
36	70	145 170 200 ^c
52	95	250
72,5	140	325 350 ^c
92,4 ^c	150 ^c 185	380 ^c 450
123	(185) ^b 230	450 550
145	(185) ^b 230 275	(450) ^b 550 650
170	(230) ^b 275 325	(550) ^b 650 750
245	(275) ^b (325) ^b 360 395 460	(650) ^b (750) ^b 850 950 1 050

^b O nível de isolamento correspondente a $U_m = 0,6 \text{ kV}$ só é aplicável ao secundário de transformador, cujo primário tem U_m superior a 1 kV.

^c Se os valores entre parênteses forem considerados insuficientes para provar que as tensões suportáveis fase-fase especificadas são satisfeitas, ensaios adicionais de suportabilidade fase-fase são necessários.

^d Indica valores não constantes na IEC 60071-1.

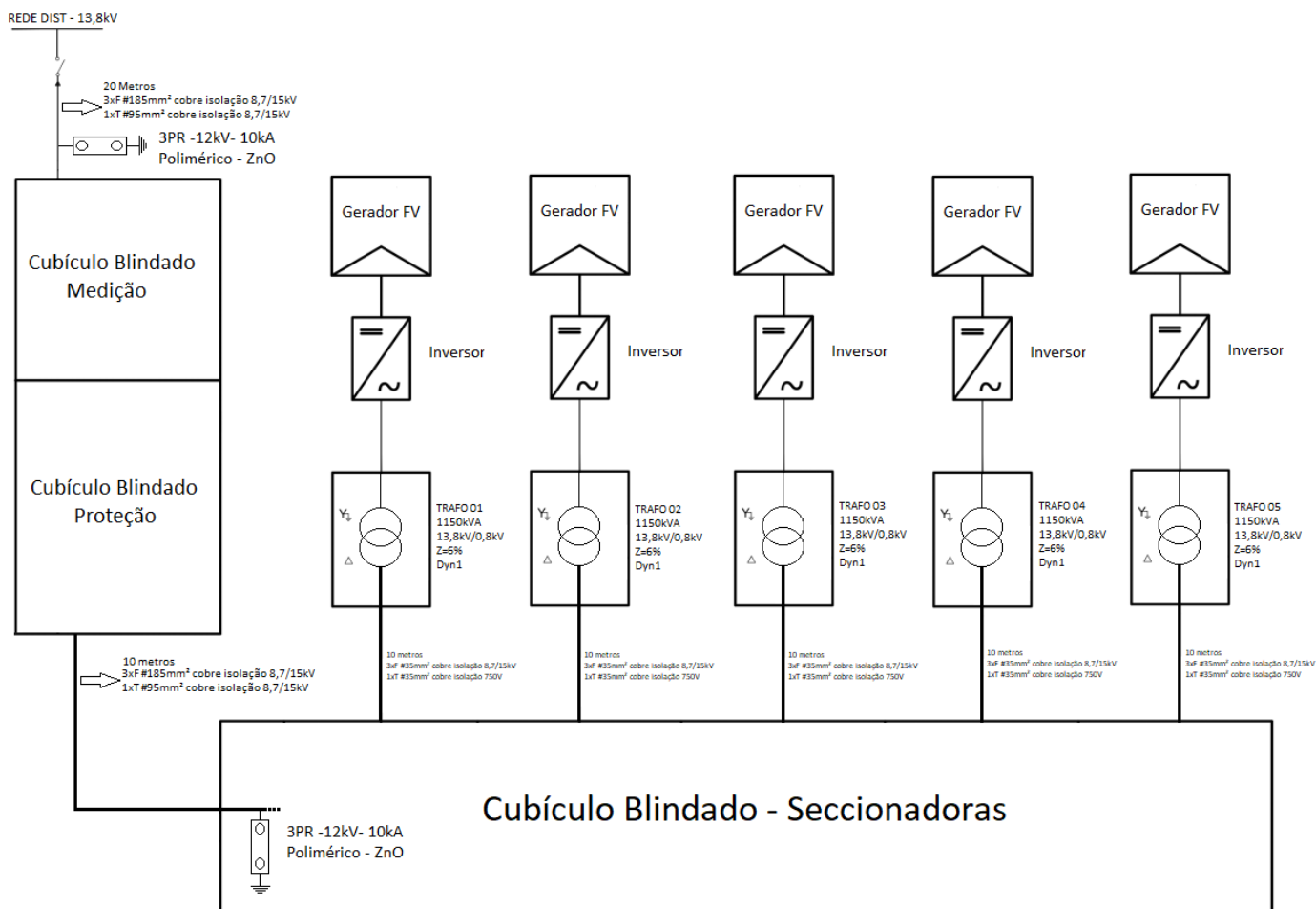
Fonte: ABNT NBR 6939:2018 - Tabela 2-Pg. 19[3]

A necessidade das sobretensões de se manter abaixo do nível de isolamento dos equipamentos é crítica para evitar falhas catastróficas. Isso assegura a integridade dos sistemas elétricos e a continuidade do fornecimento de energia, mitigando o risco de danos irreparáveis causados por descargas atmosféricas e garantindo a segurança operacional das instalações.

3 MODELAGEM DA SUBESTAÇÃO NO ATP/ATPDRAW

A subestação a ser analisada, Figura 5, consiste em uma cabine de medição e proteção, um cubículo de seccionadoras e cinco transformadores.

Figura 5: Diagrama unifilar da subestação



Fonte: Figura do autor

Com o intuito de adequar os dados elétricos da subestação para simulação no ATP/ATPDraw, serão apresentados os cálculos necessários para modelagem dos transformadores, linha, cabos, para-raios e a descarga atmosférica.

3.1 Modelagem dos Transformadores

Os cinco transformadores possuem a seguinte especificação:

Transformadores 01 a 05

- Trifásico;
- Frequência: 60 Hz;
- Potência trifásica: 1150 kVA;
- Tensão nominal: 13,8kV/0,8 kV;

- Conexão Δ -Y aterrado;
- Impedância: $Z = 6,0\%$;
- Resistência: $R_{cc} = 2,0\%$
- Corrente em vazio: $I_{vz\%} = 0,6\%$
- Perdas em vazio: $P_{vz\%} = 0,2\%$
- $\Phi_0 = 146 \text{ Wb} - \text{espiras}$

Para parametrizar o transformador no ATP/ ATP-Draw, como pode ser observado na Figura 6 é preciso encontrar a impedância, resistência, reatância, indutância, perdas a vazio, resistência no ramo magnetizante e a corrente nominal, como mostram as equações 01 a 13 a seguir:

Cálculos no Primário:

Impedância:

$$Z_P = \frac{V_{n-P}^2}{S_n} \times Z_{tr} = \frac{(13,8 \times 10^3)^2}{1150 \times 10^3} \times 0,06 = 9,936 \Omega \quad (01)$$

Resistência total:

$$R_P = \frac{V_{n-P}^2}{S_n} \times R_{cc} \frac{(13,8 \times 10^3)^2}{1150 \times 10^3} \times 0,02 = 6,624 \Omega \quad (02)$$

Reatância:

$$X_P = \sqrt{Z_P^2 - R_P^2} = \sqrt{9,936^2 - 6,624^2} = 9,367 \Omega \quad (03)$$

Indutância:

$$L_1 = \frac{1}{\omega} \times \frac{X_P}{2} = \frac{1}{2 \times 2\pi 60} \times 9,367 = 6,211 \text{ mH} \quad (04)$$

Resistência:

$$R_1 = \frac{1}{2} \times R_P = \frac{1}{2} \times 6,624 = 3,312 \Omega \quad (05)$$

Cálculos no Secundário:

Impedância:

$$Z_S = \frac{V_{n-S}^2}{S_n} \times Z_{tr} = \frac{(800)^2}{1150 \times 10^3} \times 0,06 = 0,033 \Omega \quad (06)$$

Resistencia total:

$$R_S = \frac{V_{n-S}^2}{S_n} \times R_{cc} = \frac{(800)^2}{1150 \times 10^3} \times 0,02 = 0,011 \Omega \quad (07)$$

Reatância:

$$X_S = \sqrt{Z_S^2 - R_S^2} = \sqrt{0,033^2 - 0,011^2} = 0,031 \Omega \quad (08)$$

Indutância:

$$L_2 = \frac{1}{2} \times \frac{X_S}{\omega} = \frac{1}{2} \times \frac{0,031}{2 \times 2\pi 60} = 0,021 \text{ mH} \quad (09)$$

Resistencia:

$$R_2 = \frac{1}{2} \times R_S = \frac{1}{2} \times 0,011 = 0,005 \Omega \quad (10)$$

Em que:

V = Tensão

S_n = Potência trifásica

Z_{tr} = Impedância do transformador

Perdas a vazio:

$$P_0 = S_n \times P_{vz\%} = 1150 \times 10^3 \times 0,002 = 2,3 \text{ kW} \quad (11)$$

Resistencia no ramo magnetizante:

$$R_M = \frac{V_{n-MT}^2}{P_0} = \frac{13800^2}{2300} = 82800 \Omega \quad (12)$$

Corrente a vazio:

$$I_0 = \frac{S_n}{V_{AT}} \times I_{vz\%} = \frac{1150 \times 10^3}{13800} \times 0,006 = 0,5 \text{ A} \quad (13)$$

Figura 6: Janela de dados do transformador no ATP Draw

Component: SATTRAFO.sup

Attributes | Characteristic

	Prim.	Sec.
U [V]	13800	461.880
R [ohm]	3.312	0.005
L [mH,ohm]	6.211	0.021

Coupling: D Y
 Phase shift: 30
 I(0)= 0.5 Rm= 82800
 F(0)= 146

Order: 0 Label:

Comment:

Output: 0 - No Hide Lock

NODE	PHASE	NAME
P	3	
S	3	
Sat	3	
S-N	1	

OK Cancel Help

Fonte: Software ATP Draw

3.2 Modelagem das Linhas e Cabos

Para o modelo das linhas de transmissão aérea foi utilizada o modelo LCC a três condutores sem cabo guarda com 10 km de distância da próxima subestação. Com os seguintes parâmetros geométricos e elétricos mostrados na Figura 7:

Figura 7: Modelo de Linha aérea utilizado para realizar a simulação

Poste Padrão	condutor								
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>tipo</th> <th>Raio (cm)</th> <th>Resist (cc)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Elgin</td> <td>1,177</td> <td>0,1013</td> </tr> </tbody> </table>	tipo	Raio (cm)	Resist (cc)	Elgin	1,177	0,1013		
tipo	Raio (cm)	Resist (cc)							
Elgin	1,177	0,1013							

Fonte: Notas de aula da disciplina de Usinas e Subestações - UFU [7]

Parametrizando a Linha Aérea de entrada da subestação no ATP Draw temos os dados mostrados na Figura 7. Como usaremos o modelo Jmarti para a parametrização da linha aérea, teremos que definir os seguintes dados: Décadas, Pontos por Décadas, Frequência máxima e Frequência de regime permanente como mostra a Figura 8.

Figura 8: Modelo de Linha aérea utilizado para realizar a simulação

System type: Overhead Line, #Ph: 3

Standard data: Rho [ohm*m] 10, Freq. init [Hz] 60, Length [km] 5

Model Type: JMarti

Data: Decades 10, Points/Dec 10, Freq. matrix [Hz] 500000, Freq. SS [Hz] 60, Use default fitting

Fonte: Software ATP Draw

Figura 9: Modelo de Linha aérea utilizado para realizar a simulação

#	Ph.no	React [ohm/km AC]	Rout [cm]	Resis [ohm/km AC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0	1.177	0.1013	-0.7	8.2	8.2
2	2	0	1.177	0.1013	-0.1	8.2	8.2
3	3	0	1.177	0.1013	0.8	8.2	8.2

Fonte: Software ATP Draw

Para os cabos subterrâneos foram usados o modelo π , seguindo os valores de resistência por seção nominal da Tabela 02.

Tabela 02: Resistência dos cabos

seção nominal (mm ²)	R _{cc} máxima em CC à 20 °C (Ω/km)	X _c (Ω.km)		unipolar						trifólio		banco de dutos	
		epro-tenax	volta-lene	s = 2D		s = 13 cm		s = 20 cm		R _{ca} (Ω/km)	X _L (Ω/km)	R _{ca} (Ω/km)	X _L (Ω/km)
				R _{ca} (Ω/km)	X _L (Ω/km)	R _{ca} (Ω/km)	X _L (Ω/km)	R _{ca} (Ω/km)	X _L (Ω/km)				
50	0,387	19.063	20.218	0,499	0,248	0,505	0,298	0,509	0,330	0,495	0,179	0,508	0,321
70	0,268	17.244	18.433	0,348	0,238	0,353	0,284	0,357	0,316	0,344	0,168	0,356	0,307
95	0,193	15.680	16.713	0,252	0,229	0,257	0,271	0,261	0,303	0,248	0,160	0,260	0,295
120	0,153	14.663	15.518	0,204	0,224	0,210	0,262	0,216	0,294	0,198	0,155	0,214	0,285
150	0,124	13.715	14.549	0,167	0,219	0,173	0,254	0,179	0,286	0,161	0,149	0,177	0,277
185	0,099	12.781	13.527	0,136	0,214	0,141	0,246	0,146	0,278	0,130	0,145	0,145	0,269
240	0,075	11.528	12.308	0,106	0,207	0,110	0,234	0,115	0,266	0,100	0,138	0,114	0,258
300	0,060	10.665	11.382	0,089	0,202	0,093	0,226	0,100	0,257	0,082	0,133	0,098	0,248
400	0,047	9.879	10.389	0,073	0,198	0,076	0,218	0,083	0,249	0,066	0,129	0,081	0,241
500	0,037	9.007	9.478	0,060	0,193	0,063	0,208	0,069	0,240	0,054	0,124	0,067	0,231

Fonte: Notas de aula da disciplina de Usinas e Subestações - UFU [7]

Os cabos de entrada das linhas subterrâneas são de 185mm², sendo 3 fases e 1 reserva, de cobre com isolação de 8,7/15kV e 1 terra de 95mm² de cobre com isolação de 750V. Os cabos que fazem a conexão dos transformadores com o cubículo das seccionadoras são de 35mm² sendo 3 fases e 1 terra. Será utilizado o modelo unipolar de s = 13cm para os cálculos.

3.3 Modelagem dos Para-raios

O para-raios usado nas simulações possui o modelo 3EL1-012-1 P. 3, mostrado na Tabela 3, do fabricante SIEMENS de classe 12kV – 10kA [12], será posicionado na entrada do cubículo de medição e na entrada do cubículo de seccionadoras, sendo 1 para cada fase, totalizando 6, as especificações estão mostradas na Tabela 3.

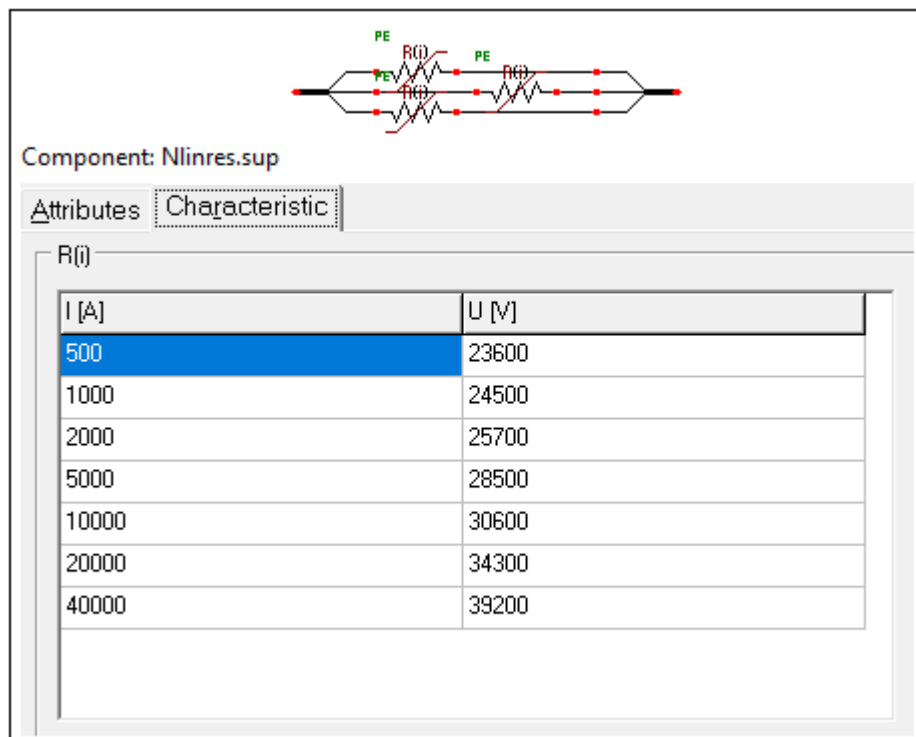
Tabela 3: Para-raios de média tensão

Highest voltage of the system	Rated voltage	Con- tinuous operating voltage	Line discharge class	Long duration current 2ms	Maximum values of the residual voltages at discharge currents of the following impulses								Arrester type	Minimum housing size
					30/60 μs 0.5 kA kV	30/60 μs 1 kA kV	30/60 μs 2 kA kV	8/20 μs 5 kA kV	8/20 μs 10 kA kV	8/20 μs 20 kA kV	8/20 μs 40 kA kV			
U _s kV	U _r kV	U _c kV	LD Class	A										
3.6	3	2.4	2	750	5.9	6.1	6.4	7.1	7.7	8.6	9.8	3EL1 003 -1 P . 2 . -	C	
	3	2.4	3	800	5.9	6.1	6.4	7.1	7.7	8.6	9.8	3EL1 003 -1 P . 3 . -	C	
	6	4.8	2	750	11.8	12.2	12.9	14.2	15.3	17.1	19.6	3EL1 006 -1 P . 2 . -	C	
	6	4.8	3	800	11.8	12.2	12.9	14.2	15.3	17.1	19.6	3EL1 006 -1 P . 3 . -	C	
7.2	6	4.8	2	750	11.8	12.2	12.9	14.2	15.3	17.1	19.6	3EL1 006 -1 P . 2 . -	C	
	6	4.8	3	800	11.8	12.2	12.9	14.2	15.3	17.1	19.6	3EL1 006 -1 P . 3 . -	C	
	9	7.2	2	750	17.7	18.4	19.3	21.3	23.0	25.7	29.4	3EL1 009 -1 P . 2 . -	C	
	9	7.2	3	800	17.7	18.4	19.3	21.3	23.0	25.7	29.4	3EL1 009 -1 P . 3 . -	C	
12	9	7.2	2	750	17.7	18.4	19.3	21.3	23.0	25.7	29.4	3EL1 009 -1 P . 2 . -	C	
	9	7.2	3	800	17.7	18.4	19.3	21.3	23.0	25.7	29.4	3EL1 009 -1 P . 3 . -	C	
	12	9.6	2	750	23.6	24.5	25.7	28.5	30.6	34.3	39.2	3EL1 012 -1 P . 2 . -	C	
	12	9.6	3	800	23.6	24.5	25.7	28.5	30.6	34.3	39.2	3EL1 012 -1 P . 3 . -	C	
17.5	15	12.0	2	750	29.5	30.6	32.1	35.6	38.3	42.8	49.0	3EL1 015 -1 P . 2 . -	C	
	15	12.0	3	800	29.5	30.6	32.1	35.6	38.3	42.8	49.0	3EL1 015 -1 P . 3 . -	C	
	18	14.4	2	750	35.3	36.7	38.6	42.7	45.9	51.4	58.8	3EL1 018 -1 P . 2 . -	C	
	18	14.4	3	800	35.3	36.7	38.6	42.7	45.9	51.4	58.8	3EL1 018 -1 P . 3 . -	C	
	24	19.2	2	750	47.1	49.0	51.4	56.9	61.2	68.5	78.3	3EL1 024 -1 P . 2 . -	C	
	24	19.2	3	800	47.1	49.0	51.4	56.9	61.2	68.5	78.3	3EL1 024 -1 P . 3 . -	E	
24	21	16.8	2	750	41.2	42.8	45.0	49.8	53.6	60.0	68.5	3EL1 021 -1 P . 2 . -	C	
	21	16.8	3	800	41.2	42.8	45.0	49.8	53.6	60.0	68.5	3EL1 021 -1 P . 3 . -	C	
	24	19.2	2	750	47.1	49.0	51.4	56.9	61.2	68.5	78.3	3EL1 024 -1 P . 2 . -	C	
	24	19.2	3	800	47.1	49.0	51.4	56.9	61.2	68.5	78.3	3EL1 024 -1 P . 3 . -	E	
	30	24.0	2	750	58.9	61.2	64.3	71.1	76.5	85.7	97.9	3EL1 030 -1 P . 2 . -	E	
	30	24.0	3	800	58.9	61.2	64.3	71.1	76.5	85.7	97.9	3EL1 030 -1 P . 3 . -	E	
36	30	24.0	2	750	58.9	61.2	64.3	71.1	76.5	85.7	97.9	3EL1 030 -1 P . 2 . -	E	
	30	24.0	3	800	58.9	61.2	64.3	71.1	76.5	85.7	97.9	3EL1 030 -1 P . 3 . -	E	
	45	36	2	750	88.4	91.8	96.4	107	115	129	147	3EL1 045 -1 P . 2 . -	E	
	45	36	3	800	88.4	91.8	96.4	107	115	129	147	3EL1 045 -1 P . 3 . -	H	
52	42	34	2	750	82.5	85.7	90.0	99.6	107	120	137	3EL1 042 -1 P . 2 . -	E	
	42	34	3	800	82.5	85.7	90.0	99.6	107	120	137	3EL1 042 -1 P . 3 . -	E	
	45	36	2	750	88.4	91.8	96.4	107	115	129	147	3EL1 045 -1 P . 2 . -	E	
	45	36	3	800	88.4	91.8	96.4	107	115	129	147	3EL1 045 -1 P . 3 . -	H	
72.5	54	43	2	750	106	110	116	128	138	154	176	3EL1 054 -1 P . 2 . -	H	
	54	43	3	800	106	110	116	128	138	154	176	3EL1 054 -1 P . 3 . -	H	
	60	48	2	750	118	122	129	142	153	171	196	3EL1 060 -1 P . 2 . -	H	
	60	48	3	800	118	122	129	142	153	171	196	3EL1 060 -1 P . 3 . -	K	
	66	53	2	750	130	135	141	157	168	188	215	3EL1 066 -1 P . 2 . -	H	
	66	53	3	800	130	135	141	157	168	188	215	3EL1 066 -1 P . 3 . -	K	
	72	58	2	750	141	147	154	171	184	206	235	3EL1 072 -1 P . 2 . -	H	
	72	58	3	800	141	147	154	171	184	206	235	3EL1 072 -1 P . 3 . -	K	

Fonte: SIEMENS ENERGY, High voltage surge arresters- Product guide, pg.35[12]

Para a modelagem foi utilizado três resistores não lineares (*Branch Nonlinear*) do tipo R(i) Type 99 disponíveis no ATP/ATP Draw, colocados um em cada linha para a proteção da mesma, com as seguintes características, como mostrado na Figura 10.

Figura 10: Modelagem Para-raios



Fonte: Software ATP Draw

3.4 Modelagem Descarga Atmosférica

Para modelar a descarga atmosférica de 10kA (1,2/50 μ s) no ATP/ATPDraw, foi utilizado a fonte *Surge Type 15* disponível no *software*, utilizado como uma fonte de corrente, cujos dados mostrados na figura 11 foram obtidos nas notas de aula da disciplina de Usinas e Subestações [7]. Para determinação dos parâmetros da descarga atmosférica foi utilizado um *script* desenvolvido na linguagem de programação Python [7] para encontrar os valores de Amp, “A” que representa o número negativo especificando a inclinação da descida e “B” o número negativo especificando a inclinação da subida.

Figura 11: Modelagem fonte Surge Type 15

Component: Surge.sup

Attributes

DATA	VALUE
Amp	10200
A	-14259
B	-4876333
Tsta	0
Tsto	1

NODE	PHASE	NAME
SU	1	


Order: 0 Label: I

Comment:

Type of source

Current Hide

Voltage Lock



Fonte: software ATP Draw

4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Para ser possível compreender os impactos de uma descarga atmosférica em uma linha de transmissão e seus impactos na subestação serão analisadas quatro situações diferentes, todas irão consistir em uma descarga de 10kA (1,2/50 μ s) a 5km da subestação:

- Caso 1: A primeira consiste nos impactos sem a utilização do para raio;
- Caso 2: Para a segunda simulação será avaliado a proteção da subestação com dois conjuntos de para raios posicionados na entrada da subestação e na entrada dos cubículos dos transformadores como mostrado na Figura 5;
- Caso 3: Para a terceira situação será analisado a o impacto de uma alta resistência de isolamento;
- Caso 4: Na última análise será estudado a possibilidade de usar apenas 1 conjunto de para raios para a proteção da subestação.

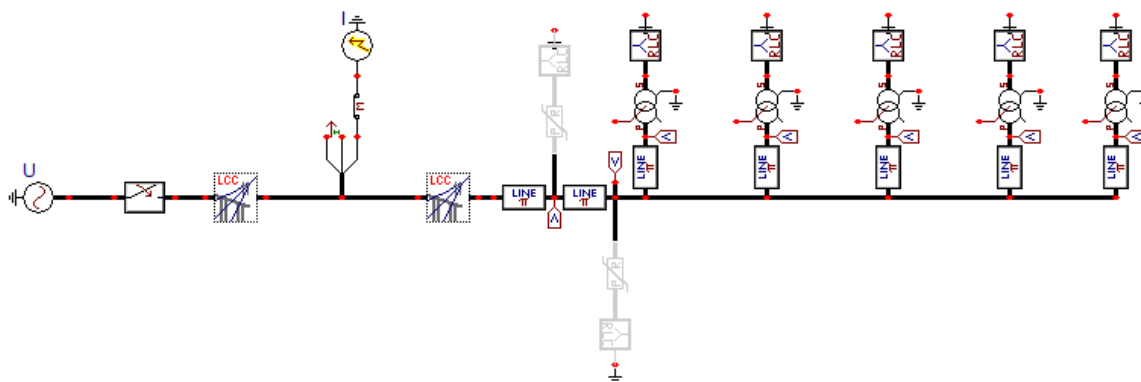
4.1 Simulações com os parâmetros calculados

a) Caso 1:

Para o caso 1 foi primeiramente analisado o efeito da descarga atmosféricas sem a utilização dos para-raios, Figura 12, e seu impacto na isolação dos cabos e transformadores. Foi observado que o nível de isolação, não suportaria a descarga que gerou uma sobretensão que alcançou valores de aproximadamente 3,0MV, como mostrado na Figura 13. Essa sobretensão observada superou o nível de isolação que é de 95kV, causando danos irreparáveis aos equipamentos e comprometendo todo o funcionamento da usina fotovoltaica.

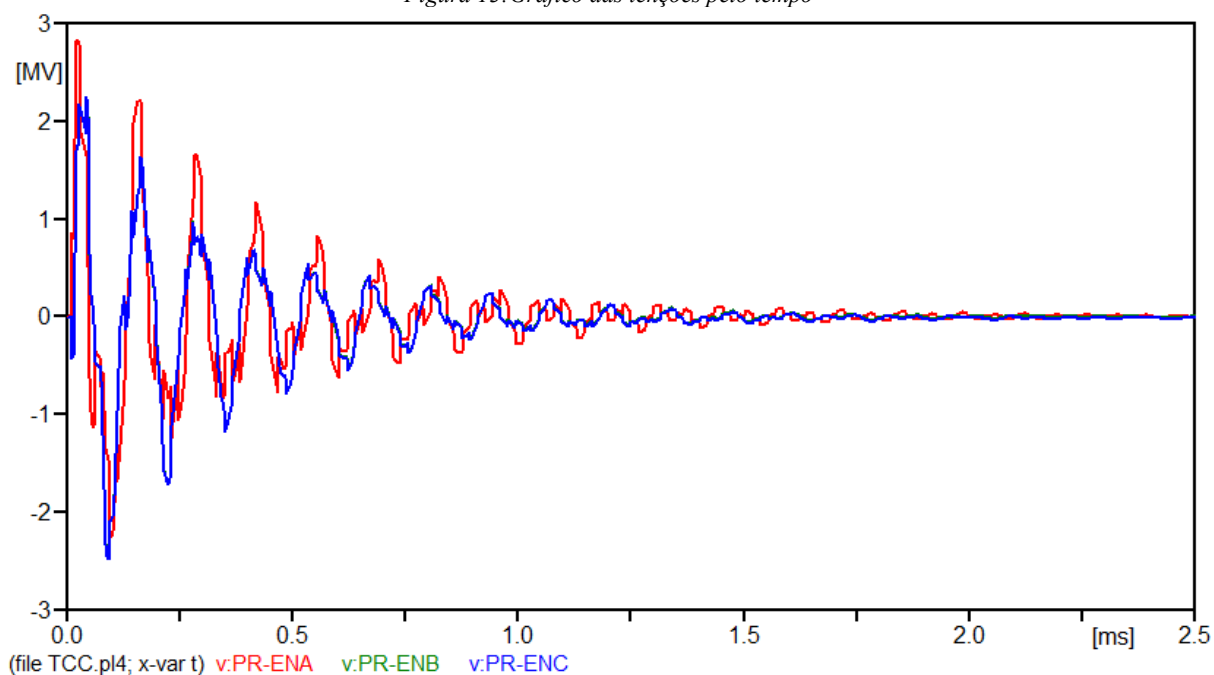
Pode-se perceber que mesmo as sobretensões causadas pelo surto tendo uma duração aproximada de 3ms, ainda sim é muito prejudicial os equipamentos, os quais tendem a romper a camada de isolação dos cabos e transformadores. A perda de isolação irá causar um curto-circuito entre as fases ou entre fase e a terra, gerando riscos enormes para os operadores da usina e prejuízos financeiros advindos da troca dos equipamentos, reparos e das horas perdidas de geração devido a manutenções. Com isso, é possível observar a necessidade do equipamento de proteção a fim de mitigar essas consequências.

Figura 12: Modelagem da subestação sem para raios



Fonte: software ATP Draw.

Figura 13: Grafico das tenções pelo tempo

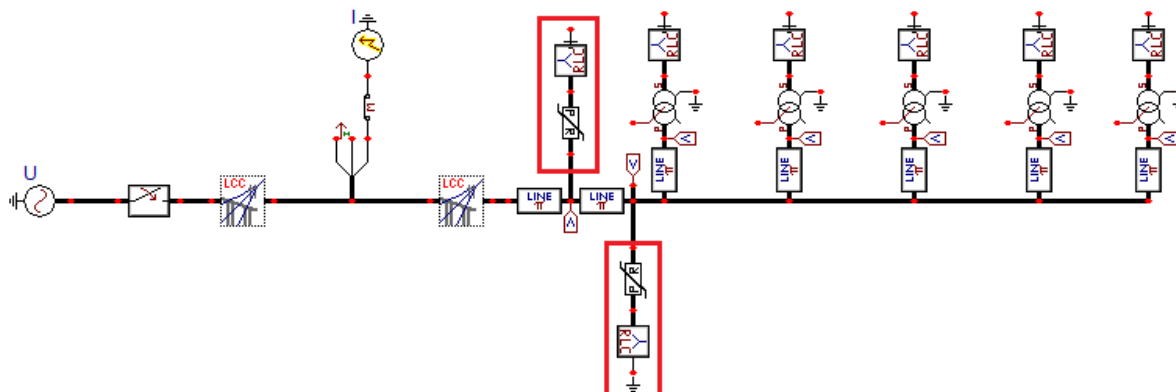


Fonte: software ATP Draw.

b) Caso 2:

Para a segunda situação, foi posicionado dois conjuntos de para raios, sendo o primeiro na entrada da subestação e o outro conjunto foi posicionado na entrada dos transformadores como mostra a Figura 14. A resistência de aterramento considerada foi de 2 Ω.

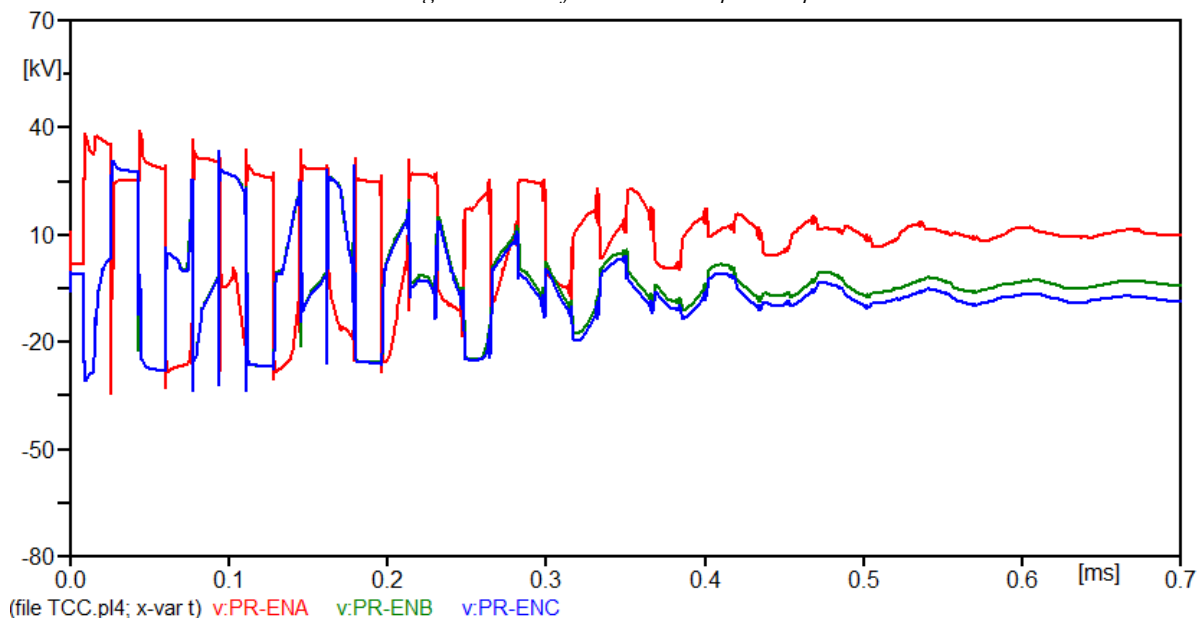
Figura 142: Modelagem da subestação com 2 conjuntos de para raios destacando os para raios



Fonte: software ATP Draw

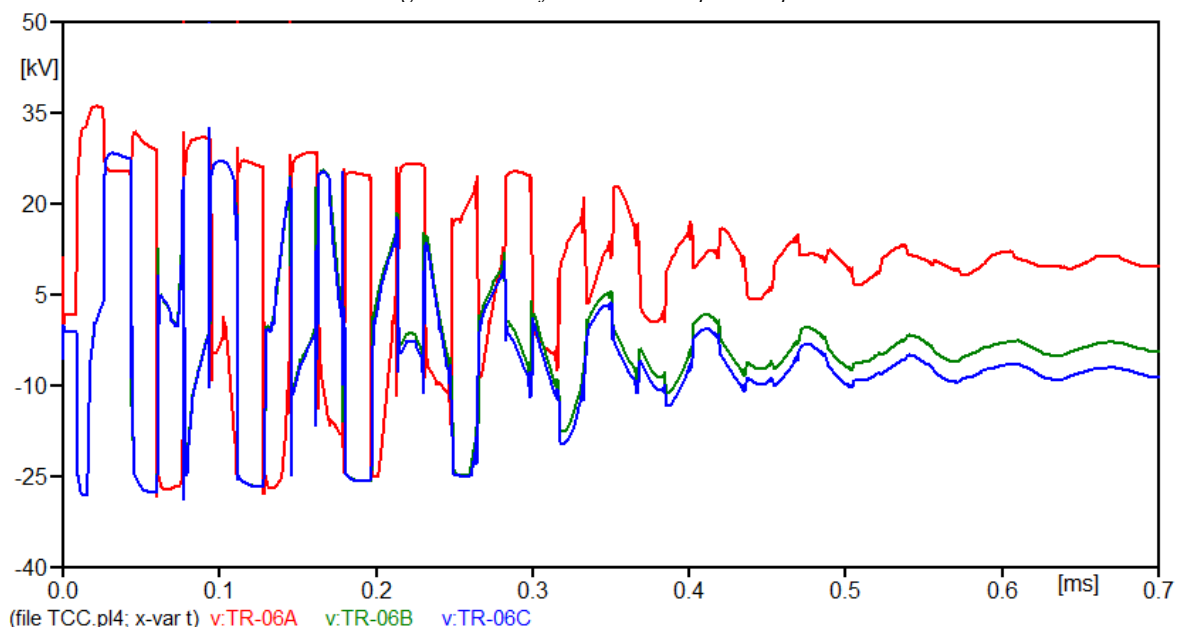
É possível observar o grande impacto positivo dos para-raios na mitigação do surto atmosférico na Figura 15, em que se pode perceber que os níveis de tensão máximos na entrada da subestação ficaram próximos de 40kV e o tempo de normalização da onda foi de 0,6ms, dentro da faixa suportada pelo isolamento, 95kV. Constata-se que, em razão da distância entre os transformadores e a entrada da subestação ser pequena, o nível de tensão se manteve muito próximo, como evidenciado na Figura 16, referente ao transformador mais distante.

Figura 153: Gráfico das tensões pelo tempo



Fonte: software ATP Draw

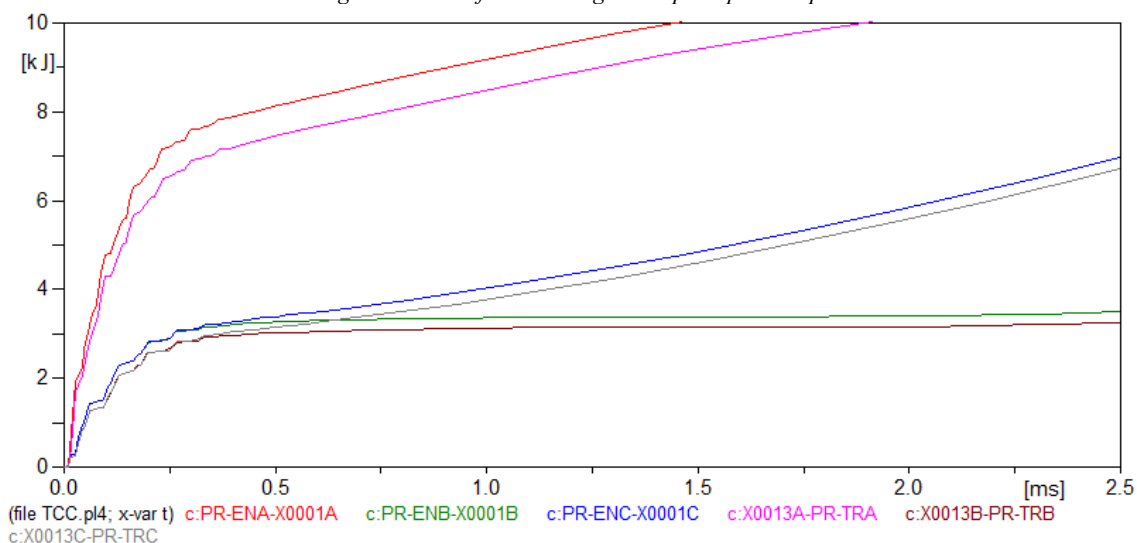
Figura 164: Gráfico das tensões pelo tempo



Fonte: software ATP Draw

Outro dado interessante de ser observado é a dissipação de energia no para-raios, que pode ser verificado na Figura 17, em que é possível ver uma elevação significativa no início, com um pico próximo de 8,0kJ. Tal valor está em conformidade com os limites suportados pelo para raio de 72kJ, é possível notar também que o para raio na entrada dos transformadores, representados na Figura 17 pelas curvas PR-TR, dissiparam ligeiramente menos energia que o primeiro, representados pelas curvas PR-EN, isto é, devido à proximidade do primeiro conjunto de proteção a descargas atmosféricas.

Figura 175: Gráfico da energia dissipada pelo tempo

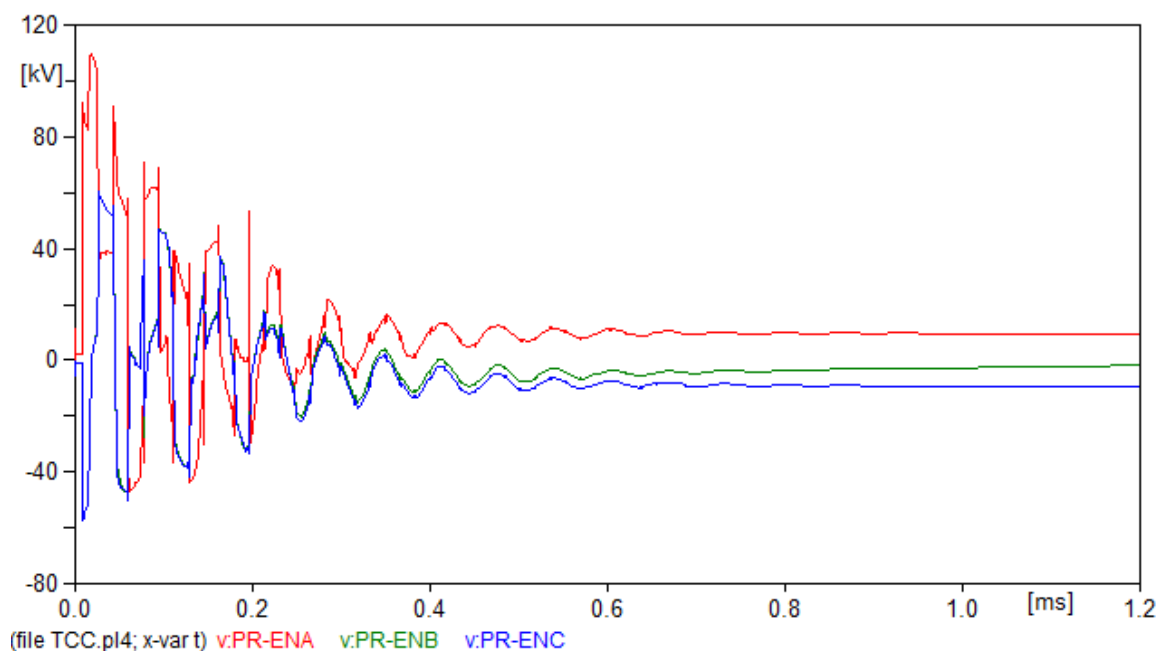


Fonte: software ATP Draw

c) Caso 3:

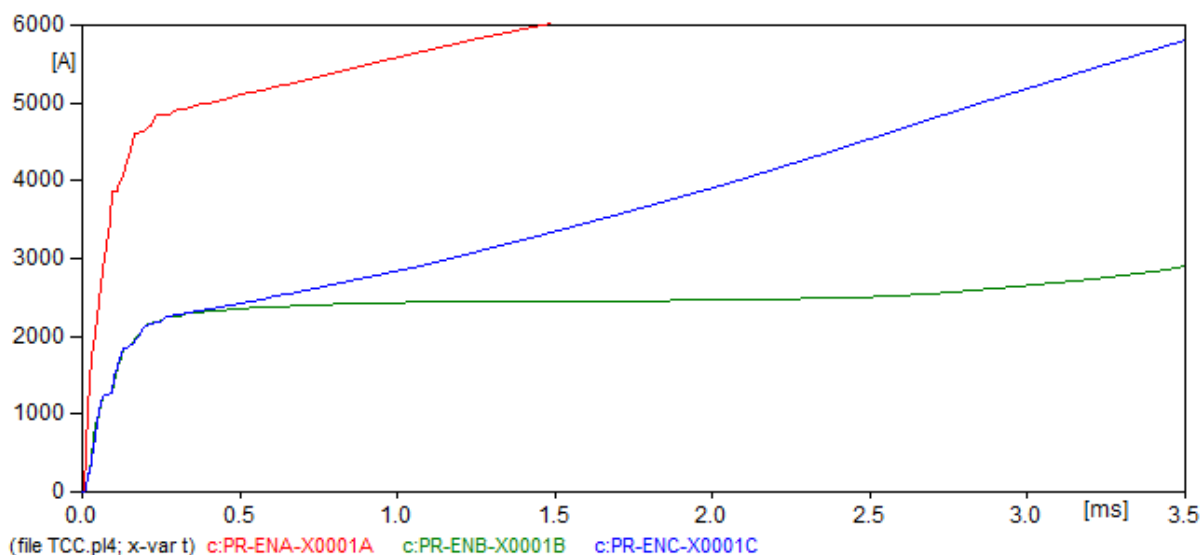
Para a terceira situação, foi verificado um caso para a resistência de aterramento mais alta, com o valor de 20Ω , para verificar seu impacto na dissipação de energia e na sobretensão. Com isso foi possível observar que com uma resistência de aterramento mais alta os níveis de tensão foram significativamente mais altos, alcançando uma sobretensão máxima de 110kV, extrapolando o nível de isolamento de 95kV, como pode ser observado na Figura 18. Já na Figura 19, observa-se que a potência dissipada nos para-raios foi um pouco menor que àquela do caso anterior, alcançando 5kJ.

Figura 186: Gráfico das tensões pelo tempo



Fonte: Software ATP Draw

Figura 197: Gráfico da energia dissipada pelo tempo



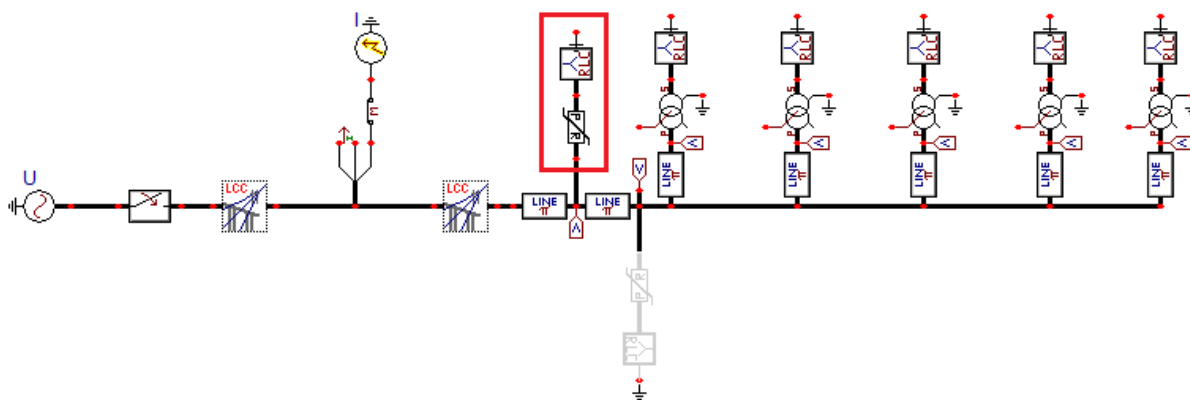
Fonte: Software ATP Draw

A partir dessa análise é possível concluir que os níveis de tensão extrapolaram a faixa de suportabilidade de isolamento dos equipamentos, possivelmente danificando-os e causando transtornos e prejuízo para gestão da usina fotovoltaica. Com isso, observa-se a necessidade de combinar os equipamentos de proteção com um bom estudo de aterramento para que a proteção seja feita de forma efetiva e coerente.

d) Caso 4:

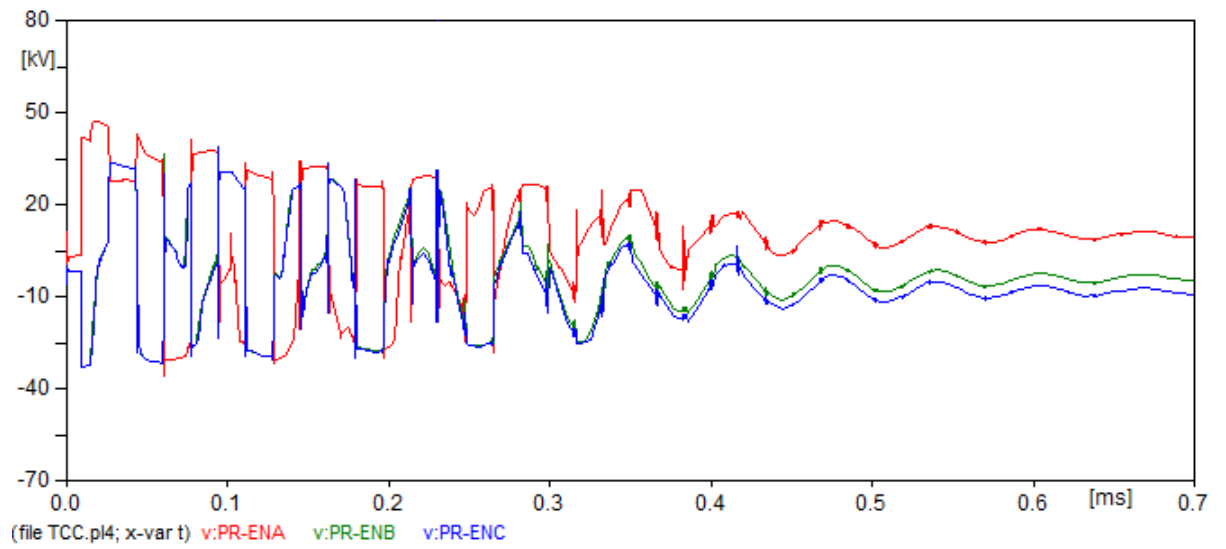
Finalmente, foi verificado se apenas um conjunto de para raios seria suficiente para a mitigação do surto atmosférico, sem causar danos aos equipamentos, exemplificado na Figura 20. Os resultados desse caso são apresentados na Figura 21, em que pode ser observado que a tensão não extrapolou os níveis de isolamento dos equipamentos, mantendo, assim, a subestação segura. Destaca-se que os níveis de dissipação de energia no para raio aumentaram para próximos de 15kJ, como mostra a Figura 22, ainda dentro da faixa aceitável para dos para raios.

Figura 208: Gráfico da tensão pelo tempo



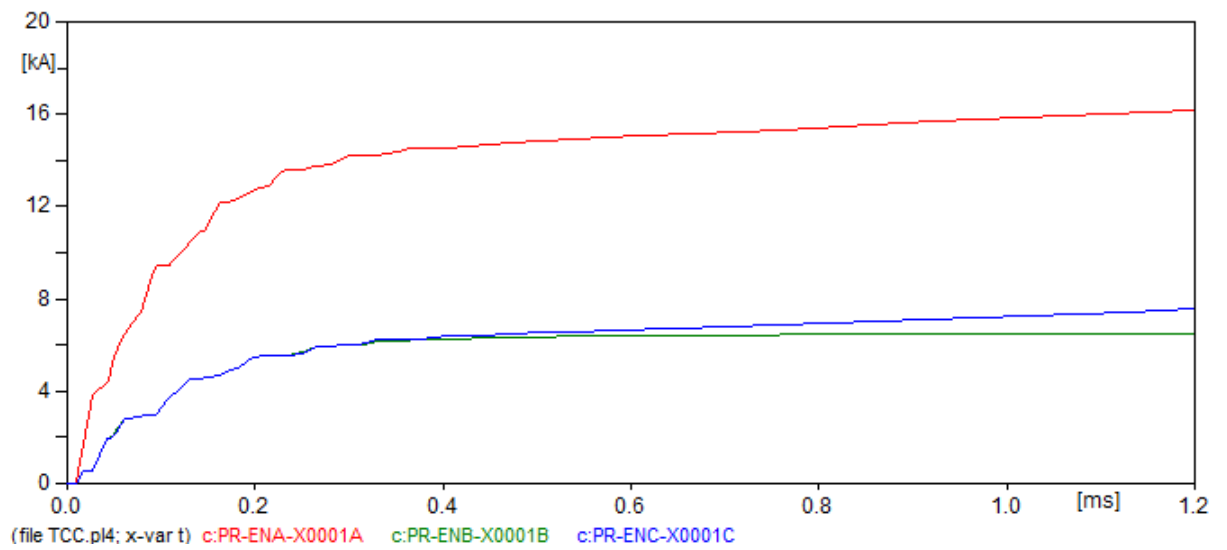
Fonte :Software ATP Draw

Figura 219: Gráfico da tensão pelo tempo



Fonte :Software ATP Draw

Figura 2210: Gráfico da energia dissipada pelo tempo



Fonte :Software ATP Draw

5 CONCLUSÃO

As descargas atmosféricas representam um risco significativo para as operações de subestações elétricas e, por extensão, para as redes de energia em que elas se integram. A análise dos quatro casos aponta para a necessidade crítica de proteção apropriada contra esses eventos. No Caso 1, a ausência de dispositivos de proteção resultou em tensões que excederam amplamente a capacidade de isolamento dos equipamentos, levando a falhas catastróficas. Esse resultado evidencia não apenas o perigo iminente à infraestrutura física, mas também às operações contínuas da planta e à segurança dos operadores. Os efeitos de um surto transitório, mesmo que de curta duração, podem ser devastadores, enfatizando a importância de medidas preventivas.

No Caso 2, a implementação de dois conjuntos de para-raios revelou-se uma estratégia eficaz, atenuando significativamente os níveis de tensão para dentro dos limites seguros e reduzindo o tempo necessário para a normalização das condições de operação. A análise detalhada da dissipação de energia nos para-raios indica uma gestão adequada do surto, sublinhando a eficiência dessa configuração de proteção. A proximidade física entre os elementos da subestação e a distribuição estratégica dos para-raios são fatores determinantes para a eficácia da proteção, algo que é essencial para a integridade a longo prazo dos equipamentos e a continuidade das operações.

Contudo, o Caso 3 destaca a complexidade da proteção contra descargas atmosféricas. A resistência de aterramento elevada, mesmo com a presença de para-raios, resultou em tensões que ultrapassaram os limites de isolamento, expondo a fragilidade dos sistemas de proteção que não estão otimizados. A complementaridade entre os dispositivos de proteção e um sistema de aterramento bem projetado é indispensável para garantir a eficiência do sistema como um todo. O Caso 4 introduz uma variação com apenas um conjunto de para-raios, que, embora tenha mantido as tensões dentro de limites seguros, resultou em maior dissipação de energia, aproximando-se do limite de capacidade dos dispositivos. Isso sugere que, enquanto um único conjunto de para-raios pode ser tecnicamente suficiente, ele opera perto de sua capacidade máxima, o que pode não ser desejável do ponto de vista de robustez e confiabilidade a longo prazo.

Em conclusão, a proteção contra descargas atmosféricas em subestações elétricas é uma questão complexa que exige uma abordagem abrangente. A utilização de para-raios é fundamental, mas deve ser complementada por um sistema de aterramento eficiente. A redundância e a distribuição estratégica de dispositivos de proteção podem oferecer melhores resultados, assegurando tanto a integridade dos equipamentos quanto a segurança operacional.

O compromisso entre o número de dispositivos de proteção e a capacidade de dissipação de energia deve ser cuidadosamente avaliado para evitar a superação dos limites de segurança e garantir a resiliência da infraestrutura contra eventos atmosféricos extremos.

Durante a realização do trabalho não foram consideradas sobretensões de manobra resultantes de operação de dispositivos de manobra, como disjuntores, ou por eventos não planejados como o acoplamento e desacoplamento de cargas elétricas. Sugere-se então a realização do estudo sobre os impactos na rede elétrica da usina fotovoltaica que podem incluir a possibilidade de falhas em isoladores e outros componentes devido ao estresse elétrico excessivo. Dessa maneira é possível garantir a confiabilidade e a segurança da rede elétrica, minimizando os riscos de danos aos equipamentos e de interrupções no fornecimento de energia.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A estimativa da Agência é de que as usinas solares centralizadas e eólicas (fontes renováveis de energia) responderão por mais de 90% da ampliação na capacidade de geração do Brasil. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/aneel-sinaliza-novo-recorde-para-expansao-da-geracao-em-2023>. Acesso em: 09 nov. 2023.
- [2] INPE. Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT). Sistema Elétrico. [S.l.]: INPE., Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/>. Acesso em: 09 nov. 2023..
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6939: Coordenação do isolamento — Procedimento. Rio de Janeiro, 2018.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8186: Coordenação do isolamento — Diretrizes de aplicação. Rio de Janeiro, 2004
- [5] INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Descargas Atmosféricas no Brasil. [S.l.]: INPE, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2023/04/pesquisa-do-inpe-estuda-formacao-das-descargas-atmosfericas-e-funcionamento-de-para-raios-em-grandes-cidades-do-pais>. Acesso em: 09 nov. 2023.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5419: Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas. Rio de Janeiro, 2018
- [7] OLIVEIRA, T. L. Apostila de Usinas e Subestações. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 2023
- [8] SILVA, J. R.; COSTA, E. C. Impactos das descargas atmosféricas em redes elétricas. Revista Brasileira de Energia, v. 15, n. 2, 2019.
- [9] TS2 SPACE. Materiais auto-recuperáveis e o futuro da sustentabilidade e economia circular. Disponível em: <https://ts2.space>. Acesso em: 09 nov. 2023.
- [10]CAVALCANTE JUNIOR, J. M. Uma Análise Estatística da Coordenação de Isolamento em Seccionadores de Alta e Extra-Alta Tensão. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), 2015.
- [11]MARI, L. Understanding the Interaction between Lightning and Power Transmission Lines. EEPower, 2020. Disponível em <https://eepower.com/technical-articles/understanding-the-interaction-between-lightning-and-power-transmission-lines/#>. Acesso em 09 nov. 2023.
- [12]SIEMENS ENERGY. High voltage surge arresters. [S.l.]: Siemens Energy, 2021. Disponível em: <https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:679b13ef-6034-4fb5-a051-07f93327e70f/high-voltage-surge-arresters-brochure.pdf>. Acesso em: 09 nov. 2023.