

ADRIANO GARUFE NOGUEIRA

**Estudos dos mecanismos de falhas por descargas disruptivas em uma linha de
transmissão: Efeito combinado de poluição e umidade**

Adriano Garufe Nogueira

Estudos dos mecanismos de falhas por descargas disruptivas em uma linha de transmissão: Efeito combinado de poluição e umidade

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

Orientador: Prof. Dr. Rubens Alves Dias
Coorientador: Prof. Me. Nelson Clodoaldo de Jesus

Guaratinguetá
2023

N778e	Nogueira, Adriano Garufe Estudos dos mecanismos de falhas por descargas disruptivas em uma linha de transmissão: efeito combinado de poluição e umidade / Adriano Garufe Nogueira–Guaratinguetá, 2023. 79 f : il. Bibliografia: f. 68-70 Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023. Orientador: Prof. Dr. Rubens Alves Dias Coorientador: Prof. Me. Nelson Clodoaldo de Jesus 1. Energia elétrica - Transmissão. 2. Isoladores e isolamentos elétricos. 3. Alta voltagem. 4. Linhas elétricas. I. Título. CDU 621.315
-------	---

ADRIANO GARUFE NOGUEIRA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA”

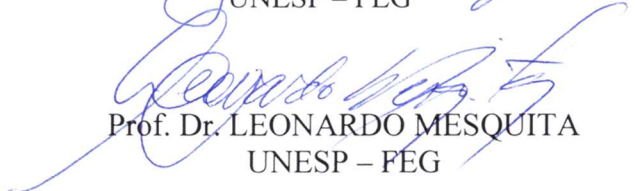
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. Daniel Julien Barros da Silva Sampaio
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


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


Prof. Dr. LUIZ OCTÁVIO MATTOS DOS REIS
UNESP – FEG


Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
UNESP – FEG

Janeiro de 2023

DEDICATÓRIA

de modo especial, a meu pai José Ademar, que faleceu durante o 6º período de minha graduação e em conjunto com minha mãe, Maria Célia, formaram uma família forte e unida que sempre me apoiou durante os estudos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte de esperança e consolo nos momentos mais difíceis. Agradeço a minha família e meus amigos,

em especial, ao meus pais *Maria Célia* e *José Ademar* que nunca mediram esforços para que eu sempre tivesse o necessário para continuar focado aos estudos.

a GSI - Engenharia e Consultoria Ltda., em particular a pessoa do engenheiro Prof. Me. Nelson Clodoaldo de Jesus, por todo conhecimento e auxílio passado, disponibilização dos dados e colaboração durante todo o trabalho como co-orientador e amigo.

ao meus amigos *Ahmad Muhammad* e *Felipe Zweetsloot* que sempre forneceram apoio e incentivo durante os anos de graduação.

a Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá que me forneceu moradia e bolsa por meio dos programas de permanência estudantil, sendo um dos principais fatores que me proporcionaram chegar ao final da graduação.

ao meu orientador e engenheiro Prof. Dr. Rubens Alves Dias por todos os ensinamentos e pela dedicação de seu trabalho, mostrando uma forma clara e simples que foi utilizada na condução do trabalho e também pelas aulas ao longo de minha formação.

“A mente que se abre para uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”

Albert Einstein

RESUMO

Este documento apresenta uma avaliação das ocorrências dos desligamentos intempestivos no sistema elétrico de alta tensão em 500 [kV], responsável pela conexão dos sistemas internos de uma indústria ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Nesta avaliação foram considerados os registros das oscilografias disponibilizadas nos últimos eventos de desligamentos relacionados a linha de transmissão, informações do sistema e unidade industrial, histórico das ocorrências, dados climáticos e simulações de transitórios eletromagnéticos, visando a definição da causa raiz do problema das ocorrências de faltas intempestivas nas LTs, bem como recomendações para a melhoria do desempenho elétrico do sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Isoladores. Grau de poluição. Linha de Transmissão. Alta tensão. Flashover. Interrupção Forçada. Umidade. Oscilografia.

ABSTRACT

This work evaluates the occurrences of sudden outages in a 500 [kV] line responsible for connecting the internal electrical system of an industry to the National Interconnected System (NIS). This evaluation goes over the last two log files of the power-down events which happened to the transmission line, electrical system information, history of fault occurrences, weather data, and simulations of electromagnetic transients, defining the essential cause of the sudden outages in the TLs.

KEY-WORDS: Insulators. Pollution levels. Transmission Lines. High Tension. Flashover. Forced Shutdown. Humidity. Oscillograph.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oferta interna de energia elétrica por tipo de fonte	18
Figura 2 - Topologia de rede para transmissão de energia elétrica	19
Figura 3 - Estratificação dos desligamentos forçados analisados (edição de 2016).....	26
Figura 4 - Estratificação dos desligamentos forçados analisados (edição de 2018).....	26
Figura 5 - Desligamentos, em número de ocorrências - julho/2017 a dezembro/2017	28
Figura 6 - Estratificação do tipo de plano de melhoria pela quantidade de planos por tema ...	28
Figura 7 - Tipos de materiais isolantes: (A) - Vidro; (B) - Porcelana; (C) - Polimérico.....	30
Figura 8 - Características físicas e construtivas de isolador do tipo disco	30
Figura 9 - Características físicas e construtivas de um isolador polimérico	31
Figura 10 - Perfis típicos de isoladores (a) normal, (b) antipoluição e (c) plano.	32
Figura 11 - Ilustração da distância de arco a seco de um conjunto de isoladores	33
Figura 12 - Ilustração da distância de escoamento de alguns isoladores.....	33
Figura 13 - DEEU básica de um isolador em função da SPL	34
Figura 14 - Representação esquemática da ocorrência de <i>flashover</i> pela ação de poluição	39
Figura 15 - Ilustração dos arcos elétricos sobre (a) - bandas secas, (b) - isolador	39
Figura 16 - Exemplo de contaminação de isoladores por excremento de pássaros.....	40
Figura 17 - Comparação da distribuição de tensão nas cadeias de isoladores	41
Figura 18 – Disposição das fases do circuito duplo da LT, com vista frontal da torre	46
Figura 19 - Total de desligamentos por ano para as linhas #1 e #2 da LT de 500 [kV].....	48
Figura 20 - Desligamentos para os períodos seco e úmido do ano na LT	48
Figura 21 - Total de desligamentos na LT para cada mês.....	49
Figura 22 - Chuva mensal média no local	49
Figura 23 - Níveis de conforto em umidade no local	49
Figura 24 - Velocidade média do vento no local.....	50
Figura 25 - Desligamentos nas linhas #1 e #2 para (A) - Cada fase; (B) - Posição das fases ..	50
Figura 26 - SPL adotada durante a fase de projeto da linha de transmissão	52
Figura 27 - Comparação entre isoladores: (a) - Novo; (b) - Usado	53
Figura 28 - Registros de descargas disruptivas na cadeia de isoladores	54
Figura 29 - Registros de descargas disruptivas na cadeia de isoladores	54
Figura 30 - Demonstração da falta de dois discos de vidro em uma cadeia de isoladores.....	55
Figura 31 - Destaques da inspeção visual realizada nas cadeias de isoladores da LT	55
Figura 32 - Destaques da inspeção visual realizada nas cadeias de isoladores da LT	56
Figura 33 - Diagrama unifilar simplificado utilizado na modelagem	57

Figura 34 - Formas de onda das tensões Ua, Ub e Uc no lado de 138 [kV] do TR 2	59
Figura 35 - Formas de onda das correntes Ia, Ib e Ic no lado em 500 [kV] do TR 2	60
Figura 36 - Formas de onda da corrente de neutro no lado em 500 [kV] do TR 2	60
Figura 37 - Formas de onda das tensões Ua, Ub e Uc no lado de 138 [kV] do TR 2	61
Figura 38 - Formas de onda das correntes Ia, Ib e Ic no lado de 500 [kV] do TR 2	61
Figura 39 - Forma de onda da corrente de neutro no lado de 500 [kV] do TR 2	61
Figura 40 - Tensões Ua, Ub e Uc do TR 2 do lado em 138 [kV] - Simulação	63
Figura 41 - Detalhe das formas de onda da fase em falta (Ua) do TR 2, no lado de 138 [kV] - Simulação <i>versus</i> Oscilografia	64
Figura 42 - Formas de ondas das correntes Ia, Ib e Ic do TR 2 no lado de 500 [kV] - Simulação	65
Figura 43 - Detalhe das formas de onda das correntes da fase em falta (Ia) no TR 2 no lado de 500 [kV] - Simulação <i>versus</i> Oscilografia	65
Figura 44 - Detalhe das formas de onda das correntes de neutro no TR 2 no lado de 500 [kV] - Simulação <i>versus</i> Oscilografia	66
Figura 45 - Tensões Ua, Ub e Uc do TR 1 do lado de 138 [kV] - Simulação	67
Figura 46 - Detalhe das formas de onda das tensões da fase em falta (Ub) no TR 1 do lado em 138 [kV] - Simulação <i>versus</i> Oscilografia	67
Figura 47 - Formas de ondas das correntes Ia, Ib e Ic do TR 1 em 500 [kV] - Simulação	68
Figura 48 - Detalhe das formas de onda das correntes da fase em falta (Ia) no TR 1 no lado de 500 [kV] - Simulação <i>versus</i> Oscilografia	69
Figura 49 - Detalhe das formas de onda das correntes de neutro do TR 1 no lado de 500 [kV] - Simulação <i>versus</i> Oscilografia	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Relação entre a severidade de poluição local e o respectivo ambiente típico.....	36
Quadro 2 - Níveis de poluição e respectivos ambientes típicos	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos níveis de tensão	20
Tabela 2 - Limites para tensões nominais iguais ou inferiores a 1 [kV]	22
Tabela 3 - Limites para tensão nominal superior a 1 [kV] e inferior a 69 [kV]	23
Tabela 4 - Limites para tensões nominais superiores a 69 [kV] e inferiores a 230 [kV]	23
Tabela 5 - Limites para tensões nominais iguais ou superiores a 230 [kV]	23
Tabela 6 - Classificação das variações de tensão de curta duração (VTCD)	25
Tabela 7 - Variação das causas de desligamentos forçados entre as edições de 2016 e 2018 ..	27
Tabela 8 - DE e DEEU em função do nível de poluição local	34
Tabela 9 - Limites de componentes do ATPDraw	43
Tabela 10 - Histórico de falhas na linha de transmissão de 500 [kV]	47
Tabela 11 - Média das amostras coletadas na LT	51
Tabela 12 - Característica dos isoladores adotados durante a concepção de projeto	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	Alternative Transient Program
DA	Descarga Atmosférica
DDNS	Densidade de Depósito Não Solúvel
DDP	Diferença de Potencial
DDSE	Densidade de Depósito de Sal Equivalente
DE	Distância de Escoamento
DEEU	Distância de Escoamento Específica Unificada
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FD	Fator de Desequilíbrio
IEC	International Electrotechnical Commission
LT	Linha de Transmissão
N/D	Não Disponível
ONS	Operador Nacional do Sistema
PRODIST	Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional
SPL	Severidade de Poluição Local
TR	Transformador
V_L	Tensão de Linha
V_N	Tensão Nominal
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS PROPOSTOS	15
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
2	REVISÃO DA LITERATURA E ASPECTOS CONCEITUAIS	17
2.1	SISTEMA ELÉTRICO - ESTRUTURA BÁSICA DE TRANSMISSÃO.....	18
2.1.1	Topologia de rede	18
2.1.2	Tensões de transmissão	20
2.2	QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	21
2.2.1	Qualidade da energia	21
2.2.1.1	Qualidade do produto	21
2.2.1.2	Tensões em regime permanente	22
2.2.1.3	Fator de potência	24
2.2.1.4	Harmônicos.....	24
2.2.1.5	Desequilíbrios de tensões	24
2.2.1.6	Flutuação das tensões	24
2.2.1.7	Variações de tensões de curta duração (VTCD).....	24
2.3	DESLIGAMENTOS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO NO BRASIL.....	25
2.4	ISOLADORES	29
2.4.1	Construção	30
2.4.2	Principais características	31
2.4.2.1	Perfis típicos	31
2.4.2.2	Distância de arco a seco.....	32
2.4.2.3	Distância de escoamento (DE)	33
2.4.2.4	Distância de escoamento específica unificada (DEEU)	33
2.5	ASPECTOS DE UMIDADE E CONTAMINAÇÕES.....	34
2.6	MECANISMO DE FALHAS EM ISOLADORES	37
2.6.1	Caracterização	37
2.6.1.1	Distribuição do Campo Elétrico	40
2.6.2	Técnicas para mitigação de <i>flashover</i>	41
2.7	SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA POR SOFTWARE	42
2.7.1	Introdução	42
2.7.2	Conceitos básicos	44
2.7.2.1	Simulações de regime permanente	44

2.7.2.2	Simulação de transitórios	44
2.7.2.3	Considerações sobre o ATPDraw	45
3	MÉTODO	46
3.1	HISTÓRICO DE FALHAS NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO	47
3.1.1	Análise dos particulados	51
3.2	PREMISSAS CONSIDERADAS NO PROJETO DAS LT	52
3.2.1	Equipamentos isolantes – cadeia de isoladores	52
3.2.1.1	Estado de conservação	53
3.3	MODELAGEM DO SISTEMA NO ATPDRAW	56
3.3.1	Concessionário de energia	57
3.3.2	Dados das linhas de transmissão	58
3.3.3	Dados dos transformadores	58
3.4	ESTRUTURAÇÃO DOS CASOS ANALISADOS	58
3.4.1	Definição dos desligamentos não programados	59
3.4.1.1	Caso 1	59
3.4.1.2	Caso 2	60
4	RESULTADOS	62
4.1	ANALISE GERAL DA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 500 [kV]	62
4.2	SIMULAÇÃO COM O ATPDRAW	63
4.2.1	Caso 1	63
4.2.2	Caso 2	66
4.3	DEFINIÇÃO DO MECANISMO DE FALHA	70
5	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS	72
	APÊNDICE A - ARTIGO PRÉ-APROVADO ERIAC	75

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica está presente em boa parte dos processos, se fazendo necessária desde as atividades mais simples, como tarefas domésticas, até ações mais complexas, as quais não podem ser executadas sem o advento da energia elétrica. De forma natural, a regularidade e qualidade do transporte e fornecimento da energia elétrica entra em pauta no cenário nacional, sendo o desligamento ou interrupção do fornecimento, mesmo que por períodos curtos de tempo, cada vez menos aceitável pelos órgãos fiscalizadores e consumidores em geral.

Os desligamentos no Sistema Interligado Nacional (SIN) podem ser divididos em dois grandes grupos: falhas permanentes e transitórias. As falhas transitórias são caracterizadas pelo rápido retorno a transmissão de energia, que depende somente do tempo de reenergização do sistema, não sendo necessário a substituição de qualquer parte-componente do sistema por causa da ocorrência. Muito embora as falhas transitórias (fugitivas) em sistemas de transmissão de energia elétrica não sejam tão significativas quanto ao impacto de falhas permanentes, estas falhas também levam, no longo prazo, a problemas de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) e também afetam os índices de operação e disponibilidade das linhas de transmissão. A QEE é afetada devido aos defeitos imporem solicitações elétricas, devido ao estabelecimento das falhas, além da capacidade nominal sobre os equipamentos presentes no sistema, o que resulta na interrupção da capacidade de escoamento de energia pelo sistema, que ao longo do tempo culminam na redução da vida útil dos equipamentos e desempenho do sistema devido ao aumento do índice de falhas da linha de transmissão.

Este trabalho propõe um estudo que avaliará o histórico de falhas de uma linha de transmissão compacta, presente em um ambiente, que ao longo do seu comprimento, sofre uma variação abrupta de níveis de poluição atmosféricas (referente ao local de passagem da LT e também a quantidade de particulados que será acumulada no sistema e principalmente nos isoladores) que são normalizados pela norma IEC/TS 60815, o fundamental para a concepção e manutenção dos níveis de isolamentos solicitados para o funcionamento correto do sistema.

1.1 OBJETIVOS PROPOSTOS

O principal objetivo deste trabalho é apresentar um estudo crítico das ocorrências disruptivas de uma linha de transmissão compacta ao longo da sua vida útil, caracterizando os principais mecanismos de falha que podem levar ao desligamento de equipamentos elétricos essenciais.

O parecer técnico sobre as ocorrências será pautado em estudos de transitórios eletromagnéticos com foco na análise de falhas não programadas com o auxílio de simulações da incidência *flashover* ao longo da Linha de Transmissão (LT), que serão realizados por meio do software ATPDraw, voltado para simulação de eventos e análise das grandezas elétricas durante transitórios eletromagnéticos.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo contém a parte introdutória sobre o tema e objetivos do trabalho.

No segundo capítulo consta a revisão da literatura sobre o tema proposto, incluindo os aspectos conceituais que ajudaram a entender os conceitos relacionados a operação de linhas de transmissão de energia elétrica, além da conceituação sobre parâmetros da LT e o ambiente em que a mesma se encontra e de que forma a interação entre parâmetros da LT e o ambiente contribuem para o aumento do número de falhas deste sistema.

A partir do capítulo três é apresentado o estudo de caso da linha de transmissão, contendo alguns dados do sistema elétrico em análise, informações sobre desligamentos intempestivos que a linha sofreu desde sua comissionamento e a ocorrência dos últimos dois eventos que aconteceram na LT, a fim de caracterizar as principais causas que levaram as falhas intempestivas da LT.

O capítulo quatro trata sobre a apresentação dos principais resultados obtidos e como tais resultados do efeito combinado de poluição em conjunto com a umidade presente no local de passagem da LT pode afetar negativamente o desempenho de uma linha de transmissão de energia elétrica, mesmo com a operação em regime permanente e tensão próximas das nominais.

Por fim, o capítulo cinco aborda a contribuição das simulações de transitórios eletromagnéticos que ajudaram durante a fase de definição do mecanismo que conduz a LT a falha intempestiva. Também é abordado neste capítulo alguns temas que podem ser explorados a partir deste trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA E ASPECTOS CONCEITUAIS

Segundo (FUCHS, 1977), o grau de desenvolvimento de um país pode ser relacionado ao consumo per-capita de energia elétrica e sobre a taxa de crescimento do consumo deste bem. Do ponto de vista macro, como a energia elétrica está diretamente ligada aos meios de produção, o poder aquisitivo da população também cresce com o aumento da disponibilidade de energia no sistema para consumo. Em outras palavras, aumentar a capacidade de produção de energia, escoamento e regularidade se tornou uma necessidade constante, onde um regime de déficit ou um sistema que apresente falhas representa um enorme freio ao desenvolvimento de um país ou região.

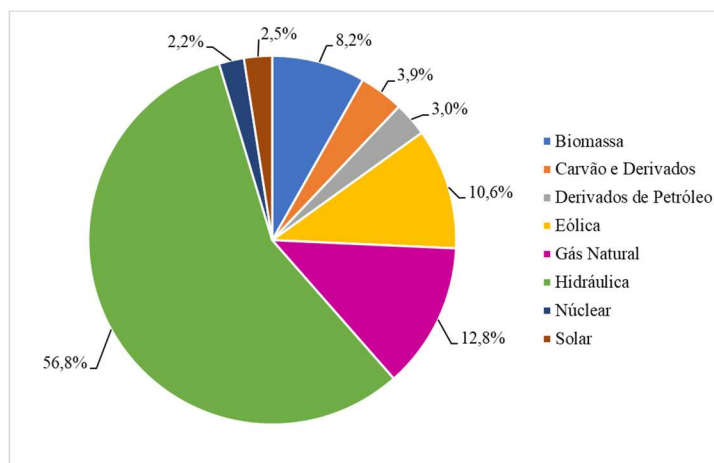
As fontes energética primárias são citadas por (OLIVEIRA, OBADOWSKI, *et al.*, 2021) e podem ser divididas conforme é mostrado abaixo.

- I. Energia Hidráulica;
 - a. Rios;
 - b. Mares;
- II. Energia Térmica;
 - a. Combustíveis sólidos;
 - b. Biomassa;
 - c. Carvão;
 - d. Derivados de petróleo;
- III. Energia Fotovoltaica;
 - a. Radiação solar;
- IV. Energia Eólica;
 - a. Deslocamento de Ar (Ventos);
- V. Energia Termonuclear;
 - a. Fissão do nuclear;
- VI. Energia Geotérmica.
 - a. Calor emanado do interior do planeta Terra;

No Brasil, segundo os dados apresentados no balanço energético nacional de 2021, disponibilizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o país apresentou aumento de 4% com relação ao ano anterior, totalizando 656,1 [TWh] de produção. Ademais, o consumo final de energia elétrica chegou a 570,8 [TWh], demonstrando uma expansão de 5,7% em comparação com o ano anterior (EPE, 2022).

A Figura 1 apresenta a estrutura de oferta interna de eletricidade no Brasil em 2020, na qual é possível verificar que o Brasil dispõe de uma matriz elétrica predominantemente renovável, chegando a aproximadamente 57% de produção proveniente de hidroelétricas, com destaque para a usina de ITAIPU que produziu 76 [TWh], que representa aproximadamente 12% do montante de produção de energia elétrica para o ano de 2021.

Figura 1 - Oferta interna de energia elétrica por tipo de fonte



Fonte: Adaptado de EPE (2022).

Quando as usinas geradoras se encontram em locais afastados dos centros de consumo, como no caso do Brasil, é necessário a elaboração de um sistema que permita o escoamento desta produção de energia para os consumidores com o menor custo possível.

Os consumidores finais que formam os grandes centros de consumo, dependem fortemente do escoamento da energia elétrica, que é realizado por meio de linhas de transmissão que buscam o menor índice de falhas sob operação.

2.1 SISTEMA ELÉTRICO - ESTRUTURA BÁSICA DE TRANSMISSÃO

2.1.1 Topologia de rede

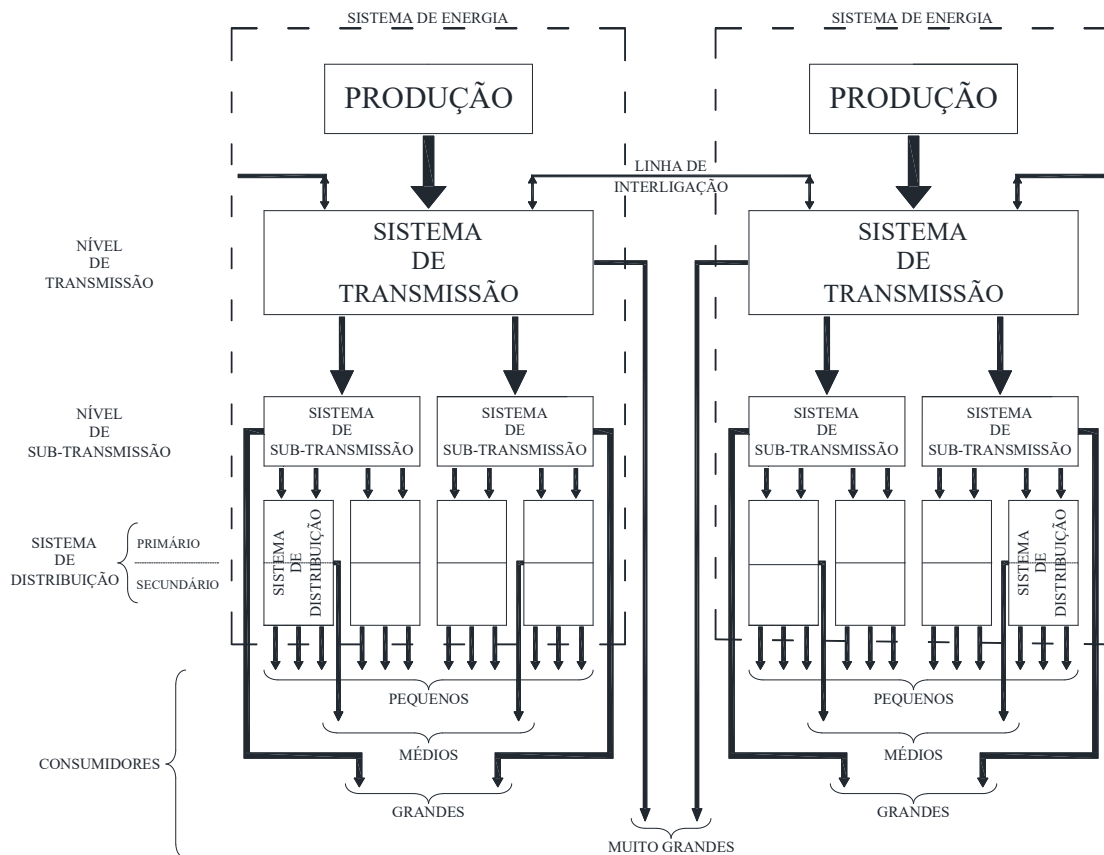
Os sistemas de transporte de energia elétrica até os consumidores finais possuem uma topologia que pode ser classificada de duas formas: horizontal e vertical.

No eixo horizontal do sistema, (FUCHS, 1977) cita 5 itens que estruturam a distribuição de energia, as quais são dispostos a seguir.

- a. Rede de distribuição;
- b. Rede de sub-transmissão;
- c. Rede de transmissão;
- d. Linhas de interligação, que conectam diversos sistemas;
- e. Sistema de geração ou produção de energia elétrica.

Já para o eixo vertical do sistema, existe a divisão em subsistemas, que do ponto de vista elétrico e principalmente geográfico, a não ser pelo nível mais elevado das tensões de operação dos sistemas de transmissão, estão isolados dos outros sistemas ao redor, conforme abordado na Figura 2.

Figura 2 - Topologia de rede para transmissão de energia elétrica



Fonte: Adaptado de Fuchs (1977).

Logo o transporte de energia é realizado em todos os níveis indicados na Figura 2, diferenciando-se somente pelas classes de tensões e máximas capacidades de transmissões de seus membros. Os elementos que são chamados de base, são os responsáveis pelo transporte efetivo da energia elétrica e são conhecidos como linhas de transmissão, podendo ser aéreas, subterrâneas ou submarinas. A seguir é feita uma breve apresentação de discriminação das diferentes nomenclaturas empregadas nos sistemas de transmissões de energia.

- a. Linhas de Transmissão (LT): operam com as tensões mais elevadas do sistema, tendo com função principal o transporte da energia elétrica dos centros de geração para os centros de consumo e como função secundária a interligação entre os sistemas de produção independente, formando um sistema único e robusto;

- b. Linhas de subtransmissão: operam com tensões inferiores, quando comparadas as tensões de transmissão, não sendo incomum operarem no mesmo nível de tensão. Sua principal função é realizar a distribuição da energia elétrica transportada pela LT, sendo originada em subestações regionais e tendo fim nas subestações abaixadoras locais;
- c. Linhas de distribuição primária: são linhas com tensões que oferecem um transporte confiável pelos postes nas vias públicas e também possuem regulação de tensão aceitável para uma potência considerada relativamente baixa;
- d. Linhas de distribuição secundária: são as linhas que efetivamente realizam a alimentação do consumidor final comum, não possuindo comprimento superior a 500 [m], sendo os valores eficazes das tensões não superiores a 0,44 [kV].

2.1.2 Tensões de transmissão

A especificação das tensões em um sistema trifásico é descrita como sendo a diferença de potencial (DDP) entre quaisquer duas fases do sistema, originando o termo de tensão de linha (V_L) o que também especifica como a tensão nominal (V_N) do sistema.

Conforme verificado em (LEÃO, 2009), no Brasil podem ser encontrados níveis de tensões de transmissão nas faixas de 138, 230, 345, 440, 500 e 765 [kV]. Para os sistemas considerados de subtransmissão, podem ser encontradas tensões nas faixas de 138, 88 69 e 34,5 [kV], que irão realizar a alimentação de subestações para dar início ao sistema de distribuição, encontrado em sua maioria em tensões de 13,8 [kV]. As tensões que chegam aos consumidores de energia elétrica possuem faixa de operação que depende da região no país e também da concessionária que administra a rede, mas a faixa de operação é na ordem de 0,11 [kV] até 0,44 [kV].

Os diferentes níveis de tensão que operam no sistema foram classificados na seção de introdução do Módulo 1 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) em 4 grandes grupos identificando as ordens de grandezas das tensões do Sistema Interligado Nacional (SIN), conforme indicado na Tabela 1, onde foram identificadas as seguintes ordens de grandeza.

Tabela 1 - Classificação dos níveis de tensão

Classificação	Nível de tensão
EAT - Extra Alta Tensão	≥ 230 [kV]
AT - Alta Tensão	≥ 69 [kV] até ≤ 230 [kV]
MT - Média Tensão	$\geq 2,3$ [kV] até ≤ 69 [kV]
BT - Baixa Tensão	$\geq 2,3$ [kV]

Fonte: Adaptado de Leão (2009).

A Resolução Normativa Nº 67 de 8 de junho de 2004, estabelecida pela ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2004), cita os critérios para composição da rede básica do Sistema Interligado Nacional (SIN). Nesta resolução, são definidos os componentes elétricos que integram a rede básica, sendo considerados parte da rede básica as instalações que possuem linhas de transmissão, barramentos, transformadores e equipamentos de potência com tensões iguais ou superiores a 230 [kV].

2.2 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Segundo (DIAS, 1998), caracteriza-se como um problema de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) qualquer distúrbio ou ocorrência manifestada nas formas de onda de tensões e/ou correntes que possam resultar em insuficiências, falhas ou defeitos permanentes em equipamentos do sistema elétrico.

A qualidade do fornecimento de energia elétrica aos consumidores deve considerar tanto a qualidade do produto quanto do serviço prestado. Conforme visto no Módulo 8 do PRODIST elaborado pelo ONS, alguns pontos principais relacionados a QEE serão abordados a seguir.

2.2.1 Qualidade da energia

2.2.1.1 Qualidade do produto

Os principais parâmetros da qualidade de energia elétrica relacionados ao produto final, em regime permanente ou transitório são listados a seguir:

- i. Tensão em regime permanente;
- ii. Fator de Potência;
- iii. Harmônicos;
- iv. Desequilíbrios de Tensão;
- v. Flutuação de tensão;
- vi. Variações de tensão de curta duração (VTCD);
- vii. Variações de frequência.

Deve-se salientar que os indicadores relacionados às tensões em regime permanente e fator de potência já são utilizados como parâmetros regulatórios. Já os valores de referência relativos aos harmônicos, desequilíbrios e flutuações de tensões servem apenas para o planejamento elétrico em termos da QEE, pois conforme estabelece as disposições transitórias do PRODIST, Módulo 8, os respectivos limites só serão estabelecidos após um período experimental de coleta de dados em campanhas de medição.

2.2.1.2 Tensões em regime permanente

As conformidades das tensões referem-se às comparações dos valores eficazes das tensões obtidos por medição apropriada, no ponto de conexão, em relação aos níveis de tensões especificadas. Os indicadores relacionados aos limites de tensões em regime permanente, classificados como adequados, precários e críticos são verificados pelos concessionários de energia tomando como base a Resolução ANEEL nº 505 de 26 de novembro de 2001 (ANEEL, 2001). Neste caso, existem dois modos de avaliação, por meio de medições amostrais ou em função de possíveis reclamações dos consumidores.

Apresenta-se na Tabela 2, os limites das tensões e a classificação das tensões de atendimento para pontos de conexão sob tensão nominal igual ou inferior a 1 [kV].

Tabela 2 - Limites para tensões nominais iguais ou inferiores a 1 [kV]

Tensão Nominal		Faixa de Valores Adequados das Tensões de Leitura (TL) (Volts)	Faixa de Valores Precários das Tensões de Leitura (TL) (Volts)	Faixa de Valores Críticos das Tensões de Leitura (TL) (Volts)
Ligação	Volts			
Trifásica	220/ 127	$201 \leq TL \leq 231$	$189 \leq TL < 201$ ou $231 < TL \leq 233$	$TL < 189$ ou $TL > 233$
		$116 \leq TL \leq 133$	$109 \leq TL < 116$ ou $133 < TL \leq 140$	$TL < 109$ ou $TL > 140$
	380/ 220	$348 \leq TL \leq 396$	$327 \leq TL < 348$ ou $396 < TL \leq 403$	$TL < 327$ ou $TL > 403$
		$201 \leq TL \leq 231$	$189 \leq TL < 201$ ou $231 < TL \leq 233$	$TL < 189$ ou $TL > 233$
Monofásica	230/ 115	$212 \leq TL \leq 242$	$207 \leq TL < 212$ ou $242 < TL \leq 253$	$TL < 210$ ou $TL > 258$
		$106 \leq TL \leq 121$	$104 \leq TL < 106$ ou $121 < TL \leq 127$	$TL < 105$ ou $TL > 129$
	240/ 120	$216 \leq TL \leq 250$	$207 \leq TL < 216$ ou $250 < TL \leq 255$	$TL < 207$ ou $TL > 255$
		$108 \leq TL \leq 125$	$103 \leq TL < 108$ ou $125 < TL \leq 127$	$TL < 103$ ou $TL > 127$

Fonte: Adaptado de ANEEL (2001).

Os limites das tensões e as classificações das tensões de atendimento para pontos de conexão em tensão nominal superior a 1 [kV] e inferior a 69 [kV] são apresentados pela Tabela 3.

Tabela 3 - Limites para tensão nominal superior a 1 [kV] e inferior a 69 [kV]

Classificação da Tensão de Atendimento		Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)
1 [kV] < TN < 69 [kV]	Adequada	$0,93 \times TC \leq TL \leq 1,05 \times TC$
	Precária	$0,90 \times TC \leq TL < 0,93 \times TC$
	Crítica	$TL < 0,90 \times TC$ ou $TL > 1,05 \times TC$

Fonte: Adaptado de ANEEL (2001).

Para os pontos de conexão em tensão nominal superior a 69 [kV], os limites das tensões e as classificações das tensões de atendimento devem seguir conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Limites para tensões nominais superiores a 69 [kV] e inferiores a 230 [kV]

Classificação da Tensão de Atendimento		Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)
69 [kV] ≤ TN < 230 [kV]	Adequada	$0,95 \times TC \leq TL \leq 1,05 \times TC$
	Precária	$0,90 \times TC \leq TL < 0,95 \times TC$ ou $1,05 \times TC < TL \leq 1,07 \times TC$
	Crítica	$TL < 0,90 \times TC$ ou $TL > 1,07 \times TC$

Fonte: Adaptado de ANEEL (2001).

Para as tensões iguais ou superiores a 230 [kV], em relação ao atendimento para os pontos de conexão, os níveis devem seguir os limites apresentados pela Tabela 5.

Tabela 5 - Limites para tensões nominais iguais ou superiores a 230 [kV]

Classificação da Tensão de Atendimento		Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)
TN ≥ 230 [kV]	Adequada	$0,95 \times TC \leq TL \leq 1,05 \times TC$
	Precária	$0,93 \times TC \leq TL < 0,95 \times TC$ ou $1,05 \times TC < TL \leq 1,07 \times TC$
	Crítica	$TL < 0,93 \times TC$ ou $TL > 1,07 \times TC$

Fonte: Adaptado de ANEEL (2001).

Onde, nas Tabelas 2, 3, 4 e 5 a nomenclatura é apresentada a seguir:

TN: Tensão nominal;

TL: Tensão de leitura;

TC: Tensão contratada.

2.2.1.3 Fator de potência

O fator de potência é calculado a partir dos valores registrados de potência ativa (W) e reativa (VAr). Para unidades consumidoras com tensões inferiores a 230 [kV], o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou capacitivo. Para unidades consumidoras com tensões superiores a 230 [kV] ou produtoras de energia elétrica, os padrões devem seguir os procedimentos de rede do ONS (ANEEL, 2021).

2.2.1.4 Harmônicos

As distorções nas formas de onda das tensões e correntes devido aos harmônicos são caracterizadas por deformações nas formas de onda em relação à onda senoidal da frequência fundamental do sistema em 60 [Hz].

2.2.1.5 Desequilíbrios de tensões

Conforme definido no módulo 8 dos PRODIST, o desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema.

O valor de referência do fator de desequilíbrio (FD) nos barramentos com tensões de operação nominal entre 2,3 [kV] e 230 [kV] deve se manter menor que 2%. Já nos barramentos com tensões inferiores a 2,3 [kV] o fator de desequilíbrio não deve superar 3%.

2.2.1.6 Flutuação das tensões

A flutuação das tensões é uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica dos valores eficazes das tensões. A determinação da qualidade das tensões de um barramento do sistema de distribuição quanto à flutuação das tensões tem por objetivo avaliar o incômodo provocado pelo efeito da cintilação luminosa no consumidor (efeito flicker), que tenha em sua unidade consumidora pontos de iluminação alimentados em baixa tensão.

2.2.1.7 Variações de tensões de curta duração (VTCD)

As variações de tensões de curta duração são desvios significativos nos valores eficazes das tensões em curtos intervalos de tempo. As variações de tensões de curtas durações são classificadas de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Classificação das variações de tensão de curta duração (VTCD)

Classificação	Denominação	Duração em ciclos da frequência industrial	Amplitude da tensão [RMS] em relação à tensão de referência [pu]
Variação Momentânea de Tensão	IMT	$T \leq 180$	$A > 0,1$
	AMT	$1 \leq T \leq 180$	$0,9 < A \leq 0,1$
	EMT	$1 \leq T \leq 180$	$A > 1,1$
Variação Temporária de Tensão	ITT	$180 < T < 10\ 800$	$A < 0,1$
	ATT	$180 < T < 10\ 800$	$0,9 < A \leq 0,1$
	ETT	$180 < T < 10\ 800$	$A > 1,1$

Fonte: Adaptado de ANEEL (2021).

Sendo as nomenclaturas utilizadas na Tabela 6:

IMT: Interrupção Momentânea de Tensão;

AMT: Afundamento Momentâneo de Tensão;

EMT: Elevação Momentânea de Tensão;

ITT: Interrupção Temporária de Tensão;

ATT: Afundamento Temporário de Tensão;

ETT: Elevação Temporária de Tensão;

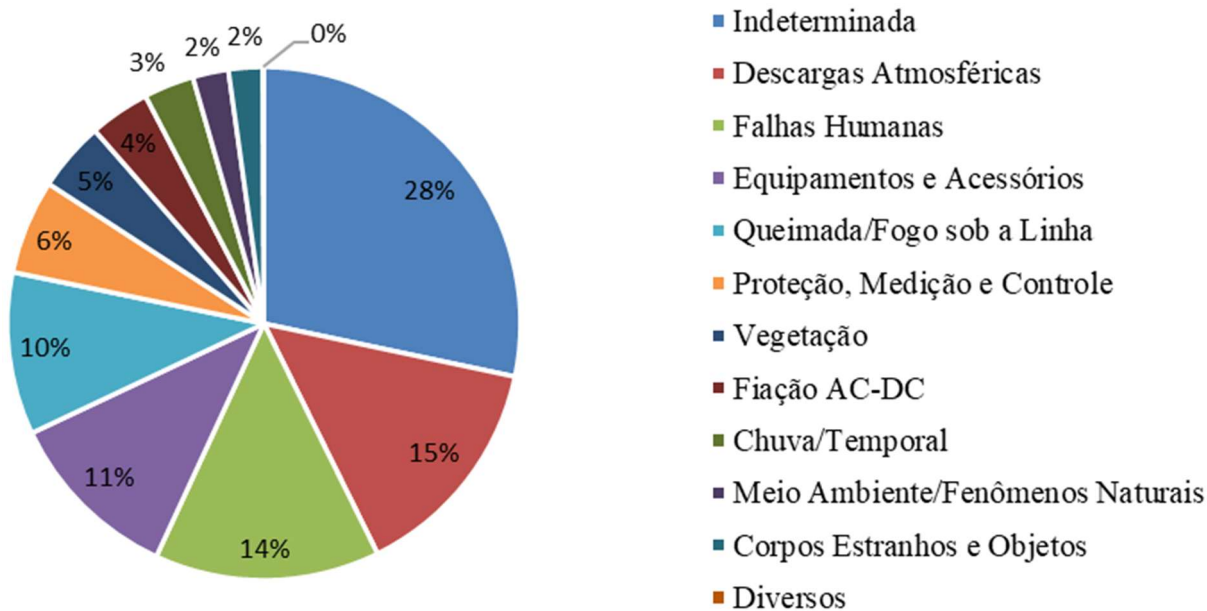
A: amplitude em pu;

T: Duração em ciclos da forma de onda fundamental em 60 [Hz].

2.3 DESLIGAMENTOS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO NO BRASIL

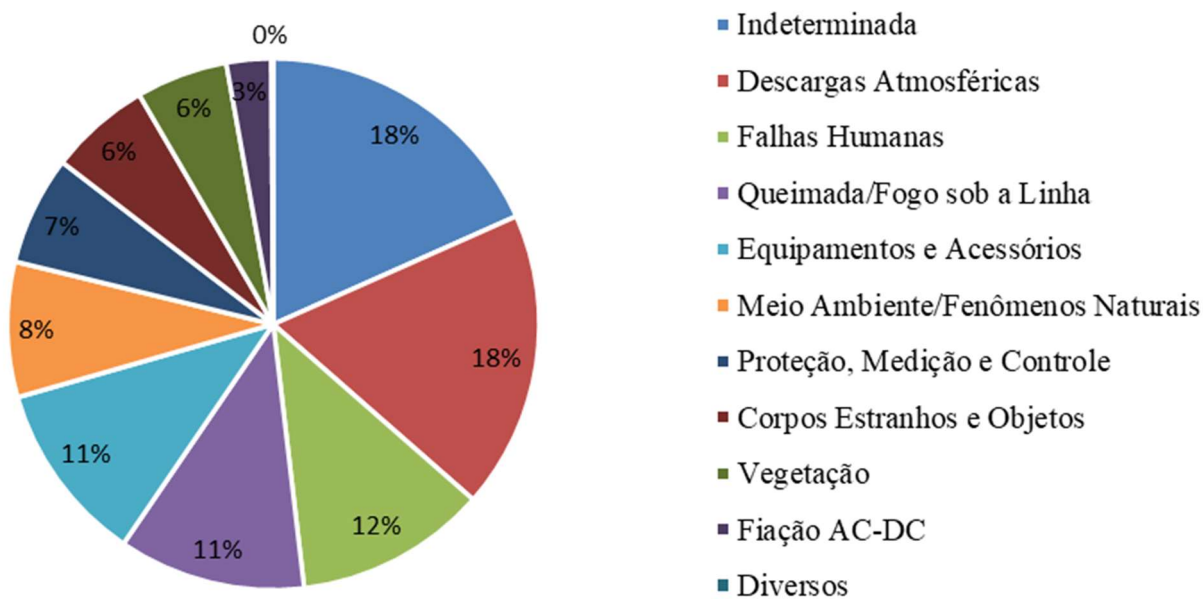
Uma maneira de classificar as falhas que ocorrem em sistemas de potência ou linhas de transmissão é a partir das análises e terminologias disponibilizadas por órgãos responsáveis por fiscalizar este tipo de ocorrência. De acordo com os dados do relatório de análise - desligamentos forçados dos sistemas de transmissão (edições de 2016 e 2018), serão apresentadas as principais causas de desligamentos considerando os critérios de fiscalização da ANEEL (ANEEL, 2016) e (ANEEL, 2018). As Figuras 3 e 4 apresentam o percentual de ocorrências de diversas causas de desligamentos, considerando linhas de transmissão e subestações.

Figura 3 - Estratificação dos desligamentos forçados analisados (edição de 2016).



Fonte: Adaptado de ANEEL (2016).

Figura 4 - Estratificação dos desligamentos forçados analisados (edição de 2018)



Fonte: Adaptado de ANEEL (2018).

A fim de analisar a variação das causas dos desligamentos forçados entre as edições supracitadas, é apresentada a Tabela 7.

Tabela 7 - Variação das causas de desligamentos forçados entre as edições de 2016 e 2018

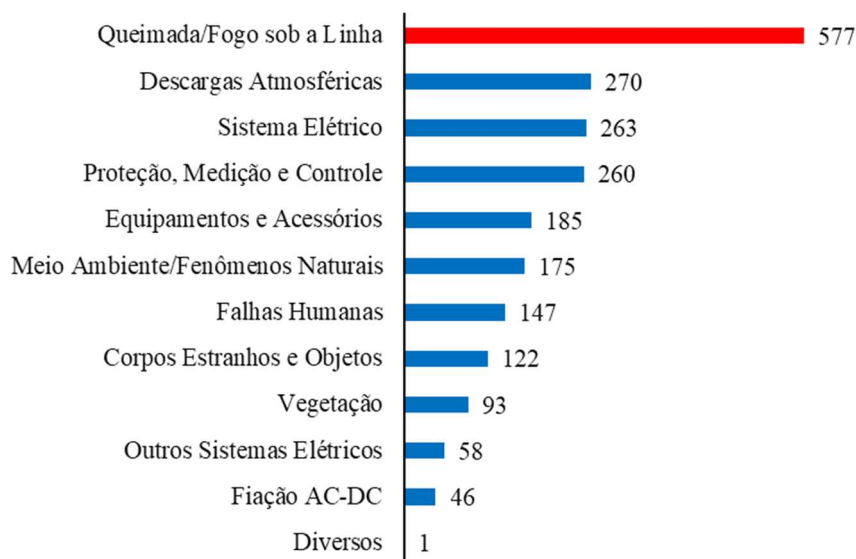
Classificação da Causa	Edição		Variação [%]
	2016	2018	
Indeterminada	957	691	-28,0
Descargas Atmosféricas	486	683	41,0
Falhas Humanas	480	440	-8,0
Queimada/Fogo sob a Linha	346	429	24,0
Equipamentos e Acessórios	375	416	11,0
Meio Ambiente/Fenômenos Naturais	76	310	308,0
Proteção, Medição e Controle	201	250	24,0
Corpos Estranhos e Objetos	73	232	218,0
Vegetação	148	210	42,0
Condutores AC-DC	129	103	-20,0
Total	3271	3764	15,0

Fonte: Adaptado de ANEEL (2016) e (2018).

Nota-se, por meio da Tabela 7, uma elevação abrupta para as causas de meio ambiente/fenômenos naturais e corpos estranhos e objetos, diminuição para as causas de condutores AC-DC e indeterminadas, principalmente devido a campanhas de fiscalização realizadas ao longo de 2016 e 2017, cujo objetivo era reduzir os desligamentos por causas indeterminadas e por falhas em equipamentos e acessórios.

Como resultado, embora a quantidade de falhas indeterminadas tenha diminuído, houve aumento do número de ocorrências das outras causas. Conforme visto em (ANEEL, 2018), incidência de queimadas aumentou consideravelmente no período entre julho de 2017 a dezembro de 2017, período de grande seca no Brasil, de forma que se tornou a predominante causa de desligamentos não programados de transmissão de energia do país. As principais causas conhecidas neste período, de acordo com dados do ANEEL, estão apresentadas na Figura 5.

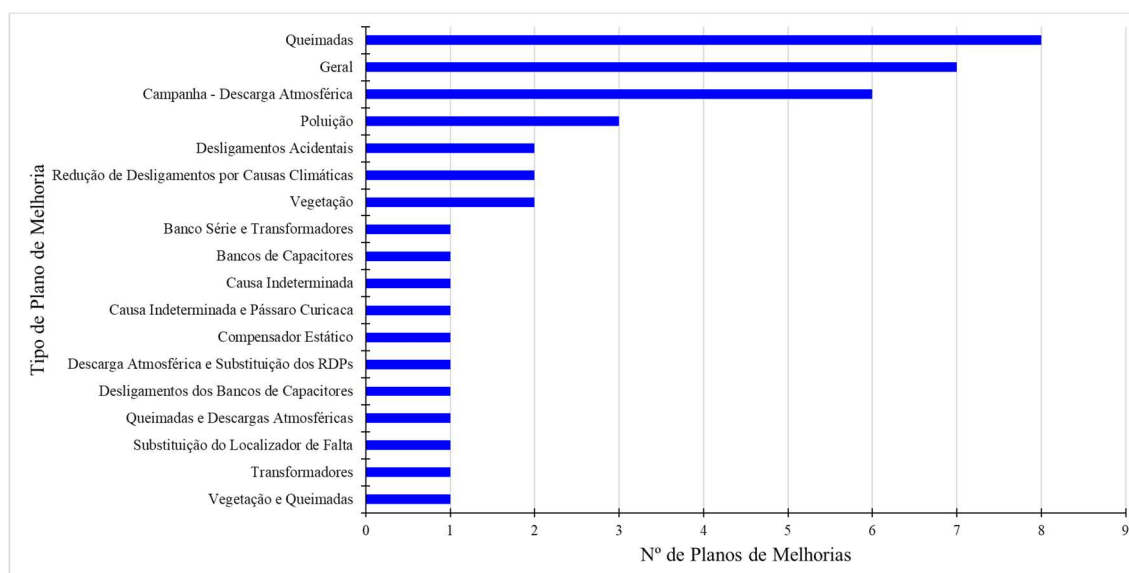
Figura 5 - Desligamentos, em número de ocorrências - julho/2017 a dezembro/2017



Fonte: Adaptado de ANEEL (2018).

A distribuição de planos de melhorias por temas, propostos pela ANEEL, considerando diversas LTs e estudos para reduzir os índices de desligamento destas linhas de transmissão, é apresentada na Figura 6.

Figura 6 - Estratificação do tipo de plano de melhoria pela quantidade de planos por tema



Fonte: Adaptado de ANEEL (2018).

2.4 ISOLADORES

De forma geral, o termo “isolador” é aplicado a suportes isolantes usados para sustentar mecanicamente elementos condutores, como cabos e barramentos em sistemas elétricos de transmissão e distribuição de energia, ao mesmo tempo em que isolam eletricamente elementos com diferentes potenciais (FUCHS, 1977).

O material isolante deve ser confeccionado de forma que seja um dielétrico excelente, capaz de suportar e acomodar elevados níveis de estresse elétrico por um longo prazo. O material dielétrico também deve ser capaz de lidar com os níveis de poluição impostos pelo ambiente a sua volta, que por muitas vezes são agressivos, suportando efeitos de radiação ultra violeta, contaminação e sobretensões causadas por descargas atmosféricas, faltas ou manobras.

Nesse contexto, isoladores devem não somente suportar as tensões de operação continua (regime permanente), mas também suportar sobretensões transitórias ou eventos de energização e desenergização de LTs, sem redução do seu desempenho evitando distúrbios, descargas disruptivas ou falhas operacionais. Os esforços mecânicos também devem ser levados em consideração de modo a garantir a integridade estrutural das linhas de transmissão devido ao tensionamento ocasionado pela massa dos condutores, assim mantendo o conjunto intacto ao longo de sua vida útil.

Os isoladores podem ser encontrados em basicamente três tipos de materiais: porcelana, vidro temperado e poliméricos (VOSLOO, MACEY e TOURREIL, 2004). Os três tipos diferentes de matérias isolantes são ilustrados pela Figura 7.

Os isoladores de porcelana ainda são os isoladores mais utilizados para ambientes externos e são produzidos a partir de uma composição de argila e materiais inorgânicos que após passar por um processo de queima, vitrifica-se e se torna um material completamente impermeável a umidade. Geralmente, a porcelana ainda ganha mais uma camada de cobertura de verniz que tem o propósito de deixar a superfície mais lisa e uniforme, minimizando a capacidade de acúmulo de matérias contaminantes e facilitando a sua limpeza natural por meio da ação das chuvas ou ventos.

Os isoladores de vidro temperado, são confeccionados a partir do rápido resfriamento das superfícies externas enquanto as superfícies internas demoram mais tempo. Devido a esta diferença de velocidade de resfriamento, cria-se uma região de altíssima tensão mecânica, prevenindo a formação e propagação de pequenas rachaduras.

Os isoladores poliméricos são isoladores que primeiramente foram pensados para serem utilizados em ambientes fechados. Devido ao avanço da tecnologia e pesquisas na área, estes materiais aumentaram sua resistência a radiação ultravioleta e estão sendo mais utilizados em ambientes externos. Por serem modulares, apresentam a vantagem de atingir com certa facilidade os requisitos industriais, uma vez que há uma vasta variedade de formatos e modelos. No entanto, como a matéria prima ainda é de origem orgânica, o isolador polimérico sofre com o desgaste e degradação devido a atividades de descargas parciais em sua superfície.

Figura 7 - Tipos de materiais isolantes: (A) - Vidro; (B) - Porcelana; (C) - Polimérico



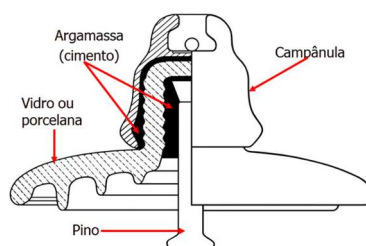
Fontes: Sediver (2017), Autor e Balestro (2020).

2.4.1 Construção

De forma geral, todo isolador voltado para atuar em linhas de transmissão são constituídos por matérias dielétricos e metálicos, facilitando a conexão em série entre os próprios isoladores e também entre as ferragens das torres dos sistemas elétricos.

Os isoladores de vidro temperado ou porcelana são compostos por três partes principais: campânula, isolante (vidro ou porcelana) e pino, conforme mostra a Figura 8. Uma cadeia de isoladores deste tipo é formada pela associação em série de diversos isoladores, buscando totalizar a distância de escoamento específica (DEEU) necessária para manter a tensão fase-terra dos condutores isolada com relação ao potencial do solo.

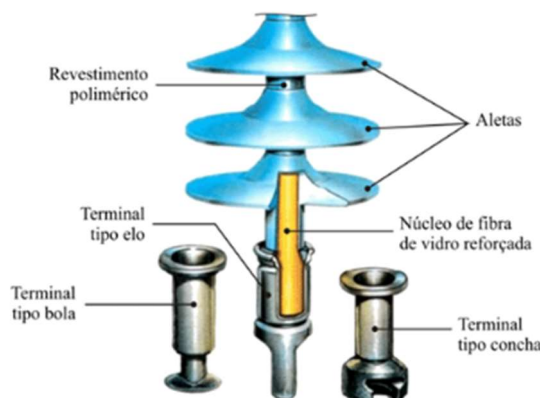
Figura 8 - Características físicas e construtivas de isolador do tipo disco



Fonte: Adaptado de Bezerra (2019).

Quanto aos isoladores poliméricos, seu núcleo é formado por fibra de vidro que é recoberta com o material polimérico. Seu corpo possui aletas de diversas larguras e possui terminais metálicos que podem ser adaptados dependendo do tipo de conexão, sendo utilizados para realizar as conexões com ferragens das torres e condutores. A Figura 9 aborda os detalhes construtivos de um isolador polimérico.

Figura 9 - Características físicas e construtivas de um isolador polimérico



Fonte: Cicré Brasil (2017).

2.4.2 Principais características

Os isoladores que são voltados para atuarem em ambientes externos como linhas de transmissão possuem parâmetros que são considerados mínimos (IEC/TS, 2008). Estes parâmetros são descritos a seguir e possuem correlação com descargas disruptivas que levam a falhas da LT.

- Perfil do isolador;
- Distância de arco a seco;
- Distância de escoamento (DE);
- Distância de escoamento específica (DEEU).

2.4.2.1 Perfis típicos

O perfil do isolador define para qual aplicação o isolador irá obter o melhor desempenho, sendo responsável por definir dimensões e consequentemente definir o nível de poluição local em que o isolador irá trabalhar. Conforme (IEC/TS, 2008), existem três tipos típicos de isoladores de vidro ou porcelana do tipo disco, sendo em perfis do tipo: normal, antipoluição e plano.

O perfil normal de isoladores possui saias consideradas curtas e bem espaçadas, sendo indicado para zonas onde o nível de poluição local é encontrado na faixa de muito baixo (E1) até médio (E3). Geralmente este perfil possui uma razão de 2,2 entre a distância de escoamento e seu diâmetro (SEDIVER, 2017), sendo este perfil abordado pela Figura 10-a.

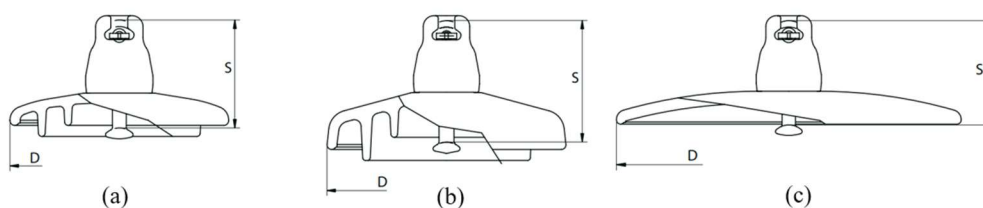
O perfil antipoluição possui saias consideradas longas e muito bem espaçadas entre si, evitando a formação de arcos elétricos entre saias vizinhas. Este perfil de isolador é utilizado para áreas onde níveis de poluição local especificado é no mínimo alto (E5 ou acima). A razão entre a distância de escoamento e seu diâmetro é geralmente em torno de 3,2 (SEDIVER, 2017). A Figura 10-b ilustra este perfil de isoladores.

Por fim, o perfil plano de isoladores é caracterizado pela não existência de saias abaixo do disco isolante, evitando o acúmulo de particulados sólidos (poeira ou areia). Geralmente encontra-se aplicado em áreas desérticas onde há ação frequente de ventos e raramente chove. Este perfil é indicado para níveis de poluição desde muito baixo (E1) até o nível considerado médio (E4) e a razão entre a distância de escoamento e o diâmetro deste tipo de isolador é tipicamente de 2,4 (SEDIVER, 2017). A Figura 10-c ilustra este perfil de isoladores.

Portanto, o perfil do isolador define as características básicas quanto a dimensões e o formato das saias, que variam conforme a aplicação e as condições de poluição do local onde serão inseridos.

A Figura 10 apresenta o diâmetro (D) e o passo (s) de três tipos de perfis para isoladores.

Figura 10 - Perfis típicos de isoladores (a) normal, (b) antipoluição e (c) plano.



Fonte: Adaptado de Sediver (2017).

2.4.2.2 Distância de arco a seco

Este parâmetro é definido como a menor distância, externa ao isolador (saias ou disco), através do ar, entre as ferragens terminais do mesmo, possuindo normalmente a tensão de fase do sistema aplicada sobre eles. A Figura 11 aborda de forma gráfica este parâmetro.

Figura 11 - Ilustração da distância de arco a seco de um conjunto de isoladores



Fonte: Cicré Brasil (2017).

A distância de arco a seco é muito importante por determinar a tensão máxima suportável de impulso atmosférico quando limpo, desta forma sendo o parâmetro que determina o tamanho físico da cadeia de isoladores utilizados em uma determinada tensão de operação (VOSLOO, MACEY e TOURREIL, 2004).

2.4.2.3 Distância de escoamento (DE)

A distância de escoamento para um isolador é definida como sendo a soma das menores distâncias ao longo da superfície dielétrica do isolador submetido a tensão de operação do sistema e sua unidade é dada em [mm] (IEC/TS, 2008). A Figura 12 ilustra de forma gráfica a distância de escoamento de alguns isoladores em uma cadeia.

Figura 12 - Ilustração da distância de escoamento de alguns isoladores



Fonte: Cicré Brasil (2017).

2.4.2.4 Distância de escoamento específica unificada (DEEU)

A distância de escoamento específica unificada para uma cadeia de isoladores é definida como sendo a relação entre a distância de escoamento (DE) e a máxima tensão de fase de operação do sistema, logo, sua unidade de medida é dada em [mm/kV], conforme equação (1).

$$DEEU = \frac{DE [mm]}{V_{m\acute{a}x_{FT}} [kV]} \quad (1)$$

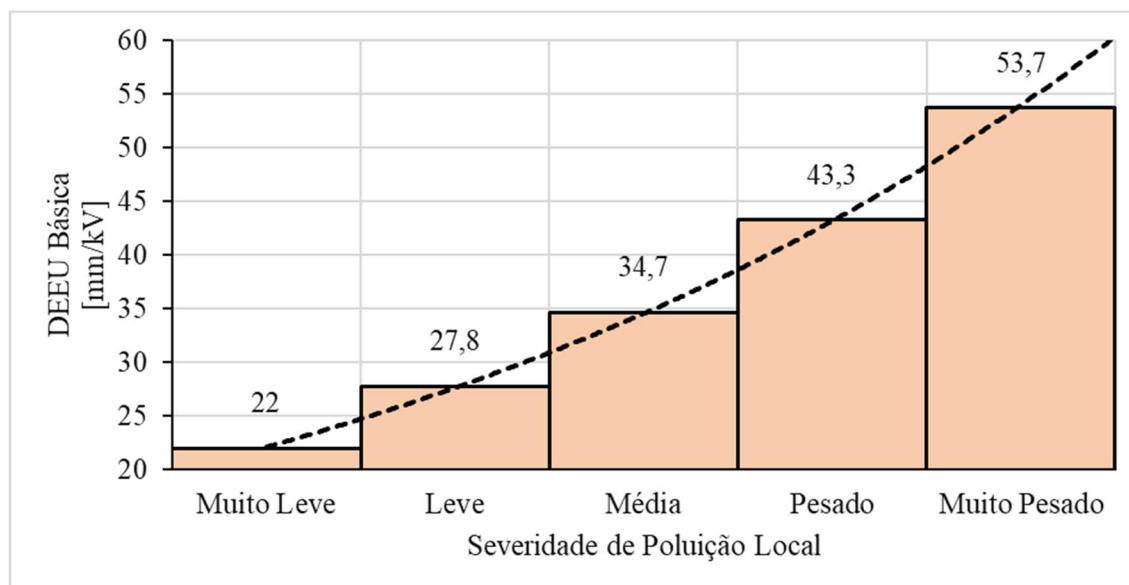
A norma IEC/TS 60815-1 (2008) fornece diretrizes para linhas de transmissão que atravessam ambientes onde se faz necessário definir os níveis de severidade da poluição local (SPL), com objetivo de selecionar os isoladores mais adequados as áreas poluídas. A Tabela 8 estabelece a relação entre o SPL e os valores DE e DEEU recomendados. A Figura 13 ilustra a relação DE e DEEU com o grau de severidade de poluição previsto em norma.

Tabela 8 - DE e DEEU em função do nível de poluição local

Nível de poluição (SPL)	DE [mm/kV]	DEEU [mm/kV]
Muito Leve (E1)	12,7	22,0
Leve (E2)	16,0	27,8
Médio (E3 a E4)	20,0	34,7
Pesado (E5 a E6)	25,0	43,3
Muito Pesado (E7)	31,0	53,7

Fonte: Adaptado de IEC/TS (2008).

Figura 13 - DEEU básica de um isolador em função da SPL



Fonte: Adaptado de IEC/TS (2008).

2.5 ASPECTOS DE UMIDADE E CONTAMINAÇÕES

Quando submetido a condições climáticas como chuvas e altos níveis de umidade, os materiais isolantes tendem a perder sua capacidade de isolamento de forma considerável. Agravando este fator, quando imerso em uma atmosfera considerada poluída, este fenômeno da diminuição da suportabilidade dielétrica do material é acentuado.

Segundo (MELLO, COSTA JR, *et al.*, 2001), entende-se que do ponto de vista elétrico, a atmosfera poluída caracteriza-se por ser o ambiente que para um dado intervalo de tempo, acumula particulados sobre a superfície isolante do material. Esta camada originada do acúmulo de particulados, quando umedecida ou dissolvida em água, produz soluções condutoras.

Se esta camada se mantém seca, não há mudança das características elétricas do dielétrico, quando comparado ao material isolante sem acúmulo de particulados. No entanto, quando umidificada por chuva ou condições climáticas adversas, os sais ali presentes facilitam a formação de arcos elétricos sobre a superfície, aumentando a corrente de fuga e dando início ao fenômeno conhecido como descarga disruptiva (*flashover*). Além disto, os arcos elétricos formados nos arredores do material isolador geram gás ozônio, que acaba oxidando as ferragens e corroendo os isoladores ao longo do tempo.

A formação de umidade sobre o disco dos isoladores advém das condições de névoa, neblina e chuvisco. No entanto, segundo (CICRÉ BRASIL, 2017), além das formas citadas anteriormente, existe outra forma de umidificar a camada isolante, descrito por três etapas: condensação, absorção e choque térmico.

A condensação sobre uma superfície ocorre quando a temperatura na superfície cai abaixo da temperatura de ponto de orvalho. O isolador de porcelana (ou vidro) perde calor para o ambiente, através de radiação, mais rápido do que o calor é fornecido a ele pelas correntes de ar. Se a temperatura na superfície do isolador cai abaixo do ponto de orvalho, ocorre a formação de umidade sobre a superfície do isolador. A umidificação devido a condensação do orvalho é uma das principais causas de descargas disruptivas nos isoladores em serviço. Quanto a absorção, os sais são higroscópicos e absorvem umidade quando a umidade relativa está acima de 80%. Consequentemente, os sais que cobrem a superfície dos isoladores podem começar a se umidificar antes da temperatura de orvalho. O choque térmico ocorre nas primeiras horas da manhã, antes do nascer do sol. A baixa temperatura da madrugada reduz a temperatura do isolador, principalmente cerâmicos. Assim sendo, a umidade matinal presente no ambiente se condensa rapidamente sobre a superfície resfriada (CICRÉ BRASIL, 2017, p. 32 a 34).

Segundo (KIESSLING, NEFZGER, *et al.*, 2010), a formação das camadas de poluição sobre o disco dielétrico pode ser associada a diversos fatores, sendo os principais citados relacionados a seguir:

- Tipo e quantidade de particulados sólidos, líquidos ou gasosos presentes no ar;
- Perfil do isolador e as condições que levam a adesão dos particulados a superfície do material dielétrico;

- Possibilidade de uma autolimpeza desta camada pela ação do vento ou chuva;
- Humedecimento da camada de poluição devido à chuva ou orvalho.

Logo, durante a concepção do projeto da LT, é interessante que exista a correta identificação dos parâmetros associados ao ambiente em que a linha irá passar. Estes parâmetros são importantíssimos pois impactam diretamente sobre os índices de falhas das linhas e ditam as distâncias de isolamento que serão utilizadas nas torres. No entanto, a identificação das características locais de poluição não é uma tarefa trivial. A norma IEC/TS 60815-1 (2008) fornece critério de avaliação com cinco níveis diferentes de severidade de poluição local, conforme ilustra o Quadro 1.

Quadro 1 - Relação entre a severidade de poluição local e o respectivo ambiente típico

SPL	Ambiente Típico
Muito Leve	E1
Leve	E2
Médio	E3
	E4
Pesado	E5
	E6
Muito Pesado	E7

Fonte: Adaptado de IEC/TS (2008).

Para locais onde existe o depósito de particulados solúveis e não solúveis, a norma recomenda os métodos DDSE (Densidade de Depósito de Sal Equivalente) e DDNS (Densidade de Depósito Não-Solúvel) que irão estudar o acúmulo de poluição sobre a cadeia de isoladores.

Por fim, a norma IEC/TS 60815-1 (2008) aborda a caracterização do ambiente de acordo com o grau de severidade, descrevendo de forma clara e resumida algumas condições que podem vir a auxiliar durante o processo de dimensionamento do SPL do respectivo vão de passagem da LT. Esta abordagem prevista em norma é apresentada pelo Quadro 2.

Quadro 2 - Níveis de poluição e respectivos ambientes típicos

(continua)

Nível de poluição	Ambiente Típico	Caracterização do ambiente típico
Muito Leve	E1	- Áreas distantes mais de 50 [km] do mar, deserto ou terra plana árida
		- Áreas distantes mais de 10 [km] de fontes de poluição humanas
Leve	E2	- Áreas distantes entre 10 a 50 [km] do mar, deserto ou terra plana árida
		- Áreas distantes entre 5 a 10 [km] de fontes de poluição humanas

Quadro 2 - Níveis de poluição e respectivos ambientes típicos

(conclusão)

Médio	E3	- Áreas distantes entre 3 a 10 [km] do mar, deserto ou terra plana árida
		- Áreas distantes entre 1 a 5 [km] de fontes de poluição humanas
	E4	Mais longe das fontes de poluição que o mencionado em E3, mas:
		- Neblina densa (ou chuveiro) ocorre frequentemente após uma longa estação de acumulação de poluição seca (várias semanas ou meses)
		- Presença de chuva forte com elevada condutividade
		- Existência de elevado valor da DDNS, entre 5 e 10 vezes o valor da DDSE
Pesado	E5	- Áreas distantes menos de 3 [km] do mar, deserto ou terra plana árida
		- Áreas distantes menos de 1 [km] de fontes de poluição humanas
	E6	Mais longe das fontes de poluição que o mencionado em E5, mas:
		- Neblina densa (ou chuveiro) ocorre frequentemente após uma longa estação de acumulação de poluição seca (várias semanas ou meses)
		- Neblina densa (ou chuveiro) ocorre frequentemente após uma longa estação de acumulação de poluição seca (várias semanas ou meses)
		- Existência de elevado valor da DDNS, entre 5 e 10 vezes o valor da DDSE
Muito Pesado	E7	Dentro da mesma distância das fontes de poluição especificadas para áreas “pesadas”
		- Mais longe das fontes de poluição que o mencionado em E5, mas:
		- Diretamente submetida a borrifos de água do mar ou névoa salina densa
		- Submetida diretamente a contaminantes com elevada condutividade, ou poeira de cimento com elevada densidade e frequente umidificação por névoa ou chuveiro
		- Áreas desérticas com rápida acumulação de areia e sal e condensação regular

Fonte: Adaptado de IEC/TS (2008).

2.6 MECANISMO DE FALHAS EM ISOLADORES

2.6.1 Caracterização

O processo de *flashover* por poluição do isolador é significativamente afetado devido as propriedades superficiais do mesmo. Segundo a normal IEC/TS 60815-1 (2008) são duas as condições que podem ser encontradas: hidrófilo e hidrofóbico, sendo a primeira condição associada a isoladores do tipo poliméricos e a segunda associada a isoladores de cerâmica ou vidro. Sob condições úmidas como chuva e névoa, a superfície do isolador polimérico tende a ficar completamente molhada, por outro lado, a superfície do isolador de cerâmica ou vidro tende a separar as gotas de água em outras partes menores.

Um fator agravante é a perda da rigidez dielétrica do ar próximo as saias dos isoladores, o qual reduz significativamente a capacidade do isolador de lidar com a disrupção elétrica devido a perda de material na superfície do isolador.

A norma citada acima descreve o processo de disrupção elétrica com seis fases:

- Fase 1: O isolador é coberto com uma camada de poluição;

- Fase 2: A superfície do material isolante absorve água devido a presença de alta umidade, condensação ou precipitação do ar ao seu redor. A chuva forte pode vir a limpar total ou parcialmente a camada de poluentes formada sem avançar as fases citadas, ou essa limpeza pode agravar o processo, criando pequenas pontes entre os espaços das saias dos isoladores. Quando a umidade relativa do ar atinge porcentagens acima de 75%, ocorrerá a absorção de umidade se a temperatura do isolador e do ambiente forem iguais. A condensação irá ocorrer sempre que a temperatura do isolador for menor que a temperatura de ponto de orvalho, sendo normalmente vista minutos antes do sol nascer;

- Fase 3: Uma vez que um isolador energizado é coberto com camada poluente, há formação de uma corrente de fuga que fluirá na camada e por efeito joule irá aquecer o caminho percorrido, e com alguns ciclos da frequência, algumas partes da camada isolante irão secar. O resultado deste processo é a formação de bandas secas;

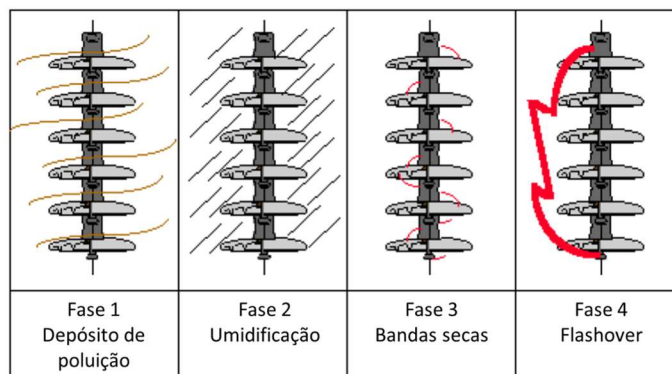
- Fase 4: Devido a formação de bandas secas, a camada de poluição não seca de forma uniforme, o que acaba interrompendo o caminho utilizado pela corrente de fuga;

- Fase 5: A tensão de fase do sistema irá ser submetida sobre as sucessões de bandas secas formadas uma por cima das outras (poucos milímetros de espessura), o que causa a ruptura da rigidez dielétrica do ar e as bandas secas serão “jumpeadas” por arcos elétricos que estarão em série com a resistência das partes ainda umedecidas da camada condutiva. Essa sucessão repetida do processo gera um surto de corrente de fuga;

- Fase 6: Se a resistência da camada de poluição molhada é suficientemente pequena, a formação de arcos sobre as bandas secas será sustentada e se estende ao longo do isolador. Esse processo cíclico diminui a resistência em série com os arcos elétricos, aumentando a corrente de fuga e permitindo que ela se estabeleça cada vez mais sobre a superfície isolante. Por fim, com o acontecimento sucessivo dos passos citados, a corrente de fuga irá ser capaz de ignorar completamente o princípio isolante do isolador e a tensão fase-terra do sistema irá estabelecer um caminho para terra, gerando um curto-circuito, sendo nomeado de *disrupção de tensão* ou *flashover*.

O processo descrito anteriormente é resumido pela Figura 14, na qual está esquematizada o processo de *flashover* na cadeia de isoladores.

Figura 14 - Representação esquemática da ocorrência de *flashover* pela ação de poluição

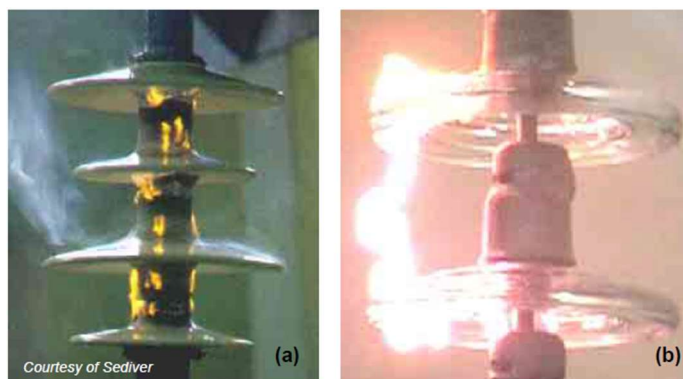


Fonte: Adaptado de GSI (2021).

De forma resumida, o processo de *flashover* só ocorre quando há a umidificação da camada poluente sobre o disco isolante. Enquanto a camada de poluição se manter seca, não há impacto significativo na alteração do comportamento dielétrico do isolante.

Porém, se no processo de umidificação não ocorrer remoção completa dos sais presentes, pode ocorrer a formação de arcos elétricos sobre pequenas superfícies que irão culminar na descarga disruptiva completa da cadeia de isoladores, fenômeno esse ilustrado pela Figura 15.

Figura 15 - Ilustração dos arcos elétricos sobre (a) - bandas secas, (b) - isolador



Fonte: Vosloo, Macey e Tourreil (2004).

Diante do exposto, é possível afirmar que o *flashover* possui características transitórias e ocorre principalmente quando há maior concentração de umidade no ar ambiente, sendo normalmente próximo das primeiras horas da manhã ou antes do sol nascer. Ademais, o fenômeno de *flashover* também é responsável por realizar a limpeza do isolador, desumidificando e retirando camadas de poluentes. Assim, quando ocorrer o religamento da LT (automático ou não), o mesmo fenômeno que provocou o desligamento não irá ocorrer novamente e haverá sucesso no reestabelecimento da operação do sistema.

Destaca-se também outras duas naturezas mais incomuns de ocorrência de *flashover*:

- Por contaminação instantânea de alta condutividade, que ocorre quando o particulado se deposita rapidamente sobre a superfície do isolador, resultando na rápida alteração de um estado aceitável limpo e de baixa condutividade para um estado de ruptura da cadeia em um curto intervalo de tempo e depois retorna a um nível baixo de condução. A poluição instantânea é normalmente depositada como uma camada altamente condutora de eletrólito líquido, por exemplo, névoa salina ou ácido industrial, assim o processo começa na Fase 2 indicada na Figura 14 e pode avançar rapidamente para a Fase 4. (IEC/TS, 2008).
- Por contaminação de excremento de pássaros, onde o acumulo de excremento de pássaros sobre a cadeia ao longo do tempo é visível. Naturalmente, o excremento de pássaro possui alta condutividade e quando associado com a umidade reduzem significativamente a resistência elétrica da superfície do isolador, facilitando o fenômeno de formação de arco elétrico sobre os isoladores, conforme descrito anteriormente. A Figura 16 ilustra exemplos de contaminação de isoladores por excremento de pássaros.

Figura 16 - Exemplo de contaminação de isoladores por excremento de pássaros



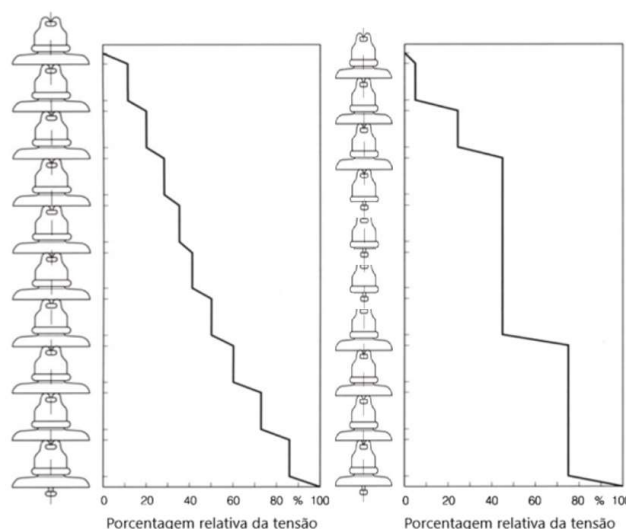
Fonte: Andrade, Lima, *et al.* (2005).

2.6.1.1 Distribuição do Campo Elétrico

Em condições de alta umidade a distribuição de tensão não diminui uniformemente ao longo da cadeia, influenciada, principalmente, pelo efeito da alta condutividade da camada de poluição. Por exemplo, se os isoladores do topo da cadeia estiverem mais poluídos, em condições de umidade elevada o potencial de terra transfere-se até os isoladores mais limpos e com maior capacidade de isolamento. Nessas condições, os isoladores mais limpos estarão sob uma condição de estresse elétrico, que pode ser superior ao suportável (KIESSLING, NEFZGER, *et al.*, 2010).

No caso de uma distribuição não uniforme de poluição, conforme ilustrado pela Figura 17, os isoladores menos poluídos irão ficar submetidos a um gradiente de tensão mais elevado, podendo ocorrer a ruptura isolante da unidade submetida a essa condição e, posteriormente, podendo evoluir para o *flashover* completo da cadeia.

Figura 17 - Comparação da distribuição de tensão nas cadeias de isoladores



Fonte: Adaptado de Kiessling, Nefzger, *et al.* (2010).

2.6.2 Técnicas para mitigação de *flashover*

Conforme exposto na seção 2.6.1, o fenômeno que precede a ocorrência de *flashover* é em geral associado aos mesmos fatores de interação entre o isolador, particulados presentes no ambiente (poluição), umidade que o isolador está exposto e a tensão do sistema que ele deve suportar. Como a tensão do sistema é um fator fixo, estabelecida pelas condições normais de operação, os demais podem ser modificados buscando melhorar o desempenho da LT. Segundo (PUCHALE, 2019), as principais técnicas abordadas em literatura para melhorar o desempenho de isoladores são apresentadas abaixo:

- Aumento da distância de escoamento da cadeia: as distâncias de escoamento são normalmente adotadas dependendo do grau de poluição durante a concepção de projeto. O aumento da distância de escoamento das cadeias pode ser atingindo de duas formas diferentes: mantendo-se o mesmo tipo de isolador, porém aumentando a quantidade de isoladores na cadeia, atentando-se a distância mínima de segurança requerida. O segundo método é a modificação do perfil do isolador, escolhendo um perfil que forneça uma maior distância de escoamento por isolador, evitando-se alterar o número de isoladores na cadeia;

- Lavagens periódicas da cadeia: devido a característica acumulativa de poluição sobre o disco dos isoladores, a lavagem realiza a limpeza total ou parcial das cadeias, evitando que o acúmulo de particulado gere demais complicações. A lavagem das cadeias de isoladores pode ser realizada tanto com a LT desenergizada, com água normal e com a LT energizada, utilizando água desmineralizada;
- Substituição das cadeias convencionais por isoladores poliméricos: a substituição das cadeias convencionais por isoladores poliméricos é vantajosa devido as características intrínsecas dos isoladores poliméricos, que fornecem alta hidrofobicidade, distâncias de escoamento elevadas e um peso relativamente menor, quando comparado a cadeias convencionais. No entanto, sua desvantagem é vista mecanicamente, sendo visualmente difícil detectar problemas internos a estrutura.

Os métodos apresentados não irão garantir completamente que a LT deixe de apresentar falha por *flashover*, mas irão auxiliar na melhoria do desempenho da linha de transmissão, sendo a decisão do método mais eficiente normalmente baseado nas características elétricas e mecânicas locais, experiência da concessionária que administra a LT, localização e custos do ciclo de vida útil dos equipamentos.

2.7 SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA POR SOFTWARE

2.7.1 Introdução

Sistemas elétricos diversos podem ser modelados e simulados por meio de softwares dedicados a esse fim. Assim, a análise de sistemas de maior tamanho e complexidade torna-se mais rápida e prática.

O software ATPDraw consiste em uma parte gráfica de interface do programa. O usuário pode construir diversos sistemas elétricos com base em modelos digitais, por meio da seleção e conexão entre componentes pré-definidos pertencentes à biblioteca do programa. Depois que o sistema é modelado pelo usuário um arquivo é gerado pelo ATPDraw para que possa ser simulado na outra parte do programa, o ATP.

O ATP, por sua vez, é a parte computacional do software, responsável por realizar as simulações dos circuitos modelados no ATPDraw. O programa consiste na análise de variáveis de interesse em sistemas de potência em função do tempo.

A solução das equações diferenciais no domínio do tempo é feita com base na resolução por método de integração trapezoidal. Também são utilizadas condições iniciais que podem ou não serem definidas pelo usuário. Essa ferramenta de simulação digital ainda possibilita simulações com faltas simétricas e não simétricas, impulsos atmosféricos e vários tipos de manobras de chaveamento.

Tipicamente, as aplicações nas quais o ATP é empregado são a análise de manobras e de impulso atmosférico, coordenação de isolamento e modelagem de relés de proteção, estudos harmônicos e de qualidade de energia (PRINKLER e HOIDALEN, 2020). Os estudos mais típicos são:

- Estudos de sobretensões impulsivas;
- Transitórios de manobras e faltas;
- Estudos de sobretensões estatísticas e determinísticas;
- Modelagem de máquinas;
- Chaveamentos de transformadores, reatores e capacitores;
- Ferroressonância;
- Aplicações de eletrônica de potência;
- Capacidade de disjuntores (arco voltaico), capacidade de interrupção de corrente;
- Análises harmônicas, ressonâncias de rede;
- Testes de dispositivos de proteção.

Em princípio, o ATPDraw possui uma interface gráfica similar a qualquer outro software de simulação de circuitos elétricos.

Como todo programa computacional, o ATPDraw possui seus limites de componentes para simulação dos sistemas elétricos. A Tabela 9 mostra a capacidade máxima de componentes que podem ser utilizados nas simulações de transitórios.

Tabela 9 - Limites de componentes do ATPDraw

Tipo	Número Máximo
Barras	6000
Ramos	10000
Chaves	1200
Fontes	900
Elementos não-lineares	2250
Máquinas síncronas	90

Fonte: Prinkler e Hoidalén (2020).

2.7.2 Conceitos básicos

Em geral, os estudos mais realizados com o ATP são os referentes às simulações em regime permanente e, principalmente, para análise de transitórios.

2.7.2.1 Simulações de regime permanente

O regime permanente é o estado de operação normal e estacionário do sistema elétrico. Em análise, o regime permanente é calculado tipicamente no domínio da frequência utilizando o método de análise de fasores. Em outras palavras, ao invés de utilizar a representação no domínio do tempo da tensão ($U_{rms} \cdot \cos(\omega t + \varphi)$), no domínio da frequência a mesma torna-se $U_{rms} \angle \varphi$.

sendo:

$$U_{rms}: U_{m\acute{a}x}/\sqrt{2}$$

ω - frequência angular normalmente referenciada a 50 ou 60 [Hz].

A utilização de fasores simplifica o cálculo na análise tradicional de sistemas de potência. O ATP automaticamente utiliza cálculos de regime permanente no domínio da frequência para preparação inicial do circuito com a finalidade de simulação de transitórios. Para a verificação das condições em regime permanente, deve-se selecionar na simulação um tempo relacionado à condição inicial igual a zero ($T_{m\acute{a}x} = 0$) e analisar o arquivo de saída (arquivo .LIS).

2.7.2.2 Simulação de transitórios

A simulação de eventos transitórios é a principal finalidade do programa ATPDraw. Um transiente elétrico pode ser definido como o fenômeno que acontece entre dois eventos distintos em regime permanente, como por exemplo, antes e depois de uma falta monofásica a terra.

A simulação de um evento transiente está diretamente ligada a frequência equivalente das tensões e correntes envolvidas no evento. Nas simulações com o programa ATPDraw, a faixa de frequência para simulação de transientes é importante por várias razões, destacadas abaixo.

- **Intervalo de Integração:** o ATPDraw simula o sistema em intervalos de tempo discreto. O passo de integração (Δt) adotado coloca um limite teórico para resolução dos eventos transientes.

- **Detalhamento do sistema:** o detalhamento do sistema que precisa ser modelado depende da frequência máxima significativa do fenômeno que está sendo simulado. Como regra geral, quanto maior a frequência de interesse, maior o detalhamento do sistema.

- **Tempo de simulação:** o tamanho do sistema que está sendo modelado depende também da frequência máxima significativa do transitório que está sendo estudado. Quanto menor a frequência, maior o sistema que precisa ser modelado (embora com menor detalhamento).

Na falta de maiores detalhes e informações sobre o sistema a ser estudado, os valores citados abaixo podem ser utilizados para simulações, apresentando em geral bons resultados no ATPDraw:

$$\Delta t = 1E^{-6} [s]$$

$$T_{m\acute{a}x} = 150 E^{-3} [s]$$

Sendo: $E^{-x} = 1 \cdot 10^{-x}$

2.7.2.3 Considerações sobre o ATPDraw

O ATPDraw é uma ferramenta de análise de transitórios que executa os cálculos necessários em uma dada simulação. No entanto, em uma simulação é necessário especificar adequadamente os seguintes itens:

- **O que simular:** parte do processo no qual o usuário informa ao ATPDraw que topologia de rede e que tipo de evento será simulado;

- **Como simular:** parte do processo no qual o usuário decide a melhor forma de simular o problema em mãos. Decisões sobre o modelo, e como modelar, são necessárias. Este é, de longe, o aspecto mais difícil do processo de análise de transitórios por meio de programas computacionais;

- **Como interpretar os resultados obtidos nas simulações:** a interpretação dos resultados da simulação é quase tão importante quanto à elaboração da simulação em si. Além do aspecto mais ou menos trivial do que planejar, a utilização do programa é extremamente importante para se ter uma ideia razoável de que respostas esperar do sistema modelado no programa.

Por fim, uma das principais vantagens do ATPDraw é a sua flexibilidade de modelagem, onde um usuário experiente pode usar o programa em uma ampla variedade de estudos. Entretanto, existem certas dificuldades que são reduzidas com a prática de outros casos analisados. Os problemas de simulação não residem no fato da ausência ou não de interfaces gráficas para o usuário, mas sim no fato de que muitos dos fenômenos transitórios geralmente são conceitualmente complexos e difíceis de modelar.

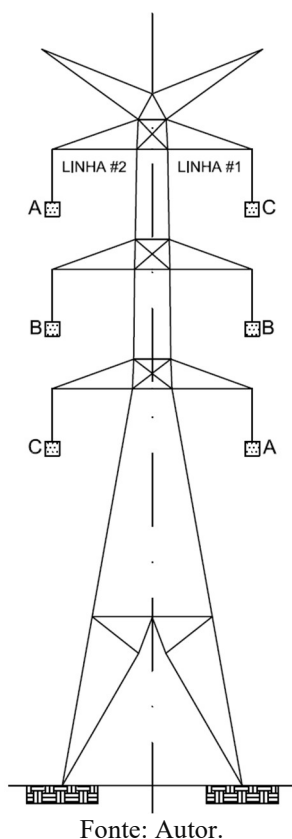
O usuário deverá ter inicialmente uma clara compreensão do fenômeno que está sendo simulado para que as respostas obtidas com a modelagem e simulação no programa ATPDraw sejam adequadas e satisfatórias.

3 MÉTODO

O método utilizado é desenvolvido de forma contextualizada visando identificar e caracterizar as falhas intempestivas em uma linha de transmissão de 500 [kV] e 6 [km] de extensão.

As torres que sustentam as linhas de transmissão em estudo, realizam o transporte de energia por meio de circuitos duplos de transmissão, ou seja, a torre possui o circuito para transmissão da linha denominada neste trabalho de #1 e o circuito para transmissão da linha #2, conforme ilustrado pela Figura 18. Na Figura 18 também é apresentada as posições de cada fase em cada um dos circuitos, o que será utilizado para posterior análise das características de desligamentos da linha de transmissão (LT).

Figura 18 – Disposição das fases do circuito duplo da LT, com vista frontal da torre



3.1 HISTÓRICO DE FALHAS NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

Esta análise é embasada nas informações expostas na Tabela 10, na qual é apresentado o histórico de falhas na linha de transmissão de 500 [kV], sendo mostrados a data, horário, circuito e fase envolvida, posição e condição climática das falhas, quando existentes. Na ocasião de falta de informação sobre a origem do desligamento e condição climática, foi associado a nomenclatura N/D (Não Disponível). Já a nomenclatura DA é utilizada para identificação de descarga atmosférica.

Tabela 10 - Histórico de falhas na linha de transmissão de 500 [kV]

Ano	Data	Horário	Linha	Fases	Posição	Condição Climática	Causa
2012	11/2012	03h50	L#2	A	Superior	Chuva Forte, Vento Forte e DA.	Disrupção do Isolamento
2013	11/2013	01h50	L#2	A	Superior	Chuva e DA	Falha de isolamento
	11/2013	02h30	L#2	C	Inferior	Chuva e DA	Falha de isolamento
2014	11/2014	23h40	L#2	B e C	Central e Inferior	Seco e Sem Vento	Curto Bifásico
2015	11/2015	04h10	L#2	B	Central	Vento e Chuva Fraca	N/D
	02/2016	06h20	L#2	A	Superior	Seco e Sem Vento	N/D
	08/2016	23h45	L#1	C	Superior	Chuva	N/D
2016	08/2016	01h45	L#2	A	Superior	Seco e Sem Vento	N/D
	10/2016	06h27	L#1	C	Superior	Chuva Fraca	N/D
	10/2016	06h40	L#2	A	Superior	Chuva Fraca	N/D
2018	02/2018	23h20	L#2	C	Inferior	Chuva e Vento Muito Forte	N/D
2021	10/2021	3h35	L#2	A	Superior	N/D	N/D
2021	10/2021	3h55	L#1	B	Central	N/D	N/D

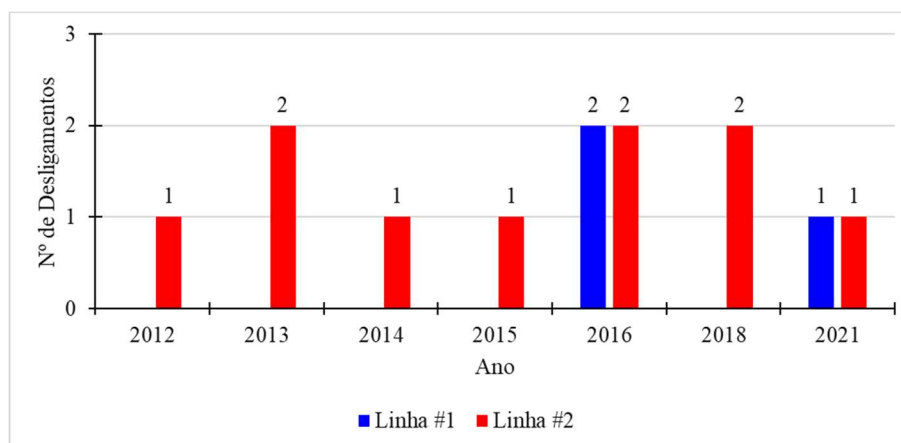
Fonte: Adaptado de GSI (2021).

Diante dos dados apresentados pela Tabela 10, o primeiro fato observado é que todas as falhas ocorrem no período das 23h até as 6h, e em sua maioria foram do tipo fase-terra, sendo geralmente um período onde há alívio de cargas ao sistema e por consequência, as tensões tendem a se aproximar dos valores limites de operação. Este horário também é associado a níveis mais elevados de umidade do ar, quando comparados aos níveis obtidos durante o período diurno.

A fim de analisar o horizonte de 10 anos dos dados disponibilizados na Tabela 10, foi realizado um levantamento do número de falhas ou desligamentos na LT desde o início do seu funcionamento, em 2011, até o final do ano de 2021 (último dado disponibilizado). Um detalhamento do número de desligamentos para as linhas 1 e 2 ao longo do período analisado é mostrado na Figura 19, onde é possível verificar que após 1 ano de funcionamento a LT já apresentou desligamento forçado.

Cruzando este desligamento com os dados disponíveis na Tabela 10, esta falha foi associada a uma interrupção do isolamento na fase A da linha 2 da LT, ocasionada por descarga atmosférica, onde as condições climáticas foram descritas como chuva e vento forte e incidência de descargas atmosféricas na região.

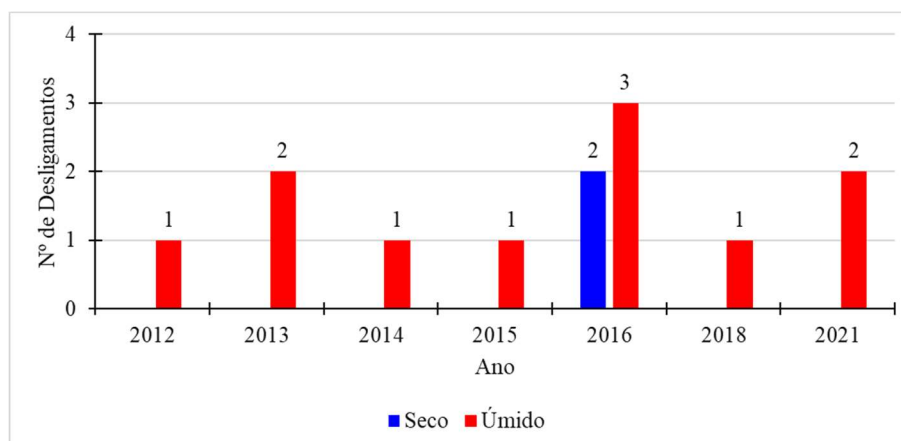
Figura 19 - Total de desligamentos por ano para as linhas #1 e #2 da LT de 500 [kV]



Fonte: Autor.

Buscando realizar uma correspondência entre o número de desligamentos e o clima, o ano foi dividido em dois períodos: seco e úmido. O período seco é caracterizado de maio até outubro, já o período úmido corresponde aos meses de novembro até abril. Desta forma, o número de desligamentos foi associado ao período do ano em que ocorre a falha, dando origem a Figura 20, que apresenta o número de desligamentos intempestivos ao longo do período estudado, levando em consideração o regime seco e úmido para a região. Nesta figura, é possível observar que aproximadamente 85% dos desligamentos ocorreram na condição de regime úmido da região, sendo um forte indicio de que o clima em que a linha de transmissão está exposta influencia diretamente na qualidade do seu funcionamento.

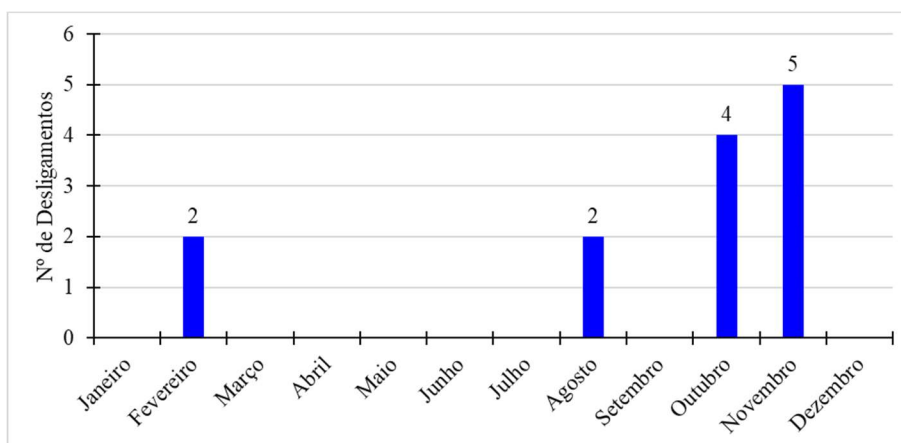
Figura 20 - Desligamentos para os períodos seco e úmido do ano na LT



Fonte: Autor.

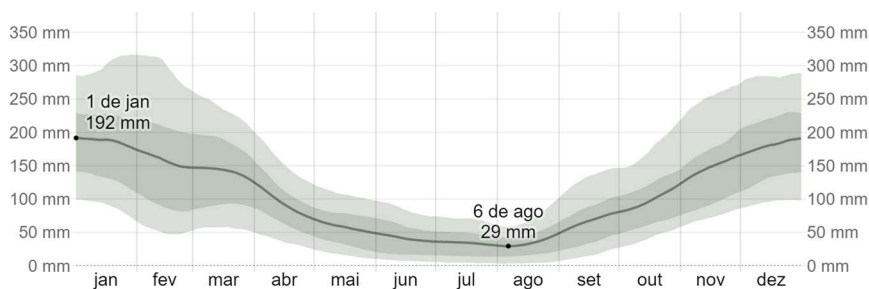
Por fim, a última estratificação realizada é referente o número de falhas das linhas de transmissões em função dos meses do ano, apresentado pela Figura 21, que encontra correlação com as Figuras 22, 23 e 24, fazendo referência a média das chuvas, umidade relativa do ar e velocidade do vento, respectivamente.

Figura 21 - Total de desligamentos na LT para cada mês



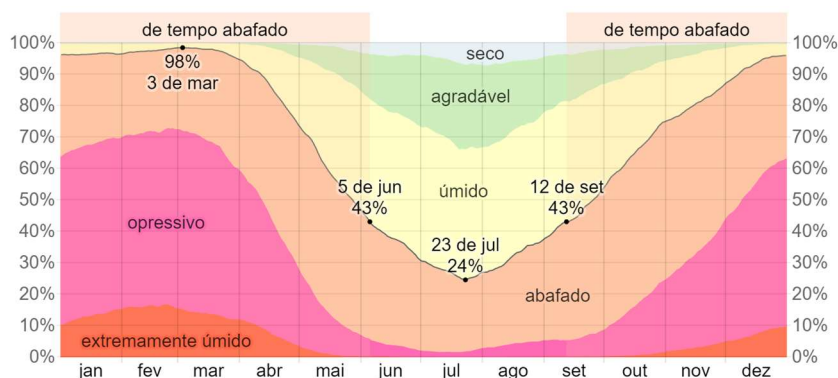
Fonte: Autor.

Figura 22 - Chuva mensal média no local



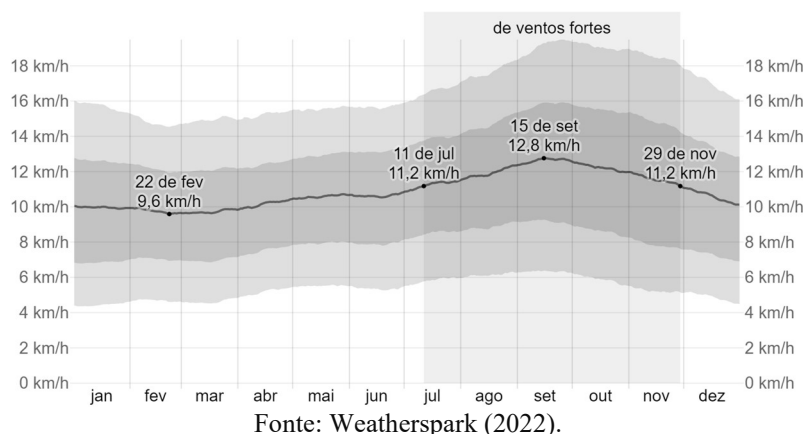
Fonte: Weatherspark (2022).

Figura 23 - Níveis de conforto em umidade no local



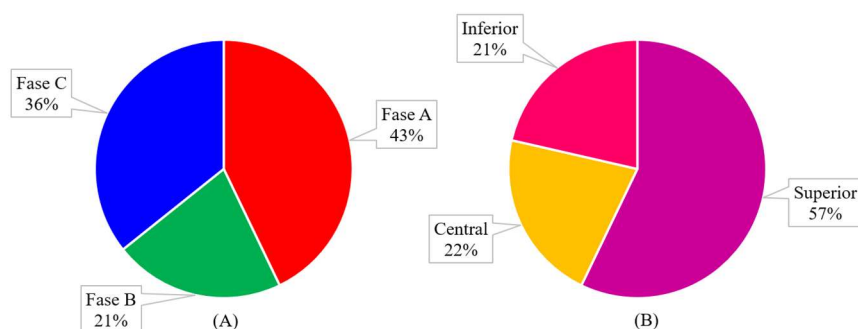
Fonte: Weatherspark (2022).

Figura 24 - Velocidade média do vento no local



Adicionalmente, a posição em que cada fase se encontra na torre deve ser levado em conta e também qual fase que originou o desligamento. Portanto, a Figura 25 indica as proporções de desligamentos em relação as fases do circuito (A, B ou C) e também em relação a posição da fase na torre (superior, inferior e central). Na Figura 25-(B) é observado que os desligamentos são originados em aproximadamente 60% das vezes pela fase que se encontra na posição mais distante do chão, o que corrobora com o índice de desligamentos por fase (Figura 25-(A)), onde a fases C no circuito da linha #1 se encontra na posição superior e a fase A no circuito da linha #2 se encontra na posição inferior, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 25 - Desligamentos nas linhas #1 e #2 para (A) - Cada fase; (B) - Posição das fases



Fonte: Autor.

Diante dos dados apresentados pelas Figuras 22, 23 e 24, em comparação com o número de desligamentos em função dos meses do ano, apresentado pela Figura 21, é observado que os meses que possuem maior número de falhas coincidem com o período do ano ao qual a LT é exposta a ventos maiores que a média e chuvas regulares, o que impacta diretamente no nível de umidade do local, afetando principalmente as fases A e C, que se encontram nas posições mais superiores da LT e por consequência estão mais susceptíveis ao acúmulo de particulados durante o período seco.

3.1.1 ANÁLISE DOS PARTICULADOS

Durante o levantamento das ocorrências de desligamentos da linha de transmissão, alguns isoladores presentes a linha foram objeto de estudo de particulados encontrados sobre os discos isolantes. Estes particulados foram amostrados e após análises laboratoriais, elaborou-se uma tabela buscando obter um comportamento característico para o ambiente em que a LT está situada, sendo os resultados apresentados pela Tabela 11, em porcentagem do total.

Tabela 11 - Média das amostras coletadas na LT

Elemento	Al ₂ O ₃	C	CaO	Cloreto	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	S	SiO ₂	Outros
Média	4,71%	8,41%	32,49%	0,20%	31,22%	1,29%	1,39%	0,75%	4,34%	11,31%	3,87%

Fonte: Adaptado de GSI (2022).

Sendo os principais elementos químicos encontrados na LT descritos a seguir.

- Al₂O₃: trióxido de alumínio;
- C: carbono;
- CaO: óxido de cálcio;
- Fe₂O₃: trióxido de ferro ;
- K₂O: óxido de potássio;
- MgO: óxido de magnésio;
- MnO: óxido de manganês;
- S: enxofre;
- SiO₂: dióxido de silicone.

Analisando a Tabela 11, é possível verificar que os componentes mais expressivos encontrados sobre o disco dos isoladores foram: óxido de cálcio (CaO), trióxido de Ferro (Fe₂O₃) e dióxido de silicone (SiO₂), sendo as respectivas porcentagens de 32,5%, 31,2% e 11,3%, totalizando aproximadamente 75% de todo o resíduo. Ademais, estes tipos de particulados são característicos de indústrias que operam com processos relacionados a fabricação de cimento e siderurgia. É importante ressaltar ainda, que esta análise não seguiu o método descrito em norma cabível, portanto possui caráter qualitativo para entender o grau de poluição do local ao qual a LT está exposta.

3.2 PREMISSAS CONSIDERADAS NO PROJETO DAS LT

Analisando o projeto durante a fase de concepção da linha de transmissão de 500 [kV], foi possível observar que a severidade de poluição adotada para o local foi considerada como leve (E1), e o DEEU sendo fixado em 14 [mm/kV], conforme apresentado pela Figura 26. Naturalmente, este valor foi utilizado uma vez que o local ainda não possuía um conjunto de indústrias que poderiam causar a mudança das características locais de poluição.

Figura 26 - SPL adotada durante a fase de projeto da linha de transmissão

Nos cálculos seguintes, é adotada a distância de escoamento específica de 14 mm/kV fase-fase, que se enquadra no nível I da publicação IEC 60815 e está de acordo com a prática usual para linhas de transmissão em 500 kV situadas em regiões com nível de poluição leve, como é o caso em estudo.

Fonte: Adaptado de GSI (2021).

Logo, uma vez que a consideração da distância de escoamento específica foi realizada, todo o projeto de concepção das torres da LT se iniciou, definindo distâncias de isolamento entre condutores e outros parâmetros. No entanto, devido ao aumento da intensidade das atividades das indústrias no local, houve mudança das características da poluição e elevação da quantidade de particulados depositados sobre os discos dos isoladores, conforme já analisado na seção 3.1.1.

De forma parcial, pode-se concluir que durante a concepção do projeto, o local de passagem da linha de transmissão de 500 [kV] sofre abrupta variação das características de poluição quando comparado aos dias atuais. Desta forma, com a adoção incorreta do parâmetro de poluição local, os isoladores foram subdimensionados, em termos de DE e DEEU. Conforme Tabela 8, o nível de poluição adequado para a faixa de passagem da LT é, no mínimo, E5 (Pesado), considerando uma DE mínima de 25 [mm/kV] ou DEEU mínima de 43,4 [mm/kV].

3.2.1 EQUIPAMENTOS ISOLANTES – CADEIA DE ISOLADORES

A linha de transmissão objeto deste trabalho possui dois tipos de cadeias de isoladores, as cadeias responsáveis por realizar a ancoragem e cadeias responsáveis por realizar a suspensão dos condutores. Uma vez que as cadeias de ancoragem tendem a ficar posicionadas horizontalmente, o acúmulo de particulado sobre os discos isolantes é significativamente menor quando comparado com as cadeias de suspensão, as quais são posicionadas verticalmente nas torres. Por este motivo, as cadeias de ancoragem facilitam a limpeza natural dos isoladores, e serão desconsideradas durante a análise.

Na LT objeto desta análise, foram utilizados desde a concepção de projeto isoladores confeccionados com material de vidro temperado e perfil normal. As cadeias de isoladores são em sua maioria cadeias de suspensão, onde os isoladores estão associados em série, para formar a distância de isolamento necessária. Desta forma, as principais características do isolador adotado para realizar o isolamento das fases com relação a terra é abordado pela Tabela 12.

Tabela 12 - Característica dos isoladores adotados durante a concepção de projeto

Características	Unidade	Suspensão Simples
Perfil	-	Normal
Carga mecânica de ruptura	[kN]	120
Diâmetro do disco	[mm]	254
Passo	[mm]	146
Distância de escoamento (DE)	[mm]	320

Fonte: Adaptado de GSI (2021).

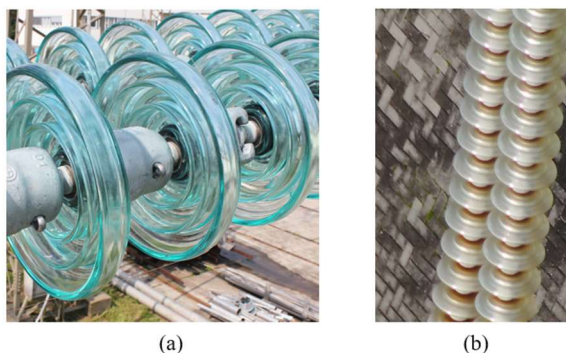
3.2.1.1 ESTADO DE CONSERVAÇÃO

Este item trata sobre o estado de conservação de algumas cadeias de isoladores que apresentam componentes faltantes (isoladores), estão sujas ou apresentam corpos estranhos presos aos mesmos.

Um conjunto de isoladores novos é mostrado pela Figura 27-(a), na qual é possível notar que o disco isolante é feito de vidro transparente e não possui ranhuras, rachaduras ou trincas. Sob o disco isolador não há acumulo de detritos ou material particulado e a campânula do isolador possui cor metálica fosca, sem apresentar oxidação.

Já na Figura 27-(b), é mostrado um conjunto de isoladores já em uso e a coloração do disco isolante foi alterada pela exposição ao ambiente com características severas. Próximo a campânula do disco é observado uma faixa mais escurecida, indicando acumulo constante de particulado que foi retirado com a ação do vento e/ou chuvas intensas.

Figura 27 - Comparação entre isoladores: (a) - Novo; (b) - Usado



Fonte: Sediver (2017) e Adaptado de GSI (2021).

Diante do exposto, é esperado que um disco isolador em uso apresente escurecimento ao longo de sua vida útil, porém que não apresente ranhuras, rachaduras ou trincas. Para as campânulas, embora não sendo claramente exposta pela Figura 27-(b), é esperado que haja um desgaste da coloração do material, mas que não apresente sinais de oxidação.

As Figura 28 e 29 abordam isoladores que foram sujeitos a descargas disruptivas (*flashover*), sendo possível verificar a coloração enferrujada sobre os discos dos isoladores e também rachaduras e trincas nos discos isolantes de vidro. Ademais, a campânula dos isoladores apresenta elevado nível de corrosão, perdendo sua característica fosca e passando para uma característica enferrujada. Desta forma conclui-se, a partir do exposto pelas Figura 28 e 29 que a severidade da poluição local impacta diretamente sob a vida útil dos isoladores.

Figura 28 - Registros de descargas disruptivas na cadeia de isoladores



Fonte: Adaptado de GSI (2021).

Figura 29 - Registros de descargas disruptivas na cadeia de isoladores

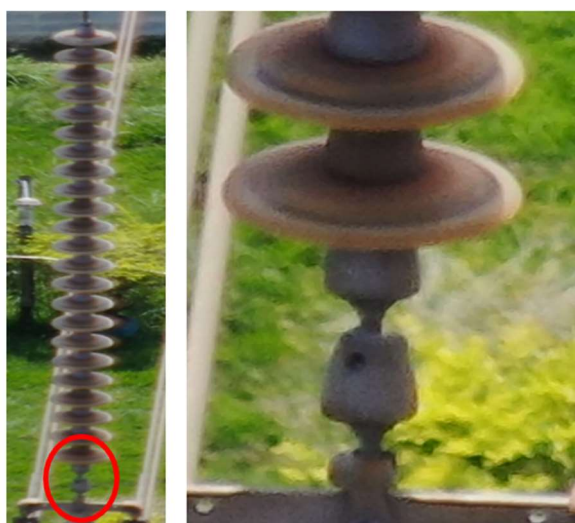


Fonte: Adaptado de GSI (2021).

A capacidade de isolação da cadeia de isoladores pode ser afetada pela falta dos discos dos isoladores, que podem ter caído devido a alguns fenômenos elétricos ou devido a ação humana de vandalismo com as cadeias. Desta forma, uma cadeia de isoladores adequada a operação tende a oferecer a cada isolador uma DDP relativamente baixa, quando comparada a DDP total da cadeia.

Uma vez que um ou mais elementos da cadeia apresenta falta dos discos isolantes, conforme apresentado na Figura 17, a DDP é dividida por menos elementos, o que acaba colocando um estresse elétrico, devido ao aumento do campo elétrico sobre os elementos restantes, podendo gerar uma ruptura da capacidade de isolação dos elementos restantes mais avariados e evoluir para o fenômeno de *flashover*. A Figura 30 ilustra cadeias de isoladores com um ou mais elementos faltantes.

Figura 30 - Demonstração da falta de dois discos de vidro em uma cadeia de isoladores



Fonte: Adaptado de GSI (2021).

Nas Figuras 31 e 32 são apresentadas algumas cadeias presentes na linha de transmissão de 500 [kV], sendo estas cadeias destacadas por apresentarem alto acúmulo de particulado, objetos estranhos presos as cadeias, marcas de oxidação e excremento de pássaros.

Figura 31 - Destaques da inspeção visual realizada nas cadeias de isoladores da LT



Fonte: Adaptado de GSI (2021).

Figura 32 - Destaques da inspeção visual realizada nas cadeias de isoladores da LT



Fonte: Adaptado de GSI (2021).

Portanto, as cadeias de isoladores presentes na linha de transmissão de 500 [kV] que percorre um trecho total de 6 [km] sofrem com a poluição local gerada por instalações industriais e atividades urbanas que estão em próximas ao local de passagem da LT e tem a característica de operar continuamente. Estas cadeias de isoladores sofrem com a ações ambientais, climáticas e humanas (quando há ocorrência de vandalismo), e, portanto, suas características isolantes se deterioram com o passar do tempo.

Desta forma, os destaques mostrados nas Figuras 30 a 32 ajudam construir o cenário que levou a LT a um aumento na taxa de falhas da LT, uma vez que as distâncias de escoamento dos isoladores foram dimensionadas para ambientes de baixíssima poluição, o que vai na contramão das condições práticas de operação da LT. Parte dos isoladores e cadeias de isoladores são encontrados em cores acinzentadas e enferrujadas, os materiais metálicos, com oxidação e, alguns isoladores também não apresentam mais discos isolantes. Logo, o conjunto de problemas verificados e apresentados compromete o bom funcionamento da linha de transmissão, o que é traduzido em um número muito maior de falhas do que o esperado.

3.3 MODELAGEM DO SISTEMA NO ATPDRAW

Para modelagem e simulações o sistema elétrico em análise foi representado de forma simplificada por meio das impedâncias equivalentes de curto-circuito, representação das linhas de transmissão em circuito duplo e os principais componentes e equipamentos elétricos do sistema em análise. Para esta análise foi utilizado o programa ATPDraw, amplamente utilizado para estudos na área de transitórios eletromagnéticos.

Serão avaliados aqui os comportamentos das formas de onda das tensões e correntes frente a registros de oscilografias disponibilizadas. O intuito das simulações é aproximar dos fenômenos elétricos que levaram os respectivos desligamentos intempestivos da LT.

3.3.1 CONCESSIONÁRIO DE ENERGIA

Os sistemas de suprimento de energia elétrica local serão modelados como sendo uma fonte ideal de tensão em série com impedâncias equivalentes concentradas, oriundas dos valores de curto-circuito fase-terra e trifásico nas barras de interesse.

Desta forma, foram modelados no programa duas fontes de tensão equivalentes que irão representar o SIN e uma fonte de tensão que está presente no barramento de interesse, que interliga o SIN ao sistema industrial por meio das linhas de transmissão de 500 [kV].

Os valores de curto-circuito apresentados para base de 100 [MVA] e 500 [kV], são apresentados e foram obtidos com o software ANAFAS, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL).

1ª Fonte de tensão

Corrente de Curto-Circuito Trifásico (Simétrica)	4,3 kA
Relação X/R Trifásica	22
Corrente de Curto-Circuito Monofásico (Simétrica).....	3,3 kA
Relação X/R Monofásica.....	6

2ª Fonte de tensão

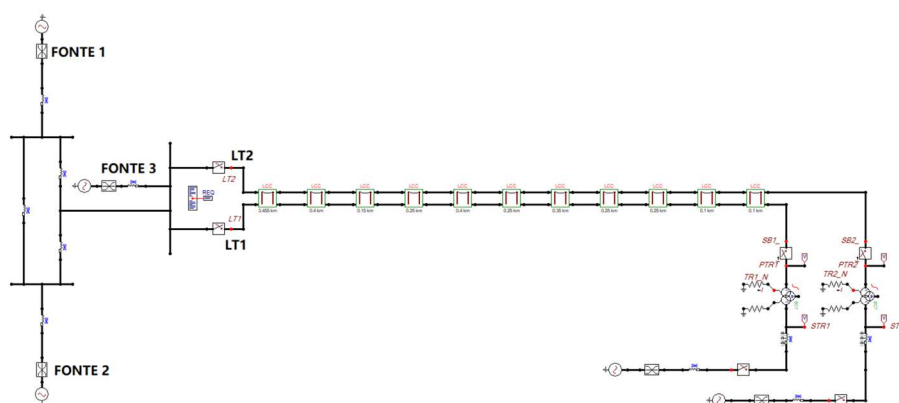
Corrente de Curto-Circuito Trifásico (Simétrica)	11,7 kA
Relação X/R Trifásica	16
Corrente de Curto-Circuito Monofásico (Simétrica).....	8,4 kA
Relação X/R Monofásica.....	6

3ª Fonte de tensão

Corrente de Curto-Circuito Trifásico (Simétrica)	1,2 kA
Relação X/R Trifásica	41
Corrente de Curto-Circuito Monofásico (Simétrica).....	1,4 kA
Relação X/R Monofásica.....	29

O diagrama unifilar simplificado do sistema em análise está apresentado na Figura 33, modelado no programa ATPDraw.

Figura 33 - Diagrama unifilar simplificado utilizado na modelagem



Fonte: Autor.

3.3.2 DADOS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

Os parâmetros relacionados às linhas de transmissão com circuito duplo (linha #1 e linha #2) em 500 [kV] estão relacionados a seguir. Para a representação e modelagem do sistema foram utilizados como base a sub-rotina LCC (*Line Cable Constants*) do ATPDraw, tomando-se como base as informações do projeto da LT, conforme relacionados a seguir.

Condutor de fase	636 CAA MCM (GROSBEAK)
Corrente Nominal (I_N)	3160 A
Tensão Nominal (U_N)	500 kV
Comprimento da linha (L)	6 km
Bitola dos condutores de fase (Alumínio + alma de aço).....	374,8 mm ²
Quantidade de condutores por fase.....	4
Material condutor	Alumínio
Dados dos Cabos Para-Raios.....	OPGW

3.3.3 DADOS DOS TRANSFORMADORES

Os dados dos transformadores que realizam o interfaceamento de tensão de 500 [kV] para 138 [kV] na entrada do parque industrial são apresentados a seguir. É importante ressaltar que para esta análise ambos os transformadores foram considerados idênticos, sendo apresentado somente os dados mais relevantes destes equipamentos para o estudo.

Tensão nominal primária	525 kV
Tensão nominal secundária	138 kV
Tensão nominal terciária	13,8 kV
Potência nominal lado primário ONAN	225 MVA
Potência nominal lado secundário ONAN	225 MVA
Potência nominal lado terciário ONAN.....	37,5 MVA
Impedância percentual de sequência positiva - primário e secundário	12,27%
Impedância percentual de sequência positiva - primário e secundário	3,07%
Impedância percentual de sequência positiva - primário e terciário	0,77%
Impedância de sequência zero - primário e secundário	12,09%
Impedância de sequência zero - primário e terciário	18,29%
Impedância de sequência zero - secundário e terciário	4,76%
Tipo de conexão do primário.....	Estrela aterrada
Tipo de conexão do secundário	Estrela isolada
Tipo de conexão do terciário	Delta

3.4 ESTRUTURAÇÃO DOS CASOS ANALISADOS

Para caracterização dos desligamentos intempestivos da linha de transmissão foram realizadas simulações que são modelos simplificados do sistema elétrico em análise. Os resultados destas simulações serão utilizados para comparação com os obtidos por meio de registros oscilográficos em eventos específicos de desligamentos da LT.

3.4.1 DEFINIÇÃO DOS DESLIGAMENTOS NÃO PROGRAMADOS

Serão considerados os eventos de desligamentos não programados na LT que ocorreram em outubro de 2021 as 3h30min, associado a uma falta do tipo fase a terra da fase A na linha #2 e as 3h55min, associado a uma falta a terra da fase B na linha #1. Para o primeiro evento, o sistema elétrico se encontrava em condições normais de operação e ambos os transformadores operavam sob regime permanente. No segundo evento, o transformador presente na linha #1 estava operando a vazio e o transformador presente na linha #2 estava fora de operação, ou seja, desconectado do SIN.

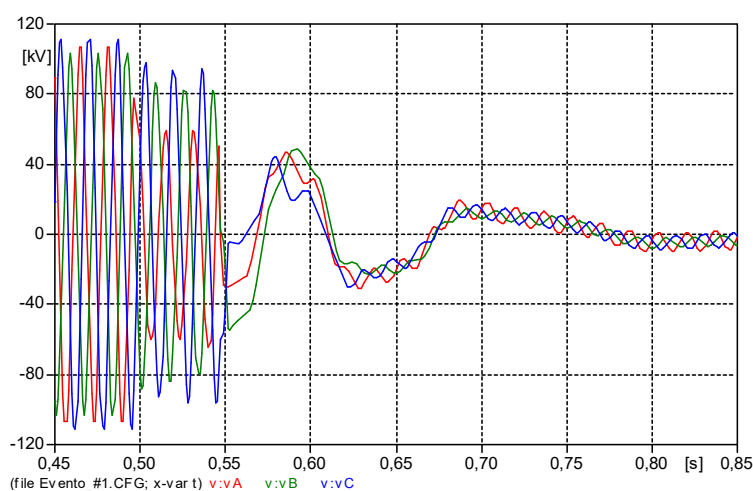
Nos itens a seguir será incluída uma descrição mais abrangente dos casos, sendo os resultados das simulações discutidas na seção 4 deste trabalho.

3.4.1.1 CASO 1

Foi considerado para este estudo que o sistema elétrico industrial estava operando sob regime permanente e com ambos os transformadores que alimentam a planta industrial exercendo suas características normais de operação.

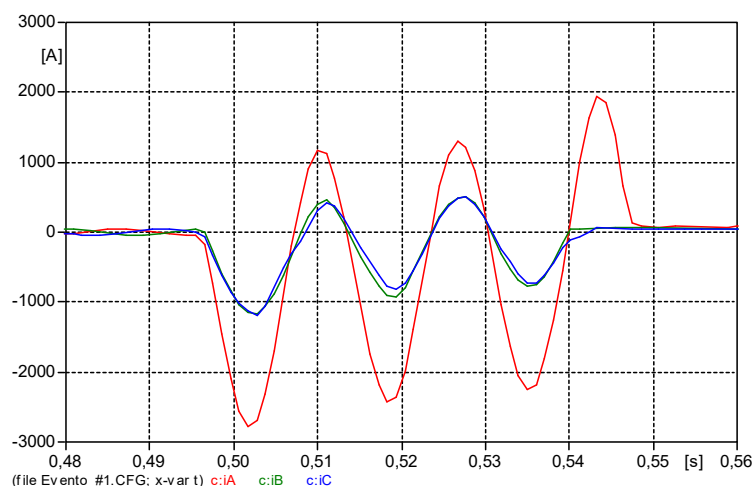
Uma falta do tipo fase-terra na fase A da linha #2 foi simulada, buscando o mesmo comportamento das tensões de fase e correntes de linha, que são apresentadas pelas Figuras 34, 35 e 36.

Figura 34 - Formas de onda das tensões U_a , U_b e U_c no lado de 138 [kV] do TR 2



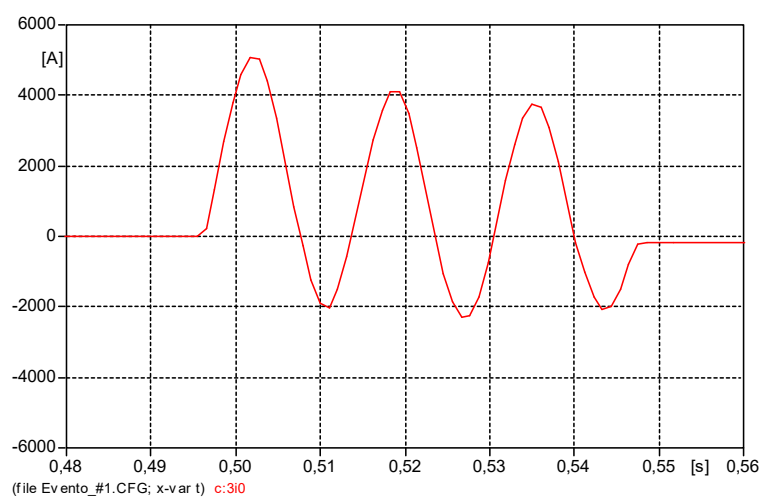
Fonte: Adaptado de GSI (2021).

Figura 35 - Formas de onda das correntes Ia, Ib e Ic no lado em 500 [kV] do TR 2



Fonte: Adaptado de GSI (2021).

Figura 36 - Formas de onda da corrente de neutro no lado em 500 [kV] do TR 2



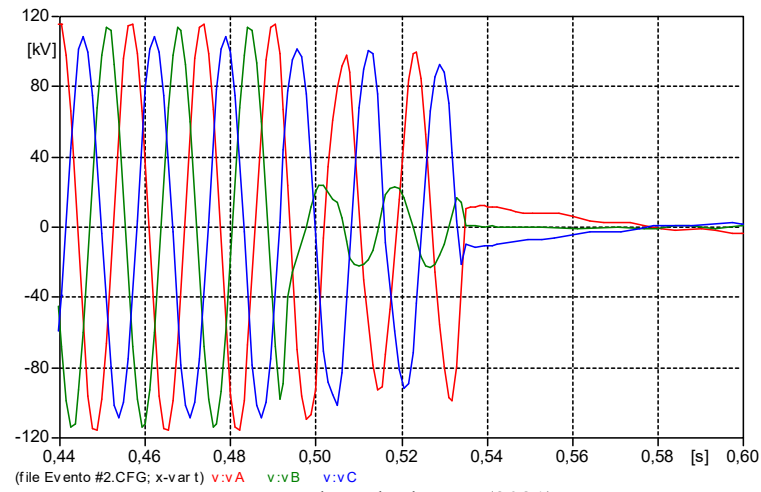
Fonte: Adaptado de GSI (2021).

3.4.1.2 CASO 2

Este caso considerou as fontes equivalente da LT operando sob regime permanente e o sistema elétrico industrial desconectado de ambos os transformadores, no qual o transformador presente na linha #1 estava operando á vazio (sem carga) e o transformador presente na linha #2 estava desenergizado (desligado).

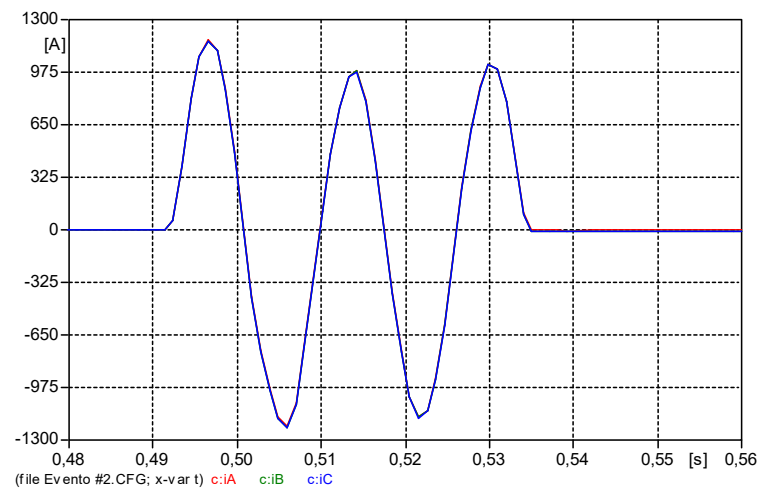
Uma falta do tipo fase-terra na fase B da linha #1 foi simulada, buscando o mesmo comportamento das tensões de fase que são mostrados nas oscilografias apresentadas pelas Figuras 37, 38 e 39.

Figura 37 - Formas de onda das tensões U_a , U_b e U_c no lado de 138 [kV] do TR 2



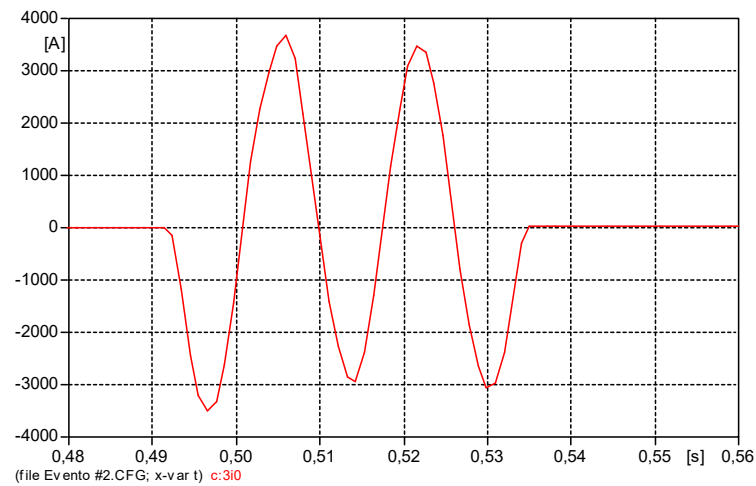
Fonte: Adaptado de GSI (2021).

Figura 38 - Formas de onda das correntes I_a , I_b e I_c no lado de 500 [kV] do TR 2



Fonte: Adaptado de GSI (2021).

Figura 39 - Forma de onda da corrente de neutro no lado de 500 [kV] do TR 2



Fonte: Adaptado de GSI (2021).

4 RESULTADOS

Este capítulo tem o objetivo de sustentar e definir os tipos de mecanismos de falhas que levou aos desligamentos intempestivos da linha de transmissão de 500 [kV], a qual se estende ao longo de 6 [km]. Os resultados obtidos aqui são oriundos das discussões realizadas no Capítulo 3 deste trabalho e também dos resultados de transitórios eletromagnéticos obtidos por meio do programa ATPDraw.

4.1 ANÁLISE GERAL DA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 500 [kV]

A linha de transmissão de 500 [kV], objeto deste estudo, que possui 6 [km] de extensão, apresentava tendência a falhar desde seu primeiro ano de operação, tendo ênfase para desligamentos durante o período úmido do ano (novembro até abril), sendo que as falhas dos meses de outubro e novembro correspondem a aproximadamente 70% de todos os desligamentos intempestivos ao longo da operação da LT.

Ademais, a LT apresentou todas as falhas intempestivas no período noturno e principalmente na madrugada (23h até 6h), sendo este período associado a altos índices de umidade no ar e conhecido por uma tendência de alívio de carga, que acarreta muitas vezes em elevações das tensões de operação do sistema.

Parte dos isoladores superiores das cadeias de suspensão apresentam coloração enferrujada e até mesmo marcas de descargas disruptivas, quando não apresentam falta de discos isolantes (efeito de vandalismo ou descargas), notória ferrugem nas ferragens dos isoladores, objetos estranhos presos as cadeias e dejetos de pássaros sobre os discos. Além disto, durante a concepção de projeto da LT, a distância de escoamento foi adotada como sendo de 14 [mm/kV] (Nível leve de SPL).

Algumas amostras dos particulados acumulados sobre os discos isolantes foram levadas para análise qualitativa em laboratório. Os particulados eram compostos, em sua maioria, por óxido de cálcio, trióxido de ferro e dióxido de silicone, componentes característicos de fortes atividades industriais.

Deste modo, observa-se que o vão de servidão que a LT percorre mudou drasticamente de condições ambientais, saindo de um ambiente considerado leve (E1) (Figura 26) para um ambiente que pode ser dito no mínimo pesado ($\geq$ E5).

Em síntese, a sobreposição de todos os efeitos de clima, época do ano, alívio de carga durante a madrugada, premissas incorretas durante concepção do projeto e principalmente o efeito combinado de umidade e alta severidade de poluição local levaram a LT as falhas intempestivas que ocorreram regularmente desde sua implementação para operação.

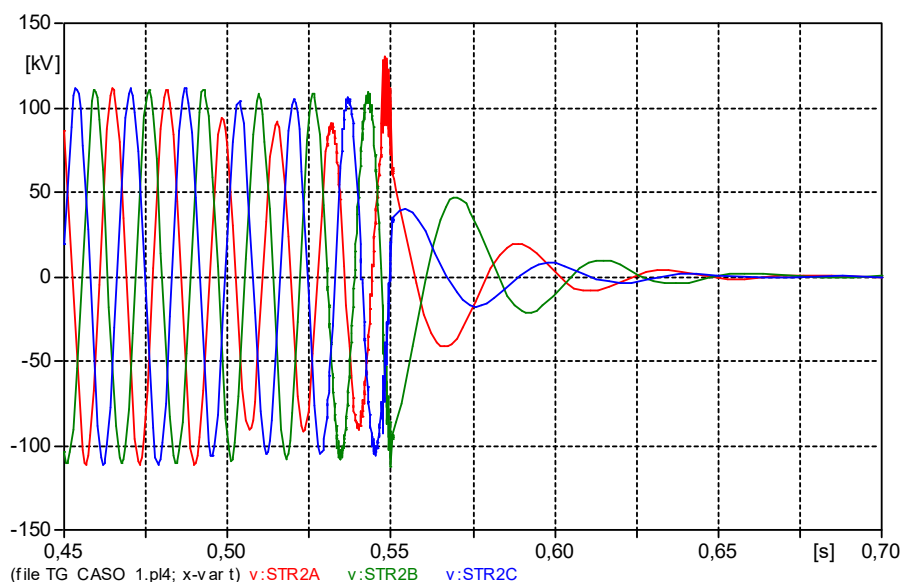
4.2 SIMULAÇÃO COM O ATPDRAW

4.2.1 Caso 1

Conforme visto na Figura 34, nos instantes que antecederam a primeira ocorrência (3h30min), as formas de onda das tensões estão normais e com pequena assimetria. Próximo ao instante de 0,50 [s], a Fase A que apresentava tendência de subida no valor da tensão, é interrompida e começa a descer. As outras duas fases são (não envolvidas com a falha), continuam tendo comportamento senoidal, porém com redução de suas amplitudes. Próximo ao instante 0,55 [s] ocorre o seccionamento da LT, sendo possível observar um forte efeito residual que permanece por aproximadamente 0,15 [s].

Na Figura 40 é apresentado o comportamento das tensões fase-terra durante as simulações de transitórios eletromagnéticos. É possível observar que o comportamento geral da simulação é muito similar ao comportamento obtido nas oscilografias. Na simulação houve a redução da amplitude das senoides após a ocorrência da falta monofásica, próximo ao instante 0,50 [s] e mais adiante, após ao instante 0,55 [s], quando ocorreu o seccionamento da LT, sendo possível verificar um comportamento semelhante ao registrado nas oscilografias.

Figura 40 - Tensões U_a , U_b e U_c do TR 2 do lado em 138 [kV] - Simulação

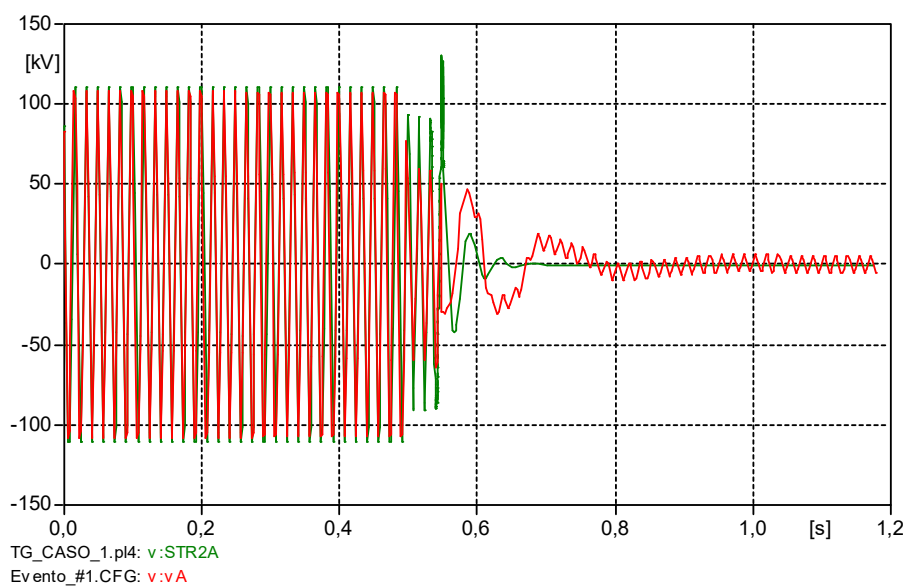


Fonte: Autor.

Na Figura 41 é apresentado um detalhamento e comparação entre os resultados das oscilografias (vermelho) e simulações (verde) para as formas de onda da tensão U_a , no lado de 138 [kV], durante a primeira ocorrência na LT2. Nota-se que o caso simulado não apresenta exatamente o mesmo comportamento durante o desligamento da LT, uma vez que foi considerado para as simulações somente os dados dos transformadores e linhas de transmissão.

A diferença observada entre a simulação e o efeito real é oriunda de cabos condutores, motores e geradores elétricos que não foram contabilizados durante os efeitos de transitórios eletromagnéticos, deixando de contribuir para uma representação mais fiel dos transitórios eletromagnéticos que ocorrem durante a falha do sistema.

Figura 41 - Detalhe das formas de onda da fase em falta (U_a) do TR 2, no lado de 138 [kV] - Simulação *versus* Oscilografia

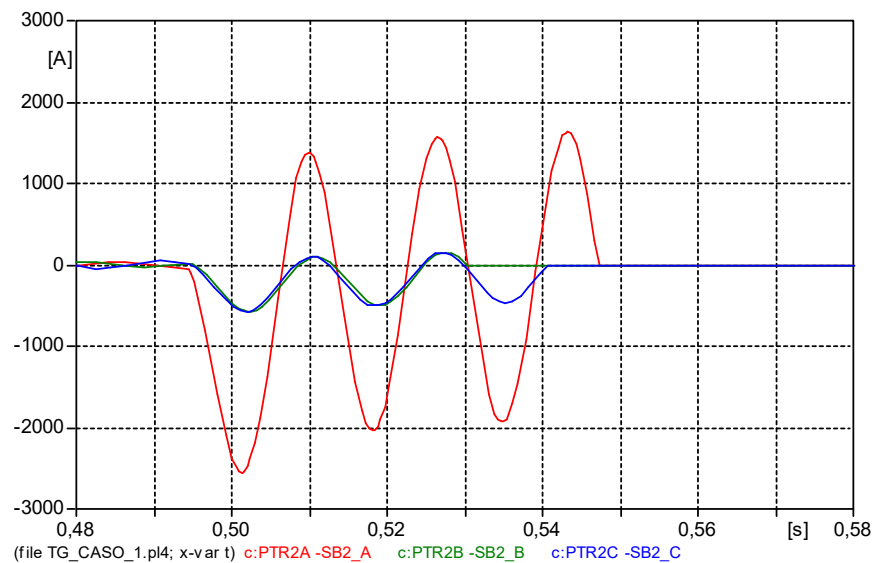


Fonte: Autor.

Na Figura 35 estão ilustradas as formas de onda das correntes de linha do lado de alta tensão do transformador 2, na qual é possível observar um comportamento assimétrico das três correntes e também que a Fase A apresenta uma amplitude superior as outras duas correntes. A ocorrência de assimetria das correntes e crescimento das amplitudes ocorre próximo ao instante 0,5 [s] e permanece até o instante de seccionamento da LT, próximo a 0,55 [s].

Os resultados das simulações referentes as formas de ondas das correntes de linha que alimentam o transformador 2 de 500/138 [kV] são apresentadas pela Figura 42, sendo possível verificar um comportamento semelhante ao observado nos registros oscilográficos. No entanto, as correntes relacionadas as fases sãs apresentam amplitude diferente das vistas no relé do transformador 2.

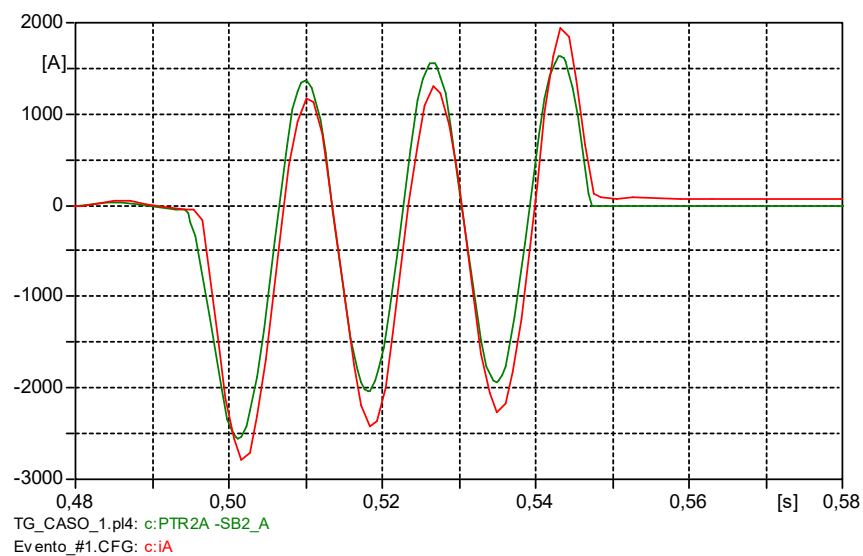
Figura 42 - Formas de ondas das correntes Ia, Ib e Ic do TR 2 no lado de 500 [kV] -
Simulação



Fonte: Autor.

Na Figura 43 é apresentado um detalhamento das formas de onda das correntes da Fase A, sendo o resultado da oscilografia (vermelho) e o da simulação (verde). Observa-se que o comportamento das amplitudes é próximo do visto pelo relé do transformador 2 e as formas das ondas das correntes das Fase A se comportam também de modo muito similar. Reitera-se que ambos os efeitos observados não são iguais devido as simplificações durante a realização das simulações de transitórios eletromagnéticos.

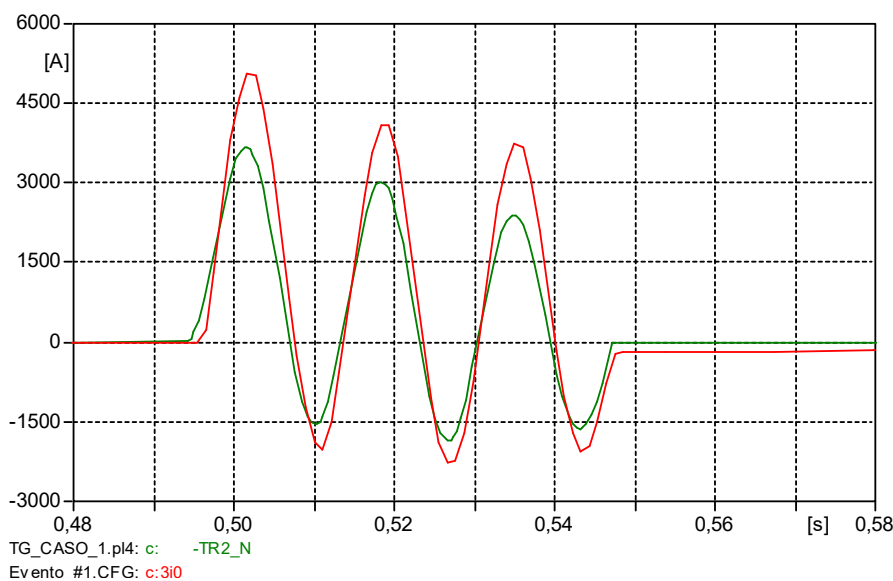
Figura 43 - Detalhe das formas de onda das correntes da fase em falta (Ia) no TR 2 no lado de
500 [kV] - Simulação *versus* Oscilografia



Fonte: Autor.

Por fim, é realizada uma comparação entre as formas de onda das correntes que circulam pelo neutro do sistema e simulação, ilustrada graficamente na Figura 44, na qual a oscilografia (vermelho) e a simulação (verde) na LT2 mostram a mesma tendência de comportamento, mas com amplitudes distintas, com ênfase para as assimetrias vistas nas correntes.

Figura 44 - Detalhe das formas de onda das correntes de neutro no TR 2 no lado de 500 [kV] - Simulação *versus* Oscilografia



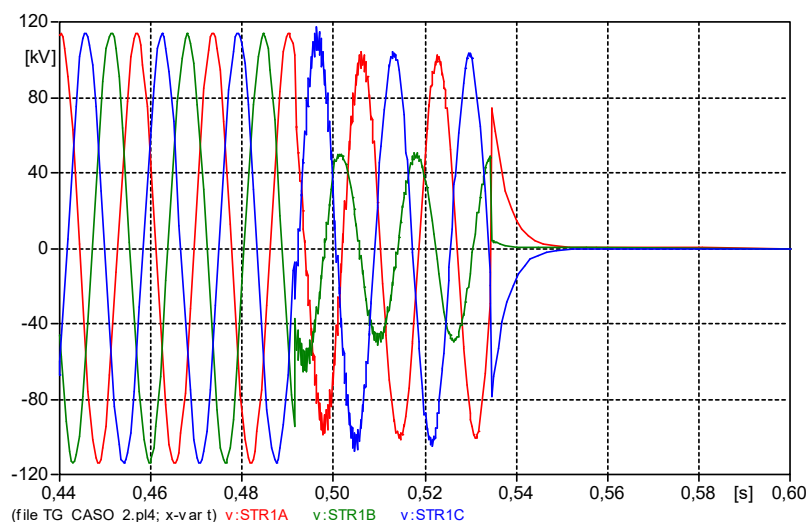
Fonte: Autor.

4.2.2 Caso 2

Conforme visto na Figura 37, nos momentos que antecedem a ocorrência da segunda falha na LT de 500 [kV], as tensões apresentam pequenas assimetrias. Próximo ao instante de 0,49 [s], a tensão na Fase B que apresentava tendência de descida, é interrompida por uma falha e próximo ao seu vale ocorre uma inversão e apresenta tendência de crescimento da amplitude de tensão e deixa a forma de onda distorcida. Próximo ao instante 0,54 [s] a LT é seccionada, deixando de operar. É possível observar que entre o instante 0,5 [s] e 0,54 [s] há uma abrupta redução da tensão na Fase B, seguida por uma leve redução das tensões nas fases sãs.

Na Figura 45 é apresentado o comportamento das tensões fase-terra durante as simulações de transitórios eletromagnéticos. O comportamento geral da simulação é similar ao comportamento obtido nas oscilografias. Na simulação houve a redução da amplitude das senoides após a incidência da falta monofásica, próximo ao instante 0,50 [s] e mais adiante, após ao instante 0,55 [s], onde houve o seccionamento da LT, sendo possível verificar um comportamento semelhante ao visto nas oscilografias.

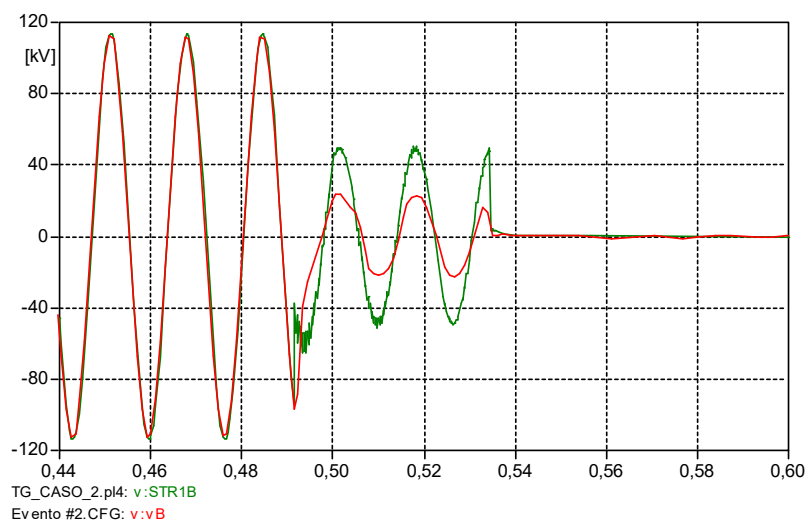
Figura 45 - Tensões Ua, Ub e Uc do TR 1 do lado de 138 [kV] - Simulação



Fonte: Autor.

Na Figura 46 é realizado um detalhamento e a comparação entre os resultados das oscilografias (vermelho) e simulações (verde) para as formas de onda da tensão Ub, no lado de 138 [kV], durante a ocorrência na linha #1. Nota-se que o caso simulado apresenta de forma muito semelhante e o mesmo comportamento observado durante o desligamento da LT, uma vez que foi considerado para as simulações somente os dados dos transformadores e linhas de transmissão. A diferença vista na amplitude da tensão Ub da simulação é oriunda do efeito de cabos condutores, motores e geradores elétricos que não foram contabilizados durante as simulações de transitórios eletromagnéticos, deixando de contribuir para uma representação mais fiel do sistema analisado.

Figura 46 - Detalhe das formas de onda das tensões da fase em falta (Ub) no TR 1 do lado em 138 [kV] - Simulação *versus* Oscilografia

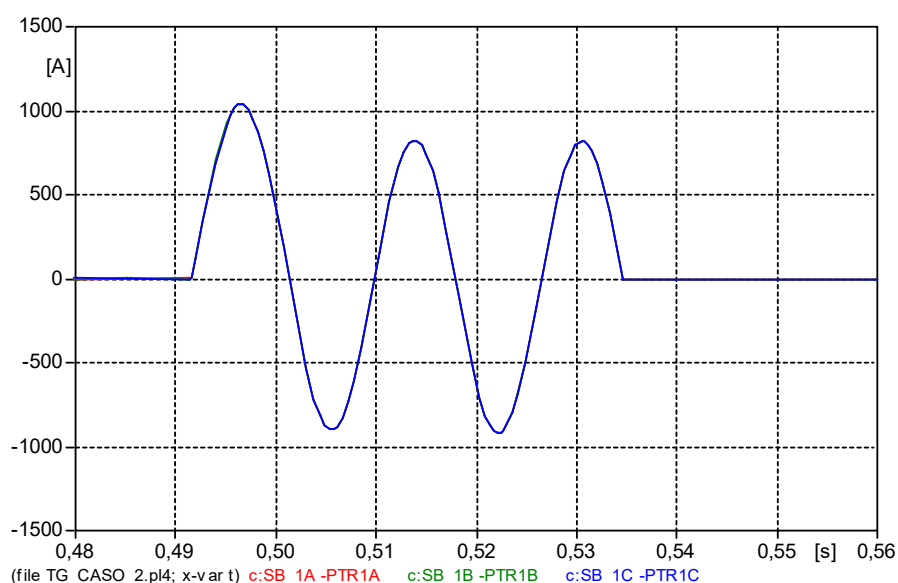


Fonte: Autor.

Na Figura 38, apresentam-se as formas de onda das correntes de linha do lado de alta tensão do transformador 1, na qual é possível observar um comportamento idêntico das três correntes Ia, Ib e Ic. O início do fenômeno ocorre próximo ao instante 0,49 [s] e é findado com o seccionamento da LT, próximo ao instante 0,53 [s]. As correntes apresentam amplitude máxima de aproximadamente 1,2 [kA] e quando comparadas com a corrente de neutro, (Figura 49), é notável que a corrente do neutro é resultado da soma das três correntes de linha.

As formas de ondas das correntes de linha que alimentam o transformador 1 de 500/138 [kV] são apresentadas na Figura 47, sendo possível verificar um comportamento similar ao observado diante dos registros oscilográficos.

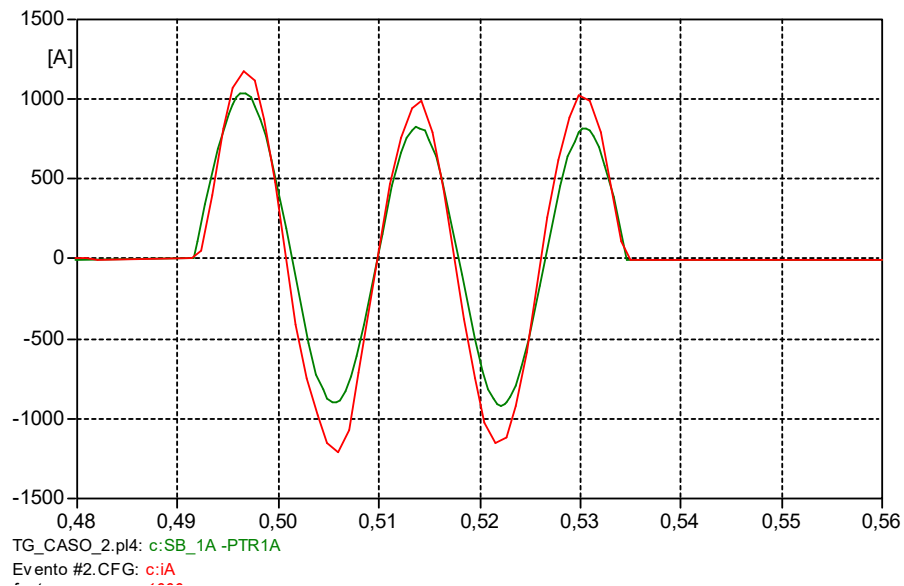
Figura 47 - Formas de ondas das correntes Ia, Ib e Ic do TR 1 em 500 [kV] - Simulação



Fonte: Autor.

Na Figura 48 é apresentado um detalhamento das formas de onda das correntes da Fase A, sendo ilustrado o resultado da oscilografia (vermelho) e o da simulação (verde). Observa-se que o comportamento das amplitudes é próximo do visto pelo relé do transformador 1 e a forma com que a onda de corrente das Fase A se comporta também é muito similar. Reitera-se que ambos não são iguais devido as simplificações durante a realização das simulações de transitórios eletromagnéticos.

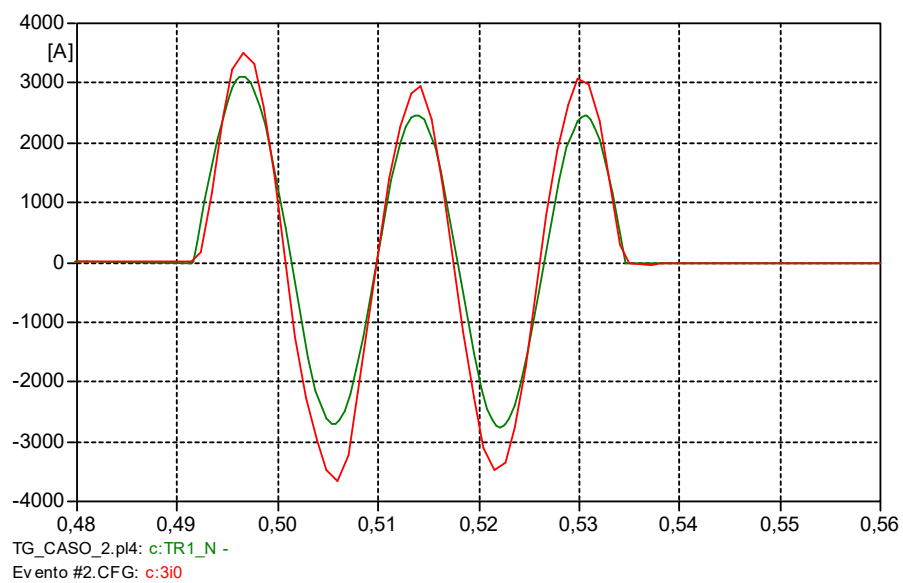
Figura 48 - Detalhe das formas de onda das correntes da fase em falta (I_a) no TR 1 no lado de 500 [kV] - Simulação *versus* Oscilografia



Fonte: Autor.

Por fim, é realizada uma comparação entre as formas de ondas das correntes que circulam pelo neutro do sistema (vermelho) e o da simulação (verde), ilustrada graficamente por meio da Figura 49, na qual a oscilografias e a simulação na LT1 mostram a mesma tendência de comportamento, sendo a única diferença a amplitude das formas de onda.

Figura 49 - Detalhe das formas de onda das correntes de neutro do TR 1 no lado de 500 [kV] - Simulação *versus* Oscilografia



Fonte: Autor.

4.3 DEFINIÇÃO DO MECANISMO DE FALHA

Conforme já abordado, a norma IEC/TS 60815 cita a sequência de acontecimentos que auxiliam na caracterização da falha por *flashover*. Logo, com auxílio da sequência indicada em norma e a partir da análise das condições do ambiente em que a LT está exposta, pode-se verificar que os fatores climáticos possuem relação direta com as falhas intempestivas, uma vez que a combinação de períodos de altas umidades após períodos sob condições de tempo seco corroboram com o aumento dos riscos de descargas disruptivas (*flashover*), que combinados com severas poluições dos isoladores, podem culminar em falhas operacionais não esperadas.

Neste sentido, a maioria dos casos de curto-circuito do tipo fase-terra foram devido as falhas de isolamento nas cadeias de isoladores, uma vez que, além dos sinais físicos típicos apresentados nos isoladores, ocorrem principalmente durante os instantes próximos aos valores de pico das tensões, momento este no qual se impõe a maior solicitação aos dielétricos, sendo uma característica típica para falhas de isolamento, conforme observado no exposto pelas simulações.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma avaliação e análise das ocorrências envolvendo diversos desligamentos intempestivos da LT com tensão de operação de 500 [kV] e extensão total de 6,0 [km], que apresenta uma média de 1,1 desligamento por ano. O submódulo 2.4 elaborado pelo ONS, voltado para os requisitos mínimos de linhas de transmissão aéreas, estabelece que linhas de transmissão com tensão igual ou superior a 345 [kV], devem apresentar 1 desligamento por 100 [km] por ano. Portanto, o número desligamentos não programados que a LT realiza é muito superior ao estabelecido pelo ONS.

Analisando os resultados obtidos, pode-se verificar que a maioria absoluta das falhas foram do tipo fase-terra e ocorreram em condições normais de operação. Além disso, verificou-se que os desligamentos não programados ocorreram em maioria no período úmido do ano (novembro a abril), especificamente para os meses de outubro e novembro, sendo relacionadas ao período da madrugada (23h até 6h). Desta forma, os fatores climáticos possuem relação direta com as falhas, uma vez que o efeito combinado de altas umidades após um longo período seco colaboram com o aumento dos riscos de possíveis descargas disruptivas em regime de operação normal e que combinadas com severas condições de poluição enfrentadas pelos isoladores, acarretam em falhas operacionais não esperadas.

As simulações formaram parte fundamental durante análise e caracterização do fenômenos que constantemente leva a LT a falhar. Com os resultados das formas de onda visto nas simulações pode-se verificar que as faltas ocorridas foram do tipo falta-terra nas fases A e B durante os eventos analisados, tendo origem próximo ao pico da tensão que apresenta falha.

Portanto, conclui-se que a maioria das falhas intempestivas foram originadas dos curtos-circuitos do tipo fase-terra oriundos de falhas de isolamento nas cadeias de isoladores, cuja explicação é descrita como sendo relacionada a disrupção pela presença de condições críticas de poluição, seja pela perda da capacidade de rigidez dielétrica do isolante, alteração da condição de isolamento ou o efeito denominado de disrupção repentina.

TRABALHOS FUTUROS

A seguir serão apresentados alguns temas que podem ser explorados a partir deste trabalho:

- Estruturação de uma proposta de substituição dos isoladores atuais por novos isoladores que forneçam distância de escoamento compatível com o SPL do local de passagem da LT;
- Análise de coordenação de isolamento da LT, verificando seu comportamento durante descargas atmosféricas;
- Levantamento de métodos ou procedimentos de manutenção que podem ser aplicados em uma LT;
- Mapear os níveis de poluição das regiões onde a linha de transmissão é presente de forma quantitativa e em consonância com a norma IEC/TS 60815 (2008);
 - Análise da interação de pássaros com as linhas de transmissão, identificando potenciais problemas

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional: módulo 8 – qualidade da energia elétrica.** Brasília: ANEEL, 2022. Disponível em: <https://tinyurl.com/2vkz7f2m>. Acesso em: 25 nov. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatório de análise - desligamentos forçados do sistema de transmissão - 2016.** Brasília: ANEEL. 2020. Disponível em: <https://tinyurl.com/yc2xnbzs>. Acesso em: 25 nov. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatório de análise - desligamentos forçados do sistema de transmissão - 2018.** Brasília, ANEEL. 2020. Disponível em: <https://tinyurl.com/26sbnkt8>. Acesso em: 25 nov. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução normativa nº 505**, de 26 de novembro de 2001. Estabelece, as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente. Brasília, DF. Disponível em: <https://tinyurl.com/websu8x7>. Acesso em: 25 nov. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução normativa nº 67**, de 8 de Junho de 2004. Estabelece critérios para a composição da rede básica do sistema interligado nacional. Brasília, DF. Disponível em: <https://tinyurl.com/4bwhv856>. Acesso em: 25 nov. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução normativa nº 729**, de 28 de Junho de 2016. Estabelece as disposições relativas à qualidade do serviço de transmissão de energia elétrica. Brasília, DF. Disponível em: <https://tinyurl.com/ywxurvru>. Acesso em: 25 nov. 2022.
- ANDRADE, A. D. *et al.* Influência do comportamento de pássaros no desempenho de linhas de transmissão. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA*, 26., 2005, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba, 2005. Disponível em: <https://tinyurl.com/4vdmnkt>. Acesso em: 25 nov. 2022.
- BALESTRO. **Isoladores poliméricos para alta tensão**, [2014]. Disponível em: <https://tinyurl.com/mr6wfytr>. Acesso em: 25 nov. 2022.
- BEZERRA, M. **Isoladores para linhas de transmissão e distribuição**, [2017]. Disponível em <https://tinyurl.com/ykwumu35>. Acesso em: 25 nov. 2022.
- CICRÉ BRASIL. **Isoladores: aplicação e importância no setor elétrico.** *In: SCRIBD: Entretenimento e conhecimento sem fim.* [2017]. Disponível em: <https://tinyurl.com/47p6mc9t>. Acesso em: 25 nov. 2022.
- DIAS, G. A. D. **Harmônicas em sistemas industriais.** 2.ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2002.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2021.** Brasília, DF: MME, 2022. Disponível em: <https://tinyurl.com/yds294uy>. Acesso em: 25 nov. 2022.

FUCHS, R. D. **Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1977.

GRENNWOOD, A. **Electrical transients in power systems**. 2nd. ed. New York: Rensselaer Polytechnic Institute, 1991.

GSI. **RT1371/001-21**: Análise das ocorrências de faltas em linhas de transmissão de 500 [kV]. Taubaté, 2021.

GSI. **RT1371/002-21**: Procedimentos de manutenção para linhas de transmissão de 500 [kV]. Taubaté, 2021.

GSI. **RT1371/003-21**: Coordenação de isolamento das linhas de transmissão em 500 [kV]. Taubaté, 2021.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC/TS 60815-1**: Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 1 - Definitions, information and general principles. Switzerland: IEC, 2008.

KIESSLING, F. *et al.* **Overhead power lines: planning, design, construction**. New York: Springer. 2003.

LEÃO, R. **GTD - Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica**. Departamento de engenharia Elétrica. Ceará: Universidade Federal do Ceará. 2009. Disponível em: <https://tinyurl.com/yvz6kd75>. Acesso em: 25 nov. 2022.

MELLO, D. R. D *et al.* Avaliação do grau de poluição em instalações de transmissão, subestações e distribuição. *In*: Centro de gestão de tecnologia e inovação, 2001, Campinas. **Trabalhos Apresentados [...]**. Campinas, 2001. Disponível em: <https://tinyurl.com/4ykvkx7n>. Acesso em: 25 nov. 2022.

OLIVEIRA, I. C. D. *et al.* **Geração de energia elétrica**. Porto Alegre: Grupo A, 2021. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786556902531/>. Acesso em: 14 fev. 2023.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. **Submódulo 20.1** - Glossário de termos técnicos. Brasília, DF. Disponível em: <https://www.ons.org.br>. Acesso em: 25 nov. 2022.

PAULILLO, G.; TEIXEIRA, M. Capítulo VII - Flutuações de tensão. **O setor elétrico**, p. 38-47, 2013. Disponível em: <https://tinyurl.com/4p8kc8sm>. Acesso em: 25 nov. 2022.

PRINKLER, L.; HOIDALEN, H.; PEÑALOZA, F. **User's manual ATPDRAW Version 7.2 for Windows**. Noruega, 2020. Disponível em: <https://www.atpdraw.net/index.php>. Acesso em: 25 nov. 2022

PUCHALE, L. H. B. **Metodologia para mitigação de desligamentos intempestivos em linhas de transmissão correlacionados a umidade elevada**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2009.

SEDIVER. Toughened glass insulators for HVAC applications. *In:* SEDIVER: World leader in overhead line insulation technology, 2017. Disponível em: <https://tinyurl.com/2p4u75vm>. Acesso em: 25 nov. 2022.

VOSLOO, W L.; MACEY, R E.; TOURREIL, C. D. The practical guide to outdoor high voltage insulators. Johannesburg: Crown Publications, 2004.

WEATHERSPARK. Clima e condições meteriológicas médias no ano todo. [2021] Disponível em <https://pt.weatherspark.com>. Acesso em: 25 nov. 2022.

APÊNDICE A - ARTIGO PRÉ-APROVADO ERIAC

Comitê de Estudos CE - Linhas Aéreas B2
**ANÁLISE DE OCORRÊNCIAS E DOS MECANISMOS DE FALHAS POR DESCARGAS
DISRUPTIVAS EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 500 kV: EFEITOS
COMBINADOS DE POLUIÇÃO E UMIDADE**

A. G. NOGUEIRA*
GSI
Brasil
 adriano.nogueira@unesp.com

N. C. JESUS
GSI
Brasil
 nelson@gsiconsultoria.com.br

J. R. COGO
GSI
Brasil
 gsi@gsiconsultoria.com.br

A. M. LAURENTINO
GSI
Brasil
 ahmad.laurentino@unesp.br

G. R. SANTOS
GSI
Brasil
 grsantosv1@gmail.com

W. S. JESUS
GSI
Brasil
 william.jesus@gsiconsultoria.com.br

D. C. B. V. SILVA
TERNIUM
Brasil
 daniel.silva2@ternium.com.br

Resumo – Este informe técnico apresenta uma avaliação das ocorrências de desligamentos intempestivos em um sistema elétrico de alta tensão em 500 [kV] responsável pela conexão de uma indústria ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Nesta avaliação foram considerados os registros das oscilografias disponibilizadas nos últimos eventos de desligamentos relacionados as falhas da linha de transmissão, bem como: informações do histórico das ocorrências, análise da inspeção de isoladores, dados climáticos e simulações de transitórios eletromagnéticos, que buscam a definição da causa raiz das faltas intempestivas nas LTs.

Palavras-chave: Cadeia de Isoladores - Grau de Poluição - Linha de Transmissão - Alta Tensão - “Flashover” - Interrupção Forçada - Oscilografias – Umidade.

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica está presente em boa parte dos processos, se fazendo necessária desde as atividades mais simples, como tarefas domésticas, até ações mais complexas, as quais não podem ser executadas sem o advento da energia elétrica. De forma natural, a regularidade e qualidade do transporte e fornecimento da energia elétrica entra em pauta no cenário nacional, sendo o desligamento ou interrupção do fornecimento, mesmo que por períodos curtos de tempo, cada vez menos aceitável pelos órgãos fiscalizadores e consumidores em geral. Os desligamentos no Sistema Interligado Nacional (SIN) podem ser divididos em dois grandes grupos: falhas permanentes e transitórias. As falhas transitórias são caracterizadas pelo rápido retorno a transmissão de energia, que depende somente do tempo de reenergização do sistema, não sendo necessário a substituição de qualquer parte ou componente do sistema por causa da ocorrência. Muito embora as falhas transitórias em sistemas de transmissão de energia elétrica não sejam tão significativas quanto ao impacto de falhas permanentes, estas falhas também levam, no longo prazo, a problemas de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) e também afetam os índices de operação e disponibilidade das linhas de transmissão, com o aumento de falhas na operação de linhas de transmissão.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise dos distúrbios na LT do sistema, com base no histórico de falhas de uma linha de transmissão compacta que ao longo de seu comprimento sofre uma variação abrupta dos níveis de poluição atmosférica (referente ao local de passagem da Linha de Transmissão (LT) e também a quantidade de particulados que se acumula na estrutura e principalmente nos isoladores.

2 GENERALIDADES

2.1 O Isolador

De forma generalista, o termo “isolador” é aplicado aos suportes isolantes usados para sustentar mecanicamente elementos condutores, como cabos e barramentos em sistemas elétricos de transmissão e distribuição de energia, ao mesmo tempo em que isolam eletricamente elementos com diferentes potenciais [1]. O material isolante deve ser confeccionado de forma que seja um dielétrico excelente, capaz de suportar e acomodar elevados níveis de estresse elétrico por um longo prazo. O material dielétrico também deve ser capaz de lidar com os níveis de poluição impostos a sua volta, por muitas vezes agressivos, suportando efeitos de radiação ultravioleta, contaminação e sobretensões causadas por descargas atmosféricas, faltas ou manobras. Os isoladores podem ser basicamente de três tipos de materiais: porcelana, vidro temperado e poliméricos, conforme apresentado na Fig. 1.

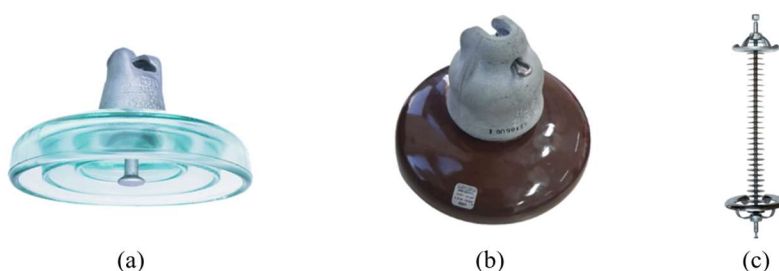


Fig. 1. Tipos de materiais isolantes: (a) - Vidro; (b) - Porcelana; (c) - Polimérico

2.2 Principais características

Os isoladores que são voltados para atuarem em ambientes externos, como linhas de transmissão, possuem parâmetros que são considerados mínimos [2]. Estes parâmetros possuem correlação com descargas disruptivas que levam a possíveis falhas de LTs e são descritos a seguir.

2.2.1 Perfil isolante

O perfil do isolador define para qual aplicação o isolador irá obter o melhor desempenho. Conforme [2], existem três tipos típicos de isoladores de vidro ou porcelana em formato de disco, sendo os perfis do tipo: normal, antipoluição e plano, representados na Fig. 2.

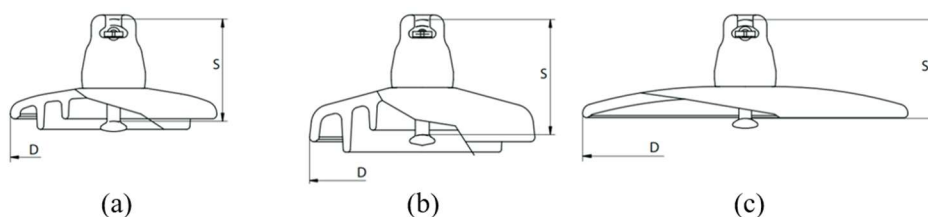


Fig. 2. Perfis típicos de isoladores (a) normal, (b) antipoluição e (c) plano.

O perfil normal de isoladores possui saias consideradas curtas e bem espaçadas, sendo indicado para zonas onde o nível de poluição local é encontrado na faixa classificada como muito baixo (E1) até médio (E3).

Já o perfil antipoluição possui saias consideradas longas e muito bem espaçadas entre si, evitando a formação de arcos elétricos entre saias vizinhas. Este perfil de isolador é utilizado para áreas onde os níveis de poluição local especificado são classificados como no mínimo alto (E5 ou acima).

Por fim, o perfil plano de isoladores é caracterizado pela não existência de saias abaixo do disco isolante, evitando o acúmulo de particulados sólidos (poeira ou areia). Geralmente encontra-se aplicado em áreas desérticas onde há ação frequente de ventos e raramente chove. Este perfil é indicado para níveis de poluição desde muito baixo (E1) até o nível considerado médio (E4).

2.2.2 Distância de arco a seco

A distância de arco a seco é definida como a menor distância, externa ao isolador (saídas ou disco), através do ar, entre as ferragens terminais do mesmo, possuindo normalmente a tensão de fase do sistema aplicada sobre eles. A distância de arco a seco é importante por determinar a tensão máxima suportável de impulso atmosférico quando limpo, desta forma, sendo o parâmetro que determina o tamanho físico da cadeia de isoladores utilizadas em uma determinada tensão de operação.

2.2.3 Distância de escoamento (DE)

A DE é definida como a soma das menores distâncias ao longo da superfície dielétrica do isolador submetido a tensão de operação do sistema e sua unidade é obtida em milímetros.

2.2.4 Distância de escoamento específica unificada (DEEU)

A DEEU é definida como a relação entre a distância de escoamento (DE) e a tensão de linha do sistema, logo, sua unidade de medida é dada em [mm/kV].

Em [2] é possível obter diretrizes para linhas de transmissão que atravessam ambientes onde se faz necessário definir os níveis de severidade da poluição local (SPL), com objetivo de selecionar os isoladores mais adequados as áreas poluídas. A TABELA I estabelece a relação entre o SPL e os valores DE e DEEU recomendados.

TABELA I. CORRESPONDÊNCIA ENTRE DE, DEEU E SPL

Nível de poluição (SPL)	DE [mm/kV]	DEEU [mm/kV]
Muito Leve (E1)	12,7	22,0
Leve (E2)	16,0	27,8
Médio (E3 a E4)	20,0	34,7
Pesado (E5 a E6)	25,0	43,3
Muito Pesado (E7)	31,0	53,7

2.3 Mecanismo de falhas em isoladores

2.3.1 Caracterização

O processo de “flashover” por poluição do isolador é significativamente afetado devido as propriedades superficiais do mesmo, sendo duas as condições que podem ser encontradas: hidrófilo e hidrofóbico, uma vez que a primeira condição é associada a isoladores do tipo poliméricos e a segunda associada a isoladores de cerâmica ou vidro. Um fator agravante é a perda da rigidez dielétrica do ar próximo as saídas dos isoladores, o que reduz significativamente a capacidade do isolador de lidar com a disrupção elétrica devido a perda de material na superfície do isolador. Em [3] é descrito o processo de disrupção elétrica através de seis fases:

- Fase 1: O isolador é coberto com uma camada de poluição;
- Fase 2: A camada de poluição absorve umidade;
- Fase 3: Formação de bandas secas e úmidas;
- Fase 4: Formação de Arco Elétrico através das bancas secas;
- Fase 5: Propagação do arco elétrico ao longo do disco isolante;
- Fase 6: Formação do arco elétrico que é capaz de pular o disco isolador e forma-se o “flashover”.

De forma resumida, o processo de “flashover” ocorre quando há a umidificação da camada poluente sobre o disco isolante. Enquanto a camada de poluição se manter seca, não há impacto significativo na alteração do comportamento dielétrico do isolante. Ademais, o fenômeno possui características transitórias e ocorre principalmente quando há maior concentração de umidade no ar ambiente, sendo normalmente próximo das primeiras horas da manhã ou antes do sol nascer, quando a umidade do ar atinge porcentagens acima de 70% e ocorre absorção de umidade se a temperatura do isolador e do ambiente forem iguais. A condensação também irá ocorrer sempre que a temperatura do isolador for menor que a temperatura de ponto de orvalho, assim avançando diretamente para a fase 2 descrita acima e tornando úmida a camada de poluição.

Após sua ocorrência, é verificada a limpeza do isolador, desumidificando e retirando camadas de poluentes. Assim, quando ocorrer o religamento da LT (automático ou não), o mesmo fenômeno que provocou o desligamento não irá se repetir e provavelmente haverá sucesso no reestabelecimento da operação do sistema.

2.3.2 Outras formas de desencadear o “flashover”

A descarga disruptiva também pode ocorrer por contaminação instantânea de alta condutividade. A poluição instantânea é depositada como uma camada altamente condutora de eletrólito líquido (névoa salina ou ácido industrial), assim o processo começa na Fase 2 e pode avançar rapidamente para a Fase 4. O “flashover” pode ser desencadeado também através da contaminação por excrementos de pássaros, que naturalmente possui alta condutividade e quando associado com a umidade reduzem significativamente a resistência elétrica da superfície do isolador, facilitando a formação de arco elétrico sobre os isoladores.

A ocorrência de faltas, quando a LT está operando em regime permanente também pode ser desencadeada pela distribuição não uniforme de poluição ao longo da cadeia de isoladores. Os isoladores menos poluídos irão ficar submetidos a um gradiente de tensão mais elevado, podendo ocorrer a ruptura isolante da unidade evoluindo para o “flashover” completo da cadeia.

3 HISTÓRICO DE FALHAS NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

As torres que sustentam as linhas de transmissão em estudo, realizam o transporte de energia por meio de circuitos duplos de transmissão, sendo a linha #2 caracterizada pela presença da Fase A na posição mais superior, seguida pela Fase B, no meio, e Fase C na posição mais inferior. Já para linha #1, há inversão nesta configuração, onde a Fase C se encontra na posição mais superior, Fase B no meio e Fase A na posição mais inferior. Desta forma, esta análise foi embasada em informações históricas de 13 falhas ao longo de um período de 10 anos.

3.1 Estratificação dos Dados

Buscando realizar uma correspondência entre o número de desligamentos e o clima, o ano foi dividido em dois períodos: seco (maio até outubro) e úmido (novembro até abril). Assim, analisando os desligamentos que foram associados aos seus respectivos períodos do ano, dando origem a Fig. 3 (a) e (b), onde é possível observar que aproximadamente 70% dos desligamentos ocorreram na condição de regime úmido da região, indicando que o clima em que a linha de transmissão está exposta influencia diretamente na qualidade do seu funcionamento.

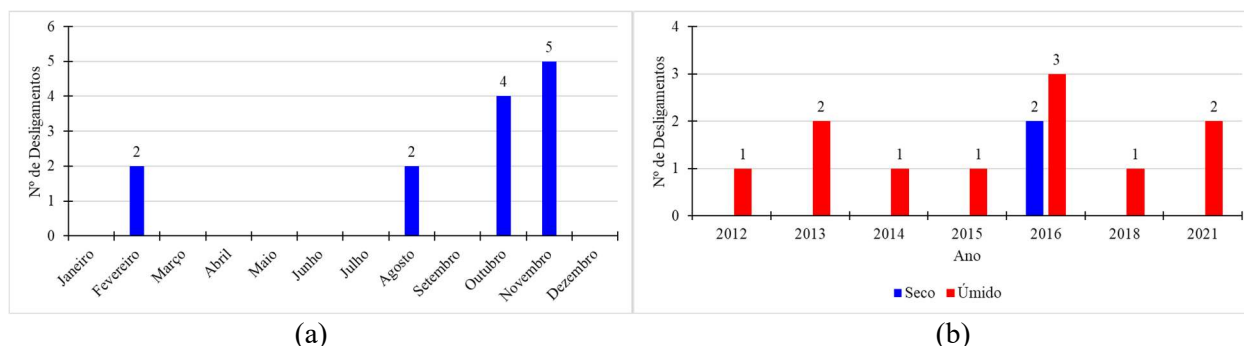


Fig. 3. Desligamentos referentes (a) para cada mês na LT; (b) para períodos seco e úmido do ano na LT

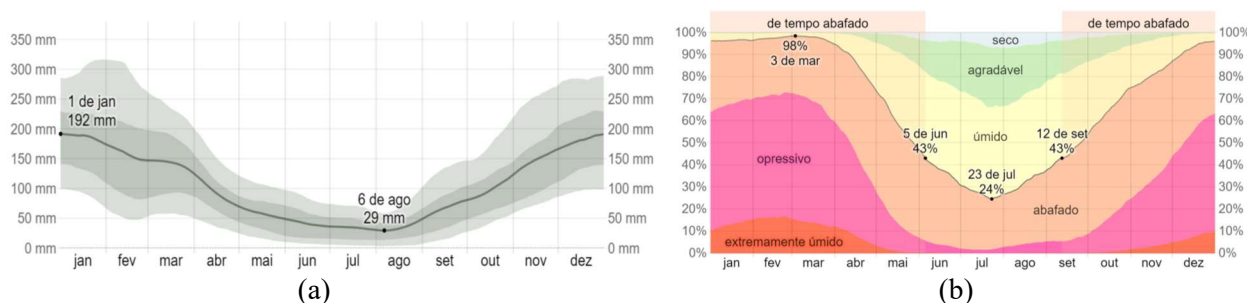


Fig. 4. Características ao longo do ano de (a) chuva média; (b) conforto em umidade

Diante dos dados apresentados pelas Fig. 3 e 4, é observado que os meses que possuem maior número de falhas coincidem com o período do ano ao qual a LT é exposta a chuvas regulares e a altos níveis de umidade do local, uma vez que 60% das falhas ocorrem nas fases A e C, que se encontram nas posições mais superiores da LT e por consequência estão mais suscetíveis ao acúmulo de particulados durante o período seco.

3.2 Premissas consideradas durante concepção de projeto

Analizando o projeto durante a fase de concepção da linha de transmissão de 500 [kV], foi possível observar que a severidade de poluição adotada para o local foi adotado como leve (E1) com uma DE de 14 [mm/kV]. Naturalmente, este valor foi utilizado como base no projeto, mas devido ao aumento da intensidade das atividades das indústrias no local, houve mudança das características da poluição e elevação da quantidade de particulados depositados sobre os discos dos isoladores em parte da LT, impactando diretamente no desempenho da LT.

3.3 Estado de conservação dos isoladores presentes na LT

A Fig. 5 ilustra isoladores da LT que foram sujeitos a descargas disruptivas (“flashover”), sendo possível verificar a coloração enferrujada sobre os discos dos isoladores e também rachaduras e trincas nos discos isolantes de vidro. Ademais, a campânula dos isoladores apresenta elevado nível de corrosão, perdendo sua característica fosca e passando a ser enferrujada. Ademais, a capacidade de isolamento da cadeia pode ser afetada pela falta dos discos dos isoladores, que podem ter caído devido a fenômenos elétricos ou vandalismo. Desta forma, uma cadeia de isoladores inadequada para operação tende a oferecer a cada isolador contaminado uma DDP relativamente baixa e assim os isoladores sem contaminação, passam a operar sob regime de estresse elétrico, podendo desencadear o “flashover” e comprometendo a capacidade de isolamento da cadeia.



Fig. 5. Registros de descargas disruptivas na cadeia de isoladores e falta de discos isolantes

Portanto, as cadeias de isoladores presentes na linha de transmissão de 500 [kV] sofrem com a poluição local gerada por instalações industriais, atividades urbanas que estão próximas ao local de passagem da LT e atividades climáticas.

3.4 Análise de Particulados

Durante o levantamento das ocorrências de desligamentos, alguns isoladores presentes na linha foram objeto de estudo de particulados encontrados sobre os discos isolantes. Estes particulados foram amostrados e analisando-se as amostras, foi possível verificar que os componentes mais expressivos encontrados sobre os discos dos isoladores foram: óxido de cálcio (CaO), trióxido de Ferro (Fe₂O₃) e dióxido de silicone (SiO₂), sendo as respectivas porcentagens de 32,5%, 31,2% e 11,3%, totalizando aproximadamente 70% de todo o resíduo. Ademais, estes tipos de particulados são característicos de indústrias que operam com processos relacionados a fabricação de cimento e siderurgia. É importante ressaltar ainda, que esta análise não seguiu o método descrito em norma cabível, portanto possui caráter qualitativo para entender o grau de poluição do local ao qual a LT está exposta.

4 ANÁLISE DA CAUSA RAIZ

Com o intuito de auxiliar na busca das causas relacionadas aos desligamentos intempestivos das LTs, utilizou-se o diagrama de causa-efeito (Ishikawa), sendo os principais itens propostos como prováveis causas: equipamentos do sistema, mão de obra, materiais, métodos, medidas e fatores externos e ambientais. Os itens mais relevantes foram avaliados com base em pontuações, considerando as probabilidades dos respectivos impactos das hipóteses apontadas ao problema. Essa avaliação foi realizada através da montagem e preenchimento de uma matriz de priorização, sendo ilustrado através da Fig 6-(a) o diagrama final.

Depois de consolidar as principais causas das falhas, foi realizada uma avaliação buscando identificar as condições que podem levar aos desligamentos. Essa avaliação leva em conta a intersecção dos três principais grupos elencados, que implicam nas causas/efeitos de desligamentos. A Fig. 6-(b) ilustra essas intersecções e seus respectivos níveis de risco, variando do menor risco (nível 1) ao maior (nível 3).

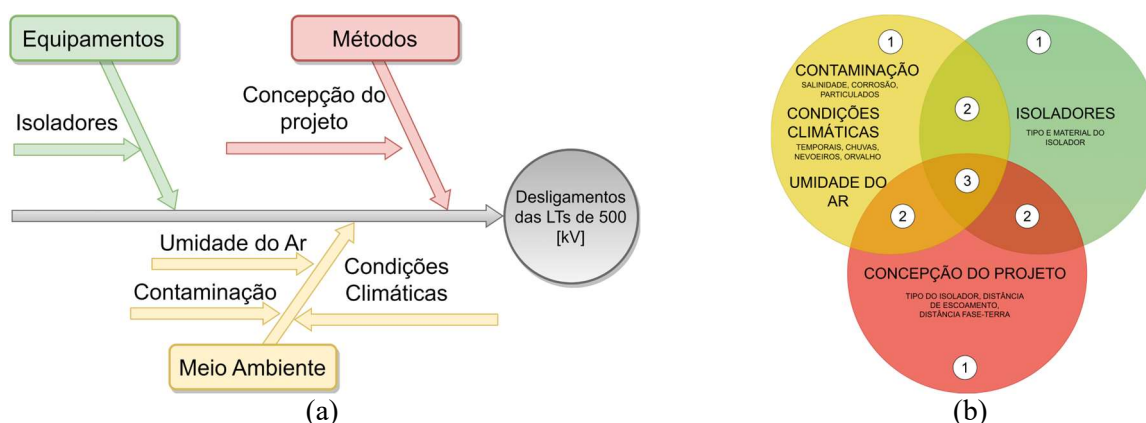


Fig. 6. Representação visual (a) diagrama final de Ishikawa; (b) perfis de risco

5 MODELAGEM NO ATPDRAW

Para modelagem e simulações o sistema elétrico em análise, apresentado na Fig. 7, foi representado de forma simplificada por meio das impedâncias equivalentes de curto-circuito, representação das linhas de transmissão em circuito duplo e os principais componentes e equipamentos elétricos do sistema em análise. Serão avaliados aqui os comportamentos das formas de onda das tensões e correntes frente aos registros de oscilografias disponibilizadas.

Serão considerados os eventos de desligamentos não programados na LT que ocorreram em outubro de 2021 as 3h30min, associado a uma falta do tipo fase a terra da fase A na linha #2 e as 3h55min, associado a uma falta a terra da fase B na linha #1. Para o primeiro evento, o sistema elétrico se encontrava em condições normais de operação e ambos os transformadores operavam sob regime permanente. No segundo evento, o transformador presente na linha #1 estava operando a vazio e o transformador presente na linha #2 estava fora de operação, ou seja, desconectado do SIN.

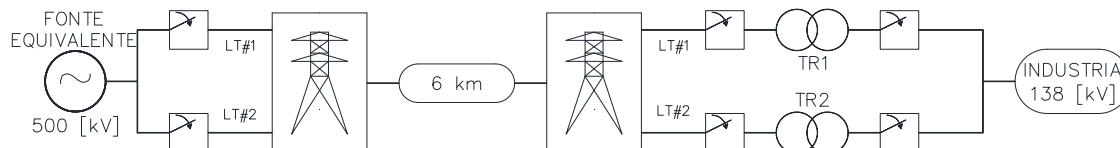


Fig. 7. Diagrama unifilar simplificado do sistema

6 RESULTADOS

Com o objetivo de sustentar e definir os tipos de mecanismos de falhas que levou aos desligamentos intempestivos da linha de transmissão de 500 [kV], os resultados obtidos são oriundos das discussões realizadas no artigo e também dos resultados de transitórios eletromagnéticos obtidos por meio das simulações no programa ATPDraw.

6.1 Análise Geral da LT de 500 [kV]

A LT, apresentou tendência de falhar desde seu primeiro ano de operação, tendo ênfase para desligamentos durante o período úmido do ano (novembro até abril), sendo que as falhas do período úmido correspondem a aproximadamente 70% de todos os desligamentos intempestivos ao longo da operação da LT.

A LT apresentou todas as falhas intempestivas no período noturno e principalmente na madrugada (23h até 6h), quando há presença de altos índices de umidade no ar e conhecido por uma tendência de alívio de carga. Parte dos isoladores superiores das cadeias de suspensão apresentam coloração enferrujada e até mesmo marcas de descargas disruptivas, quando não apresentam falta de discos isolantes, notória ferrugem nas ferragens e dejetos de pássaros sobre os discos. Além disto, durante a concepção de projeto da LT, a DE foi adotada como sendo de 14 [mm/kV] (Nível leve de SPL), a qual não é adequada especificamente a partir da metade do trecho da LT em direção ao sistema industrial.

Deste modo, observa-se que o vão de servidão da LT mudou drasticamente de condições ambientais, saindo de um ambiente considerado leve (E1) para um ambiente que pode ser dito no mínimo pesado ($\geq$ E5).

Em síntese, a sobreposição de todos os efeitos de clima, época do ano, alívio de carga durante a madrugada, premissas incorretas durante concepção do projeto e principalmente o efeito combinado de umidade e alta SPL levaram a LT as falhas intempestivas que ocorreram regularmente ao longo da sua operação.

6.2 Simulações de transitórios eletromagnéticos

6.2.1 Caso 1

Na Fig. 8 é apresentada a comparação entre os resultados das oscilografias (vermelho) e simulações (verde) para as formas de onda da tensão U_a , no lado de 138 [kV], durante a primeira ocorrência da falta fase-terra no lado de 500 [kV] na linha #2.

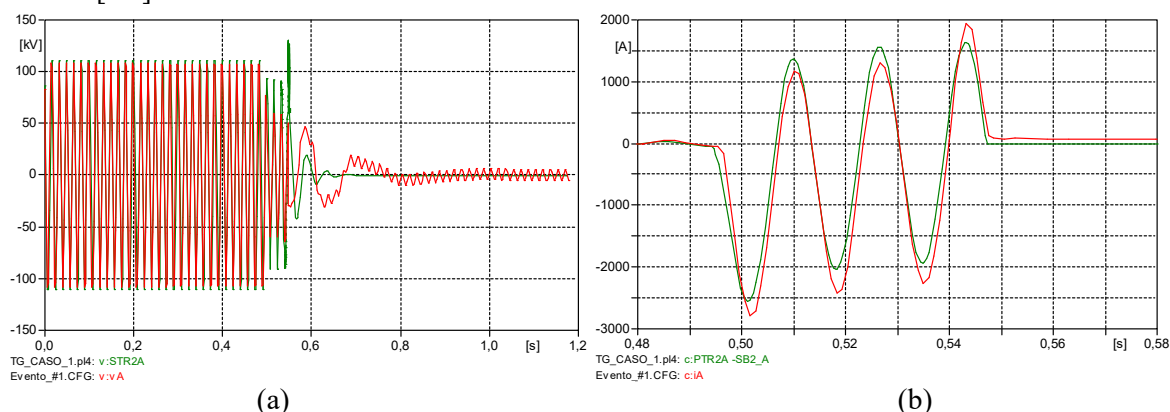


Fig. 8-(a). Formas de onda das tensões da fase em falta (U_a) - Simulação vs Oscilografia
Fig. 8-(b). Formas de onda das correntes da fase em falta (I_a) - Simulação vs Oscilografia

6.2.2 Caso 2

Na Fig. 9 é realizada uma comparação entre os resultados das oscilografias (vermelho) e simulações (verde) para as formas de onda da tensão U_b , no lado de 138 [kV], durante a ocorrência da falta subsequente em 500 [kV]. Nota-se que o caso simulado apresenta de forma muito semelhante e o mesmo comportamento observado durante o desligamento da LT.

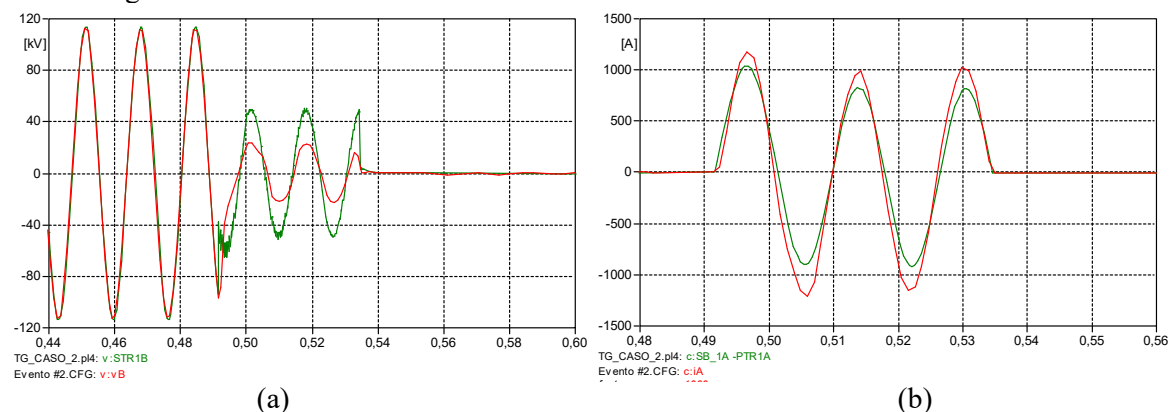


Fig. 9-(a). Formas de onda das tensões da fase em falta (U_b) - Simulação vs Oscilografia
Fig. 9-(b). Formas de onda das correntes da fase em falta (I_a) - Simulação vs Oscilografia

É importante ressaltar que a diferença observada nas amplitudes entre a simulação e o efeito real é oriunda de cabos condutores, motores e geradores elétricos que não foram contabilizados durante os efeitos de transitórios eletromagnéticos, deixando de contribuir para uma representação fiel do sistema durante as falhas.

6.3 Definição do mecanismo de falha

Com auxílio da sequência indicada em [3] e a partir da análise das condições do ambiente em que a LT está exposta, pode-se verificar que os fatores climáticos possuem relação direta com as falhas intempestivas, uma vez que a combinação de períodos de altas umidades após períodos sob condições de tempo seco corroboram com o aumento dos riscos de descargas disruptivas (“flashover”), que combinados com severas poluições nos isoladores, podem culminar em falhas operacionais não esperadas.

Neste sentido, a maioria dos casos de curto-circuito do tipo fase-terra foram devido as falhas de isolamento nas cadeias de isoladores, uma vez que, além dos sinais físicos típicos apresentados nos isoladores, as falhas ocorrem principalmente durante os instantes próximos aos valores de pico das tensões, sendo uma característica típica para falhas de isolamento, conforme observado e exposto pelas simulações.

7 CONCLUSÕES

Foi apresentada uma avaliação e análise das ocorrências envolvendo diversos desligamentos intempestivos de uma LT de 500 [kV] com extensão total de 6,0 [km], que apresenta uma média de 1,1 desligamento por ano. Em [4], são definidos os requisitos mínimos de linhas de transmissão aéreas, onde é estabelecido que para linhas de transmissão com tensão igual ou superior a 345 [kV], devem apresentar um número total de desligamentos menor ou igual a 1 desligamento por 100 [km] por ano. Portanto, o número de desligamentos não programados que a LT apresenta é muito superior ao estabelecido pelo ONS.

Ao longo do trabalho também foram apresentadas a análise dos dados históricos das falhas que ocorreram nas LTs, sendo possível verificar que 70% dos desligamentos ocorreram nos períodos úmidos e também devido aos dados adotados durante a concepção do projeto. Por fim, foi realizada uma análise específica das últimas ocorrências verificadas em 2021, resultados das oscilografias, correlacionando dados climáticos típicos do local de passagem da LT e os mecanismos de falhas que envolvem a cadeia de isoladores.

Analizando os resultados obtidos, pode-se verificar que a maioria absoluta das falhas que ocorreram na LT foi do tipo fase-terra, no período noturno (23h até 6h) e ocorreram em condições normais de operação, com o sistema em regime permanente. Além disso, verificou-se também que os desligamentos não programados ocorreram em sua grande maioria no período úmido do ano (novembro a abril), sendo relacionadas ao período da madrugada (23h até 6h).

Desta forma, pode-se concluir que os fatores climáticos possuem relação direta com as falhas, uma vez que o efeito combinado de altas umidades após um longo período seco colaboram com o aumento dos riscos de possíveis descargas disruptivas em regime de operação normal e que combinadas com severas condições de poluição enfrentadas pelos isoladores, acarretam em falhas operacionais não esperadas, pois, além dos sinais físicos encontrados nas cadeias de isoladores, é possível verificar nas oscilografias e simulações que os defeitos ocorrem próximo aos valores máximos das tensões senoidais, momento este onde são impostas as maiores solicitações ao dielétrico.

As simulações formaram parte fundamental durante análise para a caracterização dos fenômenos que periodicamente levam a LT a falhar. Com os resultados das formas de onda visto nas simulações, pode-se verificar que as faltas ocorridas foram do tipo falta-terra nas fases A da linha #2 e B da linha #1 durante os eventos analisados, tendo origem próximo ao pico da tensão que apresenta falha. Desta forma, os resultados das simulações reforçam e evidenciam a ocorrência de defeitos monofásicos envolvendo falhas intempestivas nas cadeias de isoladores, contribuindo na identificação da causa raiz e na proposta de um plano de ação para melhorias e adequação das distâncias de escoamento das cadeias de isoladores.

8 REFERÊNCIAS

- [1] FUCHS, Rubens D. Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1977. 306 p.
- [2] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC/TS 60815-1: Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 1 - Definitions, information and general principles. 2008.
- [3] PUCHALE, Leandro H. B. Metodologia para Mitigação de Desligamentos Intempestivos em Linhas de Transmissão Correlacionados a Umidade Elevada. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2009.
- [4] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. Submódulo 2.4 - Requisitos mínimos para Linhas de Transmissão. Revisão 2 de 01/12/2010.
- [5] SEDIVER. Toughened glass insulators for HVAC applications, 2017. 32 p. Disponível em: <<https://tinyurl.com/2p4u75vm>>. Acessado em: 25/11/2022.
- [6] PRINKLER, László; HOIDALEN, Hans. ATPDRAW (Alternative Transients Program) - Version 7.2 for Windows - User's Manual.