

AVALIAÇÃO DAS SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COM A VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DA LINHA UTILIZANDO O SOFTWARE ATP

João Heitor Vasconcelos de Sousa

jhvs@discente.ifpe.edu.br

Leonardo Francisco Oliveira Lima Castro

lfolc@discente.ifpe.edu.br

Prof. Me. Fernando Edier França Freitas.

fernandoedier@pesqueira.ifpe.edu.br

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise dos efeitos dos transitórios eletromagnéticos em uma linha de transmissão de 500 kV durante o processo de religamento tripolar automático, utilizando o programa computacional *Alternative Transient Program* (ATP) como ferramenta de simulação. Foi adotada a linha de transmissão 500 kV Bom Nome II – Campo Formoso II para esse trabalho. Essa linha fez parte do Leilão de Transmissão ANEEL N° 001/2024 e o caso base em ATP para estudos de Transitórios Eletromagnéticos para Projeto Básico (PB) disponibilizado no site. A partir desse caso base, foi analisado o comportamento das sobretensões transitórias na manobra de religamento tripolar de linha, variando o comprimento da linha. Foram simulados diferentes comprimentos da linha (50 km, 100 km, 200 km, 300 km e 373 km). Os resultados demonstraram que o aumento do comprimento da linha provoca elevação da magnitude e prolongamento da duração das sobretensões, devido ao maior armazenamento de energia nos campos elétrico e magnético. Conclui-se que o entendimento detalhado desses parâmetros é essencial para prever adequadamente as condições de operação e garantir a confiabilidade de sistemas elétricos de potência.

Palavras-chave: Transitórios eletromagnéticos. Linhas de transmissão. Sobretensões transitórias. Religamento tripolar. ATP.

ABSTRACT

This work presents an analysis of the effects of electromagnetic transients in a 500 kV transmission line during the automatic reclosing process, using the *Alternative Transient Program* (ATP) as the simulation tool. The 500 kV Bom Nome II – Campo Formoso II transmission line was adopted as the study case. This line was part of ANEEL Transmission Auction No. 001/2024, and the ATP base case for Electromagnetic Transient studies for the Basic Design (PB) was made available on the official website. Based on this case, the behavior of transient overvoltages during the three-pole line reclosing maneuver was evaluated by varying the line length. Different line lengths were simulated (50 km, 100 km, 200 km, 300 km, and 373 km). The results showed that increasing the line length leads to higher magnitude and longer duration of overvoltages, due to the greater amount of energy stored in the electric and magnetic fields. It is concluded that a detailed understanding of these parameters is essential for accurately predicting operating conditions and ensuring the reliability of electric power systems.

Keywords: electromagnetic transients. Transmission lines. Transients overvoltages. Three-pole reclosing. ATP.

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

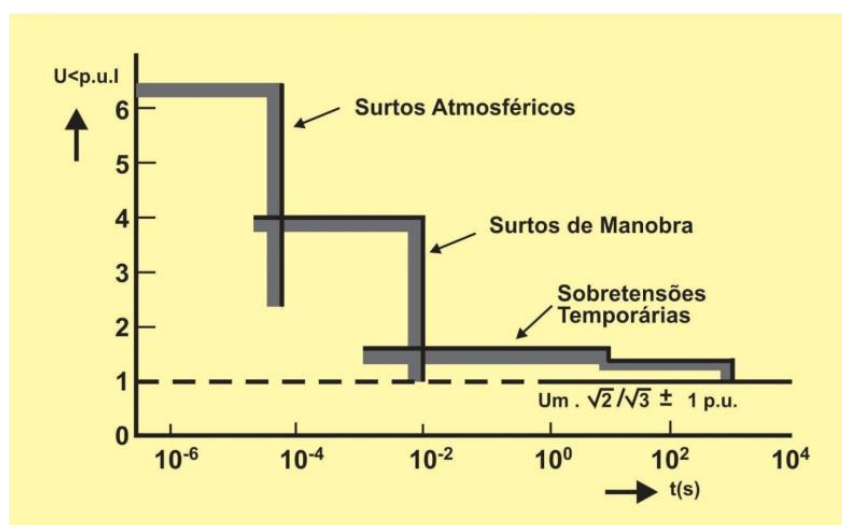
O estudo dos transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão é um tema de extrema complexidade e relevância para o bom funcionamento do sistema elétrico, principalmente no que diz respeito a adequada especificação dos equipamentos. Garantir a operação adequada dessas instalações impacta diretamente a qualidade de vida da população, proporcionando conforto aos seus usuários e assegurando a continuidade no fornecimento de energia. A análise desses transitórios permite prever anormalidades no Sistema Elétrico de Potência (SEP) e, assim, dimensionar corretamente os componentes das subestações e linhas, tanto em novas instalações quanto em ampliações de infraestruturas existentes. (ONS, 2022).

Com os avanços tecnológicos e o aumento constante da demanda por energia elétrica, torna-se essencial a expansão do sistema elétrico, com o planejamento de novas linhas de transmissão e subestações. Embora a geração de energia elétrica seja suficiente para suprir essa demanda, a transmissão tem se mostrado defasada, exigindo estudos detalhados para viabilizar novos projetos. (PERES, 2014).

O SEP opera sob dois regimes distintos: o regime permanente, em que o sistema opera com parâmetros de tensão, corrente e frequência dentro de limites pré-estabelecidos, e o regime transitório, em que o sistema opera em condições anormais e instáveis. Apesar de, na maior parte do tempo, o sistema atuar em regime permanente, é durante os transitórios que a capacidade do sistema é mais exigida. Por essa razão, as instalações elétricas são projetadas para suportar tais solicitações extremas. (DA'JUZ et al., 1987; NETO, 2009)

Os transitórios eletromagnéticos podem ter diferentes origens e causar efeitos adversos, como sobrecorrente, sobretensão e harmônicas na rede elétrica, afetando a qualidade da energia transmitida, como podemos observar na Figura 1. Dessa forma, é essencial compreender e simular esses fenômenos para evitar ao máximo as falhas e otimizar a operação das subestações e linhas de transmissão. (DA'JUZ et al., 1987).

Figura 1 – Representação Esquemática Tipos de Sobretensões

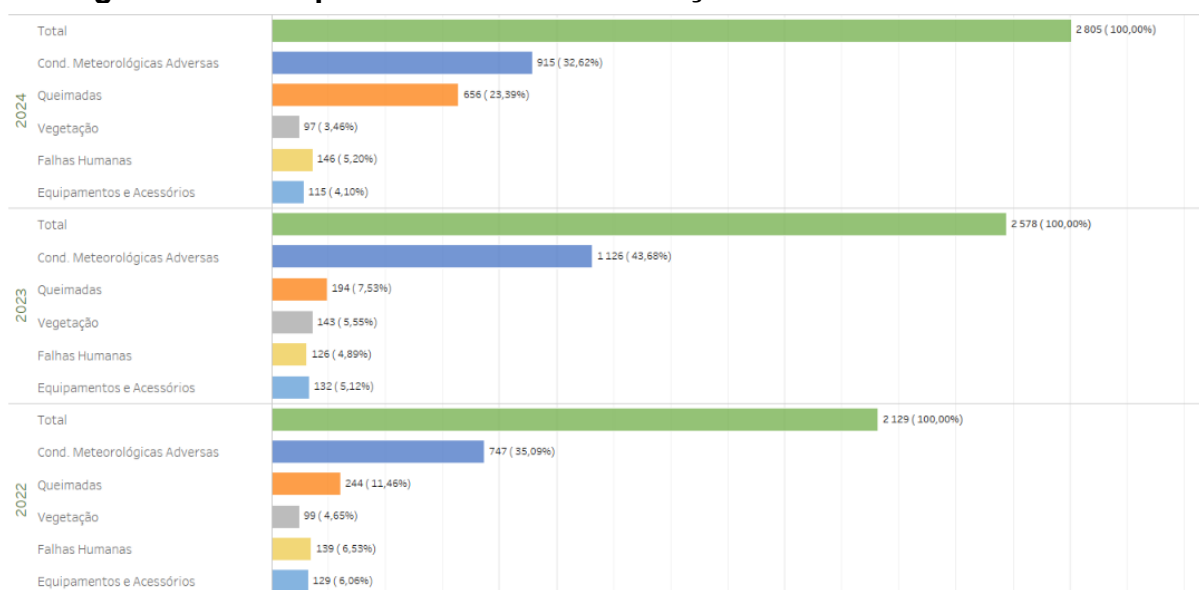


Fonte: ONS (2022).

A Figura 2 mostra que em três anos consecutivos a maioria dos curtos foram causados por condições meteorológicas adversas, ou seja, são curtos temporários. Isso ocorre pelo fato de as linhas de transmissão serem mais susceptíveis a descargas

atmosféricas devido ao fato de estarem expostas e serem extensas (MEDEIROS, 2017). Dito isto, nota-se a importância do religamento tripolar, pois com este mecanismo é possível tentar o restabelecimento da operação de uma LT após seu desligamento, sem a necessidade de intervenção humana, o que faz com que seja uma ação mais rápida, garantindo assim a qualidade no fornecimento de energia elétrica. Ou seja, após o desligamento de uma linha por qualquer motivo, com a abertura dos seus disjuntores terminais, as linhas com religamento tripolar implementado no seu sistema de proteção, tentam automaticamente religar esses disjuntores e voltar a operação após o tempo morto, causando menos problemas ao SIN.

Figura 2 – Principais Causas de Perturbações em Linhas de Transmissão.



Fonte: ONS (2025).

A compreensão dos fenômenos transitórios não se limita apenas ao aspecto acadêmico, mas constitui etapa crucial para o planejamento e a operação do sistema elétrico. Esse conhecimento é fundamental para o correto dimensionamento de equipamentos de subestações e linhas de transmissão, garantindo que a infraestrutura projetada suporte os esforços elétricos impostos durante manobras, faltas ou religamentos. Por esse motivo, os estudos de transitórios integram o conjunto de análises exigidas para o desenvolvimento de novos empreendimentos de transmissão. (ONS, 2016).

O religamento tripolar de linhas de transmissão é um dos estudos de transitórios eletromagnéticos que deve ser realizado e é de extrema importância em projetos de novas linhas de transmissão, pois é com este estudo que se permite dimensionar os componentes de proteção das subestações, e juntamente com o estudo de energização de linha e de rejeição de carga, deve ser desenvolvido dentro das atividades para o projeto básico da instalação. Os objetivos do estudo de religamento tripolar de linha é avaliar as energias dissipadas nos para-raios de linha, tendo em vista o seu dimensionamento sob o ponto de vista da capacidade de absorção de energia (kJ/kV), verificar a adequação da coordenação do isolamento das estruturas das linhas de transmissão frente a surtos de manobras, efetuando-se a integração

com os estudos do seu projeto básico e por fim, avaliar as máximas sobretensões transitórias impostas aos barramentos das subestações e aos terminais das linhas de transmissão. (ONS 2022).

Nesse contexto, o presente trabalho busca analisar o comportamento das sobretensões terminais frente a manobra de religamento tripolar de linha variando seu comprimento. Embora o estudo de religamento tripolar seja tradicionalmente utilizado para determinar o correto dimensionamento dos equipamentos das subestações terminais de uma linha, este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem como foco principal comparar os valores das sobretensões nessas subestações a partir da variação do seu comprimento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Visão Geral de Um Projeto Básico de uma Linha de Transmissão

O planejamento do sistema de transmissão inicia-se a partir do Plano Nacional de Energia (PNE), que estabelece diretrizes e projeta a demanda futura de energia elétrica no país. Com base nessas projeções, alternativas de crescimento do sistema de transmissão são analisadas e, baseado no mínimo custo global, são indicadas novas linhas de transmissão e ampliações da infraestrutura existente. Os estudos dessas alternativas, através dos chamados relatórios R, é capitaneado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e subsidiam tecnicamente o Ministério de Minas e Energia (MME) na definição dos empreendimentos que farão parte dos leilões da transmissão, este conduzido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel).

Após ocorrido o leilão, as empresas vencedoras por cada empreendimento devem primeiramente realizar os estudos de Projeto Básico (PB). Tais estudos têm como objetivos centrais a especificação dos equipamentos daquele empreendimento e comprovar que estes não causarão efeitos que comprometam a confiabilidade e a qualidade do Sistema Interligado Nacional (SIN). Nesse ponto, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) desempenha papel central, analisando se os Projetos Básicos atendem aos requisitos técnicos, sendo esta uma etapa indispensável para que o empreendimento avance para sua fase de implementação. (ONS, 2022).

Uma vez concluída a análise e aprovação dos documentos do Projeto Básico, o ONS emite o Certificado de Conformidade de Projeto Básico (CCPB), atestando que o empreendimento atende aos requisitos técnicos estabelecidos e pode seguir para a fase de projeto executivo e implantação

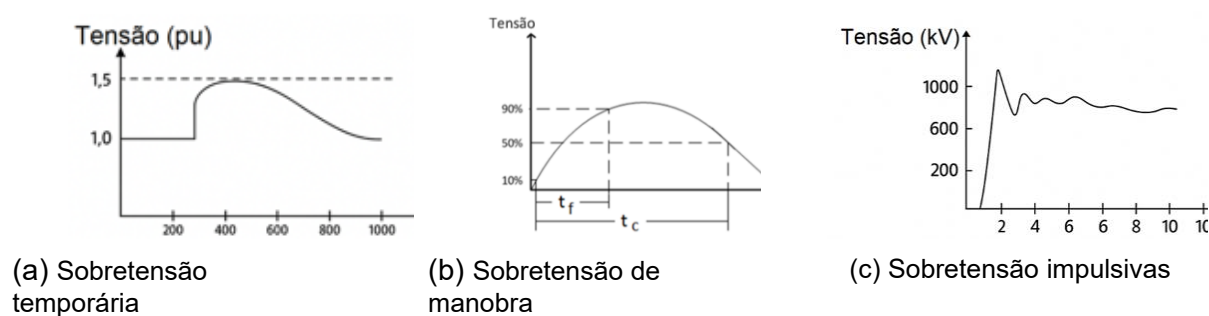
2.2 Transitórios Eletromagnéticos: definição, causas e efeitos

Os transitórios eletromagnéticos são perturbações de curta duração e elevado conteúdo espectral que ocorrem em sistemas elétricos devido a eventos súbitos, como manobras de disjuntores, faltas, religamentos automáticos, descargas atmosféricas e comutações de equipamentos (DA'JUZ et al., 1987). Essas perturbações resultam em rápidas variações de tensão e corrente que se propagam ao longo das linhas de transmissão, podendo causar sobretensões, sobrecorrentes, distorções de forma de onda e esforços dielétricos severos sobre os equipamentos do sistema. A análise desses fenômenos é essencial para garantir a confiabilidade, a segurança operacional e a integridade física dos equipamentos das redes elétricas.

O estudo dos transitórios eletromagnéticos tem como principal objetivo compreender o comportamento dinâmico do sistema de potência diante de distúrbios, permitindo o dimensionamento adequado do isolamento dos equipamentos, a escolha correta de para-raios e a definição de estratégias de manobra seguras. Segundo Prado et al. (2007), o entendimento desses fenômenos possibilita antecipar situações críticas e mitigar riscos de falhas catastróficas, garantindo maior estabilidade e continuidade do fornecimento de energia elétrica.

As sobretensões associadas aos transitórios podem ser classificadas conforme sua origem e duração. De acordo com SANTANA (2011), distinguem-se três tipos principais de sobretensões, como podemos observar na Figura 3: (a) sobretensões temporárias, de duração relativamente longa (até alguns segundos), normalmente associadas a desequilíbrios de carga ou a ressonâncias de frequência fundamental; (b) sobretensões de manobra, resultantes de operações de energização, religamento ou comutação de circuitos e equipamentos, com duração de alguns milissegundos; e (c) sobretensões impulsivas, causadas por descargas atmosféricas ou comutações muito rápidas, de duração de microssegundos. Cada uma dessas classes exige abordagem específica de estudo e proteção, considerando as características do sistema e a severidade esperada dos eventos.

Figura 3 – Representação de Tipos de Sobretensões



Fonte: SANTANA (2011).

As ondas trafegantes em linhas de transmissão constituem uma manifestação direta dos transitórios eletromagnéticos. Conforme descrito por DA'JUZ et al. (1987), uma súbita variação de tensão em um ponto de uma linha não se propaga instantaneamente para os demais pontos, mas sim como uma onda que viaja com velocidade finita determinada pelos parâmetros distribuídos de indutância e capacitância. Essa propagação gera reflexões e refrações nas discontinuidades de impedância como conexões, transformadores ou reatores, amplificando localmente as sobretensões. Dessa forma, o entendimento das ondas trafegantes é essencial para prever e mitigar os impactos transitórios em sistemas de alta tensão.

2.3 Sobretensões de Manobra

O chaveamento de linhas de transmissão, tais como energização, religamento ou rejeição de carga, dão origem à sobretensões transitórias de origem interna, que ocorrem em decorrência de operações de manobra em sistemas de potência. Esses fenômenos apresentam natureza oscilatória e amortecida, podendo atingir valores entre 1,5 e 3,0 pu, e, em casos críticos, até 4,0 pu. Sua ocorrência pode causar esforços dielétricos significativos, sendo determinante no dimensionamento dos

isolamentos de equipamentos e na coordenação de isolamento do sistema. (DA'JUZ et al., 1987).

Durante a energização de linhas, as sobretensões surgem pela interação entre as componentes capacitivas e indutivas do sistema, que produzem ondas de tensão e corrente refletidas ao longo do trecho energizado. Já no religamento, as sobretensões estão associadas também à carga residual remanescente após a abertura do circuito. O tempo morto do religamento, a presença de para-raios e de reatores de compensação shunt, e a utilização de resistores de pré-inserção influenciam diretamente a magnitude do transitório, reduzindo os valores das sobretensões (PRADO et al., 2007).

As simulações de religamento tripolar são realizadas de forma estatística, a fim de verificar o instante na onda de tensão em que o fechamento da chave causa maior efeito. Assim, as sobretensões de manobra são analisadas sob critérios probabilísticos, considerando diferentes instantes de fechamento das fases e condições do sistema. Assim, o comportamento transitório observado depende da configuração da linha, da topologia das torres e da interação entre suas capacitâncias e reatâncias. O entendimento desses fenômenos é essencial para o desenvolvimento de estudos de coordenação de isolamento e para a definição de estratégias de mitigação adequadas aos sistemas de transmissão e subtransmissão. (PRADO et al., 2007). O estudo de religamento tripolar em linhas de transmissão, estudo central desse TCC, se classifica como um estudo de manobra.

2.4 Modelagem das Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão (LTs) podem ser classificadas de acordo com o seu comprimento elétrico, o que define o tipo de modelagem mais adequada para representar seus comportamentos de tensão e corrente ao longo do percurso. De forma geral, considera-se linha curta aquela com comprimento inferior a 80 km, linha média entre 80 km e 240 km, e linha longa aquela superior a 240 km. Essa classificação é importante, pois o aumento do comprimento da linha intensifica os efeitos distribuídos da capacitância e da indutância, tornando inadequadas as simplificações empregadas em modelos concentrados. (LIMA; PEREIRA, 2000).

Nas linhas curtas, devido à pequena extensão, o efeito da capacitância pode ser desprezado, sendo possível adotar modelos simplificados de parâmetros concentrados, nos quais a tensão e a corrente são consideradas uniformes ao longo do trecho. Já nas linhas médias, a capacitância passa a influenciar os resultados, podendo ser representada por um modelo π ou T, com a divisão da linha em segmentos equivalentes que aproximam o comportamento real do sistema.

Entretanto, nas linhas longas, os parâmetros elétricos não podem ser considerados concentrados, pois as variações de tensão ao longo da linha tornam-se significativas. Nesse caso, a modelagem deve considerar a natureza distribuída dos parâmetros elétricos, resistência (R'), indutância (L'), capacitância (C') e condutância (G'), expressos por unidade de comprimento. Essa abordagem permite descrever o comportamento dinâmico da linha por meio de equações diferenciais parciais que relacionam as variações espaciais e temporais das grandezas elétricas.

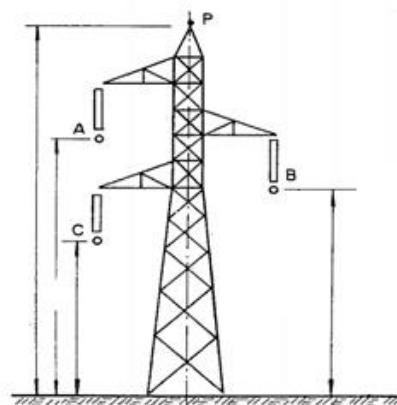
A utilização de modelos à parâmetros distribuídos é essencial em estudos de transitórios eletromagnéticos, uma vez que garante a correta representação das

ondas trafegantes e das interações entre fases. No programa ATP (Alternative Transients Program), essa representação é obtida através da subdivisão da linha em múltiplas seções equivalentes como circuitos π , permitindo a simulação numérica de fenômenos rápidos com elevado grau de precisão. Assim, a modelagem distribuída torna-se indispensável para análises de sobretensões de manobra, energização e religamento de linhas de transmissão de grande porte, assegurando a fidelidade dos resultados e a correta avaliação dos esforços elétricos no sistema. (LIMA, PEREIRA, 2000).

2.5 Capacitância, Resistência e Indutância

A capacitância (C') em linhas de transmissão decorre da diferença de potencial entre os condutores e entre estes e o solo, como apresentado na Figura 4, fazendo com que a linha se comporte como um capacitor de múltiplos eletrodos. Seu valor é influenciado pela geometria formada pelos condutores na torre, pela distância média entre eles, pela altura em relação ao solo e pela presença de estruturas metálicas e isoladores, que também funcionam como eletrodos adicionais, como podemos notar pela equação (1) (COELHO, 2024). A capacitância é responsável pela corrente de carregamento da linha, geralmente desprezível em linhas curtas, mas significativa em linhas longas, subterrâneas e submarinas, podendo inclusive limitar sua capacidade de transmissão. (COELHO, 2024; FUCHS, 1977).

Figura 4 – Capacitância em Torres de Transmissão.



Fonte: FUCHS (1977).

$$C_k = \frac{24,2}{\log\left(\frac{D}{r'}\right)} \cdot 10^{-9} \quad [\text{F/km}] \quad (1)$$

D =Distância média geométrica entre condutores [mm];

r' =Raio médio geométrico do condutor [mm].

A indutância (L'), por sua vez, resulta do campo magnético associado à circulação de corrente nos condutores e se divide em fluxo interno (dentro do condutor) e externo (no espaço ao redor). Seu valor depende da disposição geométrica, do espaçamento entre os cabos e da presença de múltiplos condutores por fase, como podemos notar na equação (2) (COELHO, 2024).

$$L_k = \left[\frac{\mu}{2 \cdot n} + 4,605 \cdot \log \left(\frac{D}{r'} \right) \right] \cdot 10^{-4} \quad [\text{H/km}] \quad (2)$$

μ =Permeabilidade relativa do condutor;

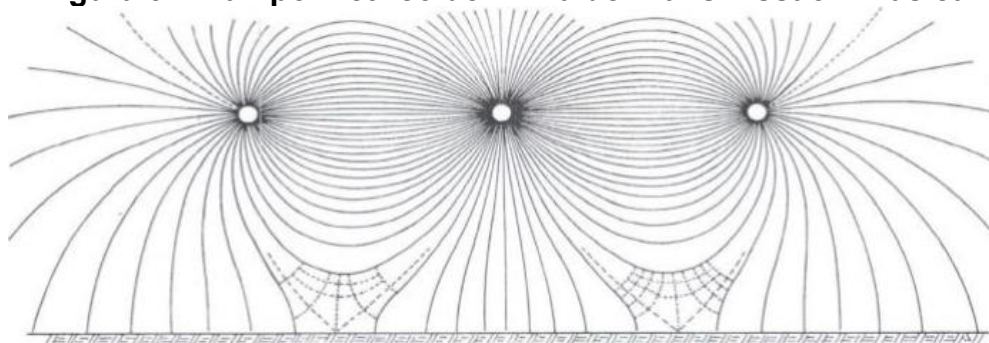
n =Número de condutores por fase;

D =Distância geométrica entre condutores [mm];

r' =Raio fictício do condutor [mm].

Energeticamente, a capacitância armazena energia eletrostática, enquanto a indutância armazena energia magnética, como pode ser visto na Figura 5, sendo ambas fundamentais para o comportamento dinâmico da linha. O comprimento da linha altera os parâmetros L' e C' e por isso modificam a amplitude, a frequência e o amortecimento dos transitórios eletromagnéticos. (COELHO, 2024; FUCHS, 1977).

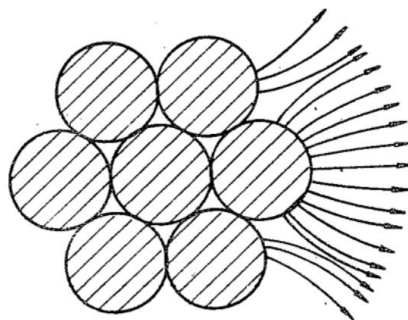
Figura 5 – Campo Elétrico de Linha de Transmissão Trifásica.



Fonte: VILLAS (2015).

A resistência elétrica (R') é outro parâmetro fundamental das linhas de transmissão, pois influencia diretamente as perdas de energia e o amortecimento dos transitórios eletromagnéticos. Sua magnitude depende do material condutor, da resistividade elétrica e da seção transversal do cabo. Em corrente contínua, a resistência pode ser calculada pela razão entre a resistividade e a área da seção do condutor, sendo também influenciada pela temperatura, que aumenta a resistência conforme eleva-se a temperatura de operação. Em corrente alternada, a análise é mais complexa devido à não uniformidade da densidade de corrente, causada pelos efeitos pelicular e de proximidade, como visto na Figura 6, que reduzem a seção efetiva de condução e elevam o valor da resistência, como podemos reparar na equação (3) (COELHO, 2024). Esses fenômenos tornam-se mais relevantes em altas frequências, embora, para redes de 50 ou 60 Hz, o efeito de proximidade geralmente seja desprezível. (COELHO, 2024).

Figura 6 – Densidade de Fluxo em Filamentos de Cabos Elétricos.



Fonte: FUCHS (1977)

$$R_{CA} = R_{CC} \cdot (1 + Y_s + Y_p) \quad [\Omega/\text{km}] \quad (3)$$

R_{CA} = Resistência em corrente alternada;

R_{CC} = Resistência em corrente contínua;

Y_s = Fator de efeito pelicular;

Y_p = Fator de efeito de proximidade;

2.6 Efeitos do Comprimento da Linha

O comprimento total da linha aumenta a capacitância e indutância agregadas, com isso, cresce a energia acumulada ao longo da linha e potencialmente a magnitude das sobretensões terminais na manobra de religamento tripolar, além de modificar as frequências dominantes do transitório - maior proliferação de modos de onda (DA'JUZ et al., 1987; COELHO, 2024; FUCHS, 1977).

Essas relações justificam a análise comparativa por variação de comprimento da linha apresentada nesse trabalho.

3 METODOLOGIA

Como já explanado anteriormente, este trabalho tem o objetivo de demonstrar a influência que mudanças nos parâmetros das linhas de transmissão causam nos valores de sobretensão na manobra de religamento tripolar. Para isto se utilizou ferramentas computacionais para realização de simulações, com as quais obteve-se valores de sobretensão para assim poder ao final se fazer comparações e assim confirmar se de fato foi encontrado o que era esperado, não tendo como foco o dimensionamento de qualquer componente para esta LT ou para as subestações em questão.

A análise realizada foi feita a partir da modelagem e simulação de transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão utilizando o programa computacional *Alternative Transients Program* (ATP), a partir de um caso base disponibilizado pela Aneel em estudos de suporte a leilões de transmissão. A partir desse caso base Aneel de referência, realizou-se adaptações necessárias para a análise, considerando as limitações do software e as simplificações necessárias. Após essas adaptações no caso Aneel, definiu-se o caso base de trabalho utilizado, detalhando seus parâmetros principais. A partir desse caso base de trabalho, foram implementados as variações propostas e os cenários de religamento tripolar avaliados, com o objetivo de

compreender a influência das capacitâncias e indutâncias da linha sobre as sobretensões observadas.

3.1 Programa ATP (Alternative Transient Program)

O *Alternative Transients Program* (ATP) é um software gratuito de simulação computacional amplamente utilizado para estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência. Trata-se de uma versão de domínio público do *Electromagnetic Transients Program* (EMTP), desenvolvida originalmente nos anos 1980, com atualizações constantes pela comunidade de usuários e pesquisadores associados ao *Canadian/American EMTP User Group* (CAU/EEUG). O ATP pode ser utilizado tanto por instituições de ensino quanto por empresas do setor elétrico, sendo uma ferramenta gratuita e acessível. (AMON FILHO; PEREIRA, 1996).

Do ponto de vista matemático, o programa combina diferentes métodos numéricos para representar os elementos do sistema elétrico. Para linhas com parâmetros distribuídos, utiliza-se o método das características (método de Bergeron), enquanto que para elementos com parâmetros concentrados aplica-se a regra de integração trapezoidal. (AMON FILHO; PEREIRA, 1996).

Outra característica relevante é a variedade de elementos disponíveis para modelagem, que inclui linhas de transmissão, transformadores, reatores, cabos com parâmetros distribuídos, para-raios, chaves e elementos não lineares. Esses componentes podem ser descritos em termos de componentes de fase, sequência positiva e sequência zero, permitindo a investigação de fenômenos como sobretensões de manobra, descargas atmosféricas, curtos-circuitos e interações eletromagnéticas em redes polifásicas de diferentes configurações. (AMON FILHO; PEREIRA, 1996).

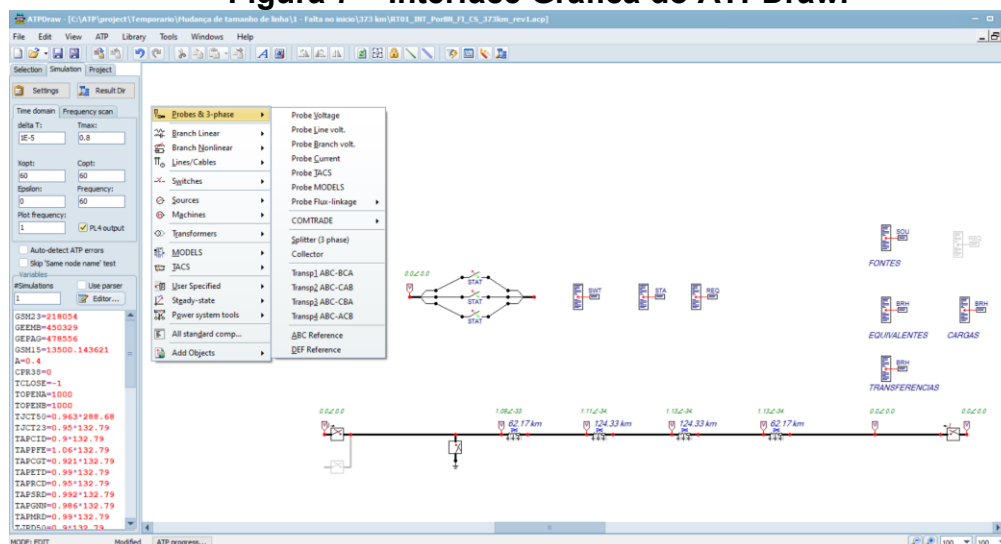
O ATP opera a partir de um arquivo de dados em formato texto simples (ASCII), o que garante sua edição em praticamente qualquer editor, desde programas básicos como o EDIT do MS-DOS ou o Notepad, até ferramentas mais modernas de edição. Esse arquivo contém todas as informações necessárias para a simulação, sendo a principal interface de entrada de dados do programa. (TAVARES; CAMPOS; PRADO, 2003).

Após o processamento do arquivo de entrada, o software gera automaticamente um arquivo de saída com extensão .LIS, que reúne os resultados do estudo realizado de forma detalhada. Além disso, há a possibilidade de criação de um arquivo gráfico adicional com extensão .PL4, no qual são armazenados os valores das grandezas elétricas solicitadas, estruturados em vetores coluna. Esses resultados podem ser posteriormente manipulados ou visualizados em ferramentas auxiliares, conforme instruções previamente definidas no início da execução do caso. (TAVARES; CAMPOS; PRADO, 2003).

Na Figura 7, tem-se a interface gráfica do software utilizado para este estudo (ATPDraw) ao clicar com o botão direito do mouse é possível visualizar uma caixa com diversos tipos de componentes, como por exemplo, uma fonte, linha de transmissão, medidores, para-raios, reatores, dentre outros, que são utilizados para modelagem de uma linha de transmissão, como é o caso analisado neste estudo. Esta interface gráfica permite que de forma simples e prática o seu usuário modele o circuito que deseja, e o próprio programa se encarrega de transformar o que lhe foi

passado em forma de “desenho” para códigos, que é o que de fato é utilizado como entrada do programa, onde com esses dados ele consegue simular e retornar os resultados, em forma de um arquivo de texto. Vale salientar que o objetivo deste trabalho não foi de modelar linhas de transmissão, apenas simular uma LT já modelada.

Figura 7 – Interface Gráfica do ATPDraw.



Fonte: Própria.

Na Figura 8, tem-se um exemplo do resultado de uma simulação realizada no ATPDraw (Arquivo de saída, extensão .LIS), esse resultado é fornecido em formato de texto, onde nele foi possível coletar os dados para a construção deste trabalho, como o maior pico de tensão em cada ponto de medição e em que tempo ocorreu este pico de tensão.

Figura 8 – Arquivo de saída da Simulação, Extensão .LIS.

```

r01_int_porbn_fl_cs_37km_rev1 - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
MAIN20 dumps OVER12 dice seed SEEDSV = 1.0110347100000000E+09
Comment card. NUPDCD = 4041.
Comment card. NUPDCD = 4042.
Comment card. NUPDCD = 4043.
Comment card. NUPDCD = 4044.
Comment card. NUPDCD = 4045.
Comment card. NUPDCD = 4046.
Comment card. NUPDCD = 4047.
Comment card. NUPDCD = 4048.
Comment card. NUPDCD = 4049.
Comment card. NUPDCD = 4050.
MODTAB, AINCR, XMAXX = 3 0.100 10.000
Comment card. NUPDCD = 4052.
Initialize variables as "FIND"
Send (request, ALL, SPY, RESET, EXCLUDE, DISK, HELP, QUIT) :
Statistical output of node voltage 0.4483E+06 | DBNCFADBNCFBDNCFB
Peak extremum of subset has value 8.95676073E+05 This occurred during
simulation 161 for the variable having names "DBNCFB" and "TERRA".
This was variable 2 of 3 in the subset; 200 shots were searched.
Send (request, ALL, SPY, RESET, EXCLUDE, DISK, HELP, QUIT) :
Exit FIND by resuming statistical tabulations. |QUIT
Statistical output of node voltage 0.4082E+06 | 408248.20DBNCFADBNCFBDNCFB

1 )
Statistical distribution of peak voltage at node "DBNCFB". The base voltage for per unit printout is V-base = 4.08248290E+05
Interval voltage voltage in Frequency Cumulative Per cent
number in per unit physical units (density) frequency .GE. current value
12 1.2000000 4.89897948E+05 0 0 100.000000
13 1.3000000 5.38722777E+05 24 24 88.000000
14 1.4000000 5.71547606E+05 46 70 65.000000
15 1.5000000 6.12372435E+05 60 130 35.000000
16 1.6000000 6.53197264E+05 52 182 9.000000
17 1.7000000 6.94022093E+05 18 200 .000000
Summary of preceding table follows: Grouped data Ungrouped data
Mean = 1.44700000E+00 1.44439625E+00
Variance = 1.33577889E-02 1.25603718E-02
Standard deviation = 1.15575901E-01 1.12073061E-01

2 )
Statistical distribution of peak voltage at node "DBNCFB". The base voltage for per unit printout is V-base = 4.08248290E+05
Interval voltage voltage in Frequency Cumulative Per cent
number in per unit physical units (density) frequency .GE. current value
18 1.8000000 7.34846922E+05 0 0 100.000000
19 1.9000000 7.75671751E+05 163 163 18.500000

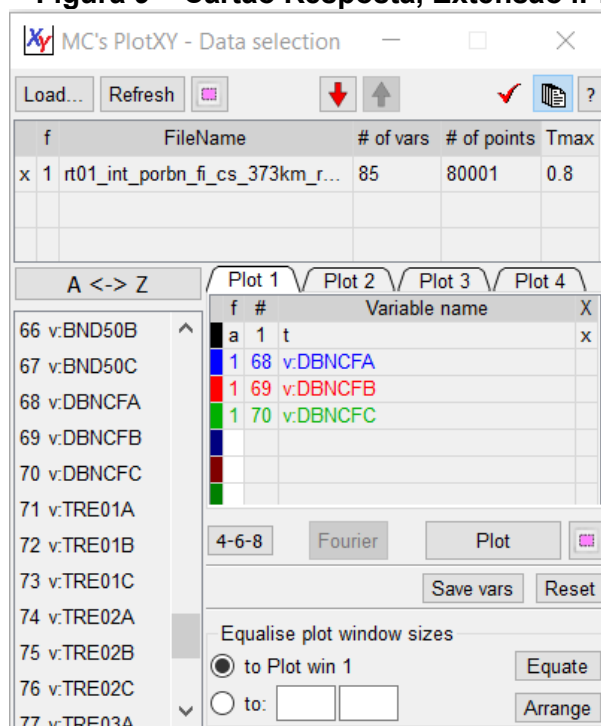
```

Fonte: Própria.

Na Figura 9 pode se observar o cartão resposta (PlotXY) da simulação realizada no ATPDraw. Com o PlotXY é possível obter diversos gráficos de forma rápida e de fácil entendimento, como os que serão apresentados no decorrer deste trabalho.

Como exemplo temos a imagem 3.8, onde nela é apresentado um gráfico da tensão em volts em função do tempo.

Figura 9 – Cartão Resposta, Extensão .PL4.



Fonte: Própria.

3.2 Caso Base Aneel

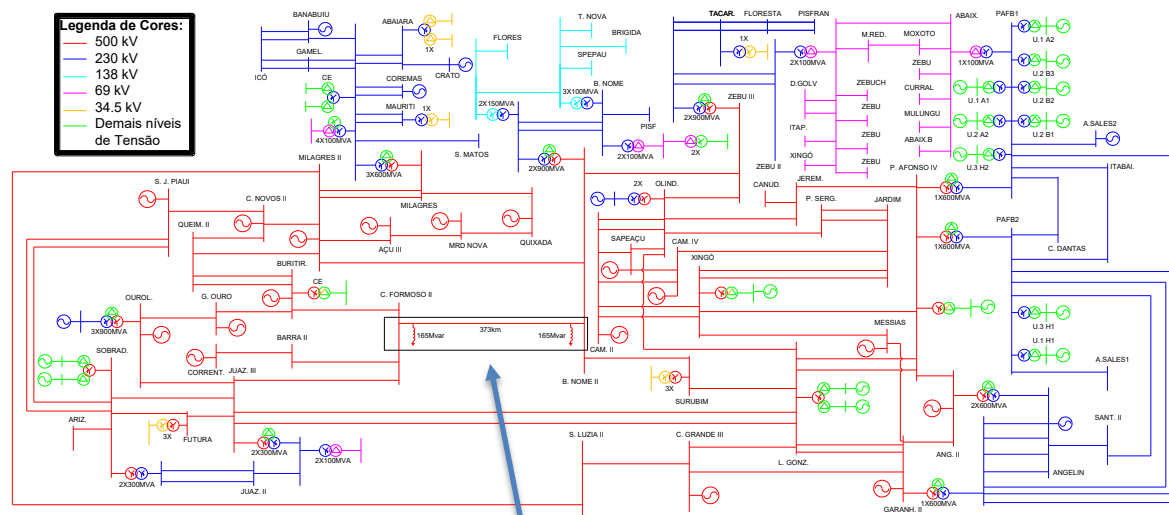
O caso base ATP utilizado neste trabalho foi o caso de simulação utilizado para elaboração do documento “*Estudos de Transitórios Eletromagnéticos para Definição das Características Básicas da LT 500 kV Bom Nome II – Campo Formoso II*”, disponibilizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em sua base de dados de apoio aos leilões de transmissão. Trata-se de um estudo desenvolvido com o objetivo de fornecer suporte técnico à licitação dessa linha de transmissão, no qual são definidos parâmetros básicos dessa linha e a especificação básica de alguns equipamentos associados às subestações. Trata-se de um estudo de referência nomeado como R2 e faz parte dos chamados relatórios R, de responsabilidade da EPE e já comentados anteriormente.

Na elaboração de estudos de transitórios eletromagnéticos por meio do programa ATP, existem limitações que impedem a representação integral do sistema elétrico. Dessa forma, uma rede elétrica equivalente ao sistema completo é modelada no entorno do empreendimento estudado, de forma a representar os fenômenos analisados de forma adequada. Essa prática está em conformidade com as *Diretrizes para Projetos Básicos, emitida pelo Operador Nacional do Sistema (ONS)*.

Considerando as restrições de acesso a dados completos dos componentes do sistema elétrico, optou-se por utilizar diretamente o caso base disponibilizado pela ANEEL em seu site. Essa escolha assegura que a análise esteja alinhada a estudos oficiais e confiáveis, além de permitir que o foco seja direcionado à avaliação do comportamento das sobretensões durante as manobras de religamento tripolar e não a montagem de um caso no ATP.

A Figura 10 apresenta o diagrama esquemático do sistema analisado, destacando a LT 500 kV Bom Nome II – Campo Formoso II, com seus principais componentes modelados para as simulações de transitórios eletromagnéticos.

Figura 10 – Rede elétrica equivalente modelada para estudos de transitórios eletromagnéticos da LT 500 kV Bom Nome II – Campo Formoso II.



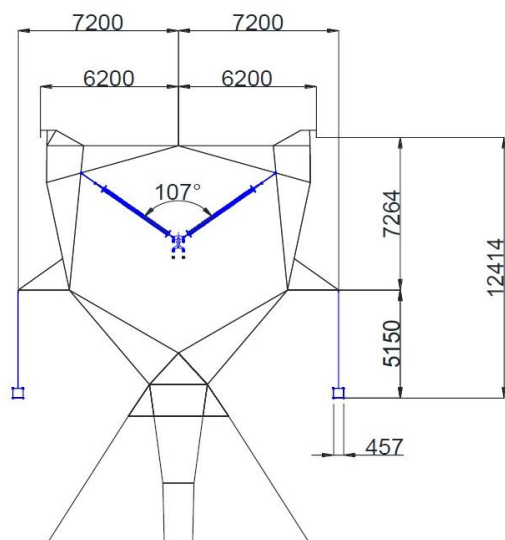
Fonte: Chesf (2022).

O sistema elétrico analisado neste estudo corresponde à linha de transmissão que interliga a Subestação de Bom Nome II, localizada no município de Bom Nome-PE, à Subestação de Campo Formoso II, situada em Campo Formoso-BA, possuindo extensão de 373 km. A linha de transmissão é equipada com para-raios de óxido de zinco com tensão nominal de 420 kV, enquanto para o neutro dos reatores de linha foram considerados para-raios destinados a sistemas de 138 kV, com tensão nominal de 120 kV. Adicionalmente, o sistema conta com reatores de linha com potência reativa de 165 MVar e reatores de neutro com resistência de 600 Ω , os quais desempenham papel fundamental na mitigação das sobretensões transitórias e no controle do regime de compensação reativa da linha.

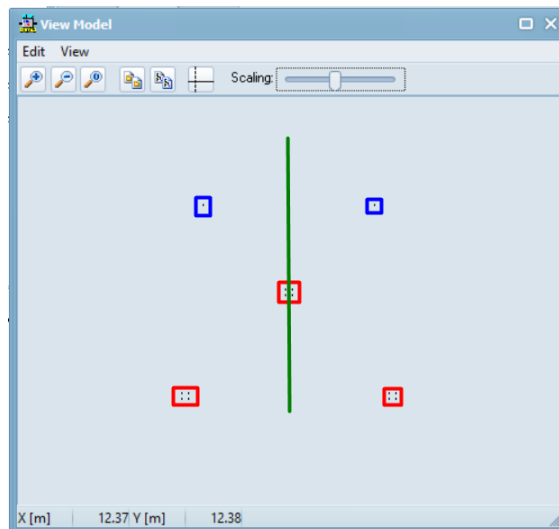
A torre típica utilizada no caso base Aneel pode ser observada nas Figuras 11 (a) e (b), onde temos os cabos condutores dispostos em formato triangular. As informações dos cabos e distâncias horizontais e verticais para cada tipo de torre podem ser observadas na Tabela 1.

Conforme abordado anteriormente nas simulações, foi utilizado o modelo de linha distribuído 03 — cuja modelagem necessita como dados de entrada os parâmetros de sequência zero e positiva de resistência, indutância e capacitância. Esses parâmetros são obtidos através do módulo *Line Constant Calculation* (LCC) do ATP. No LCC, são inseridos os dados dos cabos condutores e para-raios e as distâncias horizontais e verticais desses cabos na torre, conforme observado na Figura 12, e ao realizar a simulação deste módulo obtém-se os valores de sequência positiva e zero da resistência, indutância e capacitância conforme pode ser observado na Tabela 2. Esses parâmetros são necessários para utilização do modelo de linha distribuído 03, tendo vista que este modelo não permite como dados de entrada para a simulação as características dos cabos e geométricas da torre, como pode ser visto na imagem 13.

Figura 11 - Disposição Geométrica dos Cabos Fase e Para-raios da Torre Típica da LT do Caso Base Aneel.



(a) Estrutura da torre.



(b) Disposição geométrica dos cabos no software ATPDraw.

Fonte: Própria.

Tabela 1 – Dados de entrada para o LCC

	Rin (cm)	Rout (cm)	Resis (Ohm/km)	Horiz (m)	Vtower (m)	Vmid (m)	Separ (cm)	Alpha (deg)	NB
FASE A	0,3375	1,3515	0,08062	-7,5	35,26	12,46	45,7	45	4
FASE B	0,3375	1,3515	0,08062	0	42,76	19,96	45,7	45	4
FASEC	0,3375	1,3515	0,08062	7,5	35,26	12,46	45,7	45	4
CABO GUARDA 1	0,305	0,665	0,698	-6,2	47,3	27,1	0	0	1
CABO GUARDA 2	0	0,457	4,11	6,2	47,3	27,1	0	0	1

Topologia de Torre 01.

Rin: Raio interno dos cabos;

Rout: Raio externo dos cabos;

Resis: Resistência elétrica do cabo;

Horiz: Distância horizontal do cabo até a torre;

Vtower: Distância vertical do cabo para o chão;

Vmid: Tamanho de flecha do cabo;

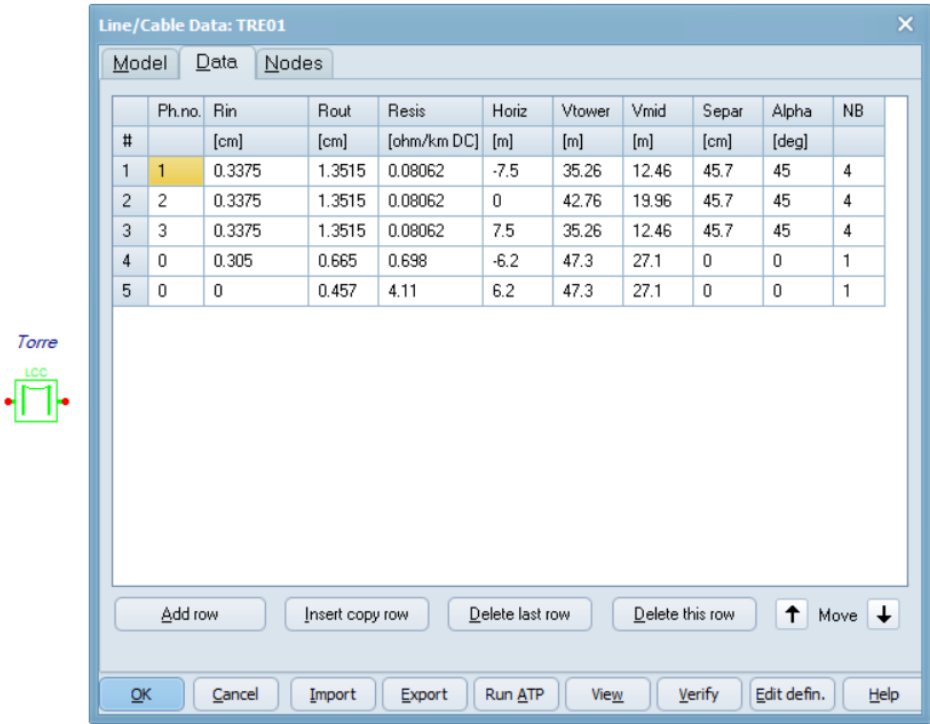
Separ: Distância entre os cabos;

Alpha: Angulação feita entre os cabos da fase;

NB: Quantidade de cabos por fase.

Fonte: Própria.

Figura 12 - Módulo *Line Constant Calculation (LCC)*.



Fonte: Própria.

Tabela 2 – Valores de Resistência, Indutância e Capacitância da Topologia da Torre do Caso Base Anel obtidas através do LCC.

	R'+ (Ohm/km)	R'0 (Ohm/km)	L'+ (Ohm/km)	L'0 (Ohm/km)	C'+ (µS/km)	C'0 (µS/km)
TORRE 01	0,024	0,322	0,322	1,353	5,088	2,782

Fonte: Própria.

R'+: Resistência de sequência positiva;

R'0: Resistência de sequência zero;

L'+: Impedância de sequência positiva;

L'0: Impedância de sequência zero;

C'+: Capacitância de sequência positiva;

C'0: Capacitância de sequência zero.

Fonte: Própria.

Figura 13 – Modelo de linha distribuído 03.

DATA	UNIT	VALUE
R ⁺	Ohm/m	0.024
R ⁰	Ohm/m	0.322
L ⁺	Ohm/m	0.322
L ⁰	Ohm/m	1.353
C ⁺	μS/m	5.088
C ⁰	μS/m	2.782

NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	TRE01
OUT1	ABC	

Order: 0 Label: 124.34 km

Comment: _____

Lines: Length 124.34 [m] ILINE: ☒ L', C' Conductance: ☒ G=0

Output: No ☐ Z, v ☐ G=R'C/L

☐ Hide ☐ \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: Própria.

3.3 Caso Base de Trabalho

Como abordado anteriormente, o intuito deste trabalho é a análise dos valores de sobretensão gerados pelos religamentos tripolares variando o comprimento da linha. Porém nas primeiras simulações observou-se que o comportamento dessas sobretensões não condizia com a literatura, onde os valores dessas sobretensões deveriam aumentar com o aumento do comprimento da LT. Após uma série de análises, observou-se que esse comportamento não esperado se devia a presença de alguns equipamentos na LT, tais como os para-raios e suas não linearidades e os reatores de linha, que atuam no sentido de limitar as sobretensões.

Assim para que os efeitos relacionados exclusivamente ao comprimento da linha pudessem ser analisados de forma isolada, esses dispositivos de proteção e equipamentos operacionais (como reator de linha) foram removidos das simulações. Essa modificação, ainda que não seja aplicável na prática — já que uma linha de transmissão de 500 kV não pode operar sem reatores de linha (uma vez definido em projeto) e para-raios (elemento fundamental para proteção da LT), justifica-se por se tratar de uma análise acadêmica, cujo propósito é evidenciar o comportamento das sobretensões na manobra de religamento tripolar com a variação do comprimento da linha e esses equipamentos mitigadores de sobretensão poderiam influenciar na resposta, principalmente os para-raios, devido ao seu comportamento não-linear.

A representação da linha no ATPDraw utilizou o modelo distribuído número 3 de linha perfeitamente transposto, disponível no programa. Para realizar medições de tensão, a linha foi segmentada em quatro blocos, obedecendo à proporção $1/6 + 1/3 + 1/3 + 1/6$ do comprimento total.

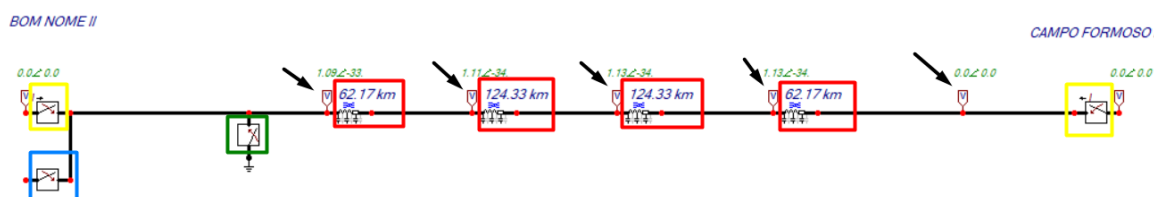
A Figura 14 representa a modelagem da LT analisada no ATPDraw. Nela podem ser observados os disjuntores terminais de cada subestação, modelados através de

chaves, uma chave que simula a falta monofásica para a terra, neste caso em específico a falta é aplicada no início da LT e a modelagem da linha por trechos, como abordado anteriormente. Nossa análise foi feita considerando como início da LT a subestação de Bom Nome II e o final de linha a subestação de Campo Formoso II, tendo em vista que os valores de sobretensão colhidos foram obtidos através do religamento realizado pela subestação de Bom Nome II.

As medições das tensões foram realizadas utilizando os componentes indicados por setas na Figura 14. A aferição foi feita no início da LT, em 25%, 50%, 75% e no final da LT, pois mesmo sendo o intuito deste trabalho apenas analisar os valores das sobretensões obtidas no final da linha, as tensões ao longo da linha também foram monitoradas, de acordo como é praticado em estudos desta natureza, e com isso também se pode comprovar que de fato os maiores picos de sobretensão são obtidos ao final da LT.

A escolha de se analisar apenas os valores no final da LT se fundamenta na premissa de que, por estar mais distante da origem do religamento, o local estará mais suscetível à propagação e à reflexão de ondas transitórias, o que pode amplificar os efeitos das sobretensões observadas. Assim, ao posicionar o ponto de medição no extremo oposto da linha, garante-se uma condição mais crítica e conservadora para a análise, permitindo uma melhor avaliação do comportamento do sistema frente aos esforços dielétricos impostos durante o processo de religamento.

Figura 14 - Modelagem do Caso Base da Linha de transmissão no ATPDraw.



Fonte: Própria.

3.3.1 Ajustes dos Casos de Estudo Para Simulações Variando o Comprimento da Linha de Transmissão

Com o intuito de se analisar a influência que o comprimento da linha causa nos valores de sobretensão gerados através de um religamento tripolar, foram realizadas simulações com diferentes comprimentos de linha: 50 km, 100 km, 200 km, 300 km e 373 km (este último representando o comprimento original da linha). Em todas as simulações, o religamento foi aplicado a partir da subestação de Bom Nome II, enquanto o ponto de medição das sobretensões foi definido na barra de Campo Formoso II, localizada na extremidade oposta da linha, conforme foi dito anteriormente. Essa escolha se deve ao fato de que, no terminal mais distante, tendem a ocorrer os maiores valores de sobretensão resultantes do transitório.

Cada configuração foi analisada em dois cenários: religamento com sucesso (extinção do defeito) e religamento sem sucesso (persistência do defeito). Para cada cenário, o ATP foi configurado para realizar 200 simulações estatísticas de religamento, nas quais o instante de fechamento do disjuntor foi variado aleatoriamente em diferentes pontos da forma de onda da tensão. Essa abordagem possibilitou observar a dispersão dos valores máximos de sobretensão em função da fase da onda no momento do chaveamento.

3.3 Procedimentos de Simulações

As análises realizadas buscaram avaliar o comportamento das sobretensões no terminal oposto da linha de transmissão sob condições de religamento tripolar (RT). Nesse contexto, dois cenários principais foram considerados:

- Religamento Tripolar sem sucesso na eliminação da falta: quando a falta não é temporária e o religamento ocorre sob a condição de falta;
- Religamento Tripolar com sucesso na eliminação da falta: quando a falta é temporária e o religamento ocorre com a falta já eliminada.

Normalmente as simulações de religamento tripolar são realizadas a partir das duas subestações terminais. Entretanto, como o objetivo desse trabalho não é especificar equipamentos e apenas avaliar as sobretensões variando alguns parâmetros da linha, o religamento tripolar nesse trabalho foi realizado apenas por um dos terminais da linha (por Bom nome II) e a sobretensão medida no terminal oposto (Campo Formoso II).

A sequência de eventos para a simulação de religamento tripolar é como segue:

- Aplicação de uma falta monofásica no início (SE Bom Nome II), no meio e no final da linha (SE Campo Formoso II);
- Abertura tripolar da SE de Bom Nome II 100 ms após a aplicação da falta;
- Abertura tripolar da SE de Campo Formoso II, por transferência de disparo, 20 ms após a abertura da SE de Bom Nome II;
- Eliminação do defeito 4 ciclos após a abertura do segundo terminal (SE Campo Formoso II) para os casos com sucesso na eliminação da falta;
- Tempo morto de 500 ms;
- Religamento estatístico da linha pela SE Bom Nome II.

Cabe ressaltar que o presente estudo possui caráter acadêmico, com foco em compreender os fenômenos transitórios e suas variações a partir de mudanças nos parâmetros simulados. Dessa forma, algumas condições consideradas nas simulações não refletem cenários práticos de operação, como a possibilidade de a linha operar sem determinados equipamentos compensadores.

Ainda assim, a utilização de um caso base real fornecido pela Aneel e a aplicação das diretrizes do ONS garantem que os resultados obtidos possuam relevância técnica, permitindo analisar de forma fundamentada a influência da capacitância e indutância das linhas de transmissão na propagação das sobretensões.

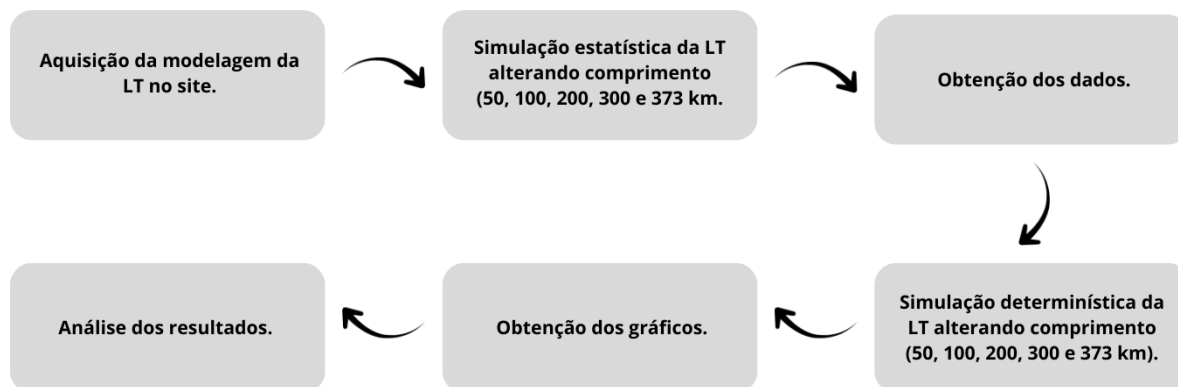
As simulações estatísticas foram conduzidas considerando um conjunto de 200 eventos de chaveamento em uma janela temporal correspondente a um ciclo, ou seja, em um ciclo de tensão, a chave estatística executa o comando de abrir e fechar 200 vezes em tempos aleatórios da onda de tensão, posteriormente dentre esses 200 acionamentos é retornado o valor da maior sobretensão e o tempo de simulação que se obteve a mesma. Com base nos resultados obtidos dessas simulações, procederam-se às simulações determinísticas, adotando-se o instante de ocorrência da maior sobretensão identificada em cada uma das simulações estatísticas.

Após a etapa estatística, foi identificado o pior caso de sobretensão em cada configuração (comprimento e tipo de religamento). Esse caso crítico foi então reproduzido em uma simulação determinística, onde os tempos exatos de fechamento dos disjuntores foram definidos conforme os resultados estatísticos mais severos. A

partir dessa simulação, foram obtidas as formas de onda completas das sobretensões transitórias em Campo Formoso II, possibilitando uma análise qualitativa e quantitativa detalhada dos efeitos do comprimento da linha na manobra de religamento tripolar.

Na Figura 15 é apresentando o fluxograma para uma melhor visualização de como se deu a sequência de estudos e simulações para a construção deste trabalho.

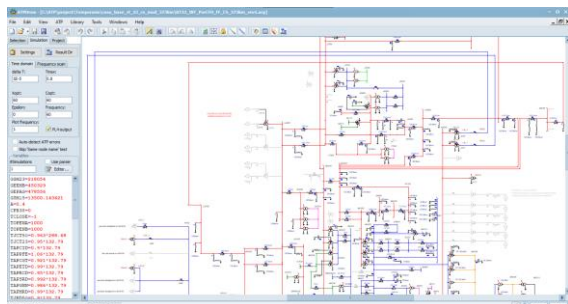
Figura 15 - Fluxograma do passo a passo realizado.



Fonte: Própria.

A aquisição da modelagem da LT foi obtida em um arquivo ACP, conforme Figura 16 (a), e com o auxílio do software ATP foi realizada a simulação estatística. Ao final dessa simulação é retornado como resposta um arquivo com extensão .LIS, Figura 16 (b), nele foi possível obter os maiores picos de sobretensão e o tempo de simulação em que ocorreu esse maior pico, em cada ponto de medição, posteriormente foi planilhado esses valores com o intuito de se verificar qual ponto apresentava maior valor de sobretensão, conforme Figura 16 (c). Por fim, realizou-se a simulação determinística, onde novamente era feita a simulação no software, porém, desta vez era inserido na chave que simulava o disjuntor da subestação de Bom Nome II o tempo exato de fechamento da maior sobretensão obtida em cada simulação, e como retorno obteve-se um arquivo com extensão .PL4, onde com este foi possível gerar os gráficos presentes no decorrer deste trabalho, da tensão em volts em função do tempo, conforme pode ser observado na Figura 16 (d). Vale ressaltar que este passo a passo relatado foi realizado para cada tipo de simulação, ou seja, para cada quilometragem este passo a passo foi feito seis vezes, sendo três vezes (falta no início, meio e fim) para o religamento tripolar com sucesso e mais três vezes para o religamento tripolar sem sucesso.

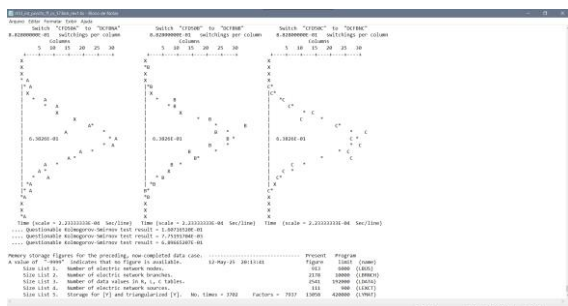
Figura 16 – Passo a passo da simulação de cada caso de estudo.



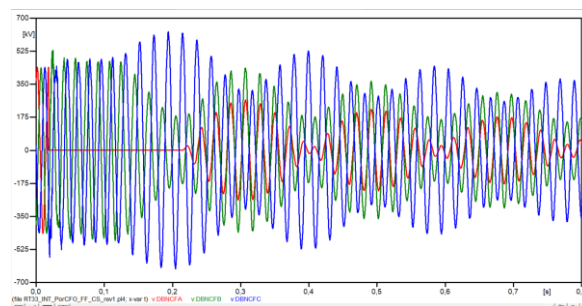
(a) Arquivo ACP aberto na interface gráfica do software ATPDraw.

Caso	Falta	Medição	Tensão F-T	Tensão P.U	E-máx Par-Raio KJ
RT31	CFD	CFD	7,46E+05	1,83E+00	892.491
RT31	CFD	25%	9,96E+05	2,44E+00	892.491
RT31	CFD	50%	9,29E+05	2,27E+00	892.491
RT31	CFD	75%	9,37E+05	2,30E+00	892.491
RT31	CFD	BND	8,12E+05	1,99E+00	892.491
RT32	1/2 LT	CFD	7,54E+05	1,85E+00	727.847
RT32	1/2 LT	25%	9,85E+05	2,41E+00	727.847
RT32	1/2 LT	50%	9,14E+05	2,24E+00	727.847
RT32	1/2 LT	75%	8,29E+05	2,03E+00	727.847
RT32	1/2 LT	BND	8,10E+05	1,98E+00	727.847
RT33	BND	CFD	7,53E+05	1,84E+00	45.344
RT33	BND	25%	9,98E+05	2,45E+00	45.344
RT33	BND	50%	9,50E+05	2,33E+00	45.344
RT33	BND	75%	9,02E+05	2,21E+00	45.344
RT33	BND	BND	8,12E+05	1,99E+00	45.344

(c) Planilha de dados.



(b) Arquivo de saída de extensão .LIS.



(d) Gráfico tensão x tempo.

Fonte: Própria.

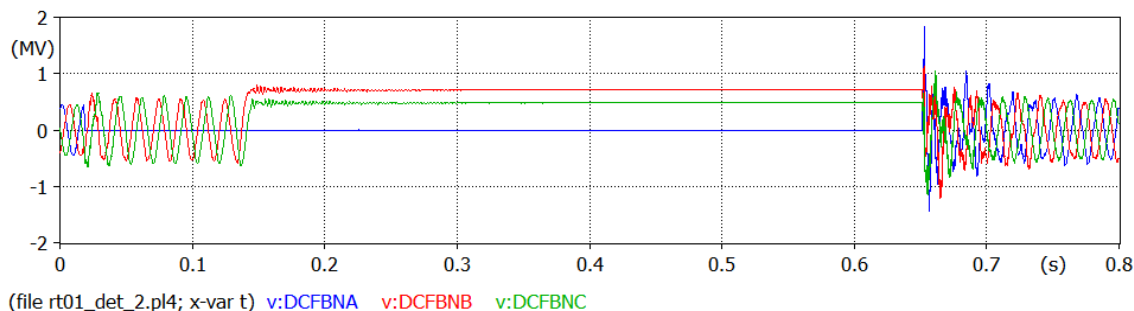
3.4 Caso Religamento Com Sucesso

A Figura 16 apresenta o comportamento gráfico típico das tensões na manobra de religamento trifásico após a LT ser desligada automaticamente pela atuação da proteção no momento em que a mesma percebe a presença de uma falta monofásica para a terra. Neste caso temos um religamento com sucesso, devido ao fato de a falta não ser permanente e extinguir-se durante o tempo morto, e após a manobra de religamento tripolar o sistema voltar a funcionar em seu regime permanente.

Nos primeiros instantes, nota-se que a LT está trabalhando em seu regime permanente, e aproximadamente em 200 ms percebe-se que na fase A (representada pela cor azul) ocorre um curto-circuito fase-terra e a tensão vai a zero. Já as fases B e C (representadas pelas cores vermelha e verde, respectivamente) são afetadas por esse curto e suas tensões se elevam. Após o curto-circuito, o sistema de proteção da linha atua para retirar esse elemento de operação, o que dura cerca de 120ms após a falta. A partir do momento que a LT é desligada conta-se o tempo morto, que dura 500 ms, após contado o tempo morto em aproximadamente 650 ms ocorre o religamento tripolar, e é neste momento que se tem o maior valor de sobretensão. Com isso, nota-se o impacto que é causado em uma LT pela manobra de religamento tripolar, onde a tensão atinge picos altíssimos, e mesmo com o desaparecimento do curto durante o tempo morto, pois após o religamento percebe-se que as ondas de tensão gradativamente retornam ao regime permanente, o transitório gerado pelo religamento pode vir a causar danos severos a LT ou SE, vindo até a interromper de forma permanente o fornecimento de energia.

Geralmente o que causa o acionamento da proteção vindo a retirar a LT de operação são descargas atmosféricas, ou contato acidental de galhos de árvore na rede, por exemplo, o que é resolvido através da retirada da LT de operação, em seguida conta-se o tempo morto, para que o curto deixe de ser alimentado e assim seja dissipado e por fim ocorra o religamento onde se espera que o curto não esteja mais presente desta forma a LT pode voltar a operar sem a necessidade de intervenção humana e sem causar grandes prejuízos a continuidade de transmissão de energia.

Figura 16 – Comportamento das tensões de fase durante tentativa de religamento trifásico automático com sucesso.



Fonte: Própria.

3.5 Caso Religamento Sem Sucesso

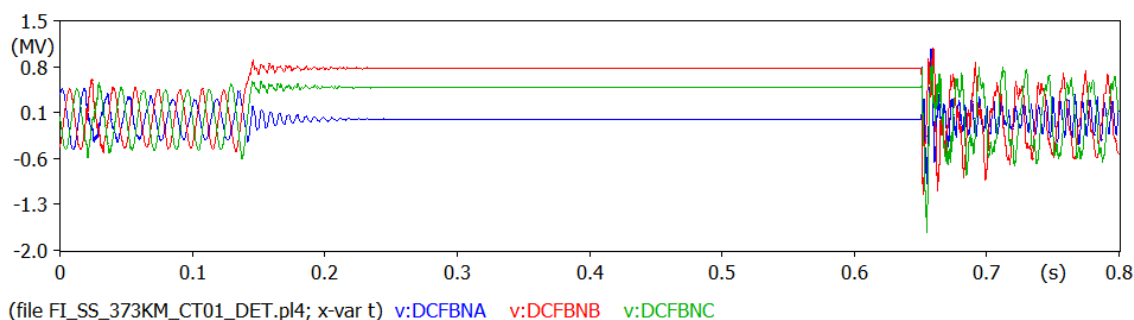
A Figura 17 apresenta a simulação de uma falta monofásica no terminal remoto de uma linha de transmissão, cuja tentativa de religamento foi mal sucedida. Nesse cenário, observa-se que, apesar da tentativa de religamento, a falta persiste no sistema, impedindo o restabelecimento seguro da operação.

Nos primeiros instantes, percebe-se a ocorrência de distúrbios nas três fases (representadas pelas cores vermelha, verde e azul), resultantes de uma falta monofásica. O disjuntor atua de forma automática, abrindo o circuito aproximadamente aos 0,1 s, com o intuito de eliminar a perturbação.

Entretanto, diferentemente do cenário de sucesso, ao ser realizado o religamento por volta de 0,65 s, observa-se o retorno imediato das oscilações intensas nas três fases, indicando que a falta permanece ativa no sistema.

Esse comportamento caracteriza uma falta permanente, comum em situações como rompimento de condutores, contato com objetos externos ou falhas internas de equipamentos. Nesse caso, o religamento automático não é capaz de restabelecer a normalidade, sendo necessário o envio de uma equipe de manutenção para correção do defeito.

Figura 17 – Comportamento das tensões de fase durante tentativa de religamento automático sem sucesso.



Fonte: Própria.

4 RESULTADOS E ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES

As simulações foram realizadas considerando os procedimentos e ajustes descritos no item 3, além das variações no comprimento da linha de transmissão,

analisando os efeitos transitórios decorrentes ao religamento tripolar, com e sem sucesso.

4.1 Comportamento da tensão variando o comprimento da LT

Neste item, são apresentados e discutidos os resultados obtidos para o religamento tripolar variando o comprimento da linha. O objetivo é analisar o comportamento das sobretensões transitórias observadas na barra de Campo Formoso II com o religamento ocorrendo pela barra de Bom Nome II, em função do comprimento da linha de transmissão.

4.1.1 Religamento Tripolar com sucesso na eliminação da falta

Na Tabela 3 são apresentados os valores da tensão (em pu) na subestação de Campo Formoso II devido ao religamento tripolar por Bom Nome II, obtidos nas simulações realizadas na LT aplicando a falta no início, no meio e no fim da linha de transmissão, variando o seu comprimento (50 km, 100 km, 200 km, 300 km e 373 km). Nota-se nos resultados apresentados na tabela que, conforme aumenta-se o comprimento da linha, independentemente de onde ocorreu a falta, tem-se um aumento do valor da sobretensão.

Tabela 3 - Valores de tensão em pu de acordo com o local da falta e comprimento da Linha de Transmissão.

Casos	Local de Aplicação da Falta	Tensão na SE Campo Formoso II (pu)				
		50 km	100 km	200 km	300 km	373 km
01	Falta no Início	3,57	3,77	4,14	4,53	4,56
02	Falta no Meio	3,85	3,88	4,08	4,51	4,53
03	Falta no Fim	3,54	3,98	4,24	4,23	4,32

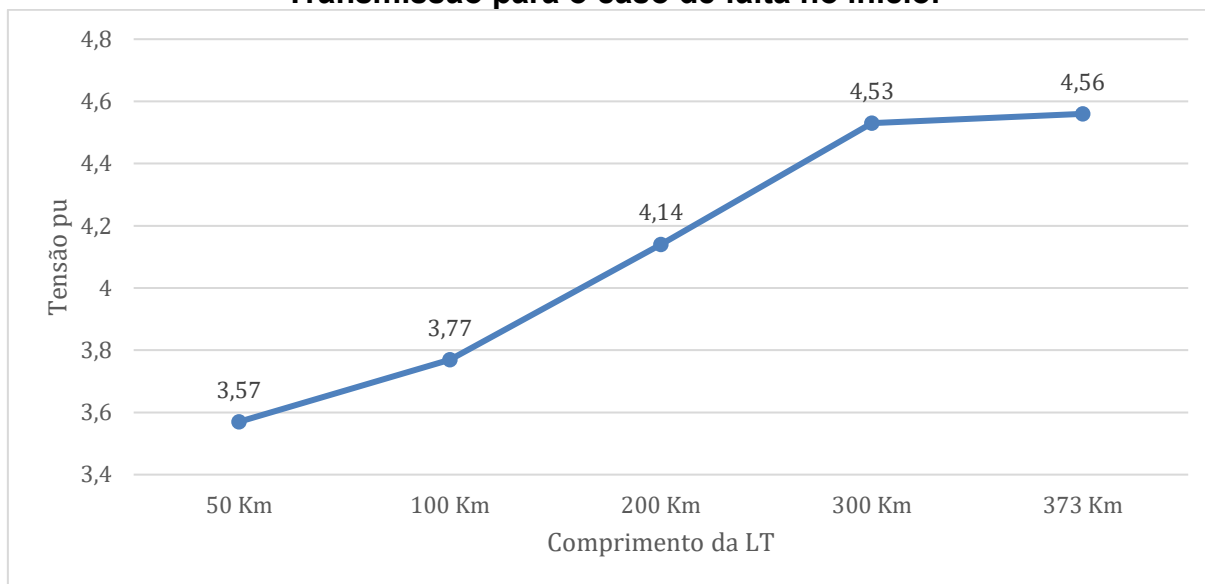
Fonte: Própria.

A Figura 18 apresenta os valores das sobretensões em função do comprimento da LT para o caso 01 apresentado na Tabela 3, para que se possa ter uma visualização gráfica dos valores de pico das sobretensões. Como esperado, os valores das sobretensões se elevam com o aumento do comprimento da linha. Como já discutido no tópico 2.2 desse trabalho, isso ocorre devido ao aumento no tempo de trânsito da onda de tensão entre os terminais emissores e receptores e ao aumento da capacitância total da linha. É importante também observar que para as diferenças de comprimentos iniciais, os valores das sobretensões se elevam mais que para as diferenças de comprimentos finais, indicando uma inclinação maior no início da curva do que no final.

As Figuras 19 (a) e (b) apresentam o oscilograma das sobretensões, também para o caso 01 apresentado na Tabela 3, como forma de observar o comportamento das sobretensões transitórias em função do tempo. Na Figura 18 é interessante observar que no terminal receptor (Campo Formoso II), o tempo de trânsito da onda de tensão

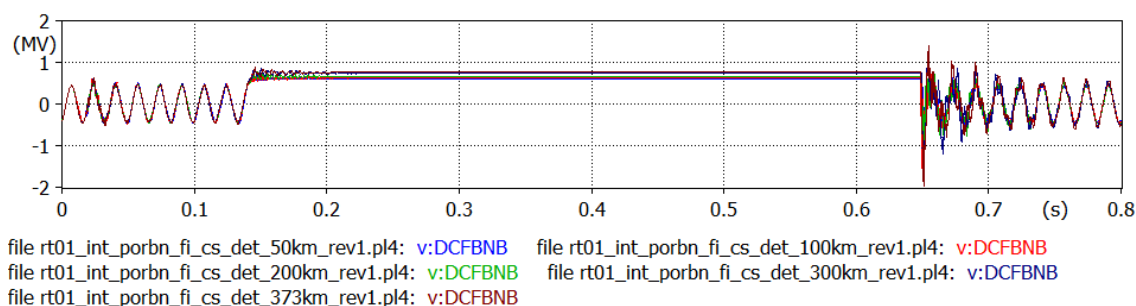
(cada degrau na onda) é maior quanto maior é o comprimento da linha. Também é possível observar que, para comprimentos maiores de linha, os degraus de tensão devido a onda refletida são maiores, devido a maior capacitância.

Figura 18 – Comparativo de tensão em pu em cada comprimento da Linha de Transmissão para o caso de falta no início.

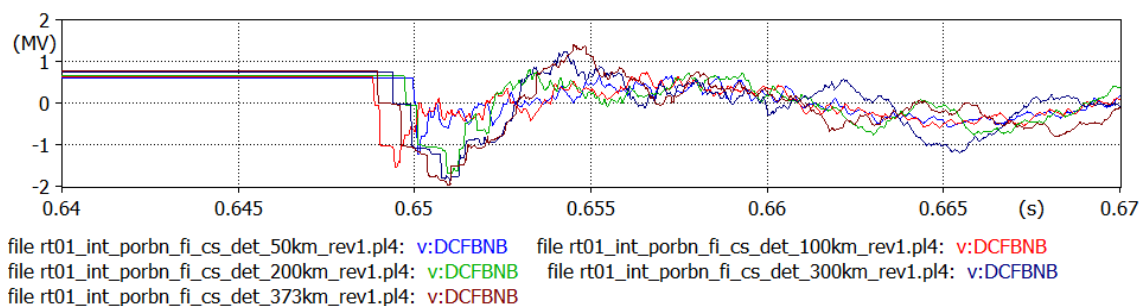


Fonte: Própria.

Figura 19 – Comportamento do transitório de tensão no religamento para o caso de falta no início.



(a) Representação gráfica da simulação.



(b) Ampliação do gráfico para uma melhor visualização das ondas no momento de sobretensão.

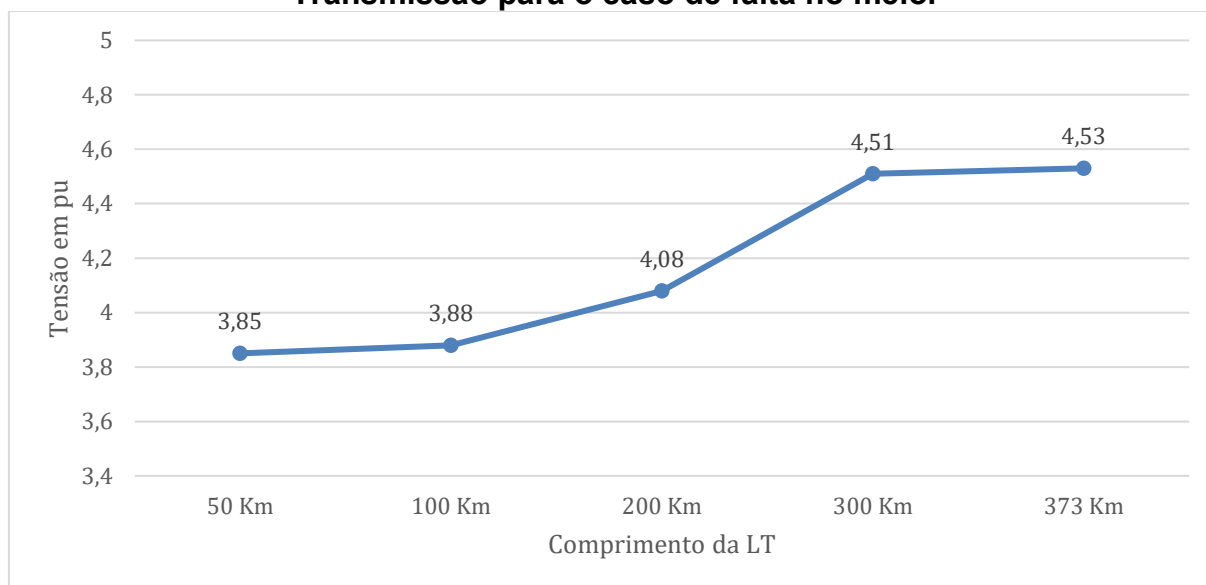
Fonte: Própria.

Para o caso de religamento com sucesso com falta monofásica no meio da linha (caso 02 da Tabela 3), apresenta-se na Figura 20 o comparativo dos maiores valores de sobretensão em pu para cada comprimento de linha avaliada. Assim como

observado no caso 01, com falta aplicada no início da linha, as tensões no terminal receptor aumentam com o aumento do comprimento da linha. Se comparado com os resultados do caso 01, se obteve uma linha de tendência semelhante, com a curva mais inclinada nas diferenças de comprimento iniciais, indicando maiores diferenças nas sobretensões, e diminuindo a inclinação ao final da curva, indicando diferenças de sobretensões menores, como podemos observar na Figura 20.

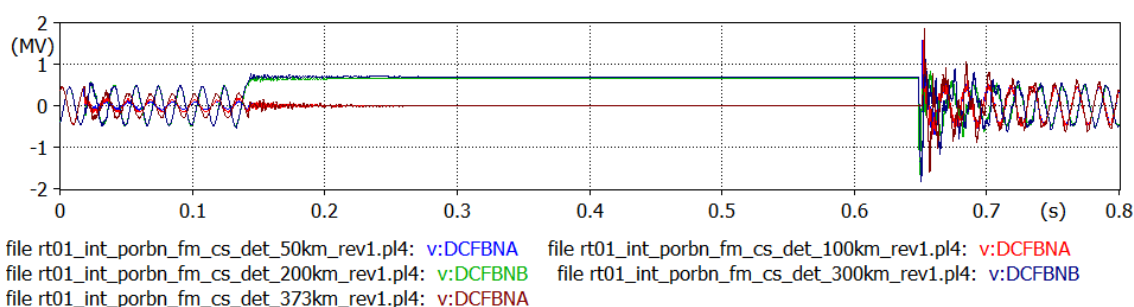
As Figuras 21 (a) e (b) apresentam o oscilograma das sobretensões para o caso 02, como forma de observar o comportamento das sobretensões transitórias em função do tempo.

Figura 20 – Comparativo de tensão em pu em cada comprimento da Linha de Transmissão para o caso de falta no meio.

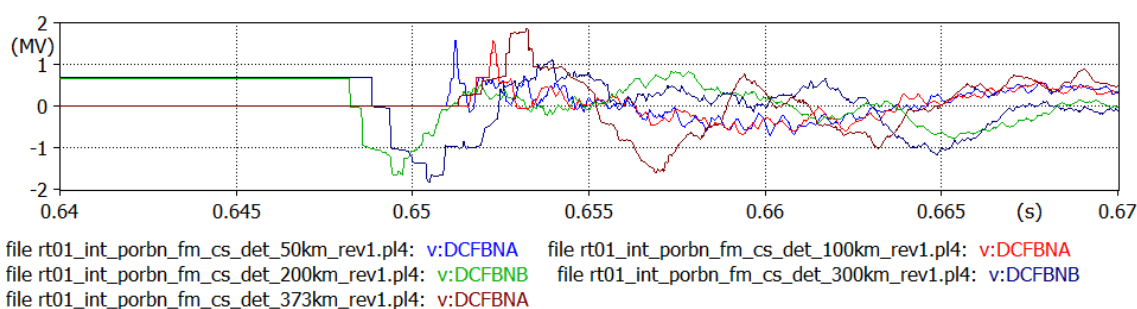


Fonte: Própria.

Figura 21 – Comportamento do transitório de tensão no religamento para o caso de falta no meio da LT.



(a) Representação gráfica da simulação.



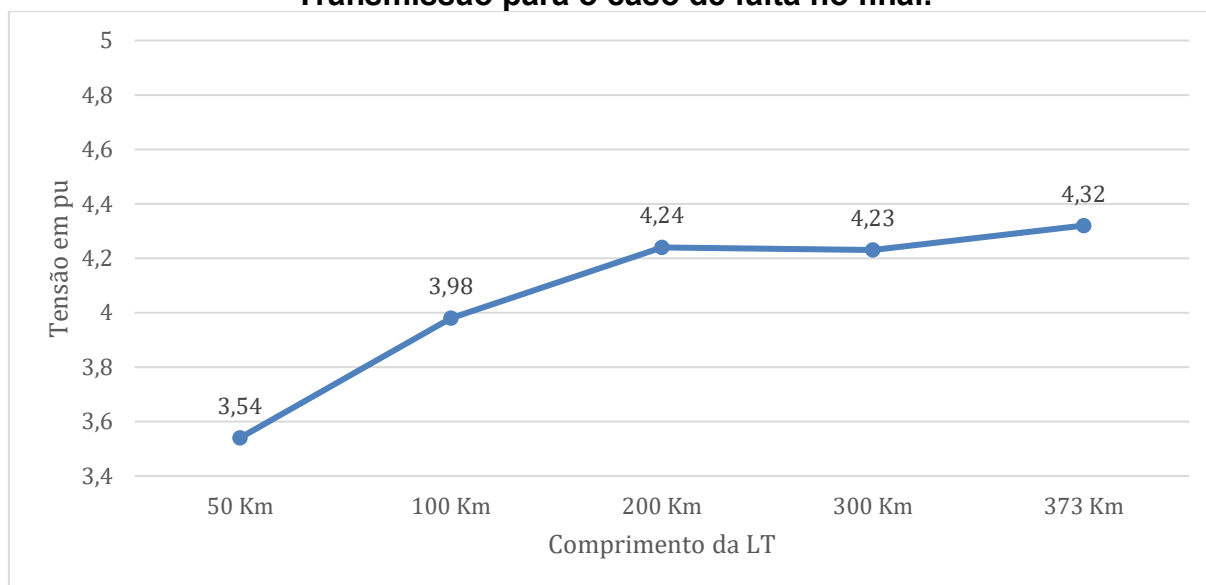
(b) Ampliação do gráfico para uma melhor visualização das ondas no momento de sobretensão.

Fonte: Própria.

Para o caso de religamento com sucesso com falta monofásica no fim da linha (caso 03 da Tabela 3), apresenta-se na Figura 22 o comparativo dos maiores valores das sobretensões em pu para cada comprimento de linha avaliada. Assim como observado nos casos anteriores, com faltas aplicadas no início e no meio da linha, as tensões no terminal receptor possuem tendência a se elevar com o aumento do comprimento da linha. Observa-se que, para os comprimentos de linha de 200 km e 300 km, os valores das sobretensões ficaram praticamente os mesmos, não apresentando uma tendência de elevação. Isso é possível de acontecer pois, além de se tratar de simulações estatísticas, com instantes de fechamento da chave do religamento em momentos aleatórios em cada caso, já era possível observar uma elevação de sobretensões menores para diferenças de comprimentos maiores, ou seja, na parte final das curvas das Figuras 18 e 20.

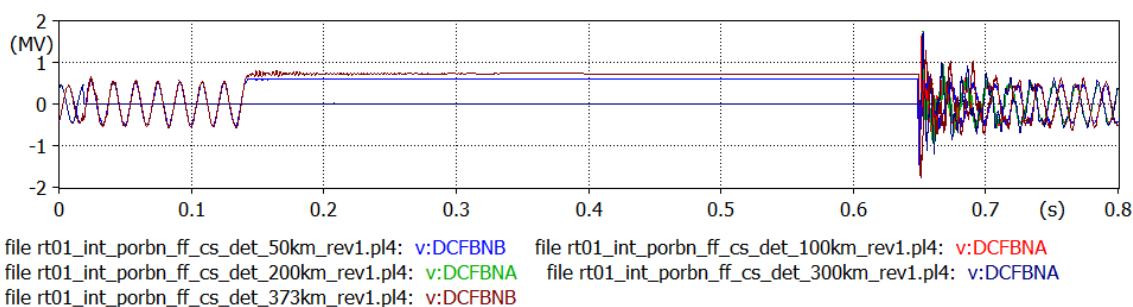
As Figuras 23 (a) e (b) apresentam o oscilograma das sobretensões para o caso 03, como forma de observar o comportamento das sobretensões transitórias em função do tempo.

Figura 22 – Comparativo de tensão em pu em cada comprimento da Linha de Transmissão para o caso de falta no final.

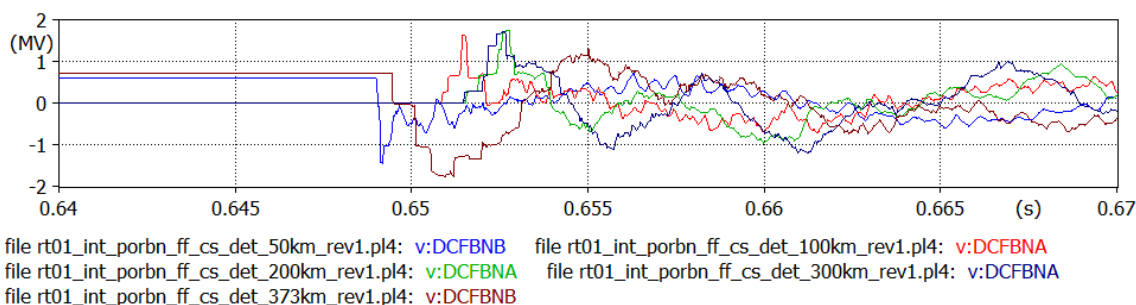


Fonte: Própria.

Figura 23 – Comportamento do transitório de tensão no religamento para o caso de falta no fim da linha de transmissão.



(a) Representação gráfica da simulação.



(b) Ampliação do gráfico para uma melhor visualização das ondas no momento de sobretensão.

Fonte: Própria.

4.1.2 RT sem Sucesso na eliminação da falta

Na tabela 4 são apresentados os valores de tensão em (pu) na subestação de Campo Formoso II devido ao religamento tripolar por Bom Nome II, registrados durante as simulações, relacionando os diferentes pontos de aplicação da falta (início, meio e fim da linha) com os comprimentos de linha analisados (50 km, 100 km, 200 km e 373 km). Esses resultados permitem observar a tendência de variação das sobretensões em função do aumento da distância entre os terminais e da localização do defeito.

Tabela 4 - Valores de tensão em pu de acordo com o local da falta e comprimento da Linha de Transmissão.

Casos	Local de Aplicação da Falta	Tensão na SE Campo Formoso II (pu)				
		50km	100 km	200 km	300km	373km
01	Falta no Início	3,52	3,43	4,21	4,46	4,43
02	Falta no Meio	3,83	4,11	4,68	5,36	5,63
03	Falta no Fim	3,49	3,81	4,27	4,61	4,89

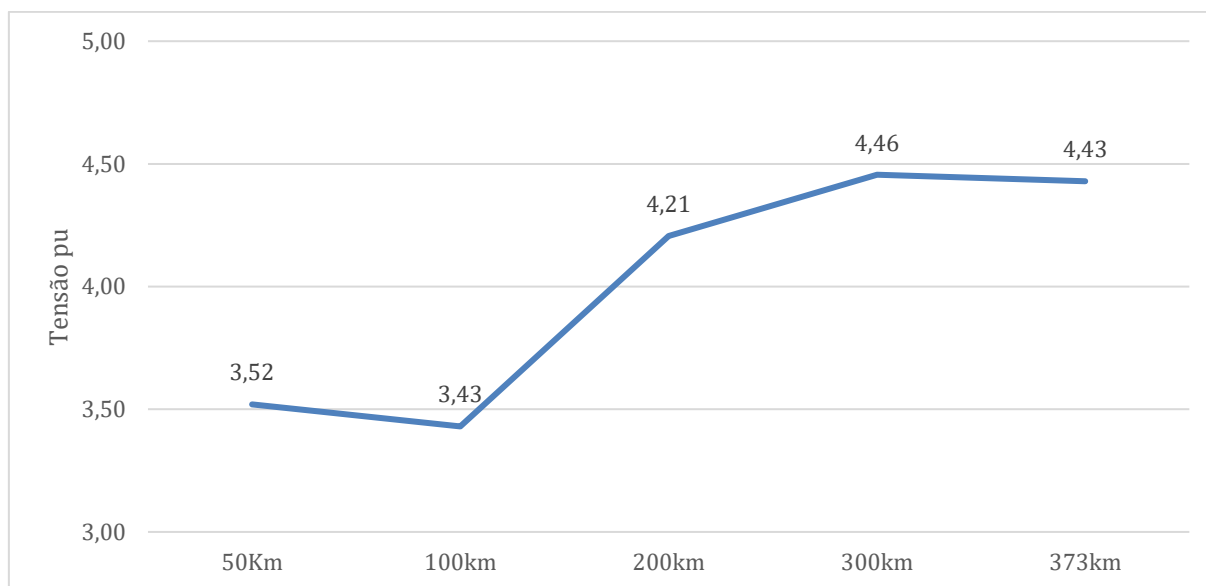
Fonte: Própria.

Em seguida, são exibidos os gráficos dos valores das sobretensões em pu por tempo obtidos nas simulações, permitindo comparar o comportamento transitório entre os diferentes casos. Espera-se que o aumento do comprimento da linha resulte em maiores amplitudes de sobretensão, devido ao acréscimo da capacitância distribuídas ao longo do percurso, assim como o aumento do tempo de trânsito da

onda de tensão entre os terminais emissores e receptores, que intensificam os fenômenos de propagação e reflexão de ondas.

Para o caso 01 de religamento sem sucesso com falta monofásica no início da linha, apresenta-se na Figura 24 o comparativo dos maiores valores de sobretensão em pu (por unidade) para cada comprimento da linha avaliada.

Figura 24 – Comparativo de tensão em pu em cada comprimento da Linha de Transmissão para o caso de falta no início.



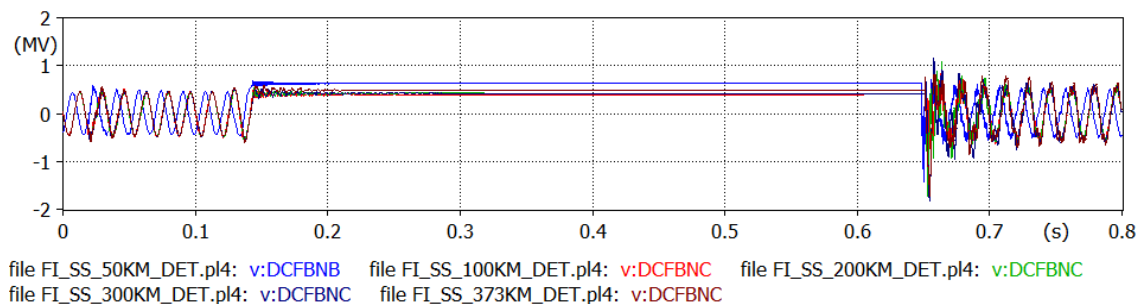
Fonte: Própria.

Observa-se que, de forma geral, as sobretensões apresentaram aumento progressivo com o incremento do comprimento da linha. No entanto, nota-se uma anomalia entre os comprimentos de 50 km e 100 km, e entre os comprimentos de 300km e 373km, onde ocorreu um pequeno decréscimo incomum nas amplitudes de sobretensão. O que poderia explicar esse efeito, além do fato das simulações serem estatísticas, e como o religamento tripolar ocorre com uma das fases ainda em curto, pode provocar um comportamento diferente do esperado nas fases sãs.

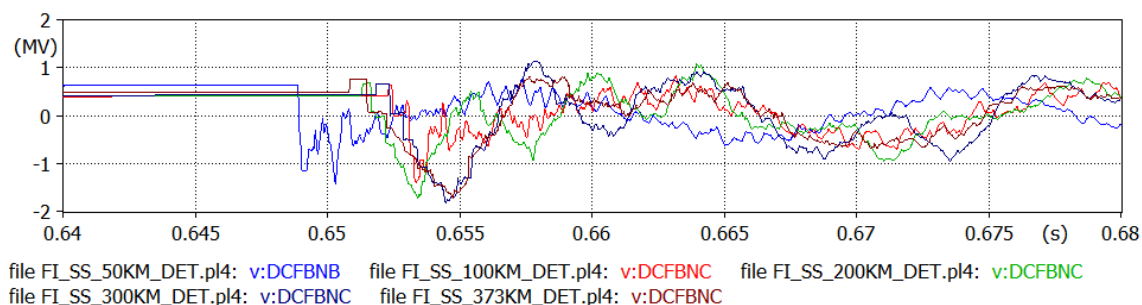
Devido a ocorrência desse efeito inesperado, todas as simulações estatísticas desse caso foram realizadas novamente, revisando todos os dados de entrada, entretanto os resultados obtidos foram semelhantes.

Além disso, é apresentado nas Figuras 25 (a) e (b) o oscilograma das sobretensões transitórias em função do tempo de cada comprimento de linha de transmissão, permitindo uma análise do comportamento da onda refletida. É interessante observar que no terminal receptor (Campo Formoso II), o tempo de trânsito da onda de tensão também é maior quanto maior for o comprimento da linha de transmissão.

Figura 25 – Comportamento do transitório de tensão no religamento para o caso de falta no início.



(a) Representação gráfica da simulação.

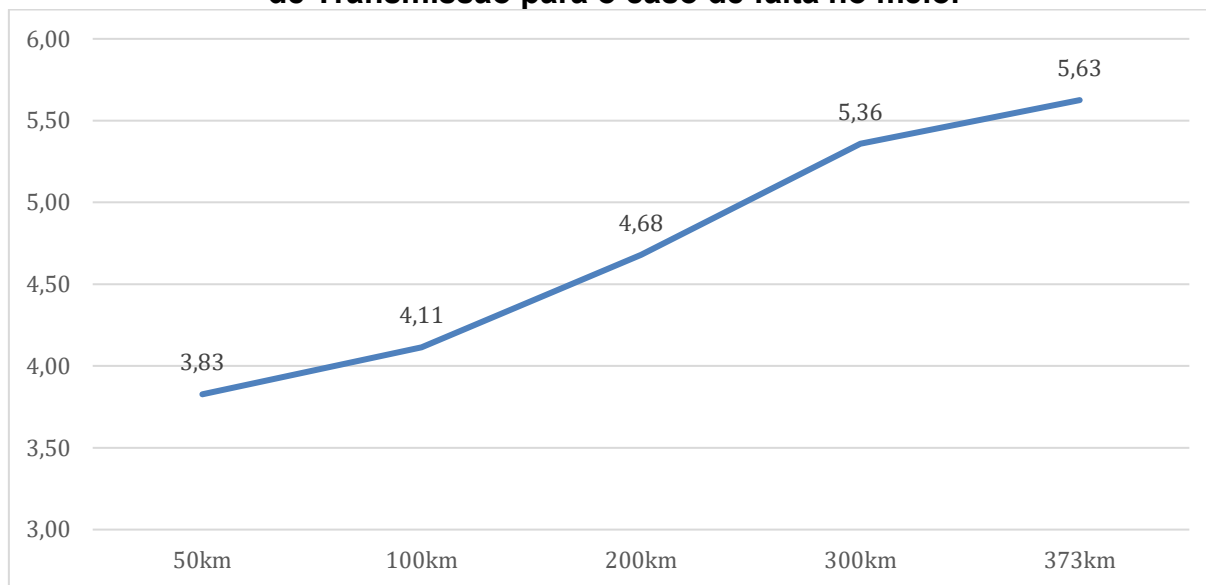


(b) Ampliação do gráfico para uma melhor visualização das ondas no momento de sobretensão.

Fonte: Própria.

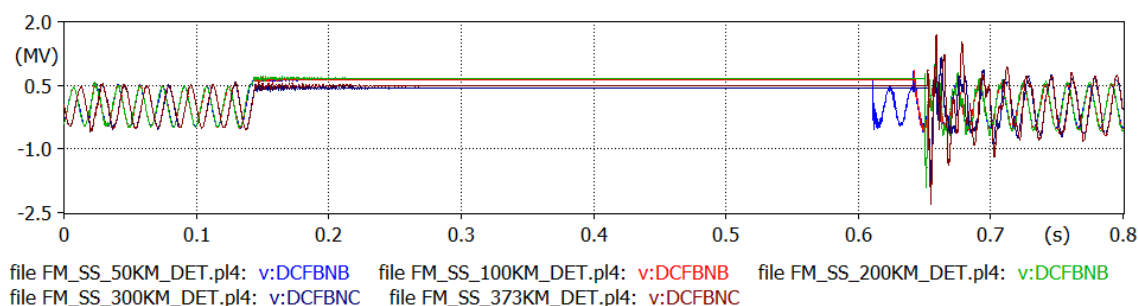
Para o religamento sem sucesso com falta monofásica no meio da linha (caso 02 da Tabela 4), apresenta-se na Figura 26 o comparativo dos maiores valores de sobretensão em pu (por unidade) para cada extensão da linha avaliada. Assim como observado no caso 01, devido à falta estar localizada no início da linha de transmissão, as sobretensões transitórias no terminal receptor aumentam com o aumento do comprimento da linha de transmissão. Assim como nos resultados do caso 01 de religamento sem sucesso, se obteve uma linha de tendência de crescimento de sobretensões ao decorrer do aumento do comprimento da linha de transmissão, só que dessa vez não foi apresentado resultados incomuns de decaimento entre um comprimento e o outro logo em seguida. É apresentando também nas Figuras 27 (a) e (b) o oscilograma das sobretensões em função do tempo de cada comprimento de linha de transmissão. Novamente é interessante observar que no terminal receptor (Campo Formoso II), o tempo de trânsito da onda de tensão também é maior quanto maior for o comprimento da linha de transmissão.

Figura 26 – Comparativo de tensão em pu em cada comprimento da Linha de Transmissão para o caso de falta no meio.

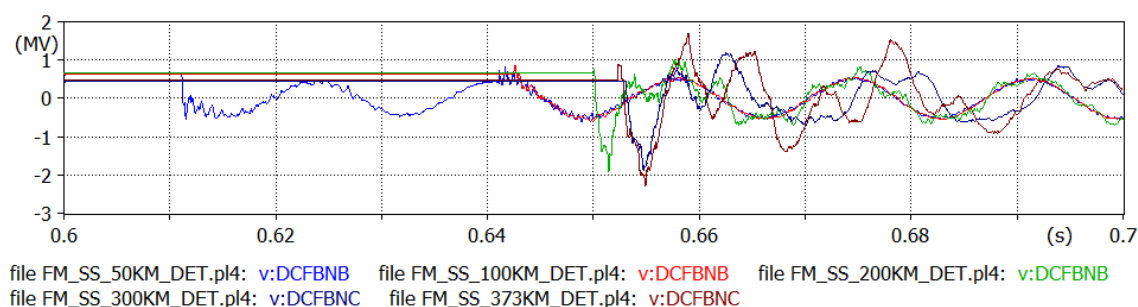


Fonte: Própria.

Figura 27 – Comportamento do transitório de tensão no religamento para o caso de falta na metade.



(a) Representação gráfica da simulação.



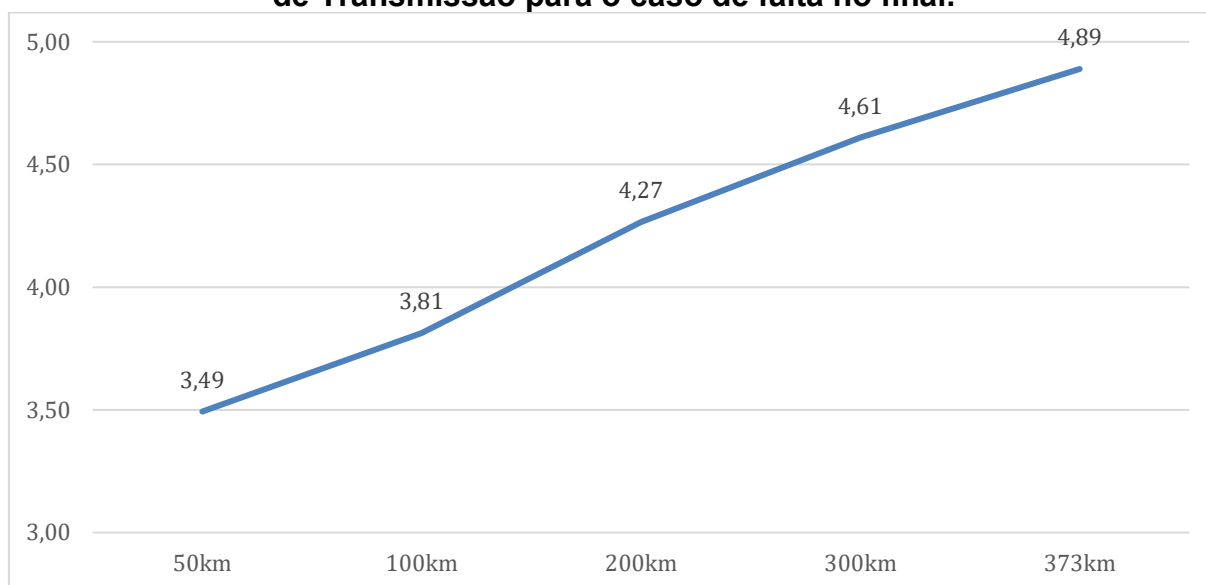
(b) Ampliação do gráfico para uma melhor visualização das ondas no momento de sobretensão.

Fonte: Própria.

Para o caso de religamento sem sucesso com falta monofásica no final da linha (caso 3 da Tabela 4), apresenta-se na Figura 28 o comparativo dos maiores valores de sobretensão em pu para cada comprimento de linha avaliado. Assim como observado nos casos anteriores, com faltas aplicadas no início e no meio da linha, as sobretensões no terminal receptor tende a se elevar de acordo com o comprimento da linha aumenta. Nota-se que a variação de sobretensão é basicamente linear, tendo

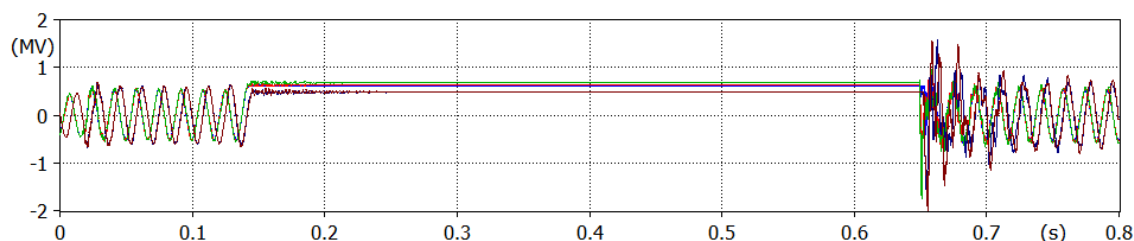
em vista na Figura 28 basicamente uma reta de inclinação pouco menor que as inclinações dos gráficos dos casos anteriores. As Figuras 29 (a) e (b) apresentam o oscilograma das sobretensões para o caso 03, como forma de observar o comportamento das sobretensões transitórias em função do tempo, no momento do religamento.

Figura 28 – Comparativo de tensão em pu em cada comprimento da Linha de Transmissão para o caso de falta no final.



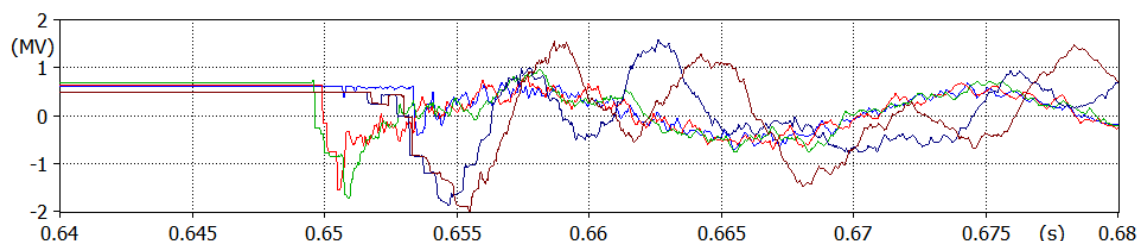
Fonte: Própria.

Figura 29 – Comportamento do transitório de tensão no religamento para o caso de falta no fim da linha de transmissão.



file FF_SS_50KM_DET.pl4: v:DCFBNB file FF_SS_100KM_DET.pl4: v:DCFBNB file FF_SS_200KM_DET.pl4: v:DCFBNB
file FF_SS_300KM_DET.pl4: v:DCFBNB file FF_SS_373KM_DET.pl4: v:DCFBNB

(a) Representação gráfica da simulação.



file FF_SS_50KM_DET.pl4: v:DCFBNB file FF_SS_100KM_DET.pl4: v:DCFBNB file FF_SS_200KM_DET.pl4: v:DCFBNB
file FF_SS_300KM_DET.pl4: v:DCFBNB file FF_SS_373KM_DET.pl4: v:DCFBNB

(b) Ampliação do gráfico para uma melhor visualização das ondas no momento de sobretensão.

Fonte: Própria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS/CONCLUSÕES

O objetivo central deste trabalho foi avaliar a influência do comprimento da linha de transmissão sobre os transitórios de sobretensão durante o processo de religamento tripolar automático. Com base nas simulações realizadas, verificou-se que esse parâmetro exerce papel determinante na amplitude e duração das sobretensões, confirmando o comportamento descrito na literatura técnica e validando o modelo adotado. Para os trechos no caso de variação de comprimento de linha de transmissão (tópico 5.1.2), por a simulação ser estatística, e pelo fato do religamento tripolar ocorrer com uma das fases ainda em curto, pode ocorrer comportamentos diferentes do esperado. Para esse caso, as simulações foram refeitas de forma estatísticas, e os resultados persistiram.

De forma geral, conclui-se que o objetivo do estudo foi alcançado, comprovando que o aumento do comprimento da linha de transmissão influencia diretamente o comportamento transitório. Ou seja, os resultados comprovaram que, quanto maior a extensão da linha, maiores são as sobretensões previstas, conforme relatado na literatura técnica (DA'JUZ, 1987; VILLAS, 2015). Dessa forma, a medida que o comprimento da linha aumenta, reforça-se a necessidade de atenção especial para a coordenação de isolamento de linha e no dimensionamento de equipamentos de mitigação, como para-raios terminais, especialmente em sistemas de transmissão de 500 kV, onde as magnitudes transitórias atingem níveis mais críticos.

Por fim, o estudo evidencia a importância de uma modelagem fiel dos parâmetros elétricos e geométricos das linhas de transmissão em ferramentas de simulação como o ATPDraw, destacando a necessidade de se compreender os fenômenos transitórios sob uma ótica integrada entre teoria e prática. A análise realizada contribui para o entendimento dos mecanismos que governam a propagação de sobretensões, reforçando a aplicabilidade dos métodos analíticos clássicos e das simulações computacionais na engenharia de sistemas elétricos de potência.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de estudos em que, ao invés da variação do comprimento da linha de transmissão, sejam analisadas diferentes topologias de cabeça de torre, avaliando de forma isolada os impactos da geometria dos condutores nos parâmetros distribuídos de capacitância e indutância e, conseqüentemente, nos níveis de sobretensão. Sugere-se também a investigação do efeito da modificação das características dos para-raios, especialmente por meio da alteração de suas curvas V-I, a fim de analisar a sensibilidade do sistema às diferentes estratégias de coordenação de isolamento, visando consolidar os resultados obtidos e ampliar sua aplicabilidade em estudos de planejamento e operação de sistemas de transmissão.

6 REFERENCIAS

- AMON FILHO, Jorge; PEREIRA, Marco Polo. ATP – **Alternative Transients Program: curso básico sobre a utilização do ATP**. CLAUUE – Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP, 1996. Versão original de setembro de 1994.
- COELHO, Pedro António Morgado. **Dimensionamento elétrico de linhas de média, alta e muito alta tensão**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2024.
- DA'JUZ, Ary et al. **Transitórios elétricos e coordenação de isolamento**. Niterói: Universidade Federal Fluminense, Editora Universitária, 1987. Publicação técnica de FURNAS – Centrais Elétricas S.A.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2034**: PDE 2034. Brasília: EPE, 2024. 579 p. Relatório (PDF). Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico758/PDE2034_Aprovado.pdf. Acesso em: 16 de setembro de 2025.
- FUCHS, Rubens Dario. **Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas**. Rio de Janeiro: Sindicato Nacional dos Editores de Livros, 1977. v. 2.
- LIMA, Antonio Carlos S.; PEREIRA, Marco Polo. **Cálculo de parâmetros de linhas de transmissão**. *Revista Iberoamericana del ATP*, Año 3, Vol. 2, n. 3, set. 2000.
- NETO, Antonio Samuel; FERNANDES, Alecio Barreto. **Efeito da modelagem da carga para estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de transmissão**. In: COMITÉ DE ESTUDIO C4 – DESEMPEÑO TÉCNICO DEL SISTEMA, 2009, Argentina. Anais... Argentina: ONS – Operador Nacional de Sistemas, 2009.
- ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Procedimentos de Rede: Submódulo 2.4 – Requisitos mínimos para linhas de transmissão**. Vigência até 01 jan. 2017. Brasília: ONS, 2016. Disponível em: <https://www.ons.org.br/ProcedimentosDeRede/M%C3%B3dulo%202/Subm%C3%B3dulo%202.4/Subm%C3%B3dulo%202.4.docx>. Acesso em: 17 set. 2025.
- ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Diretrizes para elaboração de projetos básicos para empreendimentos de transmissão**. Revisão 01. Redação: Antônio Carlos de Carvalho; Carlos Campinho; Delmo Correia; Hélio Pessoa de Oliveira Junior; Humberto Arakaki; José Augusto Martins Junior; Márcio Accioly Lins; Sérgio Cordeiro Sobral. Projeto gráfico e editoração: Assessoria de Planejamento e Comunicação do Operador Nacional do Sistema Elétrico. Rio de Janeiro: ONS, 2022.
- PERES, Leonardo Luiz; KALUCZ, Rafael. **Estudo de projeto de linhas de transmissão trifásicas aéreas com ênfase nos cálculos elétricos**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Elétrica, Curitiba, 2014.
- PRADO, Afonso José; KUOKAWA, Sergio; BOVOLATO, Luiz; SILVA, Vitor Augusto Fiates; ERMEL, Frederico Leitão; CANÔNICO, Rodolfo Barreto. **Simulação de transitórios eletromagnéticos em uma linha de transmissão monofásica**

utilizando variáveis de estado. *IEEE Latin America Transactions*, [s.l.], v. 5, n. 7, p. 463-470, out. 2007. DOI: 10.1109/TLA.2007.4378491.

SANTANA, Edilson da Silva. **Sobretensões de energização de Linha de Transmissão.** 2011.

TAVARES, Maria Cristina Dias; CAMPOS, Paulo Guidetti; PRADO, Paulo. **Guia resumido do ATP – Alternative Transient Program.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – FEEC, Departamento de Sistemas de Controle e Energia – DSCE, nov. 2003.

VILLAS, José Eduardo Telles. **Transmissão de energia I: projeto elétrico.** Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, 2015.