

ANÁLISE PARAMÉTRICA DA ENERGIZAÇÃO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 500KV UTILIZANDO O SOFTWARE ATPDRAW

PARAMETRIC ANALYSIS OF THE ENERGIZATION OF A 500KV TRANSMISSION LINE USING THE ATPDRAW SOFTWARE

Rodrigo Neves da Silva

rns5@discente.ifpe.edu.br

Prof. Me. Fernando Edier França Freitas.

fernandoedier@pesqueira.ifpe.edu.br

RESUMO

Este trabalho analisa o comportamento das sobretensões transitórias durante a manobra de energização de uma linha de transmissão (LT) de 500 kV entre as subestações Bom Nome II e Campo Formoso II, motivado pela expansão da geração renovável e pela necessidade de garantir confiabilidade ao Sistema Interligado Nacional. O objetivo é avaliar a influência do comprimento da linha e a mitigação da sobretensão nos terminais remotos, utilizando como metodologia simulações no software ATP (*Alternative Transients Program*) a partir de um caso base validado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). Os resultados mostram que o aumento do comprimento da linha intensifica os valores de sobretensão devido às reflexões de ondas. Conclui-se que a energização da LT exige atenção especial aos comprimentos elevados, pois estes geram as maiores sobretensões nos terminais remotos, reforçando a importância de estudos de transitórios para garantir segurança, coordenação de isolamento e confiabilidade do sistema.

Palavras-chave: Energização, Sobretensões, ATPDraw, Linha de Transmissão.

ABSTRACT

This work analyzes the behavior of transient overvoltages during the energization switching of a 500 kV transmission line (TL) between the Bom Nome II and Campo Formoso II substations, motivated by the expansion of renewable generation and the need to ensure reliability in the Brazilian Interconnected Power System. The objective is to evaluate the influence of the line length and the mitigation of overvoltages at remote terminals through surge arresters, using simulations in the ATP (*Alternative Transients Program*) software based on a benchmark case validated by the Brazilian Electricity Regulatory Agency (ANEEL). The results show that increasing the line length intensifies overvoltage levels due to wave reflections. It is concluded that the energization of long transmission lines requires special attention, as they produce the

highest overvoltages at remote terminals, reinforcing the importance of transient studies to ensure system safety, insulation coordination, and overall reliability.

Keywords: Energization, Overvoltages, ATPDraw, Transmission Line.

1 INTRODUÇÃO

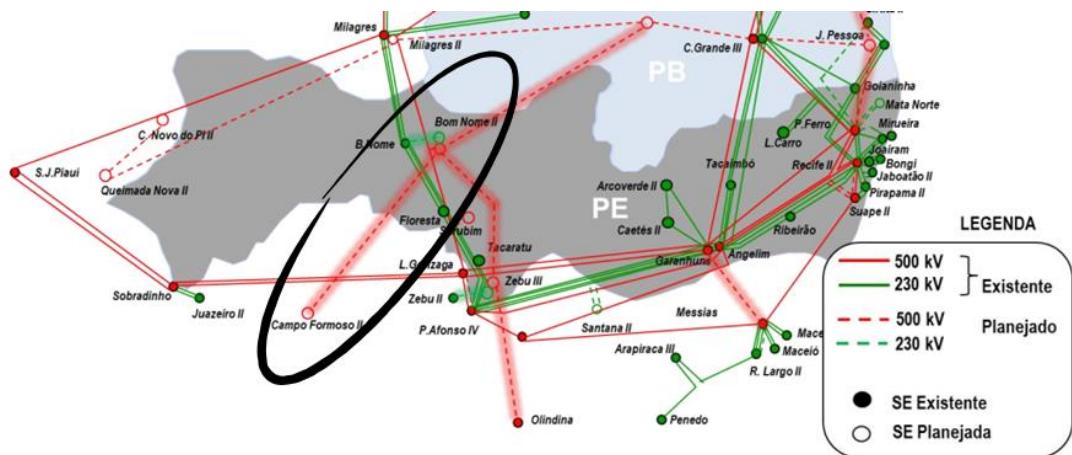
O crescimento da geração através de energias renováveis localizadas principalmente na região nordeste do país, está necessitando de transporte de grandes blocos de energia. No entanto, o transporte de energia elétrica no Brasil não é simples, devido a sua vasta área territorial e, consequentemente, longas distâncias da geração até os grandes centros consumidores, sendo necessárias linhas de transmissão (LTs) de grandes extensões. Dessa forma, as LTs devem ser estudadas para devida especificação de cada um de seus componentes, garantindo segurança, continuidade e confiabilidade do Sistema Interligado Nacional (SIN).

O sistema elétrico brasileiro é composto por diversos órgãos e instituições que atuam de forma integrada para garantir o planejamento, a operação, a regulação e a expansão do setor. Entre os principais estão o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), responsável pela coordenação e controle da geração e transmissão de energia elétrica no SIN; a Aneel que regula e fiscaliza o setor elétrico, assegurando a qualidade dos serviços e a modicidade tarifária; e o Ministério de Minas e Energia (MME), que define as diretrizes e políticas energéticas do país. Complementando essa estrutura, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) elabora estudos técnicos e de planejamento para subsidiar as decisões estratégicas relacionadas à expansão da geração e da transmissão de energia no Brasil.

No contexto do SIN, o ONS desempenha papel central, avaliando a integração dessas novas redes ao sistema. Por meio do Plano de Ampliação e Reforços (PAR), o ONS analisa a viabilidade dos empreendimentos e verifica se sua implantação não comprometerá a estabilidade ou a confiabilidade do SIN. O MME como poder concedente, define os empreendimentos que participarão dos leilões de transmissão, enquanto a Aneel conduz o processo licitatório (PERES; KALUCZ, 2014). Após a definição da concessionária vencedora, esta se torna responsável pela elaboração dos estudos iniciais, versões preliminares do projeto e especificações dos equipamentos, chamado de “etapa de Projeto Básico” e apresenta ao ONS. O ONS, por sua vez, recebe os resultados desses estudos e, verificando que tudo está de acordo com o que é exigido nas normas, emite o Certificado de Conformidade de Projeto Básico (CCPB), atestando que o projeto atende aos requisitos técnicos estabelecidos, sendo esta uma etapa indispensável para que o empreendimento avance para sua fase de implementação (ONS, 2022).

Nessa perspectiva, entre os estudos de planejamento da EPE, constatou-se a necessidade de desenvolver um planejamento da expansão da transmissão com a finalidade de recomendar reforços estruturais no sistema capazes de elevar a confiabilidade no atendimento à demanda local e de acompanhar o expressivo crescimento da geração renovável (EPE, 2022). Entre os diversos sistemas de transmissão a serem implementados está a LT de 500 kV que será implantada da subestação Bom Nome II - PE até a subestação Campo Formoso II – BA, conforme ilustrado na Figura 1, linha que será utilizada como base para este trabalho. Esse empreendimento se torna especialmente relevante diante do cenário de modernização das redes elétricas, que exige maior robustez operacional e eficiência no escoamento da energia gerada.

Figura 1 - Sistema elétrico da região nordeste – área leste



Fonte: Adaptada de EPE (2022)

A realização de estudos de transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos é fundamental no desenvolvimento de projetos de linhas de transmissão, uma vez que esses fenômenos podem impactar diretamente a confiabilidade, a segurança operacional e a integridade dos equipamentos do sistema elétrico. Eventos como manobras de linha, energizações, curtos-circuitos, descargas atmosféricas e oscilações de potência podem gerar sobretensões e correntes de elevada magnitude, exigindo análises detalhadas para a adequada especificação de equipamentos, coordenação de isolamento e definição de estratégias de mitigação (D'AJUZ, 1987).

Nesse cenário, é importante destacar a dificuldade de manter os níveis de tensão compatíveis com a isolação dos equipamentos do sistema, especialmente durante as manobras dos disjuntores e curtos-circuitos (D'AJUZ, 1987). Diante disso, o estudo das sobretensões ao longo da linha, que ocorrem durante os transitórios eletromagnéticos resultados pela energização, é de suma importância para a segurança e qualidade da energia elétrica, evitando colapsos no Sistema Elétrico de Potência (SEP).

As manobras de energização provocam sobretensões de curta duração, que podem afetar gravemente os equipamentos do sistema e sua isolação. Assim, embora o SEP opere em regime permanente, é essencial analisar os efeitos que ocorrem durante o período transitório, que tem duração determinada pelo período de acomodação de equilíbrio para outra. Por sua vez, a análise das sobretensões transitórias deve ser realizada por meio do estudo dos transitórios eletromagnéticos, que apresentam elevado grau de complexidade e, por isso, é necessário um caso base em ATP como uma parte reduzida do sistema elétrico que será futuramente implementado (SANTANA, 2011). O software ATP faz a modelagem e análise precisa dos fenômenos transitórios que afetam o desempenho do sistema elétrico. Por meio de sua capacidade de simular eventos como energização de linhas, manobras de chaveamento, curtos-circuitos e descargas atmosféricas, o ATP permite avaliar o comportamento dinâmico dos componentes e prever possíveis sobretensões e correntes. Essas informações são essenciais para a adequada coordenação de isolamento, dimensionamento de equipamentos, definição de estratégias de proteção e identificação de medidas mitigadoras. Assim, o uso do ATP contribui para assegurar que a linha de transmissão seja projetada com elevado nível de confiabilidade, segurança e conformidade com as exigências técnicas aplicáveis.

As sobretensões causadas pela manobra de energização em linhas de transmissão são influenciadas por diversas condições de sistema como: comprimento da linha de transmissão, geometria da torre, potência de curto-círcito da barra de manobra, ponto na onda de tensão em que o disjuntor é fechado, grau de compensação da linha de transmissão, perdas no condutor, presença de equipamentos de proteção, grau de aterramento do sistema, tensão pré-manobra, valor do resistor de pré-inserção, tempo de inserção do resistor e dispersão entre os contatos do disjuntor (D'AJUZ, 1987).

2 OBJETIVOS

Diante do exposto, é imperativo pontuar que o objetivo central deste trabalho foi analisar a manobra de energização variando o comprimento da linha de transmissão, não se preocupando com a parte de dimensionamento dos equipamentos. Além disso, foram realizadas comparações de casos com e sem a presença de para-raios. No intuito de alcançar esses objetivos foi seguido o seguinte procedimento:

- Realizar simulações estatísticas a fim de obter situações extremas;
- Observar o comportamento das sobretensões em configurações sem faltas e com faltas fase-terra para diferentes extensões da LT;
- Analisar o efeito que os para-raios ocasionam nos valores das sobretensões de manobra.

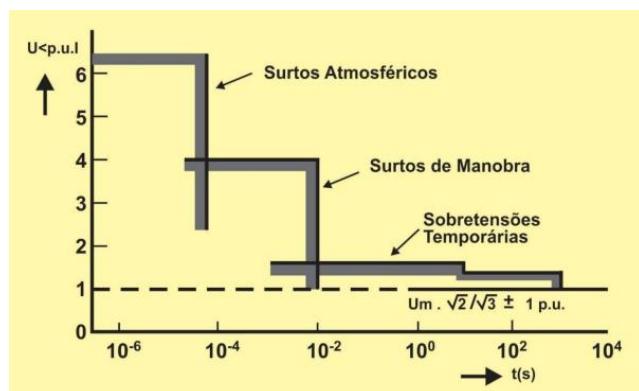
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico serão apresentados os conceitos fundamentais para a compreensão deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC).

3.1 Sobretensões

A sobretensão é caracterizada por um aumento na tensão, cujo valor do pico é acima do valor nominal para qual os equipamentos foram projetados, afetando o regime normal de operação do sistema. Essas sobretensões se dividem em dois tipos de acordo com a localização da ocorrência: (1) as sobretensões de origem externa (descargas atmosféricas) e (2) as de origem interna (manobra de disjuntores ou curtos-circuitos) (SERAFIM, 2021). Outra classificação de sobretensão é realizada com base no seu tempo de duração e grau de amortecimento, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Representação de sobretensão no sistema de alta tensão



Fonte: ONS (2022)

A sobretensão temporária, apresentada na Figura 3a, é caracterizada pelo seu tempo maior de duração em comparação às outras, normalmente superior a dezenas de milissegundos, e ela ocorre entre fase-terra ou entre fases e geralmente apresenta amplitude inferior a 1,5 pu (D'AJUZ, 1987). As sobretensões temporárias, também conhecidas como sobretensões sustentadas, devido à duração de muitos ciclos, são comumente originadas por Efeito Ferranti, curtos-circuitos e manobras como rejeição de carga. Em determinadas situações, podem ocorrer constantes de tempo não amortecidas, exigindo análises detalhadas do comportamento dinâmico do sistema. Essas perturbações permanecem ativas até que o sistema seja ajustado ou que a origem do fenômeno seja eliminada. Os equipamentos expostos a essas condições deverão ser projetados e especificados de forma a suportá-las por longos períodos (ZANETTA, 2020).

As sobretensões de manobra ocorrem entre fase-terra ou fase-fase, originadas por mudanças bruscas na rede, seja através de chaveamento dos equipamentos ou faltas. As causas predominantes desse tipo de sobretensão são a energização e religamento de LTs, energização de transformadores e rejeição de carga (SERAFIM, 2021). O impacto da sobretensão no sistema varia conforme o instante exato da manobra na onda de tensão, uma vez que os polos do disjuntor não se fecham de forma simultânea. Quando a primeira fase é conectada, formam-se ondas viajantes que influenciam as demais fases devido ao acoplamento entre elas. Essas ondas se propagam pelo sistema e, ao serem refletidas nos terminais abertos, podem resultar em sobretensões ainda mais elevadas. Na Figura 3b, é apresentado uma forma de onda característica de sobretensão de manobra, na qual o tempo de frente (t_f) — intervalo entre 10% e 90% do valor de pico — varia entre 100 e 500 μ s. Já o tempo de cauda (t_c) — período até a onda decair para 50% do valor máximo — situa-se na faixa de 2000 a 3000 μ s. As amplitudes alcançam valores de até 3,5 ou 4,5 por unidade (pu) (SANTANA, 2011).

As sobretensões atmosféricas são ocasionadas por descargas atmosféricas, como os raios, que incidem nas LTs provocando surtos de tensão, que podem ocorrer entre fase e terra ou entre fases em diferentes pontos do sistema (SANT'ANA, 2011). A forma típica dessas sobretensões, ilustrada na Figura 3c, pode ser representada por um rápido crescimento linear da onda (na ordem de microssegundos), seguido de um decaimento mais lento (dezenas de microssegundos). Como estão associadas a fenômenos atmosféricos, tanto a duração quanto a intensidade máxima dessas sobretensões são imprevisíveis.

Figura 3 - Formas de onda das sobretensões transitórias



Fonte: Adaptado de SANTANA (2011)

3.2 Ferramenta Computacional ATP – Analises Transients Program

O ATP é uma ferramenta robusta e amplamente utilizada para a simulação digital de fenômenos transitórios de origem eletromagnética e eletromecânica em sistemas elétricos de potência. Seus recursos permitem a modelagem desde elementos básicos, como resistores lineares, indutores, capacitores, fontes ideais e chaves temporizadas, até componentes mais complexos, como linhas de transmissão, dispositivos não lineares e sistemas de controle (CARVALHO, 2022). Esses elementos podem ser analisados em regime permanente por meio de soluções fasoriais, no domínio do tempo pela resolução de equações diferenciais utilizando o método de integração trapezoidal, ou ainda no domínio da frequência, com a aplicação da transformada de Fourier ou de rotinas de varredura em frequência (CARVALHO, 2022).

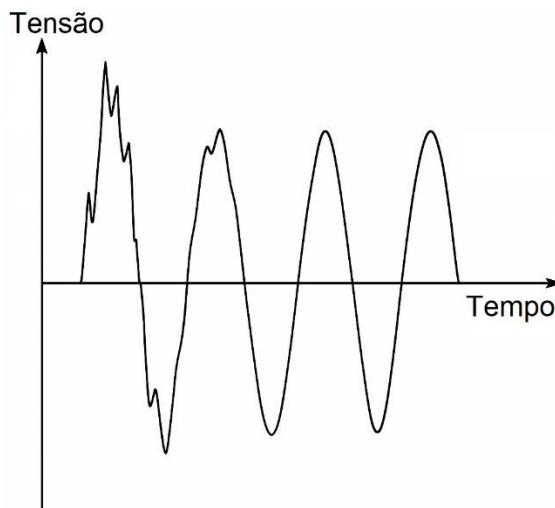
Essa ferramenta dispõe da interface gráfica ATPDraw, que possibilita ao usuário realizar modelagens de sistemas elétricos de potência sem a necessidade de conhecimentos em programação, proporcionando maior facilidade e agilidade. Além disso, o software conta com uma ampla biblioteca de componentes elétricos pré-definidos, o que simplifica a montagem dos sistemas (HØIDALEN, 2025). Este software é amplamente reconhecido e utilizado no setor elétrico nacional e internacional, uma vez que se trata de um programa de código aberto que possibilita a realização de diversos estudos analíticos, abrangendo condições de operação de um sistema elétrico complexo em regimes permanente, dinâmico e transitório (JESUS, 2025).

3.3 Energização de Linhas de Transmissão

A energização de uma LT é uma manobra transitória, realizada por meio do fechamento dos contatos dos disjuntores, que ocorre com frequência em um sistema de potência. No entanto, devido à não simultaneidade do fechamento das três fases, causada pela dispersão entre os contatos do disjuntor, o fechamento da primeira fase resulta imediatamente na propagação de onda tensão na própria fase e provoca efeitos nas outras antes do seu fechamento, em virtude do acoplamento existente entre elas. Essas ondas propagam-se ao longo da linha, refletindo e refratando no terminal oposto ao manobrado, onde geram as maiores sobretensões (ZANETTA, 2020).

Na Figura 4, é possível observar que a tensão, que inicialmente era zero devido à linha estar desenergizada, em seguida a LT é energizada resultando em picos de sobretensões durante um período transitório. Convém ressaltar que após a energização existe um período sem tensão no terminal oposto, que corresponde ao tempo de trânsito dessas ondas até atingirem esse ponto.

Figura 4 - Oscilograma típico de uma manobra de energização



Fonte: ZANETTA (2020)

O estudo de energização de uma linha de transmissão deve ser conduzida como parte das atividades do projeto básico da instalação, buscando essencialmente:

- Determinar as maiores sobretensões transitórias que podem ocorrer ao longo da linha e em seus terminais;
- Estimar as energias absorvidas pelos para-raios ao final da linha, assegurando seu correto dimensionamento quanto à capacidade de dissipação (kJ/kV);
- Avaliar se a coordenação do isolamento das estruturas da linha é adequada diante dos surtos de manobra, integrando esses resultados aos demais estudos do projeto básico.

Nos estudos, deve-se levar em conta a possibilidade de energização da linha de transmissão em ambos os sentidos, tanto com o sistema operando normalmente quanto em condição degradada. Além disso, as avaliações precisam ser realizadas com e sem a aplicação de faltas ao longo da linha. Esses defeitos devem ser inseridos, no mínimo, no terminal a ser energizado, no ponto médio e na extremidade oposta (ONS, 2022).

No decorrer do estudo para realização do projeto básico da LT, as análises se concentram nos elementos essenciais da instalação, enfatizando: as sobretensões que podem incidir sobre os equipamentos das subestações e dos terminais das linhas de transmissão; o comportamento dos para-raios de linha, que devem ser especificados para suportar, de forma independente, a energia associada ao processo de energização; e a avaliação da coordenação de isolamento da linha frente às sobretensões fase-fase e fase-terra decorrentes da manobra, porém o alvo deste trabalho é apenas as sobretensões nos terminais remotos durante a energização (ONS, 2022).

4. METODOLOGIA

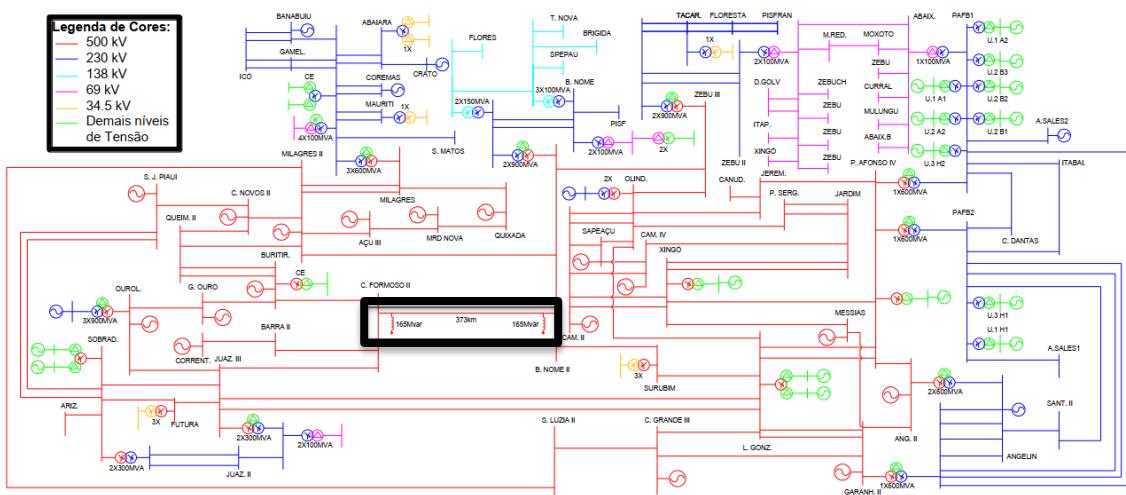
4.1 Caso base em ATP Aneel

Para a realização de estudos de transitórios eletromagnéticos, dentre eles o de energização de linha, a ferramenta computacional mais utilizada e aceita no mercado de energia elétrica é o ATP, por reconhecidamente apresentar resultados aderentes a realidade, dispor de uma grande variedade de modelos de elementos de circuitos e ser um software gratuito.

Para a montagem de um caso base em ATP, outras ferramentas auxiliares não gratuitas são necessárias, além de dispor de um banco dados dos elementos do SIN voltado para o ATP. Dada essas dificuldades, decidiu-se nesse TCC partir de um caso base em ATP já montado e disponibilizado pela Aneel para os leilões de transmissão. Esses casos são utilizados nos estudos que subsidiam os leilões de informações preliminares, sendo assim casos bases ATP devidamente validados e com informações reais dos elementos do SIN.

O caso base Aneel adotado tem como elemento de estudo uma LT de 500kV que conectará a subestação (SE) de Bom Nome II, situada no município de São José do Belmonte – PE, a SE Campo Formoso II – BA, com 373 km de extensão e que integrou o Leilão de Transmissão 001/2024 – Lote 5. Um visão simplificada do sistema elétrico modelado em ATP pode ser observado na Figura 5, com destaque para a linha estudada.

Figura 5 - Representação simplificada do sistema equivalente do caso base ATP Aneel



Fonte: Relatório R2 do leilão nº 001/2024 – Lote 5 (Aneel, 2024)

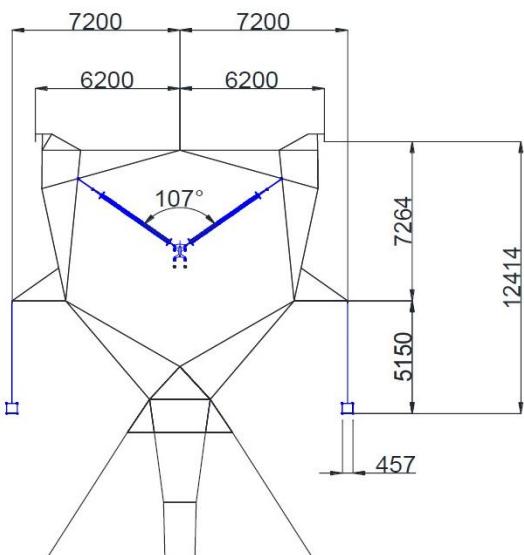
A Tabela 1 reúne os parâmetros da linha de transmissão disponibilizados pela Aneel, com os quais foi empregado no ATP o modelo de Clarke, baseado em parâmetros distribuídos invariantes com a frequência. Esse modelo considera resistências concentradas tanto no meio quanto nas extremidades da LT, constituindo uma aproximação que não causa distorções significativas em transitórios, especialmente nas sobretensões de manobra (COLQUI et al., 2022). Na Figura 6 é apresentada a torre típica adotada para essa linha de transmissão.

Tabela 1 – Parâmetros da torre base LT Bom Nome II – Campo Formoso II

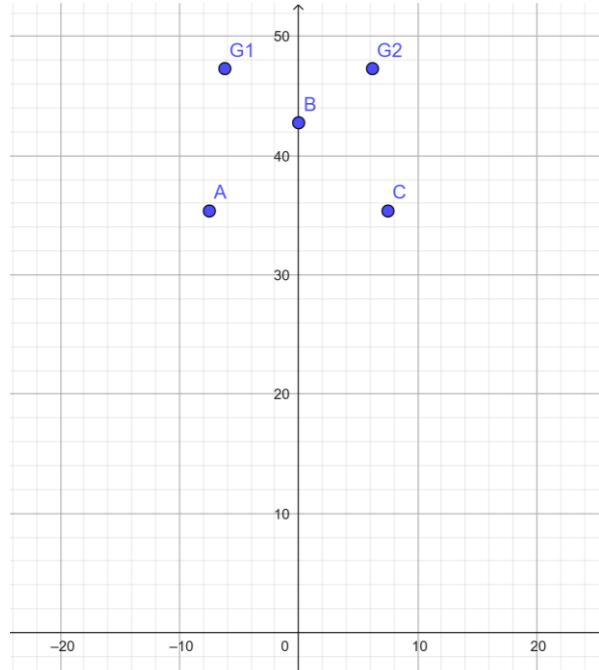
Parâmetros Distribuídos					
Sequência Zero			Sequência Positiva		
R0 (ohm/km)	X0 (ohm/km)	B0 (μ mho/km)	R1 (ohm/km)	X1 (ohm/km)	B1 (μ mho/km)
0,3330	1,1879	3,0201	0,0209	0,3093	5,2945

Fonte: Relatório R2 do leilão nº 001/2024 – Lote 5 (Aneel, 2024)

Figura 6 - Configuração da torre do caso base Aneel



a) Estrutura da torre



b) Arranjo geométrico

Fonte: Autoria própria

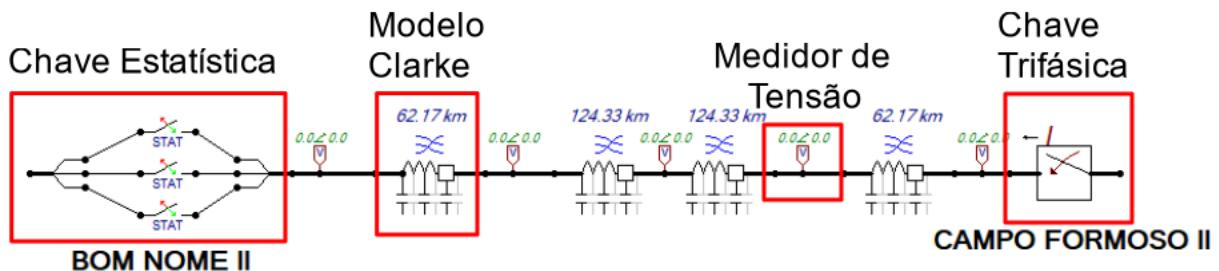
4.2 Caso base em ATP de Trabalho

A partir do caso base Aneel descrito no item anterior, foram realizadas algumas alterações necessárias para chegar no caso base de trabalho. Nas simulações foram desconsiderados os equipamentos para-raios, devido a sua não linearidade, e reatores de linha, pois tais elementos poderiam afetar o comportamento esperado das sobretensões ao longo da LT. Além disso, foi realizado a partição da LT para medição de tensão intermediária, como preconiza as diretrizes para projetos básicos de LT do ONS, embora nesse trabalho será observada apenas a tensão no terminal remoto, por entender que é nesse ponto que ocorre as maiores sobretensões.

Conforme a Figura 7, foram também implementadas no caso base de trabalho as chaves estatísticas. A análise estatística é um dos requisitos exigido durante a elaboração de um projeto básico de LT, devido à aleatoriedade do instante de fechamento dos polos do disjuntor (ONS, 2022). Dessa forma, uma chave estatística foi empregada para representar o comportamento do disjuntor, levando em conta a variação existente nos tempos de fechamento de cada polo de contato (SOARES,

2017). Neste trabalho, a chave estatística foi ajustada para realizar 200 simulações por caso estatístico, ou seja, os polos do disjuntor eram fechados com 200 tempos diferentes, quantidade mínima exigida pelos procedimentos de rede da ONS e foi configurada para fechamento no instante 0,01838s que era o instante que a magnitude da tensão valia zero, o que minimiza os efeitos transitórios. Ademais, serão coletados os tempos dos piores casos para gerar simulações determinísticas.

Figura 7 - LT do caso base de trabalho em ATP



Fonte: Autoria própria

4.2 Variação do comprimento total da LT

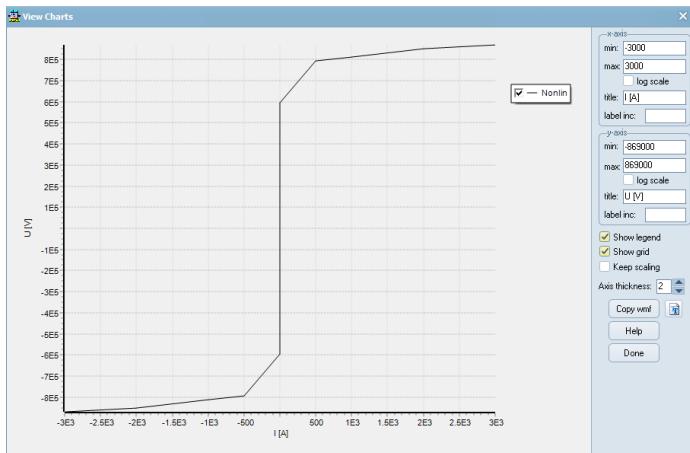
Para cumprir o objetivo principal desse trabalho, foram gerados vários casos a partir do caso base de trabalho variando o comprimento da linha para 50 km, 100 km, 200 km, 300 km e 373 km (comprimento original da LT). Além disso, para cada comprimento de linha, foram consideradas a energização por Campo Formoso II e por Bom Nome II com a condição sem falta, com faltas fase-terra no início, meio e fim da LT, totalizando 40 casos estatísticos. Esta abordagem metodológica visa uma investigação sistemática sobre a influência do comprimento da LT no comportamento transitório das tensões terminais devido à energização de linha.

4.4 Inserção dos para-raios

Como dito anteriormente, o caso base de trabalho não considerou a presença de para-raios nas subestações terminais de Campo Formoso II e Bom Nome II, visto que esses equipamentos, devido a sua não linearidade, além de atenuarem as sobretensões, poderiam causar efeitos não requeridos para esse trabalho. Entretanto, como forma de verificar a atuação desses equipamentos, decidiu-se nesse trabalho realizar simulações dos piores casos verificados com a variação do comprimento da linha considerando a presença dos para-raios.

Os para-raios são equipamentos utilizados capazes de limitar a sobretensão a níveis compatíveis com a suportabilidade do sistema, garantindo a proteção contra surtos de tensão (MAMEDE FILHO, 2013). Os para-raios utilizados para essas simulações são os mesmos que foram utilizados no caso base Aneel e possuem tensão nominal de 420kV e capacidade de absorção de energia de 5460kJ e curva de corrente x tensão para chaveamentos de manobra está apresentada na figura 8.

Figura 8 - Gráfico da curva característica do para-raios



Fonte: Autoria própria

Foram instalados para-raios em ambas as subestações, SE Campo Formoso II e SE Bom Nome II, com o objetivo de avaliar o impacto de sua presença na mitigação das sobretensões observadas durante o processo de energização da LT.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando o que foi exposto e detalhado na metodologia, este capítulo tem como propósito apresentar e analisar os resultados obtidos a partir das simulações realizadas no software ATPDraw. Vale salientar que quando a energização ocorrer por Campo Formoso II, foram considerados os valores de sobretensão medidos em Bom Nome II e no caso da energização por Bom Nome II, os valores medidos em Campo Formoso II. Ainda, é válido destacar que os resultados das sobretensões apresentadas nos próximos itens estão em “*por unidade*” (PU) e foram calculadas considerando a tensão base de acordo com a equação (1):

$$V_{base_500kV} = 500 \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} kV \quad (1)$$

5.1 Energização da linha considerando a variação do seu comprimento

5.1.1 Energização por Campo Formoso II

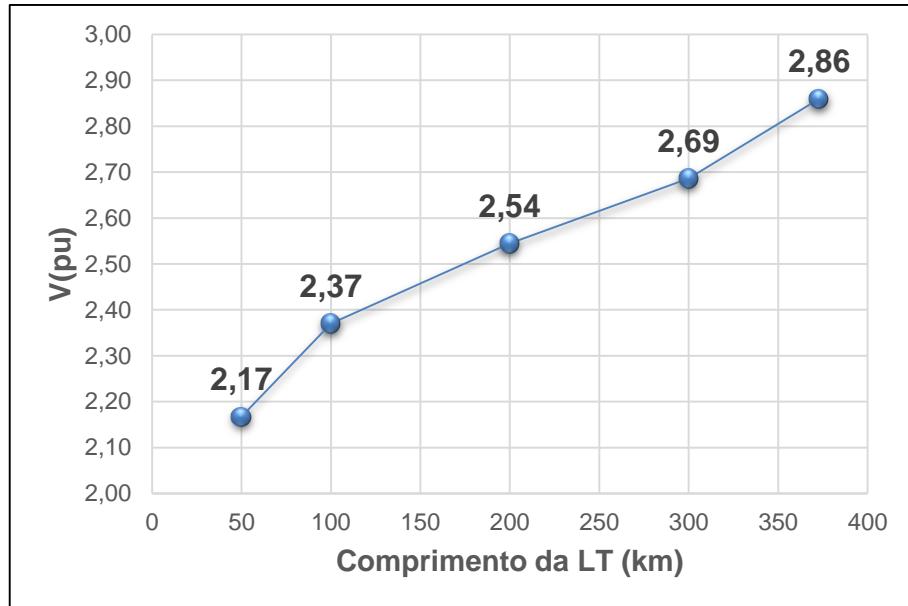
A tabela 2 apresenta os valores em pu dos picos máximos das sobretensões medidas em Bom Nome II, devido à energização por Campo Formoso II. Diante disso, para uma melhor visualização e entendimento dos resultados apresentados na tabela 2, as Figuras 9, 10, 11, 12 e 13 exibem de forma gráfica os resultados das simulações nas condições sem falta e com faltas fase-terra no início, no meio e no final da linha, respectivamente.

Tabela 2 – Sobretensões máximas na energização por Campo Formoso II

Local de Aplicação da Falta	Sobretensão máxima na SE Bom Nome II (pu)				
	50 km	100 km	200 km	300 km	373 km
-	2,17	2,37	2,54	2,69	2,86
Inicio	2,21	2,49	2,86	3,28	3,77
Meio	2,53	2,62	3,01	3,10	3,59
Fim	2,28	2,40	2,57	2,81	3,43

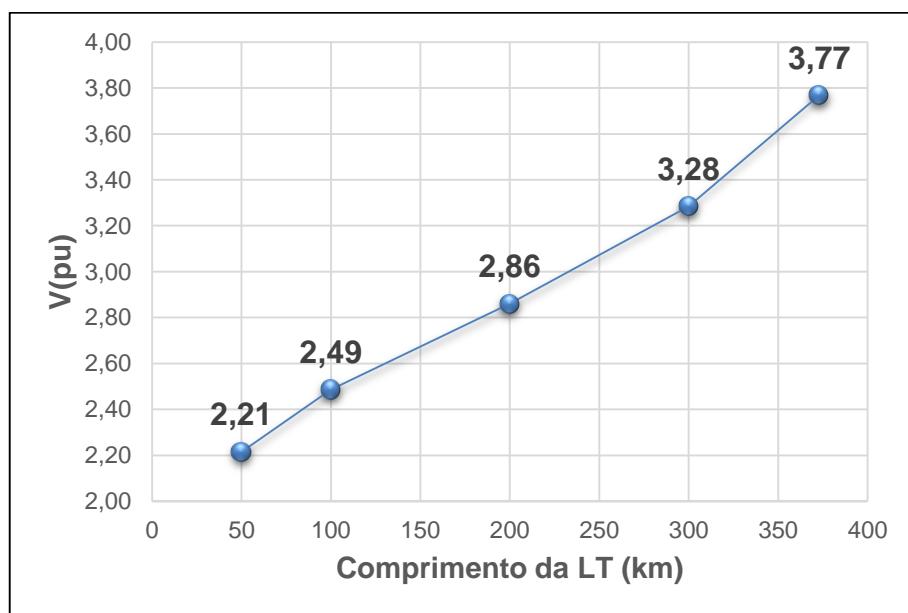
Fonte: Autoria própria

Figura 9 – Sobretensões máximas na energização por Campo Formoso II sem falta



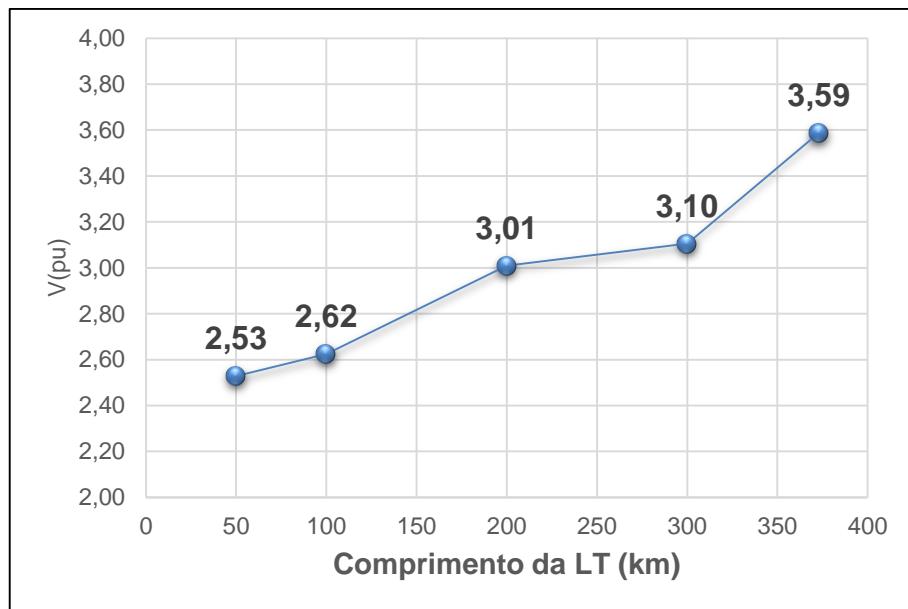
Fonte: Autoria própria

Figura 10 - Sobretensões máximas na energização por Campo Formoso II com falta no início da LT.



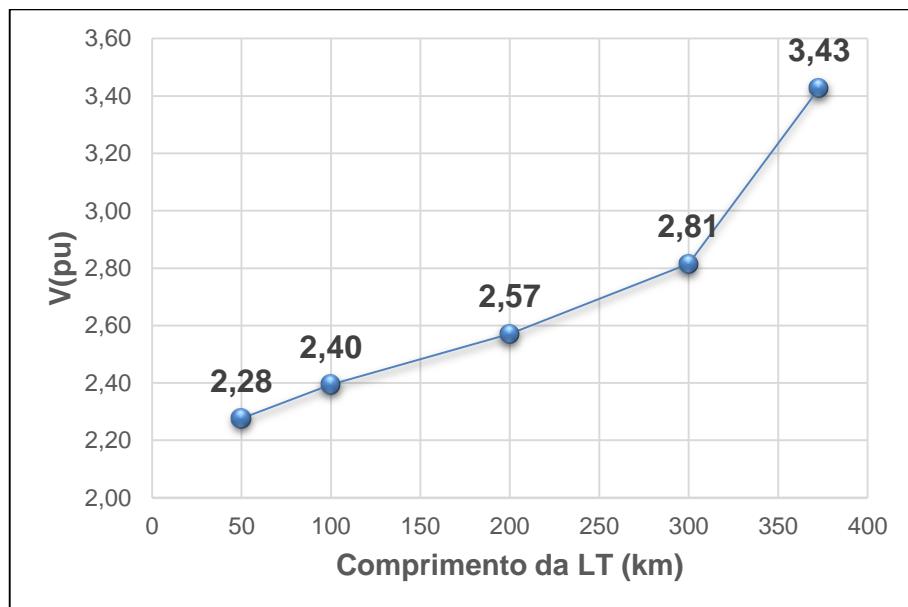
Fonte: Autoria própria

Figura 11 - Sobretensões máximas na energização por Campo Formoso II com falta no meio da LT.



Fonte: Autoria própria

Figura 12 - Sobretensões máximas na energização por Campo Formoso II com falta no final da LT

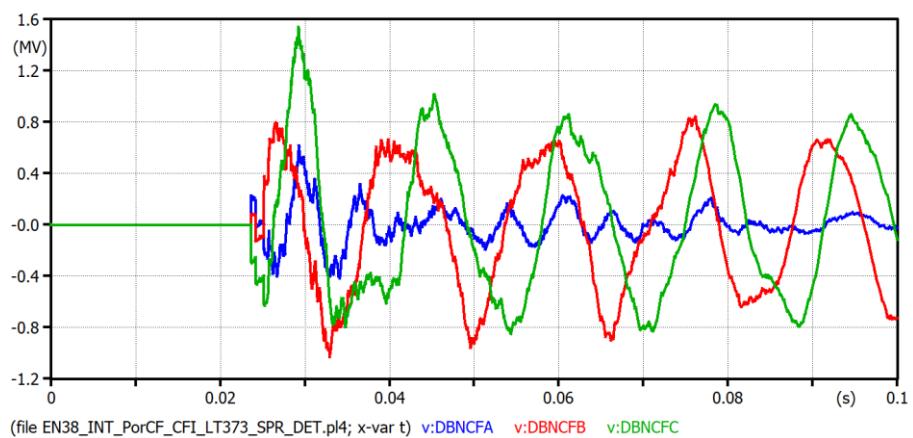


Fonte: Autoria própria

Ao observar os resultados obtidos nas simulações, é possível perceber de forma clara a influência do comprimento da LT nos picos das sobretensões medidas no terminal oposto ao de manobra. À medida que o comprimento da LT aumenta, os efeitos transitórios tornam-se mais intensos, devido ao maior percurso de propagação e ao aumento das reflexões de ondas ao longo da linha.

O pior caso em termos de sobretensão observado nas simulações anteriores (falta no início da linha de 373 km), foram simulados de forma determinísticas, considerando os tempos informados no caso estatístico. A Figura 13 mostra o oscilograma das tensões no lado de Bom Nome II para este caso, que chega a atingir uma sobretensão máxima de aproximadamente 1539 kV fase-terra na fase C (3,77 pu). O gráfico abaixo evidencia que a manobra de energização apresenta um comportamento transitório muito rápido, sendo nesse intervalo que ocorrem as maiores sobretensões. Além disso, observa-se que o fechamento não simultâneo dos polos — ou seja, o fato de as três fases não fecharem exatamente no mesmo instante — influencia diretamente o nível de sobretensão observado nas demais fases.

Figura 13 - Oscilograma do pior caso de sobretensão observada após energização por Campo Formoso II



Fonte: Autoria própria

5.1.2 Energização por Bom Nome II

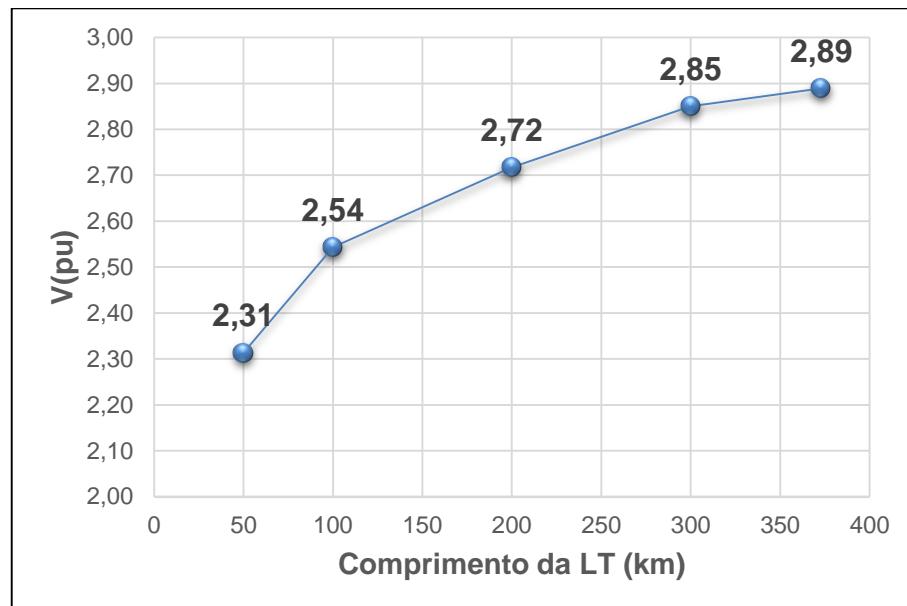
A tabela 3 apresenta os valores em pu dos picos máximos das sobretensões medidas em Campo Formoso II, devido à energização por Bom Nome II. Diante disso, para uma melhor visualização e entendimento dos resultados apresentados na tabela 2, as Figuras 14, 15, 16, 17 e 18 exibem de forma gráfica os resultados das simulações nas condições sem falta e com faltas fase-terra no início, no meio e no final da linha, respectivamente.

Tabela 3 – Sobretensões máximas na energização por Bom Nome II

Local de Aplicação da Falta	Sobretensão máxima na SE Campo Formoso II (pu)				
	50 km	100 km	200 km	300 km	373 km
-	2,31	2,54	2,72	2,85	2,89
Início	2,46	2,51	2,90	3,06	3,39
Meio	2,63	2,78	3,02	3,36	3,54
Fim	2,43	2,68	2,82	2,98	3,39

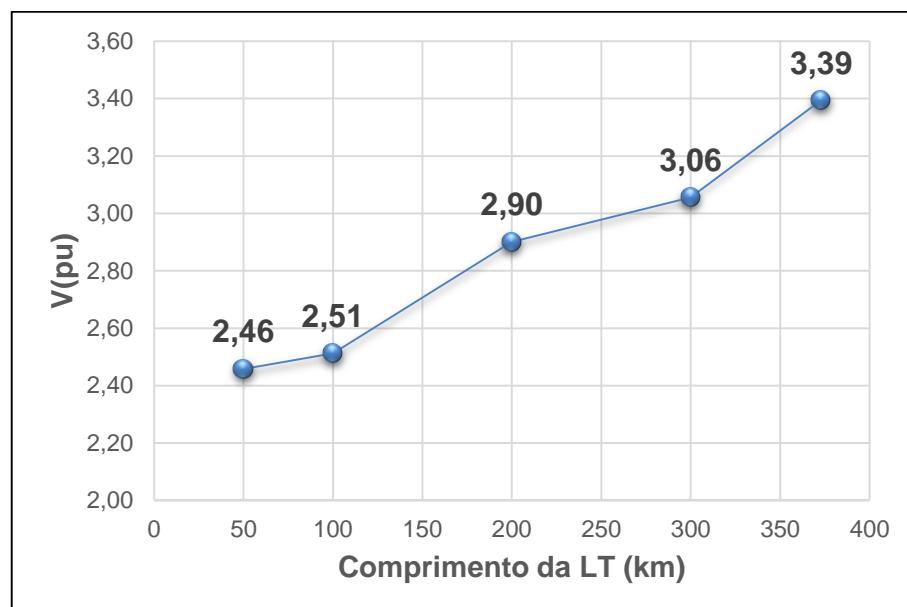
Fonte: Autoria própria

Figura 14 – Sobretensões máximas na energização por Bom Nome II sem falta



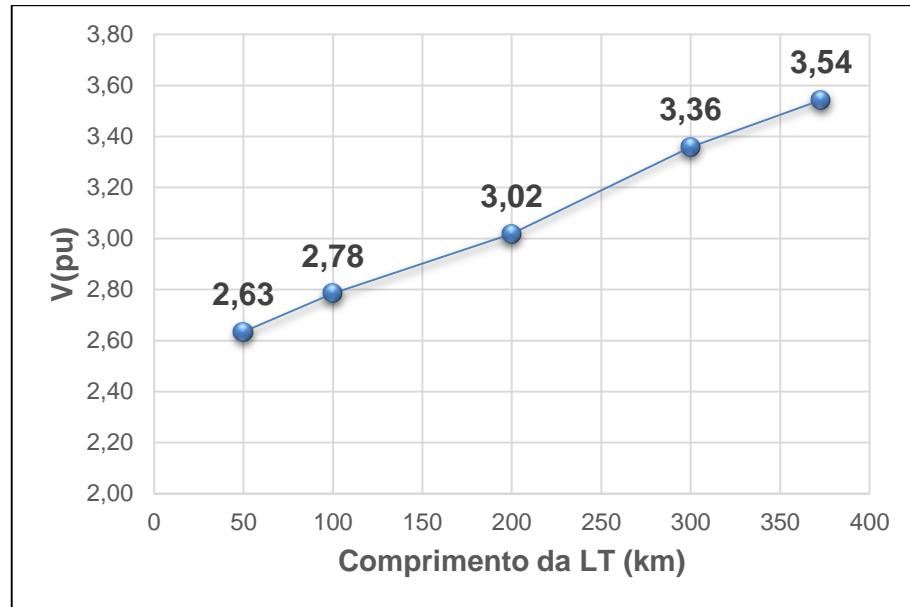
Fonte: Autoria própria

Figura 15 - Sobretensões máximas na energização por Bom Nome II com falta no início da LT



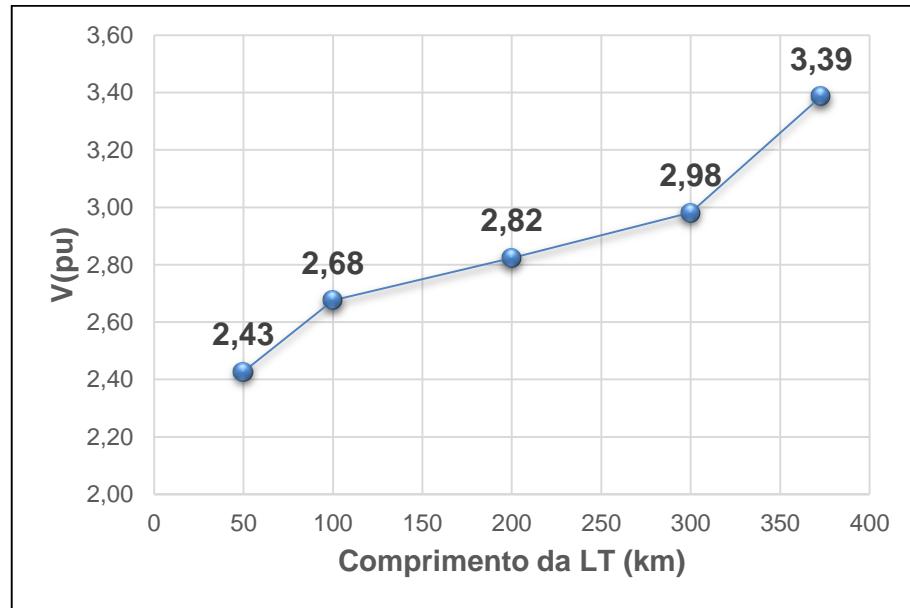
Fonte: Autoria própria

Figura 16 - Sobretensões máximas na energização por Bom Nome II com falta no meio da LT



Fonte: Autoria própria

Figura 17 - Sobretensões máximas na energização por Bom Nome II com falta no fim da LT



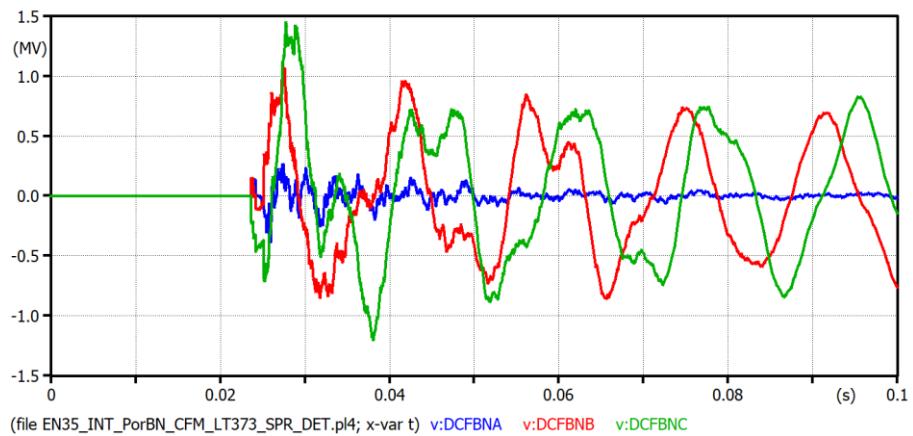
Fonte: Autoria própria

Assim como na energização por Campo Formoso II, ao observar os resultados obtidos nas simulações, é possível perceber de forma clara a influência do comprimento da LT nos picos das sobretensões medidas no terminal oposto ao de manobra. À medida que o comprimento da LT aumenta, os efeitos transitórios tornam-

se mais intensos, devido ao maior percurso de propagação e ao aumento das reflexões de ondas ao longo da linha.

O pior caso em termos de sobretensão observado nas simulações anteriores (falta no meio da linha de 373 km), foram simulados de forma determinísticas, considerando os tempos informados no caso estatístico. A Figura 18 mostra o oscilograma das tensões no lado de Campo Formoso II para este caso, que chega a atingir uma sobretensão máxima de aproximadamente 1446 kV fase-terra na fase C (3,54 pu). O gráfico abaixo evidencia que a manobra de energização apresenta um comportamento transitório muito rápido, sendo nesse intervalo que ocorrem as maiores sobretensões. Além disso, observa-se que o fechamento não simultâneo dos polos — ou seja, o fato de as três fases não fecharem exatamente no mesmo instante — influencia diretamente o nível de sobretensão observado nas demais fases.

Figura 18 - Oscilograma da pior sobretensão após energização por Bom Nome II



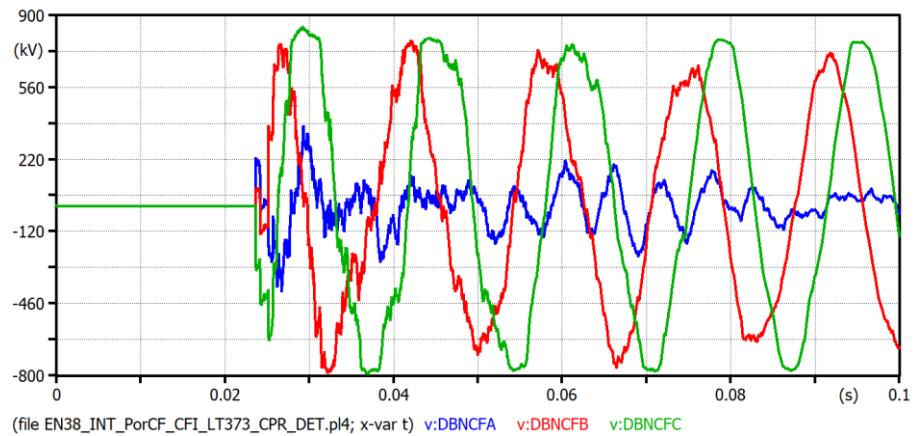
Fonte: Autoria própria

5.3 Resultado das simulações com para-raios

Com a inclusão dos para-raios nos dois piores casos apresentados no item anterior, foi possível comparar os níveis de sobretensão com e sem esses equipamentos, evidenciando sua eficácia na limitação dos picos de tensão e contribuindo para a maior confiabilidade e segurança do sistema elétrico durante as manobras de energização. Os casos simulados com para-raios foram os apresentados nas Figuras 13 e 18 do item anterior.

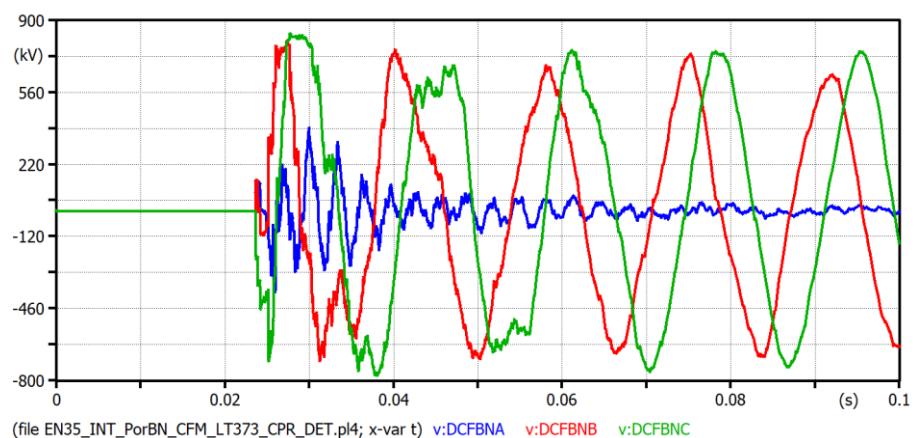
A Figura 19 apresenta as sobretensões do caso com falta no início da linha na energização por Campo Formoso II, enquanto a Figura 20 apresenta as sobretensões do caso com falta no meio da linha na energização por Bom Nome II com a presença de para-raios. É válido destacar que as sobretensões são no terminal oposto à energização.

Figura 19 – Oscilograma das sobretensões na energização por Campo Formoso II com falta no início da linha com a presença de para-raios.



Fonte: Autoria própria

Figura 20 - Oscilograma das sobretensões na energização por Bom Nome II com falta no meio da linha com a presença de para-raios.



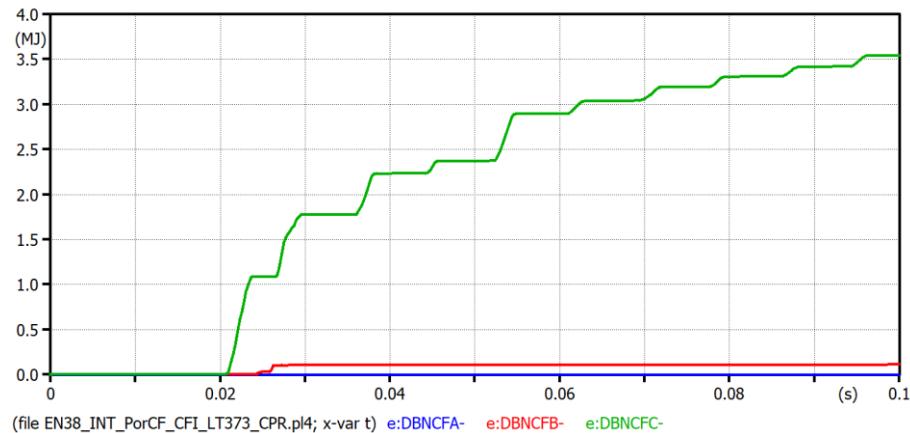
Fonte: Autoria própria

O oscilograma da Figura 19 apresentou uma sobretensão de 838 kV (2,05 pu) na fase C e representa um percentual de redução de 45% em relação ao caso sem para-raios.

O oscilograma da Figura 20 apresentou uma sobretensão de 845 kV (2,07 pu) na fase C e representa um percentual de redução de 42% em relação ao caso sem para-raios.

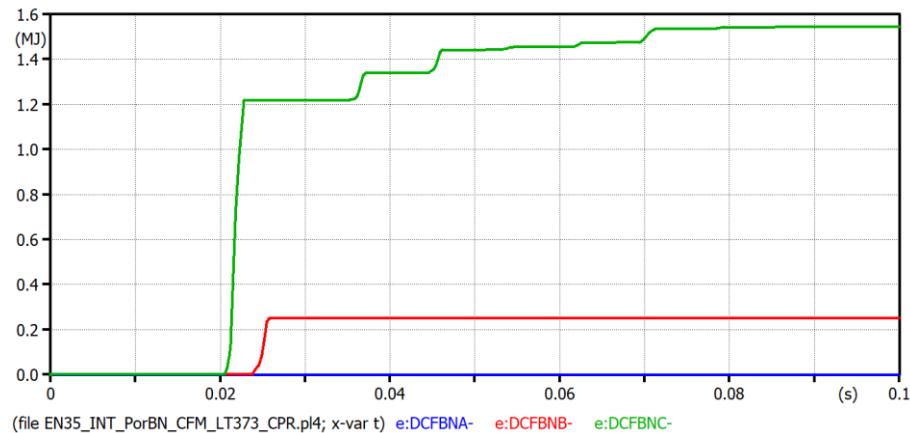
Essa diminuição demonstra que os para-raios actuaram de forma eficiente na dissipação da energia excedente, limitando os valores de tensão a níveis seguros e protegendo os equipamentos do sistema com a absorção da energia conforme está apresentado nas Figuras 21 e 22.

Figura 21 – Máxima energia absorvida nos para-raios da SE Bom Nome II do pior caso da energização por Campo Formoso II.



Fonte: Autoria própria

Figura 22 – Máxima energia absorvida nos para-raios da SE Campo Formoso II do pior caso da energização por Bom Nome II.



Fonte: Autoria própria

A energia nos para-raios apresentou um valor superior a 3,5MJ na fase C durante a energização por Campo Formoso II e de aproximadamente 1,5MJ na fase C durante a energização por Bom Nome II, sendo ambos valores de energia inferior a 5,46MJ que o valor de referência dos para-raios utilizados.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho tinha como objetivo central averiguar o comportamento das sobretensões na manobra de energização de uma linha de transmissão variando seu comprimento utilizando o software ATP para modelagem e simulações. Nessa perspectiva, os resultados possibilitaram uma análise detalhada das sobretensões que ocorrem no terminal oposto à energização, permitindo compreender de forma mais ampla o comportamento desses fenômenos transitórios. A observação dos resultados obtidos evidenciou a relevância de se estudar tais efeitos, uma vez que eles podem impactar significativamente o desempenho e a confiabilidade do sistema elétrico. Além disso, o uso do software ATPDraw demonstrou ser uma ferramenta essencial para a simulação e avaliação dos eventos de sobretensão, principalmente

através de sua análise estatística, contribuindo para uma melhor interpretação dos resultados e para o desenvolvimento de estratégias de mitigação mais eficazes. Outrossim, cada simulação permitiu caracterizar que quanto mais extensa a linha, maiores as sobretensões previstas devido à sua energização, conforme indica a literatura, e maior deve ser a preocupação com a coordenação de isolamento dessa linha e com o dimensionamento dos equipamentos mitigadores, como para-raios terminais.

A inserção dos para-raios possibilitou observar de forma clara a sua relevância na mitigação das sobretensões ao longo da linha de transmissão. Os resultados obtidos demonstraram que a presença desses dispositivos de proteção é fundamental para limitar os picos de tensão que ocorrem durante o processo de energização, proporcionando maior segurança e estabilidade ao sistema elétrico. Verificou-se que a atuação dos para-raios resultou em reduções significativas nas amplitudes das sobretensões, alcançando valores entre 40% a 45%, o que confirma sua eficiência e importância no desempenho geral do sistema elétrico.

Por fim, considerando a possibilidade de continuidade deste estudo, recomenda-se a ampliação da análise por meio da investigação de outros dispositivos e técnicas de mitigação de sobretensões, como a utilização de reatores e resistores de pré-inserção, que podem atuar também na limitação dos picos de tensão durante a energização. Além disso, sugere-se a realização de estudos envolvendo o religamento tripolar, a fim de fornecer uma compreensão mais abrangente dos métodos de proteção e contribuir para o aprimoramento do desempenho e da confiabilidade da linha de transmissão.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. Leilões de Transmissão.** 2024. Disponível em:
https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes_liferay/editais_transmissao/edital_transmissao.cfm. Acesso em 13 nov. 2025.
- BARBOSA, Patrick Trevizani. Aplicação de para-raios em linhas de transmissão utilizando o software ATPDraw.** 2019. Disponível em:
https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/1974/1/MONOGRAFIA_AplicaçãoPara-raiosLinhas.pdf. Acesso em 18 nov. 2025.
- CARVALHO, João Pedro Rego. Desenvolvimento de um programa computacional conversor de casos ATP em diagrama do ATPdraw™ via documento XML.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Disponível em:
https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/47428/1/TCC_JOAO_PEDRO_VERSAO_FINAL.pdf. Acesso em 15 nov. 2025.
- COLQUI, Jaimis Sajid Leon et al. Implementation of modal domain transmission line models in the ATP software.** IEEE, 2022. Acesso em 15 nov. 2025.
- D'AJUZ, A. Transitórios elétricos e coordenação de isolamento: aplicação em sistema de potência de alta-tensão.** Rio de Janeiro: Furnas: EDUFF, 1987. Acesso em 18 nov. 2025.
- EPE: Estudo de Escoamento de Geração na Região Nordeste – Volume 3: Área Leste.** 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/relatórios-r1> Acesso em 13 nov. 2025.
- GLOVER, J. Duncan; OVERBYE, Thomas J.; SARMA, Mulukutla S. Power system analysis & design.** Cengage Learning, 2017. Acesso em 15 nov. 2025.

HØIDALEN, H. K. ATPDraw - **The Graphical Preprocessor to ATP - User Manual**, Norway, 2025. Disponível em: <http://www.atpdraw.net/> Acesso em 18 nov. 2025.

JESUS, Diego Pereira de. **Modelagem de linha de transmissão de 345 kV no software ATPDraw para análises de transientes de sobretensão em dois barramentos**, 2025. Disponível em:

<https://repositorio.ifmg.edu.br/server/api/core/bitstreams/1cf718d9-a558-44ce-828b-1b37574e6768/content> Acesso em 18 nov. 2025.

JITSUKAWA, Jorge André Meneghel. **Coordenação de isolamento em subestações isoladas a ar**. 2010. Disponível em:
<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/33036> Acesso em 18 nov. 2025.

LIMA, Thiago Rodrigues Kleina. **Determinação de parâmetros do sistema elétrico que influenciam nos cálculos de energização de transformadores de potência**. 2022. Disponível em:

<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/8c9f5d7c-c514-4430-88d4-1bdb3a5d47d8/content> Acesso em 20 nov. 2025.

MAMEDE FILHO, J. Manual de Equipamentos Elétricos. 4ed. São Paulo, LTC, 2013.

MOURA, A. P.; MOURA, A. A. F.; ROCHA, E. P. **Transmissão de energia elétrica em corrente alternada**. Fortaleza-Brasil: Editora da Universidade Federal do Ceará, 2019.

OLESKOVICZ, Mário. **Qualidade da energia elétrica**. Edição do autor, São Carlos, 2007.

ONS. **Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão – Estudos Elétricos, Especificação das Instalações, de Equipamentos e de Linhas de Transmissão**. [Rev.I]: ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2022. Disponível em:

https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Diretrizes%20para%20Projeto%20Basico_REV.1_2022_publicação.pdf. Acesso em 18 nov. 2025.

PERES, Leonardo Luiz; KALUCZ, Rafael. **ESTUDO DE PROJETO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO TRIFÁSICAS AÉREAS COM ÊNFASE NOS CÁLCULOS ELÉTRICOS**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Elétrica, Curitiba, 2014. Disponível em: <https://www.eletrica.ufpr.br/p/arquivostccs/335.pdf>. Acesso em 15 nov. 2025.

SANTANA, Edilson da Silva. **Sobretensões de energização de Linha de Transmissão**. 2011. Disponível em:
<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/8138/1/monopoli10003917.pdf> Acesso em 13 nov. 2025.

SANTOS, José Vitor Oliveira de Souza et al. **Estudo das características geoelétricas de linhas de transmissão em prospecção a um modelo autocompensado**. 2024. Disponível em:

<https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1227/ESTUDO%20DAS%20CARACTERÍSTICAS%20GEOELÉTRICAS%20DE%20LINHAS%20DE%20TRANSMISSÃO%20EM%20PROSPECÇÃO%20A%20UM%20MODELO%20AUTOCOMPENSADO.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em 18 nov. 2025.

SERAFIM, Rafael Gonçalves. **Caracterização de sobretensões de energização em linhas de distribuição em 69 kV**. 2021. Disponível em:

<https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/32795/1/caracterizacaoenergizacao69kv.pdf>
Acesso em 15 nov. 2025.

SOARES G. B. Análise de energização e religamento de linha de transmissão no software ATP. Monografia (Graduação) - Faculdade UnB Gama, UNB, 2017.

Disponível em:

https://bdm.unb.br/bitstream/10483/20118/1/2017_GuilhermeBelotiSoares_tcc.pdf
Acesso em 18 nov. 2025.

ZANETTA JÚNIOR, L. C. Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência. Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, Ed. 2, 2020.