

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Rafael Gonçalves Serafim

**Caracterização de Sobretensões de Energização
em Linhas de Distribuição em 69 kV**

Curitiba
2021

Rafael Gonçalves Serafim

**Caracterização de Sobretensões de Energização em
Linhas de Distribuição em 69 kV**

Energization Overvoltages on 69 kV Distribution Lines

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Engenheiro Eletricista da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Ulisses Chemin Netto

Curitiba

2021



4.0 Internacional

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao autor e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença

Rafael Gonçalves Serafim

**Caracterização de Sobretensões de Energização em
Linhas de Distribuição em 69 kV**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Engenheiro Eletricista da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Ulisses Chemin Netto

Data de Aprovação: 25/novembro/2021

Me. Muryllo Amálio de Souza
Companhia Paranaense de Energia - COPEL

Dr. Fabiano Gustavo Silveira Magrin
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Dr. Ulisses Chemin Netto
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Curitiba
2021

Resumo

O objetivo deste trabalho é a caracterização estatística de sobretensões em linhas de transmissão e distribuição aéreas de 69 kV. Para tanto, foram simulados alguns cenários de energização utilizando o *software* ATP (*Alternative Transients Program*) em um modelo de linha de transmissão aérea em corrente alternada com dois terminais. Nesses foram variados os parâmetros de resistividade elétrica do solo, comprimento da linha e os valores do equivalente de curto-circuito, a fim de apontar como a mudança desses fatores pode causar influência nos resultados de sobretensão. Os resultados foram apresentados em gráficos de distribuição de frequência e probabilidade, sendo úteis para a análise do comportamento elétrico da linha e seu projeto de isolamento frente as condições evidenciadas.

Palavras-chave: Energização. Caracterização. Sobretensões. ATPDraw.

Abstract

The main goal of this study is to characterize overvoltages statistically in 69 kV overhead transmission and distribution lines. Energization scenarios were simulated using the ATP (Alternative Transients Program) software in a model of aerial transmission line in alternating current with two terminals. Some electrical parameters were varied to point out how the change in these factors can influence the overvoltage results. The results were presented in frequency and probability distribution graphs, helpful in analyzing the electrical behavior of the line and its insulation project under the conditions highlighted.

Keywords: Energization. Characterization .Overvoltagens. ATPDraw.

Lista de ilustrações

Figura 1	Representação esquemática para o SEP.	10
Figura 2	Modelo Institucional para o SEP brasileiro.	11
Figura 3	Fluxograma para Execução da Pesquisa.	14
Figura 4	Representação sobretensões em sistema EAT.	16
Figura 5	Exemplo de Sobretensão de Manobra.	17
Figura 6	Curva ITIC para sub e sobretensão.	19
Figura 7	Exemplo de tempo ótimo para fechamento da chave Controladora . . .	21
Figura 8	Exemplo de simulação de Energização de uma Linha de 5km.	22
Figura 9	Modelo para Simulações ATP.	23
Figura 10	B - Configuração ACSource.	24
Figura 11	C - Equivalente de curto-circuito do SEP (LINESY_3).	24
Figura 12	D - Configuração da chave estatística (SW_STAT).	25
Figura 13	Geometria da Linha de Transmissão.	26
Figura 14	F1 - Configuração LT_SP tela Model	26
Figura 15	F2 - Configuração LT_SP tela Data.	27
Figura 16	Distribuição de Sobretensões para LT com 5km.	27
Figura 17	Distribuição de Sobretensões para LT com 30km.	28
Figura 18	Distribuição de Sobretensões para LT com 92km.	29
Figura 19	Probabilidade Sobretensões l Variável	30
Figura 20	Distribuição Sobretensões $l=5\text{km}$ e $\rho=2500 \Omega \cdot m$	31
Figura 21	Distribuição Sobretensões $l=30\text{km}$ e $\rho=2500 \Omega \cdot m$	31
Figura 22	Distribuição Sobretensões $l=92\text{km}$ e $\rho=2500 \Omega \cdot m$	32
Figura 23	Probabilidade Sobretensões $l=5\text{km}$ e ρ variável.	33
Figura 24	Probabilidade Sobretensões $l=30\text{km}$ e ρ variável.	33
Figura 25	Probabilidade Sobretensões $l=92\text{km}$ e ρ variável.	34
Figura 26	Distribuição Sobretensões $l=5\text{km}$ e eq. Thévenin 2,54 GVA	35
Figura 27	Distribuição Sobretensões $l=30\text{km}$ e eq. Thévenin 2,54 GVA	36

Figura 28	Distribuição Sobretensões $l=92\text{km}$ e e eq. Thévenin 2,54 GVA	36
Figura 29	Probabilidade Sobretensões $l=5\text{km}$ e eq. Thévenin variável.	37
Figura 30	Probabilidade Sobretensões $l=30\text{km}$ e eq. Thévenin variável.	37
Figura 31	Probabilidade Sobretensões $l=92\text{km}$ e e eq. Thévenin variável.	38

Lista de Siglas e Abreviaturas

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

ATP *Alternative Transients Program*

CAA Condutor de Alumínio com Alma de Aço

CCEE Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CLP Controlador Lógico Programável

CMSE Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico

CNPE Conselho Nacional de Política Energética

EAT Extra-Alta Tensão

EPE Empresa de Pesquisa Energética

ITIC *Information Technology Industry Council*

LT Linha de Transmissão

MME Ministério das Minas e Energia

ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico

SEP Sistema Elétrico de Potência

Sumário

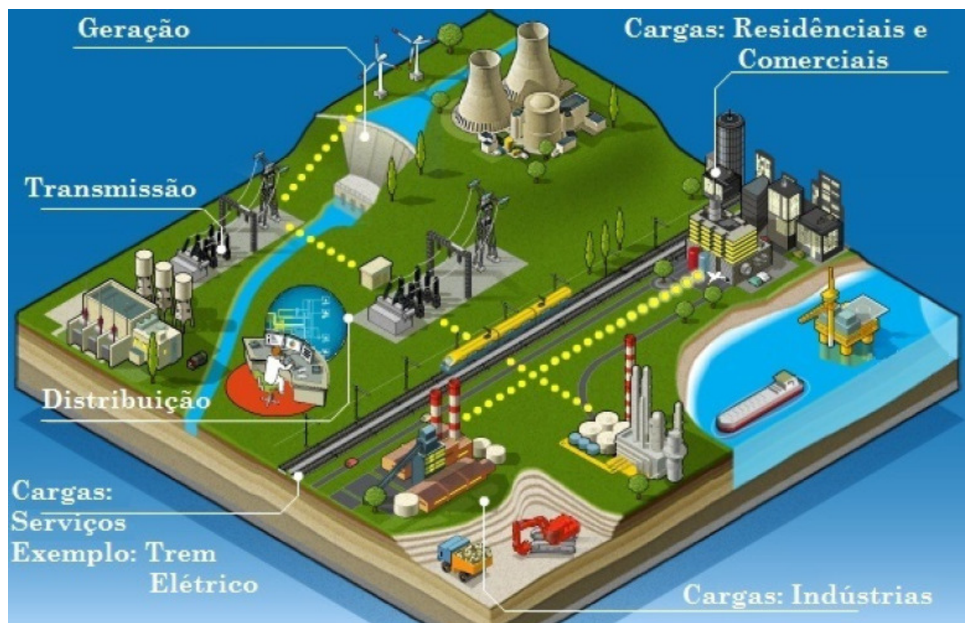
1	Introdução	10
1.1	Objetivos	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
1.2	Justificativa	13
1.3	Procedimentos Metodológicos	14
1.4	Estrutura do Trabalho	14
1.5	Comentários Finais	15
2	Revisão Bibliográfica	16
2.1	Sobretensões	16
2.1.1	Sobretensões de Manobra	17
2.1.2	Sobretensões Atmosféricas	17
2.1.3	Sobretensões Temporárias	18
2.1.4	Impactos de Sobretensões na Indústria	18
2.2	Crise Amapá	19
2.3	Chaveamento Controlado e Ponto Ótimo	20
2.4	ATPDraw e Simulações de Energização	21
2.5	Comentários Finais	21
3	Metodologia, Resultados e Discussões	23
3.1	Sistema Simulado	23
3.1.1	Fonte de Tensão	24

3.1.2	Equivalente do SEP	24
3.1.3	Simulação dos Contatos Principais do Disjuntor	25
3.1.4	Configuração da Linha de Transmissão	25
3.2	Resultados para Variações no Comprimento da LT	25
3.3	Resultados para Variações na Resistividade do Solo e Comprimento da LT . . .	29
3.4	Resultados para Variações no Equivalente Thévenin e Comprimento da LT . .	34
3.5	Comentários Finais	38
4	Conclusões	39
	Referências	40

Introdução

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEPs), esquematicamente apresentados na Figura 1, compreendem a infraestrutura (equipamentos, tecnologias, processos, normas, regulamentações, ambiente para transações comerciais, etc.) necessária para gerar, transmitir e distribuir a energia elétrica, a qual representa um insumo fundamental para as sociedades contemporâneas em face de suas diversas aplicações, como, por exemplo, iluminação, transporte, fornecimento de água potável e produção de bens de consumo (GLOVER, 2012; MOHAN, 2012). A sua disponibilidade (abundância ou escassez) é um fator preponderante no desenvolvimento e bem estar social, além de impactar diretamente no potencial econômico de uma região ou país (RABÊLO, 2010).

Figura 1 – Representação esquemática para o SEP.



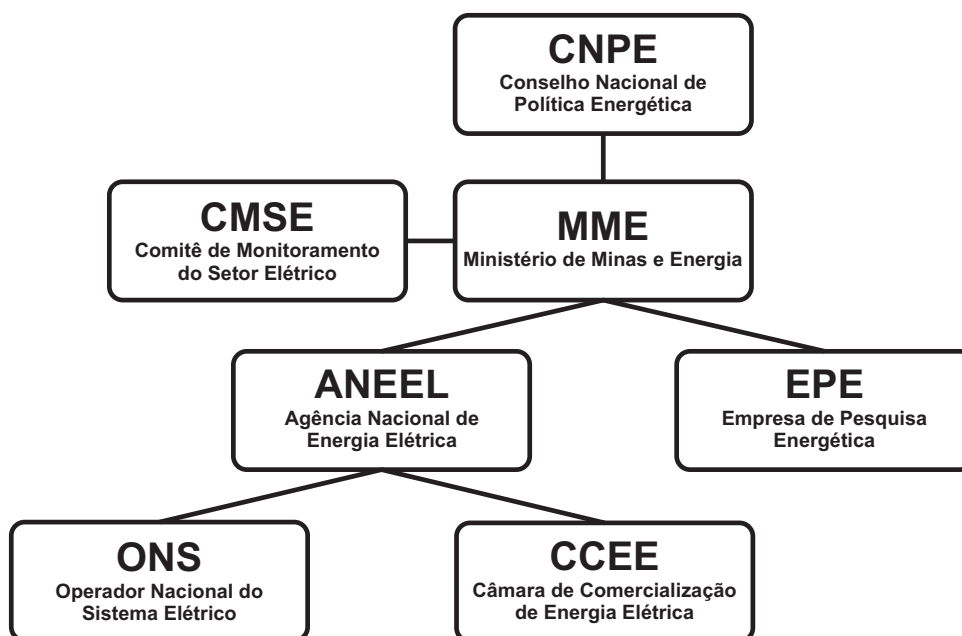
Fonte: (MIRANDA, 2009)

O SEP brasileiro, em novembro de 2020, possui 9.022 empreendimentos de geração em operação, totalizando 175.719.746,11 kW de potência outorgada. Há, ainda, a previsão de adição de 10.825.736,33 kW na capacidade de geração do País, proveniente de 251 empreendimentos em construção e mais 687 empreendimentos com construção não iniciada, que totalizarão um

acréscimo de 26.454.761,17 kW de potência outorgada, sendo do tipo hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários (ANEEL, 2020; ONS, 2019). Trata-se, portanto, de um sistema singular em âmbito mundial com alta complexidade operativa.

A continuidade e segurança no fornecimento, a universalização de atendimento e a modicidade tarifária são os principais objetivos estabelecidos para o setor elétrico brasileiro após a sua reestruturação em meados da década de 1990 (USIDA, 2011). Esses objetivos são concorrentes e representam um grande desafio tanto técnico quanto legal, sendo, portanto objeto de trabalho por diversas entidades, conforme a Figura 2. Em linhas gerais, cada uma dessas instituições desempenha as seguintes atividades:

Figura 2 – Modelo Institucional para o SEP brasileiro.



Fonte: (TOLMASQUIM, 2015)

- ❑ Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) - Define a política energética do país, com o objetivo de assegurar a estabilidade do suprimento energético;
- ❑ Ministério das Minas e Energia (MME) - Responsável pelo planejamento, gestão e desenvolvimento da legislação do setor, bem como pela supervisão e controle da execução das políticas direcionadas ao desenvolvimento energético do país;
- ❑ Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) - Supervisiona a continuidade e a confiabilidade do suprimento elétrico;
- ❑ Empresa de Pesquisa Energética (EPE) - Realiza o planejamento da expansão da geração e transmissão, a serviço do MME, e dá suporte técnico para a realização de leilões;
- ❑ Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) - Regula e fiscaliza a geração, transmissão, distribuição e comercialização de eletricidade. Define as tarifas de transporte e consumo, e assegura o equilíbrio econômico-financeiro das concessões;

- Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) - Controla a operação do Sistema Interligado Nacional (SIN) de modo a assegurar a otimização dos recursos energéticos;
- Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) - Administra as transações do mercado de energia e realiza os leilões oficiais.

Um SEP opera comumente em seu estado normal e seguro quando as restrições de carga, operação e segurança são simultaneamente satisfeitas, implicando, portanto, em atender os consumidores a ele conectado dentro de padrões de qualidade de produto e serviço estabelecidos (BENEDITO, 2019). Contudo, a ocorrência de uma contingência e/ou mudança topológica, por exemplo, fará o SEP mudar de estado operativo, podendo passar para um novo estado normal e seguro, um estado inseguro ou de emergência (SATO; FREITAS, 2015).

A cada mudança de estado, por um intervalo de tempo que pode ir de alguns poucos microssegundos até alguns ciclos da onda fundamental de tensão, será estabelecido um regime de transitórios eletromagnéticos. Durante tal período poderão surgir valores de corrente e tensão elevados nos elementos componentes do SEP, submetendo-os a solicitações (elétricas, térmicas e mecânicas) que podem comprometer sua integridade e/ou correto funcionamento. O conhecimento e predição do comportamento transitório das tensões e correntes em um SEP é relevante para fins de projeto, especificação e operação dos seus elementos constituintes (WATSON, 2003).

As sobretensões representam uma situação operativa que pode implicar no mau funcionamento de equipamentos, na diminuição da sua vida útil, no sobreaquecimento de motores, no desligamento de linhas de transmissão, em falha na operação de relés de proteção, entre outros (OLESKOVICZ, 2007).

As linhas de transmissão e distribuição, foco desta pesquisa, no Brasil são, majoritariamente, aéreas, em corrente alternada e compostas por condutores nus. Por serem “equipamentos elétricos” com dimensões na ordem de quilômetros, instalados através de variados espaços geográficos, são o elemento constituinte do SEP que tem o seu funcionamento mais afetado por desligamentos (COURY, 2007). Portanto, o projeto, a operação e o monitoramento de uma linha de transmissão precisa ser eficiente para aumentar a sua disponibilidade em serviço, implicando em melhores índices de continuidade da operação, sem impactar negativamente em seu faturamento ou na operação do restante do SEP ao qual está conectada.

As sobretensões, passíveis de ocorrência em um SEP, podem ser classificadas em dois grandes grupos, a saber: as de origem interna ao SEP e aquelas de origem externa a ele. No primeiro caso a sua origem está associada a alterações dentro do próprio SEP como, por exemplo, a eventos de manobra de disjuntores e/ou curtos-circuitos. Já as do segundo grupo tem a sua origem fora do SEP, devidas, por exemplo, a ocorrência de descargas atmosféricas (D’AJUZ, 1987).

As sobretensões internas, sejam elas fase-terra ou fase-fase, podem, ainda, ser classificadas como temporárias ou de manobra, diferindo, basicamente, em relação a sua amplitude e duração. As primeiras possuem muitos ciclos de 60 Hz (até 20 ciclos) de duração e podem

atingir magnitudes de até 2,5 p.u.. Já as do segundo tipo possuem duração de 1 ou 2 ciclos de 60 Hz e magnitudes de até 3 p.u. (D'AJUZ, 1987; HEDMAN, 1983; JÚNIOR, 2003).

Qualquer que seja o tipo de sobretensão em estudo, o conhecimento de seus possíveis valores é fundamental para a especificação de equipamentos e realização de estudos de coordenação de isolamento seja em uma subestação ou linha de transmissão (D'AJUZ, 1987; HEDMAN, 1983; JÚNIOR, 2003).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Caracterizar, através de um estudo estatístico, as sobretensões de manobra originadas durante a energização de uma linha de transmissão aérea em corrente alternada, com dois terminais, em 69 kV, 60 Hz, quando esta estiver com o terminal de carga aberto.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ❑ Realizar uma revisão bibliográfica a respeito de sobretensões, coordenação de isolamento e simulação de energização de linhas de transmissão;
- ❑ Obter, a partir da revisão bibliográfica, informações necessárias para criar o modelo base para estudo de energização de uma linha de transmissão aérea em corrente alternada, 69 kV, 60 Hz, no aplicativo computacional ATPDraw;
- ❑ A partir do caso base representado no aplicativo ATPDraw, variar os parâmetros de interesse que possam influenciar nos valores das sobretensões, como, por exemplo, o comprimento da linha de transmissão, a resistividade do solo e a potência do equivalente de curto-circuito do sistema no ponto de conexão da linha de transmissão;
- ❑ Traçar as distribuições de frequência e probabilidade para cada caso simulado. Discutir os resultados com base na revisão bibliográfica e emitir as conclusões.

1.2 Justificativa

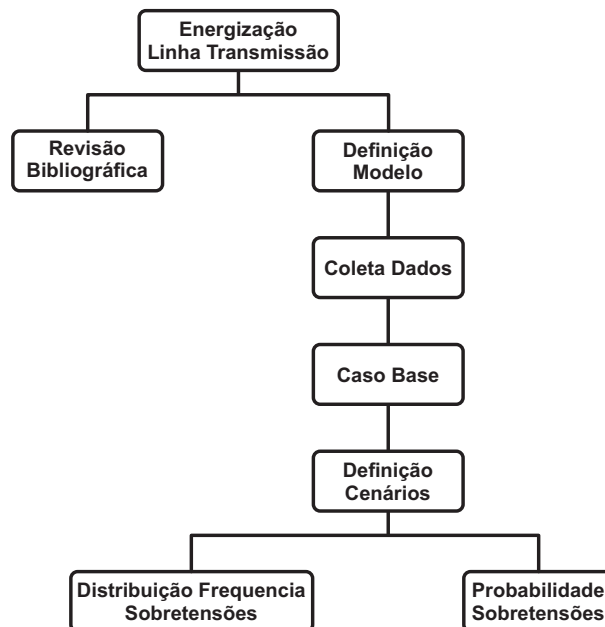
Tipicamente o projeto de coordenação de isolamento de uma linha de transmissão é realizado observando os valores de sobretensões passíveis de ocorrência, particularmente para as condições de energização a vazio e para a ocorrência de descarga atmosférica. Tais estudos são conduzidos, modernamente, pelo uso de *softwares* para caracterização de transitórios eletromagnéticos. Os estudos de energização são realizados de maneira estatística, em função da dispersão do tempo de fechamento dos contatos principais do disjuntor de potência. De posse dos valores de sobretensão calculados pela simulação e feito o devido tratamento estatístico esses são apresentados normalmente em gráficos de distribuição de frequência e probabilidade, sendo,

portanto uma ferramenta útil para o projeto de coordenação de isolamento de uma linha de transmissão (JÚNIOR, 2003).

1.3 Procedimentos Metodológicos

Inicialmente será apresentado um estudo teórico na área de sobretensões, utilizando materiais acadêmicos da bibliografia. O segundo passo será levantar dados da linha de transmissão modelo, como comprimento, resistividade, topologia entre outros. Em seguida, utilizando o *Alternative Transients Program* (ATP), será simulada a linha de transmissão alvo, atribuindo diversas situações, a fim de analisar o comportamento da linha de transmissão em vários cenários e com os dados de sobretensão calculados serão apresentados resultados estáticos (Frequência e Probabilidade) das várias situações simuladas, o fluxograma da Figura 3 resume e exposto.

Figura 3 – Fluxograma para Execução da Pesquisa.



Fonte: O autor.

1.4 Estrutura do Trabalho

O capítulo 1 apresentará o contexto em que esta pesquisa se insere, os objetivos, a justificativa, a metodologia proposta e a organização deste documento. O capítulo 2 apresentará a revisão bibliográfica a respeito da temática de transitórios eletromagnéticos originados em manobras de energização de linhas de transmissão. O capítulo 3 apresentará o modelo computacional da linha de transmissão a ser estudada durante o evento de energização em vazio, pelo uso do ATP. O capítulo 4 apresentará os resultados das simulações a partir de uma análise estatística dos valores adquiridos. O capítulo 5 apresentará as conclusões, o fechamento da pesquisa e os pontos de continuidade sugeridos.

1.5 Comentários Finais

Neste capítulo foi apresentado o contexto no qual esta pesquisa se insere, seu objetivo, justificativa e abordagem metodológica proposta. O estudo de sobretensões de energização em uma linha de transmissão por meios computacionais, sistematizado de forma estatística, torna possível a construção de um modelo parametrizável capaz de reproduzir o comportamento daquelas. A partir de tal modelo é factível verificar a influência que alguns parâmetros, como, por exemplo, o comprimento da linha de transmissão e o valor do equivalente de curto-circuito no ponto de conexão exercerão sobre os valores de sobretensão encontrados. Tais informações são de grande valia para um melhor entendimento do comportamento do SEP e, por conseguinte, um melhor planejamento, projeto e operação.

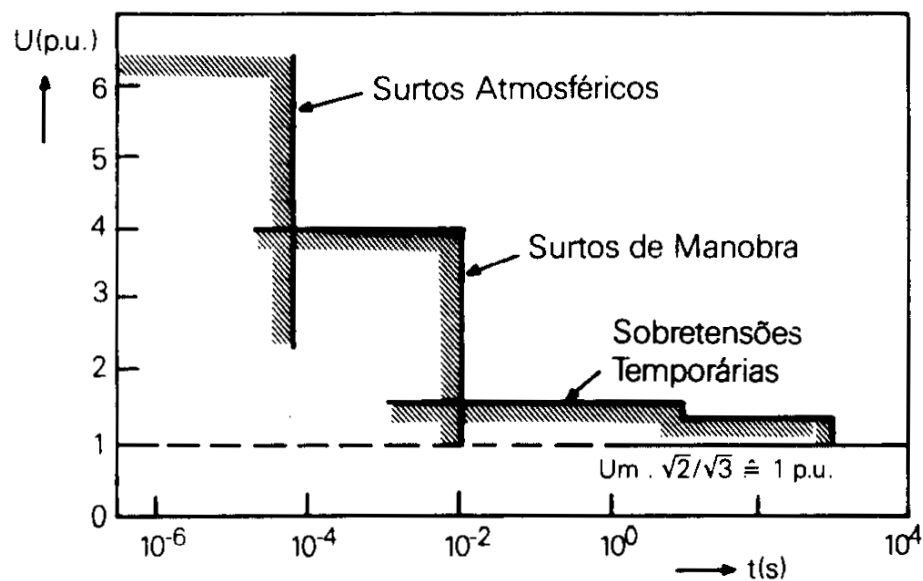
Revisão Bibliográfica

Neste capítulo foi realizada uma breve revisão bibliográfica acerca das sobretensões em SEP com o intuito de familiarizar o leitor com os aspectos fundamentais da temática relativos a pesquisa feita.

2.1 Sobretensões

Em um projeto de Distribuição de Energia Elétrica, o ideal seria o sistema operar em regime nominal constante. Infelizmente, sabemos que na prática, por diversos fatores, não é o que ocorre. Um destes é o conceito de Sobretensão .

Figura 4 – Representação sobretensões em sistema EAT.



Fonte: (D'AJUZ, 1987)

Sobretensões são distúrbios que ocorrem no sistema de distribuição e transmissão, onde seu valor de pico supera a tensão de regime nominal. Esse evento é dividido em dois grupos,

baseados na localização ocorrida, sendo, Externos (Atmosféricas) ou Internos (Manobras, Temporários) (D'AJUZ, 1987). A Figura 4 ilustra os diferentes tipos de sobretensões em um sistema Extra-Alta Tensão (EAT).

É de importância elaborar estudos de sobretensão, para prever os piores cenários possíveis de uma linha de transmissão/distribuição e assim o projeto atender as condições de continuidade, qualidade e economia (BENEDITO, 2019).

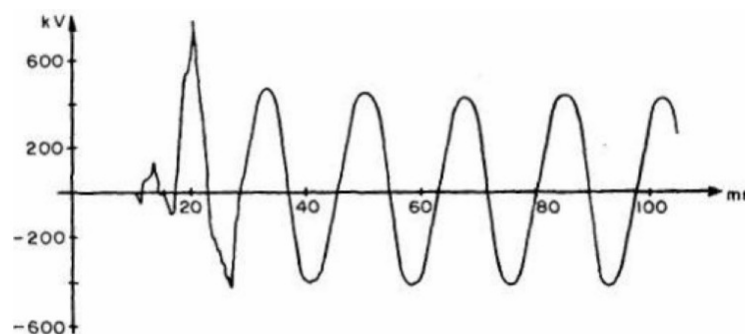
2.1.1 Sobretensões de Manobra

Sobretensões de manobras são sobretensões variáveis no tempo, fase-fase ou fase-terra causadas por mudança bruscas nos sistemas de potência, através de manobras de equipamentos de chaveamento ou curtos-circuitos. Os principais fatores para esse evento são energização e religamento de Linhas de Transmissão (LTs), rejeição de carga, energização de transformadores (DANTAS, 2007).

O impacto dessa sobretensão no sistema é dependente do exato momento da manobra de energização, devido o fato que os polos do disjuntor não são comutados simultaneamente, quando a primeira fase é comutada, é gerado ondas trafegantes nas demais fases, devido ao acoplamento entre elas. As ondas irão se propagar pelo sistema, sendo refletidas nos terminais abertos, ocorrendo maiores sobretensões.

A Figura 5 mostra um exemplo de sobretensões no início de energização de um sistema.

Figura 5 – Exemplo de Sobretensão de Manobra.



Fonte: (D'AJUZ, 1987)

Outros fatores que influenciam nesse evento de sobretensão, são características do sistema, como equipamentos, topologia da rede, potência de curto-circuito do sistema alimentador, dispersão entre os contatos do disjuntor, entre outros (D'AJUZ, 1987).

2.1.2 Sobretensões Atmosféricas

Sobretensões atmosféricas é o nome dado para incidência de descargas elétricas atmosféricas em um sistema. Esse fenômeno pode ocorrer de maneira direta, quando ocorre uma descarga elétrica diretamente em equipamentos, como linhas de transmissão, transformadores e

outros e também pode ser de maneira indireta, através de indução (SANT'ANA, 2011). Além do danos térmicos que pode ser causado por descargas atmosféricas, gerando incêndios e danificações de equipamentos, outra consequência que também é atrelado a esse fenômeno são as interferências magnéticas, que essa pode gerar mau funcionamento ou perda total em sistemas de monitoramento, comunicação e controle (JITSUKAWA, 2010).

2.1.3 Sobretensões Temporárias

Sobretensões temporárias é uma sobretensão que se origina de curtos-circuitos trifásicos, rejeição de cargas, efeito Ferranti e fenômenos não lineares como ferro-ressonância (D'AJUZ, 1987). Suas características tem como principais longa duração, e com picos e amplitude reduzidos, normalmente inferiores a 1,5 p.u. Devido essa sobretensão persistir no sistema enquanto a sua causa não for eliminada, seu estudo é importante para projetar instalações e equipamentos que suportem o tempo necessário (JITSUKAWA, 2010).

2.1.4 Impactos de Sobretensões na Indústria

Os valores alcançados em quando ocorrem sobretensões de origem de descargas atmosféricas, podem causar queda na qualidade do fornecimento, ou até interrupção. Quando atingida diretamente uma instalação podem ocorrer danos térmicos e até incêndios (JITSUKAWA, 2010).

Já sobretensões internas tem mais impacto em equipamentos de informática e eletrônicos. Com a evolução da tecnologia, esses equipamentos estão cada vez mais presente em processos industriais (equipamentos de controle, comunicação, monitoramento e muitos outros).

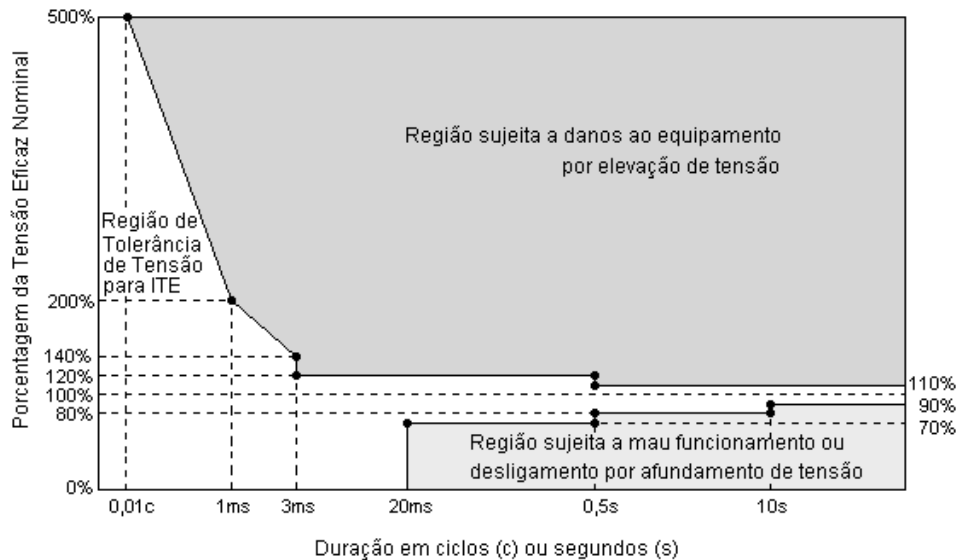
Devido estes equipamentos serem mais sensíveis a variações de tensão e corrente, seu estudo é de extrema importância para escolha de equipamentos de proteções adequados para evitar prejuízos com manutenções e parada na produção (MENEZES, 2007). Os danos através de sobretensões internas podem surgir na forma de:

- ❑ Alteração no controle de torque e/ou velocidade de motores de indução, diminuindo a qualidade da produção industrial;
- ❑ Danos aos Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), podendo acarretar parada em processos industriais;
- ❑ Falhas em pontes controladores, afetando os disparos de Tiristores, devido a problemas de comutação;
- ❑ Perda de componentes de proteção, como fusíveis;
- ❑ Falhas em contadores e relés auxiliares, podendo causar parada na produção.

Visando uma padronização de limites de suportabilidade em questões de sobretensões, para equipamentos na área de informática, foi criada a curva CBEMA/ITIC ou *Information Technology Industry Council* (ITIC) , Figura 6, que apresenta uma referência para fatores de

vulnerabilidade à sobretensões em intervalos de tempo, onde é demonstrado, tensões muito superiores podem acarretar danos a equipamento e tensões abaixo do regime de trabalho, que podem acarretar mal funcionamento dos mesmos.

Figura 6 – Curva ITIC para sub e sobretensão.



Fonte: adaptado de (IEEE..., 1996).

2.2 Crise Amapá

No dia 3 de Novembro de 2020, ocorreu incêndio na subestação Macapá, causado por uma forte chuva e raios. Esse acidente gerou a maior crise de energia da história no Estado do Amapá (LUIS; PORTO, 2021).

Os impactos causados pela falta de energia afetam não só o conforto, mas também, diversos outros setores são atingidos, demonstrando o quão é vital a eletricidade na vida moderna. Cerca de 90% da população do Amapá, sofreu com a perda de energia durante 21 dias, em plena crise sanitária acarretada pela pandemia Covid-19, sendo apresentadas a seguir algumas dessas dificuldades vivenciadas pelo povo amapaense (LUIS; PORTO, 2021).

- ❑ Crise de água: O primeiro impacto causado foi a falta de sistema de abastecimento de água. Sem energia, as bombas de captação de água pararam o serviço e assim deixando além da falta de energia, o problema de crise hídrica.
- ❑ Lotação Comércio e Escasses de produtos: Com o agravamento da falta de energia e água, o comércio recebeu uma alta demanda de pessoas buscando bens como água, gelo para conservação, sistemas de iluminação portáteis (velas, lanternas) além de pilhas e baterias. Além da dificuldade enfrentada com a diminuição de produtos que não possuíam estoque para essa situação, ainda os habitantes de 16 municípios ainda se aglomeravam em plena pandemia, acarretando ainda mais a situação caótica.

- ❑ Dificuldade Monetária: Com a falta de energia, máquinas de cartão e caixas eletrônicos que depende do serviço não funcionaram, dificultando ainda mais o comércio seja para o lojistas ou para o consumidor, gerando filas em bancos para obter dinheiro em espécie.
- ❑ Desabastecimento de Combustível: Outro serviço que foi afetado diretamente foram os postos de gasolinas, sendo apenas os que possuíam gerador conseguiram prestar serviço, gerando filas quilométricas de carros.
- ❑ Crise no Comércio: Após coletado informações sobre os impactos da crise energética entre os dias 13 a 22 de Novembro de 167 empresas, foi notado grande prejuízo para os comerciantes. Alguns desses fatores foram perda de produtos perecíveis, diminuição da clientela, equipamentos eletro/eletrônicos danificados e entre outros. Foi notado que 53% dos comerciantes precisariam solicitar crédito para manter o negócio em funcionamento.

Poderiam ser citados diversas outras consequências, como problemas na segurança pública, complicações no período eleitoral, dificuldades hospitalares, mas apenas alguns pontos citados já mostra como um problema na distribuição e transmissão de energia pode acarretar inúmeros problemas para a vida de uma nação.

2.3 Chaveamento Controlado e Ponto Ótimo

Como apresentado nos tópicos anteriores, sobretensão geradas podem acarretar danos à equipamentos elétricos e eletrônicos e a própria linha em si.

Uma forma de reduzir os impactos de sobretensões de manobras no sistema, é utilizando uma técnica de chaveamento controlado. Baseia-se em buscar um tempo ótimo de fechamento dos contatos, programados, onde a onda de cada fase se encontra em valores de magnitude próximos de zero, diminuindo assim consideravelmente os picos de sobretensão (DANTAS,2007).

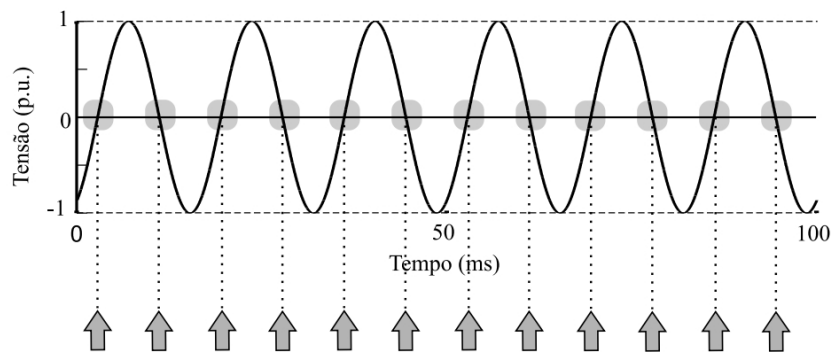
Segundo (SOARES, 2017), “para satisfazer esta condição, pode-se utilizar duas possibilidades de fechamento do disjuntor”:

- (a) “Fechar as três fases simultaneamente, quando a tensão de apenas umas das fases é zero”;
- (b) “Fechar as três fases consecutivamente, quando a tensão em cada uma delas for zero.”

A Figura 7 apresenta um exemplo dos tempos ótimos, representados por setas, em uma onda senoidal, para um fechamento de uma chave controladora.

O conceito de chaveamento controlado é útil para caracterizar como um sistema de transmissão se comporta ao ser energizado.

Figura 7 – Exemplo de tempo ótimo para fechamento da chave Controladora



Fonte:

2.4 ATPDraw e Simulações de Energização

O programa que utilizaremos na pesquisa para caracterizar subtransitórios de energização, será o ATP.

Atualmente o programa contém a interface gráfica ATPDraw, que permite o usuário fazer modelagens de SEP sem necessitar o conhecimento de programação, facilitando e gerando maior agilidade. Além disso, o programa possui uma biblioteca vasta de componentes de uma rede elétrica, pré definidos, que gera uma maior facilidade para a montagem de sistemas. Cada um dos componentes já possui setups pré montados, tornando mais fácil a utilização (FONSECA, HUGO L. C. A. ; FERNANDES, 2003).

Nesta pesquisa o ATPDraw será utilizado com o intuito de caracterizar a distribuição de frequência da tensão quando ocorrem manobras de energização. Ao ser simulado o chaveamento nas LT de 69KV, o programa gera um arquivo texto (.txt) com os valores de pico de sobretensão em p.u e a frequência que ocorreram, como é demonstrado na Figura 8.

2.5 Comentários Finais

O capítulo apresentou o conceito e tipos de sobretensões, os impactos que as sobretensões podem causar tanto na indústria, quanto na vida de uma Estado, sendo assim demonstrando o quanto é importante o estudo de sobretensões para os projetos de LT.

Figura 8 – Exemplo de simulação de Energização de uma Linha de 5km.

```

4 ) -----
SUMMARY SUMMARY SUMMARY SUMMARY SUMMARY SUMMARY SUMMARY SUMMARY SUMMARY SUMMARY SUMMARY SUMMARY
4 ) -----
The following is a distribution of peak overvoltages among all output nodes of the last data card that have the same base voltage.
This distribution is for the maximum of the peaks at all output nodes with V-base = 5.91551770E+04
Interval      voltage      voltage in      Frequency      Cumulative      Per cent
number        in per unit  physical units (density)      frequency      .GE. current value
-----
21      1.0500000    6.21129359E+04      0      0      100.000000
22      1.1000000    6.50706947E+04      1      1      99.900000
23      1.1500000    6.80284536E+04      0      1      99.900000
24      1.2000000    7.09862124E+04      1      2      99.800000
25      1.2500000    7.39439713E+04      1      3      99.700000
26      1.3000000    7.69017301E+04      1      4      99.600000
27      1.3500000    7.98594890E+04      5      9      99.100000
28      1.4000000    8.28172478E+04      7      16     98.400000
29      1.4500000    8.57750067E+04      6      22     97.800000
30      1.5000000    8.87327655E+04     12      34     96.600000
31      1.5500000    9.16905244E+04     12      46     95.400000
32      1.6000000    9.46482832E+04     20      66     93.400000
33      1.6500000    9.76060421E+04     28      94     90.600000
34      1.7000000    1.00563801E+05     25     119     88.100000
35      1.7500000    1.03521560E+05     28     147     85.300000
36      1.8000000    1.06479319E+05     32     179     82.100000
37      1.8500000    1.09437077E+05     45     224     77.600000
38      1.9000000    1.12394836E+05     66     290     71.000000
39      1.9500000    1.15352595E+05    134     424     57.600000
40      2.0000000    1.18310354E+05    198     622     37.800000
41      2.0500000    1.21268113E+05    130     752     24.800000
42      2.1000000    1.24225872E+05    109     861     13.900000
43      2.1500000    1.27183631E+05     62     923     7.700000
44      2.2000000    1.30141389E+05     29     952     4.800000
45      2.2500000    1.33099148E+05     23     975     2.500000
46      2.3000000    1.36056907E+05     13     988     1.200000
47      2.3500000    1.39014666E+05      5     993     .700000
48      2.4000000    1.41972425E+05      2     995     .500000
49      2.4500000    1.44930184E+05      2     997     .300000
50      2.5000000    1.47887943E+05      2     999     .100000
51      2.5500000    1.50845701E+05      1    1000     .000000
Summary of preceding table follows:      Grouped data      Ungrouped data
      Mean = 1.93810000E+00      1.93791180E+00
      Variance = 3.56890791E-02      3.54464226E-02
      Standard deviation = 1.88915534E-01      1.88272203E-01
    
```

Fonte: O autor.

Metodologia, Resultados e Discussões

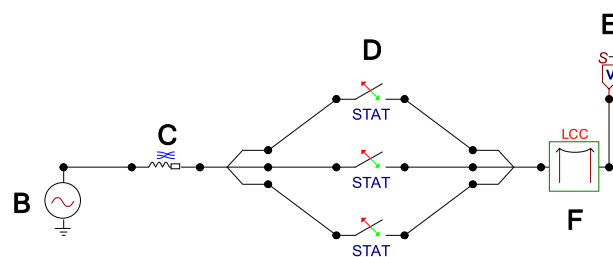
Neste capítulo são apresentadas as informações e considerações necessárias para a elaboração de um modelo parametrizável capaz de caracterizar as sobretensões de energização em uma linha de transmissão aérea em corrente alternada operando na tensão de 69 kV. São apresentados, ainda, os resultados daquelas simulações e suas discussões preliminares.

3.1 Sistema Simulado

O modelo base a ser configurado foi feito conforme a Figura 9, onde foi implementado o modelo de fonte de tensão senoidal ACSOURCE, Figura 10; O equivalente de Thévenin do SEP ao qual a LT está conectada, LINESY_3, Figura 11; a chave estatística SW_STAT, Figura 12, simulando o comportamento dos contatos principais do disjuntor; A medição das tensões no final da linha pela *Open Probe*; A representação da LT através da rotina LCC (Figura 14 e Figura 15). Para facilitar a reprodução das simulações por terceiros, o modelo apresentará as telas para configuração do ATP.

Para o modelo de estudo apresentado foram variados o comprimento da LT, o equivalente de curto-circuito no ponto de conexão da LT, a resistividade do solo a fim de caracterizar as sobretensões de energização em diversos cenários. Foram realizadas um total de 1000 simulações por caso, para obter dados estatísticos sólidos para a análise de cada situação. O número de simulações foi estipulado através do artigo (Mestas; Tavares, 2014). Também foram apresentados os detalhes das configurações utilizadas para o *software* ATP.

Figura 9 – Modelo para Simulações ATP.

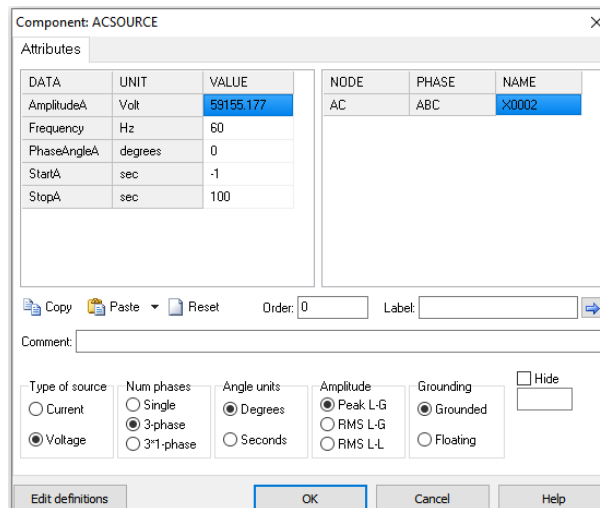


Fonte: O Autor

3.1.1 Fonte de Tensão

Conforme os Procedimentos de Rede–Submódulo 23.3 – Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos do ONS (ONS, 2017), os limites de tensão a serem observados nos estudos elétricos para a condição operativa normal e para condição operativa de emergência para redes menores de 230 KV o valor a ser considerado em condições operativas normais é de 0,95 a 1,05 p.u, onde nesse caso foi utilizado 1,05 p.u por ser o limite de operação de uma LT de 69KV.

Figura 10 – B - Configuração ACSource.

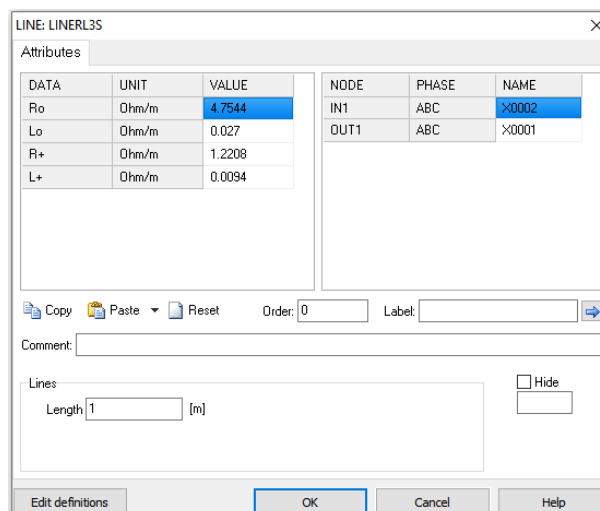


Fonte: O Autor

3.1.2 Equivalente do SEP

Os valores de impedância de sequencia positiva e zero são provenientes do artigo (SANTOSO; PATEL, 2014), conforme a Figura 11, e representam o equivalente do SEP reduzido ao qual a LT está conectada.

Figura 11 – C - Equivalente de curto-circuito do SEP (LINESY_3).

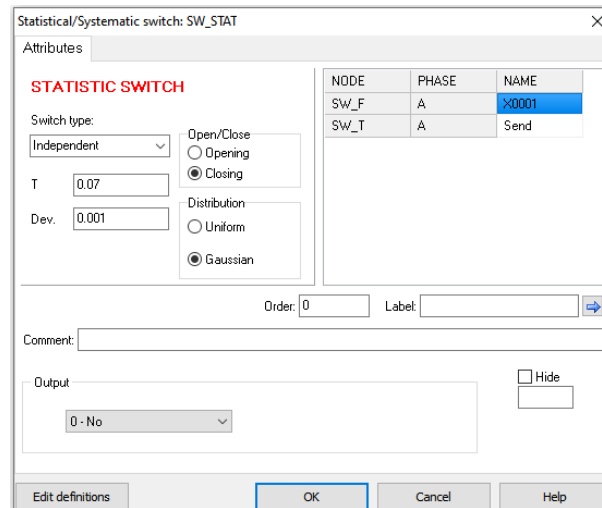


Fonte: O Autor.

3.1.3 Simulação dos Contatos Principais do Disjuntor

Os contatos principais do disjuntor foram simulados, Figura 12, pelo uso de uma chave estatística, com distribuição gaussiana e tempo de fechamento igual a 70 ms e tempo de dispersão dos contatos variando de 1 ms a 4 ms, conforme (Mestas; Tavares, 2014; IEEE..., 2019).

Figura 12 – D - Configuração da chave estatística (SW_STAT).



Fonte: O Autor

3.1.4 Configuração da Linha de Transmissão

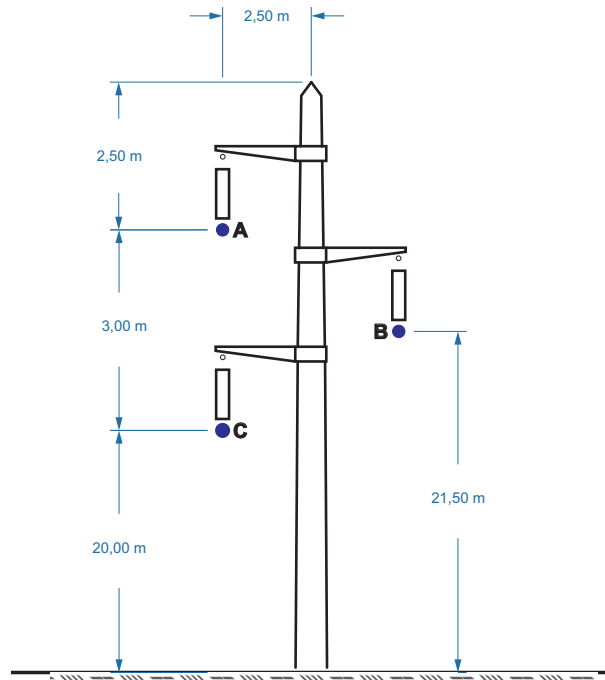
A linha de transmissão utilizada neste trabalho possui a geometria apresentada na Figura 13, os parâmetros da torre foram baseados no modelo apresentado em (??) a sendo realizada, portanto, em uma estrutura em poste de concreto, com circuito simples e disposição triangular assimétrica dos condutores. Possui um condutor por fase do tipo Condutor de Alumínio com Alma de Aço (CAA) Ibis, 397,5 MCM, formação 26/7. O cabo guarda é do tipo CAA Penguin, 4/0 MCM, formação 6/1.

A Figura 14 e Figura 15 apresenta a entrada dos parâmetros da LT na rotina *line constants* do ATP e a configuração do modelo JMarti, devido essa rotina ser dependente da

3.2 Resultados para Variações no Comprimento da LT

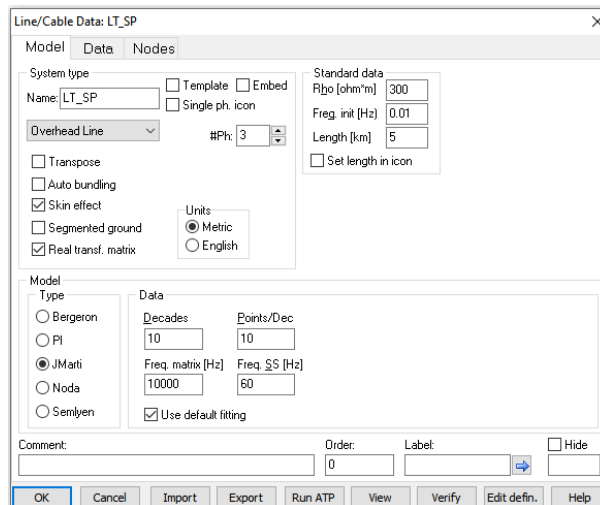
Nesta seção se apresentam os resultados das simulações de energização da LT considerando a execução de 1000 simulações. Foram mantidos constantes os valores da fonte de tensão, equivalente de Thévenin, tempo de fechamento e dispersão dos contatos do disjuntor e resistividade do solo e o terminal de carga aberto. Variou-se, apenas, o comprimento da LT em 5 km, 30 km e 92 km, valores esses escolhidos por serem representativos de LTs em 69kV. Os resultados foram apresentados em forma de histograma de ocorrência das sobretensões e

Figura 13 – Geometria da Linha de Transmissão.



Fonte: O Autor

Figura 14 – F1 - Configuração LT_SP tela Model .



Fonte: O Autor

Figura 15 – F2 - Configuração LT_SP tela Data.

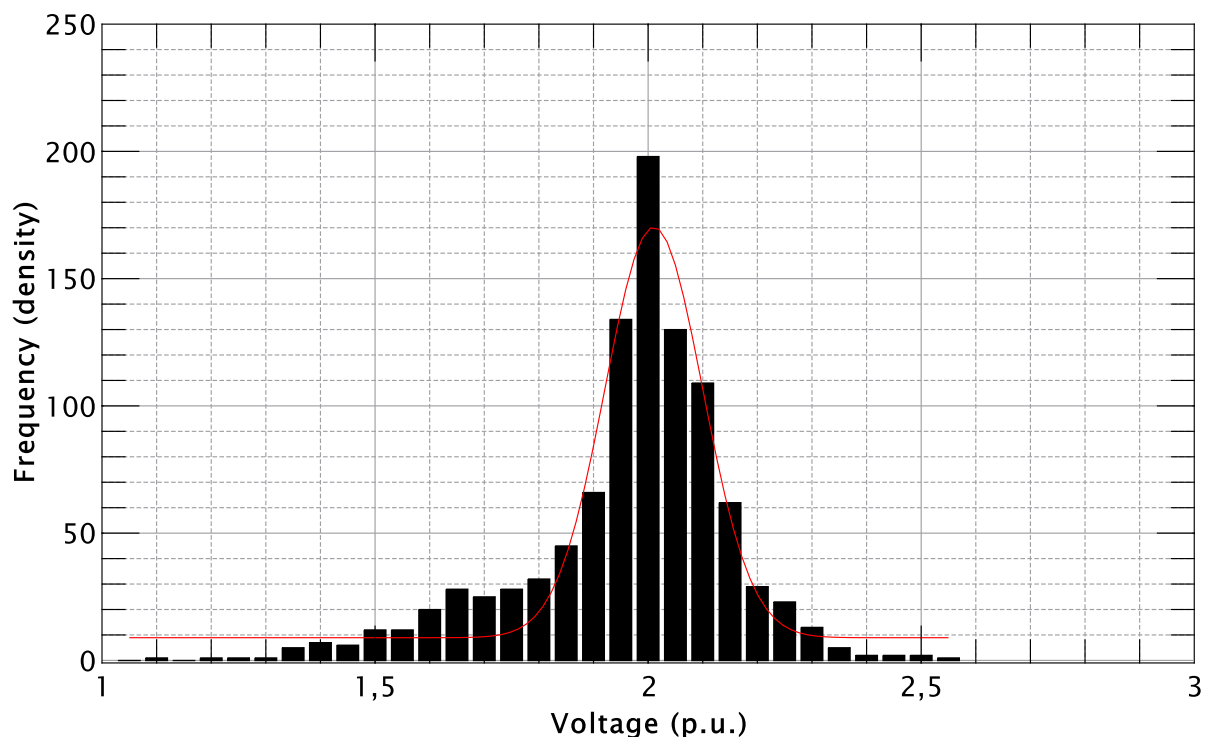
#	Ph.no	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0.366	0.994	0.1752	2.5	23	11.98
2	2	0.366	0.994	0.1752	-2.5	21.5	10.48
3	3	0.366	0.994	0.1752	2.5	20	8.5
4	0	0.2385	0.7155	0.2667	0	25.5	14.48

Fonte: O Autor

de probabilidade acumulada de ocorrência dessas, conforme a Figura 16, Figura 17, Figura 18, Figura 19, Figura 24 e Figura 25.

A Figura 16 contém a distribuição de frequência das sobretensões, para LT com 5 km, e a curva de distribuição gaussiana, $R^2 = 0,9449$, dos mesmos dados. Usando o *software* Qtiplot foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk para um intervalo de significância de 0,05, obtendo-se $w = 0,95727$ e $p = 0,24681$. Observa-se que a maioria dos valores de sobretensão está contida no intervalo de 1,95 p.u. a 2,1 p.u.

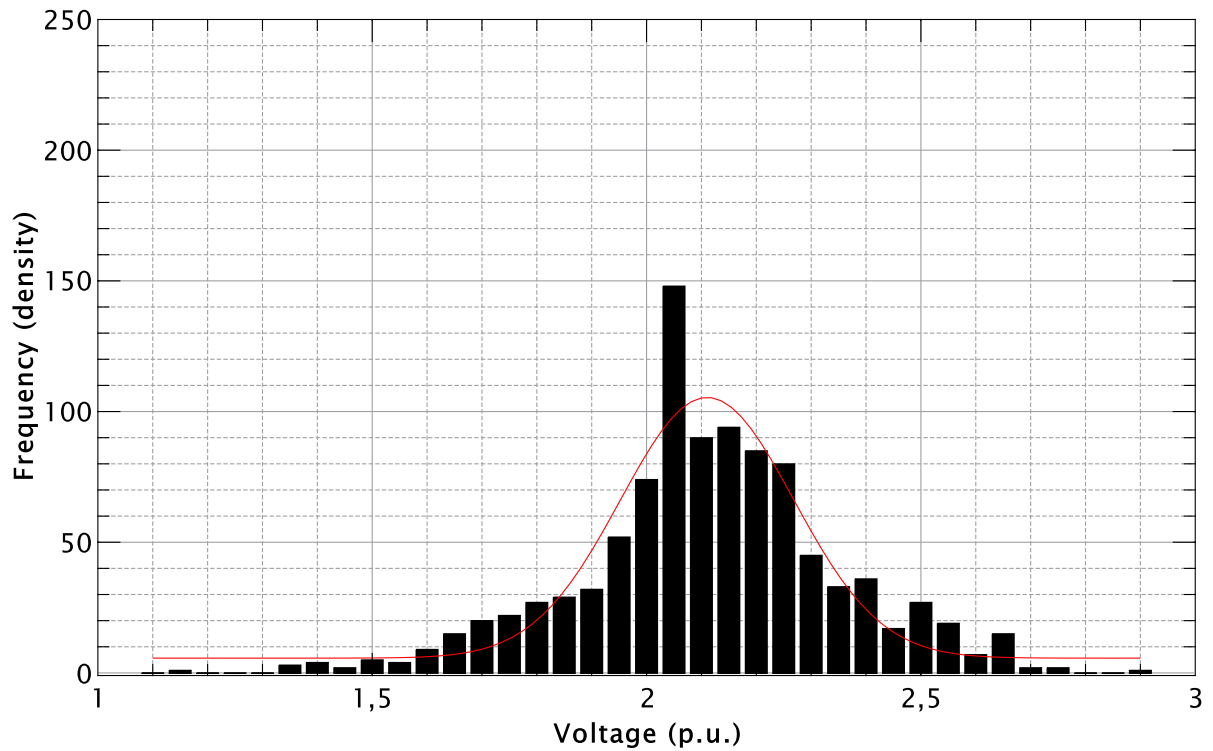
Figura 16 – Distribuição de Sobretensões para LT com 5km.



Fonte: O Autor

A Figura 17 contém a distribuição de frequência das sobretensões, para LT com 30 km, e a curva de distribuição gaussiana, $R^2 = 0,8927$, dos mesmos dados. Usando o *software* Qtiplot foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk para um intervalo de significância de 0,05, obtendo-se $w = 0,95649$ e $p = 0,15615$. Observa-se que a maioria dos valores de sobretensão está contida no intervalo de 2,0 p.u. a 2,25 p.u.

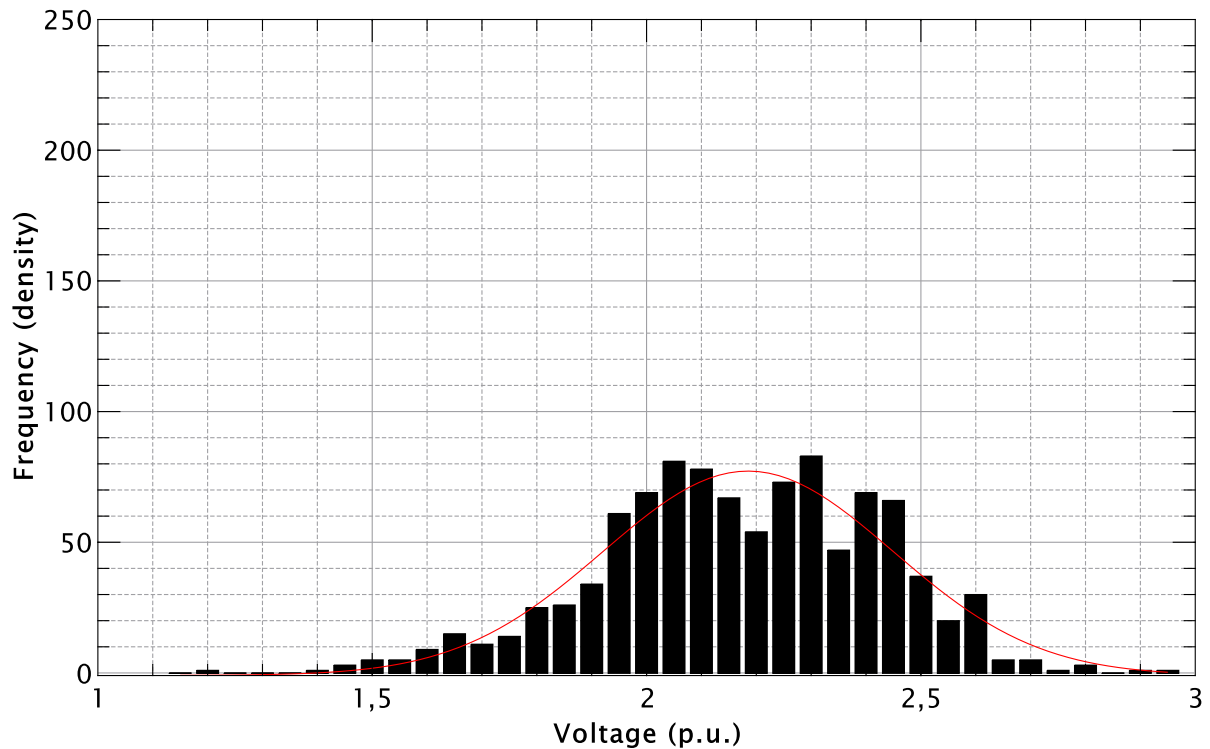
Figura 17 – Distribuição de Sobretensões para LT com 30km.



Fonte: O Autor

A Figura 18 contém a distribuição de frequência das sobretensões, para LT com 92 km, e a curva de distribuição gaussiana, $R^2 = 0,9162$, dos mesmos dados. Usando o *software* Qtiplot foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk para um intervalo de significância de 0,05, obtendo-se $w = 0,95649$ e $p = 0,15615$. Observa-se que a maioria dos valores de sobretensão está contida no intervalo de 2,05 p.u. a 2,45 p.u.

Figura 18 – Distribuição de Sobretensões para LT com 92km.



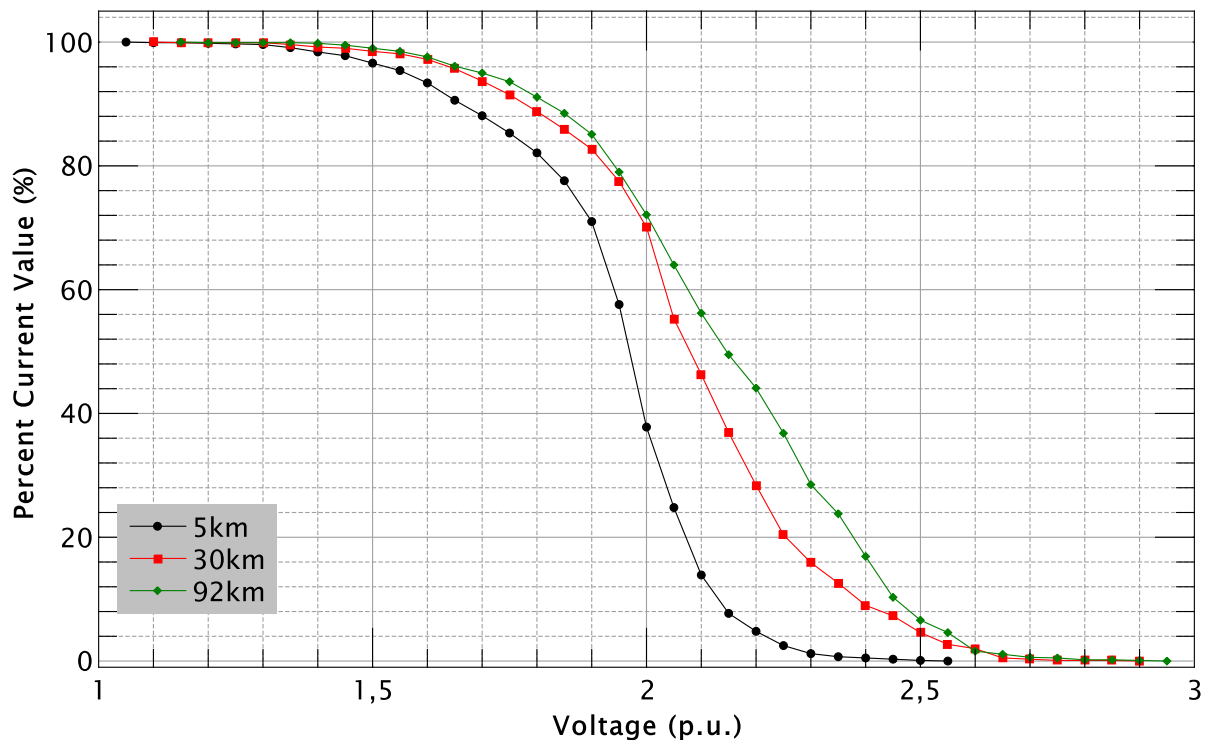
Fonte: O Autor

A fim de comparar os três cenários delineados foram traçadas as distribuições de probabilidade acumulada para os comprimentos da LT evidenciados, conforme a Figura 19. O intervalo de análise, no qual se observam mudanças relevantes nos valores de sobretensão, vai de 1,6 a 2,55 p.u. Nesse é possível inferir que o aumento no comprimento da LT, mantidos os demais parâmetros do modelo constantes, implica no aumento da probabilidade de ocorrência de certos valores de sobretensão. Tomando, por exemplo, o valor de 2,1 p.u., vê-se que a sua probabilidade de ocorrência passa de 14,35% para 47% e, por fim, 56,5%.

3.3 Resultados para Variações na Resistividade do Solo e Comprimento da LT

Nesta seção se apresentam os resultados das simulações de energização da LT considerando a execução de 1000 simulações. Foram mantidos constantes os valores da fonte de tensão, equivalente de Thévenin, tempo de fechamento e dispersão dos contatos do disjuntor e o terminal de carga aberto. Variam-se o comprimento da LT em 5 km, 30 km e 92 km, valores esses escolhidos por serem representativos de LTs em 69kV, e a resistividade do solo em $300\Omega.m$ e

Figura 19 – Comparação da Probabilidade Acumulada de Ocorrência das Sobretensões.



Fonte: O Autor

2500 $\Omega \cdot m$. Os resultados foram apresentados em forma de histograma de ocorrência das sobretensões e de probabilidade acumulada de ocorrência dessas, conforme a Figura 20, Figura 21, Figura 22 e Figura 23.

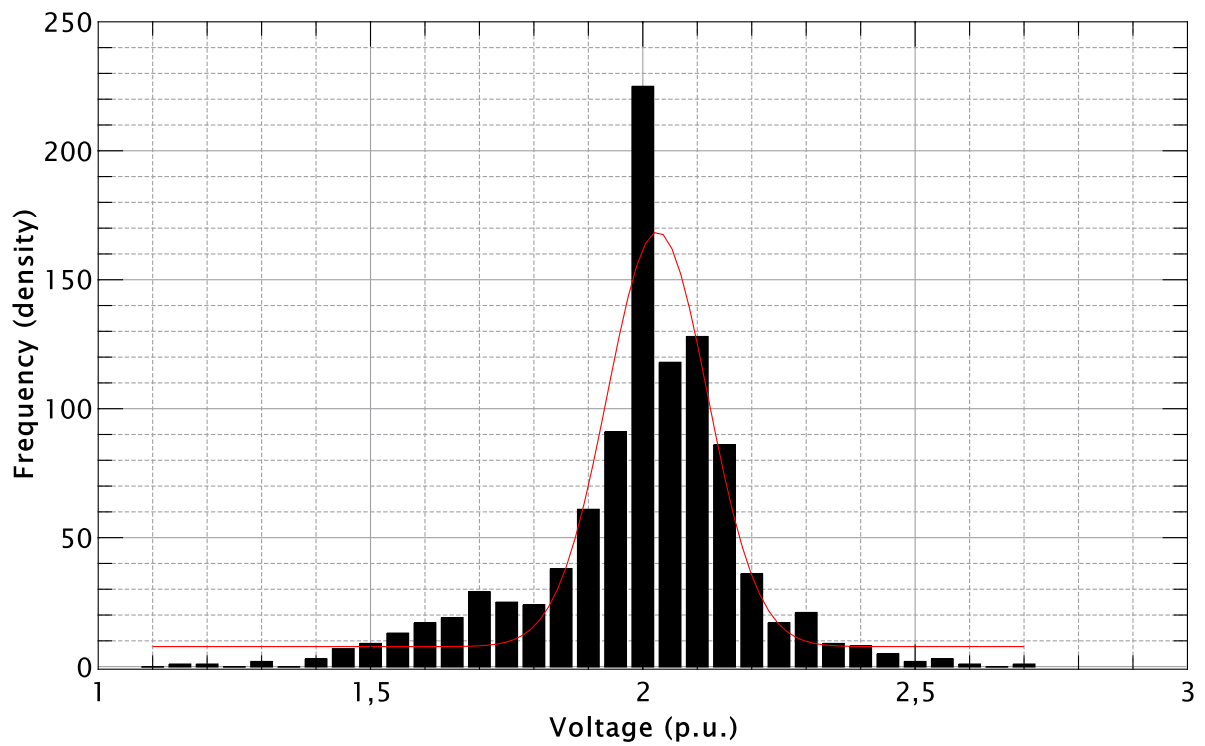
A Figura 20 contém a distribuição de frequência das sobretensões, para LT com 5 km e $\rho=2500 \Omega \cdot m$, e a curva de distribuição gaussiana, $R^2 = 0,8838$, dos mesmos dados. Usando o *software* Qtiplot foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk para um intervalo de significância de 0,05, obtendo-se $w = 0,95697$ e $p = 0,21197$. Observa-se que a maioria dos valores de sobretensão está contida no intervalo de 1,95 p.u. a 2,15 p.u.

A Figura 21 contém a distribuição de frequência das sobretensões, para LT com 30 km e $\rho=2500 \Omega \cdot m$, e a curva de distribuição gaussiana, $R^2 = 0,9422$, dos mesmos dados. Usando o *software* Qtiplot foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk para um intervalo de significância de 0,05, obtendo-se $w = 0,95639$ e $p = 0,14465$. Observa-se que a maioria dos valores de sobretensão está contida no intervalo de 2,0 p.u. a 2,3 p.u.

A Figura 22 contém a distribuição de frequência das sobretensões, para LT com 92 km e $\rho=2500 \Omega \cdot m$, e a curva de distribuição gaussiana, $R^2 = 0,9073$, dos mesmos dados. Usando o *software* Qtiplot foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk para um intervalo de significância de 0,05, obtendo-se $w = 0,9561$ e $p = 0,11500$. Observa-se que a maioria dos valores de sobretensão está contida no intervalo de 2,05 p.u. a 2,45 p.u.

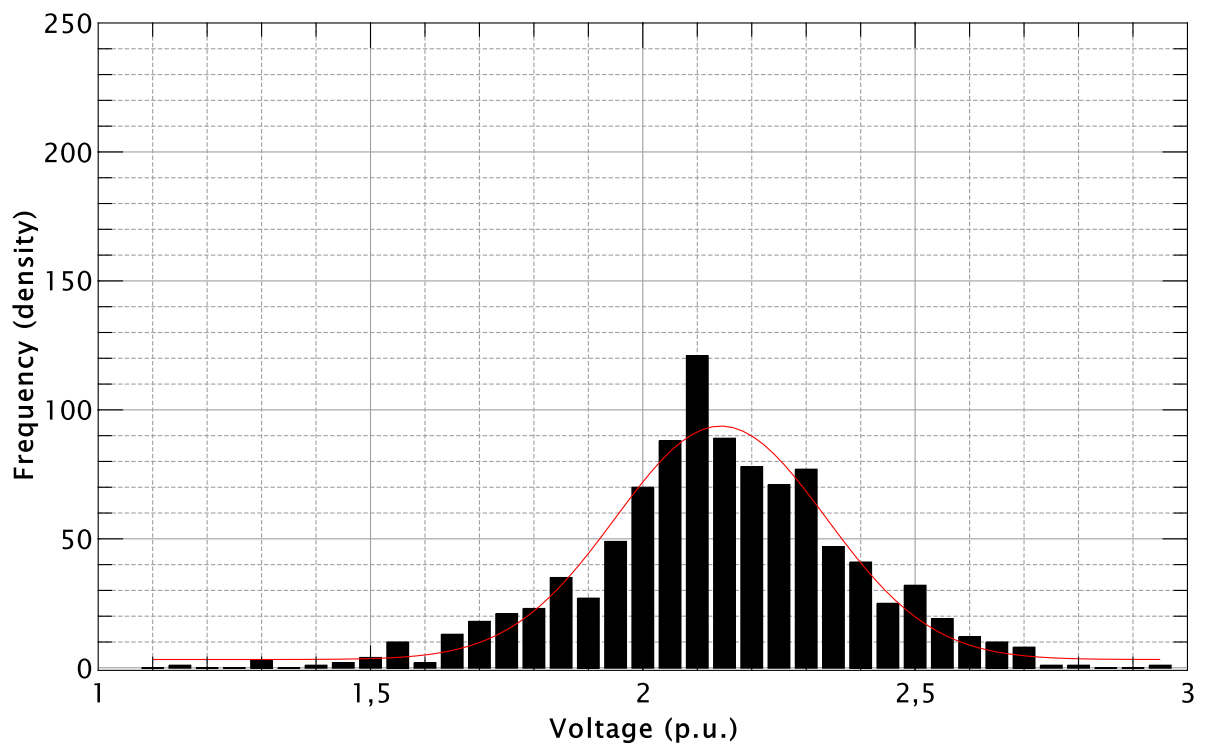
A fim de analisar a influência da resistividade do solo sobre os valores de sobretensão foi traçada a distribuição de probabilidade acumulada para cada comprimento da LT e resistividade

Figura 20 – Distribuição de Sobretensões para LT com 5km e $\rho=2500 \Omega \cdot m$

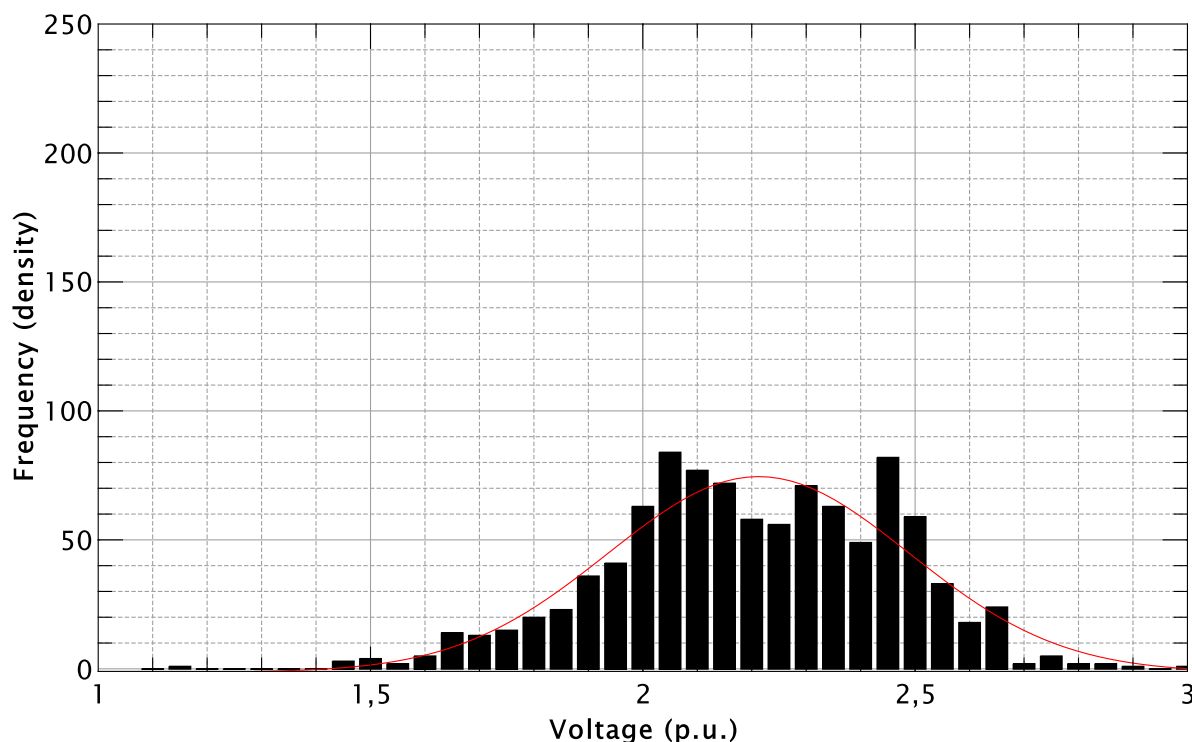


Fonte: O Autor

Figura 21 – Distribuição de Sobretensões para LT com 30km e $\rho=2500 \Omega \cdot m$



Fonte: O Autor

Figura 22 – Distribuição de Sobretensões para LT com 92km e $\rho=2500 \Omega \cdot m$ 

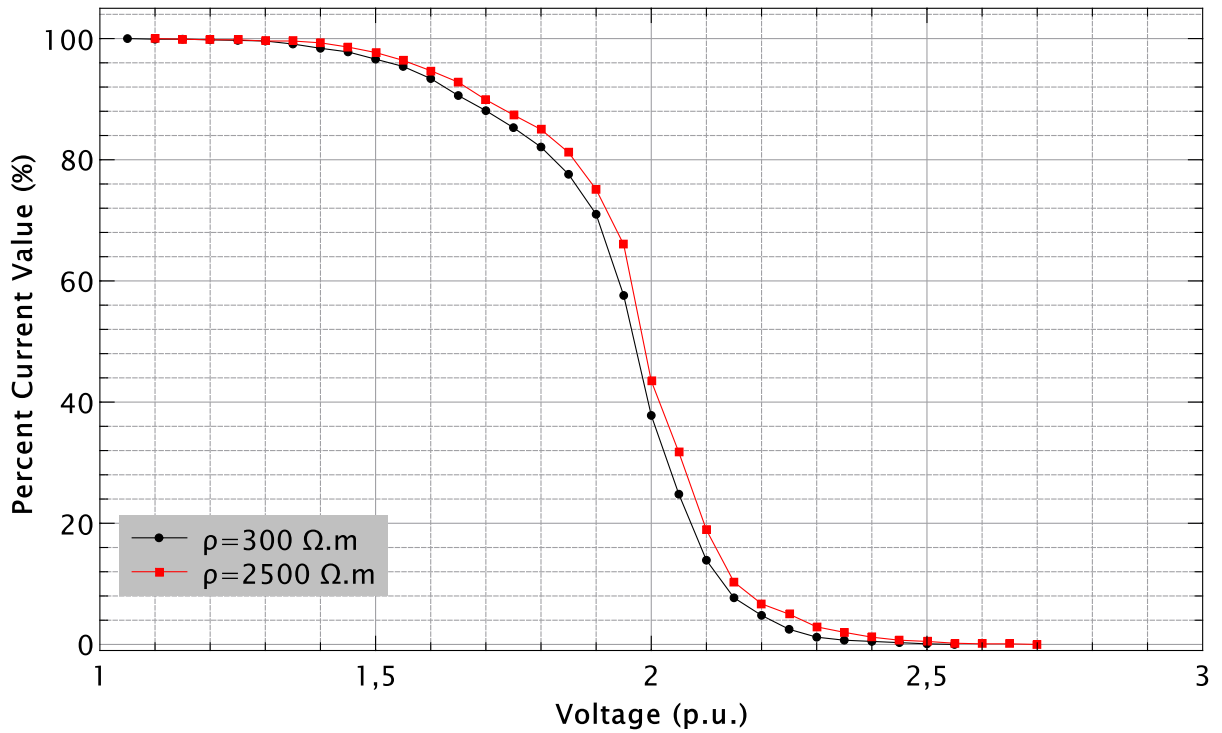
Fonte: O Autor

do solo evidenciados, conforme a Figura 23. O intervalo de análise, no qual se observam mudanças relevantes nos valores de sobretensão, vai de 1,85 a 2,10 p.u. Nesse é possível inferir que o aumento resistividade do solo, mantidos os demais parâmetros do modelo constantes, implica no aumento da probabilidade de ocorrência de certos valores de sobretensão. Tomando, por exemplo, o valor de 2,1 p.u., vê-se que a sua probabilidade de ocorrência passa de 14,06% para 19,08% .

A fim de analisar a influência da resistividade do solo sobre os valores de sobretensão foi traçada a distribuição de probabilidade acumulada para cada comprimento da LT e resistividade do solo evidenciados, conforme a Figura 24. O intervalo de análise, no qual se observam mudanças relevantes nos valores de sobretensão, vai de 2,05 a 2,4 p.u. Nesse é possível inferir que o aumento resistividade do solo, mantidos os demais parâmetros do modelo constantes, implica no aumento da probabilidade de ocorrência de certos valores de sobretensão. Tomando, por exemplo, o valor de 2,1 p.u., vê-se que a sua probabilidade de ocorrência passa de 46,03% para 51,34% .

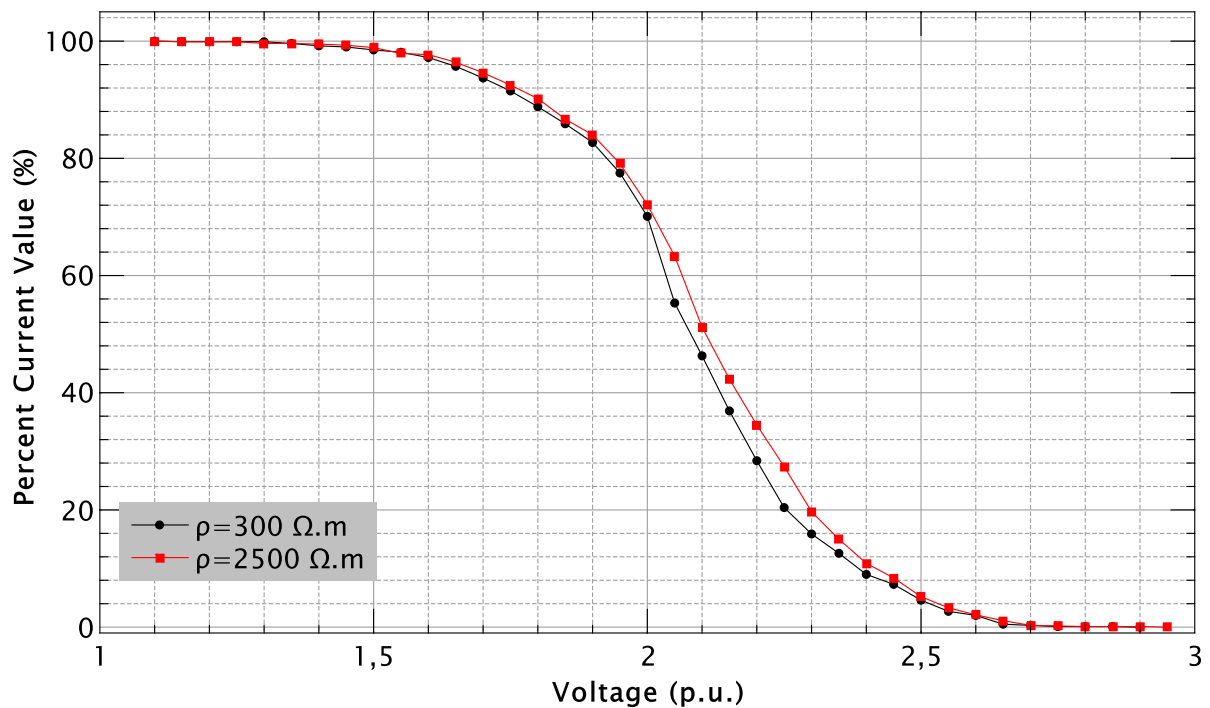
A fim de analisar a influência da resistividade do solo sobre os valores de sobretensão foi traçada a distribuição de probabilidade acumulada para cada comprimento da LT e resistividade do solo evidenciados, conforme a Figura 25. O intervalo de análise, no qual se observam mudanças relevantes nos valores de sobretensão, vai de 1,95 a 2,6 p.u. Nesse é possível inferir que o aumento resistividade do solo, mantidos os demais parâmetros do modelo constantes, implica no aumento da probabilidade de ocorrência de certos valores de sobretensão. Tomando, por exemplo, o valor de 2,1 p.u., vê-se que a sua probabilidade de ocorrência passa de 56,24% para

Figura 23 – Comparação da Probabilidade Acumulada de Ocorrência das Sobretensões para LT 5km e ρ variável.



Fonte: O Autor

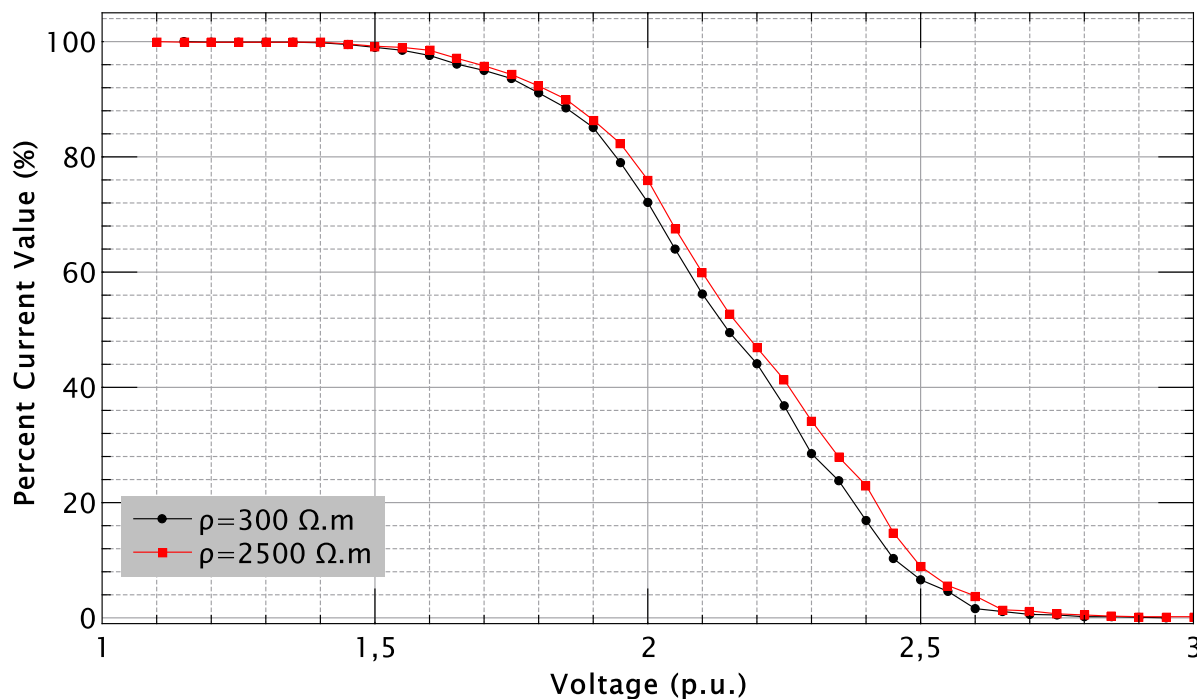
Figura 24 – Comparação da Probabilidade Acumulada de Ocorrência das Sobretensões para LT 30km e ρ variável.



Fonte: O Autor

60,08% .

Figura 25 – Comparação da Probabilidade Acumulada de Ocorrência das Sobretensões para LT 92km e ρ variável.



Fonte: O Autor

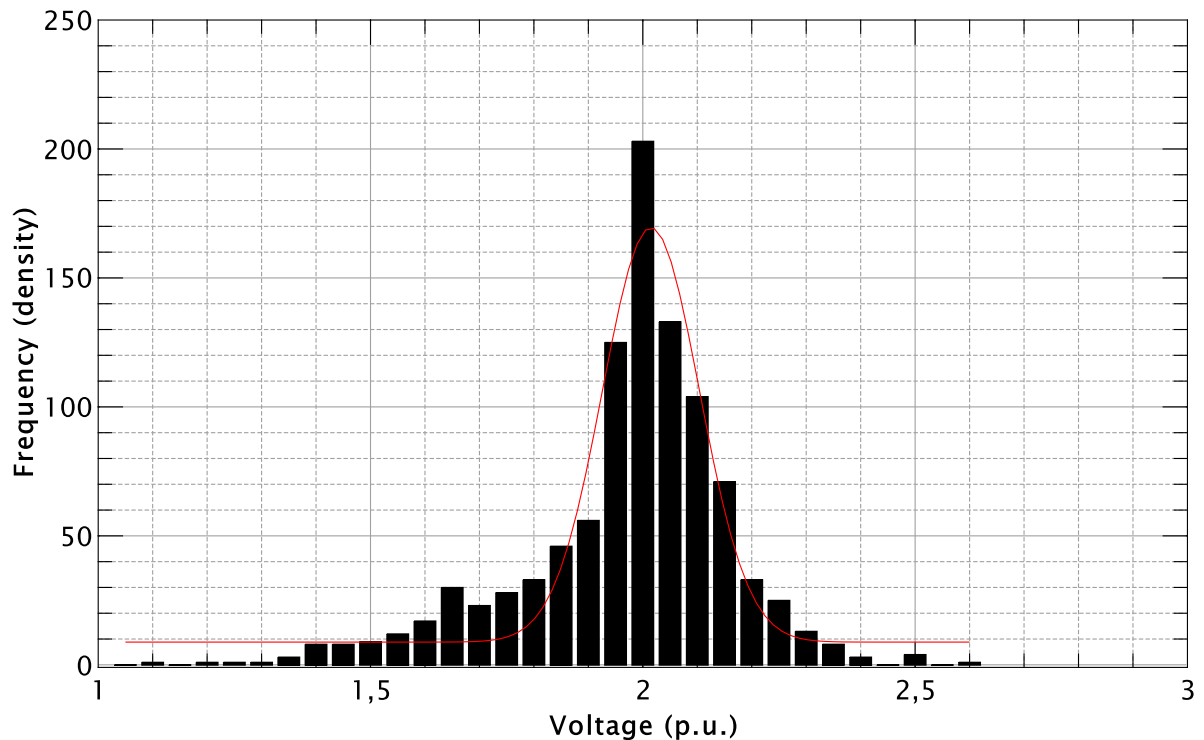
3.4 Resultados para Variações no Equivalente de Curto-Circuito da Subestação e Comprimento da LT

Nesta seção se apresentam os resultados das simulações de energização da LT considerando a execução de 1000 simulações. Foram mantidos constantes os valores da fonte de tensão, tempo de fechamento e dispersão dos contatos do disjuntor, resistividade do solo e o terminal de carga aberto. Variam-se o comprimento da LT em 5 km, 30 km e 92 km, valores esses escolhidos por serem representativos de LTs em 69kV, e o equivalente de Thévenin para os valores de 1,27 GVA e 2,54 GVA proveniente do artigo (SANTOSO; PATEL, 2014). Os resultados foram apresentados em forma de histograma de ocorrência das sobretensões e de probabilidade acumulada de ocorrência dessas, conforme a Figura 26, Figura 27, Figura 28, Figura 29, Figura 30 e Figura 31

A Figura 20 contém a distribuição de frequência das sobretensões para LT com 5 km, equivalente de Thévenin igual a 2,54 GVA e a curva de distribuição gaussiana, $R^2 = 0,9315$, dos mesmos dados. Usando o *software* Qtiplot foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk para um intervalo de significância de 0,05, obtendo-se $w = 0,95712$ e $p = 0,22875$. Observa-se que a maioria dos valores de sobretensão está contida no intervalo de 1,95 p.u. a 2,15 p.u.

A Figura 27 contém a distribuição de frequência das sobretensões, para LT com 30 km, equivalente de Thévenin igual a 2,54 GVA e a curva de distribuição gaussiana, $R^2 = 0,9030$, dos mesmos dados. Usando o *software* Qtiplot foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk

Figura 26 – Distribuição de Sobretensões para LT com 5km e eq. de Thévenin igual a 2,54 GVA.



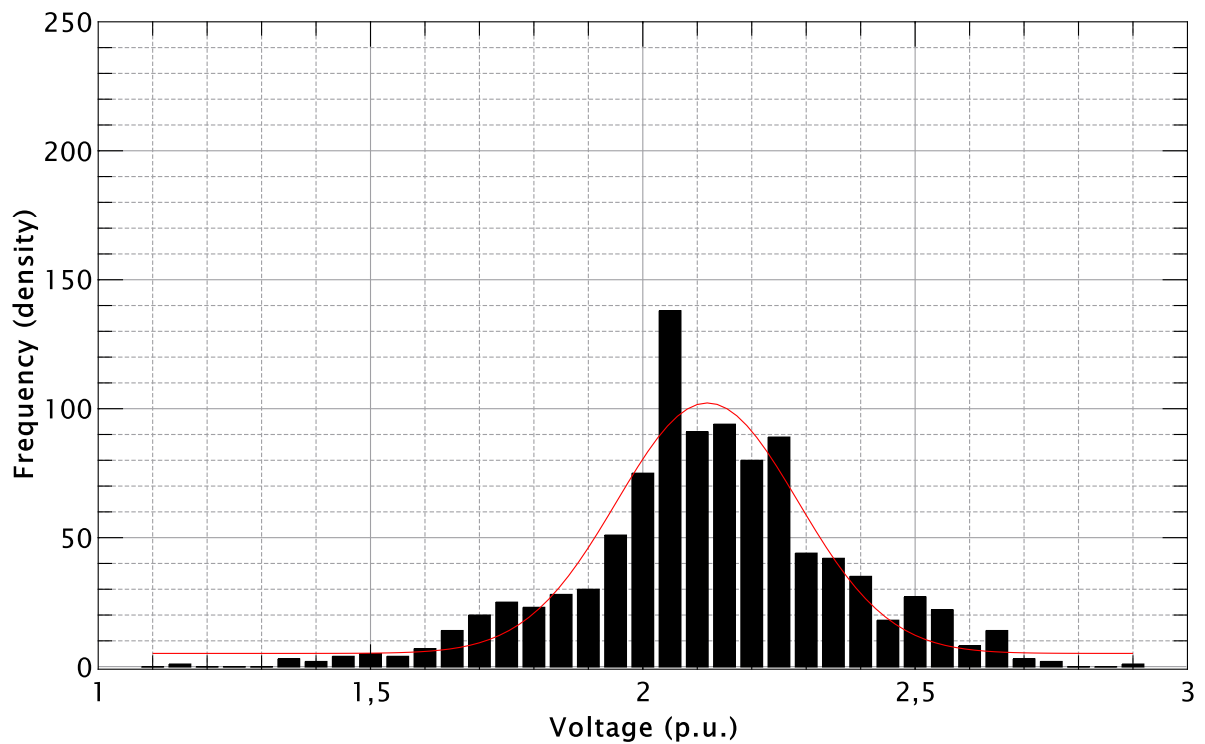
Fonte: O Autor

para um intervalo de significância de 0,05, obtendo-se $w = 0,95649$ e $p = 0,15615$. Observa-se que a maioria dos valores de sobretensão está contida no intervalo de 2,0 p.u. a 2,25 p.u.

A Figura 28 contém a distribuição de frequência das sobretensões, para LT com 92 km, equivalente de Thévenin igual a 2,54 GVA e a curva de distribuição gaussiana, $R^2 = 0,9360$, dos mesmos dados. Usando o *software* Qtiplot foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk para um intervalo de significância de 0,05, obtendo-se $w = 0,95639$ e $p = 0,14465$. Observa-se que a maioria dos valores de sobretensão está contida no intervalo de 2,0 p.u. a 2,30 p.u.

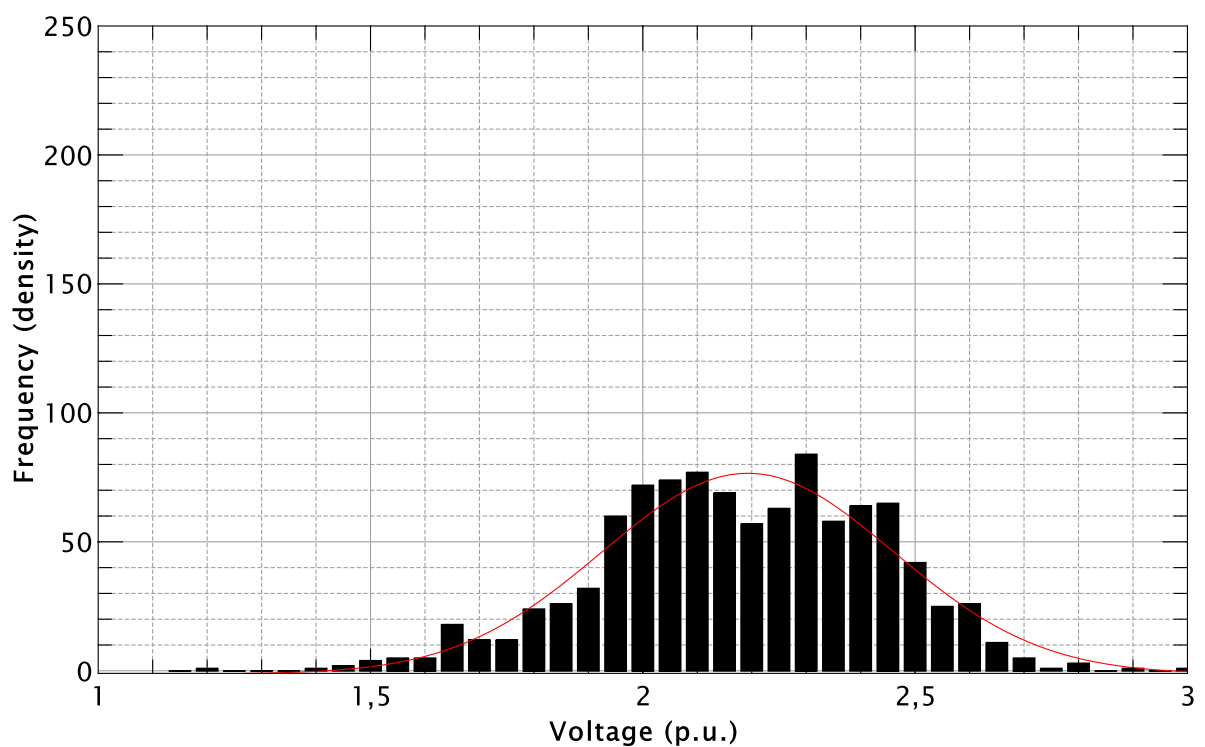
A fim de analisar a influência do valor do equivalente de Thévenin sobre os valores de sobretensão foi traçada a distribuição de probabilidade acumulada para cada comprimento da LT e equivalente de Thévenin evidenciados, conforme a Figura 29. Observa-se que a mudança no equivalente de Thévenin não provocou mudança significativa nas probabilidades acumuladas de sobretensão para a LT de 5km. O mesmo comportamento é observado, conforme a Figura 30 e Figura 31, para as LTs de 30 km e 92 km, respectivamente.

Figura 27 – Distribuição de Sobretensões para LT com 30km e eq. de Thévenin igual a 2,54 GVA.



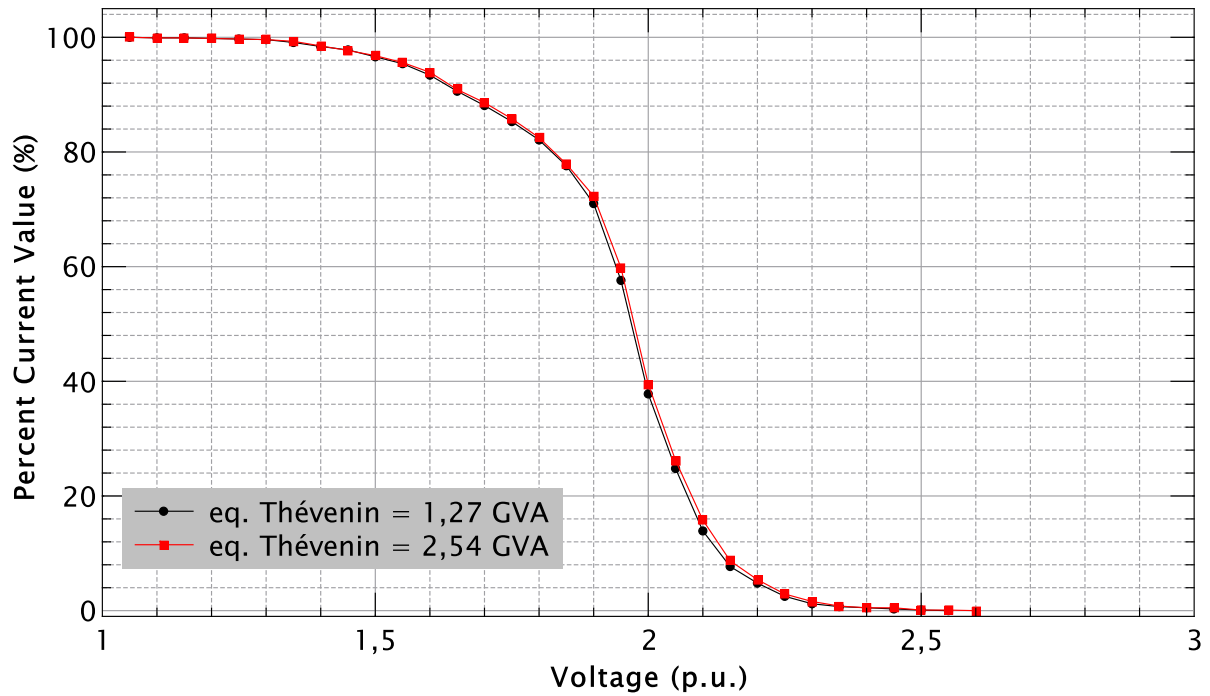
Fonte: O Autor

Figura 28 – Distribuição de Sobretensões para LT com 92km e eq. de Thévenin igual a 2,54 GVA.



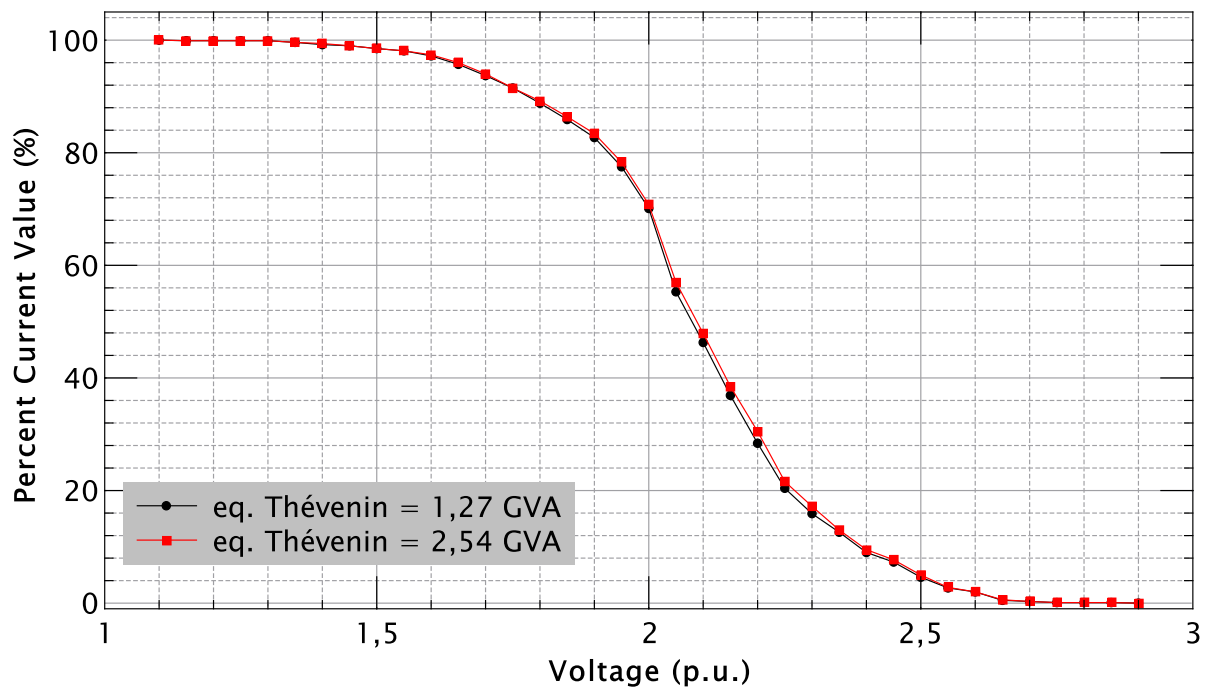
Fonte: O Autor

Figura 29 – Comparação da Probabilidade Acumulada de Ocorrência das Sobretensões para LT 5km e eq. Thévenin variável.



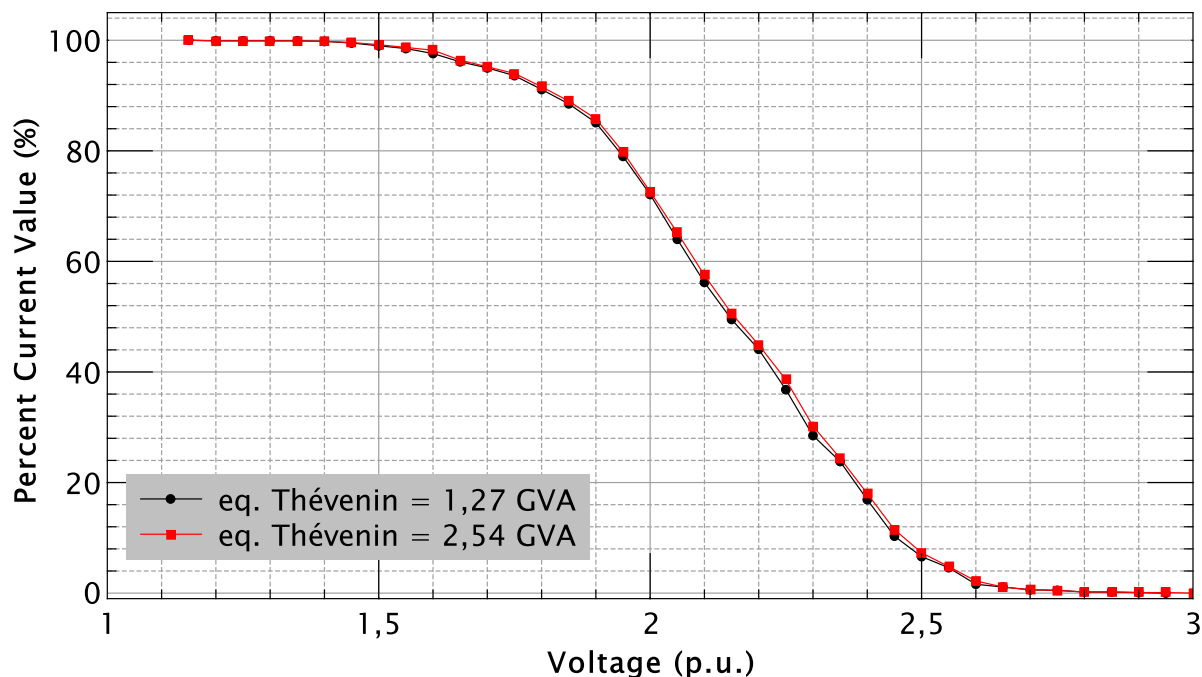
Fonte: O Autor

Figura 30 – Comparação da Probabilidade Acumulada de Ocorrência das Sobretensões para LT 30km e eq. Thévenin variável.



Fonte: O Autor

Figura 31 – Comparação da Probabilidade Acumulada de Ocorrência das Sobretensões para LT 92km e eq. Thévenin variável.



3.5 Comentários Finais

Neste capítulo foi apresentado o modelo computacional para a realização do estudo das sobretensões de energização passíveis de ocorrência em uma LT aérea, em corrente alternada e tensão nominal de 69 kV. Pelo uso do ATP e QtiPlot foi possível analisar a influência do comprimento da LT, resistividade do solo e eq. de Thévenin do SEP sobre os valores de sobretensão simulados. A partir dos resultados é possível inferir que o comprimento da LT e a resistividade do solo possuem maior influência sobre os valores de sobretensão do que o equivalente de Thévenin do SEP. Tanto o modelo desenvolvido, quanto a forma de análise apresentada, pelo uso das ferramentas escolhidas, mostra-se útil para compreensão do comportamento elétrico, frente ao fenômeno evidenciado, da LT, sendo, portanto, relevante para fins de projeto da mesma.

Conclusões

Essa pesquisa teve como objetivo desenvolver através de simulações computacionais a caracterização estatística de sobretensões devido a energização de uma linha de transmissão em 69kV.

As análises de distribuição estatísticas feitas no modelo paramétrico utilizado mostraram-se úteis para uma melhor noção do comportamento das sobretensões passíveis de ocorrência quando da energização de uma linha de transmissão.

Tais dados são úteis para o projeto de uma linha de transmissão fornecendo uma visão mais ampla da influência das variáveis analisadas, como, por exemplo, o comprimento da linha ou a resistividade elétrica do solo, sobre a escolha de equipamentos e diretrizes de projeto.

Com as parametrizações feitas na simulações, os resultados são úteis para o área de SEP, pois gera um modelo de aplicação para casos similares de análise de sobretensões de energização e também para possíveis outros modelos de LTs, sendo útil na construção de outros sistemas no viés de sobretensões de energização.

Sendo assim, para próximas pesquisas, indica-se modelos que excedem as características mínimas de segurança de sobretensão, e através das simulações, buscar um estudo de dispositivos de segurança, como para raios, resistores de pré-inserção e chaveamento controlado, afim de certificar se os valores de sobretensões que ultrapassam os limites de segurança, foram controlados.

Referências

- ANEEL. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA**. 2020. Citado na página 11.
- BENEDITO, R. A. d. S. **Aula 1: Gestão de Energia e Operação de Sistemas Elétricos de Potência**. Curitiba, PR.: [s.n.], 2019. 46 p. Citado 2 vezes nas páginas 12 and 17.
- COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes**. 1. ed. São Carlos: SEL/EESC/USP, 2007. 378 p. ISBN 9788585205782. Citado na página 12.
- D'AJUZ, A. **Transitorios eletricos e coordenação de isolamento: aplicação em sistemas de potencia de alta-tensão**. Niterói: EDUFF, 1987. 435 p. ISBN 9788522800698. Citado 5 vezes nas páginas 12, 13, 16, 17, and 18.
- FONSECA, HUGO L. C. A. ; FERNANDES, M. L. **ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS UTILIZANDO O ATPDraw**. 134 p. Tese (Monografia de Graduação) — Universidade de Brasília,, 2003. Citado na página 21.
- GLOVER, J.; SARMA, M.; OVERBYE, T. **Power System Analysis & Design, SI Version**. [S.l.]: Cengage Learning, 2012. ISBN 9781111425791. Citado na página 10.
- HEDMAN, D. E. **Coordenação de isolamento**. 2. ed. Santa Maria: Edições UFSM, 1983. 200 p. (Curso de engenharia em sistemas eletricos de potencia. Serie PTI). Citado na página 13.
- IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications. **IEEE Std 446-1995 [The Orange Book]**, p. 1–320, July 1996. Citado na página 19.
- IEEE Standard for Ratings and Requirements for AC High-Voltage Circuit Breakers with Rated Maximum Voltage Above 1000 V. **IEEE Std C37.04-2018 (Revision of IEEE Std C37.04-1999)**, p. 1–122, 2019. Citado na página 25.
- JITSUKAWA, J. **Coordenação de isolamento de subestações isoladas a ar**. 2010. Citado na página 18.
- JÚNIOR, L. C. Z. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência Vol. 52**. 1. ed. São Paulo: EDUSP, 2003. 712 p. ISBN 9788531407550. Citado 2 vezes nas páginas 13 and 14.

- LUIS, J.; PORTO, R. De apagão a apagado: Ensaio sobre a questão energética amapaense related papers. 2021. Citado na página 19.
- MENEZES, T. V. **ESTRATÉGIA PARA ANÁLISE DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO NO PLANEJAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO**. 2007. Citado na página 18.
- Mestas, P.; Tavares, M. C. Relevant parameters in a statistical analysis application to transmission line energization. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 29, n. 6, p. 2605–2613, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 23 and 25.
- MIRANDA, J. C. **IEC-61850 : Interoperabilidade e Intercambialidade entre Equipamentos de Supervisão , Controle e Proteção Através das Redes de Comunicação de Dados**. 314 p. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2009. Citado na página 10.
- MOHAN, N. **Electric Power Systems: A First Course**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2012. 256 p. (CourseSmart Series). ISBN 9781118074794. Citado na página 10.
- OLESKOVICZ, M. **Qualidade da Energia Elétrica**. São Carlos, 2007. 77 p. Citado na página 12.
- ONS. Procedimentos de Rede-Submódulo 23.3-Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos. 2017. Citado na página 24.
- _____. **O que é o SIN**. 2019. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Citado na página 11.
- RABÊLO, R. d. A. L. **Componentes de software no planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos**. 310 p. Tese (Tese) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Citado na página 10.
- SANT'ANA, E. d. S. **SOBRETENSÕES DE ENERGIZAÇÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO**. 2011. Citado na página 18.
- SANTOSO, S.; PATEL, M. Impedance-based Fault Location in Transmission Networks : Theory and Application. n. August 2015, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 24 and 34.
- SATO, F.; FREITAS, W. **Análise de Curto-Circuito e Princípios de Proteção em Sistemas de Energia: Fundamentos e Prática**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier Editora Ltda., 2015. 447 p. ISBN 9788535268867. Citado na página 12.
- SOARES, G. B. **ANÁLISE DE ENERGIZAÇÃO E RELIGAMENTO DE LINHA DE TRANSMISSÃO NO SOFTWARE ATP**. p. 0–72, 2017. Citado na página 20.
- TOLMASQUIM, M. **Novo Modelo Do Setor Eletrico Brasileiro**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: EDITORA SYNERGIA, 2015. 310 p. ISBN 9788568483060. Citado na página 11.
- USIDA, W. F. **Sistema inteligente para alocação eficiente de dispositivos indicadores de falta em alimentadores de distribuição**. 208 p. Tese (Tese) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Citado na página 11.
- WATSON, N. et al. **Power Systems Electromagnetic Transients Simulation**. [S.l.]: Institution of Engineering and Technology, 2003. (Energy Engineering). ISBN 9780852961063. Citado na página 12.