

THIAGO RODRIGUES KLEINA LIMA

Determinação de parâmetros do sistema elétrico que influenciam nos cálculos de energização de transformadores de potência.

Guaratinguetá - SP
2022

Thiago Rodrigues Kleina Lima

Determinação de parâmetros do sistema elétrico que influenciam nos cálculos de energização de transformadores de potência.

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

Orientador (a): Agnelo Marotta Cassula

Guaratinguetá - SP
2022

L732d Lima, Thiago Rodrigues Kleina
Determinação de parâmetros do sistema elétrico que influenciam nos cálculos de energização de transformadores de potência / Thiago Rodrigues Kleina Lima – Guaratinguetá, 2022.
84 f : il.
Bibliografia: f. 69

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2022.
Orientador: Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula

1. Transformadores elétricos. 2. Transitórios (Eletricidade). 3. Energia elétrica - Transmissão. I. Título.

CDU 621.314

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**

CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DO SISTEMA ELÉTRICO QUE INFLUENCIAM
NOS CÁLCULOS DE ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

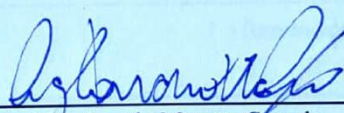
THIAGO RODRIGUES KLEINA LIMA

**ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO
REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUANDO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA "**

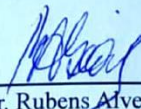
**APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Prof. Dr. Daniel Julien B. da S. Sampaio
Coordenador**

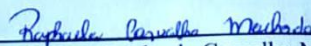
BANCA EXAMINADORA:



**Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula
Orientador/UNESP-FEG**



**Prof. Dr. Rubens Alves Dias
UNESP-FEG**



**Profa. Dra. Raphaela Carvalho Machado
UNESP-FEG**

SETEMBRO, 2022

DADOS CURRICULARES

Thiago Rodrigues Kleina Lima

NASCIMENTO 14.12.1998 – Resende / RJ

FILIAÇÃO André Robson Kleina Lima
Cristiane de Andrade Rodrigues Kleina

2016/2022 Graduação em Engenharia Elétrica
Unesp – Universidade Estadual Paulista – “Júlio de Mesquita Filho”
Campus Guaratinguetá.

dedico este trabalho
de modo especial, à minha família.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

aos meus pais Cristiane de Andrade Rodrigues e André Robson Kleina Lima, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

à minha noiva Vanessa da Silva Bohrer por suportar diversas situações ao meu lado,

aos meus amigos Pedro Emiliano Lopes Nunes e Matheus Albuquerque Oliveira, que sempre estiveram ao meu lado nas adversidades e problemas relacionados à graduação,

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“Só sabemos com exatidão quando sabemos pouco;
à medida que vamos adquirindo conhecimento,
instala-se a dúvida.”

Goethe

RESUMO

A ideia principal deste trabalho de graduação é abrir uma discussão sobre o estudo de energização de transformadores. Atualmente esse estudo é elaborado de forma a priorizar as sobretensões no terminal energizado e não há uma investigação mais profunda em relação às correntes de energização advindas dessas manobras. As correntes de energização apresentam um alto teor harmônico e podem acarretar danos permanentes na estrutura do transformador se essas manobras forem realizadas de forma sucessiva e sem a utilização de equipamentos de manobra controlada. Os equipamentos de manobra controlada visam a diminuição e amortecimento rápido desse fenômeno e a necessidade de uso desses equipamentos é verificada por meio dos estudos de projeto básico. Os equivalentes de rede podem ser elaborados com base em diversos cenários de carga, sendo eles cenários de carga leve (menor nível de curto-circuito) e cenários de carga média ou pesada (maiores níveis de curto-circuito). O objetivo desse trabalho é determinar qual cenário de carga favorece o aparecimento de altas correntes de *Inrush* e quais desses cenários devem ser levados em consideração em estudos com o intuito de verificar a necessidade da utilização de sincronizadores ou resistores de pré-inserção.

PALAVRAS-CHAVE: Energização de Transformadores. ATP. ATPDraw. Correntes de *Inrush*.

ABSTRACT

The main idea of this graduate work is to open a discussion about the study of transformer energizing. Currently this study is elaborated in a way that prioritizes the overvoltages in the energized terminal and there is no deeper investigation regarding the inrush currents arising from these maneuvers. The inrush currents have a high harmonic content and can cause permanent damage to the transformer structure if these maneuvers are carried out successively and without the use of controlled maneuver equipment. Controlled switching equipment aims to quickly reduce and damp this phenomenon, and the need to use this equipment is verified through the basic design studies. The network equivalents can be elaborated based on several load scenarios, being they light load scenarios (lower short-circuit level) and medium or heavy load scenarios (higher short-circuit levels). The objective of this work is to determine which load scenario favors the appearance of high inrush currents and which of these scenarios should be taken into consideration in studies aiming to verify the need for the use of synchronizers or pre-insertion resistors.

KEYWORDS: Transformer Energization. ATP. ATPDraw. Inrush Current.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Subdivisão dos Grupos de Estudos de Transmissão	19
Figura 2 – Fluxograma do Planejamento da Rede.....	21
Figura 3 – Comparação entre natureza dos surtos e sobretensões	25
Figura 4 – Modelo Equivalente de Transformador	26
Figura 5 – Modelo “SATTRAFO”	27
Figura 6 – Característica típica de Histerese.	29
Figura 7 – Característica não linear representada no SATTRAFO.....	30
Figura 8 – Fluxo concatenado no transformador, fechamento da chave no zero de tensão	31
Figura 9 – Fluxo concatenado no transformador, fechamento da chave no pico de tensão	32
Figura 10 – Fluxo prospectivo e fluxo concatenado no transformador.....	33
Figura 11 – Saída da Rotina HYSTERESIS HEVIA.....	34
Figura 12 – Curva de Saturação.	35
Figura 13 – Curva de Saturação, valores instantâneos.	36
Figura 14 – Fluxo prospectivo e fluxo concatenado no transformador – Linha de Referência....	37
Figura 15 – Modelo II – Representação de Linhas de Transmissão	40
Figura 16 – Modelo de linha de transmissão com parâmetros distribuídos	41
Figura 17 – Caixa de diálogo do componente LINEZT_3	41
Figura 18 – Configuração inicial da simulação ATP	42
Figura 19 – Conjunto Transformador + Sistema.....	46
Figura 20 – Simulação representada no ATPDraw	47
Figura 21 – Parametrização do SATTRAFO	48
Figura 22 – Curva de Magnetização (V [p.u.] x I [p.u.].....	49
Figura 23 – Curva de Magnetização (λ [Volt.sec] x I [Amperes])	50
Figura 24 – Parametrização da linha de transmissão. LINEZT_3.....	51
Figura 25 – Variáveis e expressões utilizadas	52
Figura 26 – Linha de Transmissão Modelo PI.	53
Figura 27 – Parâmetros da Impedância da Fonte.....	55
Figura 28 – Modelo de Disjuncto, tempo de fechamento uniforme.....	57
Figura 29 – Maiores sobretensões calculadas em cada simulação	58
Figura 30 – Regressão Linear dos resultados adquiridos - Tensão	59
Figura 31 – Maiores correntes de energização calculadas em cada simulação	60
Figura 32 – Regressão Linear dos resultados adquiridos - Corrente de Inrush.....	61

Figura 33 – Pontos de fechamento nas simulações determinísticas	62
Figura 34 – Comparação da corrente de energização em diferentes níveis de curto-circuito. $X/R = 5$	63
Figura 35 – Comparação da corrente de energização em diferentes níveis de curto-circuito. $X/R = 15$	64
Figura 36 – Comparação da corrente de energização em diferentes níveis de curto-circuito. $X/R = 40$	65
Figura 37 – Evolução da corrente assimétrica de curto-circuito ao longo do tempo	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Característica da Curva de Saturação utilizada	35
Tabela 2 – Características do Transformador utilizado na simulação.....	48
Tabela 3 – Parâmetros da Linha de Transmissão 345 kV. Valores em %.....	51
Tabela 4 – Parâmetros da Linha de Transmissão 345 kV. Valores em Ohm.....	51
Tabela 5 – Máximas correntes de energização em diferentes níveis de CC.....	63
Tabela 6 – Fator de Assimetria em função da relação X/R.	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SIN	Sistema Interligado Nacional Brasileiro
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ONS	Operador Nacional do Sistema
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EMTP	Electromagnetic Transient Program
ATP	Alternative Transient Program
GET	Grupos de Estudos de Transmissão
PET	Programa de Expansão da Transmissão
PELP	Plano de Expansão de Longo Prazo
PAR	Plano de Ampliações e Reforços
MME	Ministério de Minas e Energia
POTTE	Plano de Outorgas de Transmissão de Energia Elétrica
BPA	Bonneville Power Administration

LISTA DE SÍMBOLOS

e	comprimento
φ	fluxo por espira
λ	fluxo concatenado
I	corrente elétrica
V	tensão
E_{\max}	tensão máxima
ω	velocidade angular
f	frequência elétrica
t	tempo
R	resistência
X	reatância
Z	impedância

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	EXPANSÃO DO SISTEMA ELÉTRICO	18
3	TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS E INTRODUÇÃO AO ATP/ATPDraw	24
4	EQUIVALENTE DE REDE (REPRESENTAÇÃO EMTP)	38
5	METODOLOGIA E PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	45
6	RESULTADOS	58
7	CONCLUSÃO.....	69
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICE A – Rotina “SATURA” - ATP	72
	APÊNDICE B – Saída da Rotina “SATURA” - ATP	73
	APÊNDICE C – Rotina “HYSTERESIS HEVIA” – ATP.....	75
	APÊNDICE D – Saída da Rotina “HYSTERESIS HEVIA” – ATP.....	76
	APÊNDICE E – Script – Tratamento de dados e Representação Gráfica – ATP	78

1 INTRODUÇÃO

De modo geral, pode-se chamar a interligação de todas as interfaces elétricas que são utilizadas para garantir o uso da energia elétrica como o Sistema Interligado Nacional (SIN) (ONS, 2013), o qual é responsável por garantir a infraestrutura de transmissão de energia elétrica dando vazão à energia elétrica solicitada nos grandes centros e complexos industriais e residenciais.

A extensão territorial do Brasil solicita um sistema de transmissão extremamente complexo e conta com a participação de diversas empresas, sendo dividido entre três características, empresas de geração, responsáveis por produzir energia; empresas de transmissão, responsáveis de transportar a energia de centros geradores a centros de consumo; e empresas de distribuição responsáveis por alocar a energia dentro dos centros de consumo.

Para que o SIN funcione de uma maneira eficiente é necessário a presença de alguns órgãos públicos que realizam o planejamento e expansão da rede básica do Brasil, podendo citar como os órgãos mais relevantes os seguintes:

Empresa de Pesquisa Energética (EPE): é responsável por pesquisar e prever o comportamento do SIN em um horizonte de longo prazo. Além de propor soluções para os problemas previstos.

Operador Nacional do Sistema (ONS): é responsável por operar o SIN em tempo real e por aprovações técnicas de todos os empreendimentos conectados na rede básica. Além de identificar problemas de curto prazo e propor soluções estruturais para as limitações encontradas.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL): responsável por regular todo o uso e negociação de energia elétrica. Tem também como responsabilidade a resolução de problemas burocráticos que envolvem o setor elétrico e sua expansão.

A expansão da rede básica ocorre de duas maneiras. A primeira delas é por outorga e determina que as transmissoras efetuem obras em subestações com necessidades de ampliação ou recapacitação. O segundo modo é a partir de leilões de lotes de transmissão, estudados exaustivamente pelo setor elétrico como um todo. O leilão de transmissão ocorre anualmente e visa captar investimento de empresas privadas para expansão do SIN.

Porém, como foco deste trabalho será abordado principalmente a expansão da rede básica por meios do seguimento de transmissão.

Pode-se caracterizar como responsabilidade de uma empresa de transmissão, após ganhar o processo de leilão, entregar as obras em tempo determinado pela ANEEL, que por sua vez, emite um edital técnico de cada lote antes do leilão, com as informações e requisitos mínimos de cada equipamento.

A etapa de projeto básico ocorre antes do início das obras e da compra dos equipamentos. Ela visa dimensionar as características elétricas e eletromecânicas dos equipamentos que serão instalados por meio de estudos em regime permanente e estudos de transitórios eletromagnéticos.

Estudos de regime permanente são realizados no Brasil por meio dos softwares ANAFAS, ANAREDE e HARMZ, que possibilitam a análise de faltas e curto-circuito, fluxo de potência e qualidade de energia. Todos esses softwares fazem parte do pacote do órgão público CEPEL (Centro de Pesquisa de Energia Elétrica).

Os estudos de regime permanente têm como objetivo simular condições estáveis do sistema sem a ocorrência de eventos de curta duração

Os eventos de curta duração são analisados através dos estudos de transitórios eletromagnéticos, os quais são realizados no Brasil utilizando o software ATP/ATPDraw (*Alternative Transient Program*), entretanto qualquer software EMTP (*Eletromagnetic Transient Program*) pode ser utilizado nessas análises. Como principais estudos de transitórios eletromagnéticos, é possível citar a energização de linhas e transformadores, rejeição de carga, religamento de linhas de transmissão e tensão de reestabelecimento transitória. Uma característica específica dos estudos de transitórios eletromagnéticos é o aparecimento de ondas com diversas frequências que ficam no intervalo entre a frequência fundamental (60 Hz) até dezenas de MHz.

O documento Diretrizes de Projeto Básico (ONS, 2013), emitido pelo Operador Nacional do Sistema, visa direcionar os estudos de projeto básico impondo premissas e metodologias para cada estudo realizado e juntamente com os Procedimentos de Rede (ONS, 2018) são documentos que norteiam requisitos mínimos das subestações, linhas de transmissão e demais equipamentos envolvidos na expansão do sistema.

Existem diversos estudos que devem ser executados, visando um dimensionamento correto dos equipamentos envolvidos na obra, entretanto esse trabalho terá como foco o estudo de energização de transformadores.

Essa análise é necessária sempre que uma nova unidade de transformação está presente em lotes de leilões feitos pela ANEEL e tem por objetivo verificar se as características do transformador presente no edital técnico do leilão atendem às necessidades da rede, além de

identificar efeitos negativos comuns no processo de energização de transformadores, como sobretensões de manobras e correntes de *Inrush*, que serão discutidas mais detalhadamente no decorrer do trabalho.

A confiabilidade de um estudo de energização de transformadores depende de dois pontos. O primeiro é uma modelagem fiel à realidade do elemento em estudo, isto é, o transformador. O principal cuidado a ser tomado durante a modelagem do transformador é representar o comportamento não linear do núcleo do transformador. Felizmente os softwares tipo EMTP contam com diversos métodos para representar essa não linearidade. O segundo ponto importante no estudo de energização de transformadores é uma representação adequada da rede modelada. Esse trabalho tem a pretensão de instigar uma discussão no sentido de entender de forma qualitativa quais características da rede devem ser mantidas com a finalidade de realizar estudos de energização de transformadores da melhor maneira possível. Quais configurações do sistema são interessantes para esse tipo de estudo? É possível obter as maiores sobretensões e maiores correntes de *Inrush* com o mesmo modelo ATP? Esses são questionamentos que este trabalho visa esclarecer.

2 EXPANSÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

Segundo o portal do ONS (ONS, 2022, B), o Sistema Interligado Nacional tem previsão de atingir, até 2026, um total de 201.942,00 km em linhas de transmissão de alta tensão, isto é, linhas de transmissão com tensão nominal acima de 230 kV. Contando com cinco níveis de tensão em corrente alternada e subdividido em seis subsistemas sendo eles Sul, Sudeste, Centro-Oeste, São Paulo, Norte e Nordeste, a operação e a expansão desse sistema são realizadas por um conjunto de entes públicos e privados. Esse capítulo tem como objetivo descrever o processo de expansão desse sistema e diferenciar a atuação de cada órgão ou empresa envolvida nesse processo.

O processo de planejamento e expansão de novas instalações conectadas à Rede Básica devem ser recomendadas por meio de estudos de planejamento ("R1"- Estudos de Viabilidade Técnico-Econômica e Socioambiental) coordenados pela EPE por meio dos Grupos de Estudos de Transmissão (GET). Esses grupos são subdivididos em regiões geoeletricas do nosso país e estão representadas na Figura 1. Para a participação de qualquer empresa ou entidade nesses grupos de estudos é necessário enviar um ofício ou uma carta de indicação para os representantes de cada grupo. Esses estudos estão disponíveis em (EPE, 2022). Após a elaboração desses estudos, a EPE indica os empreendimentos ou ampliações que apresentam melhor custo-benefício para o sistema com base em análises técnico-econômicas e socioambientais.

Visto que os empreendimentos mais bem avaliados foram indicados pela EPE, são estruturados documentos gerenciais que visam organizar as obras citadas com base na natureza das obras e data de entrada. Os documentos acima são o Programa de Expansão da Transmissão (PET) e o Plano de Expansão de Longo Prazo (PELP). Cabe destacar a diferença temporal que os documentos abrangem. O PET tem um caráter de médio prazo, as indicações são determinativas, isto é, são indicações com maiores chances de serem acatadas e abrange obras que serão realizadas dentro de seis anos. O PELP se trata de um documento com indicações de longo prazo e abrange obras que serão realizadas a partir de sete anos após a emissão do mesmo. A principal função dos documentos PET e PELP é suportar o Ministério de Minas e Energia (MME) na direção de priorizar investimentos no setor elétrico e sinalizar aos agentes a demanda de investimentos que estão previstas para os próximos anos.

Figura 1 – Subdivisão dos Grupos de Estudos de Transmissão



GET	ABRANGÊNCIA GEOELÉTRICA
N	Roraima, Amazonas, Pará, Amapá, Maranhão, Tocantins
NE	Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia
CO	Acre, Rondônia, Mato Grosso, Goiás, Distrito Federal
SE	Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo
SP	São Paulo
S	Mato Grosso do Sul, Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul

Fonte: EPE, Grupos de Estudos de Transmissão (2022).

Em paralelo com a elaboração do PET/PELP pela EPE, o ONS, responsável pela operação do SIN, elabora um documento chamado Plano de Ampliações e Reforços (PAR). Esse documento é elaborado anualmente e apresenta uma visão operativa dos problemas observados no presente e com projeção de se tornarem um empecilho para o sistema no futuro. É importante observar que esse documento é feito com base nos estudos elaborados pela EPE. Entretanto também leva em consideração solicitações de acesso de novos consumidores e geradores, atrasos nas obras já licitadas e a programação advinda da operação do sistema em tempo real. Portanto é um documento que visa detectar problemas com uma visão de curto prazo e que não foram contemplados em estudos anteriores.

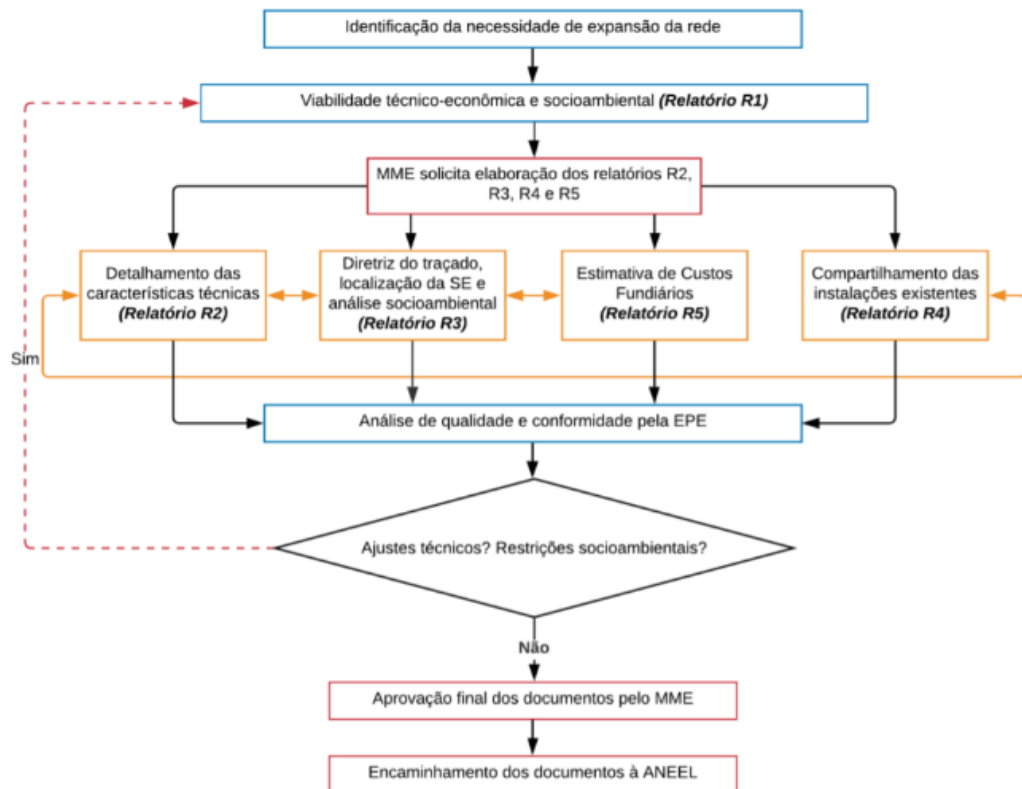
Com os documentos PAR, PET e PELP em mãos, o MME é responsável pela elaboração do Plano de Outorgas de Transmissão de Energia Elétrica (POTEE) que lista de forma objetiva quais são os próximos empreendimentos que devem ser outorgados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A ANEEL por sua vez possui duas formas de outorgar esses novos empreendimentos que farão parte da Rede Básica. A primeira delas é por meio de autorização e ocorre de uma maneira menos burocrática, visto que a ANEEL emite uma Resolução Autorizativa e o agente responsável pelo empreendimento está apto a realizar essa melhoria ou ampliação no empreendimento que já possui o controle. A segunda maneira é a licitação que ocorre por meio de leilões uma ou duas vezes por ano. Quando há a necessidade de licitar os novos empreendimentos, é requerido a elaboração de quatro relatórios (além do R1 - Estudos de Viabilidade Técnico-Econômica e Socioambiental) visando um melhor entendimento do empreendimento pelas transmissoras que entrarão no processo de licitação. Os documentos adicionais são:

- "R2" - Detalhamento da Alternativa de Referência;
- "R3" – Caracterização e Análise Socioambiental;
- "R4" - Caracterização da Rede Existente;
- “R5” – Estimativas de Custos Fundiários.

Conforme dito anteriormente, cada processo de licitação que ocorre deve acompanhar os respectivos relatórios (R1, R2, R3 ,R4 e R5). É possível realizar a consulta desses documentos em (ANEEL, 2022).

A Figura 2 apresenta um fluxograma que retrata como os relatórios se relacionam e como é feito o processo de expansão da rede de uma maneira resumida.

Figura 2 – Fluxograma do Planejamento da Rede



Fonte: EPE, Planejamento da transmissão (2022).

Em posse de todos os documentos citados acima, as transmissoras que saíram vitoriosas do processo licitatório iniciam o processo de contratação das empresas que serão responsáveis pela execução das obras e dos estudos de projeto básico. Conforme ONS (2013), qualquer subestação deve apresentar os seguintes estudos na frequência fundamental:

- Fluxo de carga;
- Rejeição de carga;
- Energização de linha de transmissão;
- Estudos dinâmicos;
- Fluxo de potência nos barramentos das subestações.

Em relação à estudos de transitórios eletromagnéticos cada subestação apresenta uma necessidade. É possível observar essa particularidade na citação abaixo.

“Os tipos de estudos de transitórios eletromagnéticos necessários ao projeto básico das instalações podem variar, dependendo dos equipamentos que fazem parte do empreendimento (existência de transformadores, banco de capacitores, reatores, compensadores estáticos, dentre outros), como também das características das linhas de transmissão existentes.” (ONS, 2013, v. 1, p. 22).

Como explicitado anteriormente, esse trabalho têm a pretensão de discutir premissas relacionadas ao estudo de energização de transformadores, portanto, os estudos ficam restritos à essa análise. Abaixo é possível observar uma passagem citada pelo próprio Operador Nacional do Sistema que trata dos objetivos desse estudo.

“Esse estudo tem como objetivo principal identificar, na etapa de projeto básico da subestação, as solicitações de tensões e correntes resultantes da manobra da energização de transformadores impostas ao próprio transformador, à rede e aos equipamentos vizinhos. Entre as conclusões mais importantes esperadas nesse tipo de estudo, mencione-se a orientação quanto à necessidade ou não de instalação de resistores de pré-inserção e/ou dispositivos de manobra controlada para os disjuntores de manobra dos transformadores, além da indicação de parâmetros mais adequados para a especificação desse equipamento.” (ONS, 2013, v. 1, p. 51).

Conclui-se que além de servir de embasamento para a coordenação de isolamento da subestação (determinar os níveis de isolamento mínimos para equipamentos terminais) a necessidade de instalação de resistores de pré-inserção e sincronizadores é verificada nessa etapa do projeto.

O ONS elabora também uma série de procedimentos que devem ser cumpridos sempre que uma nova instalação será conectada à rede básica. O submódulo 2.6 dos procedimentos de rede que têm com título “Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos” (ONS, 2022) apresenta uma série de recomendações sobre os equipamentos que serão instalados em novos empreendimentos.

“Os disjuntores das unidades transformadoras de potência e dos bancos de capacitores em derivação devem, caso os estudos apontem a necessidade, ser dotados de elementos ou sistemas que limitem os transitórios de energização desses equipamentos, com o intuito de não causar sobretensões, subtensões ou sobrecorrentes que afetem o desempenho da rede ou causem o funcionamento indevido dos sistemas de proteção e controle.” (ONS, 2022, v. 1, p. 21).

Portanto cabe a cada transmissora verificar se há necessidade de instalar disjuntores com sincronizadores nas unidades transformadoras por meio dos estudos de energização de transformadores.

A recomendação em relação ao modelo de rede utilizado no estudo de energização de transformadores é que se deve optar por modelos de rede mais fraca, os quais tem um menor

nível de curto-circuito e ocasionam maiores sobretensões durante a energização, como se pode observar na citação abaixo.

“Os impactos causados por energização de unidades transformadoras são, geralmente, mais severos, sob condição da rede mais fraca, com menor nível de curto-circuito. É o caso das configurações com menor número de unidades geradoras despachadas, verificadas, na maioria das vezes, em condição de carga leve.” (ONS, 2022, v. 1, p. 56).

Segundo D’AJUZ (1987) existem algumas características que determinam o valor inicial da corrente de *Inrush* e, portanto, vão indicar se um sistema necessita ou não da utilização de sincronizadores ou resistores de pré-inserção.

- Ponto de fechamento da onda;
- Fluxo residual no núcleo do transformador;
- Característica magnética do transformador;
- Impedância total do sistema.

Esses fatores estão numerados por ordem de maior importância na energização de um transformador, entretanto o que se pode destacar é que os parâmetros variáveis nessa lista (se a análise for realizada para apenas um transformador) são a impedância total do sistema e o tempo de fechamento da onda. No próximo capítulo serão apresentadas explicações sobre o software utilizado nessas análises e a metodologia adotada para a obtenção desses resultados. Será explicado como o tempo de fechamento dos disjuntores influencia na manobra de energização, como a impedância de um sistema (nível de curto-circuito do modelo) pode acarretar diferentes resultados e porque esse fator pode ser determinante para uma análise assertiva do problema descrito.

3 TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS E INTRODUÇÃO AO TP/ATPDraw

Os estudos de transitórios eletromagnéticos são parte indispensável do planejamento do sistema elétrico em qualquer parte do mundo. Esses estudos servem de subsídio para o dimensionamento de equipamentos terminais, linhas de transmissão e diversos componentes que fazem parte de um sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Na maior parte do tempo os sistemas de potência trabalham com uma faixa tensão determinada e não há mudanças nesse cenário a menos que ocorra algum evento interno ou externo que altere suas características de funcionamento. Esses eventos podem submeter os sistemas de potência a condições severas e ocasionar falhas de equipamentos por ruptura da isolação entre fases ou entre fase e a terra.

O principal objetivo desses estudos é determinar a máxima sobretensão que um sistema pode ser submetido, portanto, são feitas várias análises para determinar a magnitude e probabilidade desses eventos ocorrerem.

Lê-se na figura 3 a natureza de alguns fenômenos e as sobretensões advindas de cada uma. Pode-se dividir as sobretensões em três grupos principais:

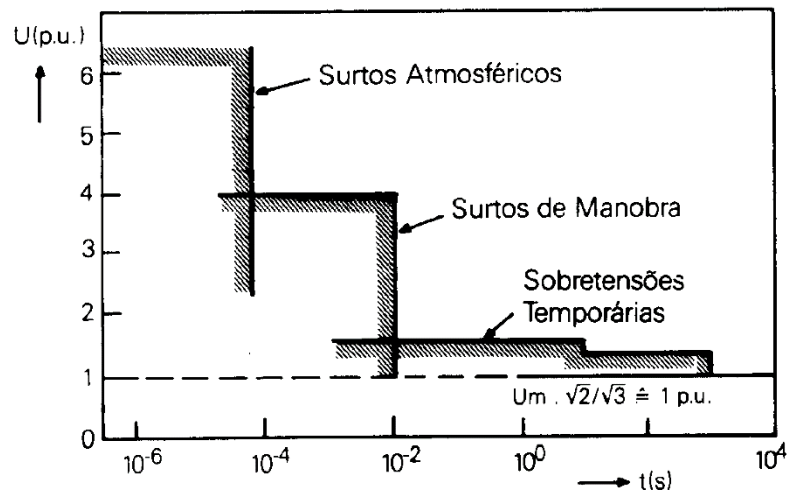
- Sobretensões temporárias ou sustentadas.
- Sobretensões de manobra;
- Sobretensões por descargas atmosféricas.

As sobretensões temporárias são caracterizadas por um baixo nível de amortecimento, isto é, tem um efeito prolongado que podem durar alguns segundos. São fenômenos causados por rejeições de carga (abertura de disjuntores em apenas um terminal da linha), faltas monofásicas e fenômenos de ferroressonância.

As sobretensões advindas de manobras feitas no sistema ocorrem frequentemente. É possível citar a energização de linhas e transformadores de potência, a abertura de circuito com ou sem falta aplicada e religamentos mono ou tripolares de linhas de transmissão como bons exemplos. A principal característica de uma sobretensão de manobra é ter frente de onda lenta, algo em torno de 100 e 500 μ s. O amortecimento desse tipo de fenômeno acontece rapidamente e o primeiro pico de tensão após o evento tende a ser a maior preocupação nessas análises.

As sobretensões atmosféricas são desencadeadas por descargas atmosféricas e possuem uma frente de onda rápida com tempos de até 20 μ s. Com sobretensões de até 6 p.u. ela ocorre rapidamente, entretanto exige um alto desempenho da isolação de equipamentos e da linha de transmissão.

Figura 3 – Comparação entre natureza dos surtos e sobretensões.



Fonte: D'ajuz et al (1987).

A necessidade da simulação dos transitórios eletromagnéticos fica evidente quando há a necessidade do dimensionamento dos equipamentos, entretanto existe também a dificuldade em retratar de forma coerente esses fenômenos. Décadas atrás diversos métodos de medição foram propostos para monitorar esses eventos e além da imensa dificuldade e custo os resultados eram extremamente imprecisos e poucas conclusões podiam ser tiradas.

O software utilizado nas análises é o ATP (Alternative Transient Program). Será realizada uma apresentação do software e com qual objetivo ele foi criado. A partir desse ponto será iniciado a explicação de como ele funciona e quais as funcionalidades existentes.

A história do ATP inicia-se por volta de 1960, com um outro nome, EMTP (Eletromagnetic Transient Program). Em 1966 Hermann W. Dommel elaborou o primeiro programa tipo EMTP enquanto desenvolvia seus trabalhos pela Bonneville Power Administration (BPA), nos Estados Unidos. Desde então houve um imenso esforço por parte do setor elétrico em desenvolver e aprimorar o código desenvolvido por Dommel com a intenção de realizar simulações e prever o resultado de manobras em sistemas de potência.

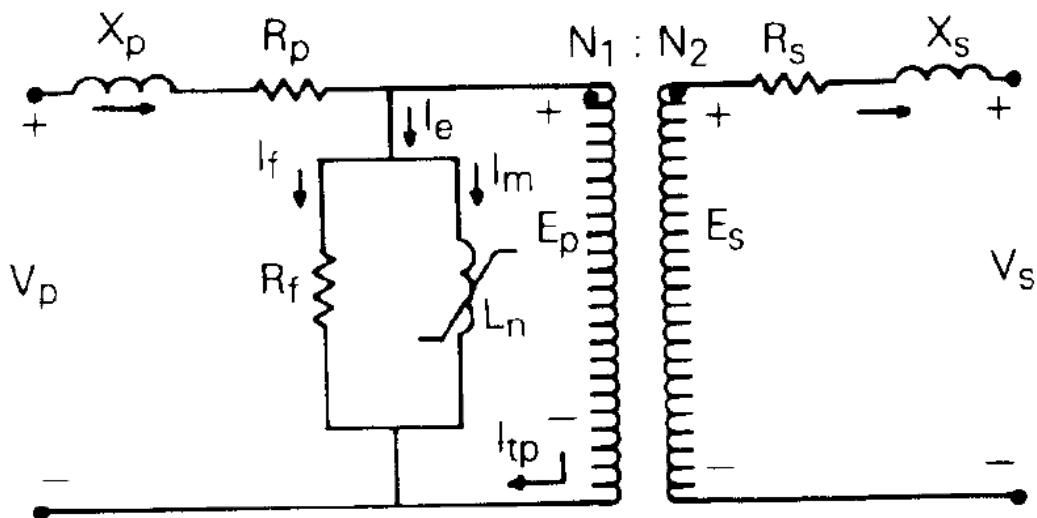
Advindo de uma época que o poder computacional era infinitamente menor o ATP utiliza os recursos atuais para realizar suas simulações por meio do método trapezoidal de integração numérica. O ATP é um software que utiliza sua própria linguagem na montagem dos circuitos e todos os recursos desse software estão descritos no *Rule Book* (RULE BOOK, 1992) um guia não muito amigável de como utilizar todos os recursos disponíveis de forma gratuita.

O ATPDraw é o complemento do ATP e têm a funcionalidade de tornar o uso da ferramenta mais fácil e intuitiva. É possível descrevê-lo como uma interface gráfica que conta

com diversos recursos e ferramentas que facilitam a utilização de recursos complexos e de difícil compreensão.

Conforme dito anteriormente, o foco desse trabalho é a análise das variáveis que influenciam um estudo de energização de transformadores e é de grande importância o entendimento do fenômeno em si e como o mesmo é retratado em softwares EMTP. Para iniciar as análises será considerado um modelo de transformador a vazio, isto é, apenas o primário conectado à rede.

Figura 4 – Modelo Equivalente de Transformador.



Fonte: D'ajuz et al (1987).

Acima pode-se observar a representação de um transformador em programas EMTP.

Onde tempos:

X_p : Característica indutiva do enrolamento primário.

R_p : Perdas resistivas nos condutores do enrolamento primário.

X_s : Característica indutiva do enrolamento secundário.

R_s : Perdas resistivas nos condutores do enrolamento secundário.

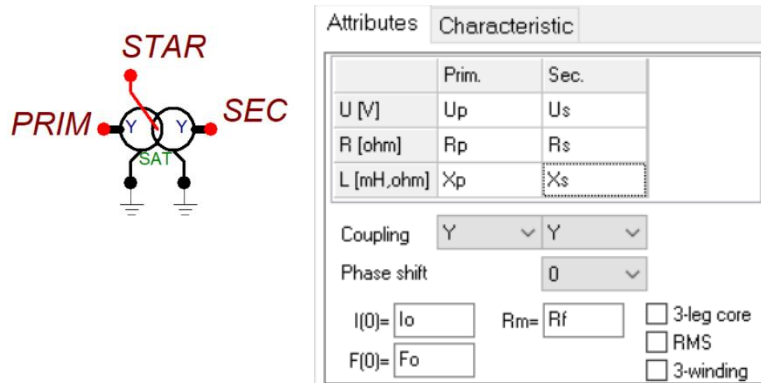
R_f : Perdas por histerese e facult no núcleo do transformador.

L_n : Representação do efeito indutivo não linear do núcleo ferromagnético do transformador.

O modelo de transformador utilizado nesse trabalho foi o "SATTRAFO". Consiste em um transformador que necessita dos parâmetros descritos acima, além da relação de transformação entre os enrolamentos para ser corretamente modelado. A Figura 5 contém o símbolo utilizado pelo ATPDraw para representar o componente e os nomes dos parâmetros utilizados em sua modelagem são equivalentes as variáveis representadas na Figura 4. Apenas

o parâmetro L_n não está representado, entretanto, será discutido posteriormente com a aba “Characteristic”.

Figura 5 – Modelo “SATTRAFO”.



Fonte: Figura de autoria própria, ATPDraw 7.2 (2022).

Adotando o transformador acima conectado à uma fonte senoidal e o secundário desconectado, isto é, em condição a vazio, pode-se considerar que:

“Para suprir as perdas e para a produção do fluxo magnético, o primário absorve da rede de alimentação uma corrente denominada corrente a vazio, cuja magnitude pode ser da ordem de até 6% da magnitude da corrente nominal. Considerando que a corrente a vazio tem por função o estabelecimento do fluxo magnético e o suprimento das perdas a vazio. É comum sua decomposição em I_p , componente ativa, responsável pelas perdas no núcleo e I_q , componente reativa, responsável pela produção do fluxo magnético principal.”(Transformadores Teoria e Ensaíos).

É de conhecimento geral que as grandezas representadas por fasores não contém componentes harmônicas além da sua componente fundamental e apresenta um comportamento periódico, usualmente senoidal. Devido ao comportamento não linear dos transformadores a corrente a vazio não apresenta uma forma senoidal. Da Lei de Faraday tem-se que:

$$e = N1(d\phi/dt) = (d\lambda/dt) \quad (1)$$

Onde:

e : Tensão induzida no enrolamento primário;

ϕ : Fluxo magnético por espira;

λ : Fluxo concatenado no enrolamento primário;

$N1$: Número de espiras do enrolamento primário.

É possível compreender que aplicado uma fonte cossenoidal no terminal primário do transformador a tensão induzida no enrolamento primário será cossenoidal e o fluxo concatenado será a integral desse sinal, portanto um sinal senoidal.

“O fluxo magnético é senoidal, o número de espiras é constante, mas a relutância varia devido a diferentes estados de saturação que ocorrem no núcleo. Com tais considerações, pode-se concluir que a parcela I_q não é senoidal, acarretando como consequência uma forma de onda não senoidal para I_0 ”(Transformadores Teoria e Ensaio)

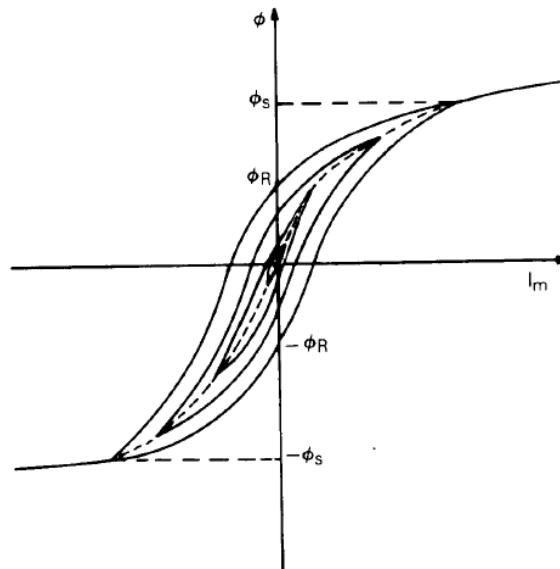
Esse comportamento é esperado em transformadores a vazio alguns segundos após a manobra de energização do equipamento. Conforme visto anteriormente, os transitórios decorrentes de manobras apresentam um pior resultado logo no primeiro pico após a ocorrência do evento e as correntes de *Inrush* também seguem esse mesmo padrão.

O comportamento magnético do transformador é a principal característica intrínseca do equipamento que determina seu desempenho durante energizações. As características magnéticas podem ser retratadas de diversas maneiras. Curvas de histerese e curvas de magnetização são os principais métodos de representação desse fenômeno e abaixo é possível diferenciar as duas modelagens.

A primeira diferença entre as duas representações é que existem infinitas curvas de histerese para cada transformador. Um novo laço de histerese se forma à medida que a corrente no terminal primário do equipamento muda e conseqüentemente há alteração na intensidade de campo magnético no núcleo ferromagnético. É possível observar na Figura 6 que quanto maior a corrente I_m (no caso retratada como corrente de magnetização) maior é a área necessária para representar o laço de histerese e maiores são as perdas no núcleo ferromagnético do equipamento.

A curva de saturação pode ser descrita como a união dos pontos dos vértices de todos os laços de histerese de um equipamento ferromagnético. A curva de saturação é representada na Figura 6 como a linha pontilhada entre os laços de histerese que por sua vez são representados pelas linhas completas.

Figura 6 – Característica típica de Histerese.



Fonte: D'ajuz et al (1987).

A curva de saturação pode ser representada inicialmente por uma curva $V(\text{p.u.}) \times I(\text{p.u.})$. Os programas EMTP necessitam de outro dado de entrada, que normalmente é uma curva $\lambda(\text{Volt.seg}) \times I(\text{Amperes})$. Essa conversão pode ser encontrada em diversos artigos e citações. Existe uma rotina interna do ATP (APÊNDICE A) capaz de realizar a converção de forma automática. Essa rotina chama-se “SATURA” e pode ser encontrada no *Rule Book* (RULE BOOK, 1992). A saída dessa rotina está disponível no APÊNDICE B ao final desse trabalho.

Além dos pontos de tensão e corrente em p.u., a rotina necessita da frequência fundamental do sistema, da tensão de base do terminal primário e da potência monofásica do transformador em questão. A curva obtida por meio dessa rotina pode ser diretamente inserida na aba “Characteristic” do componente “SATTRAFO”. A Figura 7 representa como devem ser inseridas os pontos no ATPDraw.

Figura 7 – Característica não linear representada no SATTRAFO.

Attributes		Characteristic	
Saturation (on the PRIMARY winding!)			
I [A]		Fluxlinked [wb-T]	
14.1999436		747.209274	
24.6121865		782.014282	
42.3496139		808.121774	
65.2518335		834.229266	
86.8281999		851.63177	
113.837602		869.034274	
173.763145		895.141766	
254.660961		912.54427	

Fonte: Figura de autoria própria, ATPDraw 7.2 (2022).

Os pares ordenados expostos na Figura 7 representam qual a corrente no primário do transformador em função do fluxo concatenado no material ferromagnético. O primeiro ponto, por exemplo, indica que há uma corrente de 14,19 A quando o transformador apresenta um fluxo concatenado de 747,21 Volt.s. É importante lembrar que os valores $I(0)$ e $F(0)$ presentes na primeira aba do componente e representados na Figura 5 devem ser preenchidos com o primeiro par de pontos da curva de saturação.

Para uma primeira análise do fenômeno, será considerado o transformador com fluxo residual zero (essa variável será abordada em sequência). Tendo em vista que o fluxo prospectivo da rede é atrasado 90° elétricos da onda de tensão e têm o módulo igual a tensão dividido pela velocidade angular, é possível constatar que o fechamento do disjuntor no zero de tensão proporciona um maior transitório no circuito, pois o fluxo magnético no transformador tentaria se reestabelecer de forma instantânea de zero para θ_{max} . É possível comparar o fluxo concatenado no transformador considerando o fechamento no zero da onda de tensão e no pico da onda de tensão na Figura 8 e na Figura 9.

O fluxo magnético dentro do transformador não pode ser variado instantaneamente, portando esse valor de θ_{max} será atingido após o primeiro quarto de ciclo de onda. A Figura 8 e a Figura 9 mostram como ocorre a energização de transformadores do ponto de vista de fluxo concatenado no núcleo ferromagnético.

A Figura 8 foi construída levando em consideração uma rede de 345 kV. O fluxo prospectivo da rede pode ser calculado facilmente utilizando a equação (1).

Tendo em mãos a função que rege a onda de tensão, é possível encontrar o fluxo prospectivo da rede ao integrar esse sinal no tempo. Visto que a onda de tensão é dada por:

$$e(t) = E_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2)$$

O fluxo prospectivo da rede pode ser representado por:

$$\theta(t) = (E_{\max}/\omega) \cdot (-\cos(\omega \cdot t)) \quad (3)$$

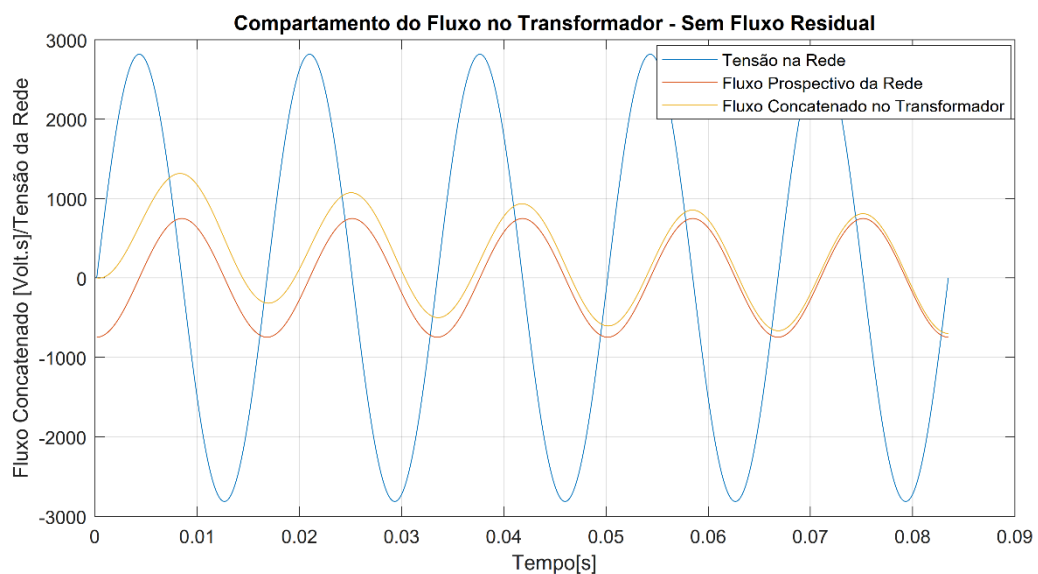
Portanto, tem-se que

$$\theta(t) = 345000 \cdot \text{raiz}(2/3) / (2 \cdot \Pi \cdot 60) \cdot -\cos(2 \cdot \Pi \cdot 60 \cdot t)$$

$$\theta(t) = -747,209 \cdot \cos(376,99 \cdot t)$$

Com o passar do tempo o sistema tende a amortecer o fluxo concatenado no transformador e esse valor se iguala ao fluxo prospectivo da rede após alguns ciclos. Esse amortecimento depende da constante de tempo do sistema e do transformador. Na simulação foi considerado um amortecimento alto, apenas para ilustrar o efeito do desaparecimento gradual do transitório.

Figura 8 – Fluxo concatenado no transformador, fechamento da chave no zero de tensão.

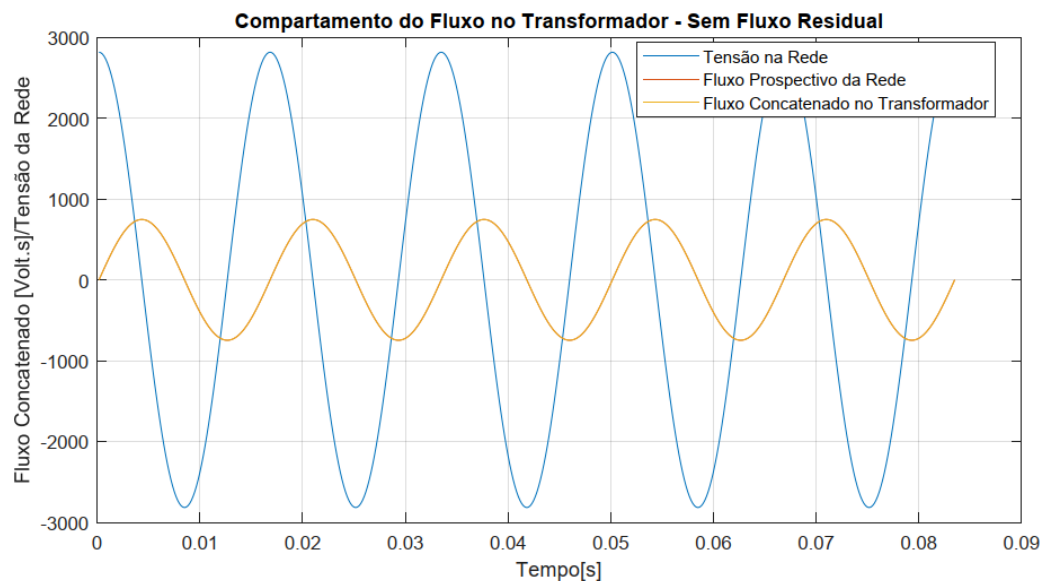


Fonte: Figura de autoria própria, MatLab (2022).

OBS: O valor de tensão foi diminuído em 100 vezes para que o gráfico seja ilustrativo.

A Figura 8 representa como o fluxo concatenado no transformador se comporta quando há uma energização que o tempo de fechamento do disjuntor ocorre no zero da tensão. É possível observar que o fluxo concatenado alcança valores próximos a 1200 Volt.s, o que representa aproximadamente 1.6 p.u. do fluxo prospectivo da rede.

Figura 9 – Fluxo concatenado no transformador, fechamento da chave no pico de tensão.



Fonte: Figura de autoria própria, MatLab (2022).

OBS: O valor de tensão foi diminuído em 100 vezes para que o gráfico seja ilustrativo.

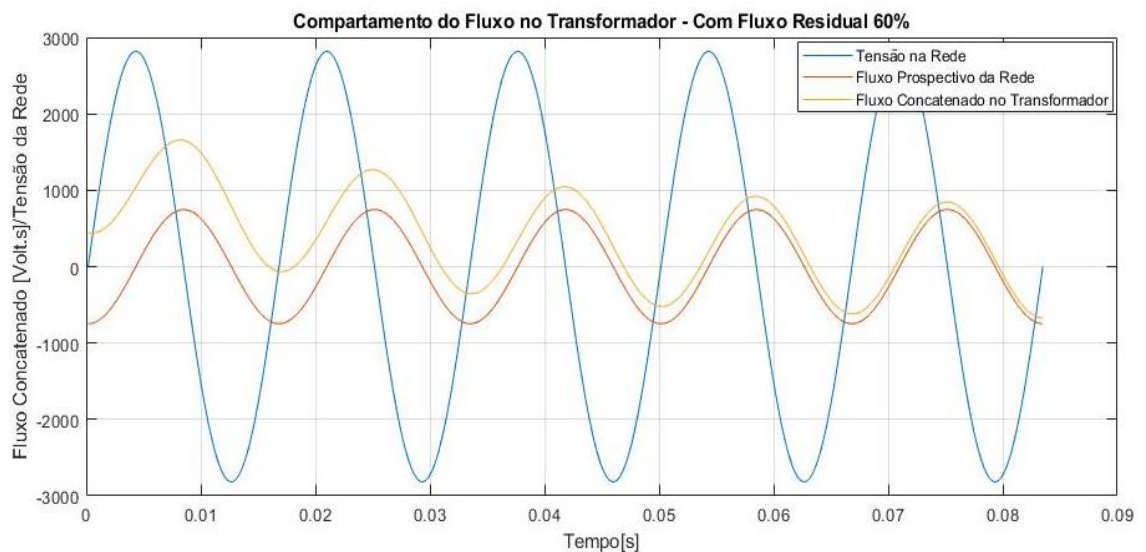
A Figura 9 representa como o fluxo concatenado no transformador se comporta quando há uma energização que o tempo de fechamento do disjuntor ocorre no pico da tensão. É possível observar que o fluxo concatenado alcança valores próximos a 750 Volt.s, o que representa exatamente 1 p.u. do fluxo prospectivo da rede. Isso indica que não há transitório e a corrente de energização não alcança valores significativos.

É importante lembrar que o núcleo do transformador é composto de material ferromagnético. As características de alta permeabilidade magnética fazem com que o fluxo magnético se acomode mais facilmente nesse tipo de material. Uma característica importante nos transformadores é que uma vez energizado, seu interior sempre apresentará um fluxo residual, mesmo com o transformador desenergizado há um fluxo preso dentro do material ferromagnético. Isso deve ser levado em consideração nos estudos de energização de transformadores. Os valores de fluxo concatenado no transformador podem alcançar valores maiores que 2 p.u. se essa condição inicial for considerada.

“Quando o transformador é desligado, sua corrente de excitação vai a zero. O fluxo então, seguindo o laço de histerese, cairá para um valor residual. Se o transformador é agora reenergizado no instante em que a onda de tensão passa por um valor tal que o fluxo magnético corresponda exatamente ao fluxo residual no núcleo, tem-se uma continuação suave na operação prévia sem um transitório magnético. Na prática, entretanto, o instante de fechamento não pode ser controlado e um transitório será inevitável.”(Transformadores Teoria e Ensaio).

Segundo ONS (2013) as manobras de energização de transformadores deve ser feita considerando um valor entre 50% e 60% de fluxo residual. O sistema retratado na Figura 8 apresenta um fluxo prospectivo de rede de 747,209 volt.s, portanto, o mesmo fenômeno será representado na Figura 10, considerando um fluxo residual de 60% no transformador. Esse valor é de 448,32 Volt.s.

Figura 10 – Fluxo prospectivo e fluxo concatenado no transformador.

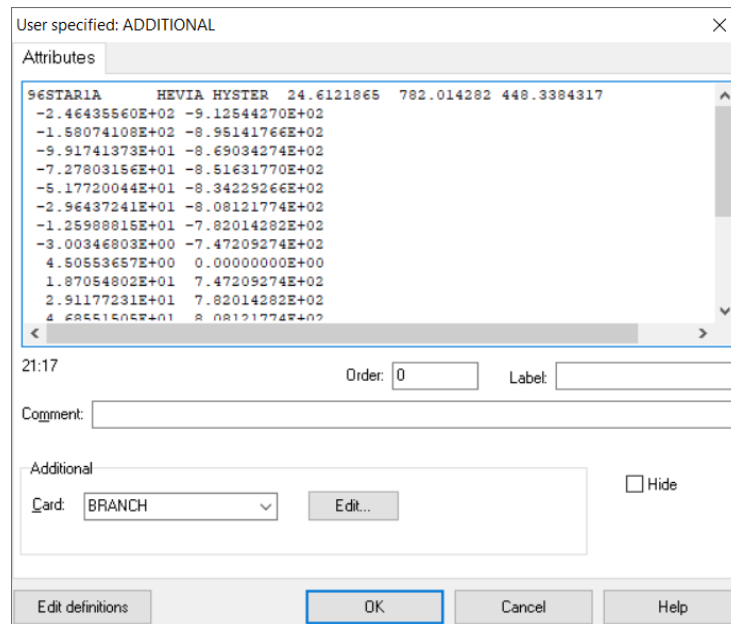


Fonte: Figura de autoria própria, MatLab (2022).

A Figura 10 representa como o fluxo concatenado no transformador se comporta quando há uma energização que o tempo de fechamento do disjuntor ocorre no zero da tensão e quando há um fluxo residual de 60%. É possível observar que o fluxo concatenado alcança valores próximos a 1600 Volt.s, o que representa exatamente 2,15 p.u. do fluxo prospectivo da rede.

O método utilizado pelo ATP para representar o fluxo residual em um transformador é simples. Utilizando a saída da rotina SATURA (uma curva de magnetização $\lambda(\text{Volt.seg}) \times I(\text{Amperes})$ que considera o fluxo residual no transformador zero) e o fluxo residual utilizado na simulação é possível utilizar a rotinas “HYSTERESIS HEVIA” para modelar esse comportamento. A rotina está disponível no *Rule Book* (RULE BOOK, 1992) e no APÊNDICE C desse trabalho. A saída da rotina deve ser anexada no ATPDraw por meio de um cartão “Additional” com a função “Branch” representado na Figura 11 e está disponível no APÊNDICE D desse trabalho.

Figura 11 – Saída da Rotina HYSTERESIS HEVIA.



Fonte: Figura de autoria própria, ATPDraw 7.2 (2022).

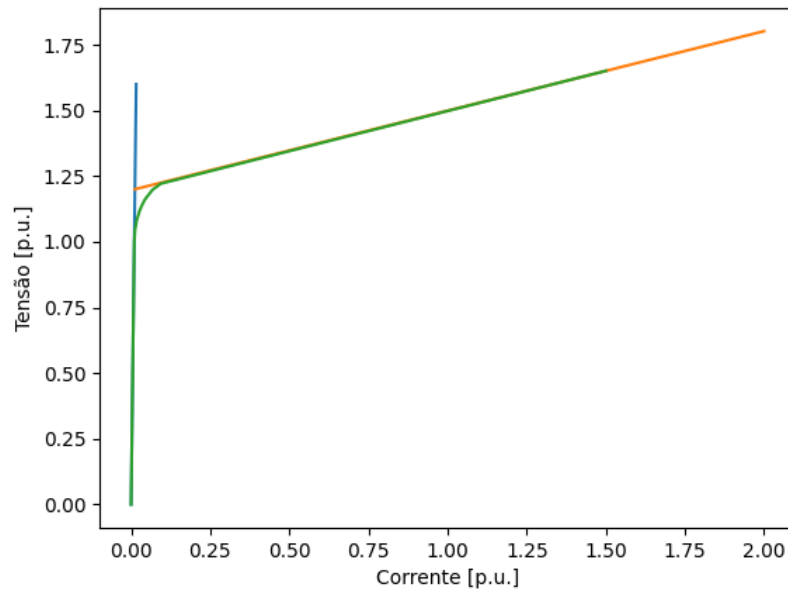
É importante lembrar que a somatória do fluxo residual nas três fases do transformador deve ser zero, portanto o fluxo residual presente na fase A, por convenção, deve ser distribuído igualmente entre as fases B e C. Lembrando que os valores de fluxo residual das fases B e C devem ser representados com valores negativos.

Após a compreensão de como o fluxo magnético no núcleo do transformador se comporta frente a uma energização é necessário compreender como o fluxo magnético se relaciona com a corrente de energização (nos primeiros segundos após a manobra) e com a corrente a vazio (quando o transformador permanece com o secundário sem carga conectada a seus terminais por um longo período de tempo).

Os fabricantes de transformadores apresentam as características magnéticas do transformador por meio de uma curva de magnetização. Normalmente os projetos básicos são feitos de forma preliminar, portanto é utilizado uma curva de saturação fictícia, a qual necessita de alguns parâmetros para ser construída. Abaixo segue listado os parâmetros necessários:

- Xac: Reatância de núcleo de ar, inclinação da reta que representa a região saturada;
- Joelho: Ponto de inflexão da curva, transição entre a região não-saturada e a região saturada do transformador;
- I0: Corrente a Vazio, corrente quando é aplicado uma tensão de 1 p.u. no primário do transformador.

Figura 12 – Curva de Saturação.



Fonte: Figura de autoria própria, MatLab (2022).

A curva acima representa a curva de saturação de um transformador com as seguintes características magnéticas.

Tabela 1 – Característica da Curva de Saturação utilizada.

Entradas	Unidades	Valor
Nível de Tensão	kV	345
Potência do Transformador	MVA	200
Corrente a Vazio	p.u.	0.01
Xac	%	30
Joelho	p.u.	1.2

Fonte: Tabela de autoria própria, Excel (2022).

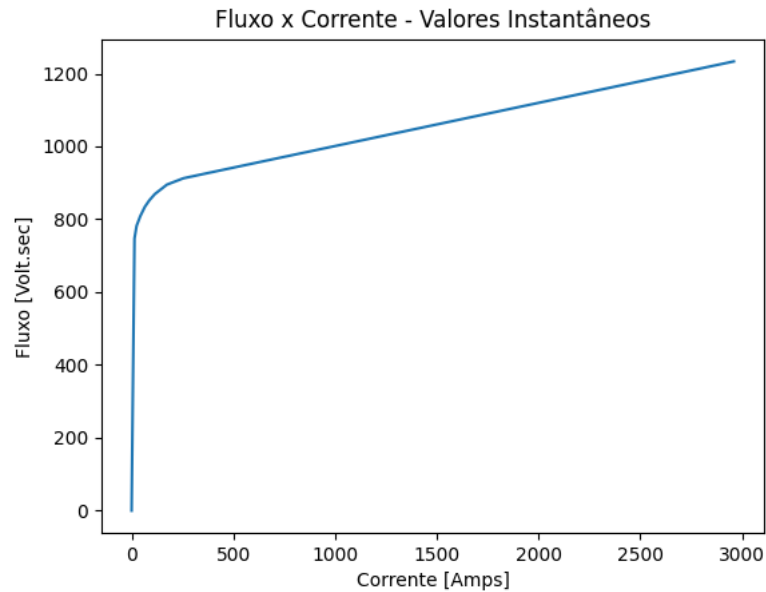
Pode-se observar que existem duas regiões bem definidas para o comportamento magnético representado. A primeira região é ilustrada pela reta azul e pode ser descrita como a região em operação normal, onde não ocorreu a saturação do núcleo ferromagnético do transformado. É esperado que o equipamento opere a maior parte do tempo nesse intervalo.

A curva em laranja pode ser descrita como a região saturada do transformador, isto é, quando o material ferromagnético não consegue concatenar mais fluxo magnético e o fluxo restante começa a utilizar o ar como meio para chegar até o enrolamento secundário, por isso tem a sua inclinação denominada reatância de núcleo de ar. É notável a dificuldade de concatenar fluxo por meio de um material com a relutância maior e os efeitos desse fenômeno

são correntes extremamente altas no primário do transformador. O joelho da curva representa o valor de tensão no ponto de intersecção entre as retas laranja e azul.

Após a conversão da curva de saturação representada na Figura 12 de valores em V(p.u.) x I(p.u.) para valores em λ (Volt.sec) x I(Amperes) por meio da rotina Satura, intrínseca do ATP, foi obtido o seguinte resultado.

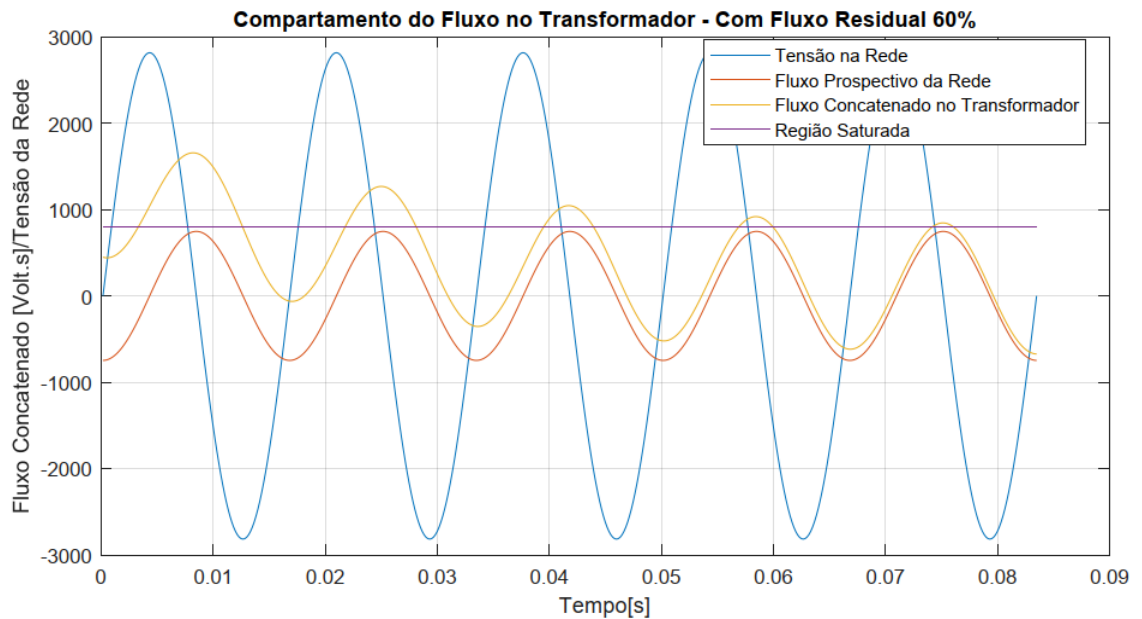
Figura 13 – Curva de Saturação, valores instantâneos.



Fonte: Figura de autoria própria, MatLab (2022).

A partir da Figura 13 é possível concluir que um fluxo magnético com valores a partir de 800 Volt.s começa a produzir correntes mais elevadas e com alto teor harmônico que causam problemas ao sistema e ao transformador. Utilizando esse ponto como margem entre a região não saturada e a região saturada é possível mapear os momentos que o transformador trabalha na região saturada adicionando uma linha horizontal em 800 volt.s na Figura 13. Sempre que o fluxo concatenado do transformador for maior que esse valor considera-se que o mesmo está operando na região saturada.

Figura 14 – Fluxo prospectivo e fluxo concatenado no transformador – Linha de referência.



Fonte: Figura de autoria própria, MatLab (2022).

Observa-se que na Figura 14 que o fluxo concatenado no transformador ultrapassa com facilidade a marca de 800 Volt.sec nos primeiros ciclos após a energização. Isso provoca correntes de Inrush altas que diminuem conforme o fluxo concatenado é amortecido. Quando o transformador atinge o regime permanente e o fluxo concatenado se iguala ao fluxo prospectivo da rede as correntes de energização assumem valores baixos e não apresentam mais riscos à integridade do equipamento.

Após a explicação teórica de como ocorre a energização de um transformador, é possível mapear quais fatores influenciam de forma significativa nesse fenômeno. Os três primeiros parâmetros que influenciam nessa manobra são o tempo de fechamento do disjuntor, característica magnética do núcleo e o fluxo residual presente no transformador momentos antes da manobra. No próximo capítulo será discutido como é feita a modelagem de um equivalente de rede e quais parâmetros devem ser levados em consideração para um estudo de energização de transformadores no ATP/ATPDraw.

4 EQUIVALENTE DE REDE (REPRESENTAÇÃO EMTP)

O modelo de equivalente de rede é o primeiro passo em direção aos estudos de transitórios eletromagnéticos. Esse modelo visa representar a rede básica existente e servir de referência para elaboração de todos os estudos sistêmicos de projeto básico, sendo eles, energização de linhas e transformadores, tensão de reestabelecimento transitória, rejeição de carga entre outros.

O primeiro passo para montar um equivalente de rede é entender de onde serão retirados os dados necessários, quais elementos serão considerados nessa análise e como os mesmos devem ser representados. Os quatro softwares desenvolvidos pelo Cepel (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica). Dois deles serão utilizados como base para elaboração do equivalente de rede. São eles o ANAFAS (utilizado para análises de faltas) e o ANAREDE (utilizado para análise de fluxo de potência). Visto que esses softwares têm função de representar fenômenos totalmente distintos, os dados utilizados para representar linhas de transmissão, transformadores e outros equipamentos não são exatamente os mesmos nos dois softwares.

O ONS e a EPE têm a obrigação de disponibilizar anualmente bases de dados gratuitas que representem o SIN em vários horizontes de tempo em ambos os softwares. O ONS (2022, C) disponibiliza as bases do PAR-PEL que contemplam o sistema interligado num horizonte de até cinco anos contando desde a data de disponibilização. A EPE disponibiliza os casos do plano decenal, isto é, contempla um horizonte de dez anos após o ano de disponibilização. O plano prospectivo, também elaborado pela EPE, avança em cinco anos no horizonte de tempo do plano decenal.

As bases de dados utilizadas no ANAREDE dispõem dos parâmetros de resistência, reatância e susceptância de sequência positiva para linhas de transmissão. Para a representação dos transformadores é necessário a resistência e reatância de sequência positiva além da faixa de tapes operativa do equipamento. Os geradores são representados por injeções de potência ativa e reativa. A validação do equivalente de rede (comparando com o ANAREDE) é dado pelo fluxo de potência que passa nas linhas de transmissão da rede do modelo equivalente. Os valores apresentados no equivalente de rede devem apresentar valores próximos ao caso base ANAREDE.

As bases de dados utilizadas pelo ANAFAS dispõem de parâmetros de resistência e reatância de sequência positiva e de sequência zero para linhas de transmissão. Os transformadores são representados por resistências e reatâncias de sequência positiva e de

sequência zero além de conter o fechamento dos terminais do transformador e, caso o sistema seja não solidamente aterrado a resistência de aterramento também é representada. Os geradores são representados por uma fonte de tensão conectada à reatância subtransitória das máquinas. O modelo de rede requer também uma verificação em relação aos parâmetros de sequência zero, observados principalmente em faltas.

Tendo em vista que um dos efeitos transitórios mais significativos é ocasionado pelo surto injetado pela aplicação/remoção de defeito, caso a rede de sequência positiva e de sequência zero sejam adequadamente representadas, os valores de magnitude dos curtos-circuitos no programa de transitórios eletromagnéticos deverão ser próximos àqueles obtidos por meio do programa ANAFAS. (ONS, 2013, v. 1, p. 24).

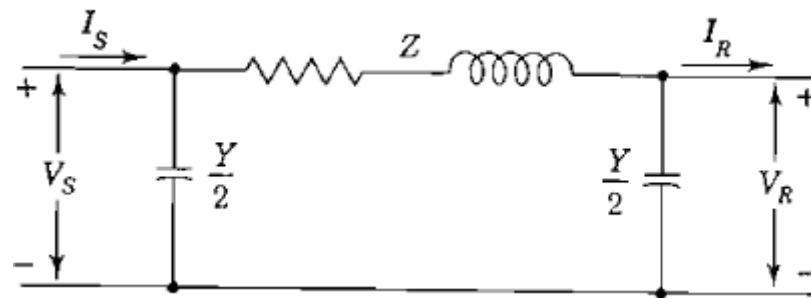
Um outro problema enfrentado ao montar um equivalente de rede é a determinação das barras de fronteira, isto é, determinar até onde o SIN deve ser representado. Programas de análise em regime permanente, ou até mesmo de análises eletromecânicas na frequência fundamental podem utilizar representações fiéis do sistema em análise, visto que o poder computacional necessário não é uma limitação. “[...] por limitações da ferramenta — a representação de todo o sistema interligado no programa de simulação, há necessidade de que se escolha uma sub-rede representativa, porém limitada, que não distorça o fenômeno em análise.” (ONS, 2013, v. 1, p. 24).

O ONS (2018) apresenta a regra de maneira clara. “Entre a(s) barra(s) focalizada(s) no estudo e as barras de fronteira devem existir, pelo menos, 2(duas) outras barras.” em complemento à essa citação o ONS (2013) recorre à “prática da boa engenharia” e menciona de forma sutil uma distância de 350 km entre subestações de mesma tensão ligadas por meio de uma linha de transmissão como sendo “adequada”.

Fenômenos de transitórios eletromagnéticos advêm da superposição de ondas trafegantes, em diversas frequências e nas três fases — que se refletem e se refratam, se superpõem ou se cancelam. Para o fenômeno poder de fato manifestar-se, é necessário um afastamento elétrico mínimo dos equivalentes de 60 Hz. (ONS, 2013, v. 1, p. 24).

Essa citação deixa explícito como devem ser representadas as linhas de transmissão nos equivalentes de rede. Geradores, bancos de capacitores, reatores de barra e transformadores são elementos concentrados, isto é, não apresentam parâmetros distribuídos em longas distâncias. As linhas de transmissão, quando representadas por ferramentas que fazem análises na frequência fundamental também não apresentam uma distribuição espacial dos seus parâmetros. Na Figura 15 é possível visualizar uma linha de transmissão representada por um modelo II.

Figura 15 – Modelo II – Representação de Linhas de Transmissão.



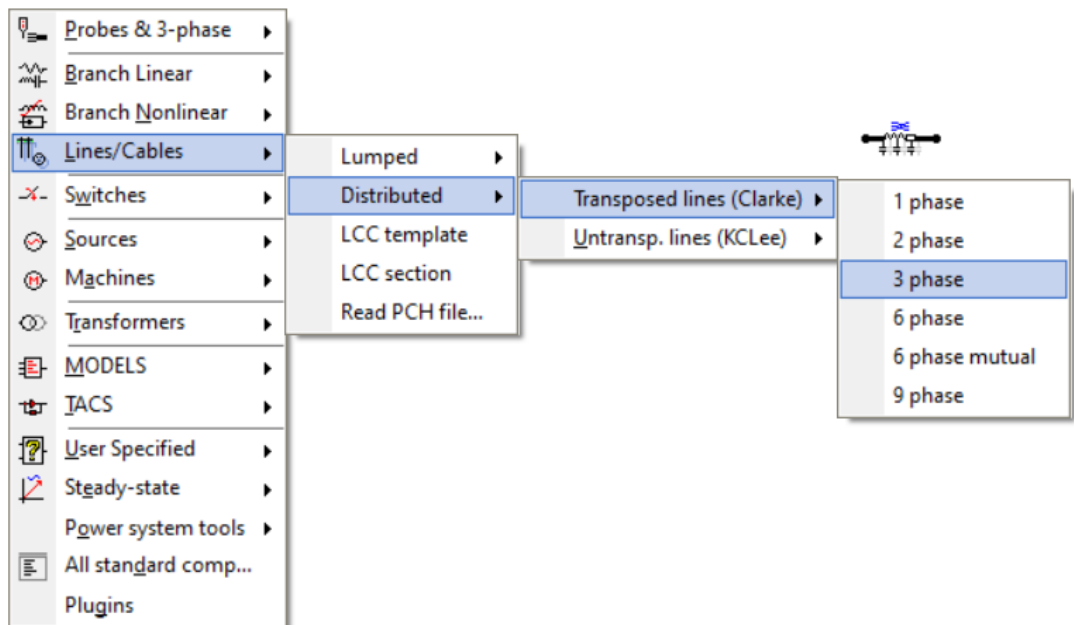
Fonte: Willian D. Stevenson, Jr. (1978).

A principal limitação dessa representação (parâmetros concentrados) são as simulações que ocorrem no tempo. É sabido que as linhas de transmissão são meios pelos quais ondas eletromagnéticas fluem, portanto, existe um intervalo de tempo entre a ocorrência de um evento em um terminal da linha e o aparecimento dos surtos no terminal oposto. Segundo Araújo (2005) uma linha de transmissão modelada conforme parâmetros distribuídos apresenta algumas características básicas.

Uma linha de transmissão tem seus parâmetros distribuídos ao longo da sua extensão. Qualquer perturbação gerada por chaveamentos ou descargas atmosféricas resulta na propagação de ondas pela linha. O efeito de uma variação de corrente ou tensão em qualquer dos terminais da linha não é sentido pelo outro até que ondas eletromagnéticas geradas por essa variação percorram todo o comprimento da linha. (Araújo, 2005, v. 1, p. 214).

Existem diversas maneiras de representar uma linha de transmissão com parâmetros distribuídos no software ATP. A mais comum é por meio do componente LINEZT_3. O mesmo pode ser encontrado no ATPDraw com um click no botão direito e seguindo as instruções da Figura 16.

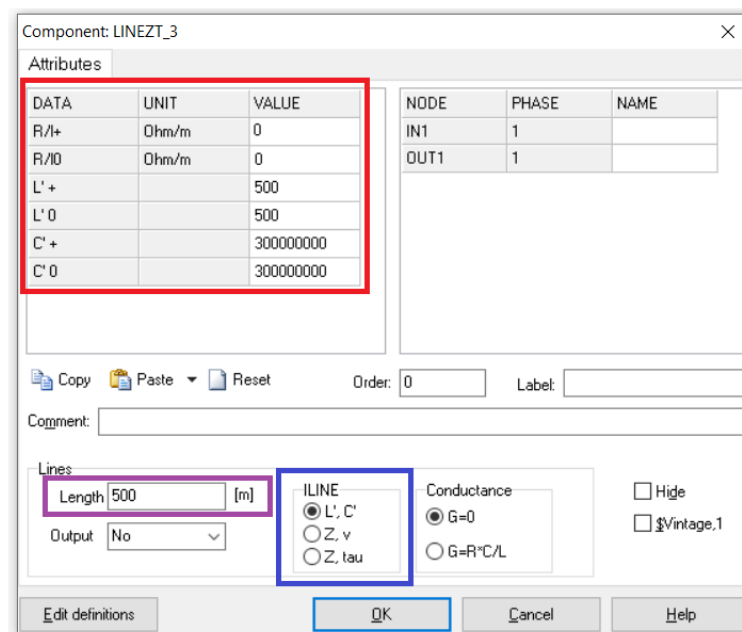
Figura 16 – Modelo de linha de transmissão com parâmetros distribuídos.



Fonte: Figura de autoria própria, ATPDraw 7.2 (2022).

A facilidade no uso desse componente se dá pelas entradas necessárias para uma modelagem completa da linha. A base de dados dos softwares ANAFAS e ANAREDE contém as informações necessárias para satisfazer esse modelo. É possível observar na figura 17 como são distribuídos os parâmetros de uma linha de transmissão no ATPDraw. Os valores da figura são os valores os valores padrão do componente.

Figura 17 – Caixa de diálogo do componente LINEZT_3.



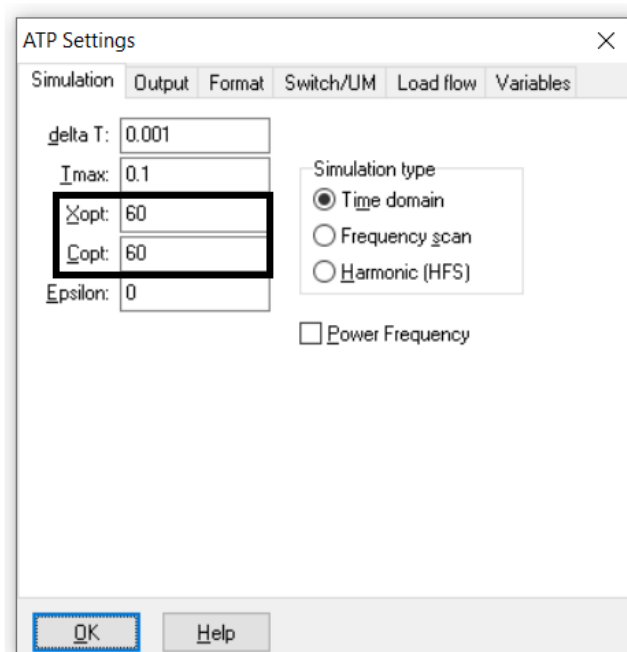
Fonte: Figura de autoria própria, ATPDraw 7.2 (2022).

A Figura 17 sintetiza os principais grupos de atenção na hora de parametrizar esse componente. Selecionando de forma conveniente as opções dispostas na caixa azul pode-se modelar a linha de transmissão com parâmetros conhecidos. O primeiro deles, e o mais usual, é a entrada dos parâmetros no formato de resistência, reatância e susceptância de sequência positiva e zero da linha de transmissão. É de extrema importância a inserção desses parâmetros de forma distribuída, isto é, reatância e susceptância por quilômetro de linha de transmissão.

A caixa destacada em roxo deve ser preenchida conforme o comprimento da linha de transmissão. Normalmente utilizada em quilômetros e não em metros.

Os dados que se encontram dentro da caixa vermelha determinam o comportamento da linha de transmissão. Para inserir os parâmetros de reatância [ohm] e susceptância [μ S] é necessário parametrizar as configurações da simulação da seguinte forma:

Figura 18 – Configuração inicial da simulação ATP. (ATPDraw)



Fonte: Figura de autoria própria, ATPDraw 7.2 (2022).

A Figura 18 indica como os parâmetros “*Xopt*” e “*Copt*” devem estar com os valores da frequência fundamental, caso contrário deve-se usar indutância em “mH” e capacitância em “ μ F”.

A modelagem de outros componentes do sistema pode ser feita de maneira mais simples, utilizando elementos de parâmetros concentrados para representar bancos de capacitores e reatores. Os transformadores contidos no equivalente de rede devem ser representados conforme explicado no Capítulo 4, utilizando uma curva de saturação (fluxo residual zero)

típica para aquele nível de tensão e potência nominal se os dados reais do transformador estiverem disponíveis.

Depois de entender como dever ser desenvolvido um equivalente de rede, será discutido as peculiaridades dos equivalentes de rede para cada estudo. De maneira geral o ONS (2013) recomenda a utilização de cenários de carga leve para a elaboração dos estudos de energização de linhas e transformadores, rejeição de carga, religamento tripolar e monopolar entre outros estudos. Essa recomendação visa a análise de situações que as sobretensões são o principal foco do estudo.

D'AJUZ (1987, p.100) apresenta uma tabela que menciona a magnitude das sobretensões alcançadas em cada tipo de manobra. Conforme referência, em manobras críticas os religamentos tripolares podem alcançar valores entre 3 e 5 p.u. e as energizações de linha apresentam valores entre 2 e 3 p.u. quando simuladas sem para-raios no terminal.

Os valores máximos atingidos por manobras de energização de transformadores estão por volta de 1,2 e 1,8 p.u.. Conclui-se que as solicitações do sistema devido à uma energização de transformador é bem inferiores às solicitações impostas pelas manobras supracitadas.

A coordenação de isolamento de uma subestação é feita com base em todos os estudos de transitórios eletromagnéticos apresentados e têm a função de determinar as máximas solicitações que podem ser impostas nos equipamentos terminais do empreendimento. Após esse mapeamento, o nível de isolamento de todos os componentes inseridos na subestação é dimensionado. A questão proposta nesse trabalho é a discussão do modelo a ser utilizado em estudos de energização de transformadores.

Conforme observado acima, é improvável que a energização de transformadores seja um estudo determinante na escolha do nível de isolamento dos equipamentos que serão instalados em uma nova subestação. Portanto, é possível fazer um questionamento em relação ao critério estabelecido para escolha da base de dados. Um cenário de carregamento leve pode influenciar de forma significativa as correntes de *Inrush*? Visto que as sobretensões causadas por energizações de transformadores não apresentam valores altos comparado a seus pares, vale a pena a preferência de maiores sobretensões em detrimento à correntes energização mais relevantes?

Os procedimentos de rede também deixam claro a responsabilidade das transmissoras na avaliação do uso de sincronizadores e resistores de pré-inserção nos bays de unidades transformadoras.

Dispositivos de manobra controlada em transformadores de potência tem a função de diminuir a corrente de *Inrush* quando a mesma apresenta valores críticos ou quando não há um

amortecimento satisfatório do transitório. Infelizmente não há uma referência que determine de forma objetiva quais valores de corrente danificam o transformador. Esses parâmetros serão discutidos nos próximos capítulos.

5 MÉTODO E PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

As simulações realizadas nesse trabalho visam avaliar como os parâmetros da rede influenciam a manobra de energização de transformadores. O sucesso dessa investigação passa pela capacidade de isolar o problema tornando o nível de curto-circuito da rede a única variável que acarreta mudanças significativas, enquanto o tempo de fechamento do disjuntor, fluxo residual contido no transformador e características magnéticas do núcleo devem permanecer iguais em todas as simulações.

As características intrínsecas ao transformador são constantes pois as simulações são feitas com o mesmo equipamento e com o mesmo laço de histerese. Esses parâmetros não serão fontes de erro ou distorções.

O grande desafio dessa simulação é contornar a diferença nos resultados obtidos causada pelos tempos de fechamento do disjuntor em redes com níveis de curto-circuito distintos.

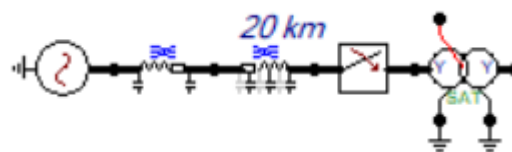
Em estudos de energização de transformadores usa-se uma metodologia estatística, isto é, o ATP simula um determinado número de vezes a mesma manobra variando apenas o ponto de fechamento do disjuntor. A questão é que essas simulações são feitas utilizando a mesma configuração de rede, o que torna essa metodologia inadequada para a investigação preterida nesse estudo.

Na direção de “diluir” essas diferenças será feito o uso de um recurso do software ATP para determinar de forma aleatória os tempos de fechamento dos disjuntores. Em paralelo, será realizado um grande número de simulações variando de forma ordenada os níveis de curto-circuito da rede com a intenção de diminuir a influência dos tempos de fechamento do disjuntor. Ao final dessa simulação será utilizado um Script em linguagem Python para mapear os resultados de corrente de *Inrush* e sobretensões no primário em função do nível de curto-circuito da rede.

Três conjuntos Transformador + Sistema serão avaliados nesse trabalho. As características intrínsecas dos transformadores e características magnéticas serão mantidas iguais em todas as simulações e conjuntos. Serão realizadas 1000 simulações desses três conjuntos “Transformador + Sistema” variando o nível de curto-circuito da fonte indutiva a cada simulação. O objetivo é varrer de forma gradual o nível de curto-circuito de 3000 ampéres (rede fraca, caracterizando carregamento leve) até 10000 ampéres (rede forte, caracterizando carregamento médio ou pesado).

Além disso, cada conjunto “Transformador + Sistema” apresenta uma característica diferente de assimetria de curto-circuito. O primeiro conjunto apresentará uma relação X/R de 5 (uma rede bem amortecida, com a componente resistiva bem representada), o segundo conjunto apresenta uma relação X/R de 15 (uma rede amortecida, mas com características mais realistas) e o terceiro conjunto apresenta uma relação X/R de 40 (uma rede pouco amortecida, normalmente sem representação resistiva de máquinas síncronas e transformadores).

Figura 19 – Conjunto Transformador + Sistema.



Fonte: Figura de autoria própria, ATPDraw 7.2 (2022).

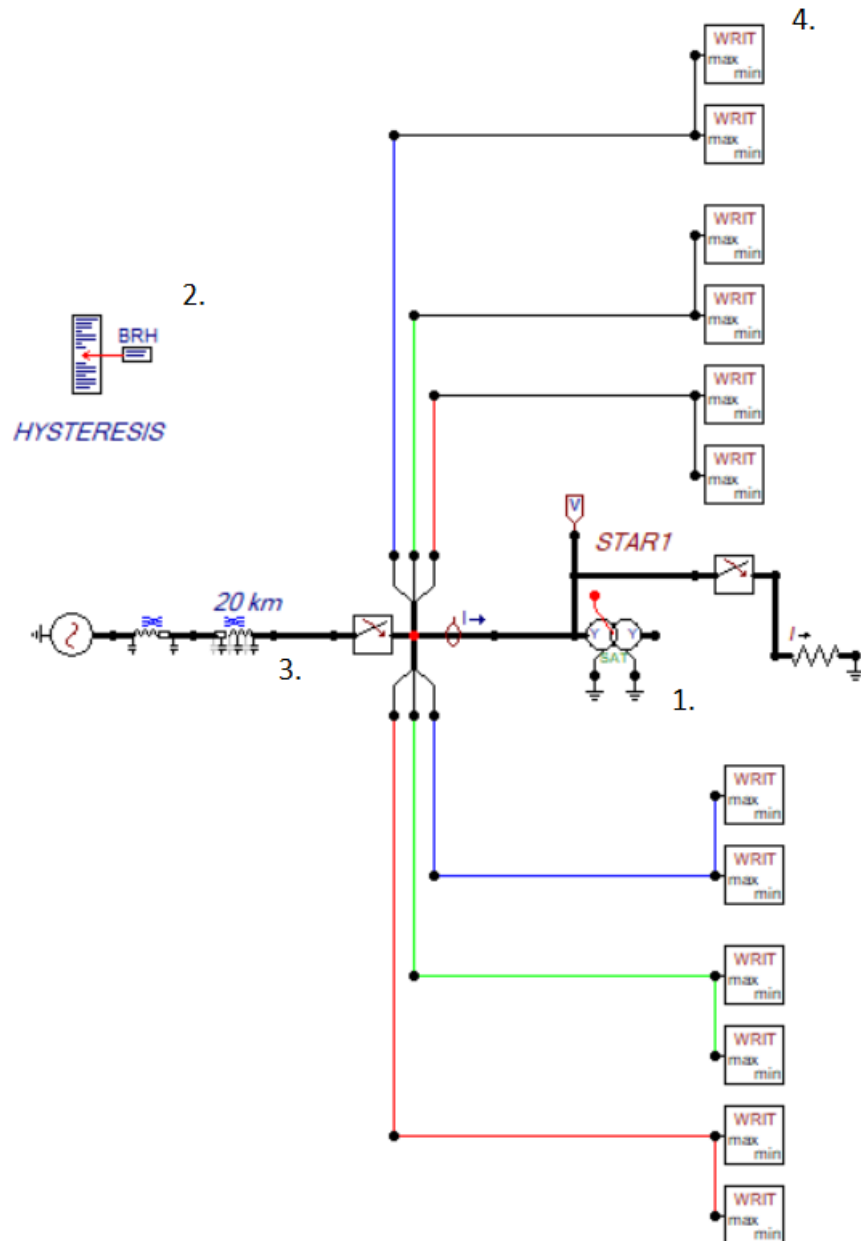
O tempo de fechamento do disjuntor será representado por uma distribuição uniforme que contempla o ciclo completo da senoide em 60 Hz. Os tempos de fechamento têm uma distribuição normal independente, portanto, os tempos de fechamento das fases A, B e C não apresentam nenhuma correlação entre eles.

O resultado será apresentado de duas formas. A primeira abordagem é uma análise em conjunto. Todos os pontos são analisados e apresentados em dois gráficos contemplando os resultados de sobretensão e corrente de energização em função do nível de curto-circuito do sistema, diferenciando o resultado de cada conjunto “Transformador + Sistema” por cores. Apresenta-se também uma função de primeiro grau que representa o comportamento médio dos resultados obtidos. Cada conjunto “Transformador + Sistema” é analisado de forma individual e uma função de primeiro grau é explicitada para as variáveis em questão.

O segundo método de análise leva em conta 3 níveis de curto-circuito. Além dos valores mínimos e máximos de curto-circuito um valor intermediário é utilizado em uma análise determinística. Os conjuntos “Transformador + Sistema” são manobrados de forma a extrair o pior resultado de corrente de energização e os resultados são comparados em um gráfico comparando os resultados obtidos por meio das simulações. O tempo escolhido para o fechamento dos polos dos disjuntores está de acordo com Fröhlich (1999).

Primeiramente será realizado uma explanação dos circuitos montados no ATPDraw, quais parâmetros não variáveis foram escolhidos e como as simulações devem ocorrer. A Figura 20 apresenta os componentes constantes nas sucessivas simulações em evidência (números posicionados ao lado do componente). Os dados de entrada de cada componente serão explicados abaixo.

Figura 20 – Simulação representada no ATPDraw.



Fonte: Figura de autoria própria, ATPDraw 7.2 (2022).

1. Transformador (SATTRAFO): os parâmetros utilizados são típicos para o nível de tensão e potência nominal do equipamento.

Tabela 2 – Características do Transformador utilizado na simulação.

Impedância		
Xps	14	[%]
Xp	7	[%]
Xs	7	[%]
Xp	13.8863	[Ohm]
Xs	2.2218	[Ohm]
Rp	0.2777	[Ohm]
Rs	0.0444	[Ohm]
Primário	Y	
Secundário	Y	
Potência 3 θ	600	MVA
X/R	50	

Fonte: Figura de autoria própria, Excel (2022).

Figura 21 – Parametrização do SATTRAFO.

The screenshot shows the 'Saturable transformer: SATTRAFO' dialog box. It has two tabs: 'Attributes' and 'Characteristic'. The 'Characteristic' tab is active, showing a table with columns 'Prim.', 'Sec.', and 'Value'. The values are: U [V] (199.1858, 79.67434), R [ohm] (0.2777, 0.0444), and L [ohm] (13.8863, 2.2218). Below this table are settings for Coupling (Y, Y), Phase shift (0, 30), and checkboxes for I(0)=0, Rm=0, F(0)=0, RMS, 3-winding, and 3-leg core. On the right, there is a table with columns 'NODE', 'PHASE', and 'NAME'. The rows are: Primary (ABC, X0016), Secondary (ABC, X0007), Starpoint (ABC, STAR1), Prim-N (1), and Sec-N (1). At the bottom, there are fields for Order (64) and Label, a Comment field (TR 345-138 kV 600 MVA), an Output dropdown (0 - No), and a Hide checkbox. Buttons for 'Edit definitions', 'OK', 'Cancel', and 'Help' are at the bottom.

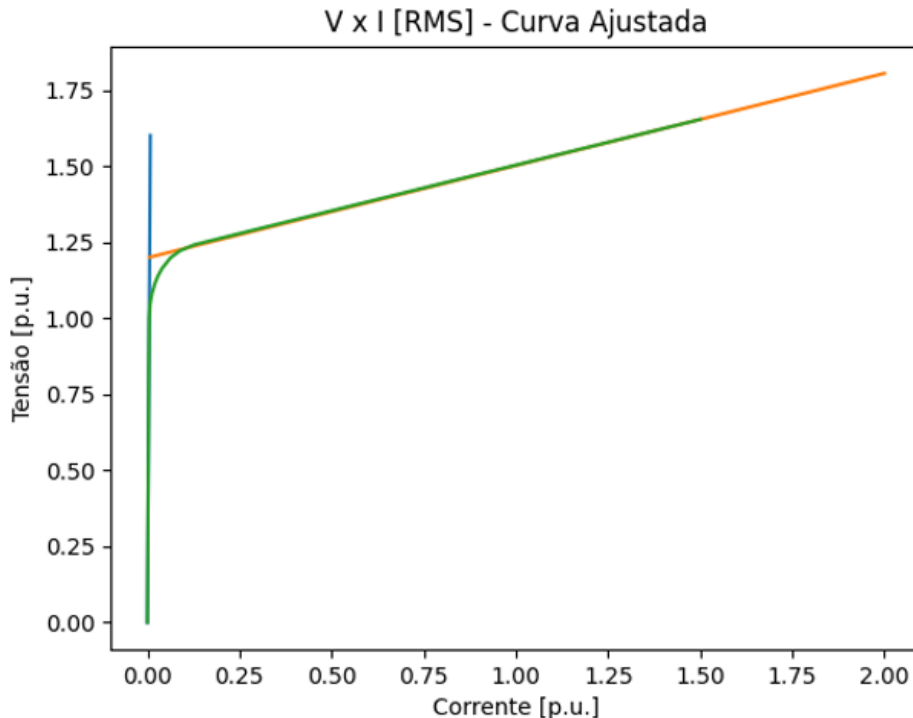
Fonte: Figura de autoria própria, ATPDraw 7.2 (2022).

Lê-se na Tabela 2 os parâmetros de sequência positiva do transformador. Esses dados são utilizados para modelar as reatâncias e resistências do equipamento. Esses dados são obtidos por meio do ensaio de curto-circuito. Lê-se na Figura 21 a utilização desses dados no componente “SATTRAFO”, disponível no ATPDraw.

2. Laço de Histerese: As características magnéticas serão consideradas utilizando a rotina “*HYSTERESIS HEVIA*” e anexada na simulação por meio de um cartão “*Additional*”. A curva de Saturação utilizada como referência para a utilização na rotina apresenta as seguintes características:

- a. Reatância de Núcleo de Ar: 30%;
- b. Joelho: 1,2 p.u.;
- c. Corrente a Vazio: 1%;
- d. Nível de Tensão: 345 kV;
- e. Potência Monofásica: 200 MVA;
- f. Fluxo Residual: 60%.

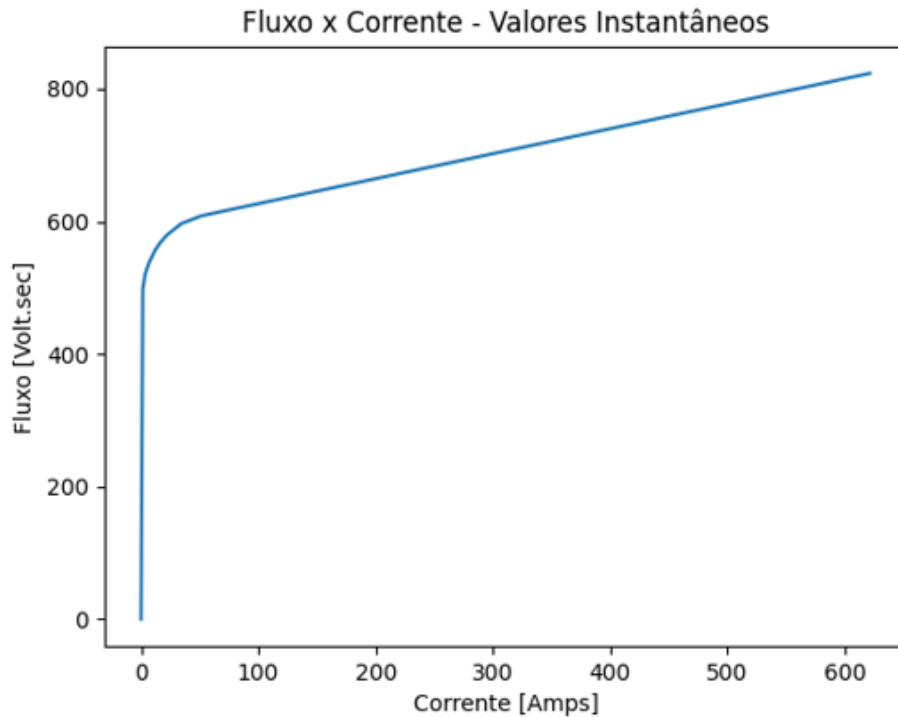
Figura 22 – Curva de Magnetização (V [p.u.] x I [p.u.]).



Fonte: Figura de autoria própria, Python (2022).

A curva apresentada na Figura 22 representa o comportamento magnético não-linear do núcleo ferromagnético do transformador. Esse comportamento está explícito por meio de um gráfico V [p.u.] x I [p.u.]. Os pontos utilizados para construção desse gráfico podem ser encontrados no APÊNDICE A.

Figura 23 – Curva de Magnetização (λ [Volt.sec] x I [Amperes]).



Fonte: Figura de autoria própria, Python (2022).

A curva apresentada na Figura 23 representa o comportamento magnético não-linear do núcleo ferromagnético do transformador. Esse comportamento está explícito por meio de um gráfico λ [Volt.sec] x I [Amperes]. Os pontos utilizados para construção desse gráfico podem ser encontrados no APÊNDICE B e são resultado da rotina “SATURA” do ATP.

A rotina “HYSTERESIS HEVIA”, utilizada para adicionar o fluxo residual de 60% no comportamento ferromagnético explícito na Figura 22 e na Figura 23 está disponível no APÊNDICE C. A saída da rotina “HYSTERESIS HEVIA” pode ser encontrada no APÊNDICE D.

3. Linha de Transmissão: A Linha de Transmissão utilizada na simulação foi retirada das bases de dados do ONS. BR2512PE (ONS, 2022, C) e ONS * PARPEL 2022-2026 * VERÃO 2025/2026 PESADA * (ONS, 2022, C). Os parâmetros de sequência positiva e sequência zero estão disponíveis na Tabela 3 e na Tabela 4.

Tabela 3 – Parâmetros da Linha de Transmissão 345 kV. Valores em %.

LT 345 kV Lagos - Macaé			Unidade
Sequência	Positiva	Zero	
Resistência	0.056	0.635	%
Reatância	0.613	2.45	%
Susceptância	11.678	--	MVar

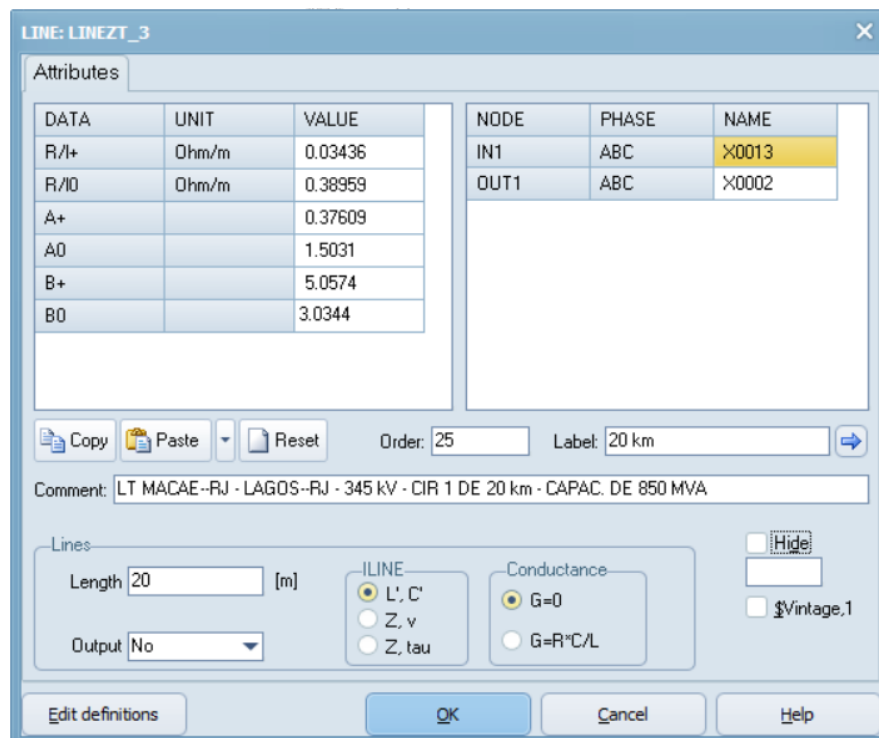
Fonte: Tabela de autoria própria, Excel (2022).

Tabela 4 – Parâmetros da Linha de Transmissão 345 kV. Valores em Ohm.

LT 345 kV Lagos - Macaé			Unidade
Sequência	Positiva	Zero	
Resistência	0.03436	0.38959	ohm/km
Reatância	0.37609	1.5031	ohm/km
Susceptância	5.0574	3.0344	μ S/km

Fonte: Tabela de autoria própria, Excel (2022).

Figura 24 – Parametrização da linha de transmissão. LINEZT_3.



Fonte: Figura de autoria própria, ATPDraw 7.2(2022).

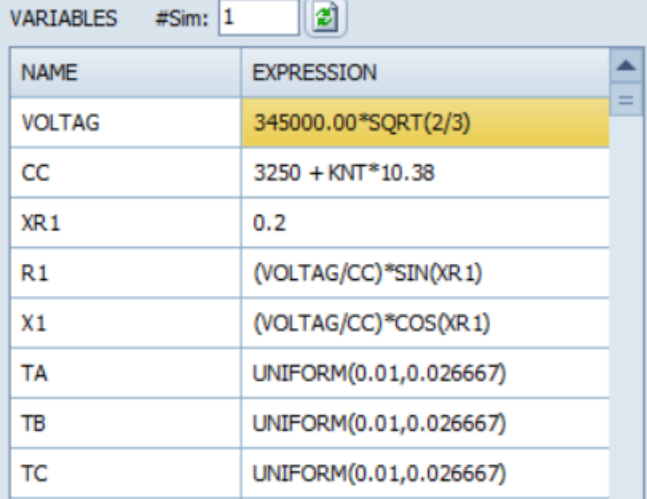
4. WRITE MAX MIN: Esse componente não interfere de forma ativa nos resultados. Ele foi utilizado para obtenção dos dados de sobretensão e corrente de *Inrush*

em cada simulação. Cada componente desse é responsável por medir os sinais máximos ou mínimos de corrente ou tensão em cada fase, portanto, são necessários 6 (seis) componentes para medir as sobretensões e 6 (seis) componentes para medir as correntes de energização em cada conjunto “Transformador + Sistema”.

É possível utilizar esses dados de duas formas, a primeira é copiando os dados diretamente do componente e tratá-los no Excel utilizando o botão “Copy”. A segunda é elaborar um script (no caso foi utilizado linguagem Python) para ler os arquivos “.lis” de cada simulação e apresentar apenas o maior resultado de corrente de energização e sobretensão no primário para cada caso simulado. Esse assunto será abordado novamente, visto que o script será utilizado para tratar os dados de forma a possibilitar uma representação gráfica dos resultados.

Fazendo o uso da última versão disponível do ATPDraw é possível encontrar, já na primeira tela do software, a tabela disponível na Figura 25. A lacuna “#Sim” deve ser completada com o número de simulações sucessivas a serem realizadas. Cada simulação realizada apresenta a variável KNT, que têm o seu valor incrementado em um a cada vez que uma nova simulação ocorre. A primeira simulação apresenta um KNT igual a 1 (um), a segunda simulação apresenta um KNT igual a 2 (dois) e assim sucessivamente. Esse recurso foi utilizado para aumentar gradualmente o nível de curto-circuito da simulação.

Figura 25 – Variáveis e expressões utilizadas.



NAME	EXPRESSION
VOLTAG	345000.00*SQRT(2/3)
CC	3250 + KNT*10.38
XR1	0.2
R1	(VOLTAG/CC)*SIN(XR1)
X1	(VOLTAG/CC)*COS(XR1)
TA	UNIFORM(0.01,0.026667)
TB	UNIFORM(0.01,0.026667)
TC	UNIFORM(0.01,0.026667)

Fonte: Figura de autoria própria, ATPDraw 7.2(2022).

A Figura 25 apresenta as variáveis utilizadas na investigação e serão explicadas de maneira detalhada mais a frente nesse trabalho. Agora será detalhado todo parâmetro não

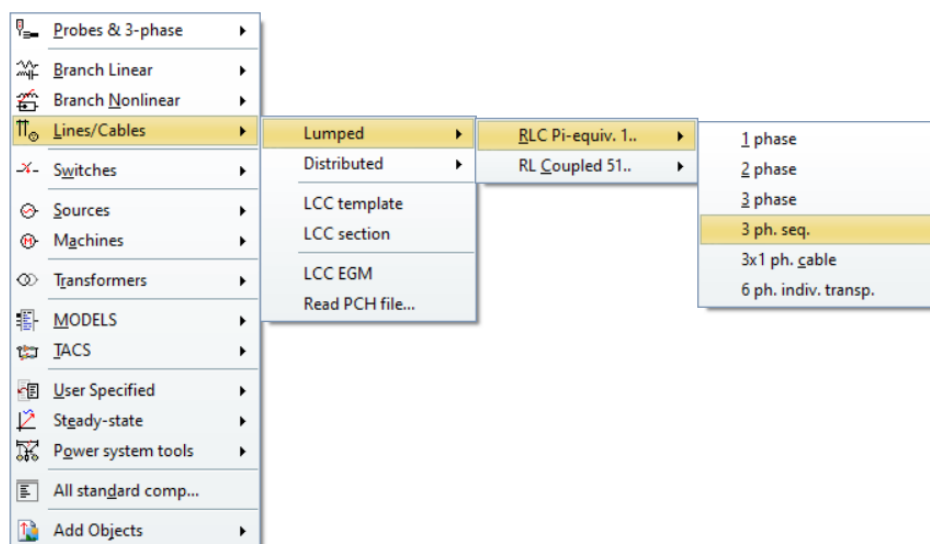
variável dessa simulação. E qual o procedimento utilizado para chegar aos resultados expostos no Capítulo 6.

A primeira linha da tabela “*Variables*” exposta na Figura 25 apresenta o nível de tensão do sistema utilizado por meio da constante “VOLTAG”. O nível de tensão das simulações será sempre o mesmo e esse valor será utilizado nos cálculos envolvendo os parâmetros da fonte indutiva.

A variável “CC” é responsável por determinar o nível de curto-circuito do sistema (caso o mesmo fosse representado apenas por uma fonte indutiva, excluindo a LT 345 kV de 20 km da análise). Essa variável será utilizada no cálculo das componentes de sequência positiva e zero da impedância de cada conjunto. Esses cálculos são feitos logo em sequência e levam em consideração a razão X/R de cada conjunto.

A impedância conectada à fonte será representada por um modelo PI de linha de transmissão, denominado no ATPDraw por “LINEPI3S”, portanto é considerado um componente concentrado sem distribuição das suas características pela distância. Esse componente pode ser encontrado no ATPDraw seguindo as instruções da Figura 26.

Figura 26 – Linha de Transmissão Modelo PI.



Fonte: Figura de autoria própria, ATPDraw 7.2 (2022).

A Figura 26 apresenta a localização dos modelos de linha de transmissão com parâmetros concentrados que podem ser encontrados no ATPDraw, dando ênfase ao modelo trifásico com parâmetros de sequência positiva e sequência zero.

Tomando como base o primeiro conjunto ($X/R = 5$), pode-se desenvolver os cálculos necessários para determinar os parâmetros da fonte.

Considerando $KNT = 1$, a variável CC apresenta um valor de 3260,58 A. Para determinar os valores de R1 e X1, é necessário realizar os seguintes cálculos.

$$R = \text{VOLTAG/CC} * \text{SEN}(1/(X/R)) \quad (4)$$

$$R1 = 345000 * \text{RAIZ}(2/3) / 3260,58 * \text{SEN}(0,2)$$

$$R1 = 281691,32 / 3260,58 * 0,198669$$

$$R1 = 86,3983 * 0,198669$$

$$R1 = 17,16$$

$$X = \text{VOLTAG/CC} * \text{COS}(1/(X/R)) \quad (5)$$

$$X1 = 345000 * \text{RAIZ}(2/3) / 3260,58 * \text{COS}(0,2)$$

$$X1 = 281691,32 / 3260,58 * 0,980067$$

$$X1 = 86,3983 * 0,980067$$

$$X1 = 84,67 \Omega$$

Esses valores são utilizados para modelar a impedância conectada diretamente à fonte e são responsáveis por variar o nível de curto-circuito em cada simulação. Essas variáveis são referenciadas diretamente no modelo conforme Figura 27. É possível observar que para cada simulação haverá um valor diferente de impedância uma vez que o nível de curto-circuito será diferente.

Figura 27 – Parâmetros da Impedância da Fonte.

The screenshot shows the 'LINE: LINEPI35' dialog box with the following data:

DATA	UNIT	VALUE
R0	Ohm/m	R1
L0	Ohm/m	X1
C0	μS/m	0
R+	Ohm/m	R1
L+	Ohm/m	X1
C+	μS/m	0

NODE	PHASE	NAME
In	ABC	X0001
Out	ABC	X0002

Additional fields in the dialog include: Order: 0, Label: (empty), Comment: (empty), Length: 1 [m], and checkboxes for Hide and \$Vintage,1.

Fonte: Figura de autoria própria, ATPDraw 7.2 (2022).

As simulações realizadas contemplarão os níveis de curto-circuito entre 3000 A e 10000 A. Para essa condição ser atingida é necessário que as 1000 simulações acrescentem 10,38 A no nível de curto-circuito da fonte indutiva a cada simulação.

Utilizando o primeiro ponto como base de cálculo, o procedimento inverso será realizado e o nível de curto-circuito do sistema será encontrado por meio dos cálculos a seguir. Se aplicado uma falta no final da linha de transmissão é possível obter a impedância vista pelo curto-circuito pela soma da impedância da linha e da impedância da fonte indutiva. Utilizando as equações (4) e (5), é possível obter os valores de resistência e reatância da fonte indutiva, portanto é necessário o cálculo dos parâmetros da linha de transmissão.

$$R_{\text{Linha}} = 0,03436 * 20 = 0,6872 \Omega$$

$$X_{\text{Linha}} = 0,37609 * 20 = 7,5218 \Omega$$

Portanto, se as componentes resistivas e reativas forem somadas entre si, os seguintes parâmetros de simulação serão utilizados:

$$R_{\text{Total}} = R1 + R_{\text{Linha}}$$

$$R_{\text{Total}} = 17,16 + 0,6872 = 17,8472 \Omega$$

$$X_{\text{Total}} = X1 + X_{\text{Linha}}$$

$$X_{\text{Total}} = 84,67 + 7,5218 = 92,1918 \Omega$$

$$Z_{Total} = \sqrt{R_{Total}^2 + X_{Total}^2}$$

$$Z_{Total} = 93,91 \, \Omega$$

$$I_{cc} = V_{Nominal} / Z_{Total} = 281691,32 / 93,91 = 2999,5 \, A \cong 3000 \, A$$

O tempo de fechamento dos disjuntores, será determinado por uma distribuição uniforme que abrange todo o ciclo da onda de tensão em 60 Hz. Sabendo que o tempo necessário para uma onda com frequência fundamental de 60 Hz completar 1 ciclo é de 1/60 segundos (16,6667 ms) pode-se escolher qualquer valor para a distribuição normal, contanto que o intervalo amostral seja de 16,6667 ms. Respeitando essa condição, todos os pontos da onda periódica serão contemplados.

Os tempos de fechamento do disjuntor serão determinados pela função “UNIFORM” disponível no Rule Book. Essa função utiliza dois parâmetros e retorna um valor aleatório entre eles.

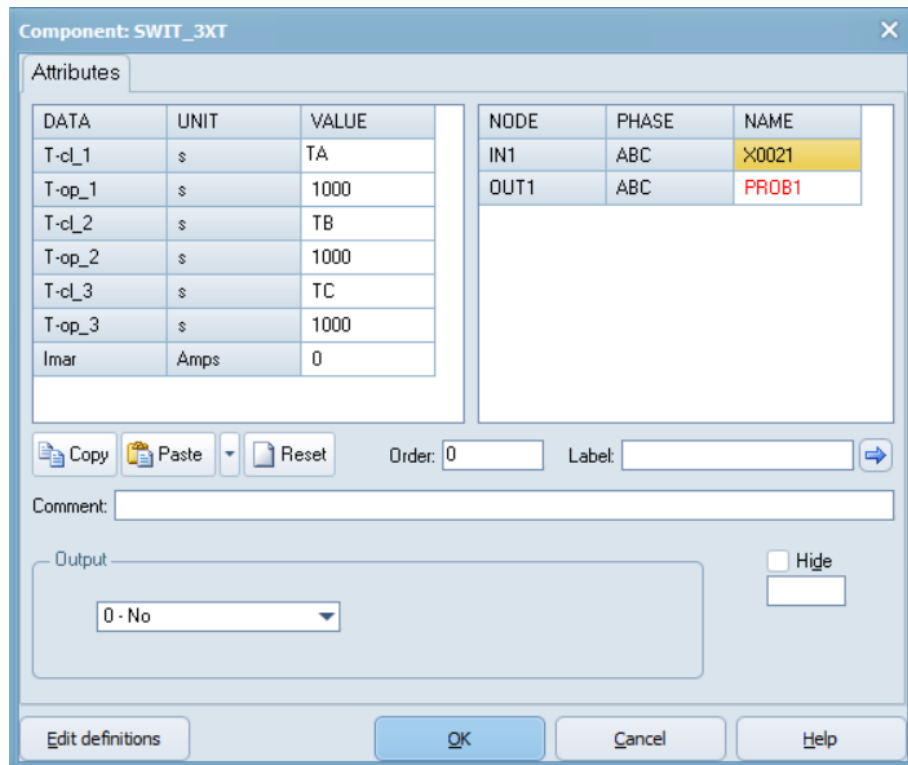
$$TA = \text{UNIFORM}(0.01, 0.026667) \quad (6)$$

$$TB = \text{UNIFORM}(0.01, 0.026667) \quad (7)$$

$$TC = \text{UNIFORM}(0.01, 0.026667) \quad (8)$$

As equações (6), (7) e (8) demonstram que os tempos de fechamento do disjuntor podem variar entre 0,01 e 0.026667 segundos. O Intervalo é suficiente para contemplar todos os pontos da senoide. Essas variáveis são referenciadas diretamente no modelo de disjuntor conforme Figura 28.

Figura 28 – Modelo de Disjunto, tempo de fechamento uniforme.



Fonte: Figura de autoria própria, ATPDraw 7.2 (2022).

A Figura 28 apresenta o modelo de chave trifásica controlada disponível no ATPDraw. Esse componente pode ser utilizado para fechamentos e aberturas de circuitos de forma determinística. Nesse exemplo, o parâmetro de fechamento está variando conforme uma distribuição uniforme e independente entre as fases A, B e C.

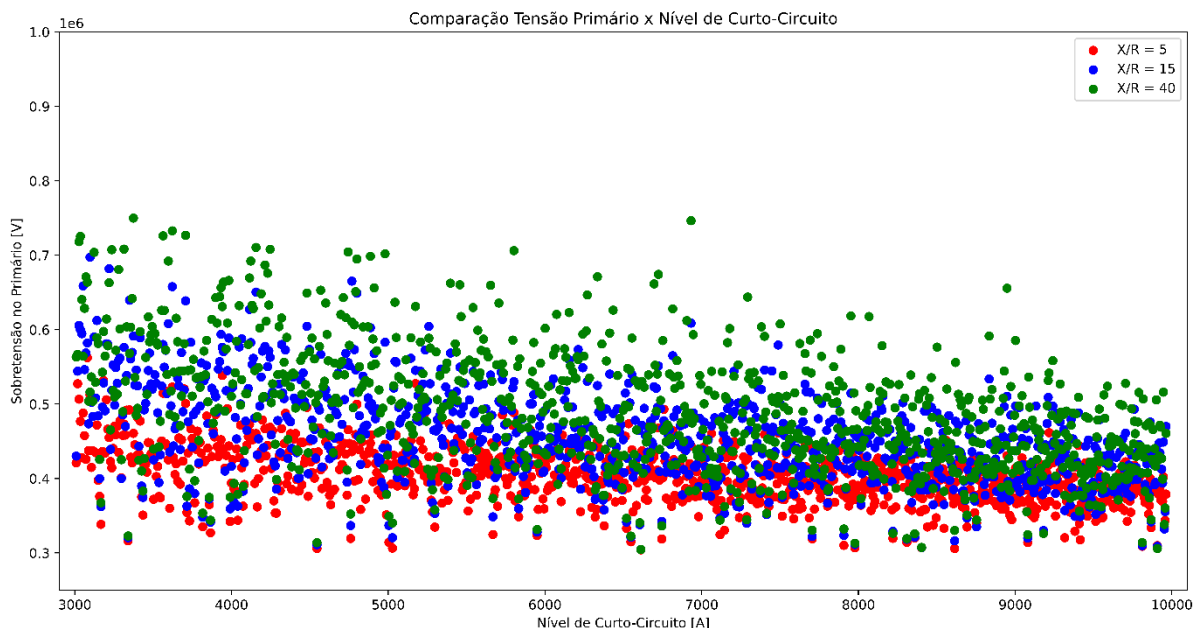
6 RESULTADOS

Esse estudo apresenta um caráter probabilístico, portanto, a investigação individual entre dois pontos só faz sentido se o tempo de fechamento entre eles for o mesmo. Nesse trabalho será realizado a investigação de duas formas. A primeira é apresentando o comportamento individual das 1000 simulações realizadas por meio de dois gráficos. Um contendo os valores máximos de corrente de energização em função do nível de curto-circuito e outro contendo os valores de tensão no terminal primário do transformador em função do nível de curto-circuito.

Com esses dados disponíveis é possível realizar uma regressão linear e caracterizar o comportamento médio das duas variáveis supracitadas em função do nível de curto-circuito.

A segunda investigação será realizada por meio de 3 (três) simulações determinísticas, efetuando o fechamento dos transformadores de forma a maximizar as correntes de *Inrush*.

Figura 29 – Maiores sobretensões calculadas em cada simulação.

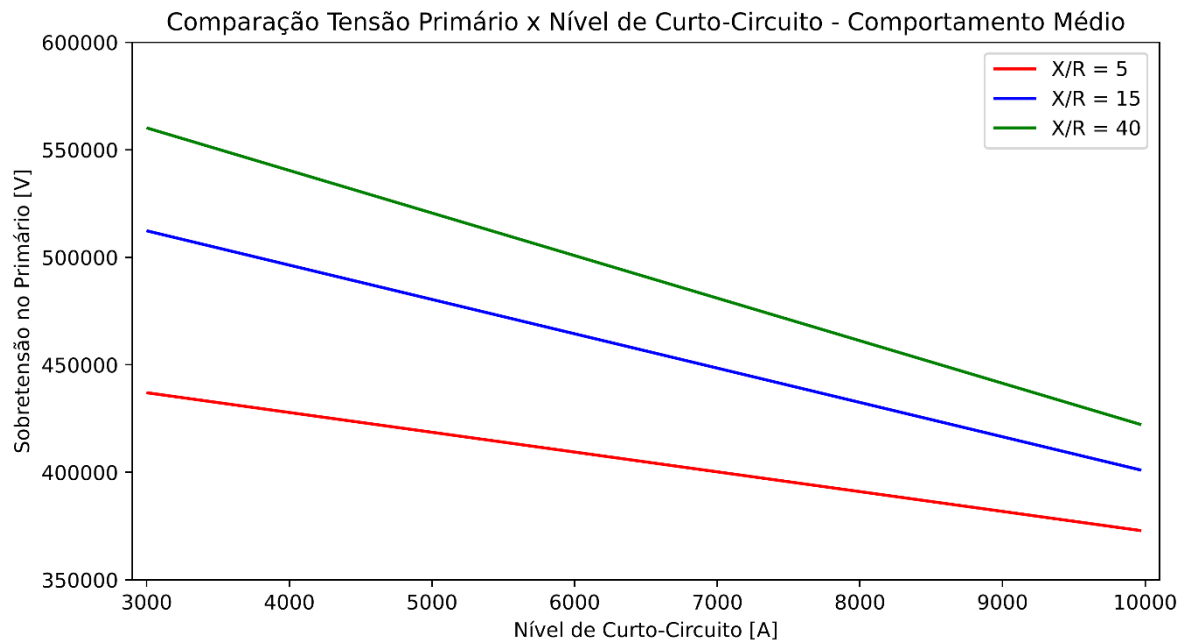


Fonte: Figura de autoria própria, Python (2022).

Na Figura 29 é possível observar as máximas sobretensões encontradas em cada simulação, sendo distribuídas conforme o nível de curto-circuito calculado para cada caso. É possível observar uma tendência de diminuição das sobretensões conforme o nível de curto-circuito aumenta, confirmando assim as recomendações do ONS (2013). A diferença nos

resultados obtidos por conta de diferentes relações de X/R mostra que sistemas mais amortecidos, isto é, com relações X/R mais baixas apresentam resultados de sobretensão menores.

Figura 30 – Regressão Linear dos resultados adquiridos.



Fonte: Figura de autoria própria, Python (2022).

$$\text{Tensão (X/R: 5)} = 464649,17 + \text{CC} * (-9,201056) \text{ [V]} \quad (9)$$

$$\text{Tensão (X/R: 15)} = 560254,36 + \text{CC} * (-15,966509) \text{ [V]} \quad (10)$$

$$\text{Tensão (X/R: 40)} = 619599,51 + \text{CC} * (-19,796848) \text{ [V]} \quad (11)$$

A Figura 30 apresenta o valor médio das sobretensões em função do nível de curto-circuito e confirma a tendência observada da Figura 29. Fica claro que o resultado médio das sobretensões diminui conforme o nível de curto-circuito aumenta. Utilizando a equação (10) e um nível de curto circuito de 8000 Amperes é possível realizar o seguinte cálculo.

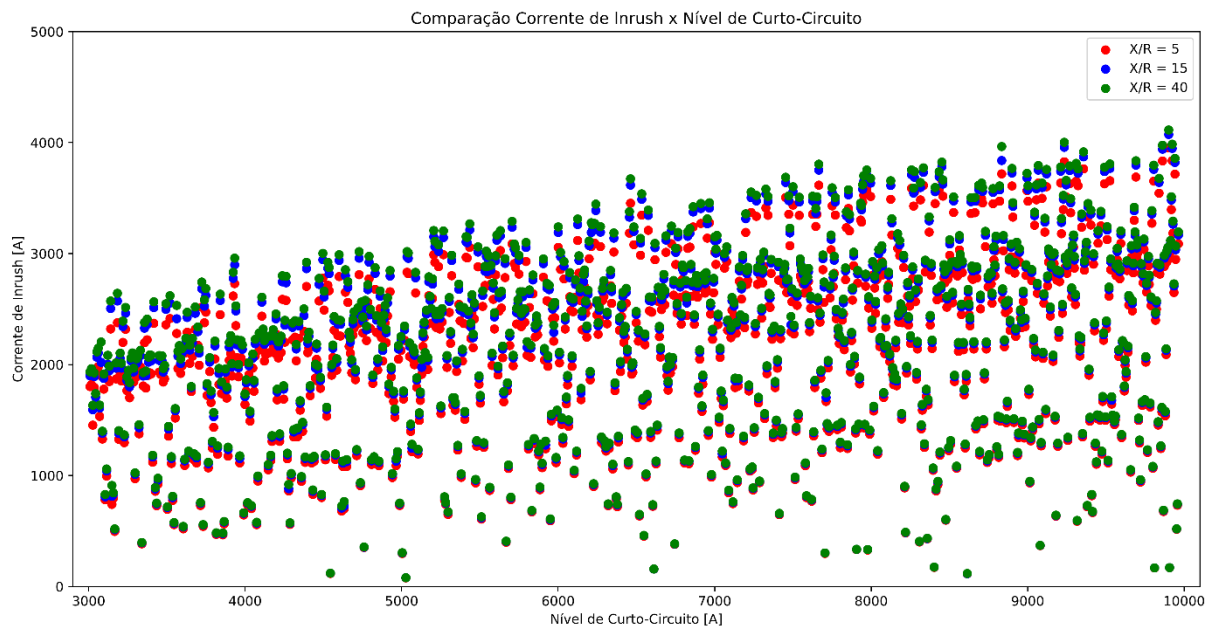
$$\text{Tensão} = 560254,36 + \text{CC} * (-15,966509)$$

$$\text{Tensão} = 560254,36 + 8000 * (-15,966509)$$

$$\text{Tensão} = 560254,36 - 127732,072 = 432522,3 \text{ V}$$

O valor médio encontrado nas energizações com um nível de curto-circuito igual a 8000 Amperes é de aproximadamente 430 kV o que representa 1,54 p.u. da tensão nominal.

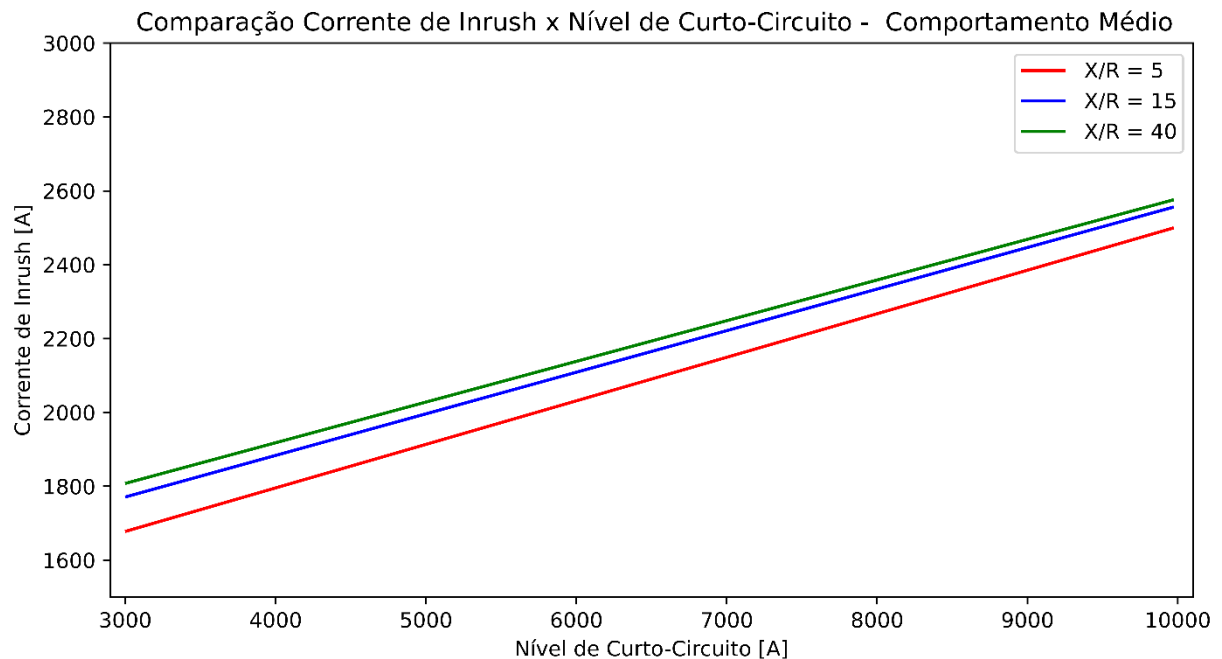
Figura 31 – Maiores correntes de energização calculadas em cada simulação.



Fonte: Figura de autoria própria, Python (2022).

Na Figura 31 é possível observar as máximas correntes de energização encontradas em cada simulação, sendo distribuídas conforme o nível de curto-circuito calculado para cada caso. É possível observar um aumento das correntes de energização conforme o nível de curto-circuito aumenta, correspondendo às expectativas desse trabalho. A diferença nos resultados obtidos por conta de diferentes relações de X/R mostra que sistemas mais amortecidos, isto é, com relações X/R mais baixas apresentam correntes de energização menores.

Figura 32 – Regressão Linear dos resultados adquiridos.



Fonte: Figura de autoria própria, Python (2022).

$$\text{Corrente (X/R: 5)} = 1324,09 + \text{CC} * 0,117891 \text{ [A]} \quad (12)$$

$$\text{Corrente (X/R: 15)} = 1433,23 + \text{CC} * 0,112603 \text{ [A]} \quad (13)$$

$$\text{Corrente (X/R: 40)} = 1477,30 + \text{CC} * 0,110161 \text{ [A]} \quad (14)$$

A Figura 32 apresenta o valor médio das correntes de energização em função do nível de curto-circuito e confirma a tendência observada da Figura 31. Fica claro que o resultado médio das correntes de energização aumenta conforme o nível de curto-circuito aumenta. Utilizando a equação (13) e um nível de curto circuito de 8000 Amperes é possível realizar o seguinte cálculo.

$$\text{Corrente} = 1433,23 + \text{CC} * 0,112603$$

$$\text{Corrente} = 1433,23 + 8000 * 0,112603$$

$$\text{Corrente} = 1433,23 + 900,82 = 2334,05 \text{ A}$$

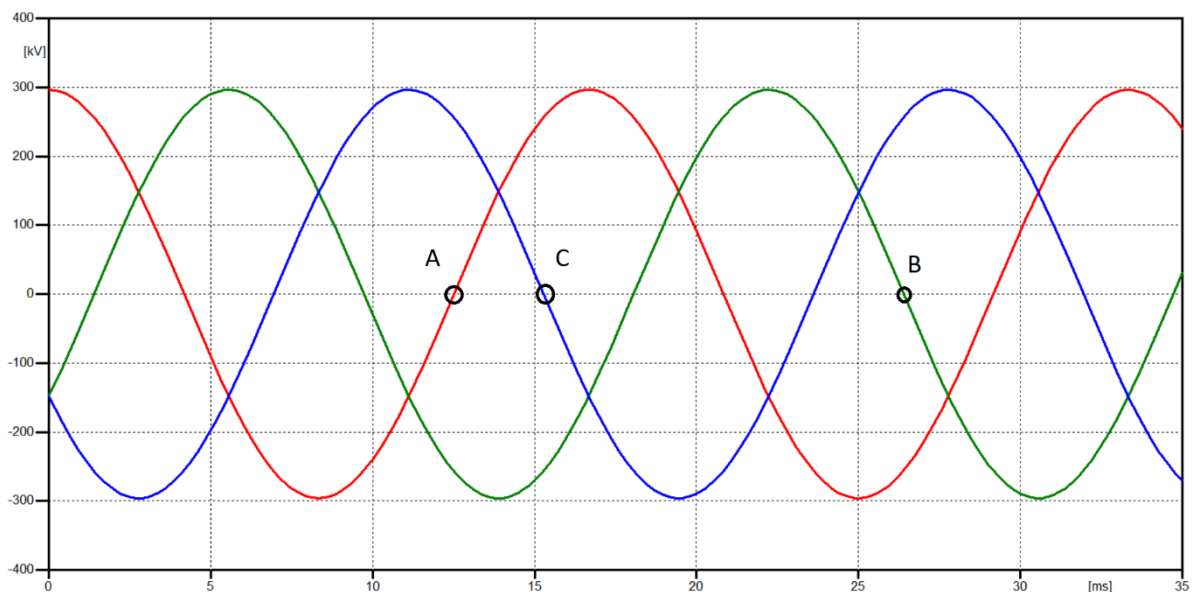
Portanto o valor médio de corrente de energização encontrado nas energizações com um nível de curto-circuito igual a 8000 Amperes é de 2334 Amperes, o que representa 3,28 p.u. da corrente nominal do equipamento.

Para finalizar as análises de forma mais assertiva, serão considerados três níveis de curto-circuito (3 kA, 6,5 kA e 10 kA) e as simulações determinísticas serão realizadas na

direção de obter os maiores valores de corrente de energização. A comparação gráfica será feita entre as fases que apresentaram maiores valores de corrente.

A simulação considera o fechamento dos polos do disjuncto no zero de tensão, pois é a pior situação para o transformador uma vez que o fluxo prospectivo da rede se soma ao fluxo residual do transformador, alcançando assim um alto valor de fluxo concatenado no equipamento. A fase A será manobrada no zero da curva de tensão no final do semiciclo negativo e início do semiciclo positivo. Isso ocorre porque o fluxo residual na fase A é positivo e neste ponto o fluxo prospectivo está em seu menor valor o que significa que alcançará o valor de pico um semiciclo depois. As fases B e C serão manobradas no zero da curva de tensão no início do semiciclo negativo e final do semiciclo positivo. Isso ocorre porque o fluxo residual na fase B e na fase C é negativo e neste ponto o fluxo prospectivo está em seu maior valor o que significa que alcançará o valor de pico (negativo) um semiciclo depois.

Figura 33 – Pontos de fechamento nas simulações determinísticas.



Fonte: Figura de autoria própria, Python (2022).

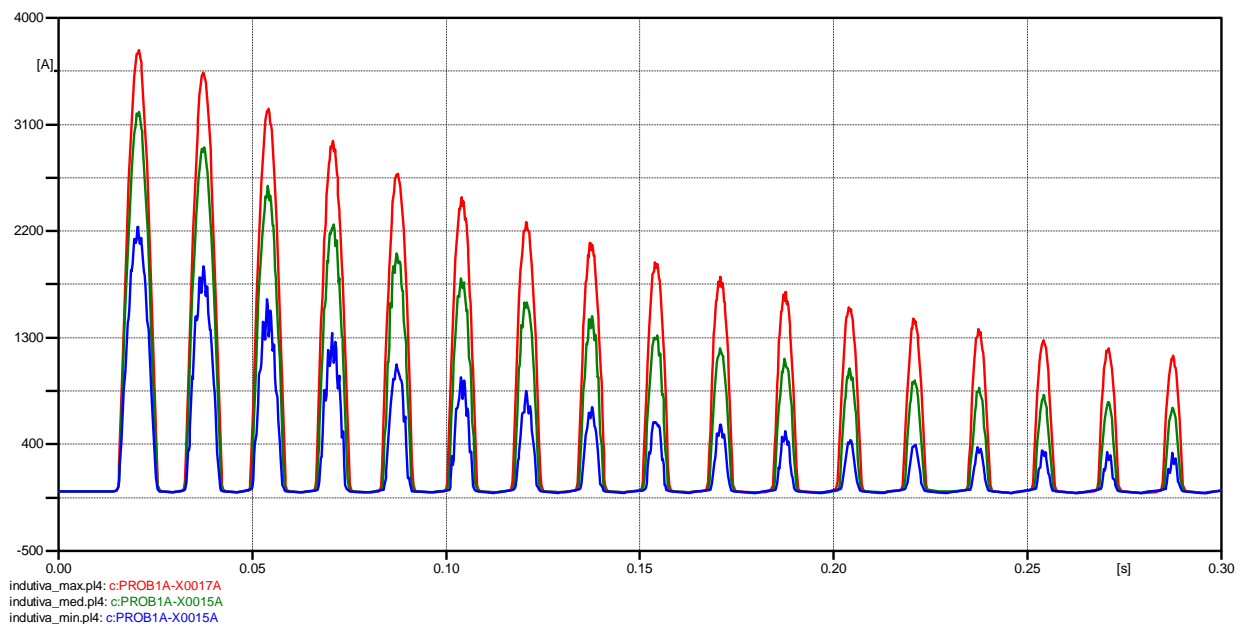
Tabela 4 – Máximas correntes de energização em diferentes níveis de CC.

Corrente de Inrush						
Nível de CC	X/R = 5	p.u.	X/R = 15	p.u.	X/R = 40	p.u.
3000	2236.5 [A]	3.15	2386.6 [A]	3.36	2537.7 [A]	3.57
6500	3202.7 [A]	4.51	3344.8 [A]	4.71	3481.7 [A]	4.90
10000	3728.1 [A]	5.25	3858.2 [A]	5.43	3968.5 [A]	5.59

Fonte: Tabela de autoria própria, Excel (2022).

Esses foram os resultados das simulações contemplando os tempos de fechamento que proporcionam maiores correntes de *Inrush* para cada transformador. Abaixo encontra-se as comparações das maiores correntes de energização separadas pela relação X/R.

Figura 34 – Comparação da corrente de energização em diferentes níveis de curto-circuito. X/R = 5.



Fonte: Figura de autoria própria, Plotxwin (2022).

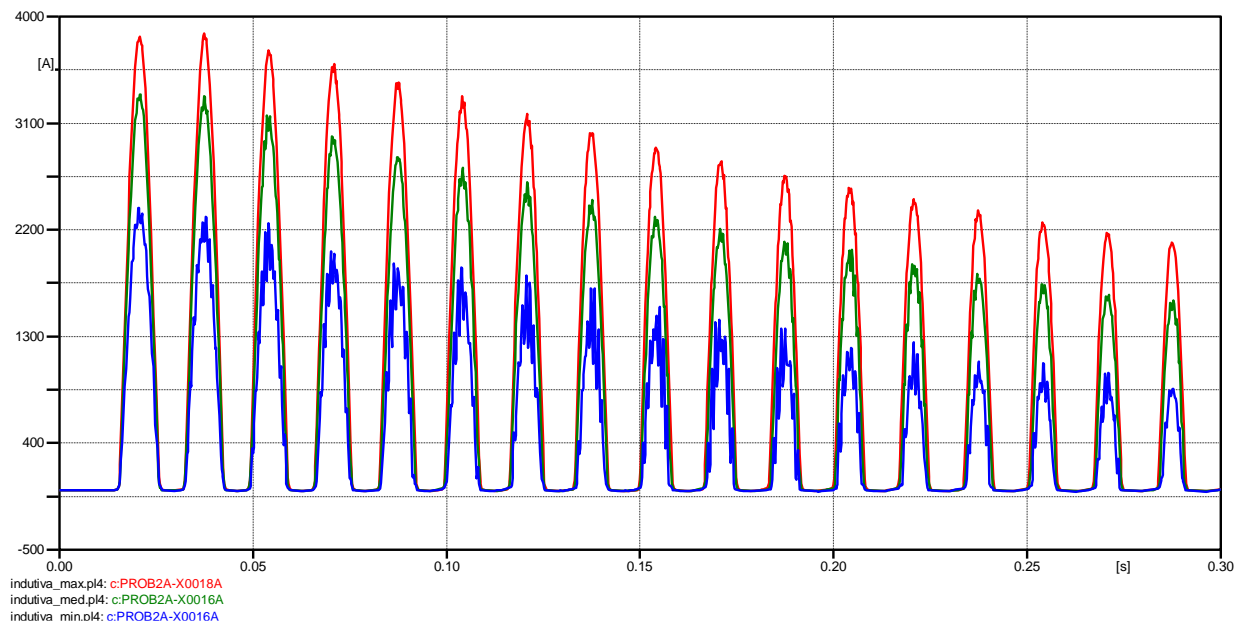
A Figura 34 apresenta a comparação das piores correntes de *Inrush* encontradas para energização do transformador em três níveis de curto-circuito distintos, mantendo a relação X/R = 5.

A corrente de energização calculada na manobra com nível de curto-circuito de 10000 Amperes foi de 3728,1 Amperes e está representada na Figura 34 pela curva vermelha. Esse valor representa 5,25 p.u. em comparação com a corrente nominal do equipamento. A corrente de energização calculada na manobra com nível de curto-circuito de 6500 Amperes foi de

3202,7 Ampères e está representada na Figura 34 pela curva verde. Esse valor representa 4,51 p.u. em comparação com a corrente nominal do equipamento. A corrente de energização calculada na manobra com nível de curto-circuito de 3000 Ampères foi de 2236,5 Ampères e está representada na Figura 34 pela curva azul. Esse valor representa 3,15 p.u. em comparação com a corrente nominal do equipamento.

Se comparado o valor da maior corrente de energização calculada no menor nível de curto-circuito com a corrente de energização calculada no maior nível de curto-circuito é possível observar um aumento de 66,7%.

Figura 35 – Comparação da corrente de energização em diferentes níveis de curto-circuito. $X/R = 15$.



Fonte: Figura de autoria própria, Plotxwin (2022).

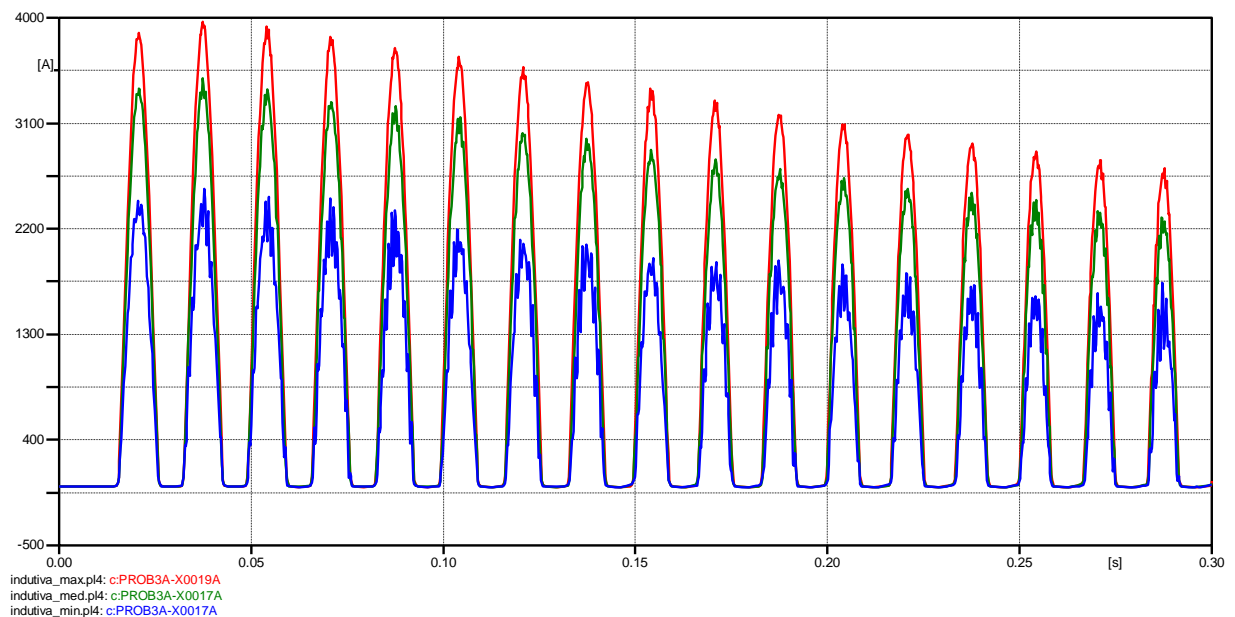
A Figura 35 apresenta a comparação das piores correntes de Inrush encontradas para energização do transformador em três níveis de curto-circuito distintos, mantendo a relação $X/R = 15$.

A corrente de energização calculada na manobra com nível de curto-circuito de 10000 Ampères foi de 3858,2 Ampères e está representada na Figura 34 pela curva vermelha. Esse valor representa 5,43 p.u. em comparação com a corrente nominal do equipamento. A corrente de energização calculada na manobra com nível de curto-circuito de 6500 Ampères foi de 3344,8 Ampères e está representada na Figura 34 pela curva verde. Esse valor representa 4,71 p.u. em comparação com a corrente nominal do equipamento. A corrente de energização calculada na manobra com nível de curto-circuito de 3000 Ampères foi de 2386,6 Ampères e

está representada na Figura 34 pela curva azul. Esse valor representa 3,36 p.u. em comparação com a corrente nominal do equipamento.

Se comparado o valor da maior corrente de energização calculada no menor nível de curto-circuito com a corrente de energização calculada no maior nível de curto-circuito é possível observar um aumento de 61,7%.

Figura 36 – Comparação da corrente de energização em diferentes níveis de curto-circuito. $X/R = 40$.



Fonte: Figura de autoria própria, Plotxwin(2022).

A Figura 36 apresenta a comparação das piores correntes de Inrush encontradas para energização do transformador em três níveis de curto-circuito distintos, mantendo a relação $X/R = 40$.

A corrente de energização calculada na manobra com nível de curto-circuito de 10000 Ampéres foi de 3968,5 Ampéres e está representada na Figura 34 pela curva vermelha. Esse valor representa 5,59 p.u. em comparação com a corrente nominal do equipamento. A corrente de energização calculada na manobra com nível de curto-circuito de 6500 Ampéres foi de 3481,7 Ampéres e está representada na Figura 34 pela curva verde. Esse valor representa 4,9 p.u. em comparação com a corrente nominal do equipamento. A corrente de energização calculada na manobra com nível de curto-circuito de 3000 Ampéres foi de 2537,7 Ampéres e está representada na Figura 34 pela curva azul. Esse valor representa 3,57 p.u. em comparação com a corrente nominal do equipamento.

Se comparado o valor da maior corrente de energização calculada no menor nível de curto-circuito com a corrente de energização calculada no maior nível de curto-circuito é possível observar um aumento de 56,38%.

É possível concluir que o nível de curto-circuito e a relação X/R do sistema são variáveis importantes no estudo de energização de transformadores, influenciando de forma direta na magnitude das correntes de energização calculadas por meio das simulações.

Em Steurer (2002) o autor apresenta uma discussão interessante que relaciona o desgaste mecânico nas espiras do transformador causadas por correntes de curto-circuito e correntes de energização. É sabido que as correntes de curto-circuito apresentam componentes DC nos primeiros ciclos da falta. Essa componente de corrente contínua causa um esforço mecânico nos enrolamentos do transformador capaz de danificar mecanicamente o equipamento.

O artigo citado acima apresenta um modelo em elementos finitos de um transformador específico e faz uma comparação entre os desgastes mecânicos causados por faltas no secundário do transformador e correntes de energização. A conclusão do artigo é que correntes de energização com magnitudes próximas a 60% das correntes de curto-circuito podem causar danos no equipamento e com isso a diminuição da vida útil do mesmo.

Para realizar essa comparação é necessário o cálculo da corrente de curto-circuito assimétrica. Esse fator depende da relação entre a resistência e a reatância do transformador investigado. No caso estudado, utilizamos uma relação X/R de 50, portanto será utilizado o fator de assimetria referente à essa relação X/R. É possível encontrar o fator de assimetria na Tabela 5.

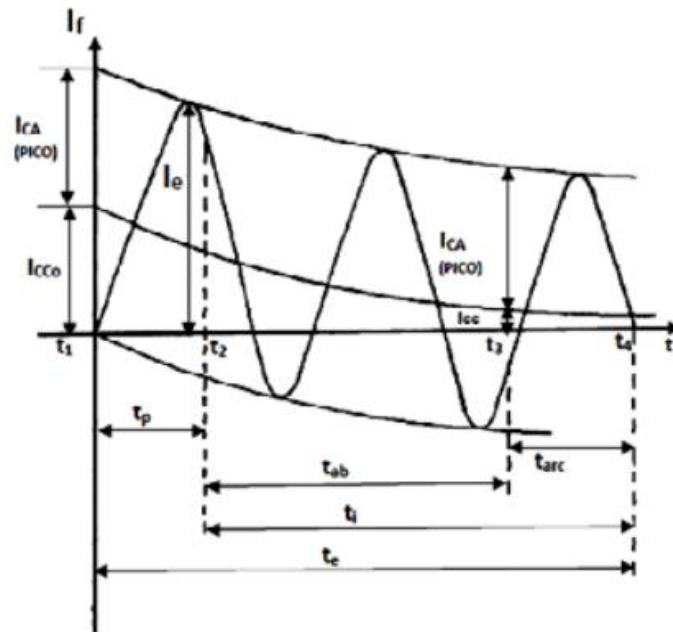
$$I_{cc}(\text{Assim}) = 1/Z_{cc}[\text{p.u.}] * I_{nom}[\text{RMS}] * \text{Raiz}(2) * F(\text{Assim}) \quad (15)$$

$$I_{cc}(\text{Assim}) = 1/0.14 * ((200*10^6)/(345*10^3/\text{Raiz}(3))) * \text{Raiz}(2) * 2,74$$

$$I_{cc}(\text{Assim}) = 1/0.14 * 1004,09 * \text{Raiz}(2) * 2,74$$

$$I_{cc}(\text{Assim}) = 27,79 \text{ kA(Pico)}$$

Figura 37 – Evolução da corrente assimétrica de curto-circuito ao longo do tempo.



Fonte: Frontin, S. O. (2013).

A Figura 37 apresenta a corrente assimétrica de curto-circuito após a aplicação de uma falta. Quanto maior a relação X/R do equipamento, maior será a corrente assimétrica caso ocorra uma falta. A equação (15) pode ser utilizada para calcular o valor de curto-circuito assimétrico do transformador.

Tabela 5 – Fator de Assimetria em função da relação X/R.

X/R	τ (ms) (para $\omega = 377$ rd/s)	f (fator de assimetria) (para $t = 8,33$ ms)	% CC	Tempo de separação dos contatos (ciclos)
12	32	2,5	46 27	1,5 2,5
17	45	2,59	57 40	1,5 2,5
20	53	2,62	62 46	1,5 2,5
30	80	2,69	73 59	1,5 2,5
40	106	2,72	79 67	1,5 2,5
50	133	2,74	83 73	1,5 2,5
60	159	2,76	85 77	1,5 2,5
100	265	2,78	91 85	1,5 2,5
∞	∞	2,83	100 100	1,5 2,5

Fonte: Frontin, S. O. (2013).

A Tabela 5 apresenta os valores de fator de assimetria para relações de X/R típicas. Foi utilizado o fator de assimetria referente à relação X/R igual a 50.

Utilizando o critério de Steurer (2012), é possível determinar se as correntes de energização causarão desgaste mecânico nos enrolamentos da transformação se a razão entre a corrente de energização e a corrente de curto assimétrica for maior que 60%.

$$I(\text{Inrush MAX})/ICC(\text{Assim}) = 3968,5/27790 = 0,1428 = 14,3\%$$

$$I(\text{Inrush MIN})/ICC(\text{Assim}) = 2537,7/27790 = 0,09132 = 9,1\%$$

No caso em questão as energizações sucessivas deste transformador tendem a não degradar o equipamento no longo prazo em ambos os níveis de curto-circuito da rede segundo o critério de avaliação adotado. É possível ressaltar que a relação entre a corrente de energização e a corrente de curto assimétrica aumentou em 56%, quando comparado o resultado obtido entre o nível de curto máximo e mínimo.

Os resultados apresentados evidenciam que a escolha correta dos cenários de carga utilizados como dados de entrada para elaboração dos equivalentes de rede é fundamental para representar da melhor forma as sobretensões e correntes de *Inrush* na energização de transformadores. Fica claro que não é possível extrair do mesmo equivalente de rede as maiores sobretensões e correntes de energização.

Conclui-se que um modelo equivalente com maior nível de curto-circuito aumenta as correntes de energização obtidas. A escolha de um modelo equivalente com maior nível de curto-circuito é mais adequada para manobras de energização de transformadores quando a intensão do estudo é verificar a necessidade de instalação de equipamentos de manobra controlada.

7 CONCLUSÃO

Uma alta corrente de energização não faz com que o transformador perca sua vida útil de maneira instantânea pois ela não causa ruptura da isolação entre fases ou entre as fases e a terra. Os desgastes causados por altas correntes de energização são mecânicos e tendem a danificar o transformador ao longo de sua vida útil, mudando as características de ensaio e aumentando as chances de mal funcionamento ao longo do tempo.

Um transformador de potência conectado ao SIN apresenta as seguintes características: alta reatância de núcleo de ar. Isso diminui a magnitude das correntes de energização. É possível diminuir ainda mais essas correntes com a utilização de equipamentos que realizam manobras controladas. Esses equipamentos realizam o fechamento do disjuntor em pontos específicos da onda (normalmente no pico de tensão) que tendem a diminuir as correntes de energização. Cada tipo de transformador apresenta um momento ideal para o fechamento das fases visando a diminuição das correntes de energização. Fröhlich (1999) descreve a melhor forma de realizar essas manobras.

Os resultados apresentados no Capítulo 6 evidenciam que a escolha correta das bases de dados utilizadas como dados de entrada para elaboração dos equivalentes de rede é fundamental para representar da melhor forma as sobretensões e correntes de *Inrush* na energização de transformadores. Fica claro que não é possível extrair do mesmo equivalente de rede as maiores sobretensões e correntes de energização.

A correlação positiva entre correntes de energização e nível de curto-circuito fica evidente quando se verifica os resultados apresentados na Figura 31 e na Figura 32. As equações (12), (13) e (14) retratam o comportamento médio das correntes de energização também corroboram com essa conclusão.

O parâmetro utilizado para determinar a necessidade do uso de equipamentos de manobra controlada no caso estudado foi a relação entre o desgaste mecânico do enrolamento primário do transformador e a intensidade de corrente de energização. No caso, foi observado que o resultado não violou os limites em ambos os níveis de curto-circuito, entretanto, é possível ressaltar que a relação entre a corrente de energização e a corrente de curto assimétrica aumentou em 56%, quando comparado o resultado obtido entre o nível de curto-circuito máximo e mínimo.

Conclui-se que um modelo equivalente com maior nível de curto-circuito aumenta as correntes de energização obtidas. A escolha de um modelo equivalente com maior nível de curto-circuito é mais adequada para manobras de energização de transformadores quando a intenção do estudo é verificar a necessidade de instalação de equipamentos de manobra controlada.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. **Leilão de transmissão ANEEL nº 002/2022**. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes_liferay/editais_transmissao/edital_transmissao.cfm. Acesso em: 20 set. 2022.
- ARAÚJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. **Cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia**. Belo Horizonte: UFMG, 2005.
- CANADIAN/AMERICAN EMTP USER GROUP. **Alternative transient program (ATP) Rule Book**. EMTP, 1992.
- D'AJUZ, A. *et al.* **Transitórios elétricos e coordenação de isolamento: aplicação em sistemas de potência de alta-tensão**. Rio de Janeiro: FURNAS. Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Estudos de planejamento da transmissão**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/planejamento-da-transmissao/estudos-de-planejamento>. Acesso em: 01 set. 2022.
- FRÖHLICH, C. *et al.* Controlled switching of HVAC circuit breakers. **Electra**, França, n. 185, 1999.
- FRONTIN, S. O. **Equipamentos de alta tensão prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas**. Brasília, 2013.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Casos de referência do PAR/PEL**. Disponível em: <https://sintegre.ons.org.br/sites/8/42/60/paginas/servicos/historico-de-produtos.aspx?Produto=Termo%20de%20Refer%C3%Aancia%20do%20PAR/PEL>. Acesso em: 21 set. 2022.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Diretrizes para a elaboração de projetos básicos para empreendimentos de transmissão**. Rio de Janeiro, 2013.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Extensão da rede básica de transmissão**. 2022. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 21 set. 2022.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Submódulo 2.6: requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos**. Rio de Janeiro, 2022.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Submódulo 23.3: diretrizes e critérios para estudos elétricos**. Rio de Janeiro, 2018.
- STEURER, M.; FRÖHLICH, K. The impact of inrush currents on the mechanical stress of high voltage power transformer coils. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 17, n. 1, 2002.
- STEVENSEN JÚNIOR, W. D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. 2. ed. São Paulo: McGraw Hill, 1978.

APÊNDICE A – Rotina “SATURA” - ATP

```
BEGIN NEW DATA CASE
SATURATION
$ERASE
C_FREQ<<V-BASE><S-BASE><I-PUNCH>K-THIRD
60.199.1858200.0
C IRMS pu << VRMS pu >
0.01000 1.00000
0.01246 1.04658
0.01772 1.08152
0.02634 1.11646
0.03440 1.13975
0.04487 1.16304
0.06773 1.19798
0.09391 1.22127
0.13200 1.24095
1.50000 1.65072
9999
$PUNCH
BLANK
BEGIN NEW DATA CASE
```



```

C 60.199.1858200.0
C C IRMS pu << VRMS pu >
C 0.01000 1.00000
C 0.01246 1.04658
C 0.01772 1.08152
C 0.02634 1.11646
C 0.03440 1.13975
C 0.04487 1.16304
C 0.06773 1.19798
C 0.09391 1.22127
C 0.13200 1.24095
C 1.50000 1.65072
C 9999

```

```

1.41999436E+01 7.47209274E+02
2.46121865E+01 7.82014282E+02
4.23496139E+01 8.08121774E+02
6.52518335E+01 8.34229266E+02
8.68281999E+01 8.51631770E+02
1.13837602E+02 8.69034274E+02
1.73763145E+02 8.95141766E+02
2.54660961E+02 9.12544270E+02
3.77494550E+02 9.27249348E+02
2.95989776E+03 1.23343329E+03
9999

```

=====< End of LUNIT7 punched cards as flushed by \$PUNCH request >=====

Blank card terminating "SATURATION" data cases. |BLANK

Timing figures characterizing central processor (CP) solution speed. ----- CP sec Wait sec Real sec

APÊNDICE C – Rotina “HYSTERESIS HEVIA” – ATP

BEGIN NEW DATA CASE

HYSTERESIS HEVIA 1 1.1 .04

C <--Losses in W--><--Freq in Hz--><--Residual flux> I

98STAR1A 60 448.33888 0

C <----I(A)----><-----Flux---->

14.1999436 747.209274

24.6121865 782.014282

42.3496139 808.121774

65.2518335 834.229266

86.8281999 851.63177

113.837602 869.034274

173.763145 895.141766

254.660961 912.54427

377.49455 927.249348

2959.89776 1233.43329

9999

\$PUNCH, dc13c.pch ! { Exclamation holds lower case

BLANK card terminates stacked Type-98 elements within HYSTERESIS HEVIA

APÊNDICE D – Saída da Rotina “HYSTERESIS HEVIA” – ATP

--- 19 cards of disk file read into card cache cells 1 onward.

Alternative Transients Program (ATP), GNU Linux or DOS. All rights reserved by Can/Am user group of Portland, Oregon, USA.

Date (dd-mth-yy) and time of day (hh.mm.ss) = 21-Aug-22 10:03:59 Name of disk plot file is hysteresi.pl4

Consult the 860-page ATP Rule Book of the Can/Am EMTP User Group in Portland, Oregon, USA. Source code date is 18 November 2012.

Total size of LABCOM tables = 296023531 INTEGER words. 31 VARDIM List Sizes follow: 65002 150K 200K 2K 5000K 6K 60K

500K 10K 16K 3K 12K 300K 2K 400K 3200 360 1016 8000K 400K 12K 60K 2000K 1K 120K 2000K 80K 9999K 1200 39 800

-----+-----
Descriptive interpretation of input data cards. | Input data card images are shown below, all 80 columns, character by character
0 1 2 3 4 5 6 7 8

012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

-----+-----
Comment card. NUMDCD = 1. |C data:HISTERESI.ATP
Marker card preceding new EMTP data case. |BEGIN NEW DATA CASE
Request to make Type-96 hysteresis branch cards. |HYSTERESIS HEVIA 1 1.1 .04
Comment card. NUMDCD = 4. |C <--Losses in W--<--Freq in Hz--<--Residual flux> I
Hevia 98. 0.0000E+00 6.0000E+01 4.4834E+02 0 |98STAR1A 60 448.33888 0
Comment card. NUMDCD = 6. |C <---I(A)---><-----Flux---->
(i, psi) point. 1.41999E+01 7.47209E+02 | 14.1999436 747.209274
(i, psi) point. 2.46122E+01 7.82014E+02 | 24.6121865 782.014282
(i, psi) point. 4.23496E+01 8.08122E+02 | 42.3496139 808.121774
(i, psi) point. 6.52518E+01 8.34229E+02 | 65.2518335 834.229266
(i, psi) point. 8.68282E+01 8.51632E+02 | 86.8281999 851.63177
(i, psi) point. 1.13838E+02 8.69034E+02 | 113.837602 869.034274
(i, psi) point. 1.73763E+02 8.95142E+02 | 173.763145 895.141766
(i, psi) point. 2.54661E+02 9.12544E+02 | 254.660961 912.54427
(i, psi) point. 3.77495E+02 9.27249E+02 | 377.49455 927.249348
(i, psi) point. 2.95990E+03 1.23343E+03 | 2959.89776 1233.43329
Special termination-of-points card. | 9999
Request for flushing of punch buffer. |\$PUNCH, dc13c.pch ! { Exclamation holds lower case

A listing of 80-column card images now being flushed from punch buffer follows.

=====

=====

12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

=====

C <++++++> Cards punched by support routine on 21-Aug-22 10:03:59 <++++++>
C HYSTERESIS HEVIA 1 1.1 .04
C C <--Losses in W--<--Freq in Hz--<--Residual flux>
C 98STAR1A 60 448.33888
C C <---I(A)---><-----Flux---->
C 14.1999436 747.209274
C 24.6121865 782.014282
C 42.3496139 808.121774
C 65.2518335 834.229266
C 86.8281999 851.63177
C 113.837602 869.034274
C 173.763145 895.141766
C 254.660961 912.54427
C 377.49455 927.249348
C 2959.89776 1233.43329
C 9999

96STAR1A HEVIA HYSTER 24.6121865 782.014282 448.3384317 0
-2.46435560E+02 -9.12544270E+02
-1.58074108E+02 -8.95141766E+02
-9.91741373E+01 -8.69034274E+02
-7.27803156E+01 -8.51631770E+02
-5.17720044E+01 -8.34229266E+02
-2.96437241E+01 -8.08121774E+02
-1.25988815E+01 -7.82014282E+02
-3.00346803E+00 -7.47209274E+02
4.50553657E+00 0.00000000E+00
1.87054802E+01 7.47209274E+02
2.91177231E+01 7.82014282E+02
4.68551505E+01 8.08121774E+02
6.97573701E+01 8.34229266E+02
9.13337365E+01 8.51631770E+02
1.18343139E+02 8.69034274E+02
1.78268682E+02 8.95141766E+02
2.56913729E+02 9.12544270E+02

3.77494550E+02 9.27249348E+02
2.95989776E+03 1.21700010E+03
9999

=====< End of LUNIT7 punched cards as flushed by \$PUNCH request >=====

Blank card terminating HYSTERESIS HEVIA cases. |BLANK card terminates stacked Type-98 elements within
HYSTERESIS HEVIA

Timing figures characterizing central processor (CP) solution speed. ----- CP sec Wait sec Real sec
Totals 1.063 0.000 1.063

APÊNDICE E – Script – Tratamento de dados e Representação Gráfica – ATP

```

# Este Script foi desenvolvido com a pretensão de tratar os dados referente às
# simulações de energização de transformadores.
# Autor: Thiago Lima
# Data: 05/06/2022
import math
from cmath import sqrt
import linecache
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import sys, string
import os
import pandas as pd

lista = os.listdir(r'C:\Users\brthlim2\Desktop\TCC\ATP\Variações\INDUTIVA')
pastas = len(lista)-10
print(pastas)

current_max_1 = [0]
current_max_2 = [0]
current_max_3 = [0]
current_max_4 = [0]
current_max_5 = [0]
current_max_6 = [0]
current_max_7 = [0]
current_max_8 = [0]
current_max_9 = [0]

current_min_1 = [0]
current_min_2 = [0]
current_min_3 = [0]
current_min_4 = [0]
current_min_5 = [0]
current_min_6 = [0]
current_min_7 = [0]
current_min_8 = [0]
current_min_9 = [0]

voltage_max_1 = [0]
voltage_max_2 = [0]
voltage_max_3 = [0]
voltage_max_4 = [0]
voltage_max_5 = [0]
voltage_max_6 = [0]
voltage_max_7 = [0]
voltage_max_8 = [0]
voltage_max_9 = [0]

voltage_min_1 = [0]
voltage_min_2 = [0]
voltage_min_3 = [0]
voltage_min_4 = [0]
voltage_min_5 = [0]
voltage_min_6 = [0]
voltage_min_7 = [0]
voltage_min_8 = [0]
voltage_min_9 = [0]

SC_Level = [0]

i = 1

while i < pastas:
    istr = str(i)
    file = open(r'C:\Users\brthlim2\Desktop\TCC\ATP\Variações\INDUTIVA\'+ istr +'indutiva.lis','r')
    content = file.readlines()
    file.close()
    print(i)

    j = 0
    while j < len(content) or j == 999999:
        #print("bug")
        if 'BEGIN WRITE @WRITEMAXMIN 1.0' in content[j]:
            cont = content[j+1].split(" ",3)

```

```

current_max_1.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 4
cont = content[j].split(" ", 3)
current_max_2.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
current_max_3.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
current_max_4.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
current_max_5.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
current_max_6.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
current_max_7.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
current_max_8.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
current_max_9.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3

```

```

cont = content[j].split(" ", 3)
current_min_1.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
current_min_2.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
current_min_3.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
current_min_4.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
current_min_5.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
current_min_6.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
current_min_7.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
current_min_8.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
current_min_9.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3

```

```

cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_max_1.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_max_2.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_max_3.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_max_4.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_max_5.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_max_6.append(abs(round(float(cont[1])))
j = j + 3

```

```

cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_max_7.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_max_8.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_max_9.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3

cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_min_1.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_min_2.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_min_3.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_min_4.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_min_5.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_min_6.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_min_7.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_min_8.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_min_9.append(abs(round(float(cont[1]))))

j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
SC_Level.append(round(float(cont[1])))
j = 999999

j += 1
i = i + 1

corrente_1 = []
corrente_2 = []
corrente_3 = []
tensao_1 = []
tensao_2 = []
tensao_3 = []
sclist = []
corrente_1_aux = []
corrente_2_aux = []
corrente_3_aux = []
tensao_1_aux = []
tensao_2_aux = []
tensao_3_aux = []

print(SC_Level)
i = 0

for i in range(pastas):
    corrente_1_aux.append(max(current_max_1[i], current_max_2[i], current_max_3[i], current_max_4[i], current_max_5[i],
current_max_6[i]))
    corrente_2_aux.append(max(current_max_7[i], current_max_8[i], current_max_9[i], current_min_1[i], current_min_2[i],
current_min_3[i]))
    corrente_3_aux.append(max(current_min_4[i], current_min_5[i], current_min_6[i], current_min_7[i], current_min_8[i],
current_min_9[i]))
    tensao_1_aux.append(max(voltage_max_1[i], voltage_max_2[i], voltage_max_3[i], voltage_max_4[i], voltage_max_5[i],
voltage_max_6[i]))
    tensao_2_aux.append(max(voltage_max_7[i], voltage_max_8[i], voltage_max_9[i], voltage_min_1[i], voltage_min_2[i],
voltage_min_3[i]))
    tensao_3_aux.append(max(voltage_min_4[i], voltage_min_5[i], voltage_min_6[i], voltage_min_7[i], voltage_min_8[i],
voltage_min_9[i]))

```

```

i = 0
j=0
lista_flutuacao = []

for i in range(pastas):
    if corrente_1_aux[i] < 10000 and corrente_2_aux[i] < 10000 and corrente_3_aux[i] < 10000 and tensao_1_aux[i] < 1300000
and tensao_2_aux[i] < 1300000 and tensao_3_aux[i] < 1300000:
        lista_flutuacao.append(i)

flut = len(lista_flutuacao)

i = 0
for i in range(len(lista_flutuacao)):
    corrente_1.append(corrente_1_aux[lista_flutuacao[i]])
    corrente_2.append(corrente_2_aux[lista_flutuacao[i]])
    corrente_3.append(corrente_3_aux[lista_flutuacao[i]])
    tensao_1.append(tensao_1_aux[lista_flutuacao[i]])
    tensao_2.append(tensao_2_aux[lista_flutuacao[i]])
    tensao_3.append(tensao_3_aux[lista_flutuacao[i]])
    sclist.append(SC_Level[lista_flutuacao[i]])

plt.scatter(sclist, corrente_1, c = 'red')
plt.scatter(sclist, corrente_2, c = 'blue')
plt.scatter(sclist, corrente_3, c = 'green')

X = np.array(sclist[1:flut])
np_corrente_1 = np.array(corrente_1[1:flut])

z = np.polyfit(X, np_corrente_1, 1)
p = np.poly1d(z)
p_c_1 = p
plt.plot(X, p(X), c='red')

np_corrente_2 = np.array(corrente_2[1:flut])
z = np.polyfit(X, np_corrente_2, 1)
p = np.poly1d(z)
p_c_2 = p
plt.plot(X, p(X), c='blue')

np_corrente_3 = np.array(corrente_3[1:flut])
z = np.polyfit(X, np_corrente_3, 1)
p = np.poly1d(z)
p_c_3 = p
plt.plot(X, p(X), c='green')

plt.title("Comparação Inrush x Nível de Curto-Circuito - LT 50 km")
plt.xlabel('Nível de Curto-Circuito [A]')
plt.ylabel('Corrente de Inrush [A]')
plt.ylim(top=5000, bottom=0)
plt.xlim(left=5000)
plt.legend(['X/R = 5', 'X/R = 15', 'X/R = 35'])
plt.show()

print(flut)

np_tensao_1 = np.array(tensao_1[1:flut])

z = np.polyfit(X, np_tensao_1, 1)
p = np.poly1d(z)
p_t_1 = p
plt.plot(X, p(X), c='red')

np_tensao_2 = np.array(tensao_2[1:flut])
z = np.polyfit(X, np_tensao_2, 1)
p = np.poly1d(z)
p_t_2 = p
plt.plot(X, p(X), c='blue')

np_tensao_3 = np.array(tensao_3[1:flut])
z = np.polyfit(X, np_tensao_3, 1)
p = np.poly1d(z)
p_t_3 = p
plt.plot(X, p(X), c='green')

plt.scatter(sclist, tensao_1, c = 'red')

```

```

plt.scatter(sclist, tensao_2, c = 'blue')
plt.scatter(sclist, tensao_3, c = 'green')

plt.legend(['X/R = 5', 'X/R = 15', 'X/R = 35'])
plt.title("Comparação Tensão Primário x Nível de Curto-Circuito - LT 50 km")
plt.xlabel('Nível de Curto-Circuito [A]')
plt.ylabel('Sobretensão no Primário [V]')
plt.xlim(left=5000)
plt.ylim(bottom=250000, top=1100000)
plt.show()

with open('Resultado.txt', 'w') as f:
    f.write('Corrente Trafo 1 = ' + str(p_c_1[0]) + ' ' + str(p_c_1[1]) + '\n')
    f.write('Corrente Trafo 2 = ' + str(p_c_2[0]) + ' ' + str(p_c_2[1]) + '\n')
    f.write('Corrente Trafo 3 = ' + str(p_c_3[0]) + ' ' + str(p_c_3[1]) + '\n')
    f.write('Tensão Trafo 1 = ' + str(p_t_1[0]) + ' ' + str(p_t_1[1]) + '\n')
    f.write('Tensão Trafo 2 = ' + str(p_t_2[0]) + ' ' + str(p_t_2[1]) + '\n')
    f.write('Tensão Trafo 3 = ' + str(p_t_3[0]) + ' ' + str(p_t_3[1]) + '\n')
    f.close()

# Este Script foi desenvolvido com a pretensão de tratar os dados referente às
# simulações de energização de transformadores.
# Autor: Thiago Lima
# Data: 05/06/2022
import math
from cmath import sqrt
import linecache
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import sys, string
import os
import pandas as pd

lista = os.listdir(r'C:\Users\brthlim2\Desktop\TCC\ATP\Variações\INDUTIVA')
pastas = len(lista)-10
print(pastas)

current_max_1 = [0]
current_max_2 = [0]
current_max_3 = [0]
current_max_4 = [0]
current_max_5 = [0]
current_max_6 = [0]
current_max_7 = [0]
current_max_8 = [0]
current_max_9 = [0]

current_min_1 = [0]
current_min_2 = [0]
current_min_3 = [0]
current_min_4 = [0]
current_min_5 = [0]
current_min_6 = [0]
current_min_7 = [0]
current_min_8 = [0]
current_min_9 = [0]

voltage_max_1 = [0]
voltage_max_2 = [0]
voltage_max_3 = [0]
voltage_max_4 = [0]
voltage_max_5 = [0]
voltage_max_6 = [0]
voltage_max_7 = [0]
voltage_max_8 = [0]
voltage_max_9 = [0]

voltage_min_1 = [0]
voltage_min_2 = [0]
voltage_min_3 = [0]
voltage_min_4 = [0]
voltage_min_5 = [0]
voltage_min_6 = [0]
voltage_min_7 = [0]
voltage_min_8 = [0]
voltage_min_9 = [0]

```

```

SC_Level = [0]

i = 1

while i < pastas:
    istr = str(i)
    file = open(r'C:\Users\brthlim2\Desktop\TCC\ATP\Variações\INDUTIVA\'+ istr +'\indutiva.lis','r')
    content = file.readlines()
    file.close
    print(i)

    j = 0
    while j < len(content) or j == 999999:
        #print('bug')
        if 'BEGIN WRITE @WRITEMAXMIN 1.0' in content[j]:
            cont = content[j+1].split(" ",3)

            current_max_1.append(abs(round(float(cont[1]))))
            j = j + 4
            cont = content[j].split(" ", 3)
            current_max_2.append(abs(round(float(cont[1]))))
            j = j + 3
            cont = content[j].split(" ", 3)
            current_max_3.append(abs(round(float(cont[1]))))
            j = j + 3
            cont = content[j].split(" ", 3)
            current_max_4.append(abs(round(float(cont[1]))))
            j = j + 3
            cont = content[j].split(" ", 3)
            current_max_5.append(abs(round(float(cont[1]))))
            j = j + 3
            cont = content[j].split(" ", 3)
            current_max_6.append(abs(round(float(cont[1]))))
            j = j + 3
            cont = content[j].split(" ", 3)
            current_max_7.append(abs(round(float(cont[1]))))
            j = j + 3
            cont = content[j].split(" ", 3)
            current_max_8.append(abs(round(float(cont[1]))))
            j = j + 3
            cont = content[j].split(" ", 3)
            current_max_9.append(abs(round(float(cont[1]))))
            j = j + 3

            cont = content[j].split(" ", 3)
            current_min_1.append(abs(round(float(cont[1]))))
            j = j + 3
            cont = content[j].split(" ", 3)
            current_min_2.append(abs(round(float(cont[1]))))
            j = j + 3
            cont = content[j].split(" ", 3)
            current_min_3.append(abs(round(float(cont[1]))))
            j = j + 3
            cont = content[j].split(" ", 3)
            current_min_4.append(abs(round(float(cont[1]))))
            j = j + 3
            cont = content[j].split(" ", 3)
            current_min_5.append(abs(round(float(cont[1]))))
            j = j + 3
            cont = content[j].split(" ", 3)
            current_min_6.append(abs(round(float(cont[1]))))
            j = j + 3
            cont = content[j].split(" ", 3)
            current_min_7.append(abs(round(float(cont[1]))))
            j = j + 3
            cont = content[j].split(" ", 3)
            current_min_8.append(abs(round(float(cont[1]))))
            j = j + 3
            cont = content[j].split(" ", 3)
            current_min_9.append(abs(round(float(cont[1]))))
            j = j + 3

            cont = content[j].split(" ", 3)
            voltage_max_1.append(abs(round(float(cont[1]))))

```

```

j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_max_2.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_max_3.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_max_4.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_max_5.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_max_6.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_max_7.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_max_8.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_max_9.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3

```

```

cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_min_1.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_min_2.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_min_3.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_min_4.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_min_5.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_min_6.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_min_7.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_min_8.append(abs(round(float(cont[1]))))
j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
voltage_min_9.append(abs(round(float(cont[1]))))

```

```

j = j + 3
cont = content[j].split(" ", 3)
SC_Level.append(round(float(cont[1]))))
j = 999999

```

```

j += 1
i = i + 1

```

```

corrente_1 = []
corrente_2 = []
corrente_3 = []
tensao_1 = []
tensao_2 = []
tensao_3 = []
sclist = []
corrente_1_aux = []
corrente_2_aux = []
corrente_3_aux = []
tensao_1_aux = []
tensao_2_aux = []
tensao_3_aux = []

```

```

print(SC_Level)
i = 0

for i in range(pastas):
    corrente_1_aux.append(max(current_max_1[i], current_max_2[i], current_max_3[i], current_max_4[i], current_max_5[i],
current_max_6[i]))
    corrente_2_aux.append(max(current_max_7[i], current_max_8[i], current_max_9[i], current_min_1[i], current_min_2[i],
current_min_3[i]))
    corrente_3_aux.append(max(current_min_4[i], current_min_5[i], current_min_6[i], current_min_7[i], current_min_8[i],
current_min_9[i]))
    tensao_1_aux.append(max(voltage_max_1[i], voltage_max_2[i], voltage_max_3[i], voltage_max_4[i], voltage_max_5[i],
voltage_max_6[i]))
    tensao_2_aux.append(max(voltage_max_7[i], voltage_max_8[i], voltage_max_9[i], voltage_min_1[i], voltage_min_2[i],
voltage_min_3[i]))
    tensao_3_aux.append(max(voltage_min_4[i], voltage_min_5[i], voltage_min_6[i], voltage_min_7[i], voltage_min_8[i],
voltage_min_9[i]))

i = 0
j=0
lista_flutuacao = []

for i in range(pastas):
    if corrente_1_aux[i] < 10000 and corrente_2_aux[i] < 10000 and corrente_3_aux[i] < 10000 and tensao_1_aux[i] < 1300000
and tensao_2_aux[i] < 1300000 and tensao_3_aux[i] < 1300000:
        lista_flutuacao.append(i)

flut = len(lista_flutuacao)

i = 0
for i in range(len(lista_flutuacao)):
    corrente_1.append(corrente_1_aux[lista_flutuacao[i]])
    corrente_2.append(corrente_2_aux[lista_flutuacao[i]])
    corrente_3.append(corrente_3_aux[lista_flutuacao[i]])
    tensao_1.append(tensao_1_aux[lista_flutuacao[i]])
    tensao_2.append(tensao_2_aux[lista_flutuacao[i]])
    tensao_3.append(tensao_3_aux[lista_flutuacao[i]])
    sclist.append(SC_Level[lista_flutuacao[i]])

plt.scatter(sclist, corrente_1, c = 'red')
plt.scatter(sclist, corrente_2, c = 'blue')
plt.scatter(sclist, corrente_3, c = 'green')

X = np.array(sclist[1:flut])
np_corrente_1 = np.array(corrente_1[1:flut])

z = np.polyfit(X, np_corrente_1, 1)
p = np.poly1d(z)
p_c_1 = p
plt.plot(X, p(X), c='red')

np_corrente_2 = np.array(corrente_2[1:flut])
z = np.polyfit(X, np_corrente_2, 1)
p = np.poly1d(z)
p_c_2 = p
plt.plot(X, p(X), c='blue')

np_corrente_3 = np.array(corrente_3[1:flut])
z = np.polyfit(X, np_corrente_3, 1)
p = np.poly1d(z)
p_c_3 = p
plt.plot(X, p(X), c='green')

plt.title("Comparação Inrush x Nível de Curto-Circuito - LT 50 km")
plt.xlabel('Nível de Curto-Circuito [A]')
plt.ylabel('Corrente de Inrush [A]')
plt.ylim(top=5000, bottom=0)
plt.xlim(left=5000)
plt.legend(['X/R = 5', 'X/R = 15', 'X/R = 35'])
plt.show()

print(flut)

np_tensao_1 = np.array(tensao_1[1:flut])

z = np.polyfit(X, np_tensao_1, 1)
p = np.poly1d(z)

```

```

p_t_1 = p
plt.plot(X, p(X), c='red')

np_tensao_2 = np.array(tensao_2[1:flut])
z = np.polyfit(X, np_tensao_2, 1)
p = np.poly1d(z)
p_t_2 = p
plt.plot(X, p(X), c='blue')

np_tensao_3 = np.array(tensao_3[1:flut])
z = np.polyfit(X, np_tensao_3, 1)
p = np.poly1d(z)
p_t_3 = p
plt.plot(X, p(X), c='green')

plt.scatter(sclist, tensao_1, c = 'red')
plt.scatter(sclist, tensao_2, c = 'blue')
plt.scatter(sclist, tensao_3, c = 'green')

plt.legend(['X/R = 5', 'X/R = 15', 'X/R = 35'])
plt.title("Comparação Tensão Primário x Nível de Curto-Circuito - LT 50 km")
plt.xlabel('Nível de Curto-Circuito [A]')
plt.ylabel('Sobretensão no Primário [V]')
plt.xlim(left=5000)
plt.ylim(bottom=250000, top=1100000)
plt.show()

with open('Resultado.txt', 'w') as f:
    f.write('Corrente Trafo 1 = ' + str(p_c_1[0]) + ' ' + str(p_c_1[1]) + '\n')
    f.write('Corrente Trafo 2 = ' + str(p_c_2[0]) + ' ' + str(p_c_2[1]) + '\n')
    f.write('Corrente Trafo 3 = ' + str(p_c_3[0]) + ' ' + str(p_c_3[1]) + '\n')
    f.write('Tensão Trafo 1 = ' + str(p_t_1[0]) + ' ' + str(p_t_1[1]) + '\n')
    f.write('Tensão Trafo 2 = ' + str(p_t_2[0]) + ' ' + str(p_t_2[1]) + '\n')
    f.write('Tensão Trafo 3 = ' + str(p_t_3[0]) + ' ' + str(p_t_3[1]) + '\n')
    f.close()

```