

Yasmin Guedes Silveira

**Estudo de tensões transitórias em
transformadores de corrente quando da
manobra de chaves seccionadoras em uma
subestação**

Belo Horizonte

2022

Yasmin Guedes Silveira

Estudo de tensões transitórias em transformadores de corrente quando da manobra de chaves seccionadoras em uma subestação

Monografia apresentada durante o Seminário dos Trabalhos de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Escola de Engenharia

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Alberto Resende De Conti

Belo Horizonte

2022

Agradecimentos

Agradeço por todos os casos e acasos que me conduziram até aqui. Sou grata por essa caminhada e por tudo e todos que contribuíram direta ou indiretamente para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Agradeço à minha família pois sem vocês não seria possível estar onde cheguei.

Agradeço ao Professor Alberto De Conti pelo privilégio de ter sido o meu orientador e por ter contribuído imensuravelmente na minha formação. Deixo aqui os meus sinceros votos de admiração e respeito pelo seu trabalho e conduta pessoal. O corpo docente da UFMG definitivamente não seria o mesmo sem você.

Agradeço, em especial, à Maria Tereza pela grande sorte de ter te encontrado nessa vida.

Agradeço aos meus amigos, por terem deixado mais leve e prazerosa a jornada da faculdade.

Agradeço aos meus colegas de trabalho da Tractebel, por terem me ensinado e me apoiado tanto.

*“Happiness can be found, even in the darkest of times, if one only remembers to turn on
the light.”
(Rowling, J.K.)*

Resumo

Recentemente, têm sido observadas crescentes falhas precoces em transformadores de corrente quando da manobra de chaveamento em subestações pertencentes à rede básica brasileira. Durante a abertura ou o fechamento de chaves seccionadoras gera-se um arco elétrico entre os seus terminais, que se extingue e se restabelece diversas vezes até o encerramento da manobra. Esse fenômeno é responsável por gerar, no interior da subestação, surtos de tensão e corrente com componentes de alta frequência. Suspeita-se que seja esse o fenômeno determinante para a ocorrência das falhas em questão, uma vez que os TCs estão instalados em pontos adjacentes às chaves seccionadoras nos arranjos de subestação. Este trabalho se dedica ao estudo das sobretensões impostas a TCs quando há operação de chaves seccionadoras utilizando para isso simulações no *software* ATP. Isso requer a modelagem adequada dos componentes de uma subestação, considerando a natureza transitória do surto de interesse, de forma a obter resultados simulados próximos aos reais. Assim, avaliou-se o impacto do emprego de diferentes modelos de linhas de transmissão na representação dos barramentos de uma subestação típica de 500 kV isolada a ar. Os modelos analisados foram: PI, Bergeron e JMarti. Além disso, escolheu-se representar, por meio de um circuito RLC, um TC do tipo *top core* e o arco elétrico a partir do modelo de Schwarz através da rotina MODELS no ATP. Assim, o evento de abertura e fechamento de chave seccionadora foi simulado para cada modelo estudado em determinados cenários. Foram verificadas diferenças de desempenho entre os modelos avaliados, sendo o modelo JMarti indicado como mais adequado para esse tipo de aplicação.

Palavras-chaves: Transformadores de corrente, transitórios eletromagnéticos, manobras de chaves seccionadoras, modelagem em altas frequências.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Número de explosões de TCs da rede básica - Período de maio de 2012 a maio de 2019.	18
Figura 2 – Representação esquemática simplificada do princípio de funcionamento de um TC.	21
Figura 3 – Vista em corte das diferentes topologias construtivas de TCs.	22
Figura 4 – Diagrama esquemático do interior da cabeça um TC do tipo <i>Top Core</i>	23
Figura 5 – Princípio de superposição das camadas de papel para isolamento interno.	24
Figura 6 – Modelo RLC série adotado para as simulações.	27
Figura 7 – Impedância harmônica do TC obtido pelo método impulsivo.	28
Figura 8 – Representação esquemática dos diferentes tipos de sobretensão em um sistema elétrico de alta tensão.	32
Figura 9 – Modelo ATP para a chave seccionadora trifásica.	35
Figura 10 – Modelo ATP para o disjuntor trifásico.	35
Figura 11 – Representação de uma linha de transmissão para desenvolvimento das equações.	36
Figura 12 – a)Linha aérea monofásica; b)Elemento dx.	37
Figura 13 – Modelo PI equivalente.	38
Figura 14 – Circuito equivalente.	40
Figura 15 – Circuito equivalente com perdas adotado no modelo de Bergeron do ATP.	40
Figura 16 – Circuito equivalente adotado no modelo JMarti.	41
Figura 17 – Representação esquemática dos arranjo disjuntor e meio.	43
Figura 18 – Representação esquemática das rotinas TACS e MODELS do arco elétrico.	44
Figura 19 – Esquemático da manobra que foi utilizada para fins de validação.	45
Figura 20 – Comparação das formas de onda de sobretensão no terminal do TC obtida por (DELGADO, 2018) e a forma obtida pelo modelo desenvolvido.	45
Figura 21 – Forma de onda padronizada no domínio do tempo para o ensaio de impulso de manobra com amplitude de 1175 kV com tempos de 100/1000 μs	46
Figura 22 – Envoltória obtida a partir da forma de onda padronizada do impulso de manobra.	47
Figura 23 – Sobretensões no domínio do tempo para a fase A - Caso 1.	50
Figura 24 – Sobretensões no domínio da frequência para a fase A - Caso 1.	50
Figura 25 – Sobretensões no domínio do tempo para a fase A - Caso 6.	51
Figura 26 – Sobretensões no domínio da frequência para a fase A - Caso 6.	51
Figura 27 – Sobretensões no domínio do tempo para a fase A - Caso 2.	52

Figura 28 – Sobretensões no domínio da frequência para a fase A - Caso 2.	52
Figura 29 – Sobretensões no domínio do tempo para a fase A - Caso 3.	53
Figura 30 – Sobretensões no domínio da frequência para a fase A - Caso 3.	53
Figura 31 – Sobretensões no domínio do tempo para a fase A - Caso 4.	54
Figura 32 – Sobretensões no domínio da frequência para a fase A - Caso 4.	54
Figura 33 – Sobretensões no domínio do tempo para a fase A - Caso 5.	55
Figura 34 – Sobretensões no domínio da frequência para a fase A - Caso 5.	55
Figura 35 – Sobretensões no domínio do tempo para a fase A - Caso 7.	56
Figura 36 – Sobretensões no domínio da frequência para a fase A - Caso 7.	56
Figura 37 – Sobretensões no domínio do tempo para a fase A - Caso 8.	57
Figura 38 – Sobretensões no domínio da frequência para a fase A - Caso 8.	57
Figura 39 – Dados do barramento alto.	65
Figura 40 – Dados da barra.	65
Figura 41 – Dados do barramento baixo	66
Figura 42 – Dados da conexão de subida.	66
Figura 43 – Dados da conexão de descida.	67
Figura 44 – Modelo de arco elétrico implementado na rotina MODELS do ATP. . .	68

Lista de tabelas

Tabela 1	–	Relações nominais simples para um TC de 5 A.	25
Tabela 2	–	Níveis de isolamento nominal para equipamento com $U_m \geq$	26
Tabela 3	–	Capacitâncias dos equipamentos por fase.	44
Tabela 4	–	Configuração das chaves em cada caso simulado	48
Tabela 5	–	Valores máximos de sobretensão em kV para cada modelo em função do caso analisado.	49
Tabela 6	–	Valores máximos de sobretensão em pu para cada modelo em função do caso analisado.	49
Tabela 7	–	Valores máximos de Fator de Severidade para cada modelo em função do caso analisado.	49

Lista de abreviaturas e siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	Alternative Transients Program
FFT	Fast Fourier Transform
FSDF	Fator de Severidade no Domínio da Frequência
LT	Linha de transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
TC	Transformador de corrente
TP	Transformador de potencial

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Motivação	17
1.2	Objetivos	18
1.3	Metodologia	19
1.4	Estrutura do Trabalho	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	O transformador de corrente de alta tensão	21
2.1.1	Princípio de funcionamento e topologia adotada	21
2.1.2	Normas técnicas e ensaios	24
2.1.3	Modelo de TC para fenômenos transitórios	26
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
3.1	Sobretensões	31
3.1.1	Estudo das sobretensões	32
3.1.1.1	Arco elétrico em chaveamentos	33
3.2	Modelos para estudos de alta frequência	34
3.2.1	Equipamentos típicos	34
3.2.2	Modelos	35
3.2.2.1	Equipamentos	35
3.2.2.2	Barramentos	35
3.2.2.3	Modelos de linha	38
4	METODOLOGIA	43
4.1	Caso base	43
4.2	Casos simulados	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
6	CONCLUSÃO	59
6.1	Sugestão para Trabalhos Futuros	59
	REFERÊNCIAS	61
A	DADOS UTILIZADOS NO ATP	65

1 Introdução

1.1 Motivação

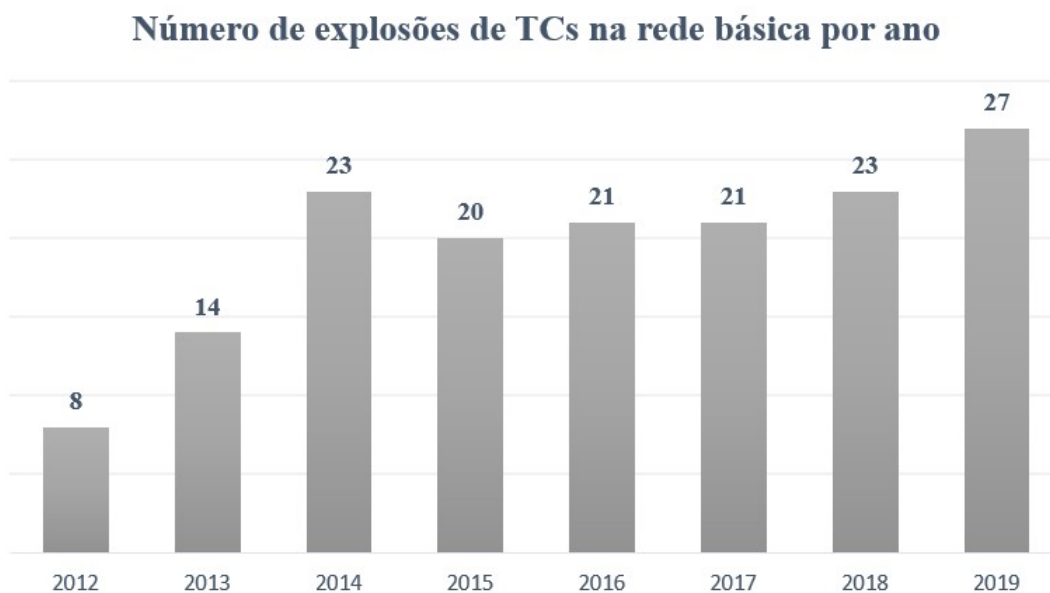
O sistema elétrico está sujeito a sobretensões causadas pela ocorrência de fenômenos transitórios, seja de natureza intempestiva, tal qual a incidência de descargas atmosféricas, seja programada, como manobras envolvendo chaveamentos (ZANETTA, 2003). Por isso, durante as várias etapas de planejamento, a rede elétrica é estudada e projetada para ser capaz de suportar não apenas a condição de regime permanente, mas também fenômenos transitórios. Para isso, é necessário que haja uma infraestrutura robusta de controle e medição de corrente e tensão para monitorar a operação do sistema e acionar os mecanismos de proteção, quando necessário.

Os transformadores para instrumentos fazem parte dessa infraestrutura de medição, desempenhando o papel de reduzir a grandeza de interesse para valores adequados ao uso do sistema de proteção e controle. Os transformadores para instrumentos podem ser classificados como: transformador de potencial (TP) e transformador de corrente (TC). O primeiro é inserido em paralelo com o circuito para se reduzir a tensão a ser medida. Já o segundo é disposto em série com o circuito em que se deseja medir a corrente (OLIVEIRA; PRADA; ENDRE, 2001).

Em relação ao arranjo de uma subestação típica isolada a ar, os TPs, geralmente, são dispostos em conjunto trifásico na entrada e na saída de cada vão, bem como em todos os barramentos de alguma fase específica definida conforme o projeto. Já os TCs, usualmente, são inseridos entre um disjuntor e uma chave seccionadora. Assim, devido a essa proximidade física com esses dois equipamentos, que praticamente anula o amortecimento dos sinais gerados por eventuais surtos de manobra, o TC está mais vulnerável aos esforços transitórios que surgem durante tais operações.

Recentemente, foram registrados sinistros em TCs da rede básica durante chaveamentos em diversas subestações brasileiras (ENERGIA, 2018). Isso ocorreu ainda que os equipamentos estivessem dentro de sua expectativa de vida útil e dos padrões exigidos por órgãos reguladores e às normas brasileiras (IEEE, 2009; IEC, 2007; ABNT, 2015), que requerem o atendimento do TC ao nível de isolamento da subestação e à corrente máxima suportável no primário. Foram totalizadas 157 perturbações, devido à explosão de TCs, no período de maio de 2012 a maio de 2019, conforme ilustrado na Figura 1. É observado um comportamento crescente desse tipo de falha no sistema, das quais aproximadamente 27% implicaram corte de carga (SPRESSOLA et al., 2019).

Uma vez que os TCs sinistrados obedecem os padrões normativos, e levando-se em



Fonte: Adaptado de (SPRESSOLA et al., 2019).

Figura 1 – Número de explosões de TCs da rede básica - Período de maio de 2012 a maio de 2019.

consideração critérios de segurança e de ordem econômica, identifica-se como necessário o estudo de sobretensões transitórias nos TCs causadas por manobras de chaveamento. Com esse intuito, podem ser utilizados programas de simulação computacional de transitórios eletromagnéticos, como o ATP (*Alternative Transients Program*) para se obter soluções que expressem as formas de onda de tensão e de corrente transitórias diretamente no domínio do tempo.

Nesse contexto, é imprescindível a adequada modelagem dos equipamentos, especialmente do TC, e dos barramentos da subestação para que os resultados obtidos na simulação dos eventos de abertura e fechamento de chaves sejam próximos do comportamento real observado no sistema. Assim, para representar os barramentos da subestação, considerando fenômenos transitórios de altas frequências, são utilizados modelos de linhas de transmissão (KERI; GOLE; MARTINEZ-VELASCO, 1998). Como dispõe-se de diferentes modelos no ATP, é necessário avaliar qual seria o mais adequado a ser empregado nessa aplicação. Dessa forma, busca-se implementar uma representação da rede mais rigorosa, para melhor analisar e quantificar o estresse elétrico ao qual o isolamento do TC estará submetido em determinadas condições de chaveamento.

Assim, é nesse atual desafio de engenharia que se insere esse trabalho.

1.2 Objetivos

Esta monografia tem como objetivo analisar os fenômenos transitórios no terminal

de alta tensão de um TC resultantes da manobra de chaves seccionadoras, a partir da modelagem de uma subestação típica de 500 kV no *software* ATP. Uma vez que se trata de um fenômeno composto por altas frequências, é necessário representar os barramentos da subestação como elementos de Linha de Transmissão (LT), para obtenção de resultados coerentes com o comportamento real do sistema sob estudo (KERI; GOLE; MARTINEZ-VELASCO, 1998). Nesse sentido, são avaliados diferentes modelos de LT aplicados na representação dos barramentos dessa subestação, de forma a apontar vantagens e desvantagens na escolha de cada modelo e indicar qual o mais adequado a ser utilizado nessa aplicação. Também é feita uma análise se há alguma violação da norma de impulso de manobra.

1.3 Metodologia

A fim de atender aos objetivos propostos, a metodologia aplicada é a representação adequada de uma subestação típica de 500 kV no ATP, considerando modelos para altas frequências. O modelo implementado no ATP é validado a partir de referências bibliográficas utilizadas para o desenvolvimento dessa monografia. São feitas simulações dos eventos de abertura e fechamento de chaves seccionadoras para cada modelo estudado de forma a avaliar as sobretensões no TC, em diferentes configurações da rede. Também busca-se implementar um modelo de arco elétrico através da rotina MODELS do ATP, para que os resultados em ambiente computacional sejam coerentes com o comportamento observado no sistema, uma vez que é esse o fenômeno responsável por caracterizar as componentes de frequência dos sinais de interesse.

A partir das oscilografias de tensão no tempo, é feita a aplicação da FFT (*Fast Fourier Transform*) para se obter a curva de tensão no espectro das frequências. Essa curva, por sua vez, é comparada a uma curva de ensaio normativo de impulso de manobra um TC no espectro da frequência, com o intuito de identificar se há alguma transgressão dos limites admissíveis recomendados por norma.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente documento está organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 1 - Introdução:** Contextualiza a pertinência do tema desse trabalho.
- **Capítulo 2 - Revisão bibliográfica:** Apresenta as informações necessárias ao entendimento e desenvolvimento do trabalho.

- **Capítulo 3 - Fundamentação teórica:** Aborda a teoria que permite a modelagem apropriada em ambiente computacional para prever o comportamento da rede elétrica sob análise.
- **Capítulo 4 - Metodologia:** Descreve as premissas, parâmetros, topologias e dados a serem utilizados nas modelagens realizadas no ATP para simulação da abertura e fechamento de chaves.
- **Capítulo 5 - Resultados e discussões:** Apresenta e analisa os resultados das simulações no ATP, para um estudo de caso envolvendo uma subestação brasileira típica de 500 kV isolada a ar.
- **Capítulo 6 - Conclusão:** Apresenta as principais conclusões decorrentes desse trabalho, além de apontar propostas de continuidade.
- **Apêndice A - Dados utilizados no ATP:** Apresenta os dados utilizados nas simulações no ATP.

Por fim, são indicadas as referências bibliográficas utilizadas para o desenvolvimento desse documento.

2 Revisão Bibliográfica

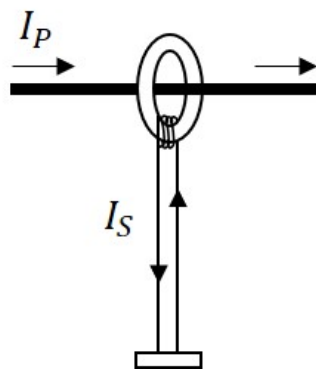
Nesse capítulo são apresentadas as informações sobre o transformador de corrente que são necessárias para compreensão da proposta de estudo dessa monografia, considerando o nível de tensão da subestação de interesse. Assim, aborda-se o princípio de funcionamento do TC, a topologia a ser estudada, as especificações técnicas normativas e os ensaios que regem o dimensionamento e o modelo do TC a ser utilizado nas simulações.

2.1 O transformador de corrente de alta tensão

2.1.1 Princípio de funcionamento e topologia adotada

O transformador de corrente de alta tensão é um equipamento responsável por suprir medidores, relés de proteção e dispositivos de controle com uma corrente proporcional àquela que circula pelo barramento da subestação. De forma geral, os TCs são constituídos por um núcleo de ferro e os enrolamentos primário e secundário, que são eletricamente isolados entre si até determinado nível de tensão operativa (FRONTIN, 2013).

O funcionamento do TC é análogo ao de um transformador convencional. A corrente I_P que circula no barramento da subestação induz um fluxo magnético variável no tempo em um núcleo de material ferromagnético. Esse fluxo magnético, por sua vez, induz uma força eletromotriz no enrolamento secundário, no qual passa a circular a corrente I_S . Como o primário possui apenas uma espira, que no caso é o próprio barramento monitorado, a corrente I_S será N_S vezes menor que a corrente I_P , onde N_S corresponde ao número de espiras do secundário. A Figura 2 ilustra, de forma simplificada, os processos descritos.



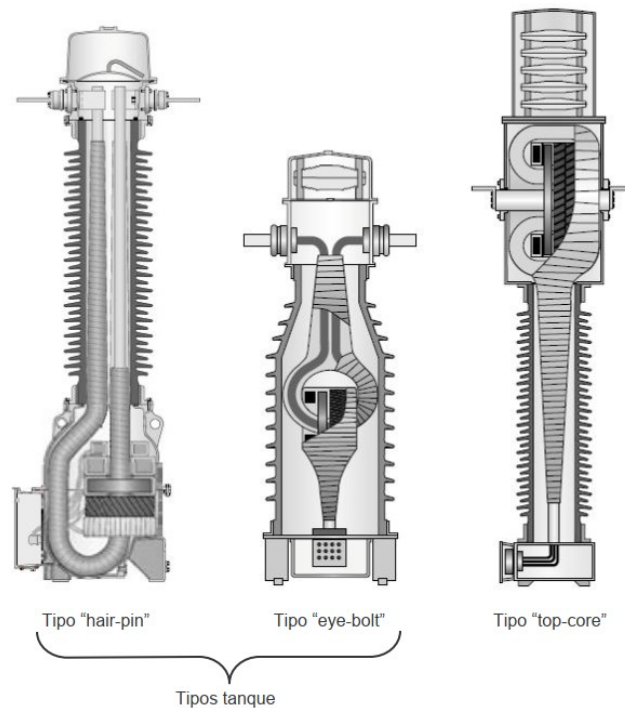
Fonte: Adaptado de (FRONTIN, 2013).

Figura 2 – Representação esquemática simplificada do princípio de funcionamento de um TC.

Como o primário é o próprio circuito de alta tensão, a impedância do TC, vista a partir desse enrolamento, é desprezível em relação à impedância do sistema elétrico ao qual ele está conectado. Assim, mesmo que exista carga no circuito secundário, formada pelos medidores, relés e cabos de interligação, a corrente I_S será proporcional a I_P , mantendo a posição fasorial, tal qual em transformadores de potência, desde que não ocorra saturação no núcleo do TC (FRONTIN, 2013).

Em relação à sua forma de utilização, os TCs podem ser subdivididos em duas categorias: medição e proteção. A principal diferença diz respeito à permeabilidade magnética do material empregado no núcleo. Já que o interesse na medição é se obter grandezas com erros reduzidos, utilizam-se nesse tipo de aplicação materiais com alta permeabilidade. Por outro lado, o objetivo da proteção é monitorar, com segurança, sobrecorrentes causadas por eventuais faltas no sistema. Por essa razão, o núcleo de TCs utilizados em aplicações de proteção é projetado para não entrar em saturação mesmo para correntes maiores que a nominal (FRONTIN, 2013). Nessa monografia, o objeto de estudo é o TC de medição.

De forma geral, o núcleo do secundário é toroidal e os enrolamentos são uniformemente distribuídos a fim de minimizar a impedância de dispersão. Existem diferentes formas construtivas de TCs comercializadas para sistemas de alta tensão. Os dois tipos principais são o tipo tanque ou o tipo invertido (DELGADO, 2018), conforme apresentado na Figura 3.

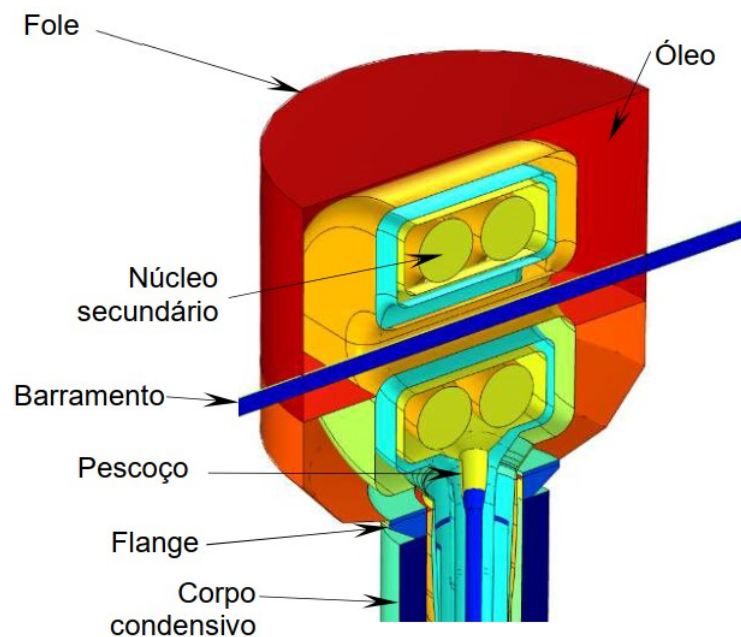


Fonte: Adaptado de (LIMA, 2009).

Figura 3 – Vista em corte das diferentes topologias construtivas de TCs.

O primeiro possui duas possibilidades, o *Hair pin*, cujo condutor primário é em formato de "U" e o *Eye bolt*, em que é circular. Nesse tipo, atualmente empregado em subestações com nível de tensão até 72,5 kV, os núcleos são situados em um tanque isolado da terra na sua parte inferior. Já o segundo, o *Top core*, possui uma disposição dos núcleos na sua parte superior, maior suportabilidade a correntes de curto circuito e é utilizado em vários níveis de alta tensão.

Considerando o nível de tensão de 500 kV, a topologia mais comum nas subestações da rede básica é a *Top Core*. Logo, esse tipo de TC será adotado como objeto de estudo. Nesse modelo, os núcleos aterrados do secundário são localizados na parte superior do equipamento, chamada de cabeça, como mostra o diagrama da Figura 4. A cabeça do TC é sustentada pelo corpo condensivo, um tubo capacitivo que contém os cabos de descida do secundário isolados por camadas de papel impregnado em óleo, papel semicondutivo e folhas metálicas. Tais camadas são cimentadas em epóxi na parte inferior da cabeça e a parte superior é imersa em óleo (ARRUDA et al., 2022).

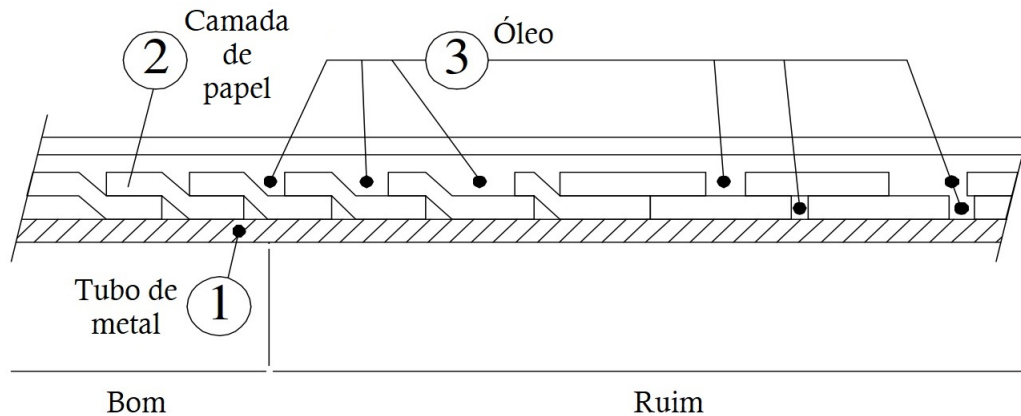


Fonte: Adaptado de (ARRUDA et al., 2022).

Figura 4 – Diagrama esquemático do interior da cabeça um TC do tipo *Top Core*.

O arranjo de blindagem eletrostática detalhado acima é feito para TCs dimensionados para sistemas de tensão superior a 69 kV com o objetivo de uniformizar o campo elétrico em seu interior (FILHO, 2005). Tal conjunto foi avaliado por (ARRUDA et al., 2022) e não foram identificadas falhas de isolamento provenientes da configuração geométrica desse equipamento. Nesse trabalho, eles apontam como possível causa das falhas o efeito na isolação dos múltiplos impulsos de tensão e da circulação de correntes transitórias no equipamento durante a manobra de chaves seccionadoras.

Assim, o isolamento do secundário é fabricado de modo que não haja canais contínuos de óleo entre as diferentes camadas de papel, pois isso reduz a rigidez dielétrica no sentido longitudinal, conforme recomendação técnica contida na brochura (WOSCHITZ, 2009). Na Figura 5 verifica-se que é desejável a manutenção de pequenas áreas homogêneas igualmente espaçadas para o óleo isolante entre as camadas.



Fonte: Adaptado de (WOSCHITZ, 2009).

Figura 5 – Princípio de superposição das camadas de papel para isolamento interno.

2.1.2 Normas técnicas e ensaios

Transformadores de corrente podem ser especificados de acordo com uma série de características (FRONTIN, 2013; ABNT, 2015), como:

- Corrente primária nominal e relação nominal;
- Tensão máxima do equipamento e níveis de isolamento;
- Frequência nominal;
- Carga nominal;
- Exatidão;
- Número de núcleos para proteção e medição;
- Fator térmico nominal;
- Corrente suportável nominal de curta duração;
- Valor de crista nominal da corrente suportável;
- Tipo de aterramento do sistema;

- Uso interno ou externo.

Considerando a finalidade dessa monografia, os dois primeiros itens serão abordados com maior detalhamento, uma vez que são esses os parâmetros principais em termos de dimensionamento do TC no projeto da subestação.

Geralmente, o dimensionamento dos enrolamentos é feito para que a corrente nominal que circula nos enrolamentos secundários seja igual a 1 A ou 5 A (FRONTIN, 2013). O valor adotado geralmente é 5 A, sendo possível adotar o de 1 A quando deseja-se reduzir as perdas nos fios de interligação (FILHO, 2005). Para o caso do TC ligado em delta, esses valores são divididos por $\sqrt{3}$.

Em relação às correntes primárias nominais e as relações nominais, a norma brasileira especifica três grupos. O grupo 1 para relações nominais simples, o grupo 2 para as relações nominais duplas e o grupo 3 para as relações nominais triplas. A Tabela 1 apresenta a especificação para as relações nominais simples, considerando o grupo 1 e a corrente secundária igual a 5 A.

Tabela 1 – Relações nominais simples para um TC de 5 A.

Corrente Primária Nominal (A)	Relação Nominal (5 A)	Corrente Primária Nominal (A)	Relação Nominal (5 A)	Corrente Primária Nominal (A)	Relação Nominal (5 A)
5	1:1	100	20:1	1200	240:1
10	2:1	150	30:1	1500	300:1
15	3:1	200	40:1	2000	400:1
20	4:1	250	50:1	2500	500:1
25	5:1	300	60:1	3000	600:1
30	6:1	400	80:1	4000	800:1
40	8:1	500	100:1	5000	1000:1
50	10:1	600	120:1	6000	1200:1
60	12:1	800	160:1	8000	1600:1
75	15:1	1000	200:1	10000	2000:1

Fonte: (ABNT, 2015).

Para fins de isolamento, a norma (ABNT, 2015) especifica os valores limites de tensão com base na tensão máxima à qual o enrolamento primário do TC estará submetido. Considerando níveis acima de 300 kV, que é o caso objeto desse estudo, a Tabela 2 apresenta os valores padrão recomendados pela norma.

Tabela 2 – Níveis de isolamento nominal para equipamento com $U_m \geq$

300 kV			
Tensão máxima do equipamento U_m (kV)	Tensão suportável nominal de impulso de manobra (kV crista)	Tensão suportável nominal de impulso atmosférico (kV crista)	Tensão suportável nominal à frequência industrial durante 1 min (kV)
300	750	950	395
	850	1050	460
362	850	1050	460
	950	1175	510
420	950	1300	570
	1050	1425	630
460	1050	1425	630
	1175	1425	630
550		1550	650
		1550	680
	1300	1675	740
	1425	1950	870
800	1550	2100	960

Fonte: (ABNT, 2015).

O bom funcionamento do TC é demonstrado por meio de ensaios de rotina ou de tipo, especificados pela norma (ABNT, 2015). O primeiro tipo é realizado para testar a qualidade e a uniformidade na mão de obra e nos materiais empregados no processo de fabricação do TC. Já o segundo tipo objetiva comprovar se um determinado modelo de TC é capaz de funcionar satisfatoriamente em condições especiais (FILHO, 2005).

Nesta monografia o ensaio de tipo que avalia a tensão suportável de impulso de manobra foi utilizado como critério de avaliação das sobretensões no TC.

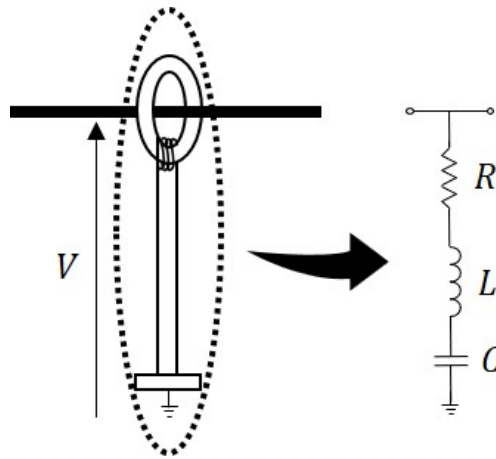
2.1.3 Modelo de TC para fenômenos transitórios

Em relação aos tipos de modelos para representar o TC de alta tensão para estudos de transitórios eletromagnéticos, a literatura apresenta três possibilidades: modelos caixa branca, cinza e preta. O primeiro é aquele em que o circuito equivalente tem uma relação física com o aspecto construtivo do equipamento. Em geral, utiliza-se o método dos elementos finitos para se estimar os parâmetros do circuito, conforme apresentado em (POULICHET; COSTA; LABOURÉ, 2003). O modelo caixa cinza, por sua vez, é obtido por um circuito que reflete resultados obtidos a partir de ensaios. Logo, possui certa relação com a geometria do equipamento. Em (ELHAFFAR; LEHTONEN, 2007) é proposto um modelo caixa cinza que apresenta bom desempenho em baixas e altas frequências.

Por fim, o modelo caixa preta é um circuito equivalente que representa o comportamento da resposta do sistema diante de um determinado sinal de entrada e não possui qualquer relação com o aspecto físico do equipamento.

O modelo adotado para o TC do tipo *Top Core* objeto de estudo é o caixa preta, cujo circuito equivalente é um RLC série, com uma única ressonância, conforme adotado por (POZO; ESTEBAN, 2009) e (DELGADO, 2018). Esse modelo representa principalmente o comportamento do arranjo dielétrico, detalhado na seção anterior, entre o terminal de alta tensão e a base aterrada, uma vez que o primário não interfere na medição e os condutores do secundário estão blindados dentro do corpo condensivo (DELGADO, 2018).

Na Figura 6 apresenta-se um esquemático do modelo caixa preta utilizado para modelar o TC, bem como a indicação gráfica da sobretensão que se deseja medir, a partir dos eventos de abertura e fechamento de chaves seccionadoras.

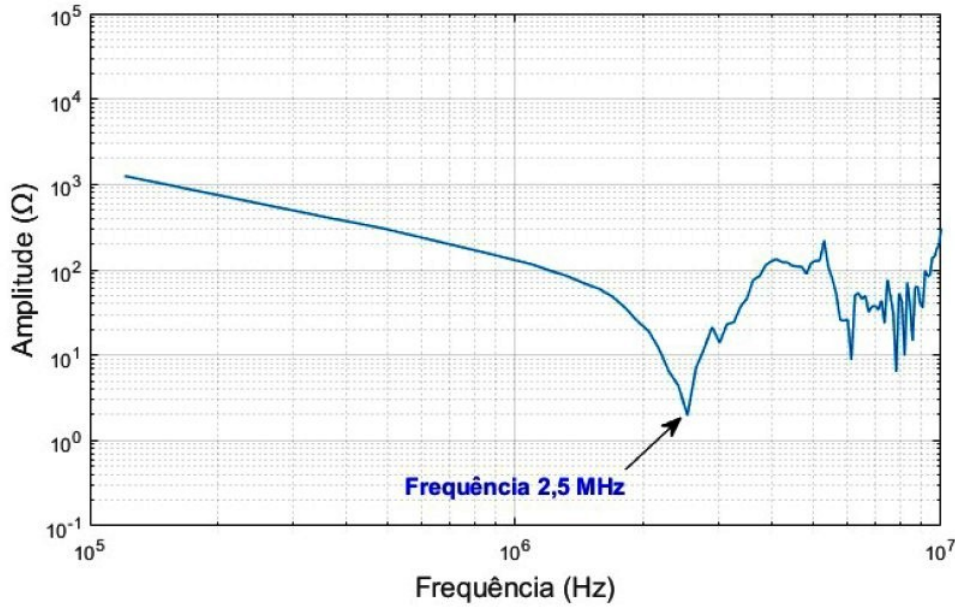


Fonte: Adaptado de (ARRUDA et al., 2022).

Figura 6 – Modelo RLC série adotado para as simulações.

Os valores dos parâmetros de circuito podem ser determinados a partir do método de varredura de frequência ou do método impulsivo. No primeiro, o usuário utiliza um medidor RLC com frequências mínima e máxima definidas conforme o sinal de interesse. No segundo, aplica-se um impulso rápido de tensão no terminal de alta do TC e mede-se a resposta a essa entrada.

Considerando o segundo método, (DELGADO, 2018) obteve uma curva de impedância harmônica com antirressonância com frequência de cerca de 2,5 MHz, apresentada na Figura 7. Esse comportamento é típico de um circuito RLC série até a frequência de 4 MHz, reiterando a adoção dessa topologia para o modelo do TC.



Fonte: Retirado de (DELGADO, 2018).

Figura 7 – Impedância harmônica do TC obtido pelo método impulsivo.

A partir dessa curva, os valores de resistência, indutância e capacitância podem ser determinados por meio das equações que caracterizam o fator de qualidade Q , sendo elas apresentadas pela Equação 2.1 e pela Equação 2.2.

$$Q = \frac{2\pi f_0 L_0}{R_0} \quad (2.1)$$

$$Q = \frac{f_0}{df} \quad (2.2)$$

A variável f_0 é a frequência de antirressonância em Hz, L_0 a indutância em H e R_0 a resistência na frequência f_0 em Ω . Por fim, df se refere ao intervalo de frequência dentro do qual a impedância apresenta uma variação máxima de 3 dB em relação à frequência central f_0 , como na Equação 2.3.

$$Z_{dB} = 20 \log_{10}\left(\frac{Z_{df}}{R_0}\right) \quad (2.3)$$

$$Z_{dB} = 3 \quad (2.4)$$

$$Z_{df} = 1,414R_0 \quad (2.5)$$

Ao combinar as Equação 2.1 e a Equação 2.2 obtém-se a Equação 2.6.

$$L_0 = \frac{R_0}{2\pi df} \quad (2.6)$$

O valor da capacitância, representado pela variável C_0 , pode ser determinado conforme a Equação 2.7.

$$C_0 = \frac{1}{L_0(2\pi f_0)^2} \quad (2.7)$$

Pode-se atribuir um significado físico aos parâmetros RLC, de forma que R representa as perdas em alta frequência no isolamento entre o terminal primário e as partes aterradas; L representa a indutância do enrolamento primário; C representa a capacitância do isolamento do enrolamento primário e as partes aterradas.

Os valores encontrados a partir da curva de ensaio obtida por (DELGADO, 2018) e pelas equações apresentadas acima são de $2,1 \, \Omega$ para o resistor, de $3,7 \, \mu\text{H}$ para o indutor e de $1100 \, \text{pF}$ para o capacitor. Esses valores podem ser considerados típicos para um TC com tensão nominal de $500 \, \text{kV}$ e relação de transformação de $5 \, \text{A}$ e serão adotados nas simulações.

3 Fundamentação teórica

Nesse capítulo, é apresentado o embasamento teórico necessário para caracterizar os fenômenos transitórios que ocorrem durante uma manobra de chaveamento em uma subestação. Além disso, são abordados quais os modelos adotados para representar adequadamente os equipamentos que constituem uma subestação típica de 500 kV da rede básica.

3.1 Sobretensões

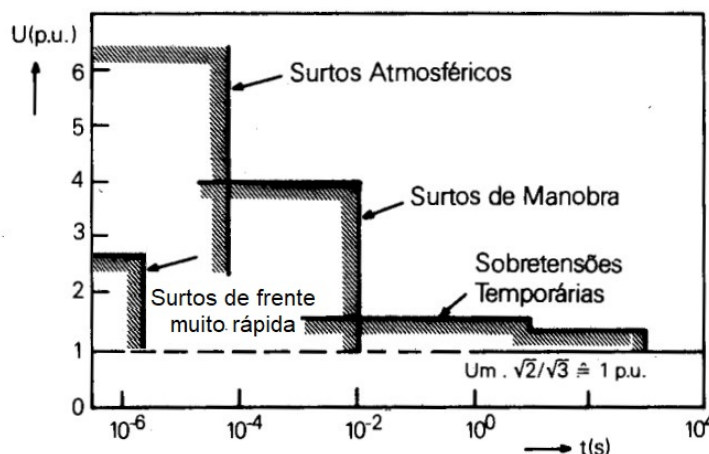
As sobretensões são distúrbios, entre fase e terra ou entre fases, que apresentam valores superiores ao valor nominal de operação do sistema. Elas são de natureza transitória e podem ser classificadas segundo a sua origem como externas ou internas. As sobretensões internas são aquelas originadas por eventos dentro do sistema sob análise, já as externas são causadas por eventos fora desse sistema. Além disso, elas podem ser categorizadas segundo o tempo de duração e o grau de amortecimento como sobretensão temporária, sobretensão atmosférica e sobretensão de manobra (D'AJUZ et al., 1987).

A sobretensão atmosférica ocorre quando há a incidência de uma descarga atmosférica em algum ponto do sistema. Em termos de forma de onda, possui curta duração e grandes amplitudes. Já a sobretensão temporária é aquela que corresponde a uma oscilação de tensão de baixa intensidade, com duração relativamente longa, fracamente ou não amortecida, que pode ser gerada por rejeição de carga, falta monofásica, efeito Ferranti e ferroressonância (D'AJUZ et al., 1987). Por fim, a sobretensão de manobra ocorre quando há energização e religamento de LTs, energização de transformadores ou de um curto-circuito, que produz uma forma de onda de média amplitude e duração.

As sobretensões geradas por transitórios eletromagnéticos também podem ser classificadas quanto a faixa de frequências que compõem a forma de onda em: frente lenta, frente rápida e frente muito rápida (IEC, 2006). As sobretensões de frente lenta possuem faixa de frequência entre 60 Hz a 20 kHz, as de frente rápida entre 10 kHz a 3 MHz e as sobretensões de frente muito rápida entre 100 kHz a 50 MHz. São definidas em (IEC, 2006). Em relação às sobretensões temporárias, a faixa de frequências que as compõem é mais baixa, da ordem de 0,1 Hz até 3 kHz. Elas são geralmente associadas a transitórios eletromecânicos e controle das máquinas síncronas, e por esse motivo, não entram na classificação apresentada acima. A caracterização quanto à faixa de frequência é importante pois permite realizar estudos elétricos de forma adequada.

Em resumo, as sobretensões de manobra possuem frente lenta, as sobretensões

atmosféricas apresentam frente rápida e as sobretensões geradas por abertura de chaves seccionadoras e faltas em Subestações Isoladas a Gás (*Gás Insulated Substation - GIS*) têm frente muito rápida. Nessa monografia, é estudada a sobretensão gerada pela manobra de abertura ou fechamento de chaves seccionadoras em uma subestação de 500 kV isolada a ar, cujas frequências características são, conforme a classificação apresentada, compatíveis com aqueles associados a surtos de frente muito rápida. Essas características podem ser observadas conforme ilustrado na Figura 8.



Fonte: Adaptado de (D'AJUZ et al., 1987) e (IEC, 2006).

Figura 8 – Representação esquemática dos diferentes tipos de sobretensão em um sistema elétrico de alta tensão.

3.1.1 Estudo das sobretensões

Os estudos de sobretensão são desenvolvidos para definir magnitude, frequência e características esperadas das sobretensões que podem ocorrer no sistema. Nesse sentido, pode-se modelar adequadamente a rede elétrica em um ambiente de simulação e aplicar sinais compatíveis com representação da sobretensão que se deseja avaliar. Assim, a partir dos resultados obtidos é possível definir os requisitos de isolamento dos equipamentos e identificar a necessidade de dispositivos auxiliares para minimizar sobretensões excessivas (D'AJUZ et al., 1987). Além disso, esses estudos também possibilitam padronizar formas de onda para serem utilizadas nos ensaios dielétricos a serem aplicados nos equipamentos a fim de verificar o atendimento à norma. Assim, com exceção da classificação frente muito rápida, existem formas de onda normalizada para testes, conforme especificado em (IEC, 2006).

O presente estudo trata do caso específico de sobretensão ocasionada pela manobra de abertura ou fechamento de chaves seccionadoras, um evento de frente muito rápida. Essa operação ocorre regularmente em subestações de 500 kV, seja para isolar o sistema

diante de um curto-circuito, fins de manutenção e até mesmo correção de carga.

Durante o chaveamento há a ocorrência de acendimento/reacendimento, bem como a extinção de arco elétrico entre os terminais desse equipamento. Cada reignição gera uma sobreensão transitória, com elevadas componentes de frequência, que se propaga pelos barramentos e conexões entre equipamentos da subestação. Essa sobreensão é mais severa nos pontos mais próximos às chaves, como é o caso do TC. Dessa forma, é evidente a importância da caracterização do arco elétrico e a definição de um modelo a ser implementado e adotado nas simulações para se obter resultados próximos daqueles observados no sistema.

3.1.1.1 Arco elétrico em chaveamentos

O arco elétrico consiste em um canal de plasma que se estabelece entre os terminais da chave seccionadora quando esse equipamento promove ou interrompe a passagem de corrente. No momento em que os contatos começam a se afastar/a se aproximar tem-se uma reduzida rigidez dielétrica entre eles, o que possibilita o estabelecimento de corrente. Considerando a manobra de chaveamento, a condição inicial para que ocorra o fenômeno do arco elétrico é a existência de carga armazenada no terminal desenergizado.

O arco elétrico é geralmente representado como um modelo do tipo caixa preta obtido experimentalmente através de medições de tensão, corrente, energia e potência. São exemplos os modelos de Cassie e Mayr, com formulações que relacionam tensão entre os terminais do arco (tensão de arco) $u(t)$ em volts, e a corrente do arco $i(t)$ em amperes, com a sua condutância $g(t)$ em siemens, e uma constante de tempo θ (SÁ, 2010).

O modelo de Cassie pode ser descrito pela Equação 3.1 e apresenta bons resultados para o intervalo onde a corrente no arco é elevada. Cassie admite que o arco está em um canal com temperatura, densidade de corrente e intensidade de campo elétrico constantes. Assim, são utilizados dois parâmetros constantes associados ao arco, a tensão de arco estacionária u_0 e a constante de tempo θ .

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(\frac{|u|}{|u_0|} - 1 \right) \quad (3.1)$$

Já o modelo de Mayr tem melhor aproximação para o intervalo em que a corrente é reduzida. Sua formulação é apresentada na Equação 3.2. Mayr assumiu que o arco é resfriado somente pelo ar e que a troca de calor ocorre por condução térmica. Assim, ele utiliza dois parâmetros constantes, constante de resfriamento do arco P_0 e a constante de tempo do arco θ .

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(\frac{|u \cdot i|}{|P_0|} - 1 \right) \quad (3.2)$$

A partir desses modelos, foram geradas novas formulações, como o modelo de Schwarz, que é um modelo modificado de Mayr no qual a constante de tempo e a potência de resfriamento são dependentes da condutância do arco, como mostrado na Equação 3.3, onde α é o parâmetro que influencia a dependência de θ com a condutância e β é o parâmetro que influencia a dependência de P_0 com a condutância. Esse modelo foi adotado nessa monografia para implementação na rotina MODELS do ATP.

O arco foi representado como uma resistência variável no tempo segundo o modelo de Schwarz, cujo comportamento incremental pode ser calculado a cada passo de simulação conforme a Equação 3.3 (SCHWARZ, 1971). A formulação detalhada do modelo e da implementação do arco de Scharwz são discutidas em (SALGE et al.,).

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d}{dt} \ln g = \frac{1}{\theta g^\alpha} \left(\frac{u.i}{P_0 g^\beta} - 1 \right) \quad (3.3)$$

Foram adotados para a simulação do arco a mesma parametrização realizada em (DELGADO, 2018).

3.2 Modelos para estudos de alta frequência

3.2.1 Equipamentos típicos

Os equipamentos típicos que compõem uma subestação de 500 kV isolada a ar são: TPs, TCs, chaves seccionadoras, disjuntores, reatores, transformadores de potência e para raios.

Os transformadores para instrumentos possibilitam o funcionamento da medição e de proteção ao adequar tensões e correntes para os níveis admissíveis pelos relés.

As chaves seccionadoras são dispositivos mecânicos de manobra cuja finalidade é garantir isolamento, quando na posição aberta, e continuidade no circuito elétrico, quando na posição fechada. Esse equipamento não possui valor nominal de corrente para interrupção e somente opera com o disjuntor aberto.

O disjuntor é um equipamento de segurança que interrompe correntes anormais de operação, quando necessário.

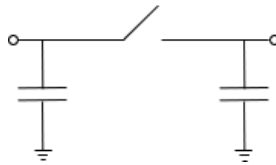
O para-raios possui o objetivo de reduzir os níveis de sobretensão para valores suportáveis pelo sistema elétrico, protegendo contra surtos.

3.2.2 Modelos

3.2.2.1 Equipamentos

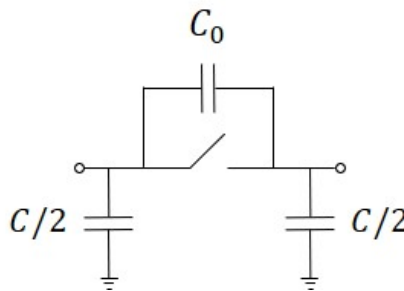
Considerando fenômenos transitórios de altas frequências, os equipamentos de uma subestação podem ser modelados como capacitâncias para a terra (KERI; GOLE; MARTINEZ-VELASCO, 1998). Apenas o TC será representado mais detalhadamente, como um circuito RLC série, uma vez que este é o objeto de estudo dessa monografia.

As chaves seccionadoras podem admitir duas posições operativas: aberta ou fechada. Na condição aberta, a chave pode ser modelada como duas capacitâncias para a terra. Já na condição fechada, pode ser representada como uma única capacitância para a terra. De forma análoga, o disjuntor também possui duas condições operativas, de modo que quando aberto ele deve ser modelado por uma capacitância série e duas capacitâncias para a terra em cada terminal. Na posição fechada ele assume o mesmo modelo da chave seccionadora. A Figura 9 e a Figura 10 ilustram essas considerações.



Fonte: Adaptado de (KERI; GOLE; MARTINEZ-VELASCO, 1998).

Figura 9 – Modelo ATP para a chave seccionadora trifásica.



Fonte: Adaptado de (KERI; GOLE; MARTINEZ-VELASCO, 1998).

Figura 10 – Modelo ATP para o disjuntor trifásico.

3.2.2.2 Barramentos

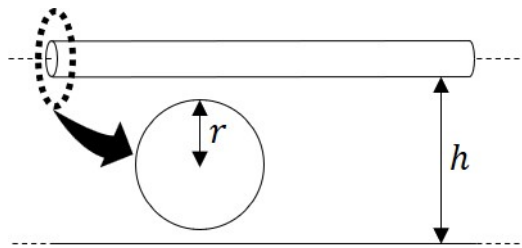
Os barramentos da subestação precisam ser modelados como elemento de linhas de transmissão para serem capazes de representar os fenômenos transitórios. A principal vantagem de se representar os cabos e barramentos de uma subestação a partir de modelos de LT é que todas as características e dimensões são levadas em consideração. Assim, é

apresentado abaixo o embasamento teórico no qual são fundamentados os modelos objeto de estudo dessa monografia.

As linhas de transmissão podem ser modeladas de duas maneiras, que se diferem na consideração da dependência dos parâmetros em relação à frequência e na finalidade de aplicação. Na primeira forma, a parâmetros concentrados, a linha é representada por elementos discretos, como resistores, indutores e capacitores, cujos valores são calculados para uma determinada frequência. Esse modelo é utilizado para linhas curtas em estudos de regime permanente (MARTINEZ-VELASCO; GUSTAVSEN, 2001). Já na segunda forma, a parâmetros distribuídos, a linha é representada segundo a natureza distribuída dos parâmetros, que são representados como constantes ou dependentes da frequência. Esse modelo é mais preciso e por isso, é adotado em estudos transitórios (MARTINEZ-VELASCO; GUSTAVSEN, 2001).

Tendo em vista os objetivos dessa monografia, a abordagem e a solução das equações que relacionam tensão e corrente em um ponto qualquer de uma LT são feitas no domínio do tempo, uma vez que apresentam resultados mais adequados em estudos envolvendo chaveamentos e elementos não lineares (MARTI, 1982). O programa de simulação computacional adotado, o ATP, é executado diretamente no domínio do tempo.

Para descrever as equações de uma linha de transmissão monofásica no domínio do tempo, considera-se um condutor infinitamente longo, de raio r , distante do solo a uma altura uniforme h , de dimensão inferior ao comprimento de onda associado aos sinais de tensão e corrente que circulam pelo condutor (ZANETTA, 2003), conforme representado na Figura 11.

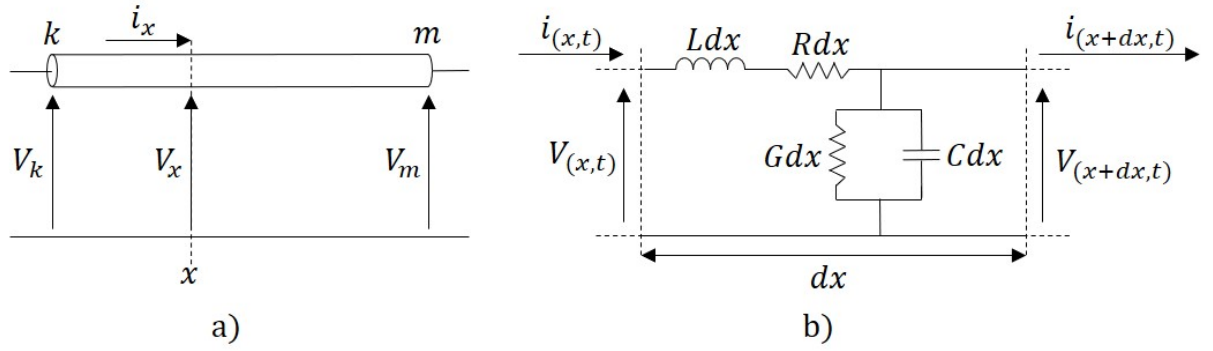


Fonte: Adaptado de (ZANETTA, 2003).

Figura 11 – Representação de uma linha de transmissão para desenvolvimento das equações.

Desprezando-se o efeito pelicular e admitindo-se perdas, é possível representar o circuito equivalente da linha da Figura 11 como na Figura 12 e escrever as seguintes equações diferenciais ordinárias:

$$-\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = Ri(x, t) + L \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (3.4)$$



Fonte: Adaptado de (MARTINEZ-VELASCO; GUSTAVSEN, 2001).

Figura 12 – a) Linha aérea monofásica; b) Elemento dx .

$$-\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = Gv(x,t) + C\frac{\partial v(x,t)}{\partial t} \quad (3.5)$$

onde $v(x,t)$ é a tensão e $i(x,t)$ é a corrente na linha, R e a resistência e a indutância série da linha por unidade de comprimento e o par G e C corresponde à condutância e à capacitância transversais da linha por unidade de comprimento. Pode-se estender essas equações para descrever linhas aéreas polifásicas com n condutores, utilizando para isso matrizes quadradas simétricas de dimensão $n \times n$ para os parâmetros R , L , G e C e de dimensão $n \times 1$ para representar os vetores coluna de tensão e corrente.

Definindo-se $Z(\omega)$, conforme a Equação 3.6 e $Y(\omega)$, como Equação 3.7, onde ω é a frequência angular, em rad/s, pode-se determinar $z(t)$ e $y(t)$ como as transformadas inversas de Laplace de Z e Y , respectivamente.

$$Z(\omega) = R(\omega) + j\omega L(\omega) \quad (3.6)$$

$$Y(\omega) = G + j\omega C(\omega) \quad (3.7)$$

Assim, pode-se reescrever a Equação 3.4 e a Equação 3.5 no domínio do tempo, onde o símbolo $*$ representa a integral de convolução, como

$$\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = -z(t) * i(x,t) \quad (3.8)$$

$$-\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = -y(t) * v(x,t) \quad (3.9)$$

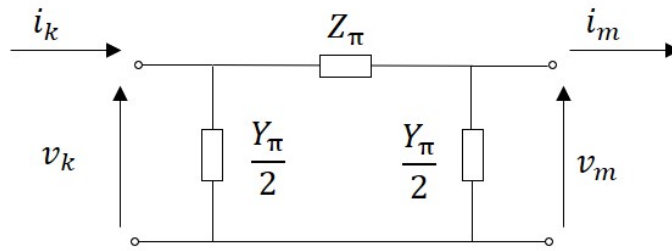
A Equação 3.8 e a Equação 3.9, conhecidas como equações do telegrafista, representam a propagação de ondas de tensão e de corrente em uma linha de transmissão no domínio do tempo.

3.2.2.3 Modelos de linha

Conforme já mencionado, essa monografia fez a análise de diferentes modelos de LT para representar o barramento de uma subestação, de forma a selecionar o mais adequado. Assim, são apresentados três modelos que compreendem as três diferentes possibilidades de se representar uma linha: parâmetros concentrados, parâmetros distribuídos invariantes com a frequência e parâmetros distribuídos variantes com a frequência. Esses modelos estão disponíveis na rotina *Line Constant* a partir do bloco LCC do ATP.

- Modelo PI equivalente

O modelo PI equivalente determina, a partir das tensões e correntes conhecidas no ponto k , para uma frequência específica escolhida pelo usuário, a solução exata para as tensões e correntes na extremidade m da LT, de comprimento l . A representação esquemática desse modelo é apresentada na Figura 13.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 13 – Modelo PI equivalente.

onde Z_π e γ_π podem ser calculados como na Equação 3.10 e na Equação 3.11, a partir da impedância característica Z_C e da constante de propagação γ da LT, que, por sua vez, são obtidos pelos parâmetros da linha por unidade de comprimento, R , L , G e C , conforme a Equação 3.12 e a Equação 3.13, respectivamente.

$$Z_\pi = Z_C \sinh(\gamma k) \quad (3.10)$$

$$\frac{Y_\pi}{2} = \frac{1}{Z_C} \tanh\left(\frac{\gamma k}{2}\right) \quad (3.11)$$

$$Z_C = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (3.12)$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (3.13)$$

O modelo PI disponibilizado pelo ATP é uma simplificação do modelo PI equivalente denominada PI nominal. No modelo PI nominal, consideram-se linhas eletricamente curtas. Nesse caso, assume-se que o produto γl linha tende a zero e pode-se simplificar a Equação 3.10 e a Equação 3.11, fazendo:

$$Z_\pi = Z.l \quad (3.14)$$

$$\frac{Y_\pi}{2} = \frac{j\omega Cl}{2} \quad (3.15)$$

- Modelo de Bergeron

O modelo de Bergeron é uma forma de representar a LT com parâmetros distribuídos constantes determinadas na frequência específica escolhida pelo usuário. Ele é baseado na teoria da propagação de ondas, na qual se adota a simplificação de um circuito sem perdas. Tendo em vista essa consideração, partindo da impedância característica e da constante de propagação da linha, pode-se definir a impedância de surto Z e o tempo de trânsito da linha τ , a partir dos parâmetros por unidade de comprimento l da LT, L e C como na Equação 3.16 e na Equação 3.17, respectivamente (DOMMEL, 1969).

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.16)$$

$$\tau = \frac{l}{\sqrt{LC}} \quad (3.17)$$

Assim, pode-se escrever, no domínio do tempo, utilizando a transformada de Laplace, as equações que relacionam as tensões nos pontos k e m da linha como na Equação 3.18 e na Equação 3.19

$$v_k(t) - Zi_k(t) = v_m(t - \tau) + Zi_m(t - \tau) \quad (3.18)$$

$$v_m(t) - Zi_m(t) = v_k(t - \tau) + Zi_k(t - \tau) \quad (3.19)$$

e as correntes nos pontos k e m da linha podem ser determinadas conforme a Equação 3.20, a Equação 3.21, a Equação 3.22 e a Equação 3.23.

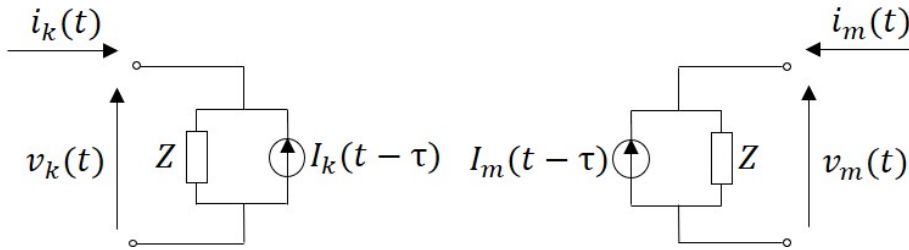
$$i_k(t) = \frac{1}{Z}v_k(t) - I_k(t - \tau) \quad (3.20)$$

$$i_m(t) = \frac{1}{Z}v_m(t) - I_m(t - \tau) \quad (3.21)$$

$$I_k(t) = \frac{2}{Z}v_m(t) - I_m(t - \tau) \quad (3.22)$$

$$I_m(t) = \frac{2}{Z}v_k(t) - I_k(t - \tau) \quad (3.23)$$

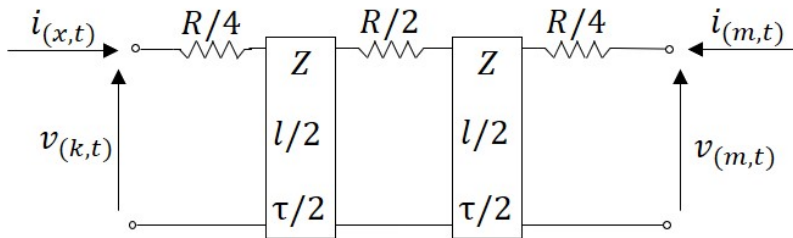
Portanto, o quadripolo apresentado na Figura 12a) pode ser representado pelo circuito equivalente da Figura 14.



Fonte: Adaptado de (DOMMEL, 1969).

Figura 14 – Circuito equivalente.

O modelo de Bergeron disponibilizado pelo ATP leva em consideração perdas, que são representadas a partir da adição de resistências concentradas nas pontas e no meio da linha, entre dois trechos de linhas sem perdas conforme ilustrado na Figura 15.



Fonte: Adaptado de (DOMMEL, 1969).

Figura 15 – Circuito equivalente com perdas adotado no modelo de Bergeron do ATP.

- Modelo JMarti

O modelo JMarti é um modelo de LT a parâmetros distribuídos variantes com a frequência. Utiliza-se uma matriz de transformação real e constante, calculada em uma frequência específica, para realizar as transformações entre os domínios de fase e modal. Uma vez que não há solução exata para determinar a impedância

característica são feitas aproximações racionais a partir do método assintótico de *Bode*. Diferentemente do modelo de Bergeron, as perdas são representadas de forma continuamente distribuída e variável com a frequência.

No domínio do tempo, pode-se escrever as seguintes equações para o modelo JMarti (MARTI, 1982):

$$z_c(t) = \mathcal{L}^{-1} \{Z_C(\omega)\} \quad (3.24)$$

$$a(t) = \mathcal{L}^{-1} \{A(\omega)\} \quad (3.25)$$

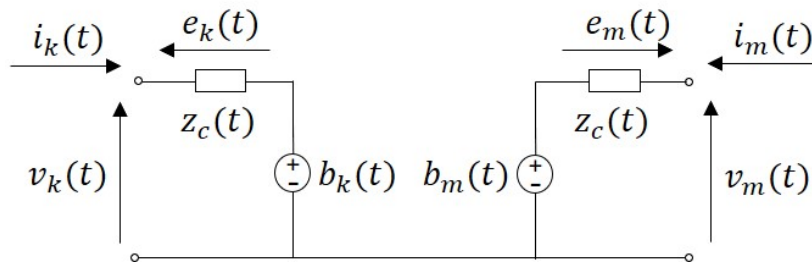
$$b_k = a(t) * f_m(t) = a(t) * [v_m(t) + z_c(t) * i_m(t)] \quad (3.26)$$

$$b_m = a(t) * f_k(t) = a(t) * [v_k(t) + z_c(t) * i_k(t)] \quad (3.27)$$

$$e_m(t) = z_c(t) * i_m(t) \quad (3.28)$$

$$e_k(t) = z_c(t) * i_k(t) \quad (3.29)$$

onde $A(\omega)$ representa a função de propagação de onda, b_k e b_m as funções regressivas associadas às ondas de tensão e corrente e, por fim, e_k e e_m as funções progressivas. A Figura 16 apresenta o circuito equivalente adotado pelo modelo JMarti no domínio do tempo.



Fonte: Adaptado de (MARTI, 1982).

Figura 16 – Circuito equivalente adotado no modelo JMarti.

4 Metodologia

Nesta seção são apresentados o caso base considerado como referência para as análises, a validação dos modelos implementados na simulação de um caso específico de sobretensão de manobra e, finalmente, os casos considerados nas simulações realizadas e discutidas no contexto desta monografia.

4.1 Caso base

O caso base modelado no ATP compreende os três vãos da subestação de 500 kV adotada por (DELGADO, 2018), que possui arranjo em disjuntor e meio, em conformidade com o Procedimento de Rede 2.3 do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (ONS, 2020). A representação dessa configuração é mostrada na Figura 17.

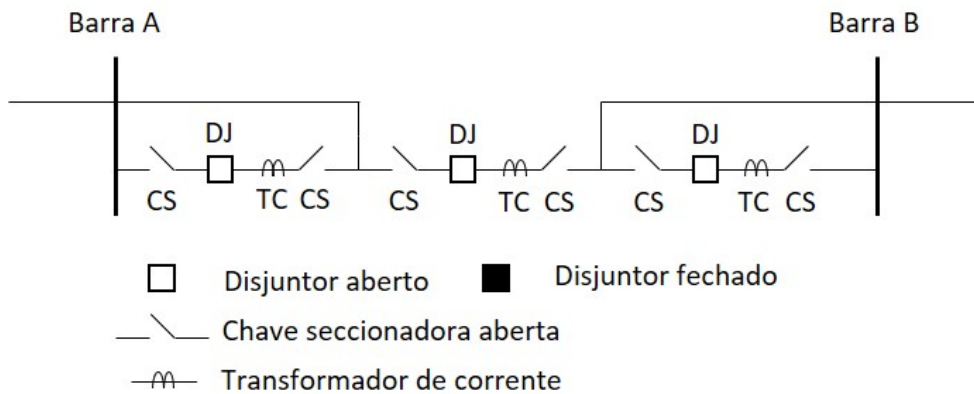


Figura 17 – Representação esquemática dos arranjo disjuntor e meio.

Considerando a faixa de frequências do fenômeno, da ordem de Hz a MHz, a modelagem da rede fica restrita apenas ao interior da subestação. Logo, o sistema externo foi representado por uma fonte de tensão trifásica com valor nominal de 500 kV em série com uma resistência de mesmo valor que a impedância de surto das linhas de transmissão que se conectam aos vãos, a fim de se evitar a ocorrência de reflexão das ondas.

Para fins de validação do modelo desenvolvido nessa monografia, foram utilizados os mesmos dados adotados e disponibilizados por (DELGADO, 2018). Nesse trabalho, foram representados no ATP três vãos de uma subestação de 500 kV. Os equipamentos, exceto o TC, foram modelados pelas suas capacitâncias para a terra por fase, cujos valores são apresentados na Tabela 3. Para as chaves seccionadoras e para os disjuntores se considerou a possibilidade dos contatos estarem abertos ou fechados na modelagem, conforme apresentado na Figura 9 e na Figura 10, respectivamente.

O evento simulado para fins de comparação é o caso representado no diagrama esquemático da Figura 19, no qual avaliam-se as sobretensões no terminal de alta tensão do TC em destaque ao se abrir a chave seccionadora 1, mantendo a chave oposta na posição aberta. O passo de integração utilizado foi igual a 1 ns e a duração da simulação foi igual a 25 μ s.

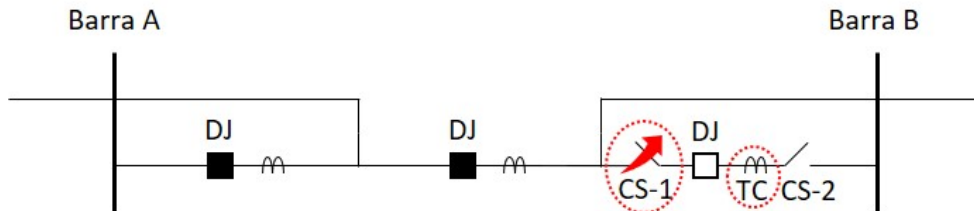


Figura 19 – Esquemático da manobra que foi utilizada para fins de validação.

É apresentada na Figura 20 a comparação entre os resultados obtidos pelo modelo desenvolvido nessa monografia e aqueles apresentados em (DELGADO, 2018).

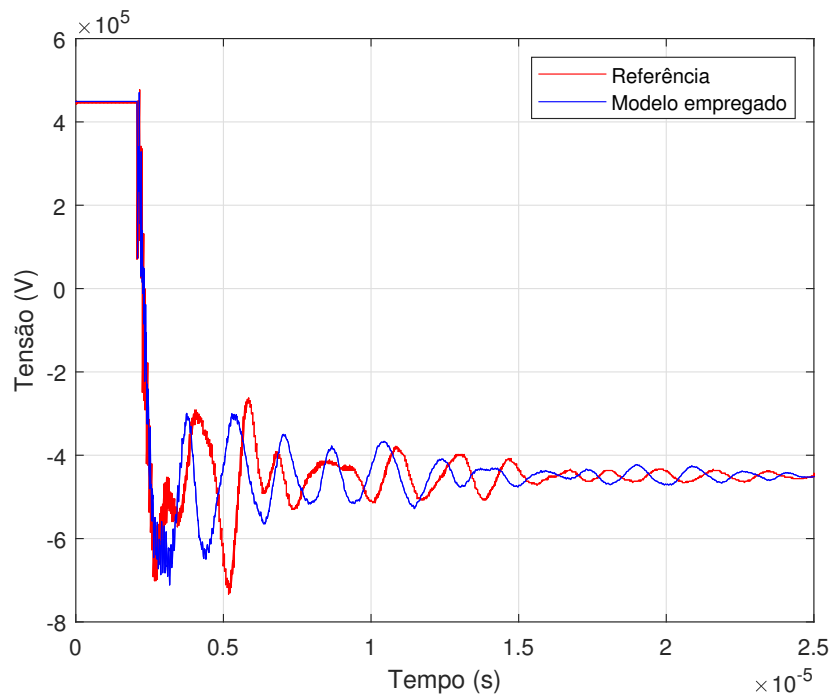


Figura 20 – Comparação das formas de onda de sobretensão no terminal do TC obtida por (DELGADO, 2018) e a forma obtida pelo modelo desenvolvido.

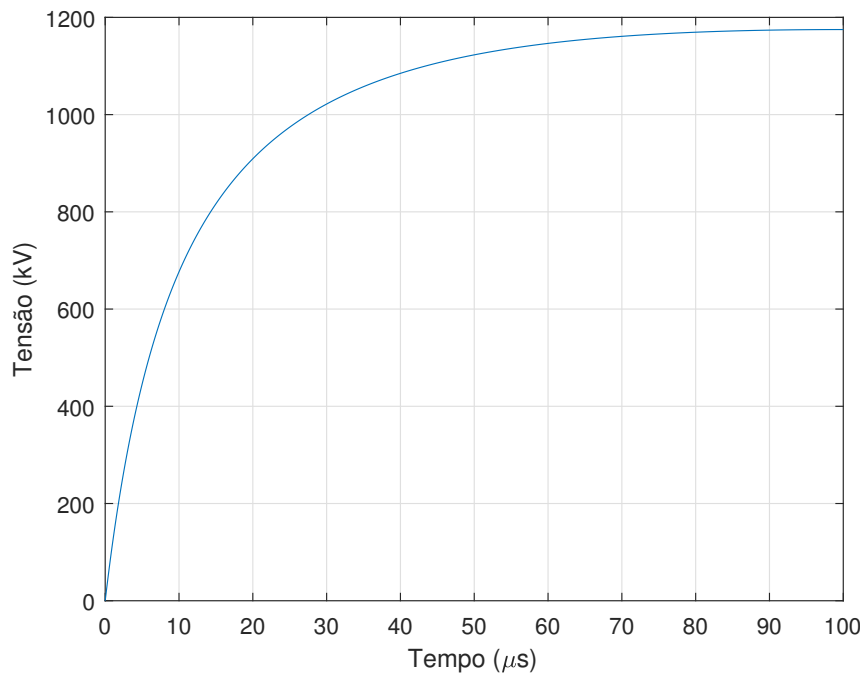
A discrepância entre as formas de onda se deve à utilização de diferentes valores para as impedâncias de surto que representam as conexões entre os equipamentos e os barramentos da subestação, calculadas a partir das alturas e diâmetros dos cabos/tubos empregados no arranjo. Isso foi feito porque nem todas as informações sobre os barramentos modelados estavam disponíveis no trabalho de (DELGADO, 2018), tendo sido

necessário utilizar valores típicos. Logo, apesar de ser observado diferente amortecimento, a amplitude das ondas e o comportamento da cauda apresentam boa conformidade, validando o modelo desenvolvido.

Para se avaliar as solicitações de alta frequência em um equipamento há o método denominado Fator de Severidade no Domínio da Frequência (FSDF) apresentado em (GIGRE, 2011). O método consiste em comparar, no domínio da frequência, as sobretensões transitórias às formas de onda de tensão dos ensaios de tipo, conforme Equação 4.1. Assim, esse critério de análise foi empregado para avaliar as diferentes manobras simuladas.

$$FSDF = \frac{V_{simulado}}{V_{norma}} \quad (4.1)$$

No contexto desse estudo, tem-se interesse pelo ensaio de tipo que avalia a tensão suportável de impulso de manobra. A Figura 21 apresenta a forma de onda do ensaio supracitado para uma amplitude de 1175 kV e tempos de 100/1000 μ s. O valor adotado para amplitude está em conformidade com o nível de tensão da subestação de 500 kV e foi retirado da Tabela 2.



Fonte: Adaptado de (ABNT, 2015).

Figura 21 – Forma de onda padronizada no domínio do tempo para o ensaio de impulso de manobra com amplitude de 1175 kV com tempos de 100/1000 μ s.

A função da onda padronizada apresentada na Figura 21 foi obtida, por meio da aplicação da FFT no *software* MATLAB, a envoltória a ser comparada com as simulações, ilustrada na Figura 22.

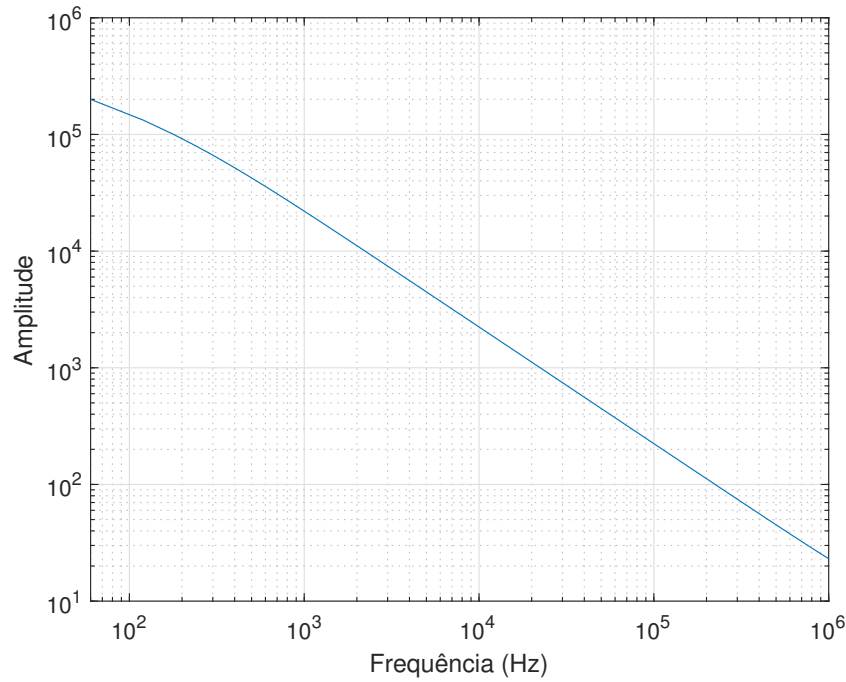


Figura 22 – Envoltória obtida a partir da forma de onda padronizada do impulso de manobra.

4.2 Casos simulados

A fim de se avaliar as sobretensões impostas aos TCs nas manobras de chaveamento, foram consideradas oito possibilidades de eventos a partir do esquemático apresentado na Figura 19, conforme Tabela 4. Por restrição operativa, a chave somente é manobrada quando o disjuntor está aberto. Assim, em todas as simulações, o disjuntor próximo ao chaveamento foi modelado na condição em que seus terminais estão abertos. As restantes chaves e também disjuntores foram representados na condição operativa fechada. Por fim, mantiveram-se idênticas as demais configurações do sistema e alterou-se apenas o modelo de linha de transmissão empregado na representação dos barramentos da subestação para cada caso simulado. Para os modelos PI e Bergeron adotou-se a frequência de 1 MHz para cálculo das impedâncias. Essa frequência foi escolhida por ser considerada representativa do fenômeno analisado.

Tabela 4 – Configuração das chaves em cada caso simulado

Caso	Condição operativa	
	Chave seccionadora 1	Chave seccionadora 2
1	Abertura	Aberta
2	Abertura	Fechada
3	Fechamento	Aberta
4	Fechamento	Fechada
5	Aberta	Abertura
6	Fechada	Abertura
7	Aberta	Fechamento
8	Fechada	Fechamento

5 Resultados e Discussões

As análises e resultados apresentados neste capítulo dependem fundamentalmente das premissas adotadas e dos modelos utilizados para o desenvolvimento do estudo. A Tabela 5 e a Tabela 6 sumarizam os resultados obtidos nas simulações para as sobretensões calculadas, em kV e em pu, respectivamente. A Tabela 7 apresenta os resultados máximos atingidos pelo FSDS nos casos estudados.

Tabela 5 – Valores máximos de sobretensão em kV para cada modelo em função do caso analisado.

Modelo	Sobretensão (kV)							
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
PI	855,40	767,73	259,82	165,34	298,24	672,37	45,510	455,08
Bergeron	924,77	840,49	390,80	637,18	368,25	764,65	60,758	553,26
JMarti	711,54	679,34	311,36	534,79	293,43	706,91	24,971	494,27

Tabela 6 – Valores máximos de sobretensão em pu para cada modelo em função do caso analisado.

Modelo	Sobretensão (pu)							
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
PI	2,0953	1,8805	0,6364	0,4050	0,7305	1,6470	0,1115	1,1147
Bergeron	2,2652	2,0588	0,9573	1,5608	0,9020	1,8730	0,1488	1,3552
JMarti	1,7429	1,6640	0,7627	1,3100	0,7188	1,7316	0,6117	1,2107

Tabela 7 – Valores máximos de Fator de Severidade para cada modelo em função do caso analisado.

Modelo	Fator de Severidade Máximo							
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
PI	14,363	14,222	4,0813	5,2656	5,7862	3,3784	0,5202	1,4399
Bergeron	42,966	43,875	15,383	21,690	27,275	30,414	16,527	18,425
JMarti	3,7746	3,6435	2,9642	3,8360	2,6189	2,6857	1,4932	1,9133

Considerando manobras realizadas pela chave seccionadora 1, os maiores valores de sobretensão para todos os modelos ocorreram no caso 1, que corresponde a abertura da CS1 quando CS2 está aberta. Foram registrados os valores de 2,09 pu no modelo PI, 2,27 pu no modelo de Bergeron e 1,74 no de JMarti. As formas de onda nos domínios do tempo e da frequência são apresentadas na Figura 23 e na Figura 24. Esse resultado está em concordância com os resultados obtidos por (DELGADO, 2018; SPRESSOLA et al., 2019; FREIRE et al., 2007), o que reitera a validação do modelo desenvolvido e das premissas adotadas.

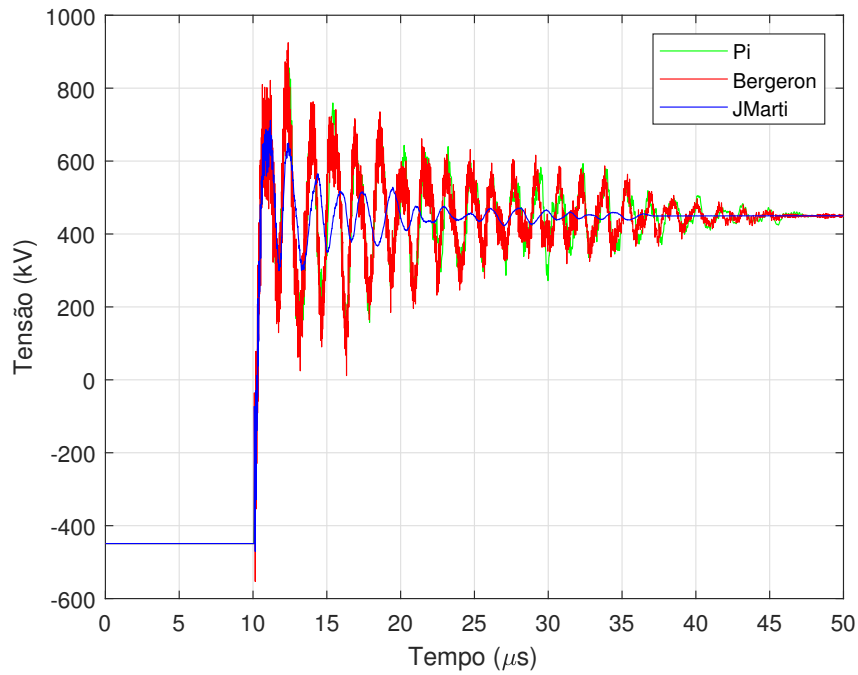


Figura 23 – Sobretensões no domínio do tempo para a fase A - Caso 1.

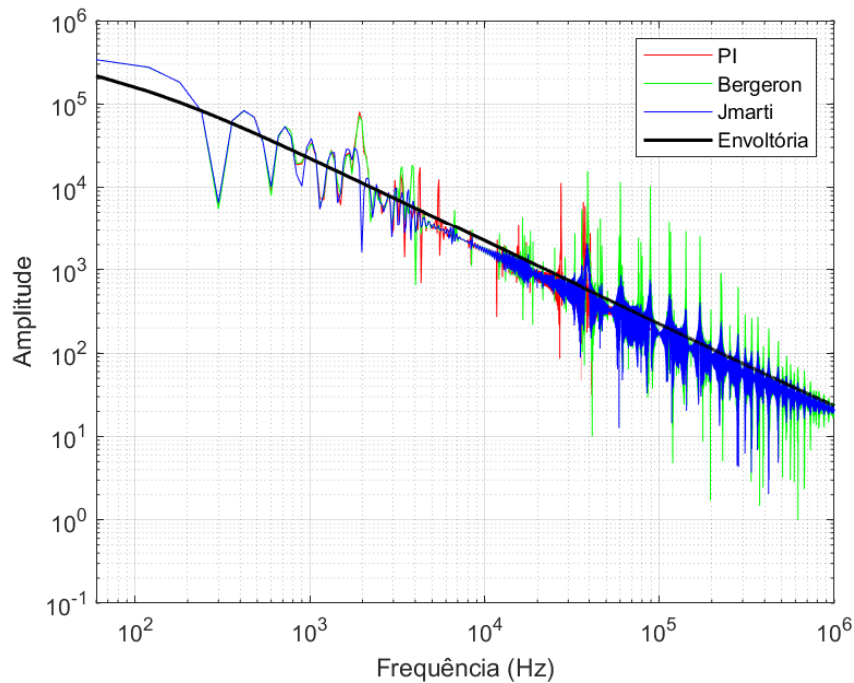


Figura 24 – Sobretensões no domínio da frequência para a fase A - Caso 1.

Para o chaveamento pela chave seccionadora 2, ocorreram as maiores solicitações no caso 6, que é a abertura de CS2 quando CS1 está fechada. Foram registrados os valores de 1,65 pu no modelo PI, 1,87 pu no modelo de Bergeron e 1,73 no de JMarti. As formas

de onda nos domínios do tempo e da frequência são apresentadas na Figura 25 e na Figura 26.

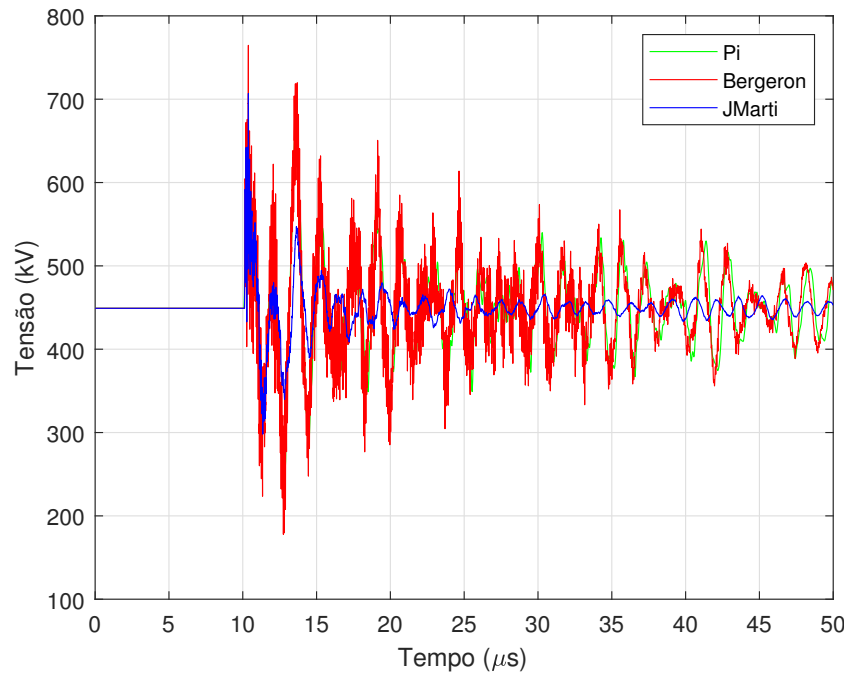


Figura 25 – Sobretensões no domínio do tempo para a fase A - Caso 6.

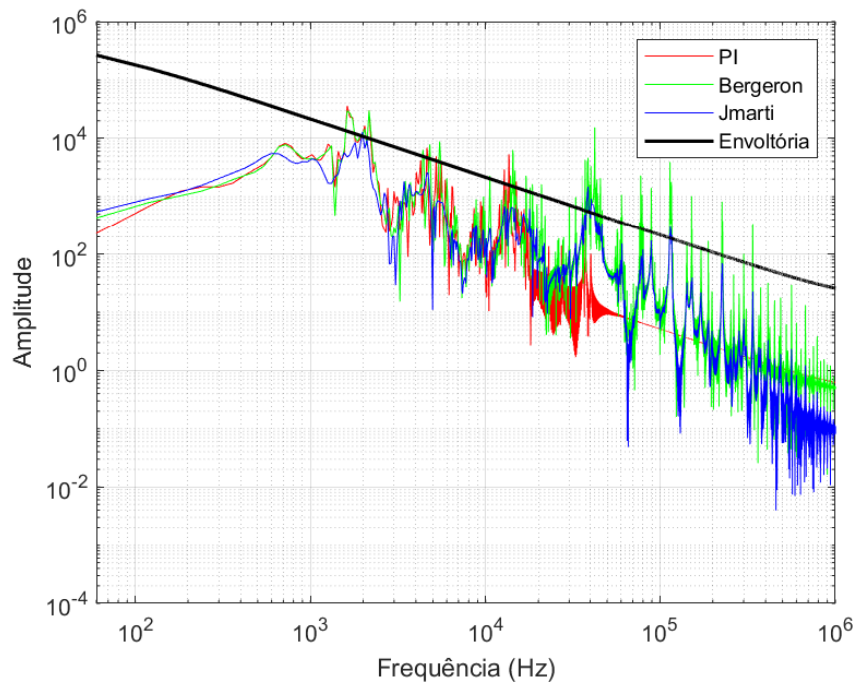


Figura 26 – Sobretensões no domínio da frequência para a fase A - Caso 6.

As demais formas de onda no domínio do tempo e da frequência, associadas aos casos 2, 3, 4, 5, 7 e 8, são apresentadas da Figura 27 a Figura 44, respectivamente.

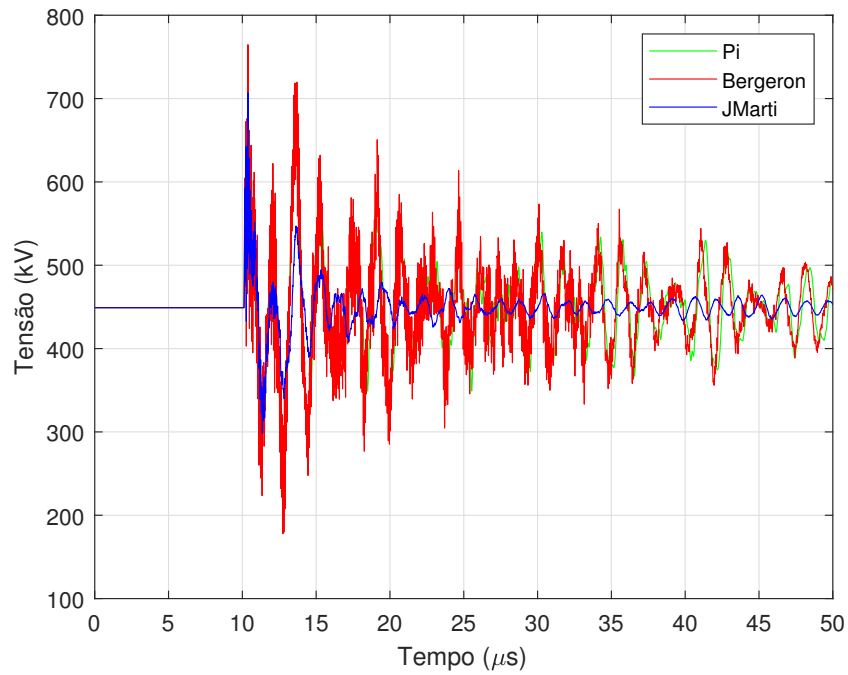


Figura 27 – Sobretensões no domínio do tempo para a fase A - Caso 2.

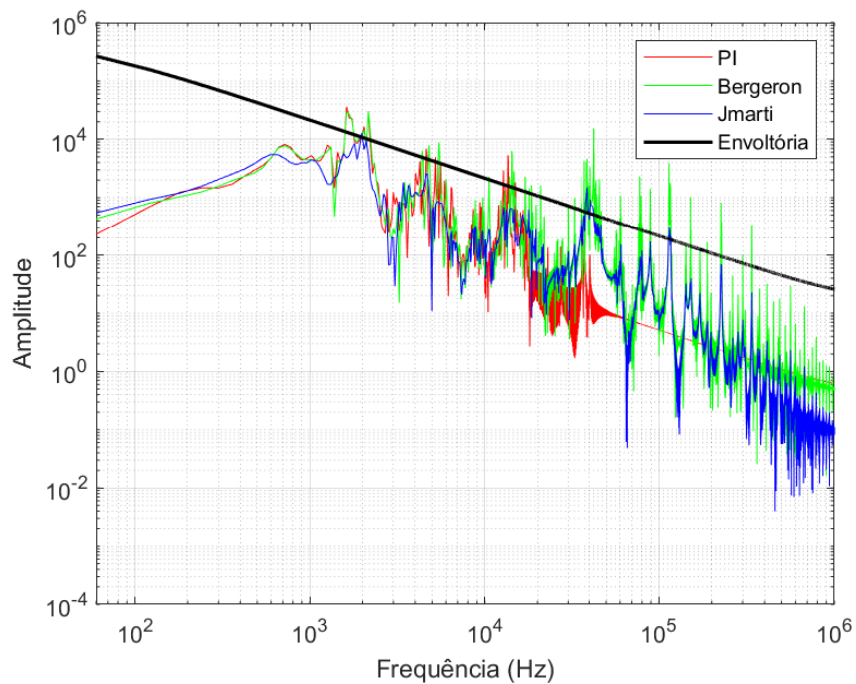


Figura 28 – Sobretensões no domínio da frequência para a fase A - Caso 2.

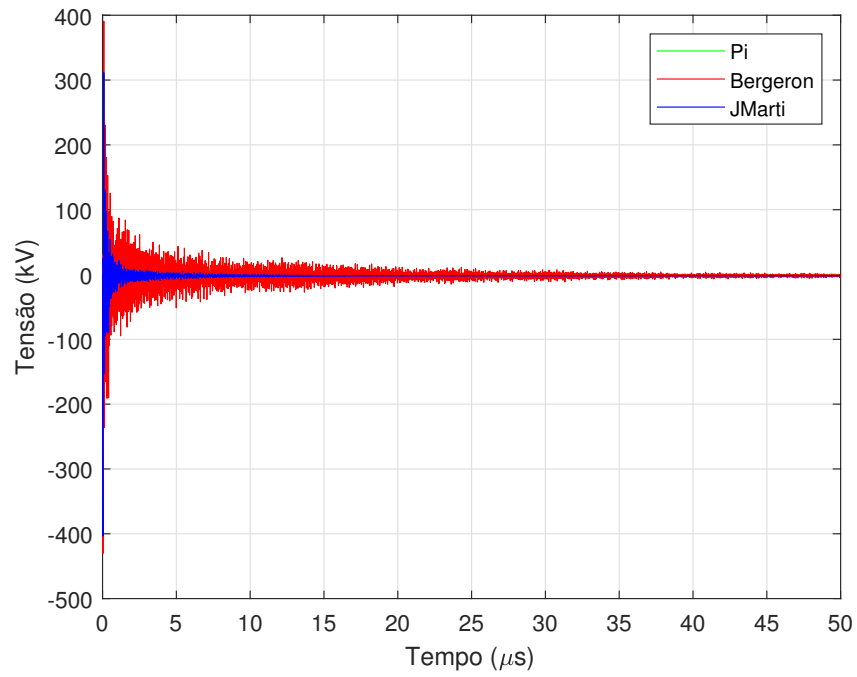


Figura 29 – Sobretensões no domínio do tempo para a fase A - Caso 3.

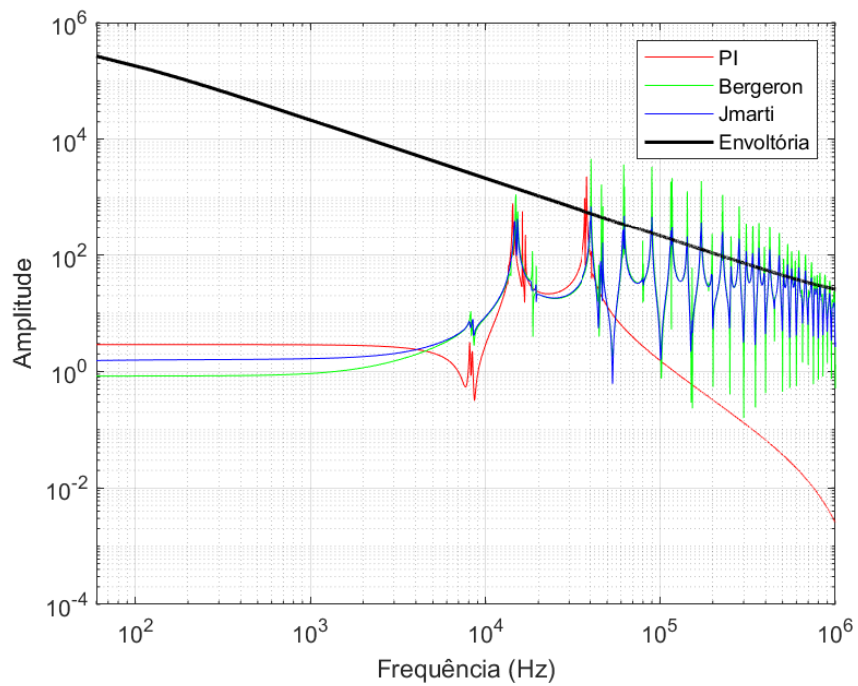


Figura 30 – Sobretensões no domínio da frequência para a fase A - Caso 3.

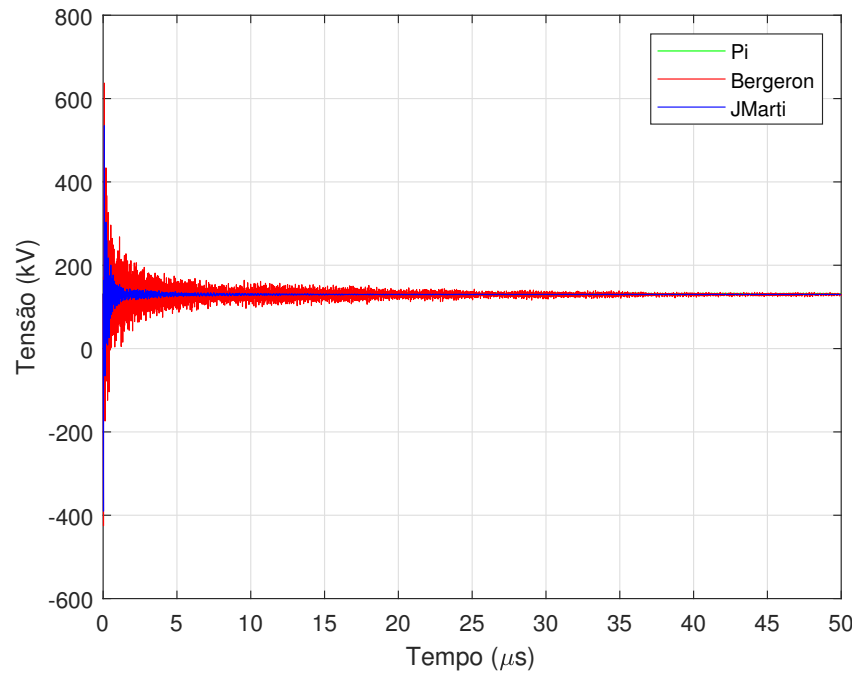


Figura 31 – Sobretensões no domínio do tempo para a fase A - Caso 4.

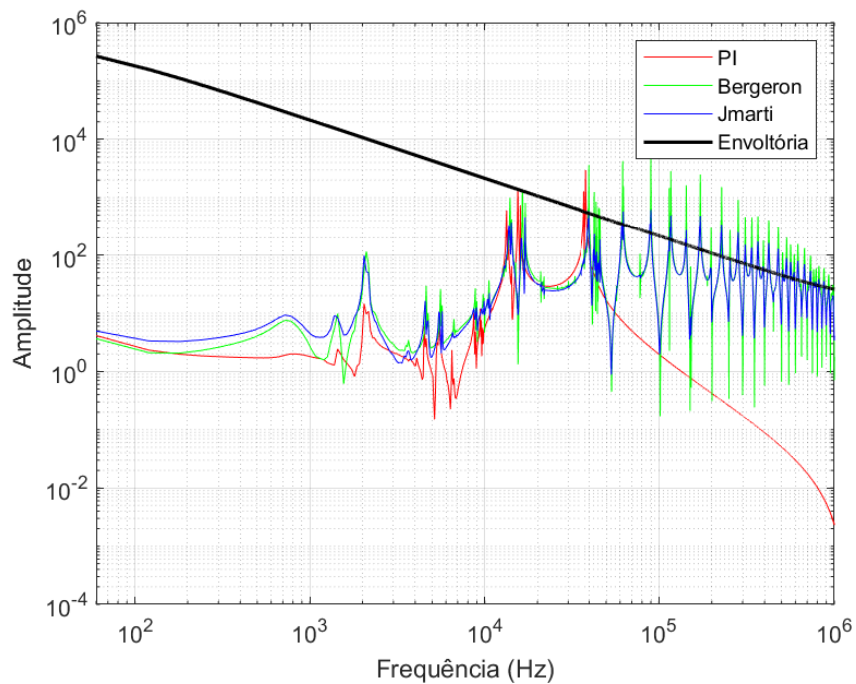


Figura 32 – Sobretensões no domínio da frequência para a fase A - Caso 4.

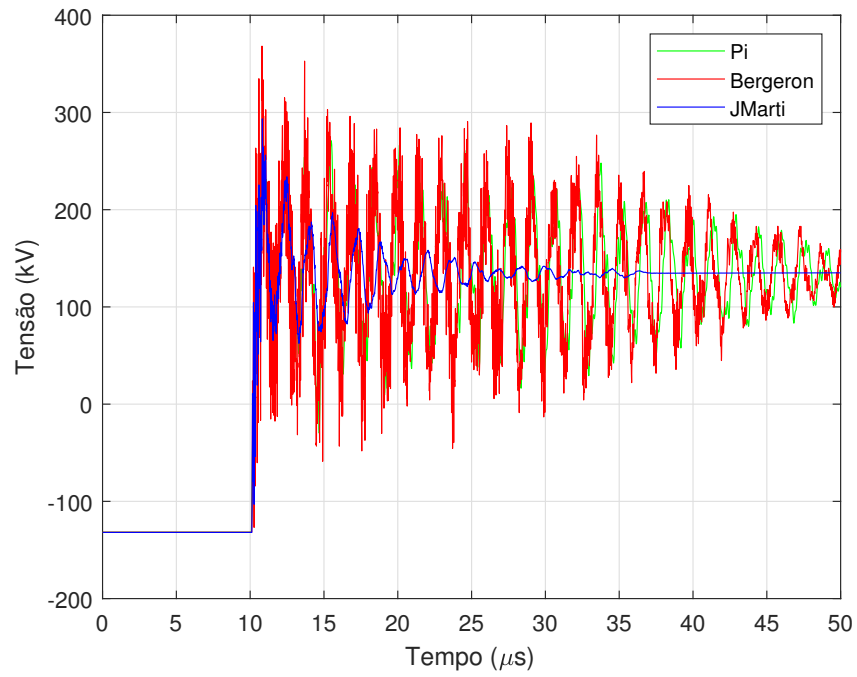


Figura 33 – Sobretensões no domínio do tempo para a fase A - Caso 5.

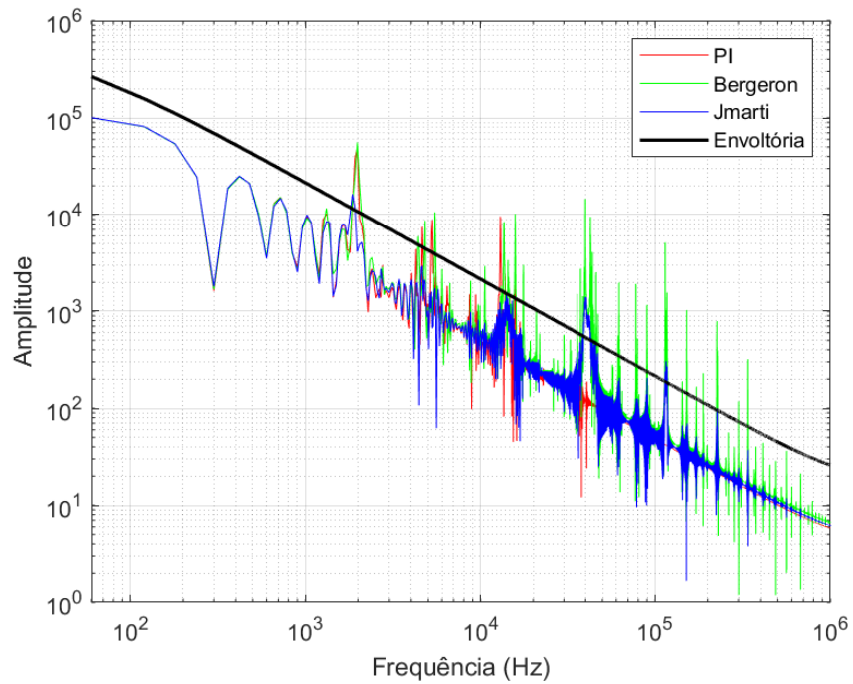


Figura 34 – Sobretensões no domínio da frequência para a fase A - Caso 5.

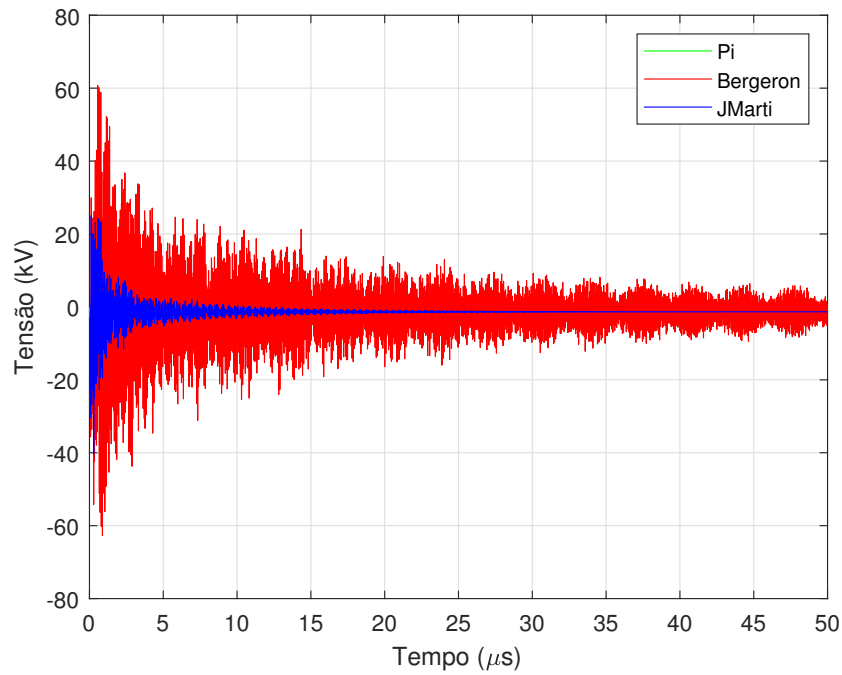


Figura 35 – Sobretensões no domínio do tempo para a fase A - Caso 7.

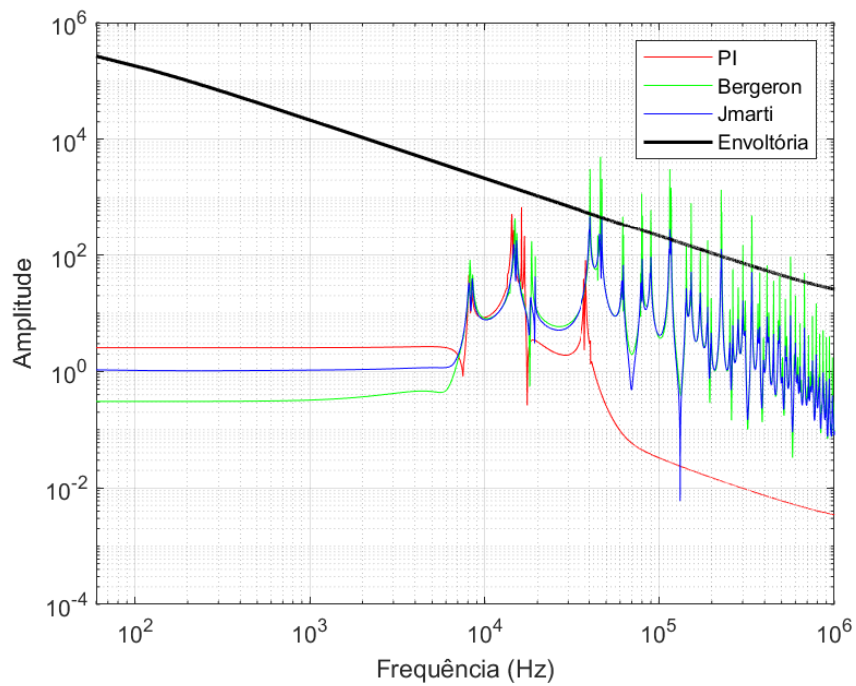


Figura 36 – Sobretensões no domínio da frequência para a fase A - Caso 7.

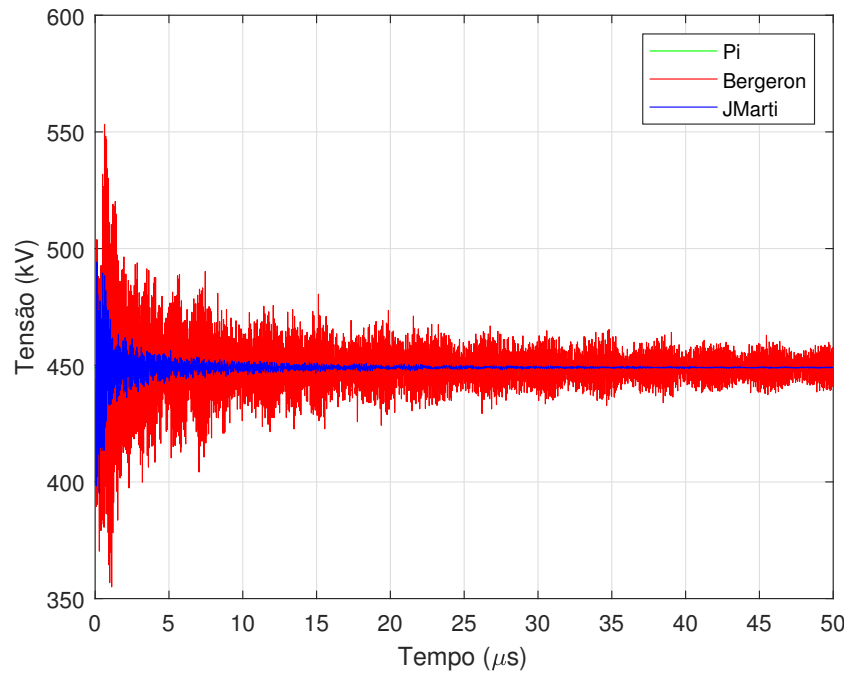


Figura 37 – Sobretensões no domínio do tempo para a fase A - Caso 8.

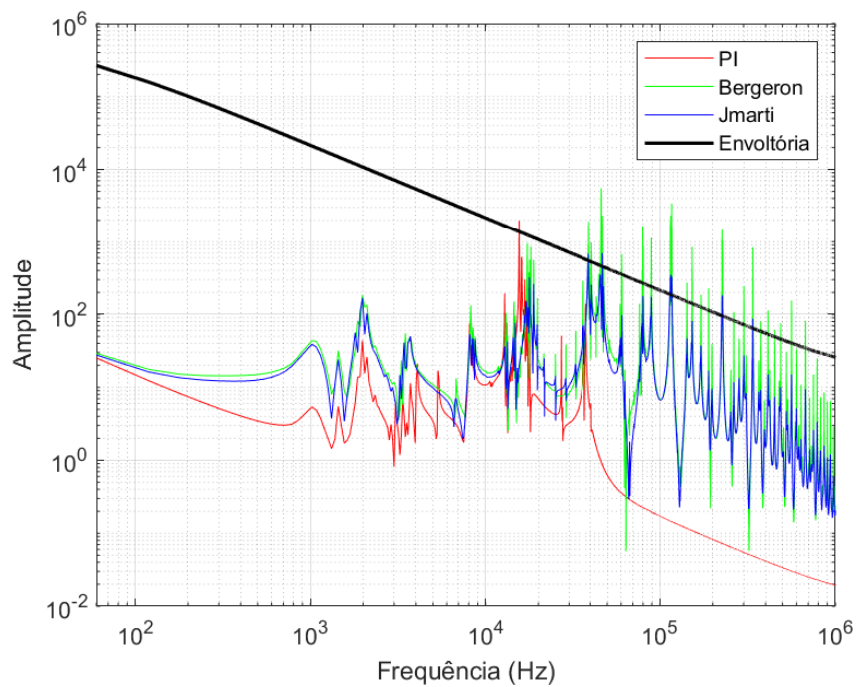


Figura 38 – Sobretensões no domínio da frequência para a fase A - Caso 8.

De maneira geral, as figuras apresentadas acima apontam para as solicitações severas a que os TCs estão sujeitos e revelam que determinadas frequências, não cobertas pelos ensaios padronizados, como impulso atmosférico e de onda cortada, podem representar riscos ao isolamento do TC. Outro ponto a se levar em consideração é o efeito cumulativo

das manobras que podem danificar o conjunto isolante de papel-óleo, conforme apontado por (SPRESSOLA et al., 2019).

São observadas diferenças nas amplitudes das ondas de tensão entre os modelos analisados. Valores obtidos em ambiente computacional a partir de modelos que não são representativos do comportamento do sistema podem levar a superdimensionamento ou falsos prognósticos. Assim, para fenômenos de alta frequência, como a abertura de chaves seccionadoras é muito importante a consideração de parâmetros dependentes da frequência.

Em relação ao fator de severidade, foram verificadas superações da envoltória em todos os casos analisados, sendo os valores mais severos obtidos no emprego do modelo de Bergeron, conforme os dados apresentados na Tabela 6. Isso pode ser explicado pelo fato de o modelo de Bergeron utilizar uma frequência específica, escolhida pelo usuário, para cálculo da matriz de impedância. Caso essa frequência não seja representativa do sinal em análise, os resultados não são adequados. O valor adotado nas simulações foi de 1 MHz, uma vez que o sinal analisado é da categoria de sobretensão de frente muito rápida. Entretanto, diante dos resultados e do desempenho desse modelo, verifica-se que esse valor não foi apropriado, sendo necessário investigar que frequência seria capaz de melhor representar a sobretensão de chaveamento.

A análise comparativa entre os modelos PI e JMarti, em relação ao máximo FSDS, permite concluir que para os casos em que as sobretensões não são muito severas, os dois modelos apresentam resultados na mesma ordem de grandeza. Isso pode ser explicado pelas curtas dimensões elétricas da subestação, que propicia um bom desempenho do modelo PI.

Entretanto, quando a solicitação é mais severa e, logo, com mais componentes de altas frequências, o modelo PI se torna inadequado, fornecendo valores muito acima do comportamento observado no sistema, além de não representar adequadamente a atenuação das ondas. Portanto, o modelo JMarti foi único modelo estudado que pode ser considerado representativo do comportamento do sistema observado nas medições apresentadas nos trabalhos (DELGADO, 2018; SPRESSOLA et al., 2019). Esse resultado já era esperado, uma vez que JMarti é o único modelo estudado que leva em consideração a variação dos parâmetros distribuídos da LT com a frequência.

6 Conclusão

Nas manobras de chaveamento em subestações, durante a ocorrência do fenômeno arco elétrico entre os terminais da chave seccionadora são geradas sobretensões transitórias de alta frequência que se propagam pelos barramentos da subestação. O TC é o equipamento eletricamente mais próximo da chave, logo, mais exposto à severidade das solicitações transitórias causadas pelo chaveamento. Nesse sentido, foi feito o estudo das sobretensões no terminal de alta tensão do TC, geradas nessa aplicação específica. De forma a se obter resultados simulados coerentes com o comportamento real do sistema, essa monografia se dedicou ao estudo do modelo de linha de transmissão empregado na representação trifásica dos barramentos da subestação, a fim de indicar qual modelo seria mais adequado para o estudo.

A partir dos resultados obtidos, foi possível concluir que o modelo JMarti é o indicado para ser utilizado nessa aplicação específica, dentre os modelos avaliados. Isso se deve ao fato de que para sobretensões de manobra, eventos de frente muito rápida, a variação dos parâmetros com a frequência é muito importante para a representação adequada do comportamento do sistema em relação às oscilações e à atenuação.

Dependendo da condição operativa na qual se encontra a subestação, as solicitações assumem valores que excedem os limites estabelecidos por norma e a suportabilidade do isolamento do TC. Esses fatores combinados levam a deterioração gradual do isolamento, que pode levar à falha e, conseqüentemente, a explosão. É necessário, portanto, avaliar a necessidade de um novo ensaio que seja capaz de cobrir eventos dessa natureza transitória.

6.1 Sugestão para Trabalhos Futuros

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros, sugere-se a implementação de outros modelos de chave de forma a considerar os reacendimentos de forma mais rigorosa nessa aplicação específica, que pode vir a se tornar um estudo de rotina na fase de coordenação de isolamento de uma subestação.

Além disso, sugere-se que sejam feitos ensaios em TCs de forma a obter os parâmetros do modelo caixa preta RLC e a impedância harmônica.

Referências

- ABNT. *NBR 6856 - Transformador de Corrente – Especificação e ensaios*. 2015. Citado 5 vezes nas páginas 17, 24, 25, 26 e 46.
- ARRUDA, C. K. d. C. et al. Análise e diagnóstico de transformadores de corrente sujeitos a falhas críticas. *XXVI SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 27.
- D’AJUZ, A. et al. *Transitórios Elétricos e Coordenação do Isolamento: Aplicação em Sistemas Elétricos de Alta Tensão*. [S.l.]: FURNAS/UFF, 1987. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- DELGADO, R. d. S. Interação entre transformadores de corrente de alta tensão e manobras do sistema. *Rio de Janeiro, Set*, 2018. Citado 11 vezes nas páginas 9, 22, 27, 28, 29, 34, 43, 44, 45, 49 e 58.
- DOMMEL, H. W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, IEEE, n. 4, p. 388–399, 1969. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.
- ELHAFFAR, A.; LEHTONEN, M. High frequency current transformer modeling for traveling waves detection. In: IEEE. *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. [S.l.], 2007. p. 1–6. Citado na página 26.
- ENERGIA, C. *ONS recomenda substituição de transformadores da GE*. 2018. Disponível em: <<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53087244/ons-recomenda-substituicao-de-transformadores-da-ge>>. Acesso em: 13 abril de 2022. Citado na página 17.
- FILHO, J. M. *Manual de Equipamentos Elétricos, 3ª*. [S.l.]: Ed., Rio de Janeiro, LTC, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 23, 25 e 26.
- FREIRE, A. R. F. et al. *Manobras de Chaves Seccionadoras com Tensão e Solicitações de Alta Frequência nos Transformadores de Corrente*. 2007. Citado na página 49.
- FRONTIN, S. O. Equipamentos de alta tensão - prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. *Brasília: Teixeira*, v. 2000, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 21, 22, 24 e 25.
- GIGRE. *JWG A2/C4-03 Brochura técnica 012 - Interação entre Transformadores e o Sistema Elétrico com Foco nos Transitórios Eletromagnéticos de Alta Frequência*. [S.l.: s.n.], 2011. Citado na página 46.
- IEC. *IEC 60071-1 Insulation coordination–Part 1: Definitions, principles and rules*. 2006. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- IEC. *61869-1 - Instrument transformers – Part 1: General requirements*. 2007. Citado na página 17.

- IEEE. *C57.13.5 Standard for Performance and Test Requirements for Instrument Transformers of a Nominal System Voltage of 115 kV and above*. 2009. Citado na página 17.
- KERI, A.; GOLE, A.; MARTINEZ-VELASCO, J. Modeling and analysis of system transients using digital programs. *IEEE Special Publication*, 1998. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 35.
- LIMA, D. K. *Transformadores para instrumentos ópticos: aspectos da viabilidade do seu uso pelas empresas do setor elétrico brasileiro*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009. Citado na página 22.
- MARTI, J. R. Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations. *IEEE Transactions on power apparatus and systems*, IEEE, n. 1, p. 147–157, 1982. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 41.
- MARTINEZ-VELASCO, J.; GUSTAVSEN, B. Overview of overhead line models and their representation in digital simulations. In: *Proceedings International Conference on Power Systems Transients (IPST'2001)*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- OLIVEIRA, P. C. d.; PRADA, R. B.; ENDRE, R. B. *Análise de transformadores de corrente para medição*. 2001. Citado na página 17.
- ONS. *Procedimentos de Rede do ONS – Submódulo 2.3 – Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos*. 2020. Citado na página 43.
- POULICHET, P.; COSTA, F.; LABOURÉ, É. High-frequency modeling of a current transformer by finite-element simulation. *IEEE Transactions on Magnetics*, IEEE, v. 39, n. 2, p. 998–1007, 2003. Citado na página 26.
- POZO, M. D. d.; ESTEBAN, D. A. Mediciones de transitorios durante las maniobras de seccionadores en estaciones transformadoras de 500 kv. In: *XIII Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRE (Misiones, Argentina, 2009)*. [S.l.: s.n.], 2009. Citado na página 27.
- SÁ, A. d. *Modelagem de arco elétrico no ar. Aplicações em sistemas de Potência*. 2010. Citado na página 33.
- SALGE, G. S. et al. Uma alternativa às rotinas tacs e models através de uma abordagem de programação gráfica que permite a otimização de simulações transitórias. In: . [S.l.: s.n.]. Citado na página 34.
- SCHWARZ, J. Dynamisches verhalten eines gasbeblasenen turbulenzbestimmten schaltlichtbogens. *ETZ-A*, v. 92, n. 3, p. 389–391, 1971. Citado na página 34.
- SPRESSOLA, F. E. et al. Efeito dos transitórios rápidos gerados por manobra de seccionador sobre transformadores de corrente do tipo top-core. *XXV SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 2019. Citado 4 vezes nas páginas 17, 18, 49 e 58.
- WOSCHITZ, R. *State of the Art of Instrument Transformers*. [S.l.: .], 2009. v. 394. (CIGRE Brochure, v. 394). CIGRE SC A4. ISBN 978-2-85873-081-0. Citado na página 24.

ZANETTA, L. C. J. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência Vol. 52*. [S.l.]: EdUSP, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 36.

A Dados utilizados no ATP

Line/Cable Data: ALTO

Model Data Nodes

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0.37	1.4805	0.0747	-8.5	27	27	45.7	45	4
2	2	0.37	1.4805	0.0747	0	27	27	45.7	45	4
3	3	0.37	1.4805	0.0747	8.5	27	27	45.7	45	4

Add row Insert copy row Delete last row Delete this row Move

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

Figura 39 – Dados do barramento alto.

Line/Cable Data: BARRA

Model Data Nodes

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0	8.414	1E-6	-8.5	21.75	21.75	0	0	1
2	2	0	8.414	1E-6	0	21.75	21.75	0	0	1
3	3	0	8.414	1E-6	8.5	21.75	21.75	0	0	1

Add row Insert copy row Delete last row Delete this row Move

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

Figura 40 – Dados da barra.

Line/Cable Data: BAIXO

Model Data Nodes

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	1.397	2.196	0.0338	-8.5	8.5	8.5	45.7	0	2
2	2	1.397	2.196	0.0338	0	8.5	8.5	45.7	0	2
3	3	1.397	2.196	0.0338	8.5	8.5	8.5	45.7	0	2

Add row Insert copy row Delete last row Delete this row Move

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

Figura 41 – Dados do barramento baixo

Line/Cable Data: SUBIDA

Model Data Nodes

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	1.397	2.196	0.0338	-8.5	12.75	12.75	45.7	0	2
2	2	1.397	2.196	0.0338	0	12.75	12.75	45.7	0	2
3	3	1.397	2.196	0.0338	8.5	12.75	12.75	45.7	0	2

Add row Insert copy row Delete last row Delete this row Move

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

Figura 42 – Dados da conexão de subida.

Line/Cable Data: DESCIDA

Model Data Nodes

	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]	
1	1	1.397	2.196	0.0338	-8.5	17.75	17.75	45.7	0	2
2	2	1.397	2.196	0.0338	0	17.75	17.75	45.7	0	2
3	3	1.397	2.196	0.0338	8.5	17.75	17.75	45.7	0	2

Add row Insert copy row Delete last row Delete this row Move

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

Figura 43 – Dados da conexão de descida.

```

MODEL RARCO_FECHA
DATA      P0
          T0arco
          Beta
          Alfa
          TiniA
          TiniB
          TiniC
          Toper
          Visol

INPUT      V1 [1..3] -- Tensao no terminal 1 do arco [V]
          V2 [1..3] -- Tensao no terminal 2 do arco [V]

VAR        Varco[1..3], Vchave [1..3]
          Parc
          Iarc
          RA2
          RA[1..3]
          G
          Ga
          Tarco
          Vsup[1..3]
          Tini[1..3]
          Arco[1..3]
OUTPUT RA[1..3]
INIT
  RA[1..3]:= 5E12
  Arco[1..3] := OFF
  Tini[1..3] :=[TiniA TiniB TiniC]
  histdef(Varco[1..3]):=V1[1..3] - V2[1..3]
  Vsup[1..3] :=0.0
  Iarc:=0.0
ENDINIT

EXEC
  for i:=1 to 3 do
    Vchave[i]:=V1[i] - V2[i]
    LAPLACE(Varco[i]/Vchave[i]):=(1|S0)/(1|S0+0.0000001|S1)
  if t>=Tini[i] then
    -----
  if t<=(Tini[i]+Toper) then
    Vsup[i]:=Visol-Visol*(t-Tini[i])/Toper {min:0.0,max:Visol}
    Iarc:=Varco[i]/RA[i]
    -----
  if Abs(Varco[i])>=Vsup[i] then
    Arco[i]:= ON
  else
    if Abs(Iarc)<0.001 then
      RA[i]:=5E12
      Arco[i]:= OFF
    endif
  endif
  -----
  if Arco[i] then
    G:=1/RA[i]
    Tarco:=T0arco*(G**Alfa)
    Ga:=((Iarc**2)/(P0*(G**Beta))-G)*(1-1/exp(timestep/Tarco))
    RA2:=1/ABS(G+Ga)
    RA[i]:=RA2 {min:0.001,max:5E12}
  endif
  -----
  else
    RA[i]:=5E12
  endif
endif
endfor
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Figura 44 – Modelo de arco elétrico implementado na rotina MODELS do ATP.