

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso

Estudo e Simulação de Transitórios Envolvendo Rejeições de Cargas e Energizações em Sistemas Elétricos

Danilo Freire de Araújo

Campina Grande - Paraíba - Brasil
Danilo Freire de Araújo, Abril de 2015.

Danilo Freire de Araújo

Estudo e Simulação de Transitórios Envolvendo Rejeições de Cargas e Energizações em Sistemas Elétricos

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Processamento de Energia

Professor George Rossany Soares de Lira, D. Sc.
Orientador

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Abril de 2015.

Danilo Freire de Araújo

**Estudo e Simulação de Transitórios Envolvendo
Rejeições de Cargas e Energizações em Sistemas
Elétricos**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador

Professor George Rossany Soares de Lira, D. Sc.

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador, UFCG

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Abril de 2015.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por todas as graças alcançadas. Sem Ele não teria conseguido iniciar este trabalho, muito menos finalizá-lo.

Agradeço aos meus pais Jorge e Jean que sempre estiveram ao meu lado, me incentivando, me apoiando e por me ensinarem que a educação é a maior herança dada aos filhos. Agradeço também ao meu irmão Renato e minha irmã Maysa pela ajuda e incentivo. Essa vitória é nossa! À vocês, muito obrigado!

As minhas tias Juceline e Jeniffer e a minha avó que cuidaram de mim quando criança e até hoje estão ao meu lado.

Agradeço à minha noiva Priscila pelo carinho, compreensão, companheirismo e zelo. Sempre me apoiou e encorajou durante todo curso. Amo você!

Aos meus cunhados Júnior e Clébia e à minha sogra Geralda que sempre torceram por mim e pelas palavras de incentivo.

Aos amigos da graduação, Danilo e sua esposa Kalina, Fellipe, Glauber, Ramon, Daniel, Rubem, Leonardo e Rodrigo que compartilharam as batalhas do curso, pela amizade e que me ensinaram muito.

Ao professor George pelos ensinamentos, pela confiança e apoio. Suas orientações e sugestões foram fundamentais para concretização deste trabalho e contribuíram para minha formação acadêmica e pessoal.

Aos colegas e profissionais do LAT, em especial a Luís Augusto, Valdemir e Laís que me ajudaram e contribuíram significativamente para a realização desse trabalho.

A Adail, Tchai e ao professor Dámasio pela ajuda e esclarecimentos.

A todos os professores e funcionários do departamento de engenharia elétrica pela determinação.

Em fim, a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

Sumário

Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	ix
Resumo	x
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	1
1.2 Organização do Trabalho	2
Abstract	1
2 Fundamentação Teórica	3
2.1 Fenômenos Transitórios Eletromagnéticos	3
2.1.1 Sobretensão Temporária	4
2.1.1.1 Faltas	4
2.1.1.2 Rejeição de Carga	5
2.1.2 Sobretensão de Manobra	8
2.1.2.1 Energização de Linhas	9
2.1.2.2 Energização de Transformadores	11
2.1.2.3 Rejeição de carga	14
2.1.2.4 Faltas	16
2.1.3 Para-raios de ZnO	18
2.2 Modelagem de Sistemas Elétricos para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos	19
2.2.1 Modelagem de linhas de transmissão	20

2.2.1.1	Representação a parâmetros concentrados	20
2.2.1.2	Representação a parâmetros distribuídos	22
2.2.1.3	Domínio da frequência	25
2.2.2	Modelagem de Transformadores	27
2.2.2.1	Modelagem incluindo a saturação	27
3	Simulações de Transitórios Eletromagnéticos	29
3.1	Descrição do Sistema	29
3.2	Resultados e Análises	32
3.2.1	Energização de Linhas	32
3.2.2	Energização de Transformadores	34
3.2.3	Falta monofásica seguida de rejeição de carga	37
3.2.4	Falta trifásica seguida de rejeição de carga	40
4	Conclusões	42
	Referências Bibliográficas	43

Lista de Figuras

2.1	Linha com carga. Adaptado de Júnior (2003)	6
2.2	Circuito simplificado e interpretação fasorial da linha em carga. Adaptado de Júnior (2003)	7
2.3	Circuito simplificado e interpretação fasorial da rejeição de carga. Adaptado de Júnior (2003)	8
2.4	Tipos de sobretensões de manobra na energização de linhas (ARAÚJO; NEVES, 2005)	9
2.5	Modelo equivalente de transformadores (Adaptado de D’Ajuz (1987))	11
2.6	Característica típica de histerese (D’AJUZ, 1987)	12
2.7	Energização de transformador no instante em que o fluxo é igual ao fluxo residual (D’AJUZ, 1987)	14
2.8	Ocorrência de falta fase/terra: pior momento (a)diagrama do circuito; (b)tensão nas três fases (ARAÚJO; NEVES, 2005)	17
2.9	Curva característica V-I típica de varistores de ZnO	18
2.10	Modelo pi para linhas de transmissão	21
2.11	Linha de transmissão a um condutor. Adaptado de Martinez-Velasco (2009)	23
2.12	Linha de transmissão trifásica (MARTINEZ-VELASCO, 2009).	25
2.13	Modelo incluindo a saturação (MARTINEZ-VELASCO, 2009)	27
3.1	Sistema Elétrico Fictício	30
3.2	Sistema modelado para energização de linha de transmissão.	33
3.3	Tensões no terminais de D2.	33
3.4	Tensões no terminais de D2 com para-raios de ZnO.	34
3.5	Sistema modelado para energização do transformador.	34

3.6	Tensões no terminais de D2.	35
3.7	Correntes de "inrush" no terminais de D2.	35
3.8	Sistema modelado para energização do transformador com para-raios de ZnO.	36
3.9	Tensões no terminais de D2 com para-raios de ZnO.	36
3.10	Tensões no terminais de D3 com para-raios de ZnO.	37
3.11	Correntes de "inrush" no terminais de D2 com para-raios de ZnO.	37
3.12	Sistema modelado para curto-circuito monofásico seguido de rejeição de carga.	38
3.13	Tensões no terminais de D2.	38
3.14	Sistema modelado para curto-circuito monofásico seguido de rejeição de carga com para-raios de ZnO.	39
3.15	Tensões no terminais de D2.	39
3.16	Sistema modelado para curto-circuito trifásico seguido de rejeição de carga.	40
3.17	Tensões no terminais de D2.	40
3.18	Tensões no terminais de D2 com para-raios de ZnO.	41

Lista de Tabelas

2.1	Origem e faixa de frequência de transitórios em sistemas de potência (MARTINEZ-VELASCO, 2009)	20
3.1	Dados de sequência da linha de transmissão (DANTAS et al., 2007)	30
3.2	Tensão das fontes ($V_{base} = 550$ kV) (DANTAS et al., 2007)	30
3.3	Impedâncias das fontes (DANTAS et al., 2007)	30
3.4	Dados do Transformador	31
3.5	Curva de Saturação	31
3.6	Característica dos pará-raios de ZnO com tensão nominal de 192 kV (DANTAS et al., 2007)	32
3.7	Característica dos pará-raios de ZnO com tensão nominal de 420 kV (DANTAS et al., 2007)	32

Resumo

Os transitórios eletromagnéticos podem gerar e propagar surtos nos sistemas elétricos, podendo causar problemas ao longo de todo o sistema. Assim, o estudo dos fenômenos que causam os transitórios são de fundamental importância para especificações dos componentes e na coordenação de isolamento. Nesse trabalho, foi feito um estudo de alguns fenômenos e a modelagem de componentes no sistema. Em seguida, foi utilizado o programa ATP para simular os transitórios eletromagnéticos, com destaque para as sobretensões, e a atuação dos para-raios de óxido de zinco como forma de mitigação.

Palavras-Chaves: Transitórios eletromagnéticos, ATP, sobretensões, para-raios.

Capítulo 1

Introdução

Os sistemas elétricos devem ser projetados para suportar as piores solicitações a que podem ser submetidos, apesar de operarem em regime permanente em maior parte do tempo. Estas solicitações extremas são normalmente produzidas durante situações transitórias dos sistemas. Nos sistemas elétricos os transitórios podem ocorrer devido a uma grande variedade de razões, podendo gerar sobretensões, sobrecorrentes, formas de onda anormais e transitórios eletromecânicos (D'AJUZ, 1987).

Os transitórios eletromagnéticos podem provocar falhas no suprimento de um sistema elétrico de potência. Tais ocorrências confirmam a grande importância do estudo desses fenômenos e o investimento em recursos para evitar o menor tempo possível de falhas. Assim, para estudar todos os tipos de surtos que podem ocorrer em uma rede elétrica, podem ser usados programas computacionais de simulação de transitórios, tais como o *Alternative Transient Program* (ATP).

Desse modo, diante da importância dos estudos de transitórios eletromagnéticos e visando desenvolver as habilidades necessárias para a correta simulação dos fenômenos envolvidos, este trabalho está sendo desenvolvido.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é analisar fenômenos de transitórios eletromagnéticos, a partir de simulações em um sistema de potência fictício e simplificado usando o programa ATP. Os fenômenos analisados são: energizações em linhas de transmissão, transformadores e rejeição de carga.

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- Revisão bibliográfica dos principais fenômenos transitórios em sistemas de alta tensão com enfoque nas sobretensões;
- Estudo sobre a modelagem de componentes de sistemas elétricos para simulações de transitórios eletromagnéticos;
- Uso de para-raios de óxido de zinco (ZnO) como forma de mitigação.

1.2 Organização do Trabalho

Este relatório está dividido em quatro seções, sendo a primeira uma breve introdução a respeito do trabalho. Na segunda seção será feita uma pesquisa sobre os principais fenômenos transitórios eletromagnéticos que ocorrem nos sistemas elétricos e os conceitos para a modelagem dos componentes dos sistemas elétricos para a análise de transitórios eletromagnéticos. Na terceira seção é feita a descrição do sistema modelado no ATP e serão realizadas as simulações. Também serão demonstrados os resultados e a análise. E na quarta seção, serão feitas as considerações finais.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Para auxiliar e embasar os conhecimentos usados para as simulações, foi feita uma revisão bibliográfica sobre os fenômenos de transitórios eletromagnéticos e a modelagem dos componentes dos sistema para simulação dos fenômenos transitórios.

2.1 Fenômenos Transitórios Eletromagnéticos

Os transitórios eletromagnéticos surgem no sistema elétrico a partir de fenômenos que podem ser internos ou externos a esse sistema. Como exemplo de fenômenos transitórios eletromagnéticos, pode-se citar as sobretensões e as sobrecorrentes. Neste trabalho será dado enfoque às sobretensões, haja vista que será utilizado para-raio de ZnO como forma de mitigação.

De acordo com Araújo e NEVES (2005), sobretensões podem ser definidas como tensões transitórias, variáveis com o tempo e com valor máximo superior ao valor de crista das tensões máximas de operação do sistema. Quanto ao grau de amortecimento e duração, pode-se fazer uma divisão em 3 categorias:

- sobretensões temporárias;
- sobretensões de manobra;
- sobretensões atmosféricas.

Determinados fenômenos que causam sobretensões se encaixam em mais de uma categoria. Assim, será feito um estudo sobre cada sobretensão, com destaque aos fenômenos realizados nas simulações.

2.1.1 Sobretensão Temporária

As sobretensões temporárias, também conhecidas como sobretensões sustentadas, possuem duração de muitos ciclos, baixo amortecimento e ocorrem após uma sobretensão com frente de onda lenta (após uma manobra ou ocorrência de defeito) enquanto medidas de proteção não são tomadas (JÚNIOR, 2003).

Os equipamentos que serão submetidos a esse tipo de sobretensão devem ser especificados de modo a suportá-la por um longo período de tempo. A análise da sobretensão sustentada é importante para a escolha de transformadores e da tensão nominal do para-raios, sendo também importante o conhecimento do período de tempo que a sobretensão pode perdurar (JÚNIOR, 2003).

Como exemplos de causas de sobretensões temporárias, temos: faltas, rejeição de carga, efeito ferranti, ressonância e ferroressonância. A seguir será realizada uma descrição das sobretensões temporárias provocadas por rejeição de carga e faltas.

2.1.1.1 Faltas

O tipo de defeito mais comum que ocorre em um sistema é o curto-circuito monofásico, sendo o bifásico e o trifásico menos frequentes. Uma das teorias para se estudar condições de desequilíbrio, como o curto-circuito, é a das componentes simétricas, com a representação da rede por meio dos diagramas de seqüências.

A forma de onda das sobretensões associada a esse tipo de fenômeno é geralmente senoidal à frequência industrial, não amortecida e persiste por vários ciclos até que a falta seja removida (D'AJUZ, 1987).

A falta fase-terra acarreta uma sobretensão nas fases não defeituosas, na qual o valor depende do grau de aterramento do sistema no ponto de falta.

Esse grau de aterramento é expresso através do fator de falta para terra ou fator de sobretensão (f_{st}), que, para o curto monofásico, representa a relação entre as tensões nas fases sem o curto (V_{fs}) pela tensão preexistente na barra antes do curto (V_A).

$$f_{st} = \frac{V_{fs}}{V_A}. \quad (2.1)$$

Seu valor também pode ser calculado a partir das impedâncias de sequência de fase, não sendo necessário para o cálculo o valor real da tensão de operação no ponto considerado. A seguir é apresentada a fórmula aproximada para o fator de sobretensão (JÚNIOR, 2003):

$$f_{st} = \sqrt{3} \frac{\sqrt{k^2 + k + 1}}{2 + k}, \quad (2.2)$$

sendo $k = X_0/X_1$.

A partir do valor de k , três ocasiões podem ocorrer:

- Os casos de sistemas com $k < 1$ por não apresentarem sobretensões não costumam ser analisados nesse contexto, sendo mais importantes para a determinação de correntes máximas;
- Para $k = 1$ o sistema é considerado sem acoplamento mútuo entre as fases e não se espera a influência de uma fase sobre as outras. Nesse caso, o fator de sobretensão é igual a 1;
- Quando X_0 tende a ∞ , ou seja, k tende a ∞ , trata-se de um sistema isolado e o fator de sobretensão é igual a $\sqrt{3}$.

Um sistema com relações $X_0/X_1 < 3$ e $R_0/X_1 < 1$ é considerado eficazmente aterrado e, para esse caso, as sobretensões nas fases são não ultrapassam o valor de 1,4 a 1,5 pu (JÚNIOR, 2003).

O curto-circuito pode ser analisado a partir de programas com representação trifásica da rede, como o EMTP, possibilitando o estudo de mais de uma condição de desequilíbrio simultânea.

2.1.1.2 Rejeição de Carga

A rejeição de carga corresponde a uma perda súbita de carga. Esse fenômeno produz uma sobretensão ao longo de todo o sistema. Isso ocorre pelos seguintes motivos (GUERRA, 2011):

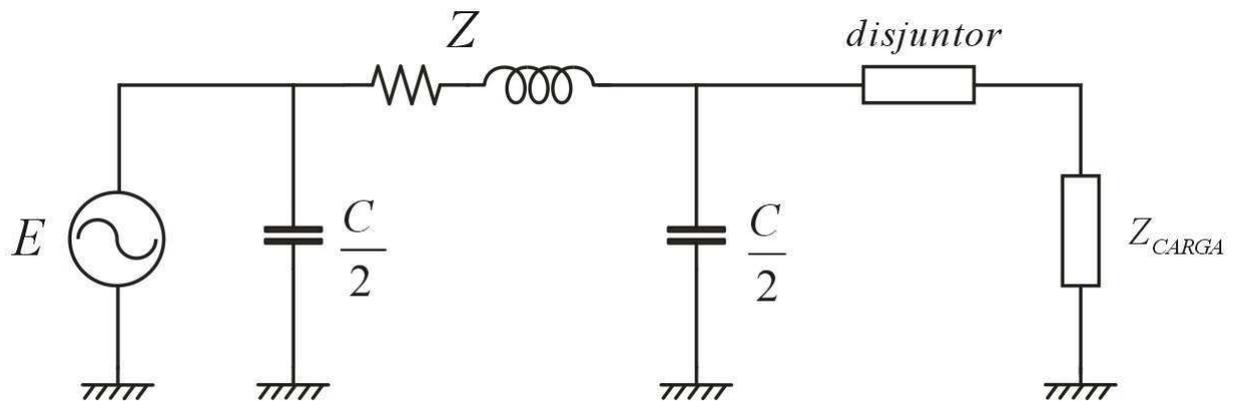
- antes da rejeição, o gerador recebe potência mecânica da turbina e fornece potência elétrica à rede. O torque mecânico é igual ao torque de reação de armadura, que se

anula após a rejeição. Assim, há aceleração e aumento da tensão gerada, pois ela é proporcional à velocidade do rotor;

- com a redução do fluxo de corrente, o efeito capacitivo da linha se acentua e a queda de tensão através das impedâncias reduz.

A Figura 2.18 representa um exemplo de circuito em condição de operação normal.

Figura 2.1 – Linha com carga. Adaptado de Júnior (2003)



Considerando um barramento infinito (gerador ideal), com tensão de operação na barra de carga de 1 pu e $Z_{carga} \ll -\frac{j^2}{\omega C}$, o circuito da figura pode ser simplificado, desprezando-se as capacitâncias. A Figura 2.2 e representa o circuito simplificado para a condição de operação normal e o respectivo diagrama fasorial.

Nesse caso, a tensão na carga é dada por:

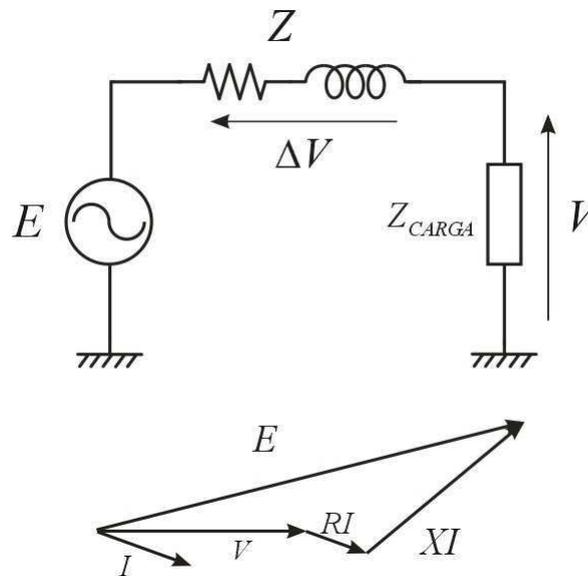
$$V = \frac{Z_{carga}}{Z + Z_{carga}} E. \quad (2.3)$$

A Figura 2.3 representa a situação de abertura do disjuntor representado na Figura 2.18, onde pode ser observado o novo circuito e o respectivo diagrama fasorial. Nesse caso supõe-se que a tensão interna do gerador (E) é mantida constante entre as duas situações (JÚNIOR, 2003).

A linha em vazio foi representada simplificada apenas pela sua capacitância, operando como um grande capacitor.

Nesse caso, a tensão no fim da linha (V') é dada por:

Figura 2.2 – Circuito simplificado e interpretação fasorial da linha em carga. Adaptado de Júnior (2003)



$$V' = \frac{E}{1 - \frac{Q_C}{P_{CC}}}, \quad (2.4)$$

onde:

C é a capacitância total da linha.

Q_C é a potência capacitiva trifásica da linha para uma tensão nominal de linha V :

$$Q_C = V^2 \omega C, \quad (2.5)$$

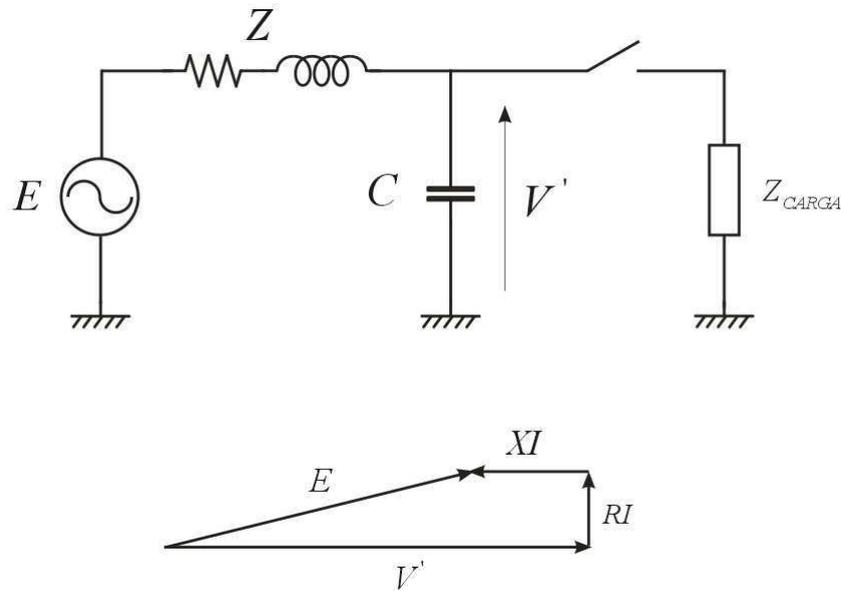
P_{CC} é a potência de curto-circuito trifásica da rede para uma tensão nominal de linha V :

$$P_{CC} = \frac{V^2}{R + j\omega L}. \quad (2.6)$$

Comparando os dois diagramas fasoriais observa-se que a tensão do fim da linha (V') tornou-se maior devido à ocorrência do fenômeno de rejeição de carga, caracterizando o fenômeno de sobretensão.

As sobretensões resultantes do fenômeno de rejeição de carga têm forma senoidal à frequência industrial e são fortemente influenciadas pelo comprimento da linha, pela potência de curto-circuito do sistema e pela geração de reativos das linhas. A ocorrência de curto-circuito pode acentuar a sobretensão de rejeição de carga (D'AJUZ, 1987).

Figura 2.3 – Circuito simplificado e interpretação fasorial da rejeição de carga. Adaptado de Júnior (2003)



De acordo com Júnior (2003), estudos de compensação reativa da linha são feitos para que essas sobretensões permaneçam em uma faixa admissível (abaixo de 1,4 a 1,5 pu). São analisadas as sobretensões nas condições de energização, rejeição de carga, regime permanente e de emergência, escolhendo-se os reatores fixos da linha e a compensação reativa manobrável por meio de reatores e bancos de capacitores.

Para linhas muito longas a melhor solução para o fenômeno de rejeição de carga é a transmissão de potência ativa somente, como no caso da transmissão em corrente contínua (ARAÚJO; NEVES, 2005).

2.1.2 Sobretensão de Manobra

As sobretensões de manobra têm sua origem através do chaveamento dos equipamentos de manobra, ou qualquer variação brusca na rede, como por exemplo os curtos-circuitos. Os principais eventos que provocam esse tipo de sobretensão são a energização de transformadores, rejeição de carga, energização e religamento de linhas de transmissão e eliminação de faltas.

Essas sobretensões são, em geral, altamente amortecidas e de curta duração, caracterizadas por uma frente de onda da ordem de dezenas a centenas de microssegundos. So-

bretensões de manobra tornam-se importantes em níveis elevados de transmissão, acima de 245 kV (JITSUKAWA, 2010).

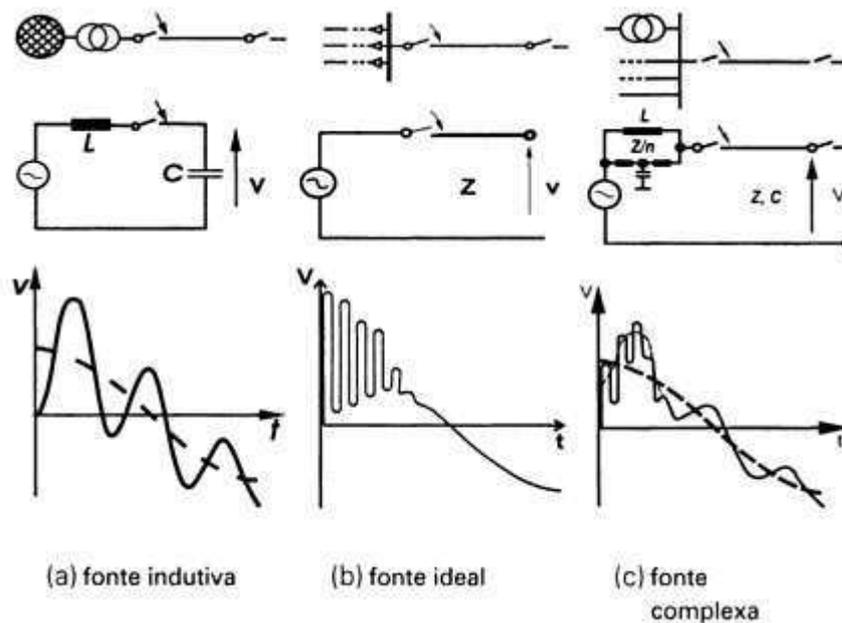
A amplitude e a duração das sobretensões de manobra dependem dos parâmetros do sistema, da sua configuração e das condições em que ele se encontra no momento da manobra. Dessa forma, para um mesmo sistema, a mesma operação pode resultar em valores diferentes para a sobretensão.

A seguir, serão abordadas as energizações em linhas de transmissão, transformadores, rejeição de carga e faltas.

2.1.2.1 Energização de Linhas

As sobretensões de energização de linha podem ser descritas com a ajuda da figura abaixo. Há três situações de energização (Figura 2.4), partindo-se de diferentes tipos de fontes, que podem, por exemplo, significar estágios diversos de um mesmo sistema.

Figura 2.4 – Tipos de sobretensões de manobra na energização de linhas (ARAÚJO; NEVES, 2005)



Na Figura 2.4(a), vêem-se o sistema representado pela indutância de dispersão do transformador de alimentação e a linha substituída pela sua capacitância. Essa simplificação da modelagem é válida para fenômenos de baixa frequência. A onda de tensão

transitória é composta por um única frequência e, se o fechamento da chave ocorre no momento da tensão máxima, a tensão oscila ao longo da linha e chega a duas vezes a amplitude da tensão de operação - linha tracejada da figura.

A Figura 2.4(b) mostra um sistema um pouco mais complexo, em que a linha é energizada por intermédio de outras linhas ou cabos. Se seu comprimento é menor que o das outras, estas, em paralelo, representam uma impedância muito pequena. Assim, pode-se considerar a fonte de alimentação ideal. Há, então, o fenômeno das ondas viajantes e de reflexões sucessivas na linha e a tensão transitória dobra ao seu final. Tem-se, nesses casos, também, a tensão transitória de frequência única - frequência natural da linha.

A configuração mostrada na Figura 2.4(c) é a de um sistema ainda mais complexo em que, além de diversas linhas, observa-se, ainda, a presença de transformadores que alimentam a linha a ser energizada. A tensão transitória é, então, composta de múltiplas frequências. As frequências mais altas são atenuadas e atingem seus picos em momentos diferentes. Como consequência, a amplitude do transitório é significativamente menor que nos casos anteriores.

Do exposto, pode concluir-se que:

- a sobretensão é reduzida à medida que o tamanho do sistema aumenta;
- essa redução é devida à superposição de tensões de diferentes frequências, com seus picos defasados no tempo.

Nos casos de comando tripolar de disjuntores para eliminação de faltas fase/terra, após a interrupção, cargas residuais aparecem nas fases sãs. Na operação de religamento automático, a tensão causada por essas cargas se superpõe à tensão de operação do sistema causando um transitório significativamente maior. Pode-se reduzir essa tensão com, por exemplo, o religamento por meio de um resistor de pré-inserção.

O momento da energização é outro fator que afeta as sobretensões de energização e de religamento. No procedimento normal de operação dos disjuntores, seus contatos nunca se fecham simultaneamente, por causa de uma dispersão estática nos respectivos tempos de fechamento. Isso causa, pelo acoplamento entre fases, transitórios na fases ainda não-energizadas, que se superpõem aos transitórios de energização, quando os respectivos

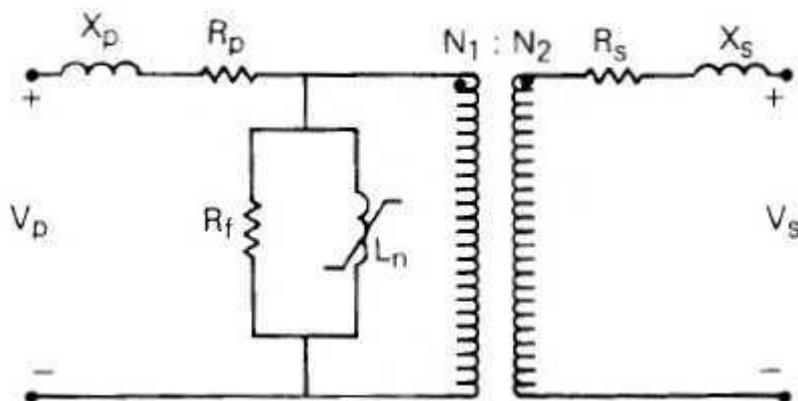
pólos se fecham. Na tentativa de evitar o aparecimento desse fenômeno, adotam-se, às vezes, as chamadas “operações síncronas”, em que os pólos do disjuntos são fechados de acordo com uma sequencia e a intervalos previamente definidos.

2.1.2.2 Energização de Transformadores

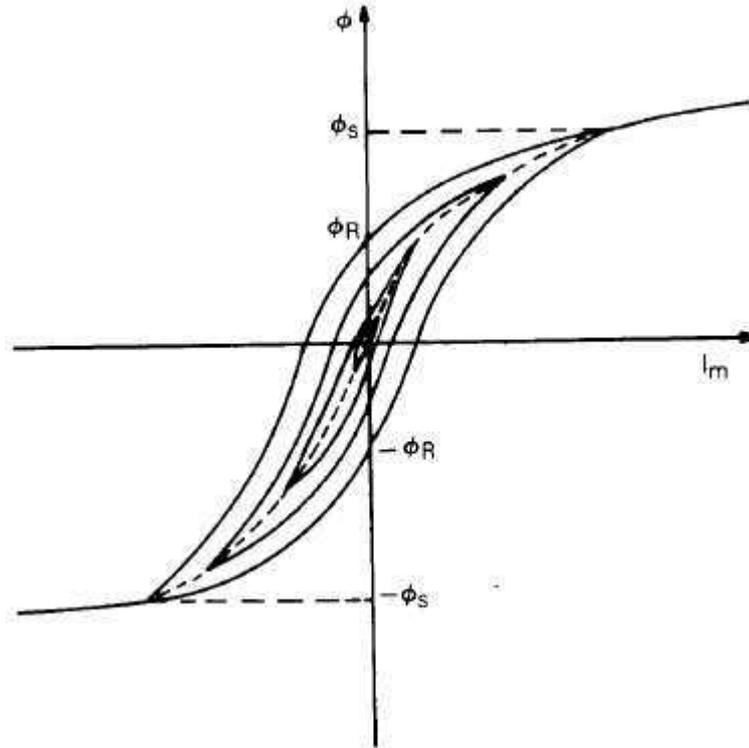
As manobras de energização de transformadores apresentam particularidades que podem conduzir a valores de sobretensões indesejáveis nos sistemas de potência, em função da característica não linear destes equipamentos.

A Figura 2.5 mostra o modelo equivalente de um transformador monofásico de dois enrolamentos com a saturação representada no lado primário. A resistência R_f simula as perdas no núcleo devido a histerese e correntes de Foucault e a indutância não-linear L_n é a responsável pela corrente de magnetização, que é uma parcela da corrente de excitação do transformador. R_p e R_s são as resistências série, que incluem as perdas Joule e as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos. X_p e X_s representam a reatância de dispersão (ou reatância série), que foi dividido entre os dois enrolamentos. V_p e V_s indicam a tensão no lado primário e secundário, respectivamente. N_1 e N_2 representam a relação de espiras no primário e secundário.

Figura 2.5 – Modelo equivalente de transformadores (Adaptado de D’Ajuz (1987))



O núcleo do transformador, de material magnético, em presença de um campo magnético alternado, trabalha em um ciclo de histerese semelhante ao mostrado na Figura 2.6, onde para cada tensão de suprimento tem-se uma curva de histerese diferente.

Figura 2.6 – Característica típica de histerese (D'AJUZ, 1987)

Várias aproximações simples e úteis podem ser obtidas, se o efeito de histerese do material for desprezado. A aproximação mais comumente usada é conhecida como curva de magnetização ou curva de saturação. Esta curva é o lugar geométrico dos vértices dos ciclos de histerese do transformador. Observa-se, nesta figura, que a curva de magnetização pode ser analisada em duas regiões distintas: até o enlace de fluxo atingir o valor ϕ_s ("joelho da curva") e após este ser alcançado.

A região de operação até o "joelho" corresponde à operação em regime permanente, fazendo com que o transformador se comporte como elemento essencialmente linear. A inclinação da curva tem dimensão de uma indutância linear ($L = \frac{d\phi}{di}$) e é conhecida como indutância de magnetização.

Quando um transformador opera na região superior ao "joelho" da curva de magnetização, a corrente de excitação aumenta muito rapidamente podendo ultrapassar a corrente nominal. Nestas condições os enlaces de fluxo se processam pelo ar, daí ser conhecida por reatâncias de núcleo de ar a relação $\phi \times I$ nesta região saturada, onde pequenas variações de fluxo (devido à variação de tensão) provocam grandes variações da corrente de magne-

tização. A operação nesta região só é usual durante transitórios do sistema, notadamente a energização com secundário em vazio ou eliminação de defeitos. Nestas situações a corrente presente nos enrolamentos primários é a corrente de excitação transitória, também conhecida como corrente de “inrush”.

O valor inicial da corrente de “inrush” depende principalmente do ponto na onda de tensão no qual se deu a energização, mas também é influenciado pela magnitude e polaridade do magnetismo residual que ficou no núcleo após a última abertura, bem como pela saturação do núcleo e da impedância total do sistema.

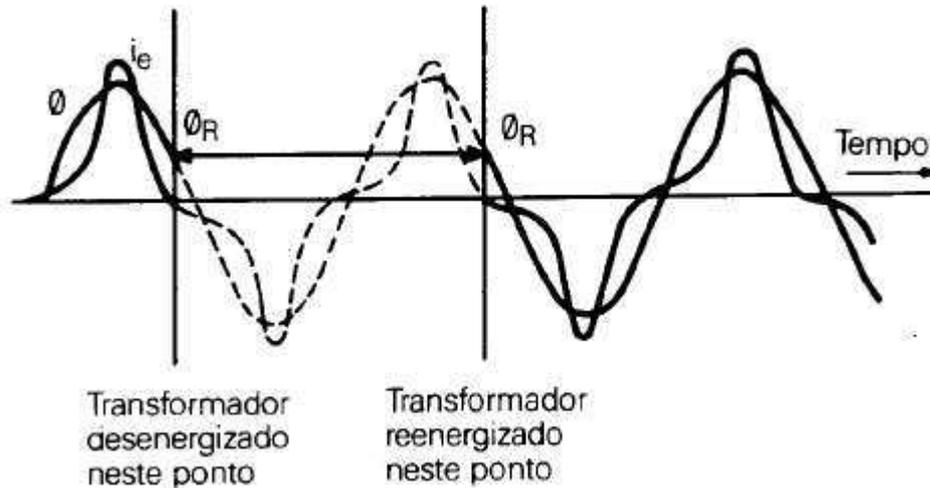
Durante o “inrush”, as correntes circulantes no sistema elétrico, principalmente no transformador energizado, apresentam componentes a frequências diferentes da industrial. Seus principais efeitos são (GUERRA, 2011)

- atuação indevida de fusíveis e relés de proteção de atuação rápida;
- afundamentos temporários de tensão (queda da qualidade de energia);
- solicitações de natureza eletromecânica e térmica no transformador e demais componentes do sistema, o que incorre em redução da vida útil;
- sobretensões causadas por fenômenos de ressonância harmônica em sistemas elétricos, como no caso de linhas de corrente contínua de alta tensão (CCAT).

É importante caracterizar que a fonte de harmônicos é a indutância não linear do transformador energizado, mas os efeitos destas correntes e tensões distorcidas se fazem sentir em todo o sistema elétrico, com maior intensidade nas áreas próximas da subestação energizada.

Quando o transformador é desligado, sua corrente de excitação vai a zero. O fluxo então, seguido o laço de histerese, cairá para um valor residual ϕ_r (Figura 2.7). 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 da operação prévia sem um transitório magnético. Na prática, entretanto, o instante de fechamento não pode ser controlado e um transitório será inevitável.

Figura 2.7 – Energização de transformador no instante em que o fluxo é igual ao fluxo residual (D’AJUZ, 1987)



Todas as outras energizações subseqüentes a esta primeira encontrarão o transformador com algum valor de fluxo residual. A situação que apresenta o fluxo transitório máximo e, conseqüentemente, a maior corrente de “inrush” é aquela em que o transformador é energizado no instante em que a tensão passa por zero e o fluxo magnético pelo seu valor máximo negativo, estando o transformador com o fluxo residual igual a $+\phi_{max}$. Nestas condições, o fluxo poderia atingir até três vezes o valor do fluxo nominal máximo. Este seria o limite teórico, uma vez que os valores usuais para o fluxo residual são normalmente inferiores a 1,0 p.u., apesar da tendência atual dos fabricantes é fornecerem transformadores cujo ciclo de histerese seja não só mais estreito de forma a reduzir as perdas, como também que a saturação só se inicie para valores mais elevados de fluxo, o que, em conseqüência, acarreta que estes transformadores permaneçam com fluxos residuais mais elevados quando de seu desligamento.

2.1.2.3 Rejeição de carga

De acordo com D’Ajuz (1987), as sobretensões devido à rejeição de carga são estudadas sob dois pontos de vista, ou seja, sobretensões transitórias nos primeiros ciclos subseqüentes à rejeição e sobretensões sustentadas que permanecem no sistema, saturação dos elementos não-lineares do sistema (transformadores e reatores).

As sobretensões dependem das condições da rejeição, isto é, se a rejeição é parcial ou total da carga do sistema. As sobretensões com rejeição total de carga são mais elevadas, e por consequência solicitam os equipamentos da subestação terminal (onde acontece a rejeição) com mais severidade, mas podem também solicitar outros pontos da rede.

O transitório inicial, que ocorre no instante da abertura do disjuntor, é da ordem de 1 a 2 ciclos e tem forma de um surto de manobra. O valor deste surto geralmente não é superior aos obtidos em transitórios decorrentes de energização e religamento. Porém, em certos sistemas, devido à utilização de resistores de pré-inserção e com consequente redução dos níveis de sobretensões relativos àquelas manobras, por vezes é necessária a verificação do desempenho dos pará-raios para este surto inicial da rejeição de carga.

Considerando que, devido à ocorrência do curto-circuito, o outro extremo da linha será aberto rapidamente pela atuação da proteção, deve-se verificar se os pará-raios expostos possuem a capacidade de suportar esse transitório.

Com relação à influência nos equipamentos, além do que já foi abordado em relação aos pará-raios, as sobretensões devido à rejeição de carga acarretam outros efeitos danosos. Assim, por causa destas sobretensões elevadas, todo o isolamento deve ser analisado frente a estas solicitações.

Os disjuntores podem também ser substancialmente influenciados por sobretensões devido à rejeição de carga. O primeiro disjuntor a ser manobrado, ou seja, aquele que provocará a rejeição de carga, interromperá a corrente de curto-circuito ou a corrente de carga. Esta é a condição de operação normal para o disjuntor e não requer maiores cuidados, supondo-se que a tensão de reestabelecimento transitória foi corretamente especificada. Por outro lado, o disjuntor da outra extremidade da linha interromperá uma corrente capacitiva em níveis elevados de tensão e frequência. Este tipo de interrupção é mais severo do que ser cuidadosamente observado na preparação da especificação do disjuntor para atendimento desta solicitação.

Portanto, todos os equipamentos do sistema devem ser capazes de suportar, sem dano, as sobretensões que ocorrem durante uma rejeição de carga e equipamentos como pará-raios e disjuntores devem ser especificados de tal forma que o dano a estes equipamentos não seja resultante de sobretensões que podem ser previstas durante estudos do sistema.

2.1.2.4 Faltas

A importância dos estudos de aplicação de falta se prende basicamente a dois fatos. O primeiro é de que as sobretensões transitórias e sustentadas geradas em um sistema quando da ocorrência de um curto-circuito são fatores decisivos na seleção dos pará-raios, uma vez que estes são escolhidos de modo a não atuarem dinamicamente para esta manobra pois, em caso contrário, a sua capacidade de absorção de energia seria excedida. O segundo fato é que este fenômeno tem a si associados dois riscos:

- O risco de um curto-circuito monofásico evoluir para uma falta polifásica;
- O risco de um curto-circuito monofásico causar um segundo defeito em uma outra linha do sistema devido ao aparecimento das sobretensões elevadas.

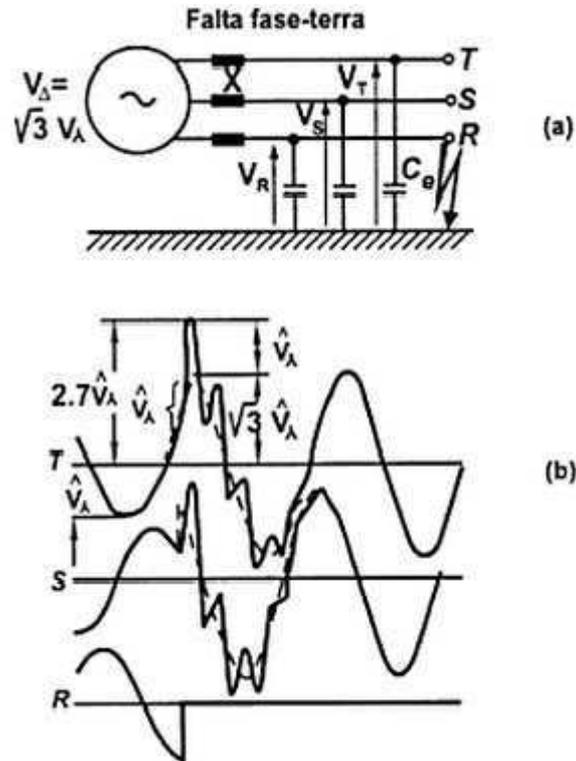
Os estudos de eliminação de falta são importantes no sentido de que os pará-raios devem limitar as sobretensões decorrentes desta operação a níveis compatíveis com a suportabilidade dos equipamentos por eles protegidos, drenando uma energia que esteja dentro do limite de sua capacidade de absorção. Além disto, outro fator de importância é que os disjuntores devem suportar as tensões através de seus pólos quando da abertura de uma linha visando a eliminação do defeito.

Ocorrência de faltas

A sobretensão gerada por uma falta fase/terra - a mais comum - depende, fundamentalmente, do tipo do aterramento do sistema. Os dois extremos são o sistema solidamente aterrado e o sistema isolado. Se o sistema for solidamente aterrado, o fato do potencial de umas das fases se igualar ao potencial da terra não implica nenhuma consequência para as outras fases, pois o neutro do sistema continua no potencial de terra. Se, no entanto, o sistema for isolado, a ocorrência da falta fase/terra causa uma sobretensão transitória nas outras fases que, teoricamente, pode chegar a 2,73 pu, dependendo do momento da falta.

A figura Figura 2.8 mostra o momento raro em que o curto ocorre no máximo negativo da fase R e em que há uma sobretensão de 2,73 pu na fase T.

Figura 2.8 – Ocorrência de falta fase/terra: pior momento (a)diagrama do circuito; (b)tensão nas três fases (ARAÚJO; NEVES, 2005)



Felizmente, esse valor é raramente atingido, pois o momento do curto é aleatório e tem pouca possibilidade de coincidir com o pior instante. Além disso, o fenômeno transitório envolve muitas frequências de diferentes amortecimentos e instantes de picos, o que reduz a tensão máxima possível.

Eliminação de faltas

No caso da eliminação de faltas, a informação mais importante é a que concerne à tensão nos terminais dos disjuntores - tensão de restabelecimento transitória. Essa tensão vai ser aplicada na câmara de extinção dos disjuntores e deve ser suportada para que se tenha uma abertura efetiva do circuito.

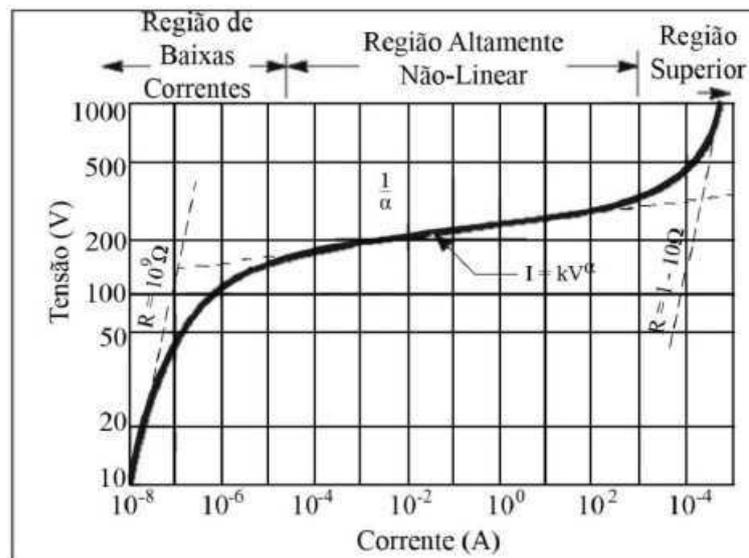
A sobretensão depende não só do tipo de falta (fase/terra, fase/fase/terra etc.) como também da complexidade do sistema (frequência única ou não). No sistema mais complexo, a sobretensão é menor por haver diferentes frequências com diferentes amortecimentos.

2.1.3 Para-raios de ZnO

Os para-raios de óxido de zinco (ZnO) são dispositivos essenciais na proteção de equipamentos dos sistemas elétricos, principalmente contra sobretensões atmosféricas e de manobra, já que limitam essas sobretensões a níveis suportáveis (BRITO et al., 2012).

Nos sistemas elétricos os para-raios de ZnO são normalmente instalados entre a linha e a terra e são constituídos por colunas de elementos varistores. Possuem como principal característica a sua alta não-linearidade entre a tensão e a corrente (como mostra a Figura 2.9).

Figura 2.9 – Curva característica V-I típica de varistores de ZnO



Pelo gráfico pode se observar três regiões. A primeira região é conhecida como região de baixas correntes que acontece quando o varistor está submetido à tensão de operação do sistema. A segunda região é a região de alta não linearidade, onde o varistor conduz uma corrente elevada, mesmo para pequenas variações de tensões. A terceira região, de alta corrente, a característica $V - I$ é novamente linear e para pequenas variações de correntes ocorre grande elevações nas tensões.

Diferentemente de outros equipamentos elétricos do sistema de potência, como o transformador, o para-raio possui terminologias distintas no que corresponde a tensão nominal (U_r) e máxima tensão de operação contínua ($MCOV$).

A tensão nominal é o maior valor da tensão RMS à frequência industrial em que

o para-raios funciona adequadamente em condições de sobretensões temporárias. Já a MCOV corresponde ao valor máximo de tensão RMS à frequência industrial que pode ser aplicado continuamente entre os terminais do para-raios.

2.2 Modelagem de Sistemas Elétricos para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos

A análise de transitórios em sistemas de potência geralmente é feita através de simulação, utilizando ferramentas computacionais tais como o *Electromagnetic Transients Program* (EMTP).

Para a realização dessas simulações é necessário uma modelagem que represente de forma aproximada o comportamento real do sistema. Uma boa representação dos componentes é essencial para uma análise confiável dos transitórios eletromagnéticos. Os seguintes passos devem ser seguidos para a obtenção da representação dos componentes de potência (MARTINEZ-VELASCO, 2009):

1. Escolha do modelo matemático.
2. Coleta de informações para determinação dos valores do parâmetro a ser especificado.
3. Decidir se a informação disponível é suficiente ou não para deduzir todos os parâmetros. Ou seja, verificar a necessidade de estimação de parâmetros.

O modelo matemático dos componentes do sistema de potência (linhas, cabos, transformadores, máquinas rotativas, etc.) para a análise de transitórios eletromagnéticos deve representar os efeitos dos campos eletromagnéticos e das perdas. Os efeitos dos campos magnéticos são representados por indutores e acoplamentos entre eles, enquanto os efeitos dos campos elétricos são representados por capacitores. As perdas são causadas por enrolamentos, núcleo, isolamento, corona e podem ser representadas por resistores (lineares ou não-lineares), ciclos de histerese, ou uma combinação de vários de tipos de elementos de circuito (MARTINEZ-VELASCO, 2009).

Para a modelagem de componentes com parâmetros dependentes da frequência, deve-se escolher um modelo adequado baseando-se na faixa de frequências em que o transitório será simulado.

Na tabela 2.1 estão listados alguns fenômenos que geram transitórios e a faixa de frequência em que ocorrem.

Tabela 2.1 – Origem e faixa de frequência de transitórios em sistemas de potência (MARTINEZ-VELASCO, 2009)

Origem	Faixa de Frequência
Ferroressonância	0,1Hz a 1kHz
Rejeição de carga	0,1Hz a 3kHz
Eliminação de Falta	50Hz a 3kHz
Chaveamento na linha	50Hz a 20kHz
Tensão de Restabelecimento Transitória	50Hz a 100kHz
Sobretensão atmosférica	10kHz a 3MHz
Chaveamento em subestação isolada à gás	100 kHz a 50 MHz

Para as simulações desse trabalho foi necessário o estudo de modelagem de linhas de transmissão e transformadores.

2.2.1 Modelagem de linhas de transmissão

A simulação de transitórios eletromagnéticos é de grande importância para o projeto de linhas de transmissão. Assim, a escolha de um modelo adequado para a linha é necessário para o estudo de transitórios e, especificamente para os cálculos de sobretensões, um modelo preciso é crucial.

Os parâmetros da linha a serem calculados dependerão do modelo a ser utilizado, mas sempre envolverão uma impedância série (efeitos do campo longitudinal) e uma capacitância shunt (efeitos do campo transversal) da linha.

Na próxima seção serão mostradas representações de linhas de transmissão a parâmetros concentrados e distribuídos.

2.2.1.1 Representação a parâmetros concentrados

A representação a parâmetros concentrados é baseada na aproximação de que cada fenômeno é associado a componentes que desempenham uma única função e que estão concentrados virtualmente em um ponto do espaço. Por exemplo: o resistor ideal tem a única

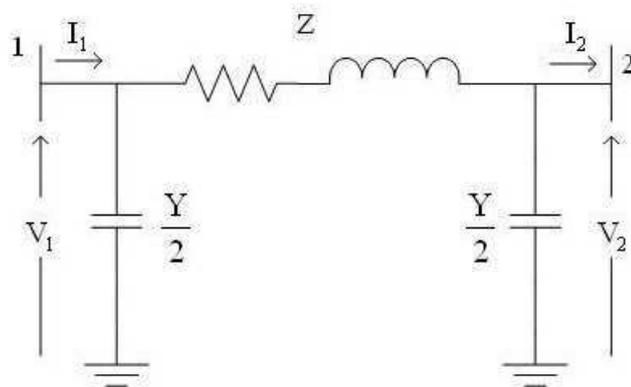
função de dissipar energia, o indutor ideal de armazenar energia do campo magnético, o capacitor ideal armazena energia do campo elétrico e a fonte supre a energia do circuito.

A representação a parâmetros concentrados desconsidera a variação de corrente com a posição ao longo do componente do circuito. Portanto, considera-se que o componente está concentrado em um único ponto do circuito e que a corrente varia apenas com o tempo. Assim, uma variável dependente (corrente que percorre o componente ou tensão entre suas extremidades) é função de apenas uma variável independente (tempo) e o sistema pode ser descrito por equações diferenciais ordinárias.

Segundo Araújo e NEVES (2005), a representação a parâmetros concentrados mostra-se adequada para circuitos percorridos por correntes de comprimento de onda muito maior que a dimensão física dos componentes.

Para a representação de linhas de transmissão a parâmetros concentrados, utiliza-se o modelo pi representado na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Modelo pi para linhas de transmissão



Onde Z representa a impedância total longitudinal da linha, ou seja, seu comportamento resistivo e indutivo, e Y a admitância total transversal da linha, representando o comportamento capacitivo da linha. Esses parâmetros concentrados são resultantes da multiplicação dos parâmetros por unidade de comprimento (r , l , c) pela extensão da linha (d).

$$Z = (r + j\omega l)d, \quad (2.7)$$

$$Y = (j\omega c)d. \quad (2.8)$$

Levando em consideração a representação de linha de transmissão da figura 2.10, as relações entre tensão e corrente para o modelo são:

$$I_1 = \frac{V_1 - V_2}{Z} + V_1 \frac{Y}{2}, \quad (2.9)$$

$$I_2 = \frac{V_2 - V_1}{Z} + V_2 \frac{Y}{2}. \quad (2.10)$$

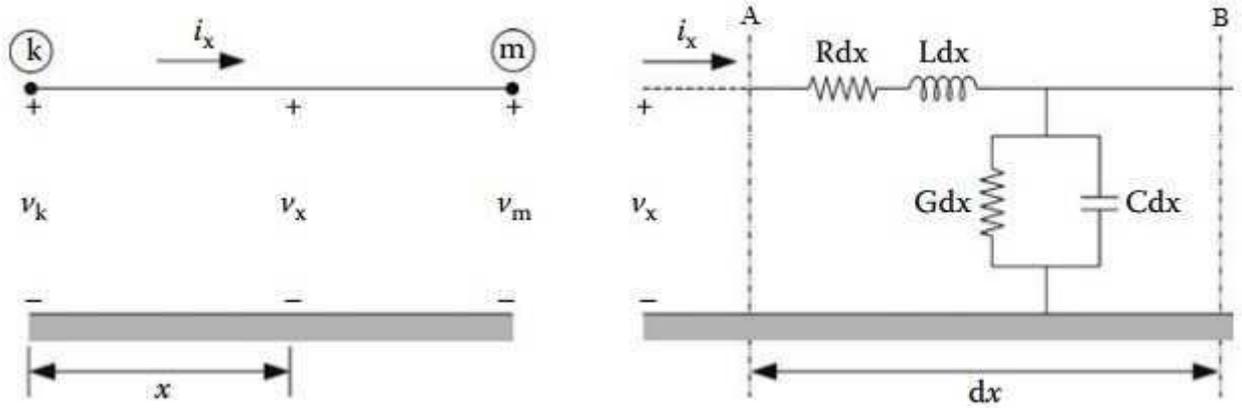
Considerando uma linha de 300 km submetida a sinais à frequência de 60 Hz ($\lambda = 5000$ km) o modelo pi é adequado para a representação, pois o comprimento de onda do sinal é consideravelmente maior que a dimensão da linha. Entretanto, submetendo essa linha a descargas atmosféricas com tempo de frente de onda $\tau = 8 \mu\text{s}$ ($\lambda = 2400$ m), o modelo a parâmetros concentrados não seria mais adequado, tornando-se necessária a representação a parâmetros distribuídos.

2.2.1.2 Representação a parâmetros distribuídos

Para a representação a parâmetros distribuídos, as dimensões do dispositivo não são desprezíveis com relação ao comprimento de onda do sinal. Trata-se de uma representação bem mais complexa, considerando o sinal dependente do tempo e do espaço e fazendo com que o modelo deva ser descrito por equações a derivadas parciais.

A Figura 2.11 representa o circuito equivalente de uma seção diferencial de uma linha monofásica, ou, quando considera-se que ela seja composta por um só condutor. Na figura, R , L , G e C são os parâmetros da linha expressos em valores por unidade de comprimento.

Figura 2.11 – Linha de transmissão a um condutor. Adaptado de Martinez-Velasco (2009)



onde:

Considerando os condutores da linha paralelos ao solo e uniformemente distribuídos e, sendo $v(x, t)$ a tensão entre o ponto A e a terra e $v(x, t) + \frac{\partial v}{\partial x} dx$ a tensão entre o ponto B e a terra, a integral de linha do campo elétrico ao longo da superfície do condutor é igual a:

$$\oint_L E \cdot dl = i \cdot \frac{R}{2} dx + v(x, t) + \frac{\partial v}{\partial x} dx + i \cdot \frac{R}{2} dx - v(x, t). \quad (2.11)$$

O fluxo magnético que corta a área retangular formada pelos pontos A, B e a terra é aproximado pela equação 2.12 quando a distância entre o condutor e a terra for pequena quando comparada ao comprimento da onda viajante.

$$\phi = L \cdot dx \cdot i. \quad (2.12)$$

De acordo com a Lei da Indução de Faraday:

$$\oint_L E \cdot dl = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S B \cdot dS = -\frac{\partial \phi}{\partial t}. \quad (2.13)$$

Combinando as equações 2.11, 2.13 e 2.12 pode-se escrever:

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = Ri(x, t) + L \frac{\partial i}{\partial t}. \quad (2.14)$$

A partir dessa equação que a variação da tensão do ponto A ao B é resultante de quedas provocadas pela resistência e indutância.

Para a análise da variação da corrente entre os dois pontos recorre-se à equação da continuidade, que expressa a conservação da carga no volume limitado pelos pontos A, B e a terra, à direita na Figura 2.11. A corrente que entra no ponto A é $i_x = i(x, t)$ e a que sai no ponto B é $i(x, t) + \frac{\partial i}{\partial x} dx$. Parte da diferença entre essas correntes se deve à fuga de cargas do condutor em direção a outro condutor ou à terra, essa corrente é proporcional à tensão e igual a $v(x, t) \cdot G \cdot dx$, sendo representado no modelo pela presença da condutância G . A outra parte se deve ao acúmulo de cargas na superfície do condutor, o fenômeno é representado no modelo pela presença da capacitância C e resulta em uma taxa de variação da carga de acordo com a seguinte equação:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} [C \cdot dx \cdot v(x, t)] = C \cdot dx \cdot \frac{\partial v}{\partial t}. \quad (2.15)$$

Então, de acordo com a equação da continuidade:

$$i(x, t) + \frac{\partial i}{\partial x} dx + v(x, t) \cdot G \cdot dx - i(x, t) = -C \cdot dx \cdot \frac{\partial v}{\partial t}. \quad (2.16)$$

E, conseqüentemente:

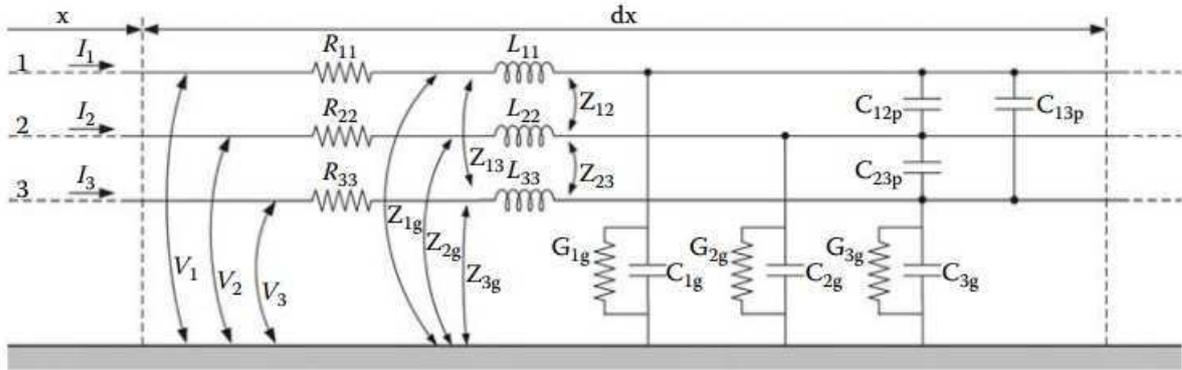
$$-\frac{\partial i}{\partial x} = Gv(x, t) + C \frac{\partial v}{\partial t}. \quad (2.17)$$

Assim, as equações no domínio do tempo para a linha com um só condutor são representadas a seguir:

$$-\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = Ri(x, t) + L \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}, \quad (2.18)$$

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = Gv(x, t) + C \frac{\partial v(x, t)}{\partial t}. \quad (2.19)$$

A Figura 2.12 representa uma seção diferencial de uma linha trifásica não blindada, evidenciando os acoplamentos entre indutâncias série e capacitâncias shunt.

Figura 2.12 – Linha de transmissão trifásica (MARTINEZ-VELASCO, 2009).

De forma similar ao caso de um só condutor, mas considerando agora o acoplamento entre os condutores, as equações no domínio do tempo para linhas com mais de um condutor são representadas a seguir:

$$-\frac{\partial \mathbf{v}(x, t)}{\partial x} = \mathbf{R}\mathbf{i}(x, t) + \mathbf{L}\frac{\partial \mathbf{i}(x, t)}{\partial t}, \quad (2.20)$$

$$-\frac{\partial \mathbf{i}(x, t)}{\partial x} = \mathbf{G}\mathbf{v}(x, t) + \mathbf{C}\frac{\partial \mathbf{v}(x, t)}{\partial t}. \quad (2.21)$$

onde:

$v(x, t)$ e $i(x, t)$ são respectivamente os vetores de tensão e corrente. \mathbf{R} , \mathbf{L} , \mathbf{G} e \mathbf{C} são as matrizes dos parâmetros da linha expressos em valores por unidade de comprimento.

Para uma modelagem mais precisa da linha, esses parâmetros podem ser considerados dependentes da frequência, embora \mathbf{C} possa ser assumido constante e \mathbf{G} geralmente é desprezado.

Essas equações governam o fenômeno de propagação de ondas eletromagnéticas nas linhas, para resolvê-las, e assim determinar a variação de tensão e corrente tanto no tempo quanto ao longo da linha, recorre-se a uma análise no domínio da frequência.

2.2.1.3 Domínio da frequência

Considerando a dependência da frequência dos parâmetros série, a metodologia para solução das equações da linha deve ser feita no domínio da frequência. Para o caso de um

condutor, aplicando a transformada de Laplace nas equações 2.18 e 2.19 e considerando as condições iniciais nulas, tem-se:

$$-\frac{dV}{dx} = (R + sL).I(x, s), \quad (2.22)$$

$$-\frac{dI}{dx} = (G + sC).V(x, s). \quad (2.23)$$

Derivando a equação 2.22 em relação ax e substituindo a derivada da corrente em relação a x pela equação 2.23, e fazendo o mesmo para a equação da corrente, substituindo a derivada da tensão, temos:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = (R + sL).(G + sC).V(x, s), \quad (2.24)$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = (R + sL).(G + sC).I(x, s). \quad (2.25)$$

Nesse caso a solução dessas equações torna-se trivial e, sendo a constante de propagação $\gamma = \sqrt{(R + sL)(G + sC)}$, tem-se a seguinte solução:

$$V(x, s) = A(s)e^{-\gamma x} + B(s)e^{\gamma x}, \quad (2.26)$$

$$I(x, s) = \frac{A(s)}{Z_c(s)}e^{-\gamma x} - \frac{B(s)}{Z_c(s)}e^{\gamma x}. \quad (2.27)$$

em que $Z_c(s) = \sqrt{\frac{R+sL}{G+sC}}$ é a impedância característica da linha.

As constantes em relação a x , $A(s)$ e $B(s)$, são determinadas a partir das condições de contorno no início e no final da linha.

O comportamento de linhas com mais de um condutor, no domínio da frequência, também pode ser representado de forma similar às equações 2.24 e 2.25, substituindo os elementos R , L , G e C pelas matrizes \mathbf{R} , \mathbf{L} , \mathbf{G} e \mathbf{C} .

Além da modelagem dos condutores, para o modelo de linhas de transmissão também é importante representar outras partes físicas, como torres, aterramento e fenômenos como o efeito corona. Entretanto, só será abordado a modelagem dos condutores.

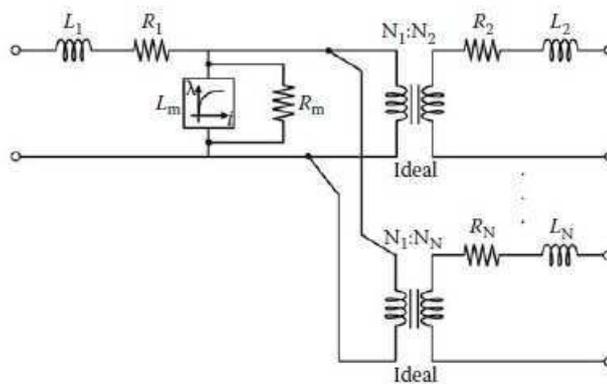
2.2.2 Modelagem de Transformadores

2.2.2.1 Modelagem incluindo a saturação

A saturação do transformador é um componente importante de muitos fenômenos transitórios eletromagnéticos de baixa frequência, incluindo ferrorressonância, sobretensões temporárias durante a rejeição de carga e energização do transformador que leva a correntes de “inrush”. Em geral, a saturação precisa de ser incluído na transitórios que envolvem um elevado fluxo. O fluxo total no núcleo de ferro durante uma energização é a soma dos dois fluxos, o fluxo residual e o fluxo forçado, sendo que este último depende do tempo de fechamento dos pólos do disjuntor.

O modelo mostrado abaixo é conhecido como STC (*Saturable Transformer Component*) no software de simulação de transitórios ATP/EMTP. O enrolamento primário do transformador é considerado como um circuito RL desacoplado. No caso de transformadores multifásicos, as outras fases são tratadas como se possuíssem um transformador de dois enrolamentos. A Figura 2.13 mostra a configuração considerada nessa modelagem.

Figura 2.13 – Modelo incluindo a saturação (MARTINEZ-VELASCO, 2009)



No circuito magnético equivalente, os enrolamentos aparecem como fontes magnetomotrizes (FMM), os caminhos de dispersão aparecem como relutâncias lineares e os núcleos ferromagnéticos aparecem como relutâncias com saturação. Nota-se também que, nesse modelo, tanto os efeitos da saturação quanto os efeitos da histerese são incluídos na modelagem através de um indutor não-linear em um nó fictício interno ao transformador representados pela figura Figura 2.13 pelos elementos L_m e R_m .

Este modelo possui algumas limitações, pois não pode ser usado para mais do que três enrolamentos, embora sejam raros transformadores com mais de três enrolamentos e a indutância magnetizante, com a resistência em paralelo, é conectada ao ponto estrela, o qual nem sempre é o ponto topologicamente correto.

Os modelos tipo-T e pi para transformadores não serão tratados nesse estudo, já que o modelo que inclui a saturação é mais adequado para os fenômenos aqui abordados.

Capítulo 3

Simulações de Transitórios Eletromagnéticos

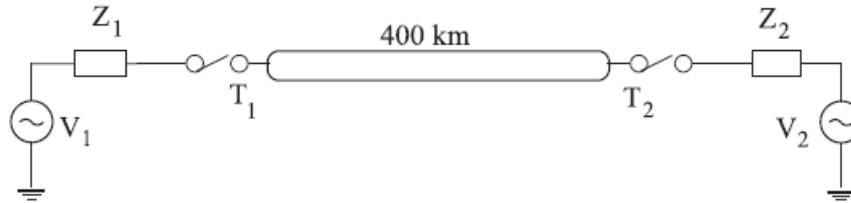
Nesse capítulo serão apresentados o sistema elétrico modelado e modificações na sua configuração para simular os casos: energização da linha de transmissão, de um transformador e faltas seguidas de rejeição de carga. Descritos os casos, será feita uma análise das simulações.

Para a simulação dos transitórios eletromagnéticos foi utilizado o software ATP (*Alternative Transient Program*). O ATP é uma versão do EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) e permite representar redes monofásicas ou polifásicas de qualquer topologia, pelo método da matriz de admitâncias de barras (LEUVEN, 1987).

A formulação matemática baseia-se na regra da integração trapezoidal para os elementos a parâmetros concentrados e no método das características (método de Bergeron) para os elementos com parâmetros distribuídos. O ATP também utiliza, durante a solução, técnicas de esparsidade e fatoração triangular otimizada de matrizes.

3.1 Descrição do Sistema

Para as simulações de energização de linha e transformador, faltas seguida de rejeição de carga, foi usado como base um sistema elétrico fictício proposto por Dantas et al. (2007) e mostrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Sistema Elétrico Fictício

Em seguida, os dados correspondentes ao sistema fictício são demonstrados nas tabelas 3.1, 3.2 e 3.3.

Tabela 3.1 – Dados de sequência da linha de transmissão (DANTAS et al., 2007)

Sequência	R (Ω/km)	X (Ω/km)	ωC (v/km)
Zero	0,3996	0,9921	3,0839
Positiva	0,0333	0,3170	5,2033

Tabela 3.2 – Tensão das fontes ($V_{base} = 550$ kV) (DANTAS et al., 2007)

Barra	Módulo (p.u.)	Fase ($^\circ$)
Fonte 1	1,00	0
Fonte 2	0,99	-10

Tabela 3.3 – Impedâncias das fontes (DANTAS et al., 2007)

Fonte	Sequencia zero		Sequencia positiva	
	$R_0(\Omega)$	$X_0(\Omega)$	$R_0(\Omega)$	$X_0(\Omega)$
Fonte 1	1,1268	20,838	0,9681	28,513
Fonte 2	1,1268	20,838	0,9681	28,513

Para as linhas de transmissão, o modelo no ATP será à de parâmetros distribuídos devido aos transitórios simulados serem de frente rápida. Esse modelo utilizado foi com a linha transposta e parâmetros independentes da frequência.

A fonte utilizada no ATP fonte senoidal tipo 14. As impedâncias dos geradores foram consideradas como circuitos R-L mutuamente acoplados (tipo 51, 52 e 52). As chaves simuladas foram chaves controladas por tempo. A resistência de falta foi considerada como um ramo RLC concentrado e atribuído um valor constante de 50Ω , já que o curto-circuito simulado não é franco.

O transformador usado no ATP foi o modelo saturável trifásico $Y/Y/\Delta$, com os seguintes dados:

Tabela 3.4 – Dados do Transformador

Fabricante	Tensão (kV)			Impedância (Ω)			Pot. (MVA)	TAP
	P	S	T	X_p	X_s	X_t		
Hitachi	500 Y	230 Y	13,8 Δ	72,3000	2,4334	0,5850	500	0.9922

Tabela 3.5 – Curva de Saturação

Corrente (A)	Fluxo (V.s)
2,2268274	1911,1935
10,495043	1310,3129
20,104322	1429,4322
32,609780	1548,5516
62,563210	1667,6709
111,45914	1727,2306
148,09253	1786,7903
187,62857	1846,3499

Um capacitor *shunt* (C_{shunt}) foi utilizado para representar a capacitância parasita equivalente do enrolamento do transformador e tendo um valor constante de 1.131 pF baseado nos dados da placa.

O para-raios é representado no ATP por uma resistência não-linear (tipo-92). Os para-raios foram modelados a partir dos dados de placa do EXLIM T550-XV420 e T245-XV192 da ABB, com tensões nominais de 192 e 420 kV . Os dados das placas são apresentados nas Tabelas 3.6 e 3.7.

Tabela 3.6 – Característica dos pará-raios de ZnO com tensão nominal de 192 kV (DANTAS et al., 2007)

Corrente (kA)	Tensão fase-terra (kV)
9,515	344,080
13,699	352,420
18,755	355,900
23,888	359,380
27,995	364,240
33,226	368,420
39,672	376,060
45,778	381,630
46,914	387,890
53,794	394,140

Tabela 3.7 – Característica dos pará-raios de ZnO com tensão nominal de 420 kV (DANTAS et al., 2007)

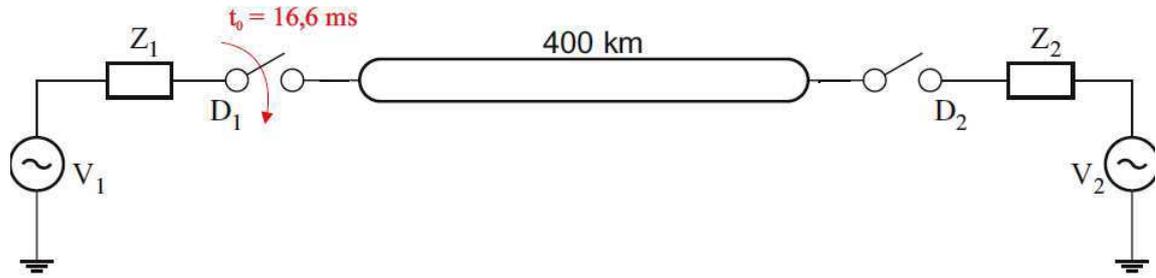
Corrente (kA)	Tensão fase-terra (kV)
9,515	751,600
13,699	769,830
18,755	777,430
23,888	785,020
27,995	795,650
33,226	804,770
39,672	821,470
45,778	833,630
46,914	847,300
53,794	860,970

3.2 Resultados e Análises

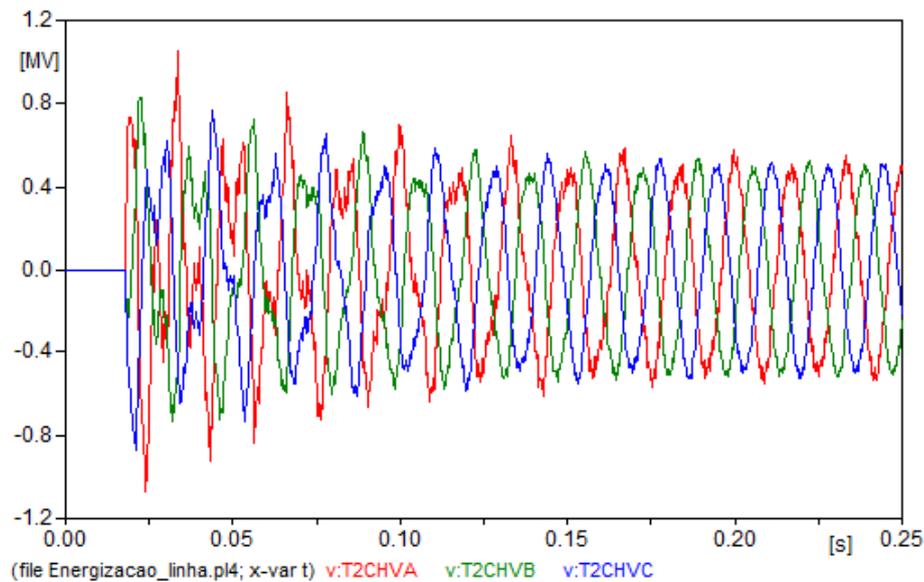
Neste tópico, serão apresentados os resultados obtidos a partir das simulações feitas no ATP. Será feita uma análise desses resultados e, comparando-os com o uso de para-raios como forma de mitigação.

3.2.1 Energização de Linhas

Para a energização da linha de transmissão, é necessário observar a linha em vazio. O procedimento para a manobra de energização consiste em fechar o disjuntor (chave) D1 da linha de transmissão com o D2 em aberto e verificar a tensão nos terminais de D2. O modelo é demonstrado na Figura 3.2.

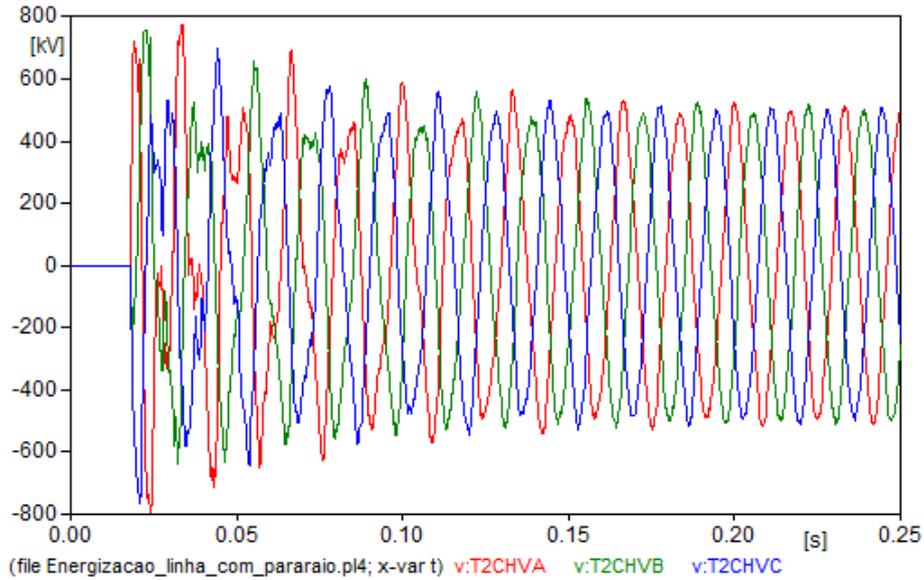
Figura 3.2 – Sistema modelado para energização de linha de transmissão.

Para a simulação foi utilizado um tempo total de 0,25s e passo de 10^{-6} s, em razão do fenômeno analisado. Inicialmente, foi considerado que o sistema não possui para-raios de ZnO. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Tensões no terminais de D2.

Para o sistema modelado, a tensão em regime permanente estava em torno de 416 kV ou 1 p.u.. Considerando que a tensão em vermelho (T2CHVA) na fase A obteve um valor próximo de 1 MV, ocorreu uma sobretensão de 2,56 p.u..

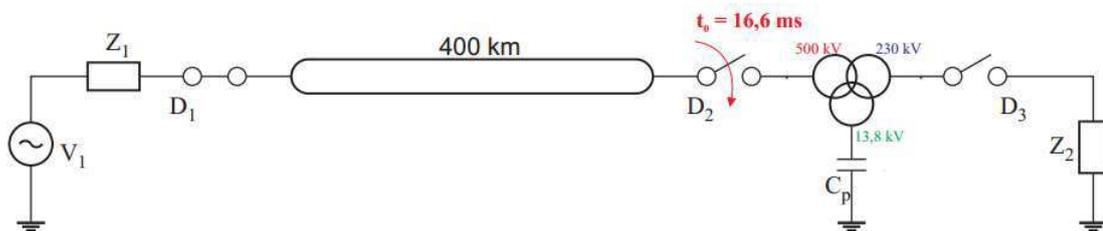
Para reduzir o efeito da sobretensão devido a manobra de energização, foram empregados para-raios de ZnO nas extremidades da linha. Os resultados obtidos são exibidos na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Tensões no terminais de D2 com para-raios de ZnO.

Com a atuação dos para-raios, a tensão da fase A (T2CHVA) atinge um valor de 793kV e assim houve uma redução na sobretensão de aproximadamente de 26%.

3.2.2 Energização de Transformadores

Da mesma forma que análise anterior, será observado o transformador em vazio conforme a Figura 3.8. Para tanto, é considerado que o disjuntor D1 está fechado, D2 fecha após 16,6ms (tempo em que ocorre o pico da tensão) e D3 permanece aberto.

Figura 3.5 – Sistema modelado para energização do transformador.

Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 3.6 e 3.7 abaixo. A sobretensão em vermelho (fase A) da Figura 3.6 atinge um valor de 261 kV que corresponde a 1,13 p.u. e a corrente de "inrush" em verde um valor de 388,62 A, quando sua corrente em

regime permanente tem valor de 15,22 A. As correntes ao circularem pelos componentes do sistema provocam sobretensões de forte conteúdo harmônico e com valores elevados.

Figura 3.6 – Tensões no terminais de D2.

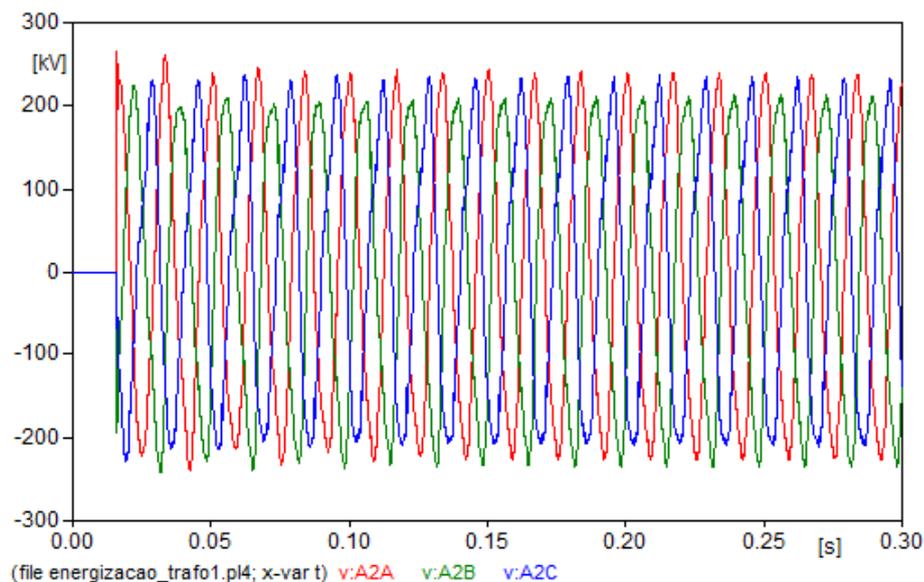
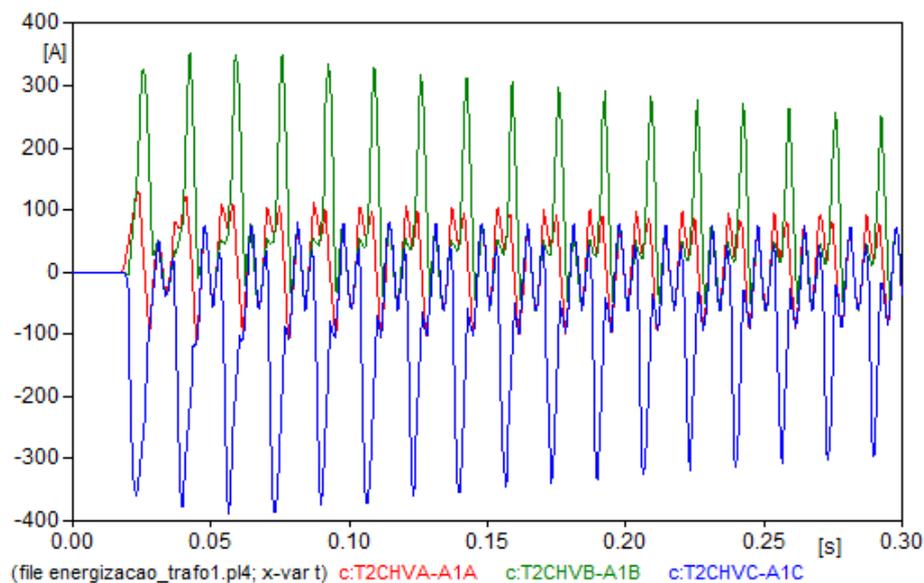
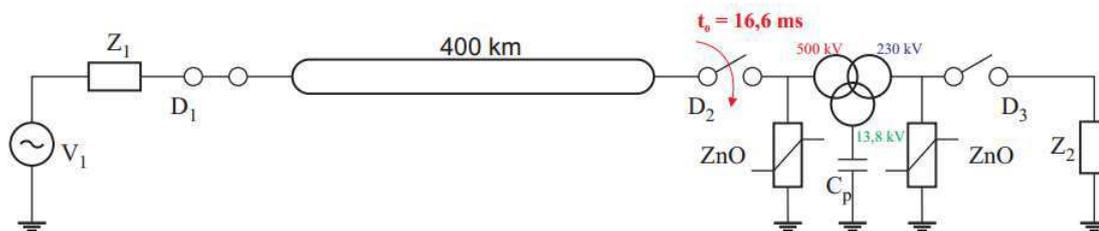


Figura 3.7 – Correntes de “inrush” no terminais de D2.



Para minimizar os efeitos das sobretensões no transformador, devido as correntes de “inrush”, são colocados para-raios entre os terminais de alta e de média no transformador (Figura 3.8).

Figura 3.8 – Sistema modelado para energização do transformador com para-raios de ZnO.

Dessa forma, foram obtidos as tensões e correntes de “inrush” no trafo como mostram as Figuras 3.9, 3.10 e 3.11.

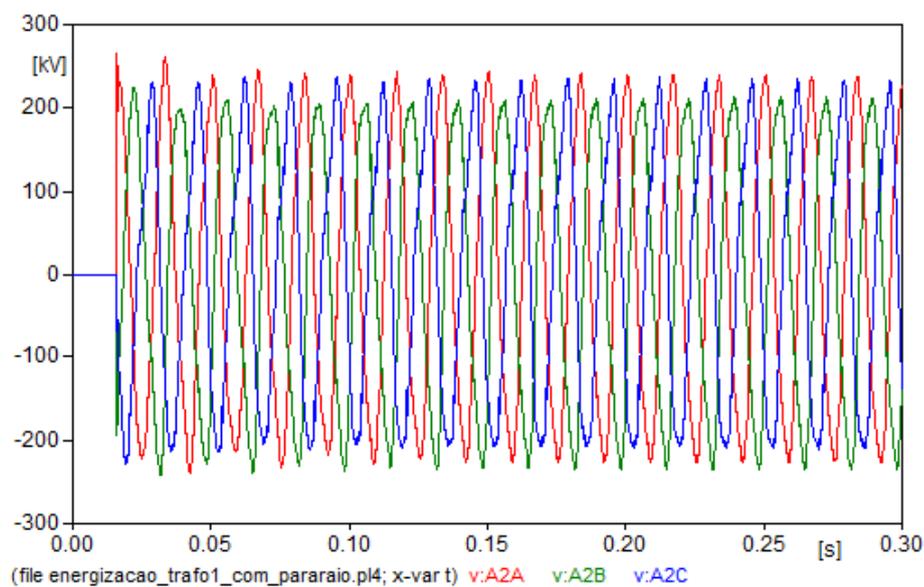
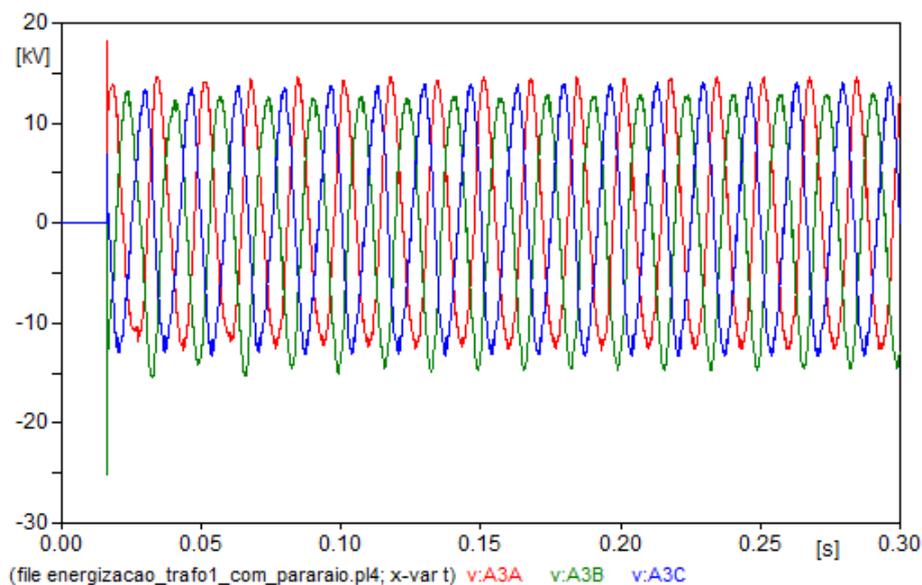
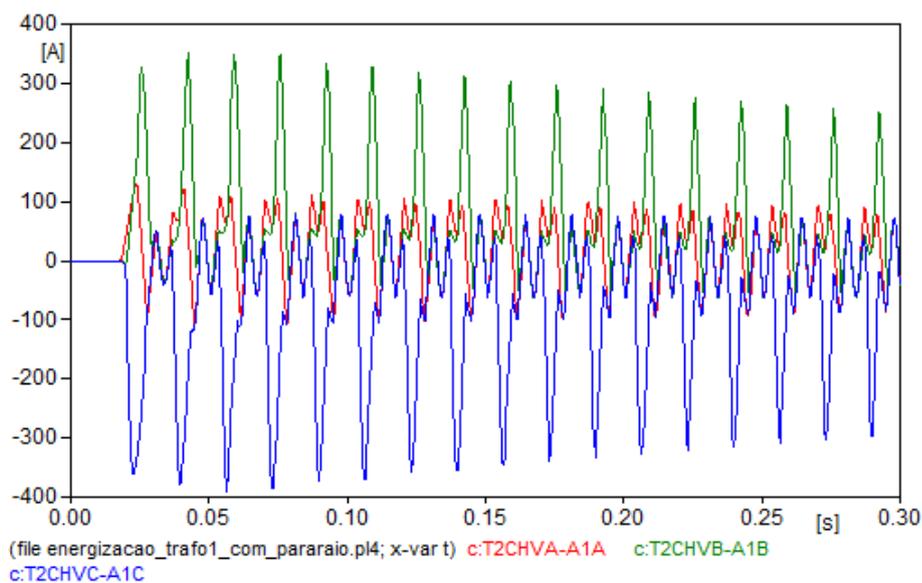
Figura 3.9 – Tensões no terminais de D2 com para-raios de ZnO.

Figura 3.10 – Tensões no terminais de D3 com para-raios de ZnO.**Figura 3.11** – Correntes de “inrush” no terminais de D2 com para-raios de ZnO.

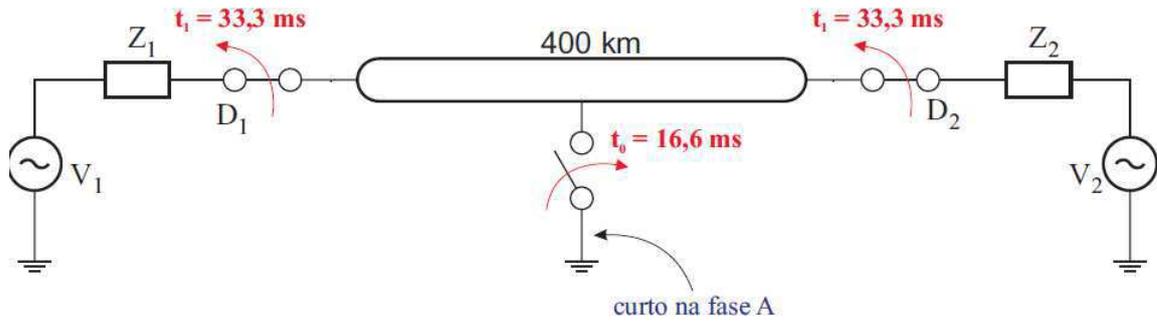
Como o para-raios limita a tensão, não há modificação nas correntes de “inrush”. Devido a operação dos para-raios, aconteceu uma redução na sobretensão na faixa de 10%.

3.2.3 Falta monofásica seguida de rejeição de carga

O estudo da falta monofásica seguida de rejeição de carga foi realizado com o mesmo sistema mostrado anteriormente. Foi aplicado um curto monofásico com uma impedância

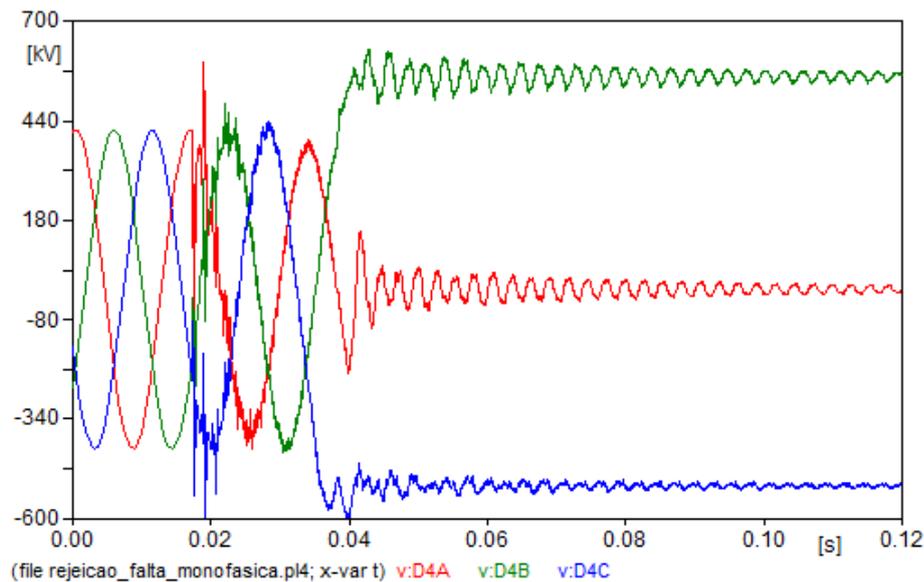
de 50Ω na fase A no meio da linha (200 km), como mostra a Figura 3.12. O curto-circuito ocorreu em $t_0 = 16,6 \text{ ms}$ e após $t_1 = 33,3 \text{ ms}$ houve um comando de D1 e D2 para seccionamento da linha.

Figura 3.12 – Sistema modelado para curto-circuito monofásico seguido de rejeição de carga.



A simulação foi realizada com um tempo total de $0,12 \text{ s}$ e um passo de 10^{-6} s . A Figura 3.15 mostra o resultado obtido.

Figura 3.13 – Tensões no terminais de D2.



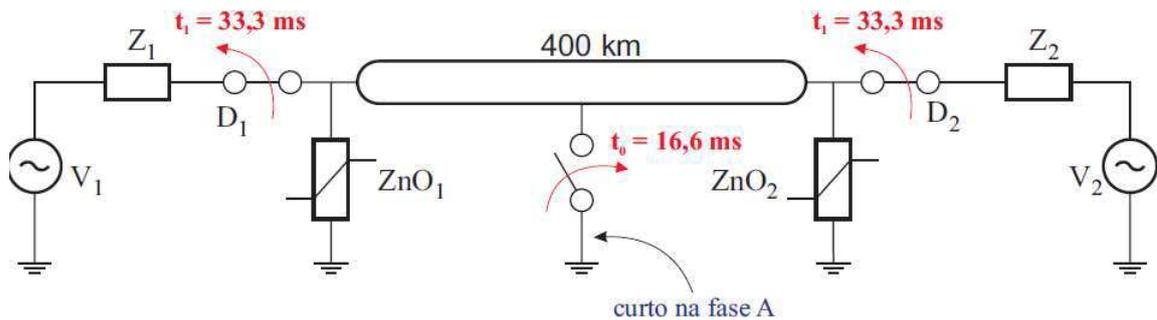
A partir das curvas de tensões, observa-se uma sobretensão na fase C de 1,36 p.u. após o curto-circuito. As duas primeiras oscilações são sobretensões de manobra.

Em $33,3 \text{ ms}$, acontece a rejeição de carga. Um pouco depois desse tempo, já que a chave abre no momento que a corrente passa por zero, a tensão medida nos terminais de D2 - que corresponde a curva vermelha - decresce em torno de zero. Isso ocorre, pois a

fase A está aterrada. Porém, para as fases B e C oscilam em torno de um valor, devido as capacitâncias distribuídas da linha de transmissão.

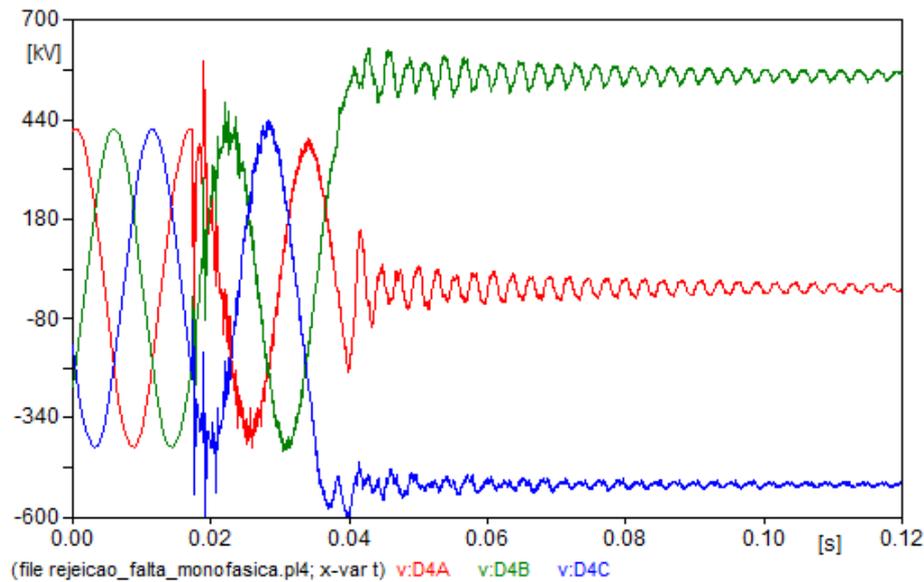
Da mesma forma que as simulações anteriores, foram colocados para-raios (nas extremidades da linha) para limitar as sobretensões existentes no transitório como ilustra a Figura 3.14.

Figura 3.14 – Sistema modelado para curto-circuito monofásico seguido de rejeição de carga com para-raios de ZnO.



Na Figura 3.15, são demonstrados os resultados.

Figura 3.15 – Tensões no terminais de D2.



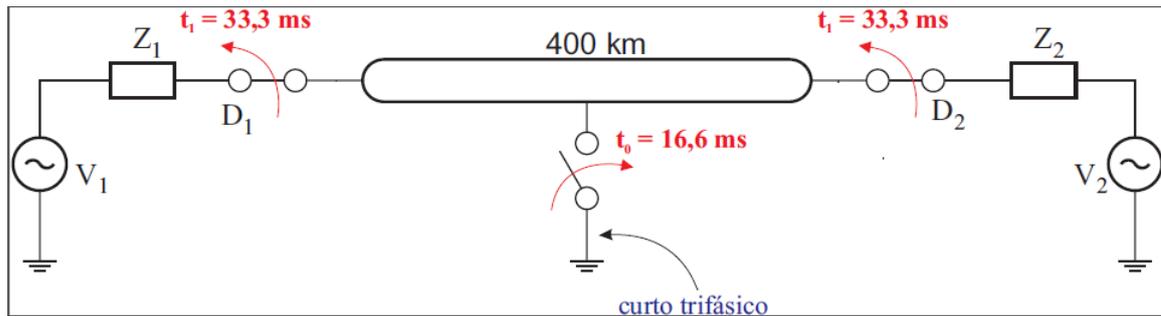
O valor obtido na sobretensão na fase C foi de 550 kV, isto é, 1,32 p.u. Demonstrando assim, que o para-raios não forneceu um resultado satisfatório. Isso acontece, porque as sobretensões sustentadas possuem duração de muitos ciclos, e para-raio não é projetado para tipo de transitório e tendo uma probabilidade grande de ser danificado. Outra causa

para esse fato, o para-raio foi mal especificado.

3.2.4 Falta trifásica seguida de rejeição de carga

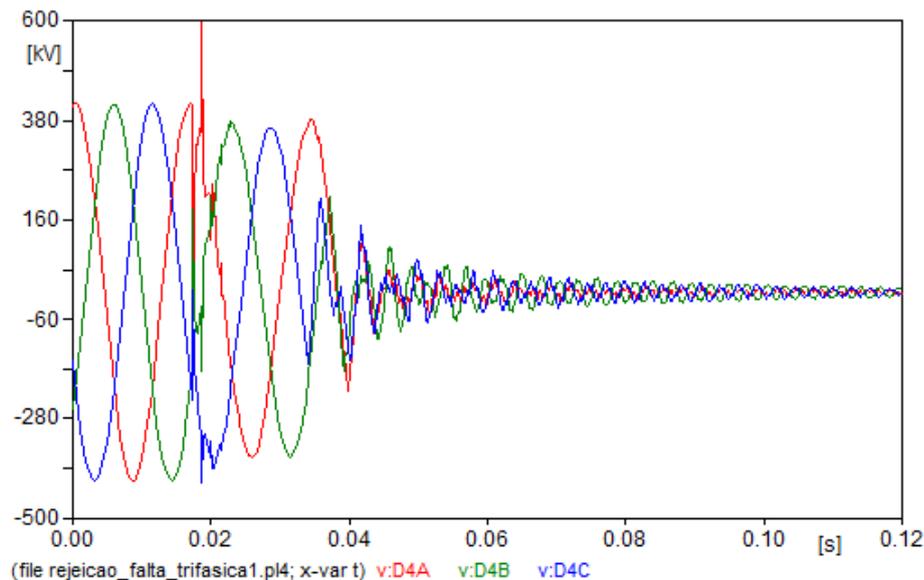
Semelhante a falta monofásica, foi aplicado uma falta trifásica a 200 km da linha seguida de uma rejeição de carga. O curto trifásico ocorreu em $t_0 = 16,6\text{ms}$ e após $t_1 = 33,3\text{ms}$ houve um comando de D1 e D2 para seccionamento da linha.

Figura 3.16 – Sistema modelado para curto-circuito trifásico seguido de rejeição de carga.



Foram verificados as tensões nos terminais de D2 pra terra, conforme mostrado na Figura 3.17.

Figura 3.17 – Tensões no terminais de D2.

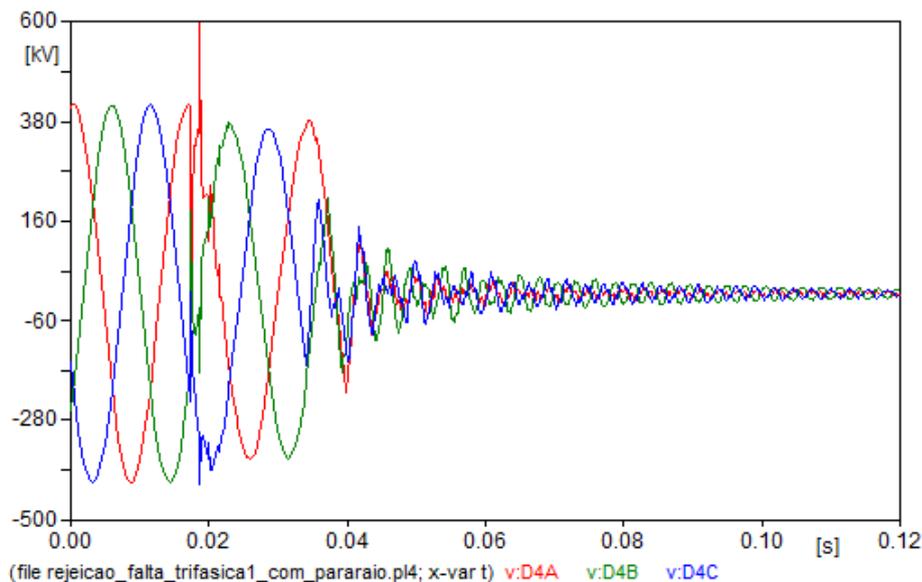


O valor da sobretensão obtido na fase A foi na faixa de 595 kV, ou seja, 1,43 p.u. após o instante em acontece o curto. Verifica-se que depois da rejeição de carga, os valores das

tensões nas fases A, B e C oscilam em torno de zero, em virtude das três fases estarem aterradas.

Usando o para-raios nas extremidades da linha, para suprimir as sobretensões que acontecem no sistema, é obtido o resultado mostrado na Figura 3.18.

Figura 3.18 – Tensões no terminais de D2 com para-raios de ZnO.



Com o uso dos para-raios, praticamente, não houve mudança. Uma razão para isso pode ter sido por uma má especificação do para-raio, pois nem o spike de tensão foi atenuado. E assim como foi dito anteriormente, os para-raios submetidos as sobretensões que podem perdurar por um tempo mais longo, ele pode entrar num processo contínuo de elevação de temperatura e corrente de fuga, podendo causar sua destruição.

Capítulo 4

Conclusões

Neste trabalho foram realizadas simulações de transitórios de eletromagnéticos usando o programa ATP. Foi feita uma abordagem teórica e uma análise das simulações para as seguintes situações do sistema modelado: energização de linhas de transmissão, energização de transformadores, falta monofásica e trifásica seguidas de rejeição de carga.

Os resultados obtidos apresentaram bastante semelhança com a teoria. Percebe-se que o software ATP é adequado para estudo e simulação de transitórios eletromagnéticos. Porém, é necessário um pouco de prática e experiência para utilizá-lo.

Como forma de mitigação das sobretensões, foi utilizado para-raios de ZnO nas simulações. Para as manobras de energização de linhas e de transformadores, ocorreu uma redução nas sobretensões. Para a rejeição de carga, os para-raios não apresentaram resultados favoráveis na diminuição de sobretensões. Verifica-se que os para-raios são usados na proteção contra qualquer tipo de sobretensão. Mas, na ocorrência de sobretensões temporárias (como ocorre na rejeição de carga), os para-raios são capazes de proteger os equipamentos durante um curto período de tempo, caso contrário, sua capacidade de absorver energia será ultrapassada, podendo causar danos permanentes aos mesmos.

Referências Bibliográficas

ARAÚJO, A. E. D.; NEVES, W. L. *Cálculos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia*. [S.l.]: Editora UFMG, 2005.

BRITO, V. S. et al. *Estudo Comparativo de Métodos de Decomposição da Corrente de Fuga Total em Para-Raios ZnO*. [S.l.]: SBSE, 2012.

D'AJUZ, A. e. a. *Transitorios eletricos e coordenação de isolamento: aplicação em sistemas de potencia de alta-tensão*. [S.l.]: EDUFF, 1987.

DANTAS, K. M. et al. *Chaveamento controlado de linhas de transmissão*. Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, Setembro, 2007.

GUERRA, F. d. C. F. Notas de aula. DEE - UFCG, 2011.

JITSUKAWA, J. A. M. Coordenação de isolamento em subestações isoladas a ar. 2010.

JÚNIOR, L. C. Z. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência Vol. 52*. [S.l.]: EdUSP, 2003.

LEUVEN, E. Center, atp-alternative transient program-rule book. *Herverlee, Belgium*, 1987.

MARTINEZ-VELASCO, J. A. *Power system transients: parameter determination*. [S.l.]: CRC press, 2009.