

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

## Trabalho de Conclusão de Curso

# Estudo e Simulação de Transitórios Envolvendo Ferroressonância, Efeito Ferranti, Descargas Atmosféricas e Manobra de Capacitores e Reatores em Sistemas Elétricos

Laís Farias Martins

Campina Grande - Paraíba - Brasil

© Laís Farias Martins, Março de 2015.

Laís Farias Martins

**Estudo e Simulação de Transitórios Envolvendo  
Ferroressonância, Efeito Ferranti, Descargas  
Atmosféricas e Manobra de Capacitores e Reatores 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 da Energia

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

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Março de 2015.

Laís Farias Martins

**Estudo e Simulação de Transitórios Envolvendo  
Ferroressonância, Efeito Ferranti, Descargas  
Atmosféricas e Manobra de Capacitores e Reatores 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 da 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

Março de 2015.

# Agradecimentos

Agradeço a meus pais e à minha família, por todo suporte.

A Kal-El, por estar ao meu lado diariamente, pela cumplicidade e amor.

Aos amigos que fiz nesse curso, responsáveis pelo companheirismo diário.

Ao meu orientador, Professor George Rossany, pela paciência, orientação e tempo dedicado.

Enfim, a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para construção de quem sou hoje.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>x</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	1
1.2 Estrutura do trabalho . . . . .	2
<b>2 Fundamentação teórica</b>	<b>3</b>
2.1 Fenômenos transitórios eletromagnéticos . . . . .	3
2.1.1 Sobretensão Temporária . . . . .	4
2.1.1.1 Efeito Ferranti . . . . .	4
2.1.1.2 Ferrorressonância . . . . .	5
2.1.2 Sobretensão Atmosférica . . . . .	9
2.1.2.1 Descargas Atmosféricas . . . . .	10
2.1.3 Sobretensão de Manobra . . . . .	11
2.1.3.1 Energização de banco de capacitores . . . . .	11
2.1.3.2 Desenergização de banco de reatores . . . . .	13
2.2 Para-raios de ZnO . . . . .	16
2.3 Modelagem de Sistemas Elétricos para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos . . . . .	18
2.3.1 Modelagem de linhas de transmissão . . . . .	19
2.3.1.1 Representação a parâmetros concentrados . . . . .	20
2.3.1.2 Representação a parâmetros distribuídos . . . . .	21
2.3.1.3 Análise no domínio da frequência . . . . .	24

---

2.3.2	Modelagem de reatores . . . . .	26
2.3.3	Modelagem de capacitores . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Simulações de transitórios eletromagnéticos</b>	<b>30</b>
3.1	Descrição dos Sistemas . . . . .	30
3.2	Resultados e Análises . . . . .	34
3.2.1	Efeito Ferranti . . . . .	34
3.2.2	Ferromressonância . . . . .	36
3.2.3	Descargas atmosféricas em linha de transmissão . . . . .	43
3.2.4	Energização de banco de capacitores . . . . .	47
3.2.5	Desenergização de banco de reatores . . . . .	51
<b>4</b>	<b>Conclusões</b>	<b>56</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>57</b>

# Lista de Figuras

2.1	Circuito L-C série. . . . .	7
2.2	Gráfico da tensão na indutância em função da corrente (VIENA, 2010). . .	8
2.3	Efeito da variação da capacitância no circuito ferorrressonante. Adaptado de Greenwood (1991). . . . .	8
2.4	Representação do impulso atmosférico. Adaptado de Zanetta Júnior (2003).	10
2.5	Circuito representando a energização de banco de capacitores . . . . .	12
2.6	Circuito representando a desenergização de reator . . . . .	13
2.7	Tensão no reator e corrente no disjuntor para interrupção de corrente de 20 A. Adaptado de Giudici (1989) . . . . .	15
2.8	Tensão nos terminais do disjuntor para interrupção de corrente de 20 A. Adaptado de Giudici (1989) . . . . .	16
2.9	Característica tensão-corrente para um varistor de 420 kV. Adaptado de (HINRICHSEN, 2001). . . . .	17
2.10	Modelo pi para linhas de transmissão . . . . .	20
2.11	Linha de transmissão a um condutor. Adaptado de Martinez-Velasco (2009)	22
2.12	Linha de transmissão trifásica (MARTINEZ-VELASCO, 2009). . . . .	24
2.13	Modelo para reator de linha. Adaptado de D’Ajuz et al. (1987) e Merícia (2008) . . . . .	26
2.14	Banco de Capacitores. Adaptado de Neves et al. (2009). . . . .	28
3.1	Sistema elétrico fictício. Adaptado de Dantas (2007). . . . .	31
3.2	Circuito para simulação de ferorrressonância. Adaptado de Abdul-Malek et al. (2013). . . . .	33
3.3	Sistema para simulação do efeito Ferranti. . . . .	35

---

3.4	Tensões do lado de geração e na extremidade aberta da linha para a fase A.	35
3.5	Tensões do lado de geração e na extremidade aberta da linha para a fase A - com banco de reatores. . . . .	36
3.6	Circuito para simulação de ferorrressonância. Adaptado de Abdul-Malek et al. (2013). . . . .	37
3.7	Tensão de saída com capacitor série de 50 pF. . . . .	38
3.8	Correntes na chave e no capacitor série de 50 pF. . . . .	38
3.9	Tensão de saída com capacitor série de 500 pF. . . . .	39
3.10	Correntes na chave e no capacitor série de 500 pF. . . . .	39
3.11	Tensão de saída com capacitor série de 1500 pF. . . . .	40
3.12	Correntes na chave e no capacitor série de 1500 pF. . . . .	41
3.13	Tensão de saída com capacitor série de 500 pF e utilização de resistor . . .	42
3.14	Correntes na chave e no capacitor série de 500 pF com utilização de resistor.	42
3.15	Sistema para simulação de descarga atmosférica. . . . .	43
3.16	Descarga atmosférica simulada. . . . .	44
3.17	Tensões no fim da linha - sem para-raios. . . . .	45
3.18	Tensões no fim da linha - com para-raios. . . . .	46
3.19	Tensões no fim da linha - com para-raios no local da descarga. . . . .	47
3.20	Sistema para simulação de energização de banco de capacitores. . . . .	48
3.21	Tensões nos terminais da chave. . . . .	48
3.22	Tensões no fim da linha. . . . .	49
3.23	Corrente de <i>inrush</i> no banco de capacitores. . . . .	49
3.24	Tensões no fim da linha - mudança no tempo de chaveamento. . . . .	50
3.25	Corrente de <i>inrush</i> no banco de capacitores - mudança no tempo de chaveamento. . . . .	51
3.26	Sistema para simulação de desenergização de banco de reatores. . . . .	52
3.27	Tensão no banco de reatores - fase A. . . . .	52
3.28	Tensão nos terminais da chave - fase A. . . . .	53
3.29	Tensão nos terminais da chave (zoom) - fase A. . . . .	53
3.30	Tensões no banco de reatores (com para-raios) - fase A. . . . .	54

---

3.31 Tensão nos terminais da chave (com para-raios) - fase A. . . . .	55
---	----

# Lista de Tabelas

2.1	Origem e faixa de frequência de transitórios em sistemas de potência . . .	19
3.1	Dados de sequência da linha de transmissão . . . . .	31
3.2	Tensão das fontes ( $V_{base}=550$ kV) . . . . .	31
3.3	Impedância das fontes . . . . .	31
3.4	Característica dos para-raios de ZnO com tensão nominal de 420 kV . . . .	32
3.5	Dados de corrente e tensão para o primário do transformador. . . . .	34

# Resumo

O estudo e simulação de transitórios eletromagnéticos são ferramentas fundamentais para o projeto de um sistema confiável e que forneça energia de qualidade, mantendo modicidade tarifária. Nesse trabalho foi utilizado o software ATP para a realização de simulações de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência e de técnicas de mitigação para esses fenômenos. Ao término do trabalho, foi observada a conformidade dos resultados obtidos com a fundamentação teórica e a eficácia de métodos de redução de sobretensões.

**Palavras-Chaves:** Transitórios eletromagnéticos, ATP, sobretensão atmosférica, sobretensão de manobra, sobretensão temporária.

# Capítulo 1

## Introdução

Os sistemas elétricos de potência operam na maior parte do tempo em regime permanente, porém, a ocorrência de fenômenos como descargas atmosféricas, curtos-circuitos, abertura ou fechamento de disjuntores, podem provocar transitórios eletromagnéticos no sistema. Na ocorrência desses transitórios, os componentes do sistema ficam sujeitos a perturbações e, conseqüentemente, a altos níveis de tensão e corrente. Devido ao elevado custo dos equipamentos de potência e à importância de se fornecer energia de qualidade, faz-se necessário um estudo detalhado do impacto de surtos em sistemas de energia elétrica.

### 1.1 Objetivos

O objetivo geral do trabalho é realizar uma análise dos fenômenos transitórios eletromagnéticos, a partir de simulações realizadas em um sistema de potência fictício e simplificado, utilizando o software ATP. Os fenômenos analisados são: efeito Ferranti, ferorressonância, descargas atmosféricas e sobretensões de manobra causadas por energização de capacitores e desenergização de reatores.

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- Realização de uma fundamentação teórica sobre fenômenos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência.
- Estudo da modelagem de sistemas elétricos de potência para simulação de transitórios eletromagnéticos.
- Análise de técnicas de mitigação para os fenômenos analisados.

## 1.2 Estrutura do trabalho

Este Trabalho de Conclusão de Curso está dividido em quatro capítulos. O primeiro capítulo corresponde à parte introdutória, apresentando uma contextualização do tema, os objetivos e estrutura do trabalho.

No Capítulo 2 será feita uma fundamentação teórica para os fenômenos transitórios eletromagnéticos e para a modelagem de sistemas elétricos de potência para estudo de transitórios eletromagnéticos. Na etapa de modelagem foi feito o estudo de modelos de linhas de transmissão, banco de capacitores e banco de reatores para simulação de transitórios.

O Capítulo 3 corresponde à etapa de simulação dos fenômenos transitórios utilizando o software ATP (Alternative Transients Program). Serão apresentados os sistemas elétricos e modelos escolhidos e, em seguida, os resultados e análises das simulações feitas.

O Capítulo 4 apresentará as conclusões do trabalho.

# Capítulo 2

## Fundamentação teórica

Para proporcionar o embasamento teórico para a realização das simulações, foi feita uma fundamentação teórica referente aos fenômenos de transitórios eletromagnéticos, para-raios e à modelagem de componentes dos sistemas elétricos para simulação de fenômenos transitórios.

### 2.1 Fenômenos transitórios eletromagnéticos

Transitórios eletromagnéticos são manifestações de uma súbita mudança nas condições do circuito. Tais fenômenos podem ser causados por descargas atmosféricas, ocorrência de faltas no sistema, manobras de chaveamento em circuitos que contenham indutores ou capacitores, entre outras causas. Nesse trabalho os fenômenos transitórios serão analisados com enfoque nas sobretensões.

Segundo 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 ser feita uma divisão em três categorias:

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

Certos fenômenos podem causar sobretensões que se enquadram em mais de uma classe. A seguir será feito um estudo de cada tipo de sobretensão, com enfoque nos

fenômenos que serão objetivo das 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 (ZANETTA 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 (ZANETTA JÚNIOR, 2003).

São exemplos de causas de sobretensões temporárias: faltas, rejeição de carga, efeito ferranti, ressonância e ferorrressonância. A seguir será realizada uma descrição da sobretensão temporária provocada pelos fenômenos de efeito Ferranti e ferorrressonância, como base às simulações que serão feitas no Capítulo 3.

#### 2.1.1.1 Efeito Ferranti

O efeito Ferranti é um fenômeno em que a tensão sustentada na extremidade aberta da linha de transmissão torna-se superior à tensão no lado da geração. Isso acontece devido ao fluxo de corrente capacitiva através da indutância série da linha (D'AJUZ et al., 1987).

Levando em consideração a representação de linha de transmissão como um circuito de dois terminais, a equação geral da linha pode ser dada por:

$$V_1 = V_2 \cosh(\gamma l) + Z_C I_2 \sinh(\gamma l), \quad (2.1)$$

em que:

$V_1$ : tensão no lado da geração;

$V_2$ : tensão no lado da recepção;

$I_2$ : corrente no lado da recepção;

$l$ : comprimento da linha;

$Z_C$ : impedância característica da linha;

$\gamma$ : constante de propagação =  $\alpha + j\beta$ ;

$\alpha$ : constante de atenuação;

$\beta$ : constante de fase.

Para o caso de energizações ou rejeição de carga, em que a linha está aberta na extremidade receptora, tem-se  $I_2 = 0$ . Então:

$$V_1 = V_2 \cosh(\gamma l).$$

O efeito Ferranti, para uma linha não compensada e desprezando-se as perdas, pode ser calculado pela Equação 2.2:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\cos(\beta l)}, \quad (2.2)$$

em que:  $\beta = \omega\sqrt{LC} = 6^\circ/100 \text{ km}$  em 50 Hz e  $7,2^\circ/100 \text{ km}$  em 60 Hz.

A forma de onda da sobretensão sustentada provocada por esse fenômeno geralmente é senoidal à frequência industrial.

Técnicas como compensação capacitiva série e compensação reativa em derivação são úteis para diminuir a sobretensão provocada pelo efeito Ferranti (D'AJUZ et al., 1987).

### 2.1.1.2 Ferrorressonância

A ferrorressonância é um fenômeno de ressonância não-linear, caracterizado pela presença de capacitores (capacitâncias associadas a cabos, linhas, bancos de capacitores) e elementos não-lineares, como transformadores e reatores, excitados por uma tensão. A não linearidade é uma consequência da presença do núcleo ferromagnético nesses equipamentos (D'AJUZ et al., 1987).

Por se tratar de um fenômeno de caráter não linear, a ferrorressonância é caracterizada por efeitos peculiares introduzidos pela presença de saturação no circuito magnético da indutância. A ocorrência de ferrorressonância provoca sobretensões e sobrecorrentes e até distorções nas formas de onda de tensão e corrente, o que pode causar danos aos equipamentos e prejuízos ao sistema. O aquecimento provocado pelas sobrecorrentes,

por exemplo, pode causar danos à isolação dos transformadores (ABDUL-MALEK et al., 2013).

A seguir são apresentados exemplos de situações de ocorrência de ressonância e ferrorressonância (D’AJUZ et al., 1987):

- Ressonância entre cabos de elevada capacitância e reatores limitadores de corrente;
- Ressonância entre a indutância linear e a capacitância de um sistema constituído por uma linha levemente carregada;
- Ferrorressonância entre a reatância de transformadores de potencial e a capacitância entre enrolamentos de um transformador de distribuição;
- Ferrorressonância em sistemas que contêm elementos saturáveis e filtros harmônicos.

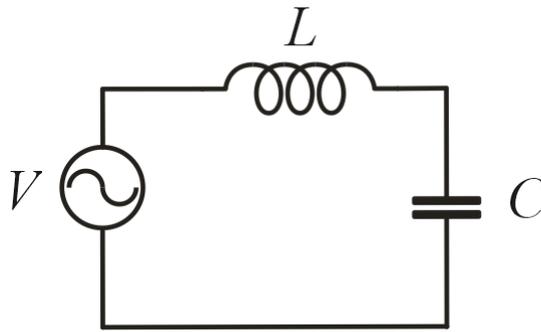
Segundo Abdul-Malek et al. (2013), a ferrorressonância não é um fenômeno comum ou previsível diante de um determinado estímulo ao sistema, e diferentes respostas em regime permanente podem ser obtidas para o mesmo conjunto de parâmetros iniciais da rede. Assim, a detecção e análise desse fenômeno são complicadas.

Para o fenômeno de ferrorressonância em transformadores, por exemplo, a saturação do núcleo de ferro provoca um ruído audível diferente do ruído do transformador em operação normal, possibilitando assim a identificação do fenômeno (ABDUL-MALEK et al., 2013).

Devido às dificuldades para realização de uma análise de ferrorressonância, uma análise qualitativa do fenômeno pode ser feita utilizando ferramentas gráficas. Para simplificação da análise são desconsideradas as perdas e distorções de tensão e corrente. Considera-se então um circuito como o da Figura 2.1 composto por fonte, um capacitor e um indutor não-linear, em série.

A tensão no indutor não-linear dependerá da frequência angular  $\omega$  e da corrente, através de uma função não-linear  $f(I)$ . Essa tensão está adiantada de  $90^\circ$  em relação à corrente.

$$V_L = \omega f(I). \quad (2.3)$$



**Figura 2.1** – Circuito L-C série.

A tensão no capacitor é dada por:

$$V_C = -\frac{I}{\omega C}. \quad (2.4)$$

O sinal negativo indica que a tensão  $V_C$  está em anti-fase em relação à tensão  $V_L$  e assim, atrasada de  $90^\circ$  em relação à corrente.

A tensão total é então dada por:

$$V = V_L + V_C = \omega f(I) - \frac{I}{\omega C}, \quad (2.5)$$

ou

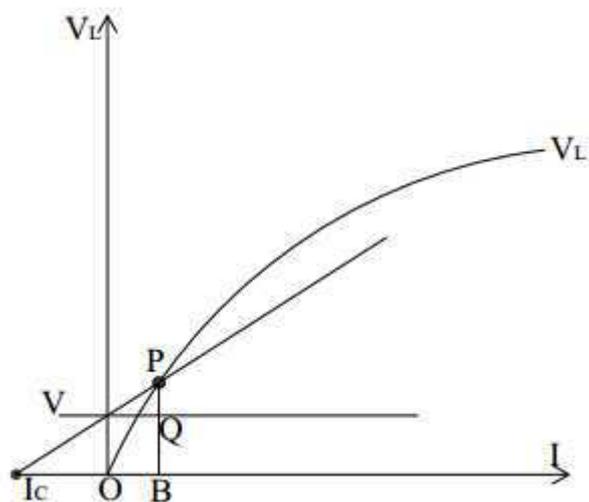
$$V_L = V + \frac{I}{\omega C}. \quad (2.6)$$

Assim,  $V_L$  tem uma componente fixa  $V$  e outra proporcional à corrente. A equação 2.6 é representada pela reta inclinada e a equação 2.3 pela curva na Figura 2.2.

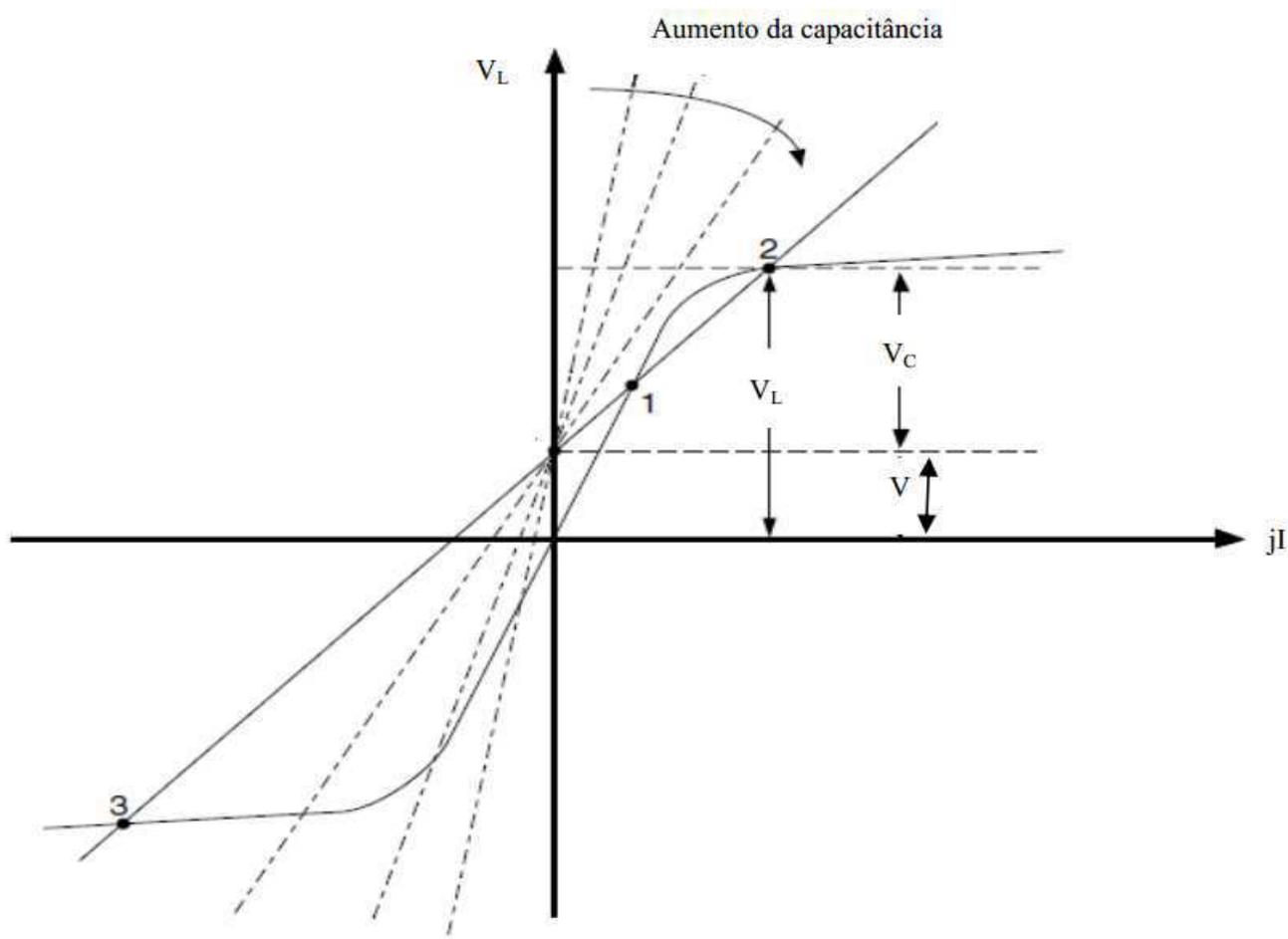
Como as duas características representam a tensão  $V_L$ , o ponto de operação é dado pela intersecção das duas curvas, ou seja, o ponto P. Nesse ponto, a tensão no capacitor é representada pelo segmento PQ, a tensão no indutor pelo segmento PB e o módulo da corrente pelo segmento OB.

Se os valores da capacitância ou da frequência  $\omega$  são modificados, de acordo com a equação 2.6, a inclinação da reta muda e, conseqüentemente, o ponto de operação P se deslocará ao longo da curva  $V_L$ .

A Figura 2.3 representa o efeito da variação dos valores de capacitância, mantendo os outros parâmetros constantes, no circuito ferorrressonante. As retas com diferentes inclinações representam diferentes valores de capacitância.



**Figura 2.2** – Gráfico da tensão na indutância em função da corrente (VIENA, 2010).



**Figura 2.3** – Efeito da variação da capacitância no circuito ferorressonante. Adaptado de Greenwood (1991).

Ao contrário do que acontece no fenômeno de ressonância, a reta que representa o valor de capacitância pode produzir múltiplas intersecções com a curva que representa a indutância. Na Figura 2.3, para uma determinada reta de capacitância foram identificados três pontos de intersecção (pontos 1, 2 e 3). Os pontos de operação 1 e 3 são considerados estáveis pois qualquer variação na corrente provocará mudanças na tensão tendendo a restaurar a corrente ao seu valor inicial. Já o ponto 2 é um ponto de operação instável pois qualquer mudança na corrente causa mudanças em  $V_L$  e  $V_C$  no sentido de aumentar a diferença e desestabilizar, ao invés de retornar aos valores iniciais (GREENWOOD, 1991).

### 2.1.2 Sobretensão Atmosférica

Sobretensões atmosféricas são sobretensões que ocorrem devido a uma descarga atmosférica em um dado ponto do sistema. A incidência das descargas pode acontecer diretamente sobre o equipamento, atingindo a subestação, ou sobre as linhas de transmissão, originando, nesse caso, surtos que se propagam ao longo das linhas. Essas sobretensões podem ser classificadas como de origem externa, pois são resultantes da interação elétrica da nuvem com o sistema de potência.

A forma de onda da sobretensão pode ser aproximada por uma onda com um crescimento linear rápido (alguns  $\mu s$ ), atingindo um valor máximo e, em seguida, decaindo de forma linear mais lentamente (dezenas de  $\mu s$ ). Portanto, trata-se de sobretensões de curta duração e com frente de onda rápida.

Por causa da elevada inclinação da frente de onda, essas sobretensões solicitam a isolação longitudinal de enrolamentos de máquinas e transformadores (ARAÚJO; NEVES, 2005).

As sobretensões atmosféricas costumam ser suficientemente elevadas para provocar falhas nos isolamentos de linhas de transmissão e outros equipamentos, provocando a perda de continuidade no atendimento aos consumidores. No Brasil, dados da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) indicam que 70% dos desligamentos no seu sistema de transmissão se devem a descargas atmosféricas (ARAÚJO; NEVES, 2005).

Esquemas de proteção são adotados para aumentar a confiabilidade do sistema, dentre os quais destacam-se: a utilização de cabos guarda, impedimento que as descargas

atinjam diretamente as linhas e os equipamentos e o uso de para-raios com o objetivo de limitar as sobretensões atmosféricas, de forma que elas não danifiquem os isolamentos dos equipamentos da subestação. A suportabilidade do isolamento, associada às sobretensões atmosféricas, é chamada de tensão nominal suportável a impulso atmosférico ou tensão crítica de descarga.

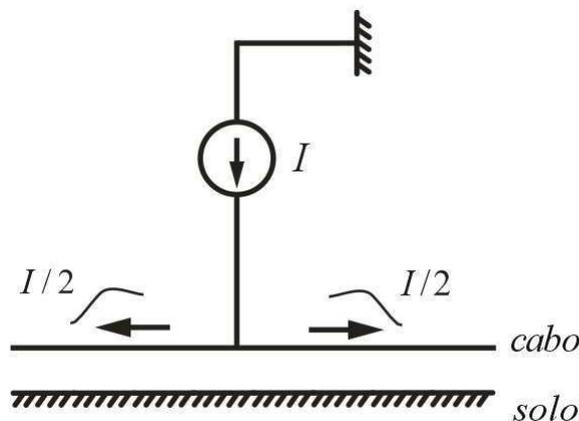
### 2.1.2.1 Descargas Atmosféricas

A descarga atmosférica é responsável por uma grande transferência de cargas das nuvens para a terra, ou estrutura que se interponha entre a nuvem e o solo. Nos estudos de surtos atmosféricos em redes elétricas não há interesse nas descargas entre nuvens, somente naquelas entre nuvens e a terra.

A separação de cargas na nuvem cria campos elétricos internos e externos, que podem resultar na incidência do raio para a terra.

Segundo Zanetta Júnior (2003), o fenômeno pode ser dividido em duas partes: a primeira corresponde à formação de um canal ionizado, chamado *leader*, através da camada de ar entre a nuvem e a terra; a segunda está relacionada com a efetiva passagem de corrente pelo canal ionizado, chamada de corrente de retorno.

A ocorrência de um impulso atmosférico em determinado ponto de um cabo condutor pode ser representada por uma fonte de corrente, conforme o exemplo da Figura 3.16. Modelos mais aprimorados podem considerar uma impedância em paralelo com a fonte para representar o efeito do canal ionizado (ZANETTA JÚNIOR, 2003).



**Figura 2.4** – Representação do impulso atmosférico. Adaptado de Zanetta Júnior (2003).

### 2.1.3 Sobretensão de Manobra

Sobretensões de manobra ocorrem devido a mudanças na topologia do sistema. Assim, origina-se a partir de operações de chaveamento de equipamentos de manobra ou variações bruscas no sistema, como a ocorrência de curtos-circuitos.

A sobretensão de manobra tem um aspecto probabilístico, ou seja, para determinada operação de manobra pode-se obter diferentes valores de sobretensão. Isso acontece pois a sobretensão depende da dispersão dos instantes de abertura ou fechamento do disjuntor e do instante na onda de tensão quando ocorreu a abertura ou fechamento (D’AJUZ et al., 1987).

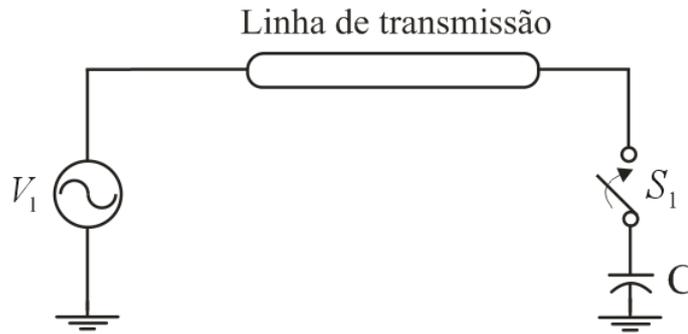
Assim, as características da sobretensão de manobra, como amplitude e duração, dependem dos parâmetros, configuração e condições do sistema no momento da manobra (ARAÚJO; NEVES, 2005).

Para o presente trabalho serão estudadas as manobras envolvendo elementos concentrados: capacitores e reatores.

#### 2.1.3.1 Energização de banco de capacitores

Em sistemas de potência, bancos de capacitores são colocados e retirados de operação regularmente, seja para regular o fator de potência ou para filtragem de harmônicos, por exemplo. A interrupção da corrente capacitiva pode causar problemas ao equipamento de chaveamento, enquanto a energização do banco de capacitores provoca o surgimento de altas correntes de *inrush* (SLUIS, 2001).

A operação de energização pode ser representada pelo circuito simplificado da Figura 2.5.



**Figura 2.5** – Circuito representando a energização de banco de capacitores

Considerando-se que a linha é representada apenas por uma indutância  $L_S$ , a corrente no circuito e a frequência natural de oscilação  $\omega_0$  são dadas por (ZANETTA JÚNIOR, 2003):

$$i(t) = \frac{E_0 - v_0}{Z_S} \text{sen}(\omega_0 t), \quad (2.7)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_S C}}, \quad (2.8)$$

onde:

$E_0$  é a tensão da fonte no momento da energização;

$v_0$  é a tensão do capacitor no momento da energização;

$Z_S = \sqrt{\frac{L_S}{C}}$  é a impedância característica do circuito.

O pior caso de energização de um banco de capacitores descarregado é quando o disjuntor atua no momento em que a tensão da fonte atinge o pico. Ao energizar o banco nesse momento, são atingidas correntes de *inrush* mais altas e a tensão transitória também é maior, e teoricamente poderia atingir o valor máximo de 2 pu. Entretanto, as perdas do sistema provocam uma redução do pico da tensão transitória (IIZARRY-SILVESTRINI; VÉLEZ-SEPÚLVEDA, 2008).

Segundo Iizarry-Silvestrini e Vélez-Sepúlveda (2008) um típico banco de capacitores operando com uma corrente de poucas centenas de ampères pode desenvolver uma corrente transitória de *inrush* de milhares ou até dezenas de milhares de ampères. Essas altas correntes podem provocar danos ao banco de capacitores e aos equipamentos de

chaveamento.

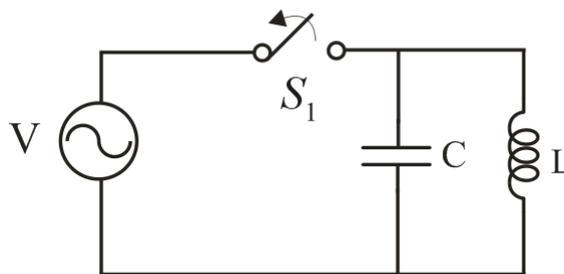
A representação simplificada do sistema, mostrada nessa seção fornece uma idéia da natureza do fenômeno, mas despreza fatores importantes como a dispersão no fechamento dos contatos dos disjuntores, representação mais detalhada da linha de transmissão, presença de perdas e amortecimento. Nos estudos de energização, para a obtenção de valores precisos das sobretensões, é necessário a realização de simulações com programas de transitórios eletromagnéticos(ZANETTA JÚNIOR, 2003).

Para controle das sobretensões e sobrecorrentes resultantes da energização podem ser utilizados resistores de pré-inserção, reatores limitadores de corrente e disjuntores com sincronização de tensão.

### 2.1.3.2 Desenergização de banco de reatores

Durante o chaveamento de bancos de reatores e transformadores a vazio ocorre a interrupção de pequenas correntes indutivas, o que pode causar sobretensões nos terminais do banco.

Na Figura 2.6 está representado o circuito simplificado para a manobra de desenergização de reatores.



**Figura 2.6** – Circuito representando a desenergização de reator

O capacitor em paralelo com o indutor na representação do reator corresponde à capacitância dos enrolamentos do indutor e capacitâncias parasitas. No momento da abertura do disjuntor a corrente não é imediatamente interrompida, então estabelece-se um arco elétrico entre os terminais do disjuntor. Idealmente, o arco se extingue quando a corrente passa por zero. Entretanto, durante seu decaimento, o arco tem uma tendência para muitas instabilidades e a corrente pode oscilar e abruptamente cair para zero, caracterizando

o que se chama de corte de corrente. A magnitude da tensão a ser cortada depende do tipo de disjuntor, do material dos contatos e do circuito ao qual o disjuntor está conectado. Tipicamente esse valor é cerca de 10 A (D'AJUZ et al., 1987).

No momento do corte de corrente, a energia magnética remanescente na indutância é transferida para a capacitância. Sendo a tensão nos terminais do reator  $v_S$ , e  $i(t)$  a corrente que circula entre o capacitor e indutor:

$$\frac{1}{2}Cv_S^2(t) = \frac{1}{2}Li^2(t). \quad (2.9)$$

E, portanto:

$$v_S(t) = \sqrt{\frac{L}{C}}i(t). \quad (2.10)$$

De acordo com a Figura 2.6, o pico da corrente é dado por:

$$I \leq \frac{V_m}{2\pi fL}, \quad (2.11)$$

onde:

$V_m$  é o valor de pico da tensão da fonte;

$f$  é a frequência de operação do sistema.

Assim o valor de pico da sobretensão é:

$$V_S \leq \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{V_m}{2\pi fL}, \quad (2.12)$$

$$\frac{V_S}{V_m} \leq \frac{1}{2\pi f\sqrt{LC}} = \frac{f_r}{f}, \quad (2.13)$$

onde:  $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  é a frequência de ressonância do equipamento.

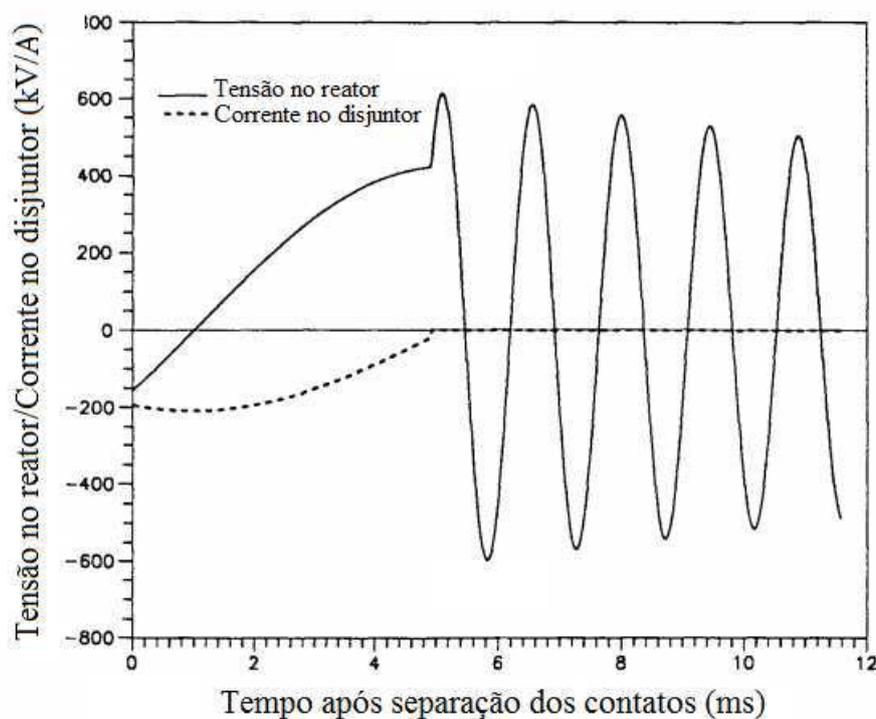
Observa-se que o valor de pico da sobretensão no banco é função da razão entre a frequência de ressonância e a frequência de operação do sistema

Após a interrupção da corrente, estabelece-se uma tensão de alta frequência através dos contatos dos polos do disjuntor manobrado, chamada de Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT). O disjuntor deve ser capaz de suportar essa tensão, caso contrário,

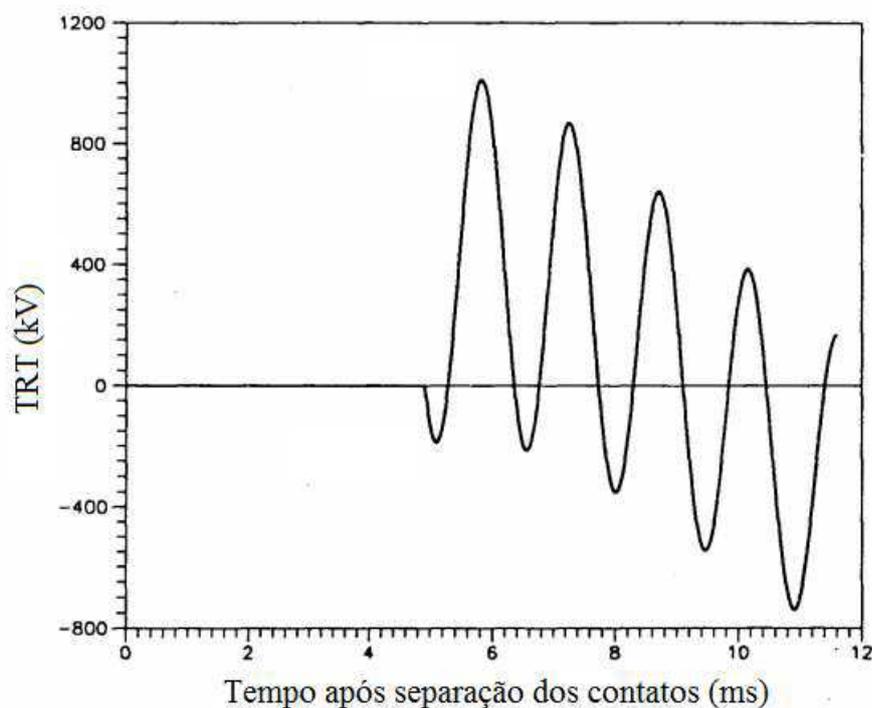
pode ocorrer reignições do arco por ruptura do dielétrico ou reignição térmica. É necessário que o resfriamento dentro da câmara do disjuntor seja mais rápido que o crescimento da TRT e que a suportabilidade dielétrica do meio de extinção seja maior que o valor de pico da TRT (PEREIRA; SOBREIRA, 2012).

Assim, a magnitude e a taxa de crescimento da tensão de restabelecimento são importantes para o projeto e especificação dos disjuntores.

Nas Figuras 2.7 e 2.8 estão ilustradas a tensão no reator/corrente no disjuntor e a tensão de restabelecimento transitória, respectivamente, para a manobra de desenergização com um disjuntor que interrompe uma corrente de 20 A.



**Figura 2.7** – Tensão no reator e corrente no disjuntor para interrupção de corrente de 20 A. Adaptado de Giudici (1989)



**Figura 2.8** – Tensão nos terminais do disjuntor para interrupção de corrente de 20 A. Adaptado de Giudici (1989)

Observa-se que no momento do corte de corrente, ocorre uma sobretensão no reator, e a tensão passa a oscilar numa frequência maior que a de operação do sistema. Também nota-se que a tensão nos terminais do disjuntor atinge valores bem elevados, entretanto, nesse caso não foi considerada a ocorrência de reignição do arco.

A medida de proteção normalmente utilizada para proteção de sobretensões nos bancos de capacitores é a instalação de para-raios (ARAÚJO; NEVES, 2005).

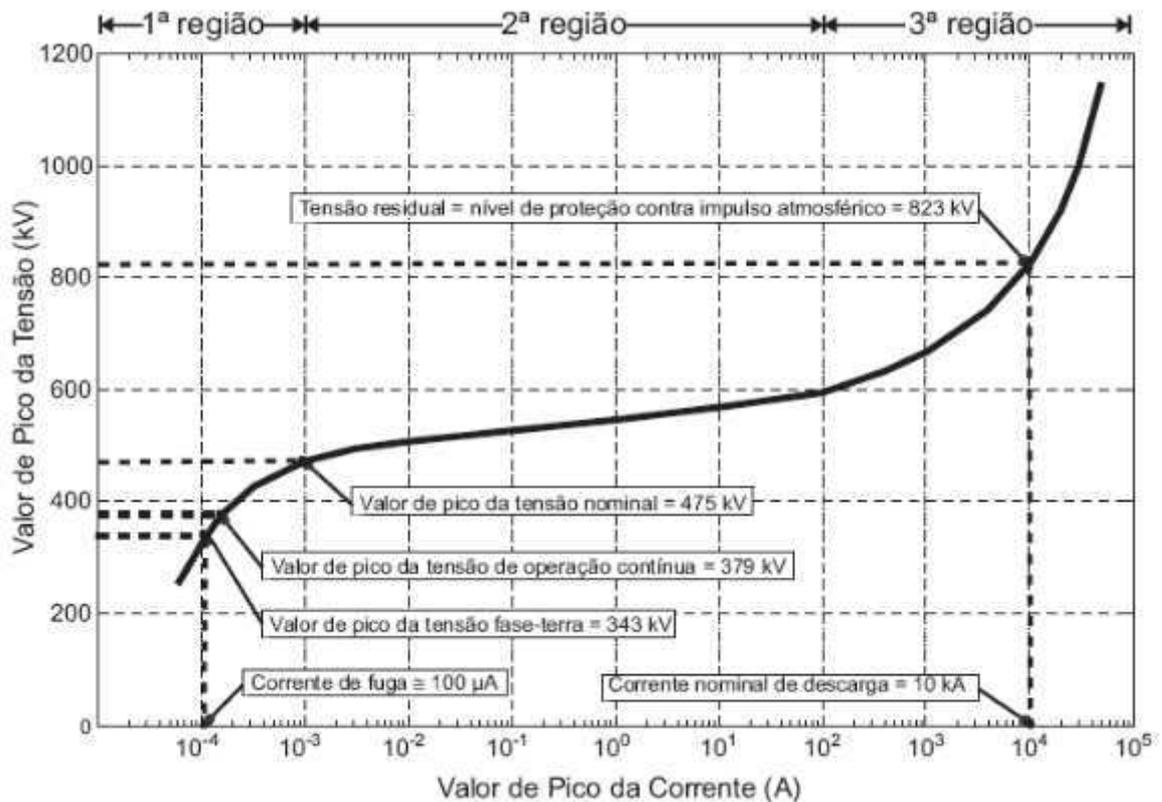
## 2.2 Para-raios de ZnO

Para-raios são dispositivos importantes para a proteção dos equipamentos do sistema elétrico quando ocorrem sobretensões, limitando a sobretensão a níveis suportáveis por esses equipamentos.

Os para-raios possuem relação entre tensão e corrente altamente não-linear, de modo que, em regime de operação normal uma pequena corrente de fuga circula continuamente pelos seus elementos não-lineares, os varistores. Para-raios são constituídos por uma coluna de varistores (pastilhas de óxido de zinco) envolvida por uma coluna de porcelana

ou material polimérico (COSTA, 1999).

A Figura 2.9 representa a característica tensão-corrente de um varistor de 420 kV.



**Figura 2.9** – Característica tensão-corrente para um varistor de 420 kV. Adaptado de (HINRICHSEN, 2001).

No gráfico podem ser observadas três regiões. A primeira região é a de baixa corrente, na qual o para-raios opera em regime permanente. A segunda região é chamada de altamente não-linear, onde a tensão no varistor permanece praticamente constante mesmo com grande variação de corrente. Na terceira região, a de alta corrente, a relação entre tensão e corrente volta a ser linear e pequenas variações de corrente causam grandes variações de tensão.

Para o estudo da teoria da para-raios é importante entender o significado de alguns termos como: máxima tensão de operação contínua, tensão nominal e tensão residual.

A máxima tensão de operação contínua (MCOV - *Maximum Continuous Operating Voltage*) corresponde à tensão na qual o varistor pode ser operado sem restrições. Já a tensão nominal do para-raio é o maior valor de tensão RMS admissível entre os terminais do para-raios, para o qual o dispositivo é projetado para funcionar adequadamente em

condições de sobretensão temporária.

A tensão nominal e a tensão de operação contínua de um varistor são diretamente relacionadas. A razão entre esses dois valores é de normalmente de 1,25, valor este determinado empiricamente (MEISTER, 2005).

A tensão residual é o valor de pico da tensão nos terminais do para-raios durante a passagem da corrente de descarga.

## 2.3 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 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

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

Fonte: (MARTINEZ-VELASCO, 2009).

Para a realização das simulações do presente trabalho foi necessário o estudo de modelagem de linhas, reatores e capacitores.

### 2.3.1 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.

Nessa seção serão estudados duas representações para a linha: a parâmetros concentrados e a parâmetros distribuídos.

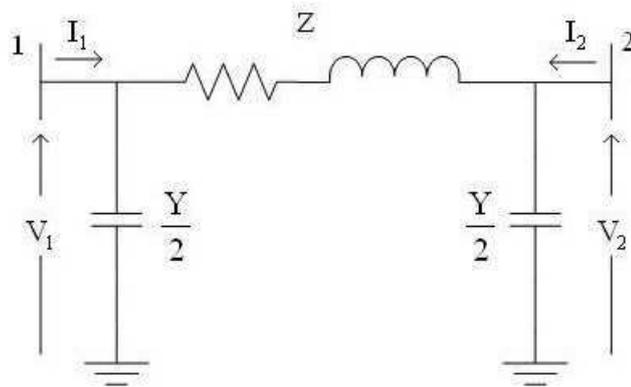
### 2.3.1.1 Representação a parâmetros concentrados

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).

$$Z = (r + j\omega l)d, \quad (2.14)$$

$$Y = (j\omega c)d. \quad (2.15)$$

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

$$I_1 = \frac{V_1 - V_2}{Z} + V_1 \frac{Y}{2}, \quad (2.16)$$

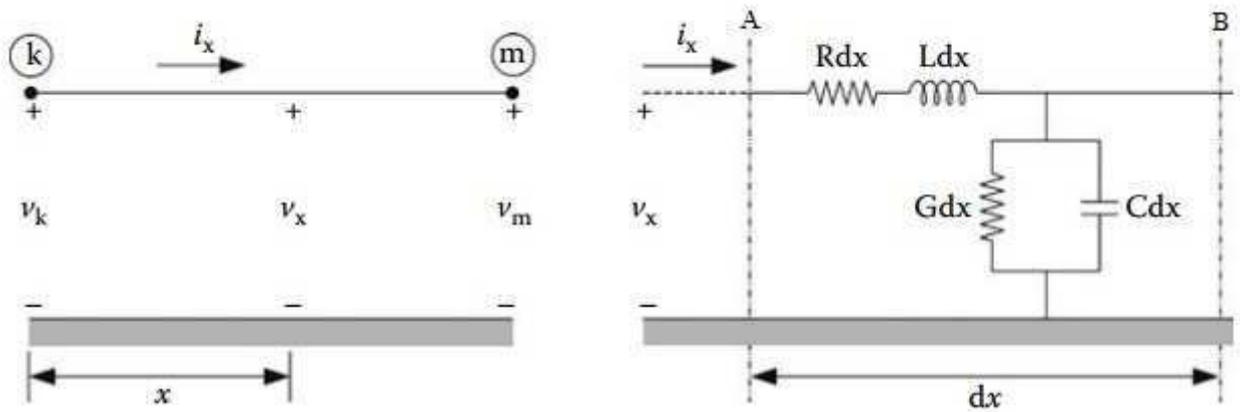
$$I_2 = \frac{V_2 - V_1}{Z} + V_2 \frac{Y}{2}. \quad (2.17)$$

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.

### 2.3.1.2 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)

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:

$$\oint_L E \cdot dl = i \cdot \frac{R}{2} dx + v(x, t) + \frac{\partial v}{\partial x} dx + i \cdot \frac{R}{2} dx - v(x, t). \quad (2.18)$$

O fluxo magnético que corta a área retangular formada pelos pontos A, B e a terra é aproximado pela equação 2.19 quando a distância entre o condutor e a terra for pequena quando comparada ao comprimento da onda viajante.

$$\phi = L \cdot dx \cdot i. \quad (2.19)$$

De acordo com a Lei da Indução de Faraday:

$$\oint_L E \cdot dl = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S B \cdot dS = -\frac{\partial \phi}{\partial t}. \quad (2.20)$$

Combinando as equações 2.18, 2.20 e 2.19 pode-se escrever:

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = Ri(x, t) + L \frac{\partial i}{\partial t}. \quad (2.21)$$

A partir dessa equação, nota-se que a variação da tensão do ponto A ao B é resultante de quedas de tensão 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:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} [C \cdot dx \cdot v(x, t)] = C \cdot dx \cdot \frac{\partial v}{\partial t}. \quad (2.22)$$

Então, de acordo com a equação da continuidade:

$$i(x, t) + \frac{\partial i}{\partial x} dx + v(x, t) \cdot G \cdot dx = -C \cdot dx \cdot \frac{\partial v}{\partial t}. \quad (2.23)$$

E, conseqüentemente:

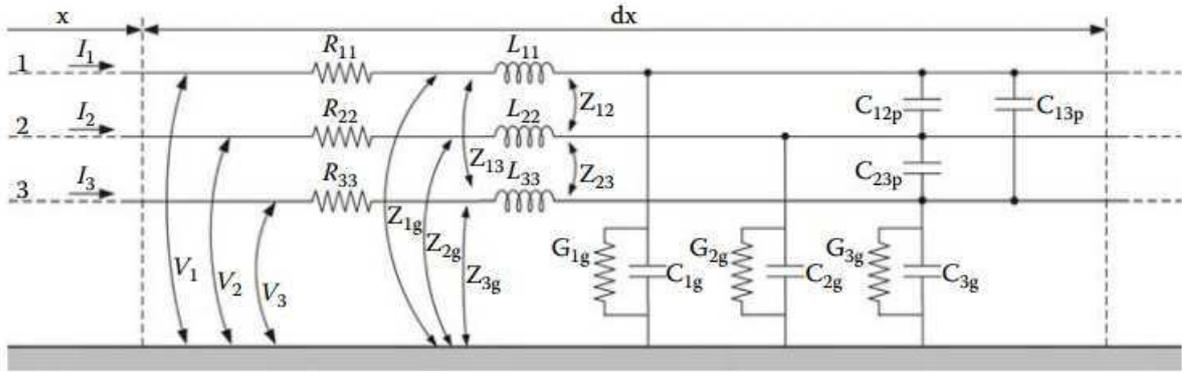
$$-\frac{\partial i}{\partial x} = Gv(x, t) + C \frac{\partial v}{\partial t}. \quad (2.24)$$

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

$$-\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = Ri(x, t) + L \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}, \quad (2.25)$$

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = Gv(x, t) + C \frac{\partial v(x, t)}{\partial t}. \quad (2.26)$$

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:

$$-\frac{\partial \mathbf{v}(x, t)}{\partial x} = \mathbf{R}\mathbf{i}(x, t) + \mathbf{L}\frac{\partial \mathbf{i}(x, t)}{\partial t}, \quad (2.27)$$

$$-\frac{\partial \mathbf{i}(x, t)}{\partial x} = \mathbf{G}\mathbf{v}(x, t) + \mathbf{C}\frac{\partial \mathbf{v}(x, t)}{\partial t}, \quad (2.28)$$

onde:

$\mathbf{v}(x, t)$  e  $\mathbf{i}(x, t)$  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.

### 2.3.1.3 Análise no domínio da frequência

Para o caso de um condutor, aplicando a transformada de Laplace nas equações 2.25 e 2.26 e considerando as condições iniciais nulas, tem-se:

$$-\frac{dV}{dx} = (R + sL).I(x, s), \quad (2.29)$$

$$-\frac{dI}{dx} = (G + sC).V(x, s). \quad (2.30)$$

Derivando a equação 2.29 em relação a  $x$  e substituindo a derivada da corrente em relação a  $x$  pela equação 2.30, e fazendo o mesmo para a equação da corrente, substituindo a derivada da tensão, temos:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = (R + sL).(G + sC).V(x, s), \quad (2.31)$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = (R + sL).(G + sC).I(x, s). \quad (2.32)$$

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

$$V(x, s) = A(s)e^{-\gamma x} + B(s)e^{\gamma x}, \quad (2.33)$$

$$I(x, s) = \frac{A(s)}{Z_c(s)}e^{-\gamma x} - \frac{B(s)}{Z_c(s)}e^{\gamma x}, \quad (2.34)$$

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. Aplicando-se as condições iniciais (para  $x = 0$ ), são obtidas as seguintes equações:

$$V(x, s) = \frac{V(0, s) + Z_c I(0, s)}{2}e^{-\gamma x} + \frac{V(0, s) - Z_c I(0, s)}{2}e^{\gamma x}, \quad (2.35)$$

$$I(x, s) = \frac{V(0, s) + Z_c I(0, s)}{2Z_c}e^{-\gamma x} + \frac{V(0, s) - Z_c I(0, s)}{2Z_c}e^{\gamma x}. \quad (2.36)$$

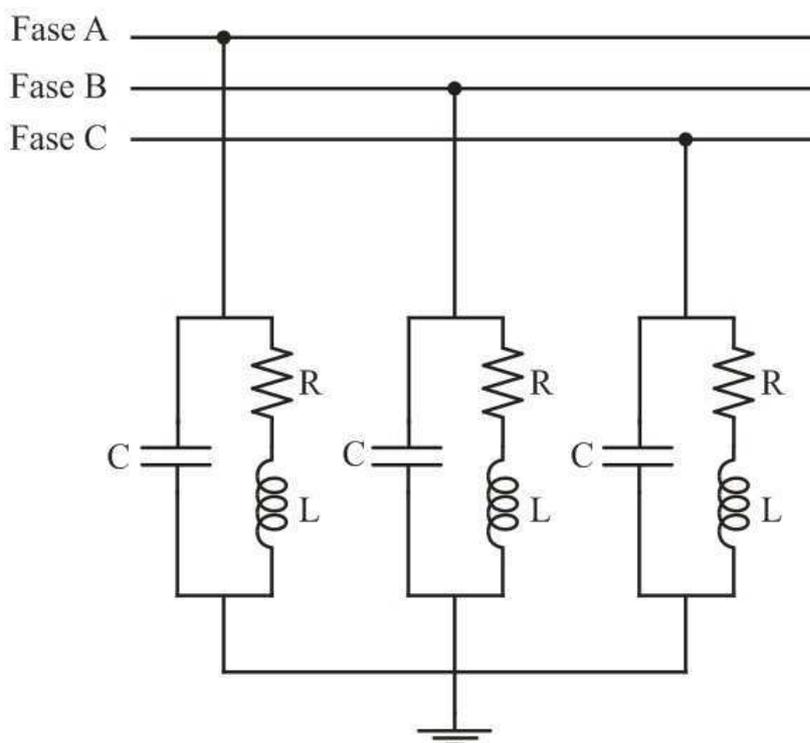
O comportamento de linhas com mais de um condutor, no domínio da frequência, também pode ser representado de forma similar às equações 2.31 e 2.32, substituindo os elementos  $R$ ,  $L$ ,  $G$  e  $C$  pelas matrizes  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{L}$ ,  $\mathbf{G}$  e  $\mathbf{C}$ .

Além da modelagem dos condutores, a depender do estudo a ser realizado, também é importante representar outras partes físicas, como torres e aterramento e fenômenos como o efeito corona. Entretanto, nesse trabalho será considerada apenas a modelagem dos condutores.

### 2.3.2 Modelagem de reatores

Os reatores *shunt* são instalados em um sistema com o objetivo de minimizar o efeito capacitivo da linha e, conseqüentemente, o efeito Ferranti.

O modelo para reatores, resultante da combinação dos modelos apresentados por D'Ajuz et al. (1987) e Merícia (2008), está representado na Figura 2.13.



**Figura 2.13** – Modelo para reator de linha. Adaptado de D'Ajuz et al. (1987) e Merícia (2008)

Além da parte fundamental representada pelo indutor, o reator também apresenta uma resistência e capacitância. O valor do indutor é obtido através da seguinte equação:

$$L = \frac{V^2}{\omega Q}, \quad (2.37)$$

em que:

$Q$  é a potência reativa trifásica do respectivo banco de reatores;

$V$  é a tensão rms, entre fases, da barra onde o banco está conectado;

$\omega$  é a frequência angular do sistema.

Segundo Merícia (2008), as resistências dos reatores são determinadas da seguinte forma:

$$Q = \frac{X}{R}, \quad (2.38)$$

onde:

$Q$  é o fator de qualidade;

$X$  é a reatância de fase;

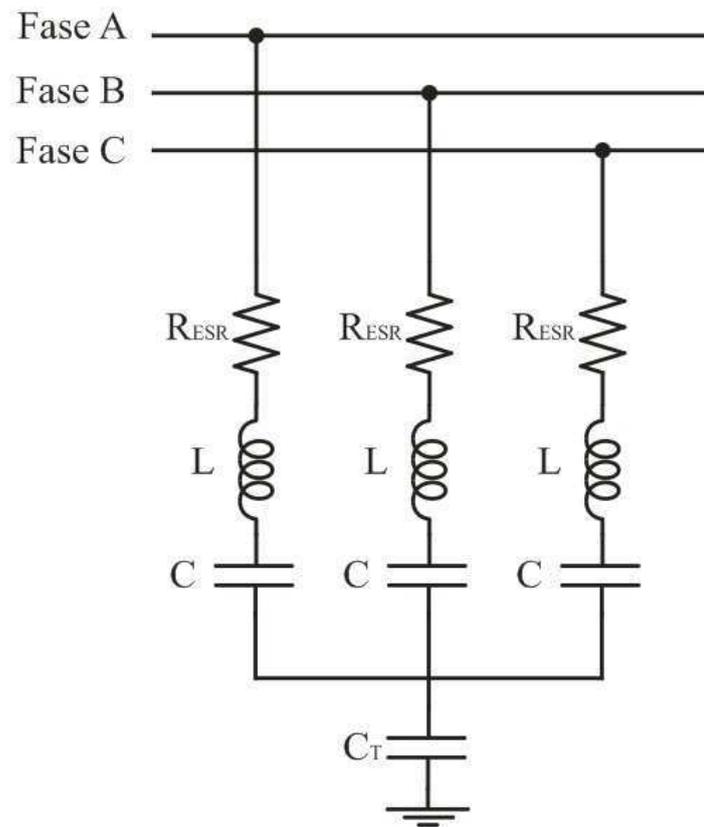
$R$  é a resistência de fase.

A presença do capacitor representa o efeito das capacitâncias distribuídas dos enrolamentos. De acordo com Zanetta Júnior (2003), o valor dos capacitores é de 1 a 4 nF para transformadores e reatores em geral. Para reatores de núcleo de ar, a capacitância é de poucos pF segundo Sluis (2001).

### 2.3.3 Modelagem de capacitores

Bancos de capacitores são projetados para gerar potência reativa em sistemas de alto consumo de reativos. Eles são utilizados para aumentar a tensão na linha de transmissão durante os períodos de carga pesada.

Segundo Neves et al. (2009), os bancos de capacitores devem ser representados por elementos a parâmetros concentrados, tal como ilustrado na Figura 2.14:



**Figura 2.14** – Banco de Capacitores. Adaptado de Neves et al. (2009).

Na figura,  $L$  representa a soma da indutância interna do banco de capacitores (entre  $5\mu\text{H}$  e  $10\mu\text{H}$ ) e da indutância limitadora de corrente instalada no banco (valores da ordem de  $100\mu\text{H}$ ) (ANSI C37.0731-1973, 1973; ZANETTA JÚNIOR, 2003).

Segundo Neves et al. (2009), a capacitância entre o neutro e a terra ( $C_T$ ) tem um valor padrão de  $250\text{ pF}$ .

A capacitância  $C$  representa a capacitância do banco de capacitores e seu valor pode ser obtido a partir da seguinte equação:

$$C = \frac{Q}{\omega V^2}, \quad (2.39)$$

em que:

$Q$  é a potência reativa trifásica do respectivo banco de capacitores;

$V$  é a tensão rms, entre fases, da barra onde o banco está conectado;

$\omega$  é a frequência angular do sistema.

A resistência  $RESR$  (*Equivalent Series Resistance*) é a resistência série equivalente do banco de capacitores. Este parâmetro permite que as perdas resultantes no banco de capacitores sejam expressas como perdas em um único resistor no circuito equivalente. O valor das perdas totais nos bancos de capacitores são da ordem de 0,44 W/kvar (D'AJUZ et al., 1987).

O valor da resistência equivalente ( $RESR$ ) pode ser obtido a partir da seguinte equação:

$$R_{ESR} = \frac{0,44 \cdot 10^{-3} \cdot V^2}{Q}. \quad (2.40)$$

# Capítulo 3

## Simulações de transitórios eletromagnéticos

Nesse capítulo serão apresentados os sistemas e modelagens utilizados, bem como os resultados e análises para as simulações realizadas. Os fenômenos simulados foram: efeito Ferranti, ferrorressonância, descarga atmosférica em linha de transmissão, energização de banco de capacitores isolados e desenergização de banco de reatores.

Para a realização das simulações de transitórios eletromagnéticos foi utilizado o software ATP (*Alternative Transient Program*). O ATP é uma versão do programa EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) e possibilita a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, por um método que utiliza a matriz de admitância de barras.

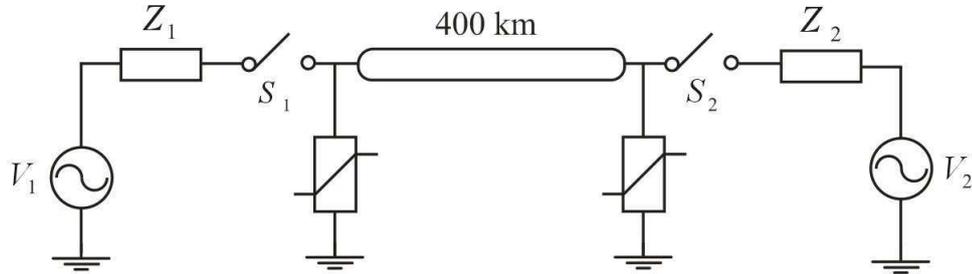
A formulação matemática do programa baseia-se no método das características (Método de Bergeron) para elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para parâmetros concentrados. Durante a solução são utilizadas técnicas de esparsidade e de fatorização triangular otimizada de matrizes. Por se tratar de um programa digital, os valores são calculados a intervalos de tempo discretos.

A seguir serão descritos os sistemas simulados e os modelos escolhidos no ATP para a representação.

### 3.1 Descrição dos Sistemas

Para as simulações de efeito Ferranti, descarga atmosférica e manobra de capacitores e reatores foi escolhido o sistema elétrico fictício proposto por Dantas (2007) e representado

na Figura 3.1. Esse sistema simplificado baseia-se em dados reais obtidos do sistema elétrico de potência de 500kV da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF).



**Figura 3.1** – Sistema elétrico fictício. Adaptado de Dantas (2007).

A seguir são apresentados os dados da linha de transmissão e das fontes.

**Tabela 3.1** – Dados de sequência da linha de transmissão

Sequência	R ( $\Omega/\text{km}$ )	X ( $\Omega/\text{km}$ )	$\omega C$ ( $\mu\text{S}/\text{km}$ )
Zero	0,3996	0,9921	3,0839
Positiva	0,0333	0,3170	5,2033

Fonte: (DANTAS, 2007).

**Tabela 3.2** – Tensão das fontes ( $V_{base}=550$  kV)

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

Fonte: (DANTAS, 2007).

**Tabela 3.3** – Impedância das fontes

Fonte	Sequência zero		Sequência positiva	
	$R_0(\Omega)$	$X_0(\Omega)$	$R_1(\Omega)$	$X_1(\Omega)$
Fonte 1	1,1268	20,838	0,9681	28,513
Fonte 2	1,1268	20,838	0,9681	28,513

Fonte: (DANTAS, 2007).

Para a representação da linha de transmissão no ATP foi escolhida a representação a parâmetros distribuídos, pois serão simulados transitórios de frente rápida. Foi utilizado um modelo do ATP de linha transposta com três fases e com parâmetros que não são dependentes da frequência.

No ATP a fonte senoidal é representada pela fonte tipo 14. As impedâncias das fontes foram modeladas no ATP como elementos R-L mutuamente acoplados (tipo 51, 52, 53).

Nas simulações de efeito Ferranti e desenergização de banco de reatores foram utilizados reatores de 180 Mvar no início da linha para o caso de desenergização de reatores e no fim da linha para o caso do efeito Ferranti. Na simulação de energização de banco de capacitores foi utilizado um banco de 120 Mvar no fim da linha. A escolha dos valores não foi feita com base em um estudo de compensação da linha, já que o objetivo da utilização de reatores e capacitores é apenas observar a influência desses elementos para os transitórios eletromagnéticos. Assim, foram escolhidos valores típicos para linhas de 500 kV.

Nas simulações de efeito Ferranti, descargas atmosféricas e manobra de capacitores e reatores foram utilizados para-raios de ZnO com tensão nominal de 420 kV e nível de proteção a sobretensão de manobra de 830 kV em 2 kA. A característica desse para-raios está apresentada na Tabela 3.4

**Tabela 3.4** – Característica dos para-raios de ZnO com tensão nominal de 420 kV

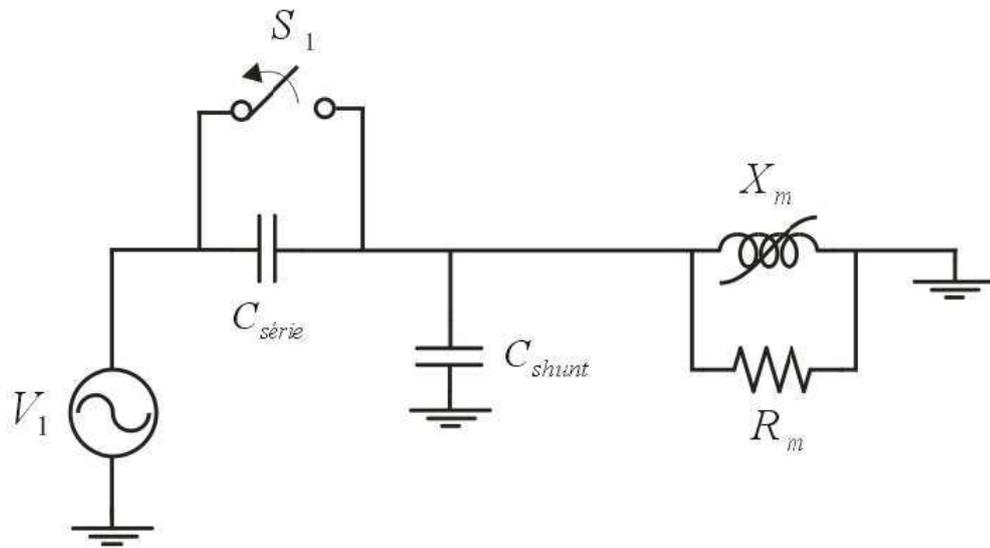
Corrente (kA)	Tensão fase-terra (kV)
0,001	643,72
0,010	681,23
0,050	721,27
0,100	738,70
0,200	756,14
0,400	775,75
0,700	793,18
1,000	806,26
2,000	830,23
5,000	873,81

Fonte: (DANTAS, 2007).

Para a representação do para-raios no ATP foi utilizada uma resistência não-linear (tipo 92).

Para a simulação do fenômeno de ferrorressonância foi utilizado o circuito da Figura 3.2, que representa um circuito monofásico simplificado para simulação de um transformador de 33kV/110V em vazio, proposto por Abdul-Malek et al. (2013). Devido à presença de capacitâncias e do indutor não-linear, esse circuito é adequado para verificação do

fenômeno de ferrorressonância.



**Figura 3.2** – Circuito para simulação de ferrorressonância. Adaptado de Abdul-Malek et al. (2013).

O circuito é simulado do ponto de vista do primário, assim, a fonte de tensão tem valor de pico de 26,94 kV e frequência de 50 Hz.

O ramo de magnetização do transformador é representado por um indutor não-linear em paralelo com um resistor de alto valor (16,9 M $\Omega$ ).

Para a representação do indutor não-linear no ATP, foi utilizado o elemento indutor não-linear (tipo 93 - *true non-linear*). A partir dos dados de tensão e corrente no primário apresentados na Tabela 3.5, utilizou-se a rotina SATURATION do ATP para se obter a característica fluxo-corrente, necessária para a utilização do indutor tipo 93 no ATP.

**Tabela 3.5** – Dados de corrente e tensão para o primário do transformador.

Corrente (p.u.)	Tensão (p.u)
0,283	0,150
0,495	0,313
0,677	0,475
0,897	0,640
1,091	0,785
1,409	0,957
1,673	1,100
1,788	1,143
2,083	1,288
2,436	1,430
2,779	1,539
3,553	1,756
7,696	1,969

Fonte: (ABDUL-MALEK et al., 2013).

O capacitor *shunt* ( $C_{shunt}$ ) representa a capacitância parasita equivalente do enrolamento do transformador e é mantido constante no valor de 97,4 pF. O valor desse capacitor *shunt*, os valores de resistência de magnetização e a característica tensão-corrente do núcleo magnético foram obtidos a partir de medições realizadas no transformador em Abdul-Malek et al. (2013).

A chave representa um disjuntor ou fusível. Inicialmente ela está fechada, mas quando abre considera-se que a tensão de alimentação ainda está acoplada ao transformador através de uma capacitância ( $C_{serie}$ ). O valor desse capacitor é variado para avaliar a ocorrência ou não de ferorrressonância no circuito.

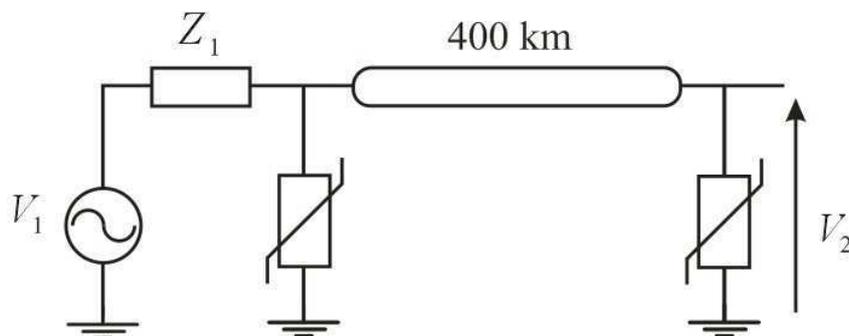
## 3.2 Resultados e Análises

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos a partir das simulações realizadas no ATP. Será também feita uma análise dos resultados obtidos e de possíveis técnicas de mitigação para alguns casos.

### 3.2.1 Efeito Ferranti

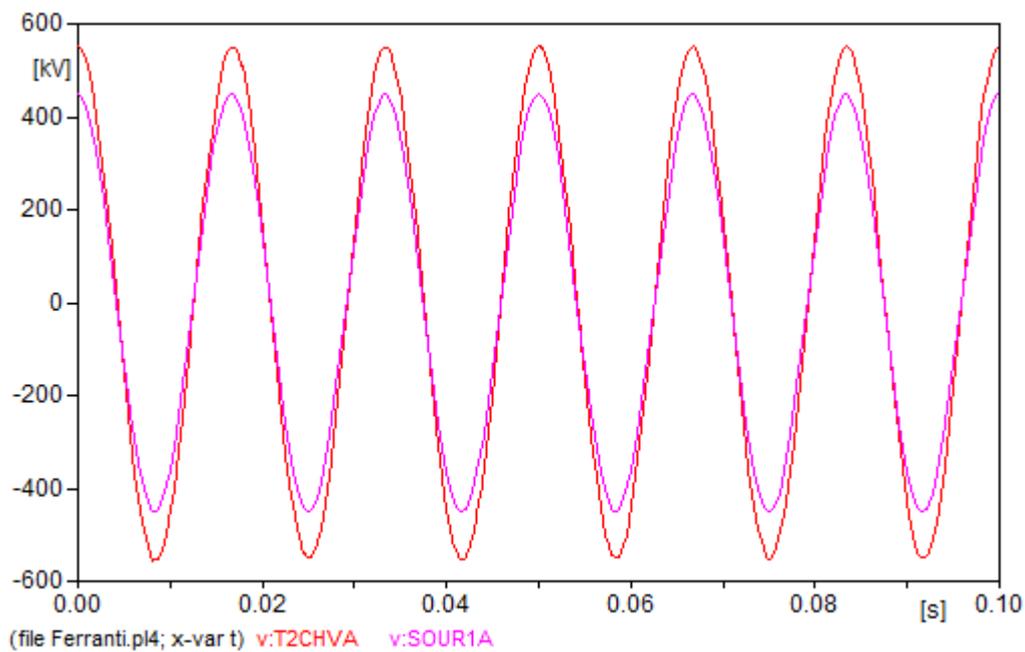
Para a simulação do efeito Ferranti é necessário analisar a linha em vazio e observar se realmente a tensão na extremidade aberta da linha ( $V_2$ ) é maior que a tensão do lado de

geração ( $V_1$ ). Para tanto, utilizou-se a representação da Figura 3.3.



**Figura 3.3** – Sistema para simulação do efeito Ferranti.

A simulação foi realizada com um passo de  $10^{-7}s$ . Os resultados obtidos a partir da simulação no ATP estão representados nas Figuras ?? e 3.4. Na Figura 3.4 está representada a comparação entre a tensão do lado de geração e na extremidade aberta da linha para a fase A. A curva em vermelho (T2CHVA) representa a tensão na extremidade aberta e a curva em rosa (SOUR1A) a tensão no lado de geração.

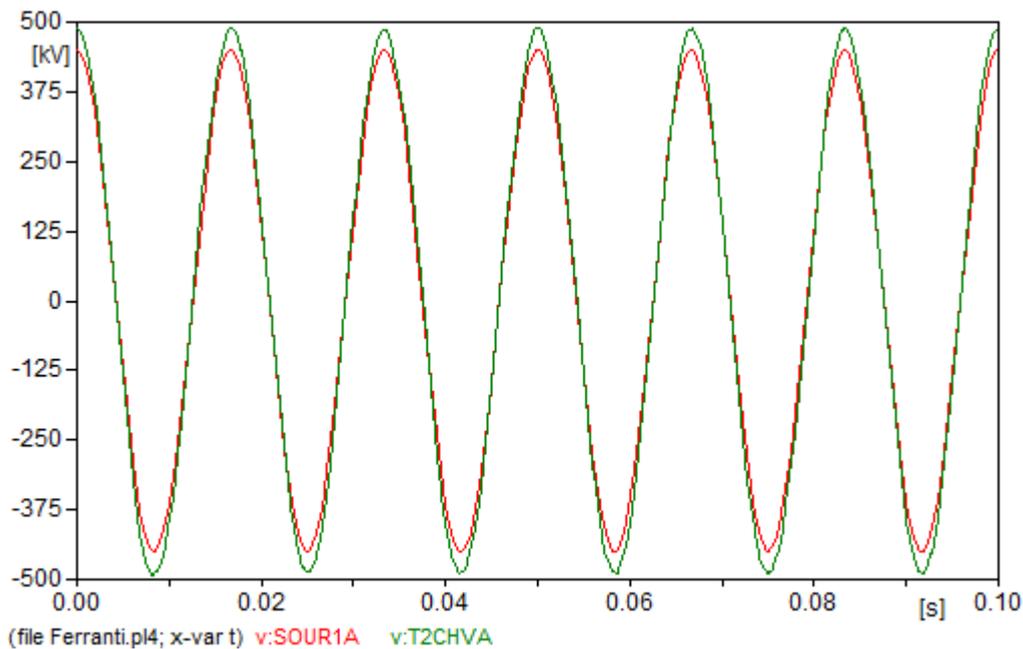


**Figura 3.4** – Tensões do lado de geração e na extremidade aberta da linha para a fase A.

A partir da análise dos resultados foi possível observar a sobretensão sustentada no fim da linha. O valor de pico da tensão da fonte é de aproximadamente 449 kV, enquanto

a tensão na extremidade aberta da linha é de 550 kV. Assim, para uma tensão de 1 p.u. no lado de geração, a tensão na extremidade aberta chega a 1,225 p.u..

Para minimizar o efeito Ferranti uma solução seria a instalação de bancos de reatores. Foram feitas então novas simulações adicionando no fim da linha um banco de reatores de 180 Mvar. Os resultados obtidos estão representados na 3.5. Na Figura 3.5 está representada a comparação entre a tensão do lado de geração (SOUR1A) e na extremidade aberta da linha (T2CHVA) para a fase A, após a instalação do banco de reatores.

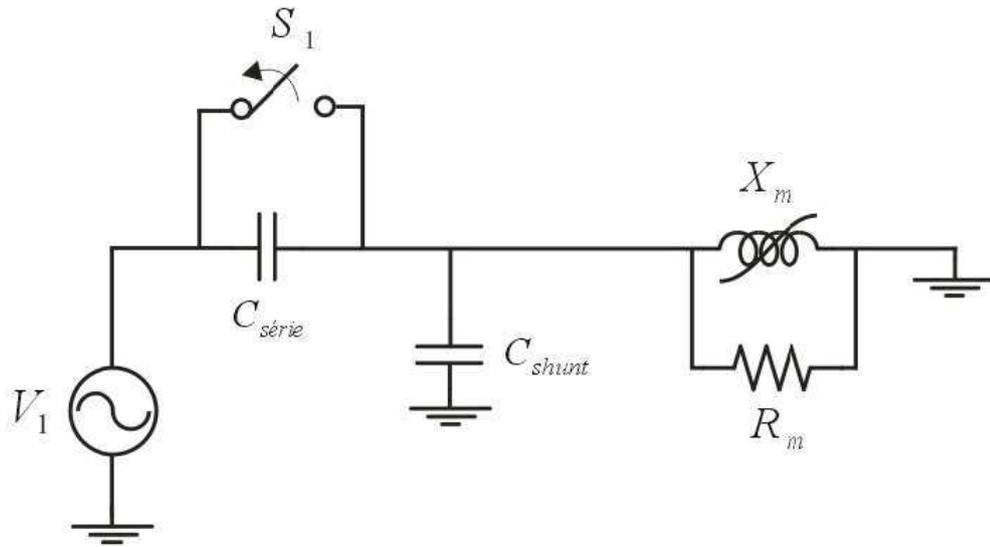


**Figura 3.5** – Tensões do lado de geração e na extremidade aberta da linha para a fase A - com banco de reatores.

Após a instalação do banco de reatores, observou-se uma minimização da sobretensão provocada pelo efeito Ferranti. A tensão de pico na extremidade da linha atinge valores próximos a 488 kV (tensão de 1,087 p.u.).

### 3.2.2 Ferrorressonância

O circuito utilizado para a simulação é o mesmo descrito na seção 3.1 e está novamente representado na Figura 3.6. A chave está inicialmente fechada e abre após 0,25s. Foi utilizado um passo de  $10^{-6}$  s.



**Figura 3.6** – Circuito para simulação de ferroressonância. Adaptado de Abdul-Malek et al. (2013).

A simulação foi feita para valores de capacitância série entre 50 pF e 1500 pF, com o objetivo de determinar para que faixa de valores de capacitâncias poderia ocorrer ferroressonância. Sobretensões devido ao efeito de ferroressonância foram observadas para os valores entre 350 e 1500 pF. Entretanto, no sistema real, a capacitância série é muito pequena e bem inferior a 350 pF. Sendo assim, a ocorrência de ferroressonância seria improvável para esse sistema, em uma situação real.

Nas Figuras 3.7 e 3.8 estão representados os resultados obtidos para o caso de 50 pF, quando não ocorreu ferroressonância. A tensão de saída representa a tensão nos terminais do transformador e, nesse circuito, foi medida nos terminais do indutor não-linear. Na condição do transformador em vazio, antes da abertura da chave, essa tensão tem o valor de pico de 26,94 kV. Para todos os gráficos da simulação de ferroressonância a corrente em vermelho representa a corrente na chave e a verde representa a corrente no capacitor série.

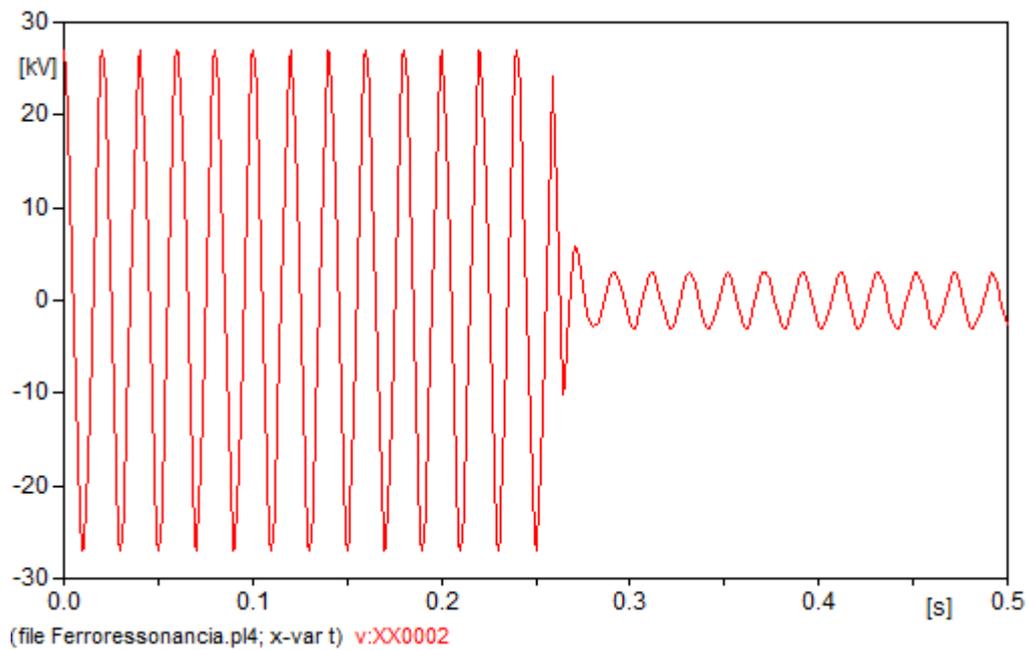


Figura 3.7 – Tensão de saída com capacitor série de 50 pF.

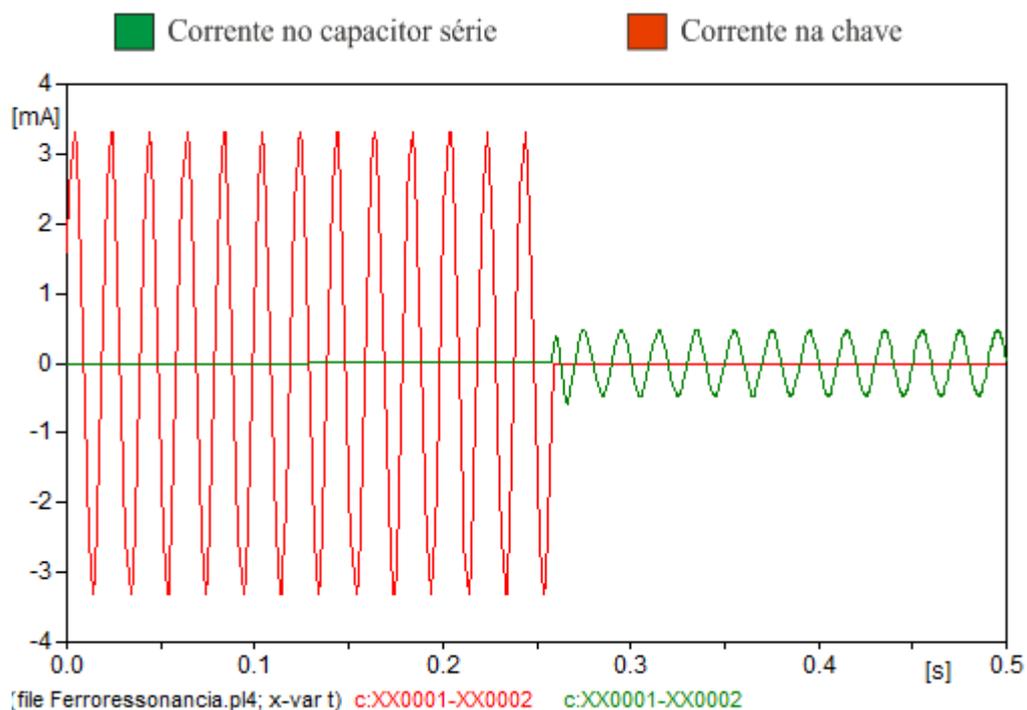


Figura 3.8 – Correntes na chave e no capacitor série de 50 pF.

Para esse caso observa-se que não ocorreu sobretensão. A tensão diminui e o valor de pico se estabiliza próximo a 3 kV.

Nas Figuras 3.9 e 3.10 estão representados os resultados obtidos para o caso de 500pF, quando ocorreu ferrossonância.

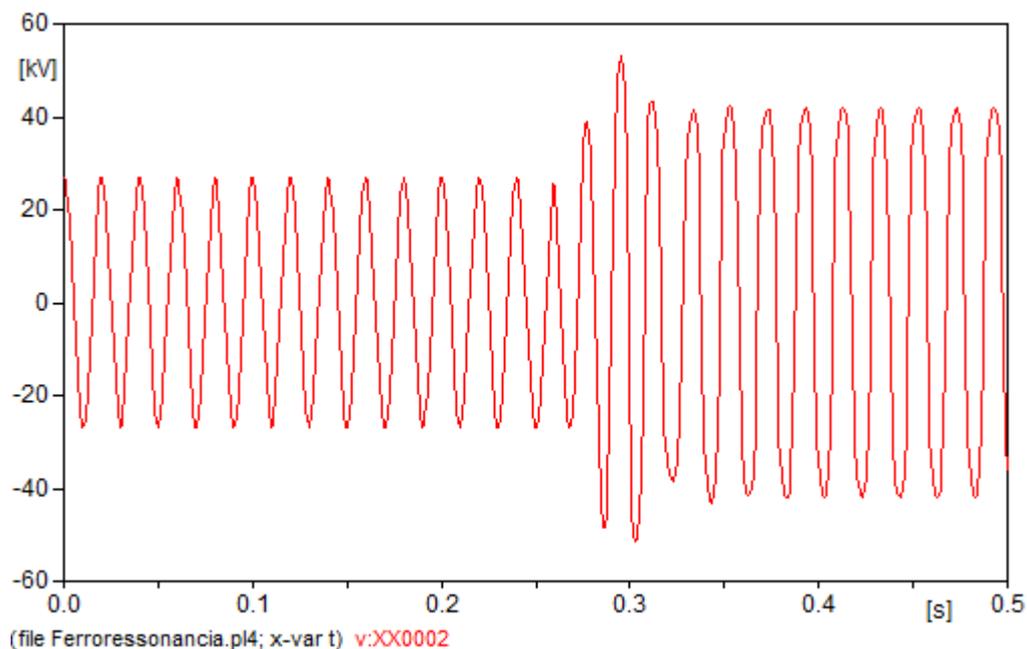


Figura 3.9 – Tensão de saída com capacitor série de 500 pF.

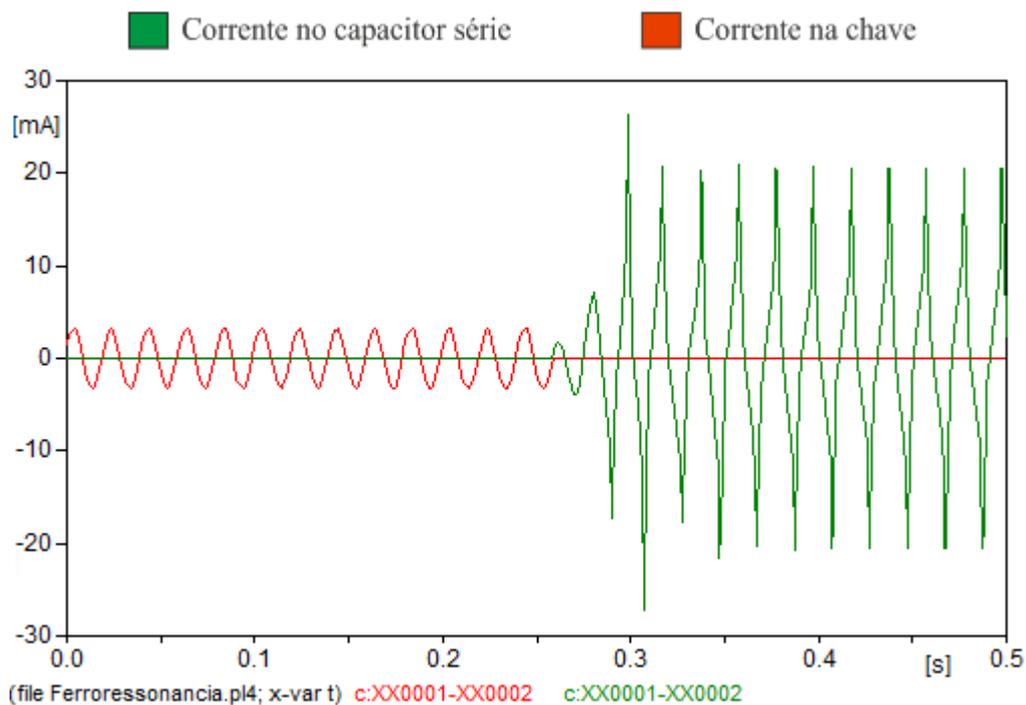


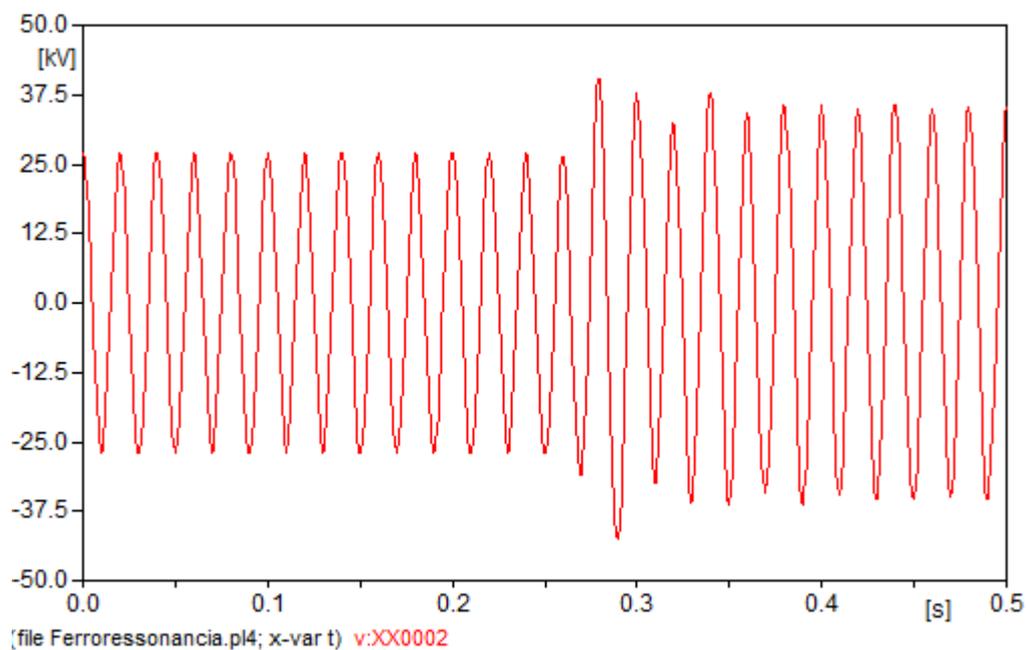
Figura 3.10 – Correntes na chave e no capacitor série de 500 pF.

Para o caso do capacitor de 500 pF, ocorre uma sobretensão de manobra devido a

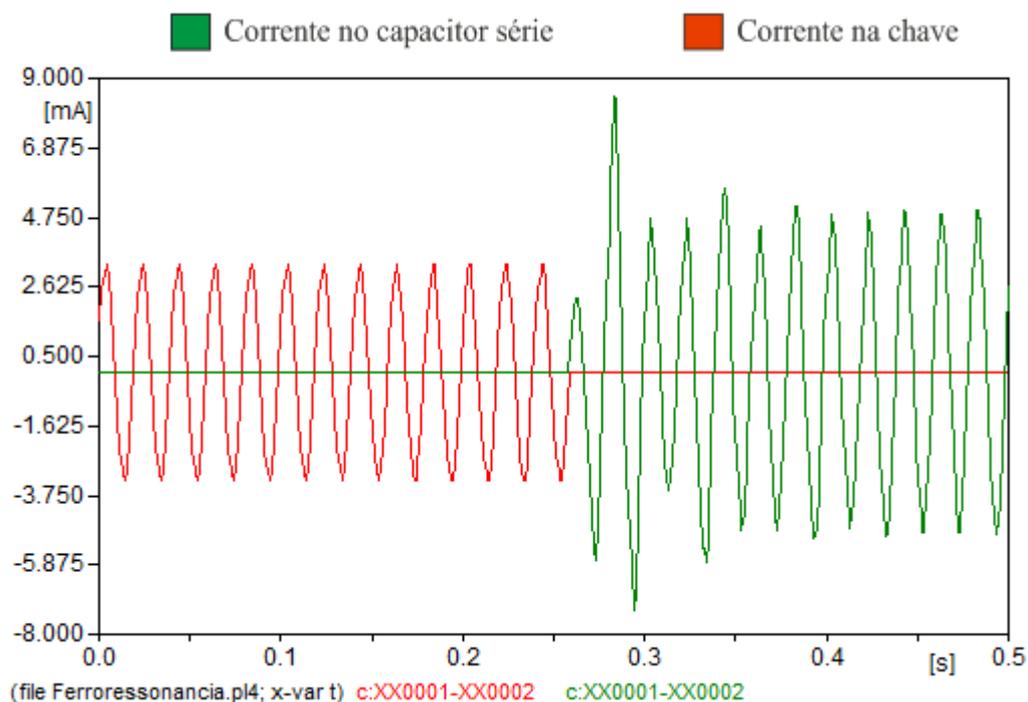
abertura da chave e uma sobretensão sustentada devido ao fenômeno de ferrorressonância. Durante a manobra, a tensão chega a atingir um valor máximo de 53,2 kV, depois, o valor de pico fica por volta de 42 kV.

Quanto à corrente, foram atingidos valores de até 26 mA. Para as condições anteriores de funcionamento o valor de pico da corrente total do sistema era de aproximadamente 3,3 mA, assim, ocorreu um aumento de quase oito vezes. Também é possível observar uma deformação na forma de onda da corrente devido à característica não-linear de operação, que pode introduzir componentes harmônicos no sinal.

Para o caso do capacitor série de 1500 pF também ocorreu sobretensão devido à manobra e ferrorressonância. Os resultados são apresentados nas Figuras 3.11 e 3.12. O valor de pico da tensão se estabiliza em 34,8 kV, mas devido à operação de manobra da chave chega a atingir um pico de 40,5 kV. A corrente total chega a 8,5 mA.



**Figura 3.11** – Tensão de saída com capacitor série de 1500 pF.



**Figura 3.12** – Correntes na chave e no capacitor série de 1500 pF.

Assim, a partir dos resultados obtidos, confirma-se que, para o circuito analisado, o fenômeno de ferroressonância poderia provocar um aumento considerável e perigoso da tensão nos terminais do transformador.

Como técnica de mitigação para o efeito de ferroressonância, é proposta por Abdul-Malek et al. (2013) a utilização de um resistor de  $1\text{ M}\Omega$  em paralelo com o transformador. Tomando como base o circuito da Figura 3.6, o resistor foi adicionado em paralelo com o indutor não linear. A simulação foi feita para o caso de ocorrência de ferroressonância com a utilização do capacitor de 500 pF. Os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras 3.13 e 3.14.

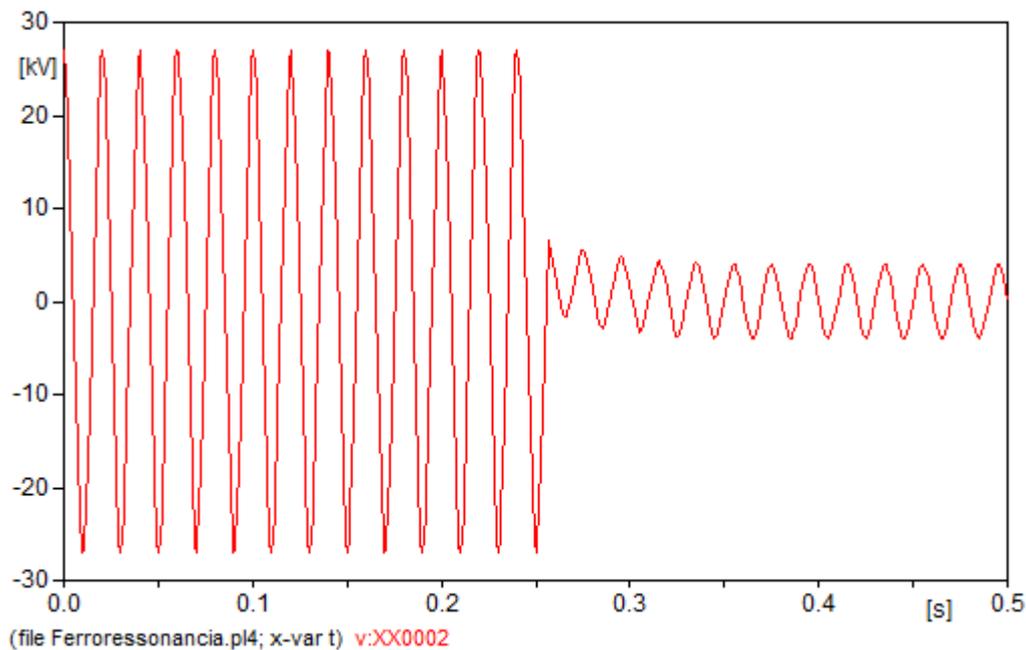


Figura 3.13 – Tensão de saída com capacitor série de 500 pF e utilização de resistor

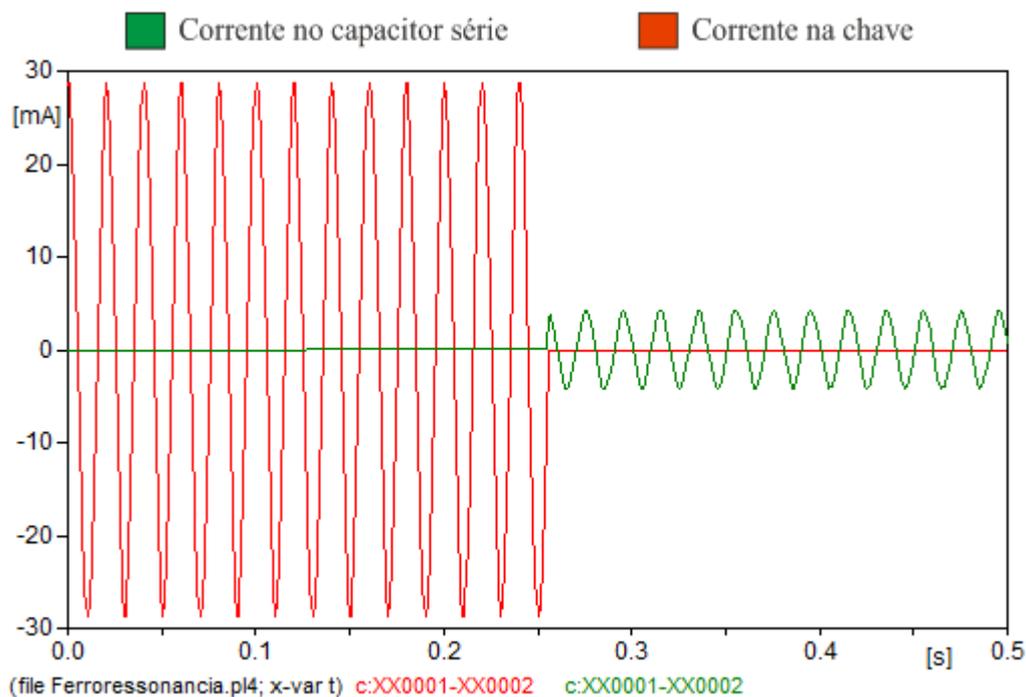


Figura 3.14 – Correntes na chave e no capacitor série de 500 pF com utilização de resistor.

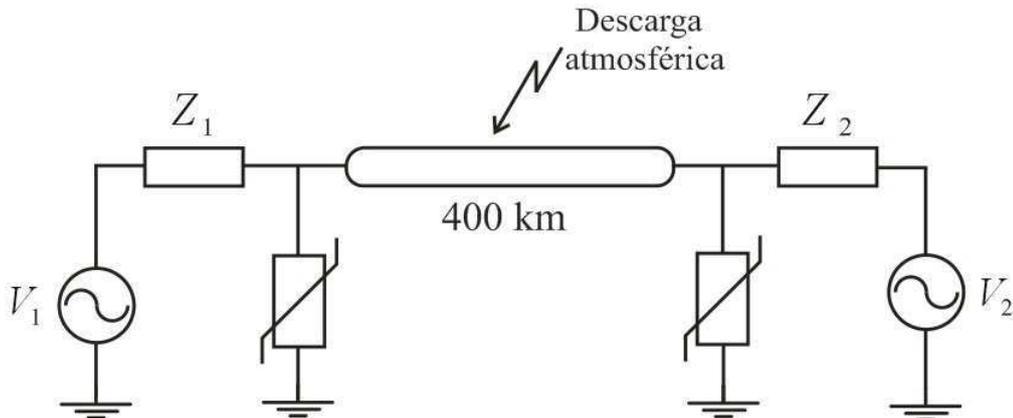
Observou-se que, após a inserção do resistor, não ocorre mais sobretensão no sistema nem deformação da forma de onda da corrente devido ao fenômeno de ferrossonância. O valor de pico da tensão reduziu para 4 kV e da corrente para 4,2 mA. Entretanto, essa

solução não é muito adequada, pois tem a desvantagem de aumentar, em operação normal do sistema, o carregamento do cabo e do transformador, dissipando mais potência. Outras medidas corretivas em caso de ocorrência de ferrorressonância, propostas por D'Ajuz et al. (1987), são :

- Redução da tensão aplicada para que o transformador opere na região linear da curva de saturação;
- Para sistemas trifásicos, substituir chaves fusíveis por disjuntores, evitando operações desbalanceadas no sistema.
- Manobrar por último, quando possível, o mais próximo do transformador, de maneira a evitar o circuito série cabo-transformador.

### 3.2.3 Descargas atmosféricas em linha de transmissão

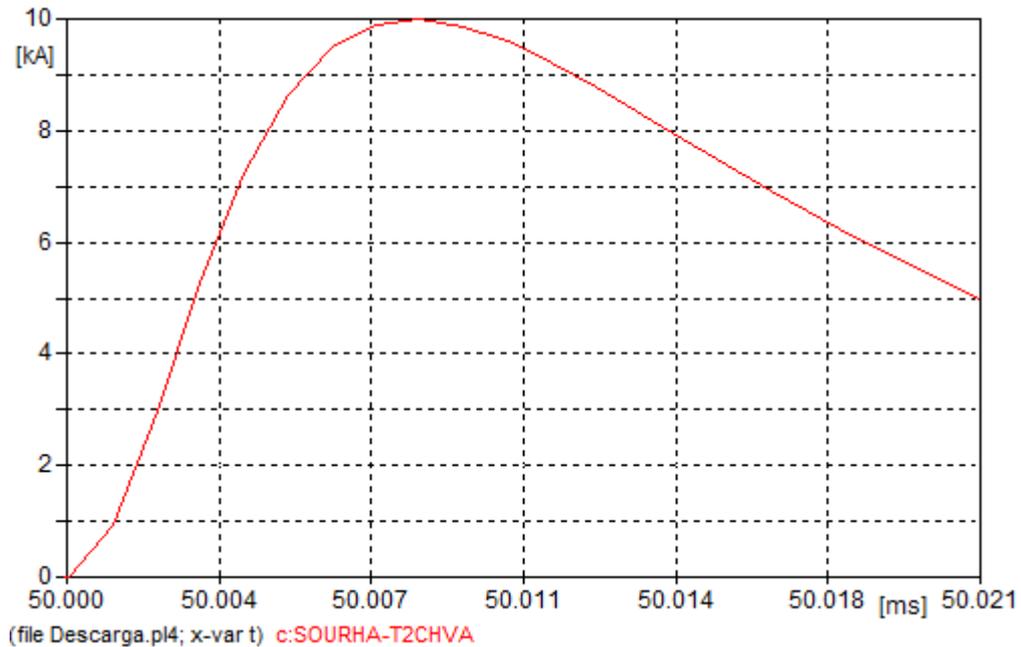
Para a avaliação da ocorrência de sobretensões atmosféricas foi feita a simulação no ATP de uma descarga atmosférica atingindo uma linha de transmissão em um ponto situado na metade do seu comprimento. O sistema está representado na Figura 3.15.



**Figura 3.15** – Sistema para simulação de descarga atmosférica.

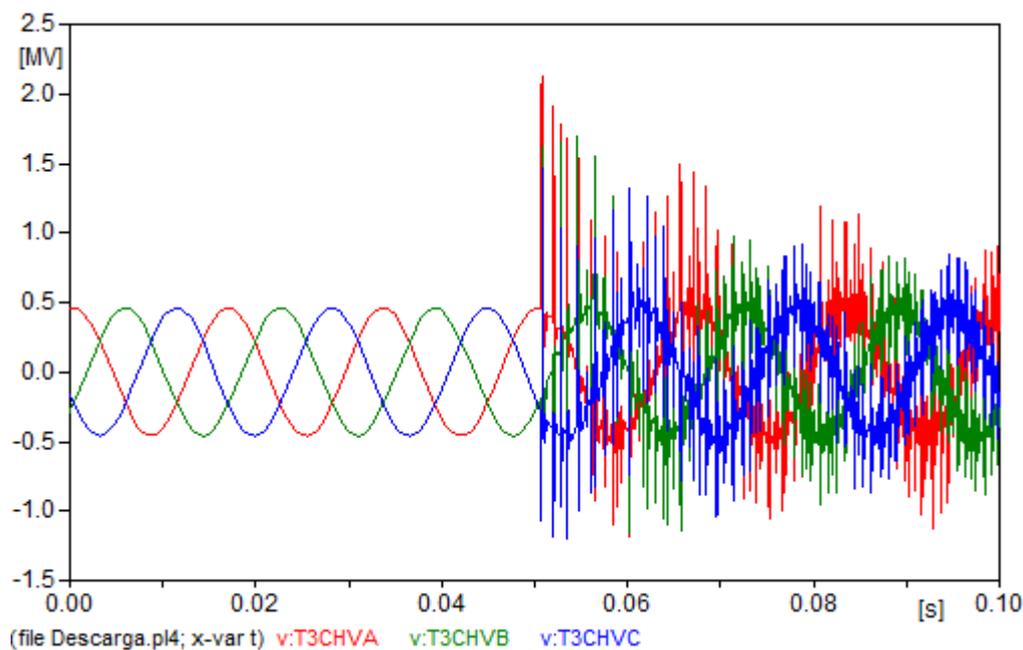
Para modelagem de um impulso atmosférico padrão no ATP foi utilizada a fonte Heidler (tipo 15). O impulso tem 10 kA de amplitude e forma de onda aproximada de  $8/20 \mu s$ . O impulso é aplicado na fase A quando  $t = 0,05$  s. Como a duração do impulso

atmosférico é da ordem de  $\mu s$  foi utilizado um passo de simulação de  $10^{-8}$  s. A forma de onda simulada no ATP está representada na Figura 3.16



**Figura 3.16** – Descarga atmosférica simulada.

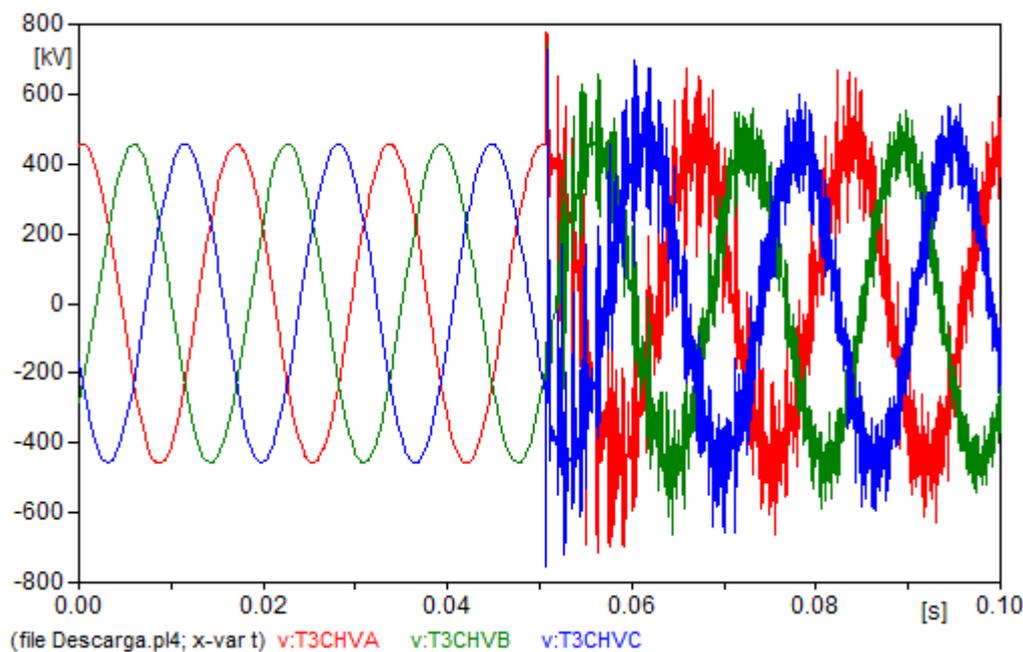
A presença dos para-raios no início e fim da linha é importante para atenuar a sobretensão provocada pela descarga. Para realizar uma comparação, primeiramente foi realizada a simulação do sistema sem os para-raios no início e fim da linha. Os resultados estão representados na Figura 3.17.



**Figura 3.17** – Tensões no fim da linha - sem para-raios.

O impulso de corrente foi aplicado na fase A. Observa-se uma perturbação nas formas de onda devido às reflexões de ondas. No momento do impulso, a tensão na fase A chega a um valor máximo de 2,13 MV (4,74 pu). Devido ao acoplamento existente entre as três fases do sistema, as outras fases também são perturbadas e a tensão chega a valores máximos de 1,71 MV (3,81 pu) para a fase B e 1,46 MV (3,25 pu) para a fase C.

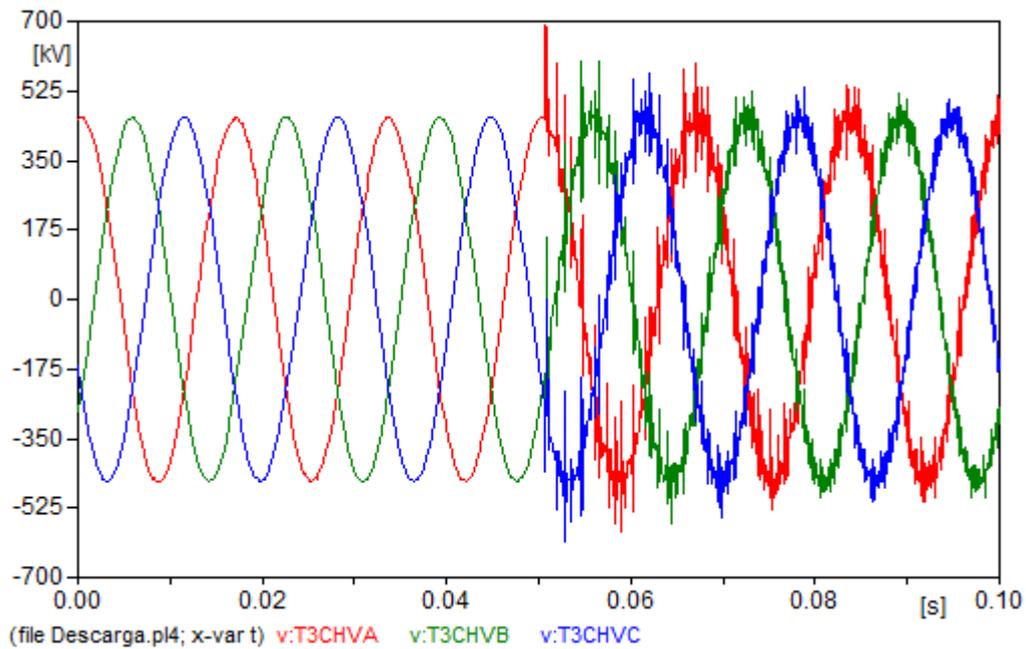
Os resultados da simulação com a utilização dos para-raios no início e fim da linha estão representados na Figura 3.18.



**Figura 3.18** – Tensões no fim da linha - com para-raios.

No momento do impulso a tensão na fase A chega a um valor máximo de 780 kV (1,74 pu). As outras fases apresentam níveis ligeiramente menores de sobretensão, o valor máximo chega a 743 kV (1,65 pu) para a fase B e 726 kV (1,62 pu) para a fase C. A utilização de para-raios proporcionou uma redução significativa da sobretensão nas três fases. Em comparação ao caso da não utilização de para-raios, houve uma redução na tensão de 63,3% para a fase A, 56,6% para a fase B e 50,2% para a fase C.

A localização do para-raios também é importante para a proteção contra sobretensões. Quanto mais perto o para-raios estiver do ponto de ocorrência da descarga, maior será a proteção. Assim, foi realizada uma simulação para o caso de instalação de para-raios adicionais no meio da linha, nas três fases, sendo este o local exato onde a descarga atinge a linha. Os resultados estão representados na Figura 3.19. Entretanto, é importante destacar que a ocorrência de descargas é um fenômeno estatístico e em uma situação real não há como prever exatamente onde a descarga ocorrerá.



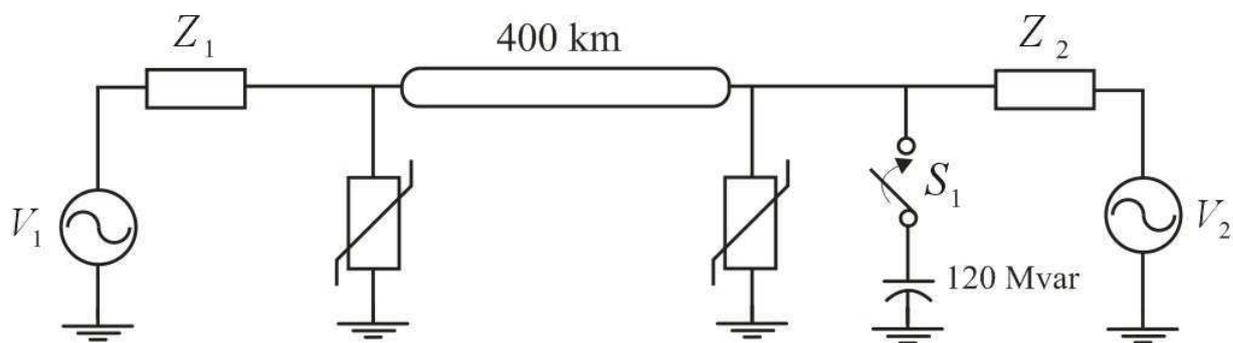
**Figura 3.19** – Tensões no fim da linha - com para-raios no local da descarga.

Nesse caso observa-se novamente uma redução da sobretensão. O valor máximo de tensão no fim da linha é de 688 kV (1,53 pu) na fase A, 600 kV (1,34 pu) na fase B e 568 kV (1,26 pu) na fase C. Houve uma redução na tensão de 67,7% para a fase A, 64,9% para a fase B e 61,13% para a fase C, comparado ao caso sem para-raios. Assim, é interessante a utilização de para-raios não só nas extremidades mas também ao longo das linhas.

Em geral, todos os casos simulados da utilização de para-raios provocaram reduções significativas das sobretensões resultantes da ocorrência de descarga atmosférica. Entretanto, é importante destacar que, para uma representação mais precisa nas simulações de descarga atmosférica, seria mais adequado utilizar um modelo de linha com parâmetros dependentes da frequência.

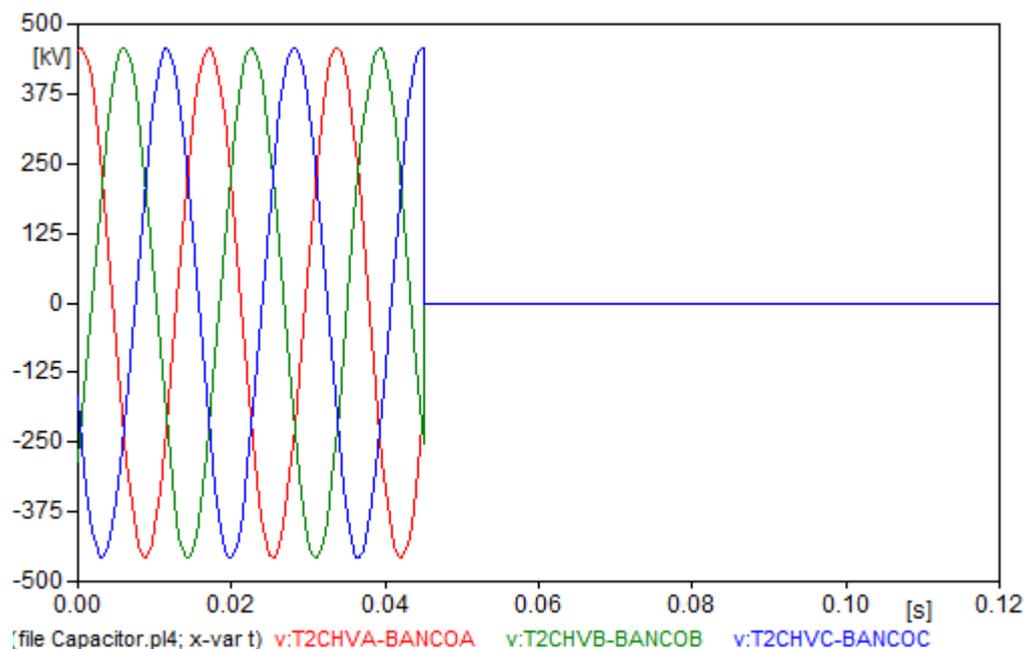
### 3.2.4 Energização de banco de capacitores

Para a simulação de manobra de um banco de capacitores isolados de 120 Mvar foi utilizado o sistema da Figura 3.20.



**Figura 3.20** – Sistema para simulação de energização de banco de capacitores.

Foi utilizado um passo de simulação de  $10^{-7}$  s. A chave fecha em  $t = 0,045$  s, nesse momento a tensão no ponto onde o banco vai ser conectado (fim da linha), na fase C, é próxima à máxima. As tensões nos terminais da chave para as três fases estão representadas na Figura 3.21.



**Figura 3.21** – Tensões nos terminais da chave.

Os resultados obtidos estão representados nas Figuras 3.22 e 3.23. Na Figura 3.22 observa-se as tensões no fim da linha, ponto onde o banco foi conectado e na Figura 3.23 está representada a corrente de *inrush* no banco de capacitores.

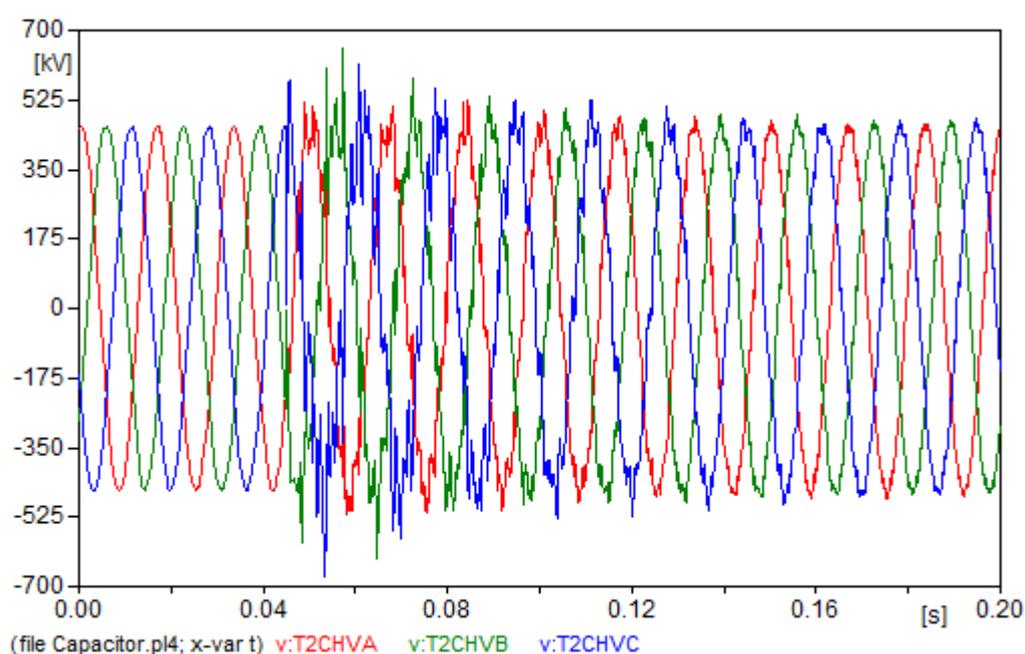


Figura 3.22 – Tensões no fim da linha.

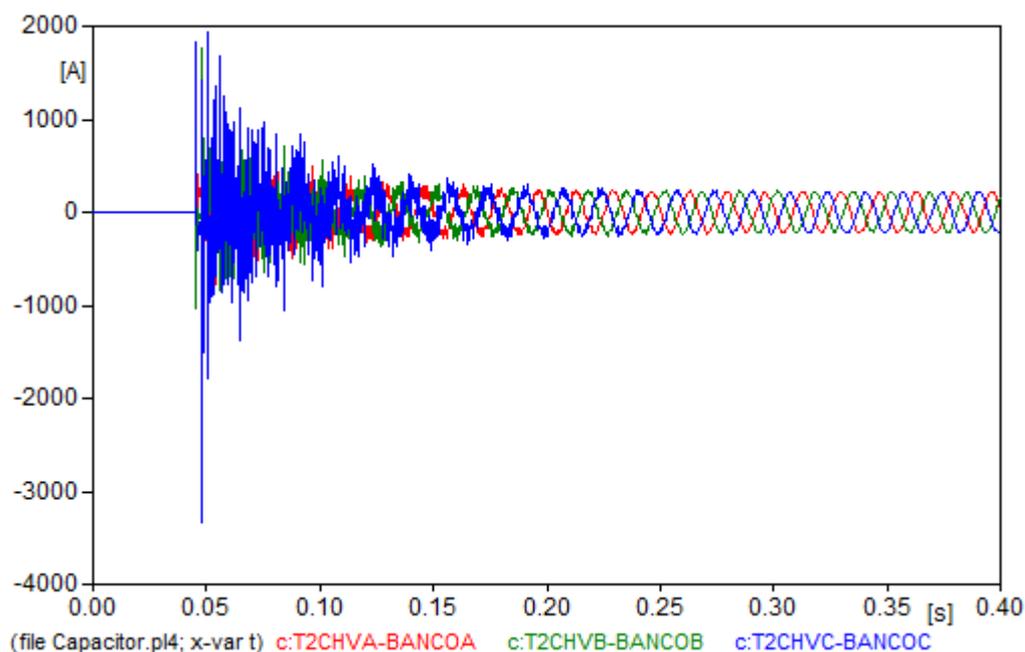
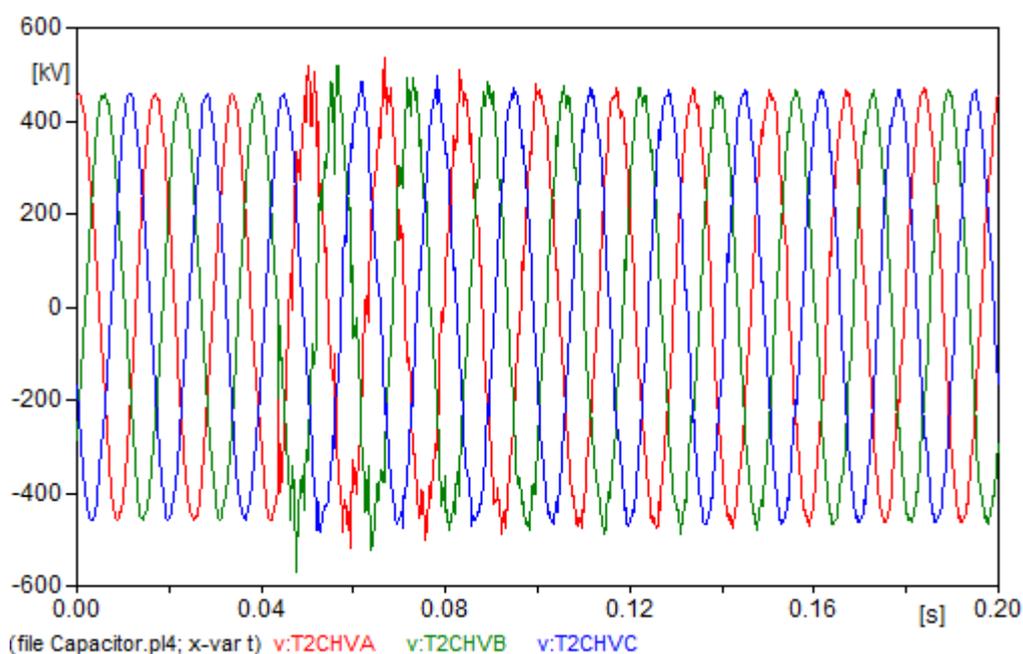


Figura 3.23 – Corrente de *inrush* no banco de capacitores.

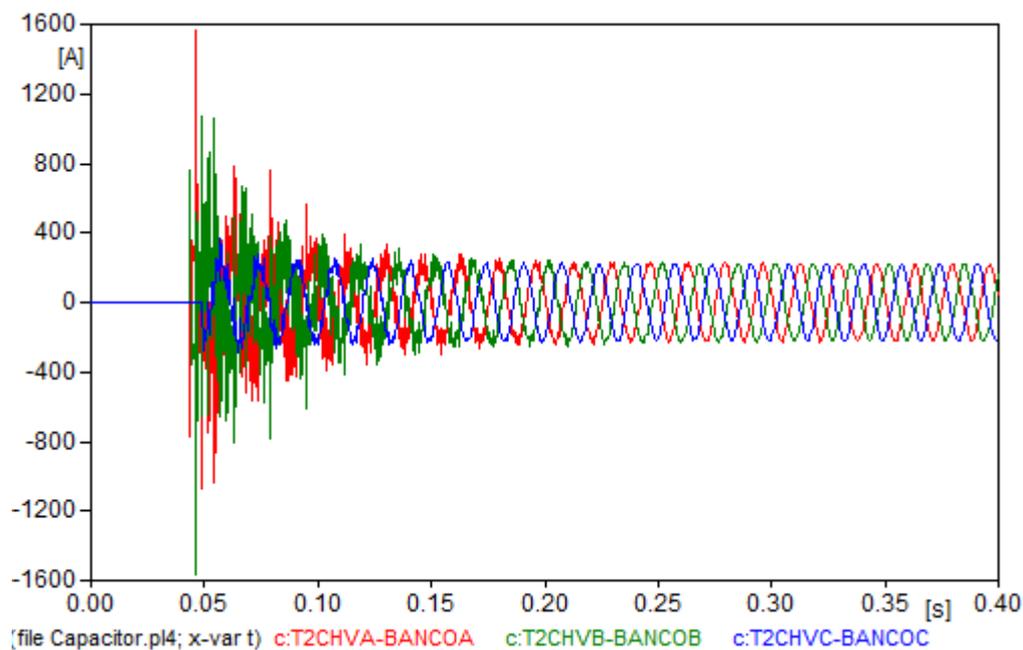
No momento da energização foi observada a sobretensão. A tensão chega a atingir um valor máximo de 673 kV (1,5 pu). Em regime permanente a tensão de pico é de aproximadamente 463 kV (1,03 pu). A corrente no banco de capacitores atinge valores muito altos durante a energização, chegando a um valor máximo de 3,33 kA, quando

o valor em regime permanente é de 220 A de pico. Os piores casos de sobretensão e sobrecorrente são na fase C, pois no momento da manobra ela estava mais próxima do seu máximo.

Para ilustrar a importância do momento de chaveamento foi simulado um segundo caso modificando apenas o momento de fechamento das chaves. Não foi feito um estudo detalhado de técnicas de chaveamento controlado, apenas foi escolhido um momento aproximado em que a tensão no fim da linha, nas três fases, estivesse com valores mais baixos e longe do pico. Assim, a chave da fase A fecha em 0,0379 s, da fase B em 0,0435 s e da fase C em 0,0490. Os resultados estão ilustrados nas Figuras 3.24 e 3.25.



**Figura 3.24** – Tensões no fim da linha - mudança no tempo de chaveamento.



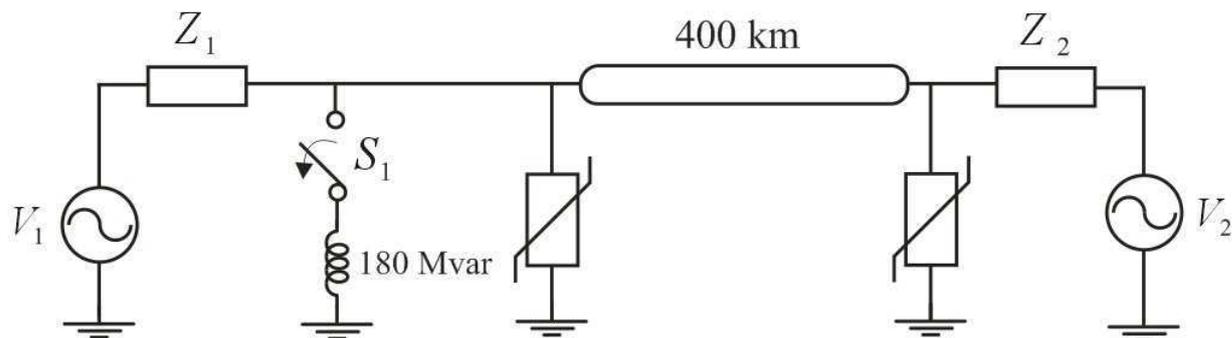
**Figura 3.25** – Corrente de *inrush* no banco de capacitores - mudança no tempo de chaveamento.

A mudança no tempo de chaveamento provocou uma redução do nível de sobretensão, a tensão passa a atingir um valor máximo de 572 kV (1,27 pu) durante a operação manobra. Houve então uma redução na tensão máxima de 15% em relação ao caso anterior. A corrente de *inrush* também reduz, atingindo um valor máximo de 1570 A, sendo assim uma redução de 52,8% em relação ao caso anterior.

Para a diminuição das sobretensões e corrente de *inrush* utiliza-se comumente resistores de pré inserção ou métodos de chaveamento controlado.

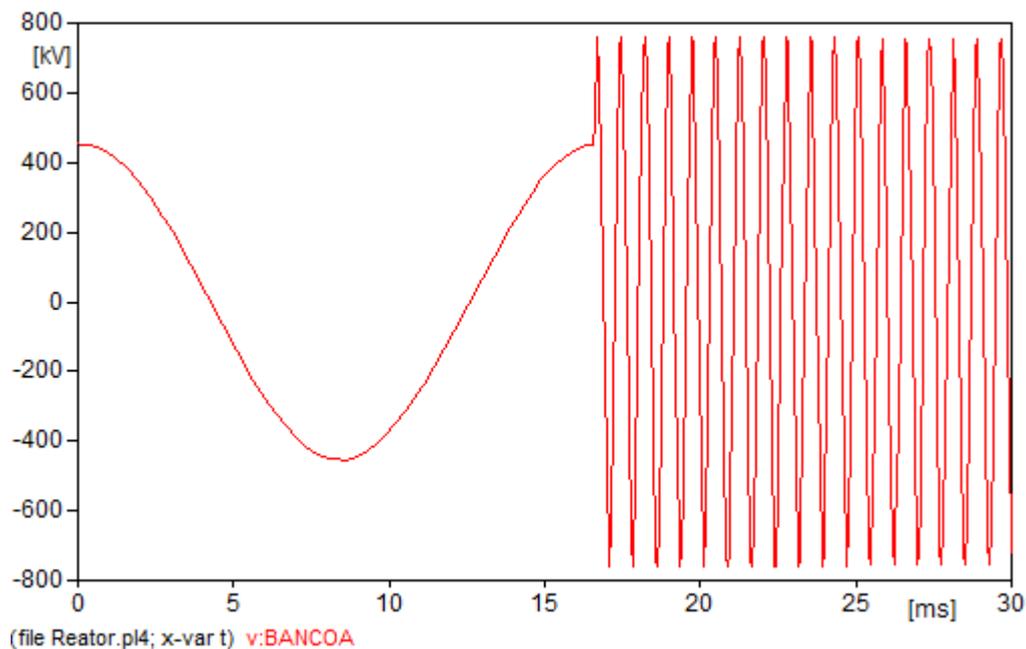
### 3.2.5 Desenergização de banco de reatores

O sistema utilizado para manobra de desenergização de um banco de reatores de 180 Mvar está representado na Figura 3.26



**Figura 3.26** – Sistema para simulação de desenergização de banco de reatores.

A chave abre em  $t = 0,01$  s, estabelece-se um arco entre os terminais da chave e as correntes só serão interrompidas no valor de 20 A. Não foi considerada a ocorrência de reignições. Os resultados obtidos para a tensão nos terminais do banco e da chave estão representados nas Figuras 3.27, 3.28 e 3.29. Para facilitar a visualização só está representada a fase A, as demais fases apresentam o mesmo comportamento.



**Figura 3.27** – Tensão no banco de reatores - fase A.

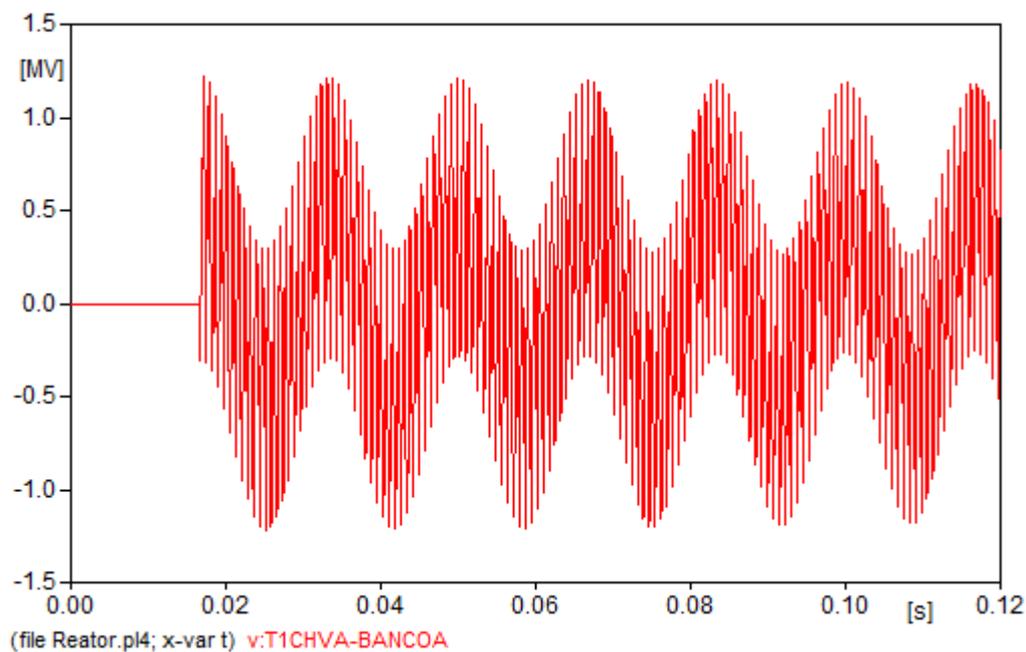


Figura 3.28 – Tensão nos terminais da chave - fase A.

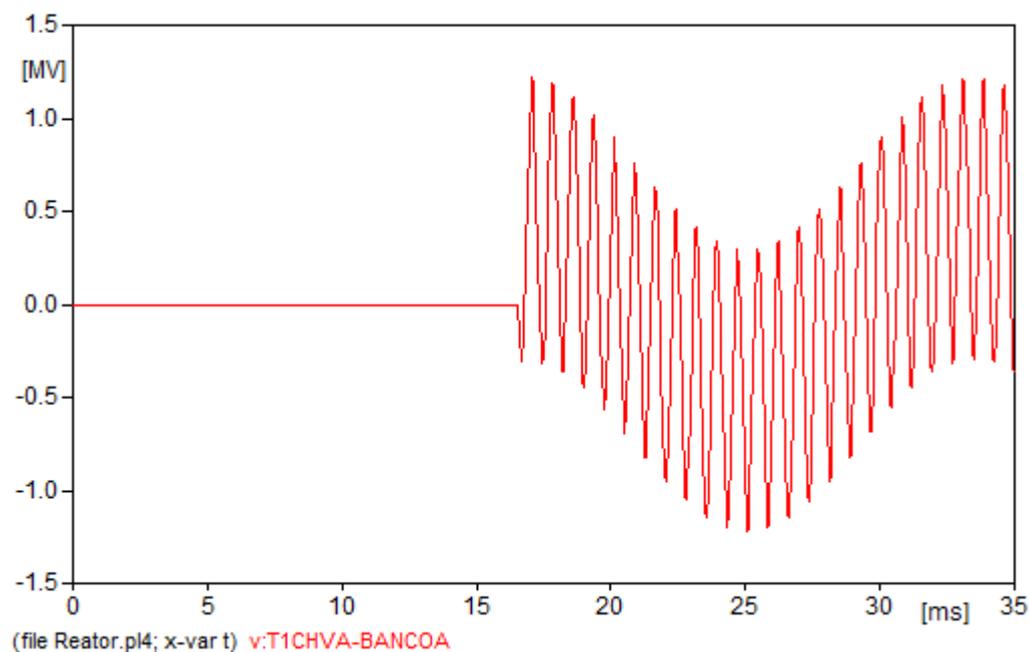


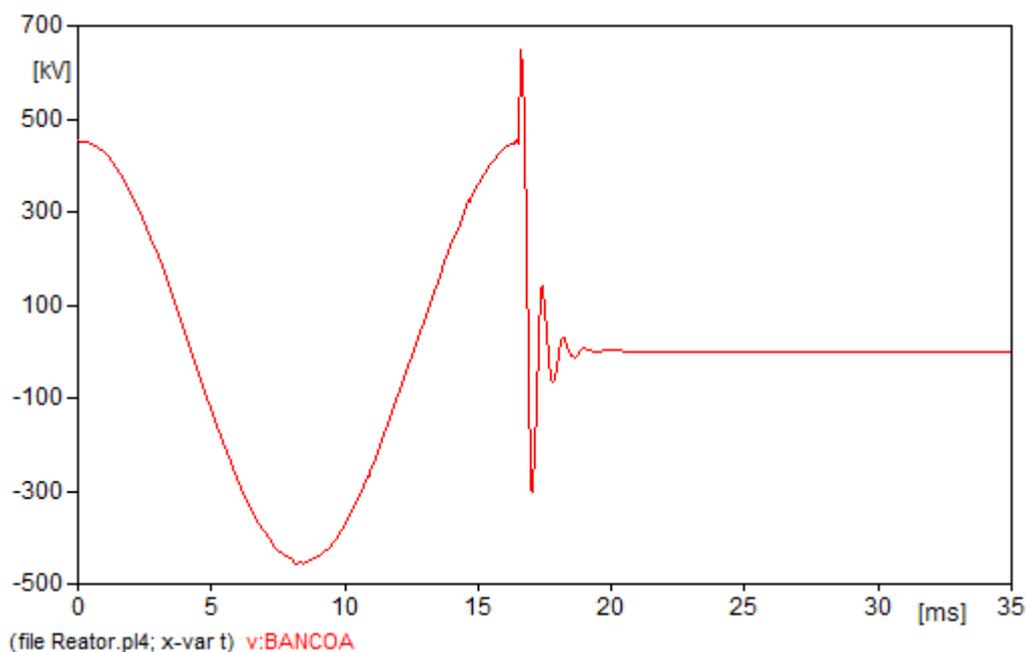
Figura 3.29 – Tensão nos terminais da chave (zoom) - fase A.

A Figura 3.27 representa a tensão no reator. Pode ser observada uma sobretensão, que chega a um valor máximo de 761 kV (1,69 pu). O valor de pico da tensão vai diminuindo muito lentamente, tendendo a zero. Para o dimensionamento das resistências no modelo de reator foi utilizado um fator de qualidade de 400, o que resultou em um valor de

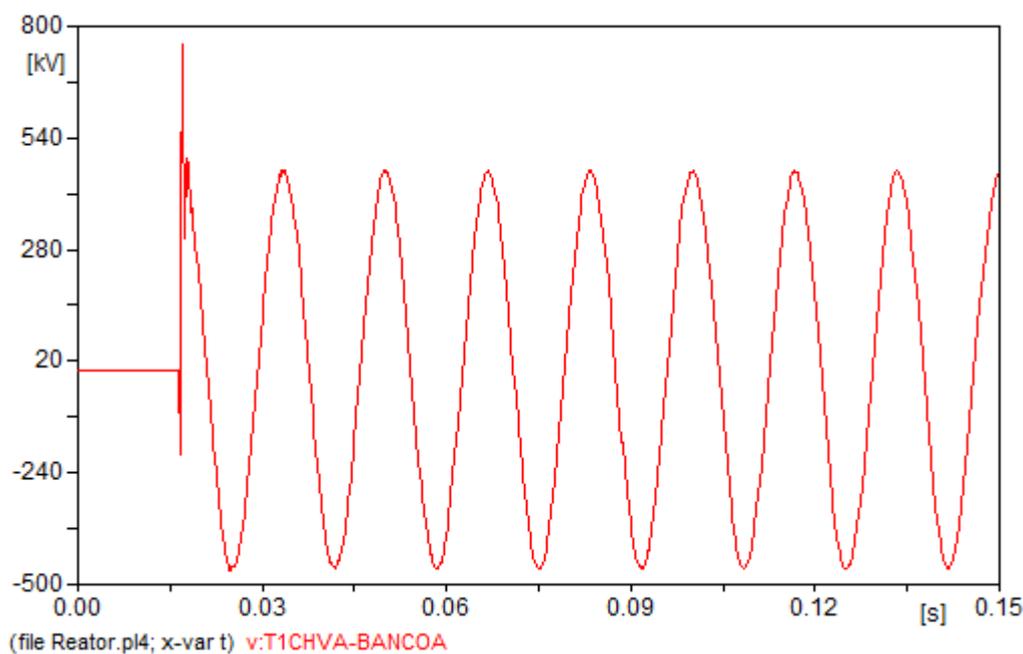
resistência pequeno e em um baixo amortecimento.

Na Figuras 3.28 e 3.29 pode ser observada a tensão de restabelecimento transitória nos terminais da chave. Essa tensão atinge valores altos, de até 1,2 MV (2,67 pu) e pode provocar reignições indesejáveis. Em regime permanente o valor da tensão de pico nos terminais do disjuntor deveria ser de aproximadamente 461 kV.

Como forma de proteção contra essas sobretensões pode utilizar-se resistores de pré-inserção ou para-raios. Foi feita a simulação com a instalação de para-raios nos terminais do banco de reatores. Foram utilizados o mesmo tipo de para-raios utilizado para a linha de transmissão. Os resultados estão representados nas Figuras 3.30 e 3.31.



**Figura 3.30** – Tensões no banco de reatores (com para-raios) - fase A.



**Figura 3.31** – Tensão nos terminais da chave (com para-raios) - fase A.

A partir da análise das figuras observa-se que a tensão no banco de reatores atinge um valor máximo de 647 kV (1,44 pu), uma redução de 14,8% em relação ao caso anterior, e rapidamente cai para valores próximos a zero. A amplitude da tensão nos terminais da chave atingiu um pico de 757 kV (1,69 pu), havendo uma redução de 36,7% em relação ao caso sem para-raios. O regime permanente é alcançado bem mais rápido.

Assim, demonstra-se que a utilização de para-raios é uma técnica efetiva para atenuação de sobretensões devido a desenergização de bancos de reatores.

# Capítulo 4

## Conclusões

Neste trabalho foi realizada a simulação de fenômenos transitórios eletromagnéticos utilizando o software ATP. Foram simuladas cinco situações que provocam sobretensões no sistema: efeito Ferranti, ferrorressonância, descargas atmosféricas, energização de banco de capacitores e desenergização de banco de reatores.

Os resultados obtidos não apresentaram divergências com o que foi apresentado na fundamentação teórica. Confirmou-se então que o ATP é um software adequado para simulação de transitórios eletromagnéticos e que os modelos utilizados para a simulação de transitórios foram adequados para a representação do sistema.

Verificou-se também a importância e eficácia de algumas técnicas de mitigação de sobretensões e sobrecorrentes. A utilização de bancos de reatores na linha foi adequada para a diminuição de sobretensões devido ao efeito Ferranti. A instalação de para-raios foi eficaz contra sobretensões devido a descargas atmosféricas e desenergização de bancos de reatores. A alteração do tempo de chaveamento foi importante para a diminuição de sobretensões e sobrecorrentes na energização de bancos de capacitores. Observou-se também que, apesar de apresentar desvantagens para o uso prático, a utilização de resistor em paralelo com o transformador provoca redução de sobretensões devido ao fenômeno de ferrorressonância.

Assim, a partir da análise dos resultados foi verificado o comportamento de sobretensões temporárias, de manobra e atmosférica de acordo com o esperado com base na teoria.

# Referências Bibliográficas

- ABDUL-MALEK, Z. et al. Investigation of ferroresonance mitigation techniques in voltage transformer using atp-empt simulation. *Jurnal Teknologi*, v. 64, n. 4, 2013.
- ANSI C37.0731-1973. *Application Guide for Capacitance Current Switching for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis*. [S.l.], 1973.
- ARAÚJO, A. E. D.; NEVES, W. L. *Cálculos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia*. [S.l.]: Editora UFMG, 2005.
- COSTA, E. G. *Análise do Desempenho de Pára-Raios de Óxido de Zinco*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Paraíba, 1999.
- D’AJUZ, A. et al. *Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento—Aplicação em Sistemas Elétricos de Alta Tensão-FURNAS*. [S.l.]: FURNAS - UFF, 1987.
- DANTAS, K. M. C. *Chaveamento Controlado de Linhas de Transmissão*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, 2007.
- GIUDICI, B. C. *Aspects of circuit breaker performance during high voltage shunt reactor switching*. Dissertação (Mestrado) — University of British Columbia, 1989.
- GREENWOOD, A. *Electrical transients in power systems*. [S.l.]: New York, NY (USA); John Wiley and Sons Inc., 1991.
- HINRICHSEN, V. *Metal-Oxide Surge Arresters Fundamentals*. [S.l.]: Siemens Power Transmission and Distribution Power Voltage Division, Berlin, 2001.
- IIZARRY-SILVESTRINI, M.; VÉLEZ-SEPÚLVEDA, T. Mitigation of back-to-back capacitor switching transients on distribution circuits. *IEEE Transactions on Transmission Line*, 2008.
- MARTINEZ-VELASCO, J. A. *Power system transients: parameter determination*. [S.l.]: CRC press, 2009.
- MEISTER, A. *Modelagem de Varistores de Óxido de Zinco para Estudos de Coordenação de Isolamento*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2005.
- MERÍCIA, E. J. de. *Estudo Comparativo de Métodos de Controle de Sobretensões na Energização de Linhas de Transmissão*. [S.l.], 2008.
- NEVES, W. L. et al. *Manobras em sistemas de distribuição: Impacto em consumidores residenciais*. 2009.

PEREIRA, P. D.; SOBREIRA, P. B. *Introdução ao ATP: Simulação de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. [S.l.], 2012.

SLUIS, L. V. D. *Transients in power systems*. [S.l.]: Wiley, 2001.

VIENA, L. B. *Modelagem de Transformadores no Programa ATP para o Estudo do Fenômeno da Ferrorressonância*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Bahia, 2010.

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