

# **TENSÕES E CORRENTES INDUZIDAS EM LÂMINAS DE TERRA DE SECCIONADORAS**

**LUIS GUSTAVO MARÇAL LUCAS**

**Monografia submetida à Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Engenharia de Sistemas Elétricos de Potência – CESEP, Ênfase: Proteção Elétrica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do certificado da Especialização.**

**Aprovada em 22 de dezembro de 2015**

---

**Alberto Resende De Conti - Dr.  
Supervisor**

---

**Silvério Visacro Filho - Dr.  
Coordenador do CESEP**

## RESUMO

Este trabalho é dedicado à avaliação dos efeitos gerados por manobras de abertura em lâminas de terra de seccionadoras, em condições de seu emprego em um dos circuitos de uma linha de transmissão de circuito duplo que compartilha uma mesma faixa de servidão com uma linha de transmissão de circuito simples. Nestas condições, podem surgir correntes e tensões elevadas no circuito desenergizado causadas pelos acoplamentos indutivos e capacitivos entre os circuitos. A intensidade das correntes e tensões induzidas é determinada neste trabalho por meio de simulações computacionais realizadas na plataforma *Alternative Transients Program (ATP)*, utilizando a interface gráfica *ATPDraw*. Nas simulações, são verificadas várias situações de interesse prático como a suportabilidade das lâminas de terra das seccionadoras para as correntes induzidas, para as tensões induzidas e para as tensões de restabelecimento transitórias causadas pelas manobras de abertura das chaves. Além disso, verifica-se o efeito da transposição da linha de transmissão e da resistência de aterramento das lâminas de terra nas correntes e tensões induzidas, bem como o efeito de diferentes modelos de linhas de transmissão.

---

## ABSTRACT

This work is dedicated to investigate the effects of grounding switches when they are applied in one of the circuits of a double-circuit transmission line that shares the same right-of-way with another transmission line. In this condition, voltages and currents of high amplitudes can be induced in the non-energized circuit due to the electric and magnetic coupling between the lines. The amplitude of the induced voltages and currents is determined in this work by means of computer simulations with the *Alternative Transients Program* (ATP), using its graphical interface ATPDraw. In the simulations, several situations of practical interest are investigated, such as the withstand of the grounding switch to induced currents, to induced voltages and to transient recovery voltages associated with the switch opening. The effects of line transposition, grounding resistance, and the effect of different transmission line models are also investigated.

---

---

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 RELEVÂNCIA E CONTEXTO DA INVESTIGAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVO E METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO .....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	3
<b>2. SOLICITAÇÕES POR ACOPLAMENTOS INDUTIVO E CAPACITIVO</b>	<b>4</b>
2.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .....	4
2.2 SUPORTABILIDADE DAS LÂMINAS DE TERRA DE SECCIONADORAS.....	7
2.3 ANÁLISE CRÍTICA DE ARTIGOS TÉCNICOS.....	9
<b>3. MODELAMENTO DOS ACOPLAMENTOS INDUTIVO E CAPACITIVO</b>	<b>11</b>
3.1 DIAFONIA .....	11
3.2 ESTUDO DE CASO .....	11
3.3 CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS.....	15
<b>4. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS</b>	<b>16</b>
4.1 ESTUDO DE CASO PRÁTICO.....	16
4.2 CORRENTES E TENSÕES INDUZIDAS.....	19
4.2.1 Caso 1: Linha Desenergizada com Ambos os Terminais Fechados.....	19
4.2.2 Caso 2: Linha Desenergizada com Ambos os Terminais Abertos.....	20
4.2.3 Caso 3: Linha Desenergizada com Abertura de um Terminal e o outro Fechado	21
4.2.4 Caso 4: Linha Desenergizada com Abertura de um Terminal e o outro Aberto....	24
4.2.5 Discussão.....	26
4.3 AVALIAÇÃO DA TRANSPOSIÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO.....	26
4.4 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO.....	29
4.5 COMPARATIVO DOS MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO ADOTADOS .....	31
<b>5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE</b>	<b>37</b>
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	37
5.2 CONCLUSÕES.....	38
5.3 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE .....	39
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>40</b>

---

# 1 Introdução

## *1.1 Relevância e Contexto da Investigação*

Em linhas de transmissão que compartilham a mesma faixa de servidão ou em linhas de circuito duplo, as atividades de manutenção e as constantes manobras de abertura ou fechamento de uma das linhas ou de um circuito requerem cuidados especiais. Isso ocorre porque podem surgir correntes e tensões elevadas, no circuito desenergizado, associadas ao acoplamento eletromagnético entre os dois circuitos.

Para que a manutenção na linha desenergizada possa ser realizada com segurança, empregam-se em ambas as suas extremidades lâminas de terra que são fechadas por meio de seccionadoras. Quando as lâminas de terra se encontram fechadas, verificam-se correntes induzidas na linha desenergizada. Por outro lado, no procedimento de abertura destas lâminas são verificadas tensões de restabelecimento transitórias em seus terminais. O Operador Nacional Sistema elétrico (ONS) solicita o levantamento dos valores de tensão e corrente resultantes para elaboração do projeto básico das linhas de transmissão com o intuito de verificar o surgimento de solicitações severas acima dos limites de suportabilidade das seccionadoras de lâminas de terra [ONS, 2013].

Neste contexto, torna-se importante o levantamento das correntes e tensões induzidas em linhas paralelas para uma correta especificação das seccionadoras de lâminas de terra, proporcionando segurança para o pessoal de manutenção e para os equipamentos que compõem o sistema elétrico de potência.

Particularmente, no que concerne à manutenção das linhas de transmissão, os efeitos das tensões induzidas nas linhas desenergizadas são muito mais conhecidos. Isto ocorre porque para manutenção em linha morta solicita-se, conforme normas de segurança existentes na legislação brasileira, o fechamento das seccionadoras de lâminas de terra para aterramento da linha de transmissão e consequentemente redução das tensões induzidas. Porém, o aterramento da linha e

---

as manobras de abertura das lâminas de terra necessitam de um controle mais rigoroso sob o ponto de vista da segurança dos operadores e equipamentos.

Na literatura técnica têm sido apresentados diversos trabalhos dedicados a este aspecto. Entretanto, a diversidade dos modelos de linha de transmissão que podem ser considerados em análises deste tipo e a variedade de situações de topologia do sistema dificultam a generalização dos resultados apresentados e, por conseguinte, das considerações sugeridas em tais trabalhos. Por outro lado, a realização de estudos comparativos considerando os diferentes modelos de linhas de transmissão existentes nos softwares de simulação de transitórios eletromagnéticos em situações de interesse prático faz-se necessária para a definição dos critérios e metodologias mais ajustados para identificação e mitigação de eventuais problemas. Este cenário é ainda mais crítico se forem considerados os novos conceitos de linhas de transmissão compactas, em que os acoplamentos indutivos e capacitivos tendem a ser mais elevados. Isto ocorre porque em linhas compactas são utilizadas novas configurações de torres, com vãos menores e com maior aproximação entre os condutores fases.

É neste contexto que se insere esta monografia, que pretende avaliar as questões envolvidas nas manobras das seccionadoras de lâminas de terra, através da verificação das correntes e tensões induzidas em uma linha de transmissão desenergizada.

## ***1.2 Objetivo e Metodologia de Desenvolvimento***

O objetivo fundamental desta monografia consiste no cálculo das correntes e tensões induzidas nas seccionadoras de lâminas de terra de linhas de transmissão, através do modelamento dos acoplamentos indutivos e capacitivos existentes em diversas situações de manobras. Com isso, pretende-se determinar os limites de suportabilidade das seccionadoras de lâmina de terra em diversas situações específicas de interesse prático, bem como definir práticas de modelamento adequadas para a determinação dos efeitos gerados pelos acoplamentos indutivos e capacitivos entre linhas ou circuitos paralelos.

Para atingir tal objetivo adotou-se como metodologia a sistemática simulação por via computacional da solicitação das seccionadoras de lâminas de terra por correntes e tensões induzidas associadas aos acoplamentos indutivos e capacitivos, para o caso de um sistema de transmissão concebido por uma linha de circuito simples paralela a outra linha de circuito duplo, e a realização da avaliação do desempenho em termos da resposta do sistema frente a estas solicitações. Da análise dos resultados decorreram conclusões e propostas de aplicação de metodologias e critérios de verificação das tensões e correntes induzidas resultantes.

---

---

Para as avaliações dos casos de interesse foram utilizados modelos disponíveis na plataforma computacional *Alternative Transients Program* (ATP). No estudo apresentado, partiu-se da situação em que as lâminas de terra já se encontram fechadas em ambos os terminais do circuito e, ao tentar-se realizar a abertura da primeira lâmina de aterramento em uma das terminações do circuito, verifica-se um valor elevado de corrente a ser interrompido. Ao mesmo tempo, a tensão que se estabelecerá através dos contatos da lâmina aberta também poderá ser elevada devido à tensão de restabelecimento transitório, caso equivalente à abertura de um disjuntor. Em seguida, quando a lâmina do outro terminal é aberta, a corrente a ser interrompida tende a ser pequena, pelo fato de um terminal já estar aberto, mas ainda assim existe caminho para a corrente devido às capacitâncias do circuito para terra. Entretanto, a tensão que se estabelece através dos contatos das lâminas abertas pode ser também elevada, pois o circuito não estará mais aterrado em nenhum ponto e estará submetido predominantemente aos acoplamentos capacitivos do sistema.

### **1.3 Organização do texto**

Nesta monografia, buscou-se a apresentação de um texto conciso, dedicado objetivamente aos desenvolvimentos e resultados da investigação em foco. Nesta perspectiva, o texto desta monografia foi distribuído em 5 capítulos, incluindo a presente *Introdução*.

No *Capítulo 2* é realizada uma descrição do problema, destacando-se os procedimentos de manutenção necessários para linhas de transmissão, uma análise da suportabilidade das seccionadoras de lâminas de terra e uma análise crítica dos artigos técnicos relacionados ao tema.

O *Capítulo 3* apresenta um modelamento dos acoplamentos indutivo e capacitivo entre circuitos vizinhos e algumas considerações adicionais para adequação do modelo adotado.

No *Capítulo 4* são apresentados resultados de simulações computacionais de um caso real em diversas situações de interesse prático.

As conclusões finais desta monografia, decorrentes das avaliações realizadas, assim como os possíveis desdobramentos relativos às propostas de continuidade, são apresentadas no *Capítulo 6*.

Ao final do texto são apresentadas as *Referências Bibliográficas* utilizadas.

---

# 2 Solicitações por Acoplamentos Indutivo e Capacitivo

## *2.1 Descrição do Problema*

Os efeitos dos acoplamentos eletromagnéticos existentes em linhas de transmissão podem ser analisados por meio das indutâncias e capacitâncias mútuas entre os condutores paralelos. Nos casos de linhas de transmissão que compartilham uma mesma faixa de servidão ou de linhas em circuito duplo, se uma destas linhas estiver carregada e a outra estiver desenergizada, podem surgir correntes ou tensões elevadas no circuito desenergizado dependendo da presença ou não de aterramentos em suas extremidades. A presença de circuitos paralelos é verificada em grande número no sistema elétrico de potência brasileiro, conforme apresentado na Figura 2.1 [ONS, 2015]. Isso sugere a importância de se conhecer de que maneira se comportam estas linhas quando uma delas está desenergizada.

Um dos problemas associados aos efeitos de acoplamento indutivo e capacitivo se refere à segurança das equipes de manutenção. Nos dias atuais, as equipes de manutenção de linhas de transmissão possuem equipamentos capazes de interferir no sistema com a linha energizada. Porém, este tipo de serviço demanda um custo mais elevado do que a manutenção com o sistema desenergizado, além do conhecimento de técnica de manutenção em linha viva. Em linhas de circuito duplo, a interrupção de um dos seus ramais não ocasiona prejuízos ao sistema elétrico, pois em sua maioria estas linhas são projetadas para suprir uma demanda de emergência em caso de falha de um dos circuitos. Nestes casos, a manutenção de um dos circuitos normalmente ocorre com este circuito desligado, seccionado e aterrado, caracterizando-se uma linha morta. Este trabalho descreve as solicitações em condições de linha

morta. Isto porque estes efeitos podem ocasionar danos aos equipamentos e às pessoas envolvidas na operação e manutenção destas linhas de transmissão.

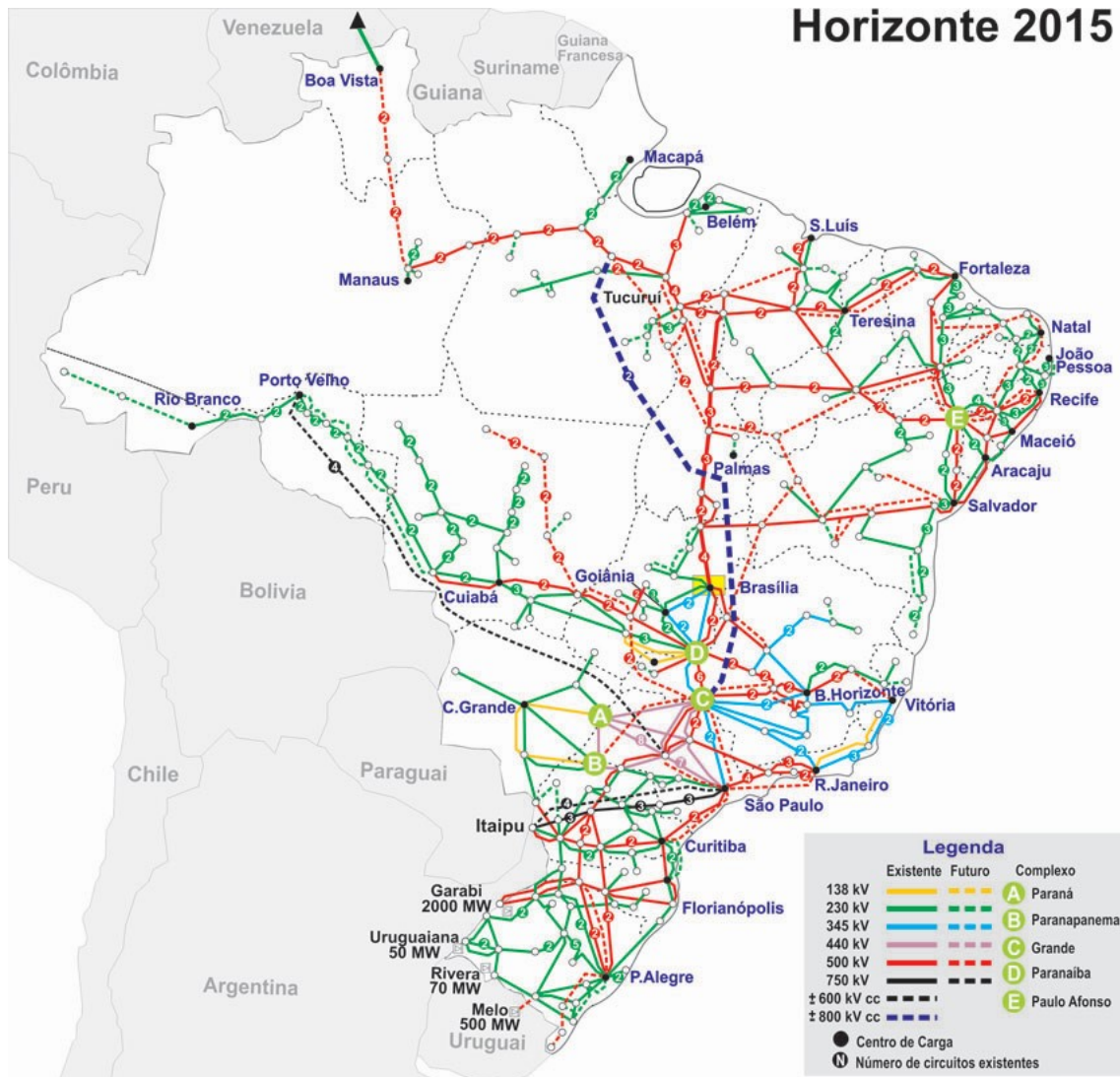


Figura 2.1- Sistema de transmissão brasileiro no horizonte de 2015 (reprodução de [ONS, 2015]).

Para a realização de procedimentos de manutenção é necessário seguir as normas e legislações brasileiras, que estabelecem os requisitos e condições mínimas objetivando a implantação de medidas de controle preventivas para garantir a segurança dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam com instalações elétricas e realizem serviços com eletricidade. A norma reguladora [NR-10, 2004], que estabelece os requisitos e condições mínimas para segurança em instalações e serviços em eletricidade, aplica-se às fases de geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica, incluindo as etapas de projeto, construção, montagem, operação, manutenção das instalações elétricas e quaisquer trabalhos realizados nas suas proximidades, observando-se as normas técnicas oficiais estabelecidas pelos

órgãos competentes e, na ausência ou omissão destas, as normas internacionais cabíveis. Nela são exigidos itens de segurança, dentre os quais se podem destacar os equipamentos de desconexão ou desligamento, como os disjuntores, os equipamentos para seccionamento, como as seccionadoras, e os equipamentos para aterramento, como as lâminas de terra.

O objetivo principal das seccionadoras de lâminas de terra das linhas de transmissão consiste em restringir a tensão induzida, oriunda por acoplamento capacitivo com circuito vizinho, a limites aceitáveis, a fim de reduzir os riscos de choques elétricos para as pessoas que eventualmente toquem em partes vivas do circuito. Porém, nas condições de aterramento de ambas as extremidades da linha podem surgir correntes elevadas no circuito desenergizado, consequência do acoplamento indutivo entre o circuito energizado e o circuito desenergizado. Neste sentido, devem-se verificar nas manobras de abertura das seccionadoras de lâminas de terra os limites aceitáveis de suportabilidade destes equipamentos para as solicitações que lhes serão impostas. Isto porque nestas manobras pode haver solicitações de intensidade elevada de corrente e tensões de restabelecimento transitórias.

Na Figura 2.2 são apresentados os perfis de tensão de uma linha de transmissão de circuito duplo de 230 kV e aproximadamente 75 km de comprimento simulados no ATP, em que um dos circuitos foi desligado para manutenção. Esta linha compartilha a mesma faixa de servidão de outra linha de circuito simples, conforme apresentado no Capítulo 4. Nesta figura verificam-se níveis elevados de tensão ao longo de todo o comprimento da linha de transmissão na condição de não aterramento da linha desenergizada. Como se pode observar, na condição da linha desenergizada e não aterrada o nível de tensão encontrado é da ordem de 13 kV eficaz. Também é possível observar que na condição de aterramento em um dos terminais da linha são encontrados na ponta desaterrada níveis elevados de tensão, de aproximadamente 3 kV eficaz. Esta condição demonstra a importância do aterramento de ambas as terminações da linha para que possa haver a manutenção segura ao longo de toda linha de transmissão. Por fim, verifica-se na condição de aterramento de ambas as terminações da linha de transmissão uma redução significativa do perfil de tensão ao longo da linha, com uma tensão máxima no meio da linha de aproximadamente 10 V eficaz, que permite o trabalho seguro do pessoal de manutenção.

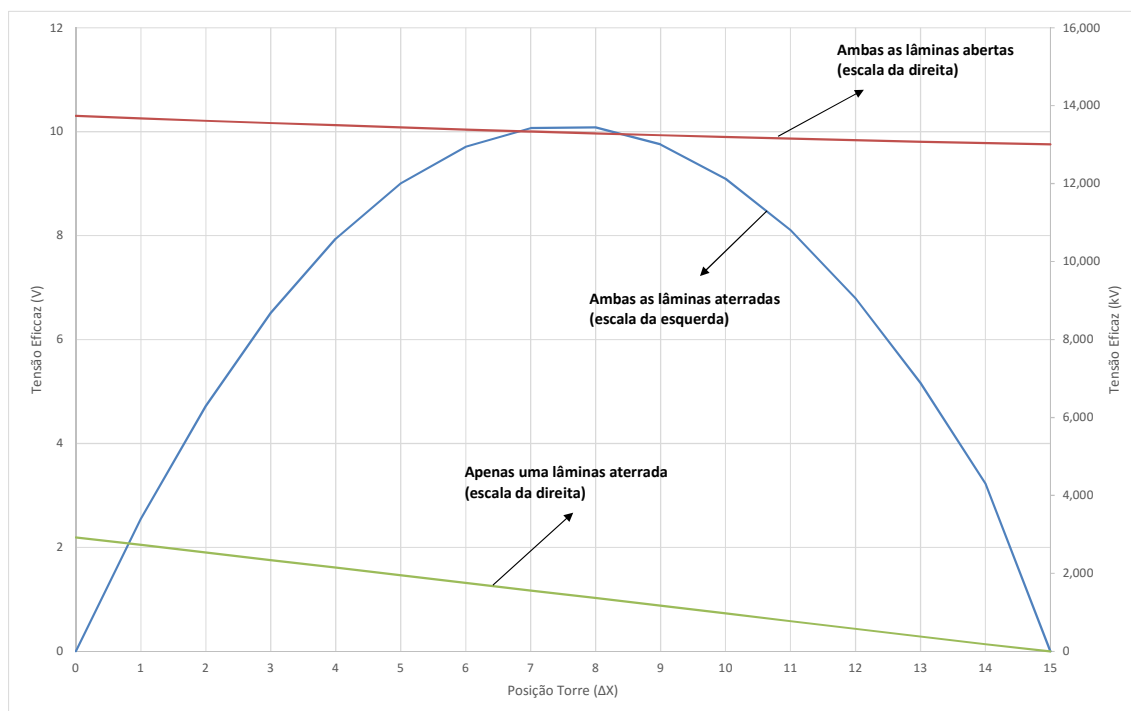


Figura 2.2- Perfil de tensão em linha de transmissão de circuito duplo para um circuito energizado e outro desenergizado.

## 2.2 Suportabilidade das Lâminas de Terra de Seccionadoras

A norma [IEC 62271-102, 2001], referente a seccionadoras e a lâminas de terra, apresenta, em seu Anexo C-Tabela C.1, os valores nominais de correntes e tensões induzidas permissíveis para as lâminas de terra em função de sua classe de tensão. Nesta tabela são apresentados os limites normalizados para as correntes e tensões induzidas por acoplamento indutivo e capacitivo, divididos em duas classes: classe A – baixo acoplamento ou para linhas paralelas relativamente curtas; e classe B – alto acoplamento ou para linhas paralelas relativamente longas. Na mesma norma, na Tabela C2 do Anexo C, são apresentados os valores normalizados das tensões de restabelecimento transitórias para os ensaios de interrupção de correntes induzidas eletromagneticamente, que também são observados como requisito para as lâminas de terra. As Figuras 2.3 e 2.4 apresentam os valores em questão.

Para verificação dos limites de tensão de restabelecimento transitória indicados na Figura 2.4 deve-se realizar a medição da tensão resultante imediatamente após a abertura da lâmina de terra e a interrupção da corrente induzida. Para verificar os limites indicados na Figura 2.3, deve-se considerar os instantes anteriores ao aterramento da lâmina de terra.

Rated voltage $U_r$ kV	Electromagnetic coupling				Electrostatic coupling			
	Rated induced current		Rated induced voltage		Rated induced current		Rated induced voltage	
	A (r.m.s.)		kV (r.m.s.)		A (r.m.s.)		kV (r.m.s.)	
	Class		Class		Class		Class	
	A	B	A	B	A	B	A	B
52	50	80	0,5	2	0,4	2	3	6
72,5	50	80	0,5	2	0,4	2	3	6
100	50	80	0,5	2	0,4	2	3	6
123	50	80	0,5	2	0,4	2	3	6
145	50	80	1	2	0,4	2	3	6
170	50	80	1	2	0,4	3	3	9
245	80	80	1,4	2	1,25	3	5	12
300	80	160	1,4	10	1,25	10	5	15
362	80	160	2	10	1,25	18	5	17
420	80	160	2	10	1,25	18	5	20
550	80	160	2	20	2	25	8	25
800	80	160	2	20	3	25	12	32

NOTE 1 Class A earthing switches: low coupling or relatively short parallel lines. Class B earthing switches: high coupling or relatively long parallel lines.

NOTE 2 In some situations (very long sections of the earthed line in proximity to an energized line; very high loading on the energized line; energized line having a service voltage higher than the earthed line, etc.), the induced current and voltage may be higher than the given values. For these situations, the rated values should be subject to agreement between manufacturer and user.

NOTE 3 The rated induced voltages correspond to line-to-earth values for both single-phase and three-phase tests (see C.6.105.6).

Figura 2.3- Valores normalizados de correntes e tensões induzidas para lâminas de terra (reprodução de [IEC 62271-102, 2001]).

Rated voltage $U_r$ kV	Class A			Class B		
	Power frequency recovery voltage	TRV peak	Time to peak	Power frequency recovery voltage	TRV peak	Time to peak
	( $\begin{matrix} +10 \\ 0 \end{matrix}$ %)	( $\begin{matrix} +10 \\ 0 \end{matrix}$ %)	( $\begin{matrix} 0 \\ -10 \end{matrix}$ %)	( $\begin{matrix} +10 \\ 0 \end{matrix}$ %)	( $\begin{matrix} +10 \\ 0 \end{matrix}$ %)	( $\begin{matrix} 0 \\ -10 \end{matrix}$ %)
	kV r.m.s.	kV	$\mu$ s	kV r.m.s.	kV	$\mu$ s
52	0,5	1,1	100	2	4,5	300
72,5	0,5	1,1	100	2	4,5	300
100	0,5	1,1	100	2	4,5	300
123	0,5	1,1	100	2	4,5	300
145	1	2,3	200	2	4,5	300
170	1	2,3	200	2	4,5	300
245	1,4	3,2	200	2	4,5	330
300	1,4	3,2	200	10	23	850
362	2	4,5	325	10	23	1 000
420	2	4,5	325	10	23	1 000
550	2	4,5	325	20	45	2 000
800	2	4,5	325	20	45	2 000

NOTE 1 Recovery voltages are valid for single-phase or three-phase tests.

NOTE 2 The prospective TRV waveform may be of a triangular or (1-cos) form (see C.6.105.6.1). The time to peak is valid for either waveform type.

Figura 2.4- Valores normalizados de tensões de restabelecimento transitórias induzidas por correntes induzidas para testes de abertura (reprodução de [IEC 62271-102, 2001]).

### 2.3 *Análise Crítica de Artigos Técnicos*

Esta seção destina-se à análise crítica da literatura técnica e a uma descrição geral dos principais pontos que compõem o tema da monografia.

Os primeiros passos das pesquisas em direção ao tema de correntes e tensões induzidas em lâminas de terra são encontrados na base de dados do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), onde se verificam trabalhos dedicados ao estudo de acoplamentos indutivos e capacitivos em linhas de transmissão paralelas. Em [Mousa, 1981], por exemplo, apresenta-se uma investigação sobre o tema para linhas de diferentes classes de tensão, de 69 kV a 1150 kV, com um comparativo de vários fatores que influenciam na indução em circuitos paralelos. Estes fatores foram identificados como aqueles causados pela configuração dos circuitos, pelo espaçamento entre fases, pela separação entre os circuitos, pela altura dos condutores em relação ao solo, pelo diâmetro dos condutores, pela presença de correntes desequilibradas de sequência zero no circuito energizado, pela resistividade do solo, pela existência de cabos para-raios e sua localização, pelo número de circuitos paralelos energizados e pela sequência de abertura dos polos da lâmina de terra. Dentre os aspectos investigados foi destacado o significativo aumento do acoplamento indutivo caso exista uma componente de sequência zero no circuito energizado. Porém, apesar da grande gama de efeitos investigados, o trabalho foca apenas na análise dos limites de suportabilidade das lâminas de terra em regime permanente, não sendo considerados os fenômenos transitórios originados pelas manobras das lâminas de terra.

Em [Mousa, 1982] apresenta-se uma investigação para eventual eliminação da utilização das lâminas de terra em linhas de transmissão desenergizadas. Na investigação sugere-se a utilização de vários seccionamentos da linha através de chaves por intermédio de capacitores em série, o uso da transposição da linha e o emprego de um novo arranjo de condutores que permita a redução dos níveis de corrente e tensão induzidas em linhas paralelas. Como solução alternativa sugere-se a utilização de múltiplos aterramentos ao longo da linha para eliminação das lâminas de terra.

Em [Luehrmanm et al., 1985], apresenta-se a dedução de uma formulação matemática para os cálculos das correntes induzidas a serem interrompidas nas aberturas das lâminas de terra e das tensões de restabelecimento transitórias resultantes destas manobras. Também se apresenta um comparativo para determinação das correntes e tensões induzidas em regime permanente nas condições de ambas as lâminas estarem fechadas e abertas, respectivamente, para linhas de transmissão de 450 km e 10 km. Nesse estudo se observa que, apesar de as

---

indutâncias e capacitâncias mútuas serem proporcionais ao comprimento da linha, apenas a tensão induzida com uma das terminações aterradas permanece diretamente proporcional ao comprimento, diferentemente da corrente induzida, que é independente do comprimento na condição de ambas as lâminas aterradas. Na análise das tensões de restabelecimento transitórias, foi observado que em ambas as condições de abertura das lâminas de terra as tensões resultantes são diretamente proporcionais ao comprimento da linha.

---

# 3 Modelamento dos Acoplamentos Indutivo e Capacitivo

## 3.1 *Diafonia*

Diafonia é o acoplamento não intencional entre circuitos próximos e teoricamente independentes [Paul, 2006]. Os efeitos de acoplamento indutivo e capacitivo entre linhas de transmissão paralelas podem ser analisados por meio das matrizes de impedâncias e admitâncias mútuas referentes a estas linhas. Os efeitos de indutâncias e capacitâncias mútuas podem ser decompostos no circuito vítima como os efeitos de campo gerado pelo circuito gerador.

## 3.2 *Estudo de Caso*

Os efeitos associados aos acoplamentos indutivo e capacitivo são geralmente analisados através das matrizes de impedância longitudinal e transversal de uma linha de transmissão. Para ilustrar qualitativamente tais fenômenos, apresenta-se nesta seção um estudo de caso de uma linha de circuito duplo, em regime permanente, desprezando-se as perdas e considerando-se o solo como um plano de terra ideal. As equações deduzidas permitem uma melhor compreensão do fenômeno analisado.

Para determinar as relações entre as correntes e tensões induzidas pode-se, a partir das equações matriciais de linha de transmissão sem perdas aplicadas à linha de circuito duplo da Figura 3.1, escrever:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = -L' \frac{\partial I}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} = -C' \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2)$$

onde  $L'$  e  $C'$  correspondem à indutância e à capacitância por unidade de comprimento, e  $V$  e  $I$  são tensão e corrente, respectivamente.

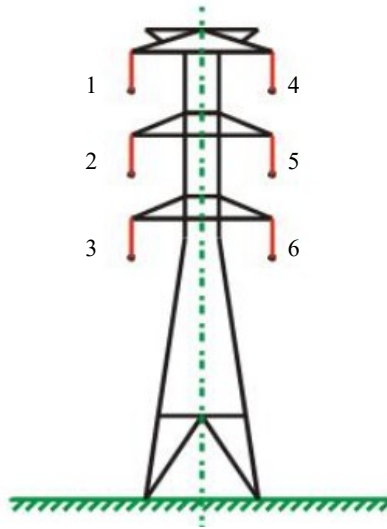


Figura 3.1- Linha de transmissão de circuito duplo.

Passando (1) e (2) para o domínio da frequência, tem-se:

$$\frac{dV}{dx} = -j\omega L' I \quad (3)$$

$$\frac{dI}{dx} = -j\omega C' V \quad (4)$$

Supondo-se que a linha seja eletricamente curta na frequência de interesse e transformando-se as derivadas em (3) e (4) em equações de diferenças, pode-se escrever:

$$\frac{dV}{dx} = \frac{V(l) - V(0)}{l} \quad (5)$$

$$\frac{dI}{dx} = \frac{I(l) - I(0)}{l} \quad (6)$$

onde  $l$  é o comprimento da linha,  $V(l)$  e  $I(l)$  são tensão e corrente no terminal receptor da linha, e  $V(0)$  e  $I(0)$  são tensão e corrente no terminal emissor da linha.

Após estas manipulações, pode-se reescrever (3) da seguinte forma:

$$\frac{1}{l} \begin{bmatrix} V_1(l) - V_1(0) \\ V_2(l) - V_2(0) \\ V_3(l) - V_3(0) \\ V_4(l) - V_4(0) \\ V_5(l) - V_5(0) \\ V_6(l) - V_6(0) \end{bmatrix} = -j\omega \begin{bmatrix} L_{11}' & L_{12}' & L_{13}' & L_{14}' & L_{15}' & L_{16}' \\ L_{21}' & L_{22}' & L_{23}' & L_{24}' & L_{25}' & L_{26}' \\ L_{31}' & L_{32}' & L_{33}' & L_{34}' & L_{35}' & L_{36}' \\ L_{41}' & L_{42}' & L_{43}' & L_{44}' & L_{45}' & L_{46}' \\ L_{51}' & L_{52}' & L_{53}' & L_{54}' & L_{55}' & L_{56}' \\ L_{61}' & L_{62}' & L_{63}' & L_{64}' & L_{65}' & L_{66}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Padronizando o circuito 1 como os condutores 1, 2 e 3 e o circuito 2 como os condutores 4, 5 e 6, pode-se considerar que, para análise da corrente induzida em regime permanente, as lâminas de terra estarão inicialmente fechadas. Nesse caso, o circuito 2 têm as tensões  $V_4$ ,  $V_5$  e  $V_6$  iguais à zero. Pode-se partir também da premissa de que os valores de  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  são conhecidos no circuito 1 energizado. Nesse caso, pode-se escrever (7) como:

$$\frac{1}{l} \begin{bmatrix} V_1(l) - V_1(0) \\ V_2(l) - V_2(0) \\ V_3(l) - V_3(0) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = -j\omega \begin{bmatrix} L_{11}' & L_{12}' & L_{13}' & L_{14}' & L_{15}' & L_{16}' \\ L_{21}' & L_{22}' & L_{23}' & L_{24}' & L_{25}' & L_{26}' \\ L_{31}' & L_{32}' & L_{33}' & L_{34}' & L_{35}' & L_{36}' \\ L_{41}' & L_{42}' & L_{43}' & L_{44}' & L_{45}' & L_{46}' \\ L_{51}' & L_{52}' & L_{53}' & L_{54}' & L_{55}' & L_{56}' \\ L_{61}' & L_{62}' & L_{63}' & L_{64}' & L_{65}' & L_{66}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Sabendo que as distâncias entre os condutores 1, 2 e 3 são idênticas àquelas entre os condutores 4, 5 e 6, pode-se deduzir que o maior acoplamento indutivo existente será no condutor 5, levando também em consideração que todos os condutores são idênticos. Portanto, analisando o circuito que implicará a maior corrente de interrupção na lâmina de terra, pode-se analisar a corrente do circuito 5 em (8):

$$I_5 = - \left[ \frac{L_{51}' I_1 + L_{52}' I_2 + L_{53}' I_3 + L_{54}' I_4 + L_{56}' I_6}{L_{55}'} \right] \quad (9)$$

Analisando (9) verifica-se que o acoplamento indutivo gera correntes com sinais contrários às correntes do circuito gerador. Além disso, observa-se que para a condição das lâminas de terra aterradas o aumento do comprimento da linha de transmissão não resulta em aumento da corrente induzida. Inferindo-se, a partir de (9), que as demais correntes no circuito vítima também têm sentido contrário as correntes do circuito fonte, pode-se escrever (9) como:

$$I_5 = - \left[ \frac{L_{51}' I_1 + L_{52}' I_2 + L_{53}' I_3 - L_{54}' I_4 - L_{56}' I_6}{L_{55}'} \right] \quad (10)$$

onde  $I_4' = -I_4$  e  $I_6' = -I_6$ .

Portanto, enquanto as correntes do circuito gerador contribuem para o aumento da corrente induzida no circuito vítima, as correntes dos outros condutores vítimas contribuem para a redução da corrente induzida.

Em seguida, analisando a equação matricial que descreve o acoplamento capacitivo para a linha de transmissão de circuito duplo, pode-se reescrever (4) como:

$$\frac{1}{l} \begin{bmatrix} I_1(l) - I_1(0) \\ I_2(l) - I_2(0) \\ I_3(l) - I_3(0) \\ I_4(l) - I_4(0) \\ I_5(l) - I_5(0) \\ I_6(l) - I_6(0) \end{bmatrix} = -j\omega \begin{bmatrix} C_{11}' & C_{12}' & C_{13}' & C_{14}' & C_{15}' & C_{16}' \\ C_{21}' & C_{22}' & C_{23}' & C_{24}' & C_{25}' & C_{26}' \\ C_{31}' & C_{32}' & C_{33}' & C_{34}' & C_{35}' & C_{36}' \\ C_{41}' & C_{42}' & C_{43}' & C_{44}' & C_{45}' & C_{46}' \\ C_{51}' & C_{52}' & C_{53}' & C_{54}' & C_{55}' & C_{56}' \\ C_{61}' & C_{62}' & C_{63}' & C_{64}' & C_{65}' & C_{66}' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Se as lâminas de terra estão abertas, ou seja, se o circuito 2 têm as correntes  $I_4$ ,  $I_5$  e  $I_6$  iguais à zero, pode-se escrever (11) como:

$$\frac{1}{l} \begin{bmatrix} I_1(l) - I_1(0) \\ I_2(l) - I_2(0) \\ I_3(l) - I_3(0) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = -j\omega \begin{bmatrix} C_{11}' & C_{12}' & C_{13}' & C_{14}' & C_{15}' & C_{16}' \\ C_{21}' & C_{22}' & C_{23}' & C_{24}' & C_{25}' & C_{26}' \\ C_{31}' & C_{32}' & C_{33}' & C_{34}' & C_{35}' & C_{36}' \\ C_{41}' & C_{42}' & C_{43}' & C_{44}' & C_{45}' & C_{46}' \\ C_{51}' & C_{52}' & C_{53}' & C_{54}' & C_{55}' & C_{56}' \\ C_{61}' & C_{62}' & C_{63}' & C_{64}' & C_{65}' & C_{66}' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Analogamente ao caso anterior, pode-se deduzir que o maior acoplamento capacitivo existente se manifestará nos condutores 4 e 6. Portanto, analisando apenas o circuito que implicará a maior tensão, pode-se escrever a tensão no condutor 4 em (12) como:

$$V_4 = - \left[ \frac{C_{41}'V_1 + C_{42}'V_2 + C_{43}'V_3 + C_{45}'V_5 + C_{46}'V_6}{C_{44}'} \right] \quad (13)$$

Analisando (13) e sabendo-se que as capacitâncias mútuas são números negativos, verifica-se que o acoplamento capacitivo gera, no circuito vítima, tensões com sinais idênticos ao do circuito gerador, porém dependentes das relações entre as capacitâncias do circuito. Enquanto na condição de lâminas de terra aterradas as contribuições dos demais condutores vítimas contribuem para a redução da corrente induzida, no caso em que as lâminas de terra estão abertas a tensão induzida aumenta com a elevação da tensão em qualquer um dos condutores.

### 3.3 Considerações Adicionais

Este item se dedica a uma análise básica do efeito da transposição da linha de transmissão no modelamento dos acoplamentos indutivo e capacitivo existentes entre os dois circuitos analisados. Tais avaliações são consideradas para o melhor entendimento das simulações realizadas no próximo capítulo.

Primeiro analisando a transposição da linha de transmissão de circuito duplo, considera-se uma transposição perfeita, com trechos iguais, para o melhor entendimento do efeito da transposição. Nesse caso, tem-se que todas as indutâncias mútuas são iguais a  $L_M'$ , situação na qual se pode reescrever (9) como:

$$I_5 = - \left[ \frac{L_M' I_1 + L_M' I_2 + L_M' I_3 + L_M' I_4 + L_M' I_6}{L_{55}'} \right] \quad (14)$$

Se o circuito gerador é equilibrado, tem-se que  $I_1 + I_2 + I_3 = 0$ . Nesse caso, a equação (14) reduz-se a

$$I_5 = - \left[ \frac{L_M' (I_4 + I_6)}{L_{55}'} \right] \quad (15)$$

Em seguida, analisando-se (13) na condição de transposição perfeita, em que todas as capacitâncias mútuas são iguais a  $C_M'$ , pode-se escrever:

$$V_4 = - \left[ \frac{C_M' V_1 + C_M' V_2 + C_M' V_3 + C_M' V_5 + C_M' V_6}{C_{44}'} \right] \quad (16)$$

Se o circuito é equilibrado, tem-se que  $V_1 + V_2 + V_3 = 0$ . Nesse caso,

$$V_4 = - \left[ \frac{C_M' (V_5 + V_6)}{C_{44}'} \right] \quad (17)$$

Com isso verifica-se que a transposição das linhas de transmissão permite uma redução dos acoplamentos indutivo e capacitivo entre linhas em paralelo. Vale notar, contudo, que a análise apresentada deve ser vista do ponto de vista qualitativo, pois se considerou a transposição perfeita e conjunta dos seis condutores presentes na torre, o que normalmente não é feito na prática.

# 4 Simulações Computacionais

## 4.1 *Estudo de Caso Prático*

Neste capítulo analisa-se um caso real de um sistema de transmissão composto por uma linha de circuito simples que compartilha a mesma faixa de servidão de uma de linha de circuito duplo. São consideradas nas análises condições mais severas dos acoplamentos indutivo e capacitivo entre os circuitos paralelos, tendo em vista o maior carregamento dos circuitos que permanecem energizados e a máxima tensão operativa referente à classe de tensão da rede. Nessas análises são considerados os dados de projeto das linhas de transmissão (geometria da torre, características do cabo fase, cabos pára-raios e flechas) para determinação de seus parâmetros elétricos, com o intuito de se determinar as impedâncias mútuas (indutiva e capacitiva) presentes entre as fases de todos os circuitos do sistema analisado.

As análises dos acoplamentos indutivos e capacitivos são realizadas por meio de simulações computacionais. No problema estudado busca-se verificar se os limites de suportabilidade das lâminas de terra para as correntes e tensões induzidas na linha de transmissão desenergizada são ultrapassados.

O sistema de transmissão em estudo se refere às linhas de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência, compostas por uma linha de circuito duplo e outra de circuito simples, instaladas em paralelo ao longo de uma mesma faixa de servidão. As linhas têm extensão de aproximadamente 75 km e nível de tensão de 230 kV.

Nas simulações foi utilizado o software ATPDraw, conforme ilustrado na Figura 4.1, sendo considerada a subestação de Ilha Solteira 2 como terminal fonte e a subestação Inocência como terminal carga.

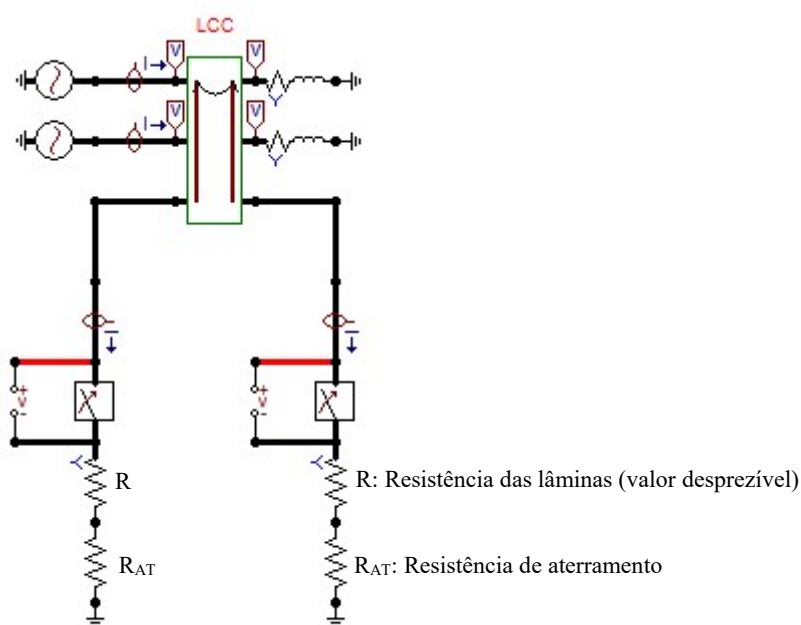


Figura 4.1- Circuito modelado no ATPDraw para representar as linhas de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência

Para a modelagem das linhas de transmissão foi utilizada a rotina LCC do ATPDraw, optando-se por uma representação na forma de parâmetros distribuídos através do modelo “J.Marti”. O elemento foi representado com 13 condutores, sendo três cabos de fase e dois cabos pára-raios para a linha de circuito simples, e seis cabos de fase e dois cabos pára-raios para a linha de circuito duplo. Em ambas as linhas foram consideradas uma resistividade do solo de  $1000 \Omega\text{m}$  e cabos de fase com dois condutores por fase. Na simulação, foi considerada a representação dos cabos fase como um conjunto de cabos geminados (cabos idênticos espaçados uniformemente ao redor de uma circunferência), através do comando "auto bundling", a fim de facilitar a entrada dos dados. Esta opção implica uma quantidade menor de instruções, sendo necessária apenas uma instrução para cada fase da linha de transmissão (sem levar em conta os cabos para-raios). Também foi utilizado o comando “skin effect” para incluir o efeito pelicular na resistência e indutância interna dos condutores. A resistência de aterramento da lâmina de terra foi desprezada nesse primeiro momento. Os condutores foram considerados como cabos de fase CAA 954 MCM Rail (2 cabos por fase) e cabos pára-raios dos tipos OPGW 13,4 mm e 3/8" EHS.

A Figura 4.2 ilustra a disposição dos condutores das linhas de transmissão de circuito simples (CS) e de circuito duplo (CD) estudadas, conforme configurado no elemento LCC.

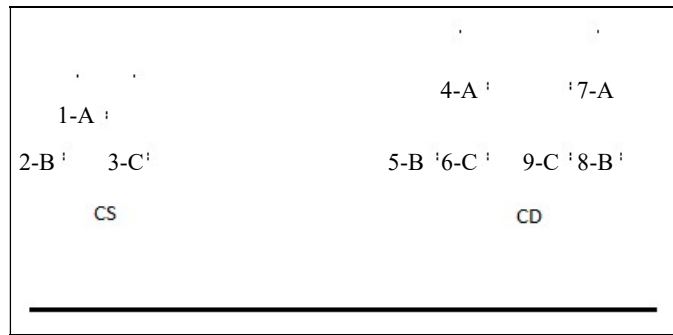


Figura 4.2- Vista frontal da configuração dos circuitos das linhas de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência

Nas Figuras 4.3(a) e 4.3(b) estão representadas as estruturas das torres utilizadas como referência para a modelagem no ATPDraw.

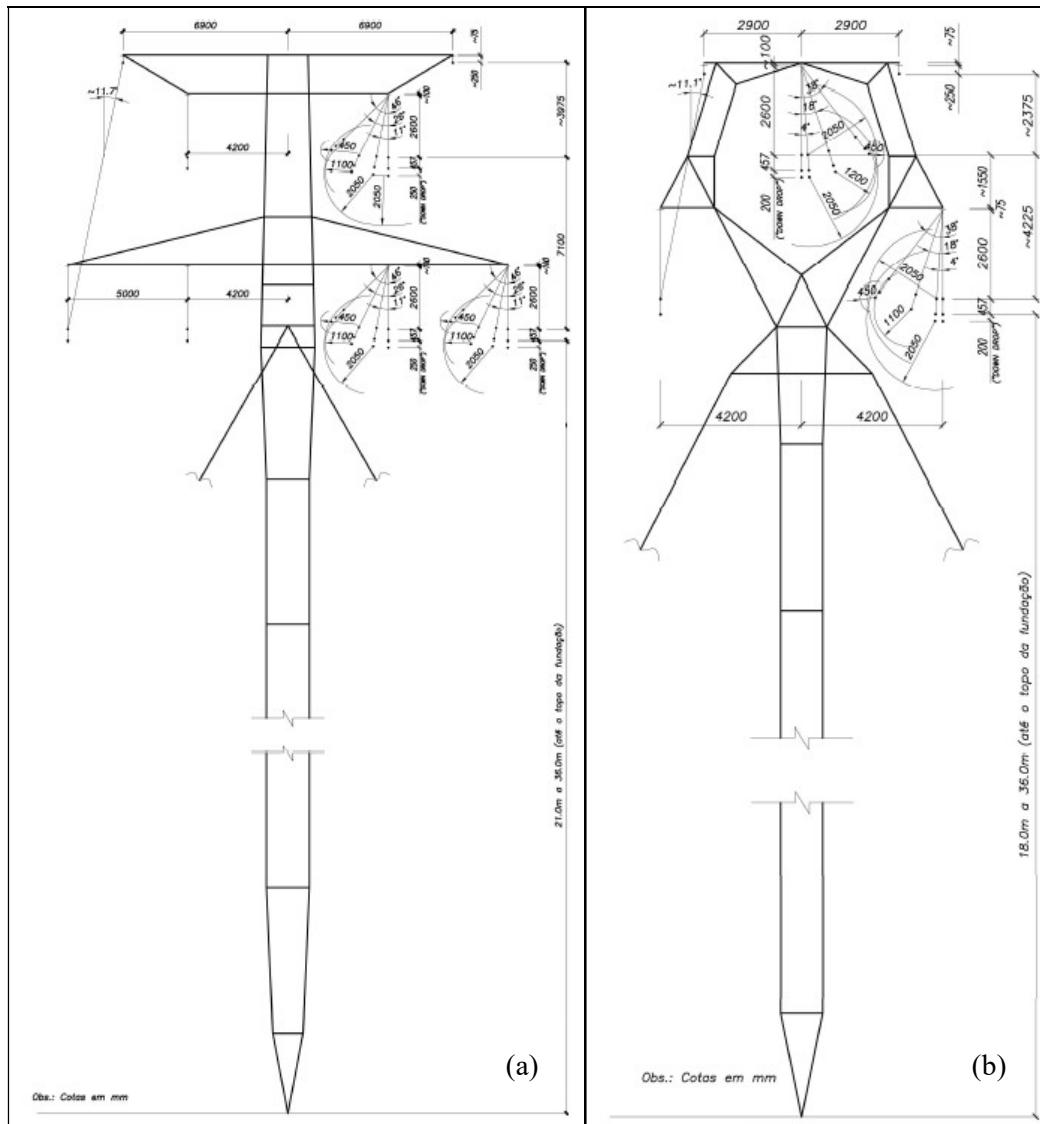


Figura 4.3(a) Estrutura da linha Ilha Solteira 2 – Inocência circuito duplo (b) Estrutura da linha Ilha Solteira 2 – Inocência circuito simples

Nas simulações considerou-se que as fases externas da linha de circuito duplo estivessem aterradas e que a linha de circuito simples e o circuito interno da linha de circuito duplo estivessem energizados. Esse caso corresponde à situação crítica de acoplamento indutivo entre as linhas de transmissão devido à soma das linhas de campo de fluxo magnético de cada circuito conforme sentido da corrente transmitida, sendo Ilha Solteira 2 o terminal fonte e a subestação Inocência o terminal carga.

Para considerar os limites de corrente e tensão resultantes na condição mais severa do sistema de transmissão, foi considerada uma corrente no valor de 1600 A com uma tensão operativa de 105% da tensão nominal e um fator de potência 0,94 indutivo. Esses valores têm em vista a capacidade de operação em emergência da linha de transmissão, de aproximadamente 669 MVA, e a máxima tensão operativa do sistema de transmissão.

## **4.2 Corrente e Tensões Induzidas**

Os efeitos associados aos acoplamentos indutivo e capacitivo são ilustrados por meio de gráficos e tabelas apresentados para cada tipo de situação avaliada. Os casos avaliados são os seguintes: linha de transmissão desenergizada com ambas as lâminas de terra dos terminais fechadas (caso 1), ambas as lâminas dos terminais abertas (caso 2), abertura de uma lâmina de terra com a outra fechada em cada terminal (caso 3), e abertura de uma lâmina de terra com a outra já aberta em cada terminal (caso 4). Em cada um dos casos analisados obteve-se um conjunto de parâmetros de interesse, como as correntes resultantes e as tensões de restabelecimento transitórias. Em todos os casos os circuitos analisados correspondem aos condutores 7, 8 e 9, fases A, B e C da Figura 4.2, respectivamente.

Os primeiros casos analisados (caso 1 e 2) são eventos em regime permanente, situações onde não há mudanças de estado no sistema, ou seja, não há manobras das lâminas de terra. Estes correspondem aos casos em que ambas as chaves estão aterradas ou abertas nos terminais da linha de transmissão desenergizada. Os casos 3 e 4 correspondem a estudos transitórios.

### **4.2.1 Caso 1: Linha Desenergizada com Ambos os Terminais Fechados**

Neste caso calcula-se a corrente induzida pelo efeito associado ao acoplamento indutivo entre os circuitos gerador e vítima. Na Figura 4.4 é possível visualizar as correntes induzidas no terminal de carga da linha de transmissão desenergizada e aterrada. Embora não ilustrado, as correntes do terminal carga não possuem variação em relação ao valor da corrente do terminal fonte, consequência da pequena fuga de corrente ao longo da linha desenergizada.

---

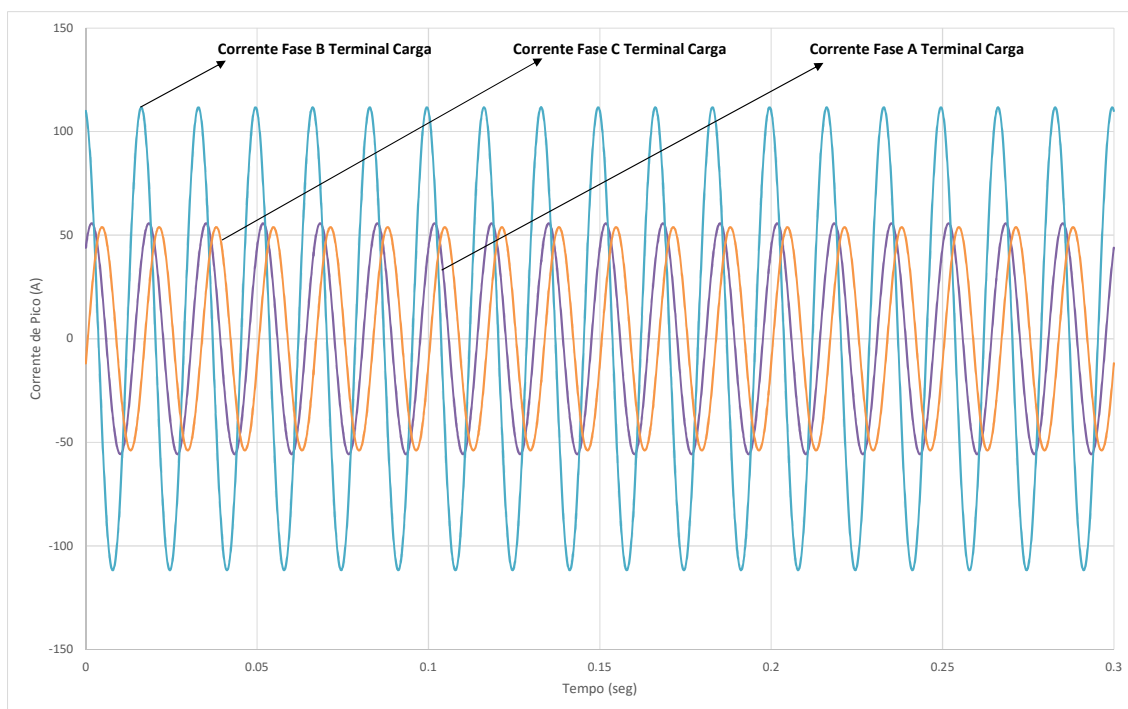


Figura 4.4- Caso 1 - Corrente induzida na linha de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência no terminal carga.

Na figura verifica-se o maior acoplamento indutivo existente no condutor da fase B, no valor de aproximadamente 112 A de pico, ou seja, aproximadamente 79 A eficaz, condição devida à maior indutância mútua entre os condutores, conforme deduzido no capítulo 3.2. Nos condutores das fases A e C observa-se que as correntes possuem aproximadamente o mesmo módulo, com variação apenas no ângulo de fase. Comparando o valor calculado com os valores indicados na Figura 2.3, verifica-se que este corresponde ao limiar da suportabilidade prevista, que é de 80 A.

#### 4.2.2 *Caso 2: Linha Desenergizada com Ambos os Terminais Abertos*

No segundo caso verifica-se a tensão induzida pelo efeito associado à capacitância mútua entre os condutores dos circuitos fonte e vítima.

A Figura 4.5 ilustra as tensões induzidas na linha de transmissão desenergizada desaterrada, onde se verificam as tensões no terminal fonte. Embora não ilustrado, essas tensões apresentam uma variação de aproximadamente 9% em relação ao valor da tensão no terminal carga, consequência da fuga de corrente capacitiva ao longo da linha energizada.

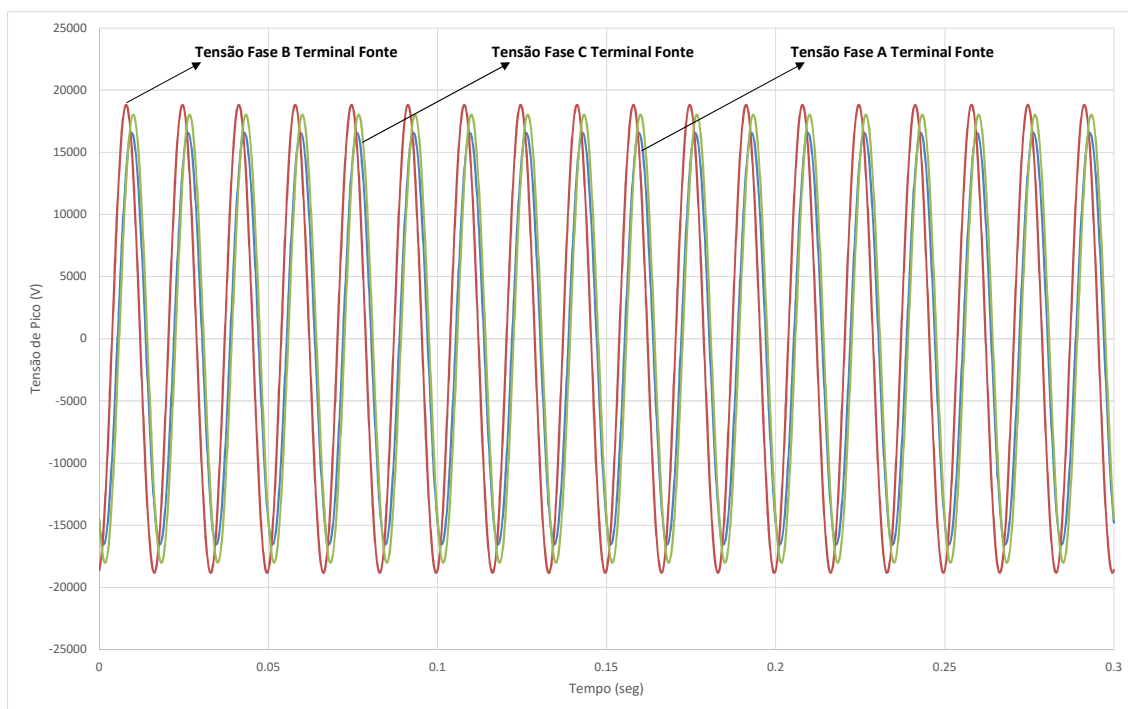


Figura 4.5- Caso 2 - Tensão induzida na linha de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência no terminal fonte.

Na figura também se verifica o maior acoplamento capacitivo existente no condutor da fase B, conforme discutido na seção 3.2, que apresenta uma tensão de aproximadamente -18831 V de pico, ou seja, aproximadamente -13316 V eficaz. Nos condutores das fases A e C verificam-se tensões praticamente em fase, com pequena variação em módulo. Comparando o valor calculado com o conjunto de valores apresentado na Figura 2.3, verifica-se que este ultrapassa o limite previsto de 12 kV.

Nas próximas seções são apresentados os casos em que se avaliam os eventos transitórios resultantes de situações onde são realizadas manobras das lâminas de terra nos terminais da linha de transmissão.

#### 4.2.3 *Caso 3: Linha Desenergizada com Abertura de um Terminal e o outro Fechado*

No terceiro caso avalia-se a tensão de restabelecimento transitória associada à abertura de uma lâmina de terra no caso de a outra lâmina permanecer fechada, para ambos os terminais. Nas Figuras 4.6 e 4.7, referentes à abertura do terminal carga e da fonte, respectivamente, é possível visualizar as tensões de restabelecimento transitórias na linha de transmissão desenergizada. São verificadas tensões semelhantes em ambos os terminais, com variação de aproximadamente 2% para cada abertura.

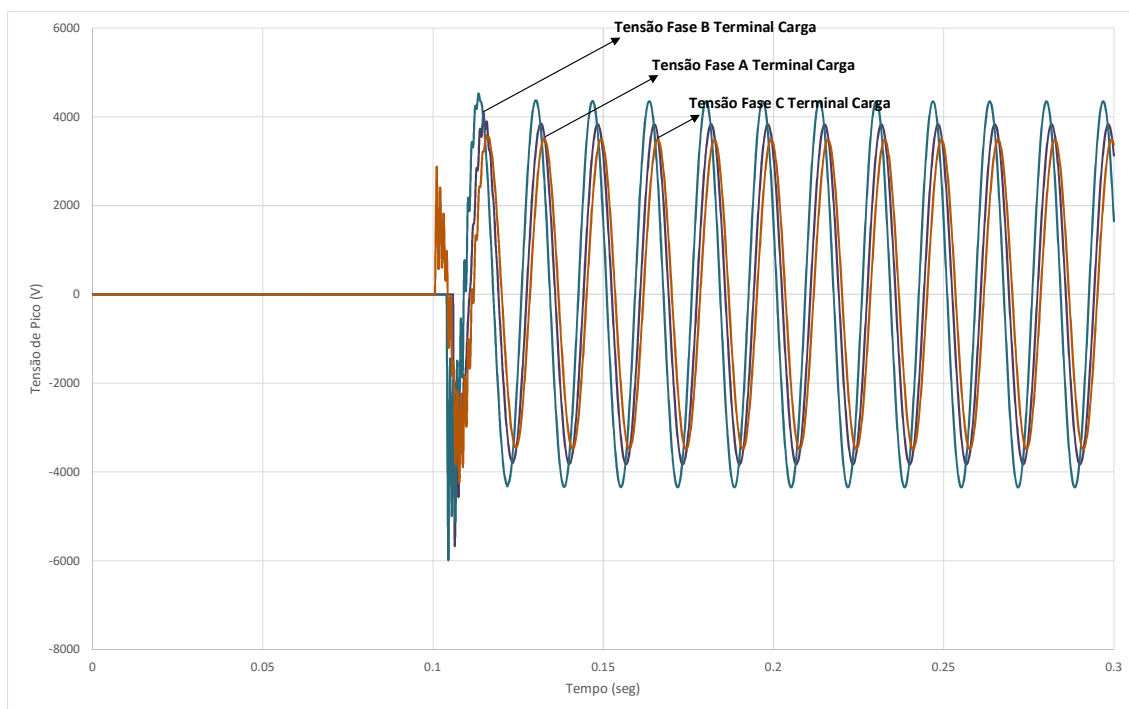


Figura 4.6- Caso 3 - Tensões de restabelecimento transitórias induzidas na linha de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência na abertura do terminal carga.

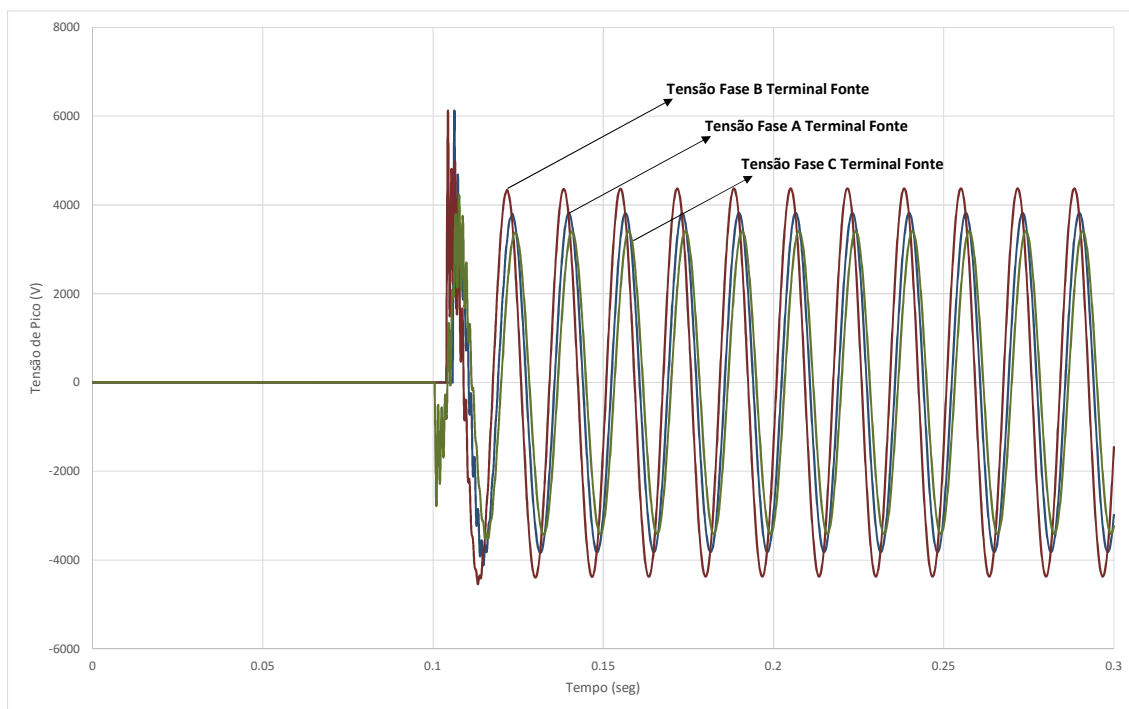


Figura 4.7- Caso 3 - Tensões de restabelecimento transitórias induzidas na linha de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência na abertura do terminal fonte.

Nas Figuras 4.6 e 4.7 verifica-se também que a maior tensão de restabelecimento transitória ocorre no condutor da fase B, consequência dos maiores acoplamentos eletromagnético e eletrostático na mesma fase. No terminal fonte encontram-se os maiores

valores de tensão de restabelecimento transitória, no valor máximo de aproximadamente de 6126 V de pico na fase B. Comparando o valor calculado com os valores de referência na Figura 2.4, verifica-se que este ultrapassa o limite de 4,5 kV permitido.

Nas Figuras 4.8 e 4.9, é possível visualizar as correntes na linha de transmissão desenergizada, onde se vê que as correntes interrompidas em cada terminal possuíam os mesmos valores. Foi considerada para a interrupção da corrente na lâmina de terra a passagem da corrente por zero, pois é sabido que a corrente não pode variar instantaneamente em um circuito. Também é possível verificar no terminal carga uma maior corrente capacitiva após a abertura da chave no terminal fonte, fato ocasionado pela maior tensão induzida no terminal fonte, conforme discutido no caso 2.

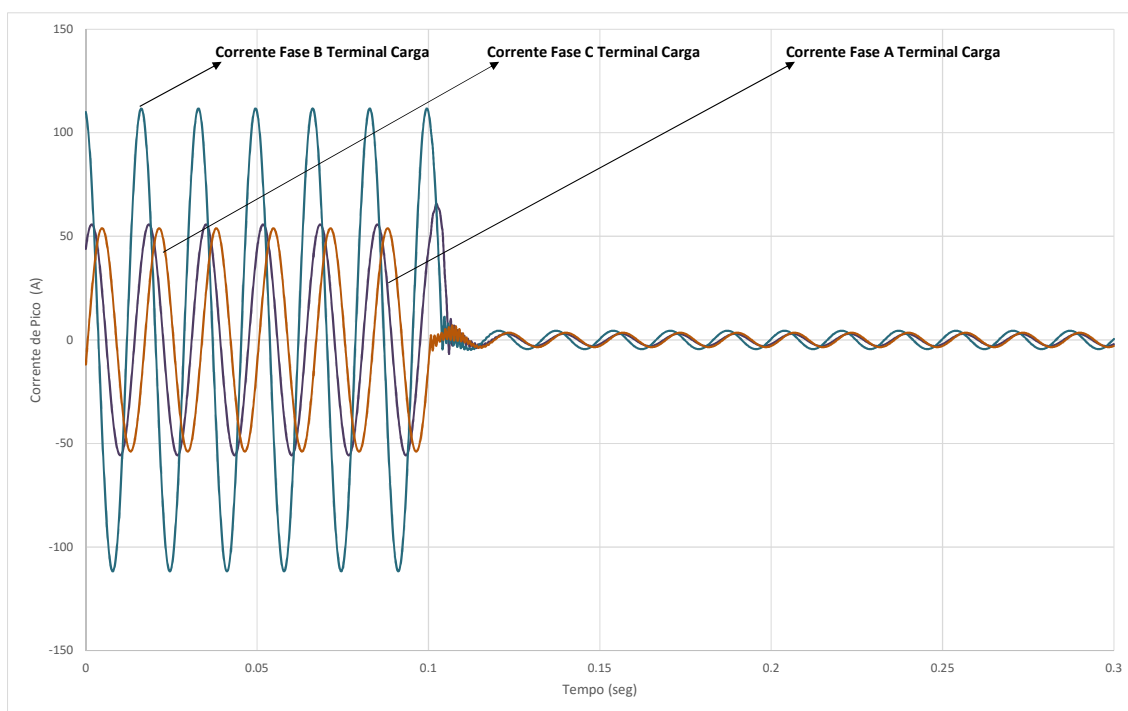


Figura 4.8- Caso 3 - Correntes induzidas na linha de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência na abertura do terminal carga.

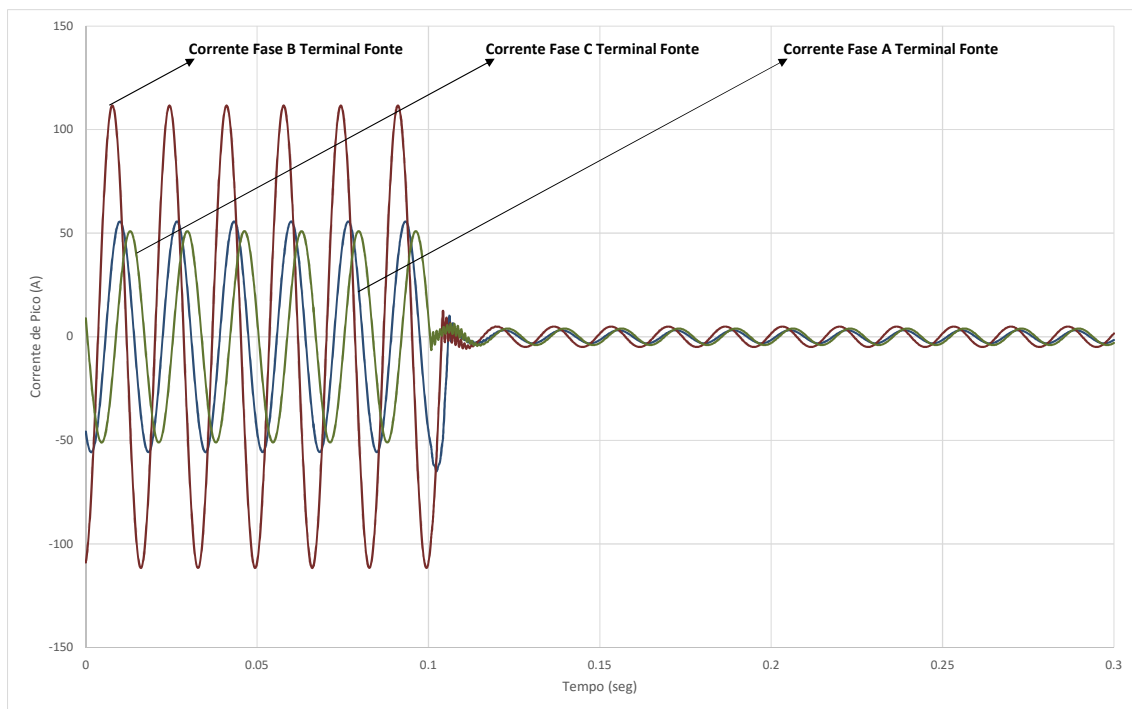


Figura 4.9- Caso 3 - Correntes induzidas na linha de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência na abertura do terminal fonte.

#### 4.2.4 *Caso 4: Linha Desenergizada com Abertura de um Terminal e o outro Aberto*

No quarto caso avalia-se a tensão de restabelecimento transitória causada pela abertura da lâmina de terra com um dos terminais já aberto. Nas Figuras 4.10 e 4.11, referentes à abertura do terminal carga e da fonte, respectivamente, é possível visualizar as tensões de restabelecimento transitórias na linha de transmissão desenergizada. Verificam-se as mesmas tensões resultantes em ambos os terminais, para cada abertura, com uma pequena elevação para o terminal fonte de aproximadamente 5%.

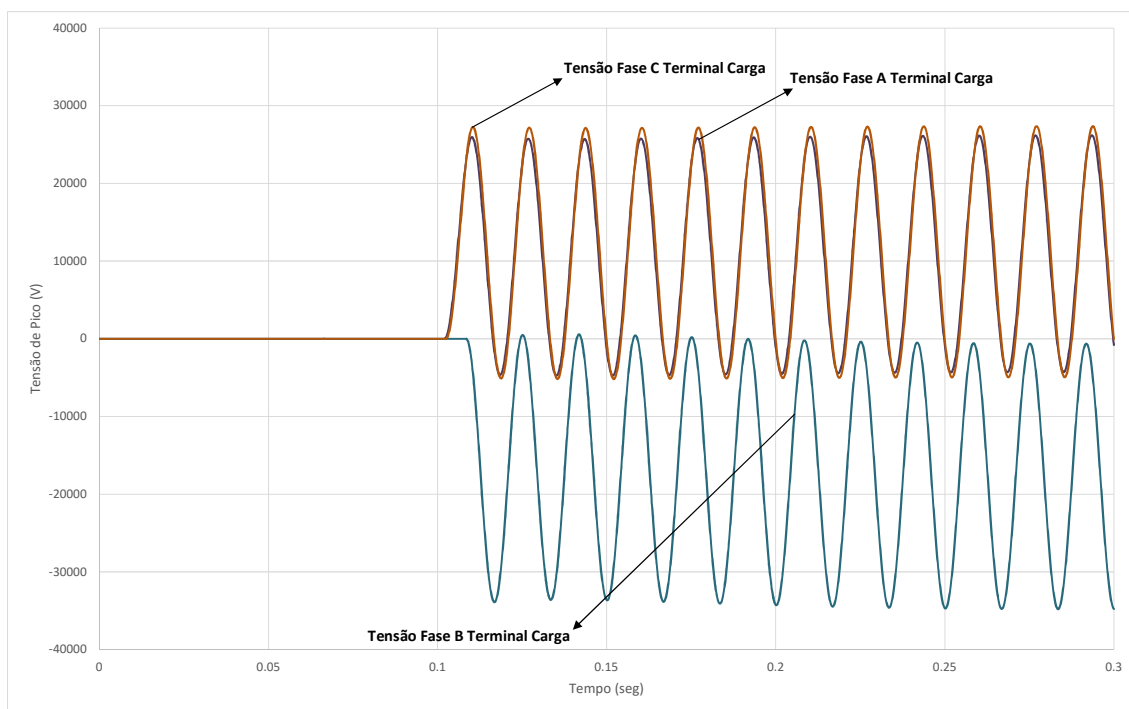


Figura 4.10- Caso 4 - Tensões de restabelecimento transitórias induzidas na linha de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência na abertura do terminal carga.

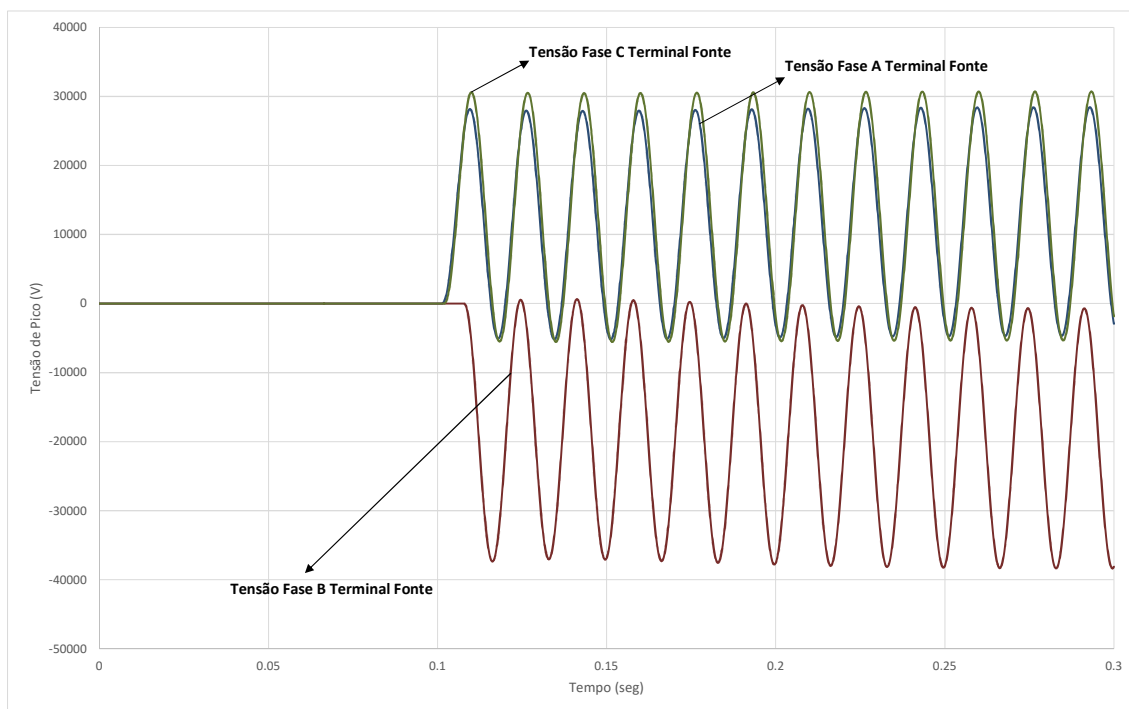


Figura 4.11- Caso 4 - Tensões de restabelecimento transitórias induzidas da linha de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência na abertura do terminal fonte.

Nas figuras observa-se também que a maior tensão de restabelecimento transitória se manifesta no condutor da fase B, consequência do maior acoplamento e capacitivo nesta fase. No terminal fonte encontram-se os maiores valores de tensão de restabelecimento, no valor

máximo de aproximadamente de -38347 V de pico na fase B. Comparando o valor calculado com os valores indicados na Figura 2.4, verifica-se que este supera o valor permitido de 4,5 kV.

#### **4.2.5 Discussão**

Conforme mencionado na seção 2.2, os limites para os acoplamentos indutivo e capacitivo para um sistema de transmissão podem ser classificados conforme duas classes: classe A, relativa a linhas com baixo acoplamento e classe B, relativa a linhas com altos acoplamentos. Em comparação com os valores encontrados no estudo apresentado pode-se verificar que, conforme os limites apresentados nas Figuras 2.3 e 2.4, houve superação dos limites pré-estabelecidos por norma para as classes A e B nas condições de tensão induzida e tensão de restabelecimento transitória, sendo necessário verificar outro artifício para redução destes valores. Por segurança, como os valores das correntes induzidas calculadas se aproximam dos limites apresentados, sugere-se considerar que os limites por corrente induzida tenham sido ultrapassados.

A solução mais empregada nos dias atuais para a redução da impedância e da admitância mútuas de linhas em paralelo é a transposição da linha de transmissão. Esta solução não foi adotada em um primeiro momento porque, de acordo com os procedimentos de rede da ONS, somente as linhas de transmissão de comprimento igual ou superior a 100 km devem ser transpostas com um ciclo completo de transposição, de preferência com trechos de 1/6, 1/3, 1/3 e 1/6 do comprimento total. Para linhas de transmissão com comprimento inferior a 100 km, caso considerado neste estudo, devem ser verificados apenas os desequilíbrios de tensão, que não podem ser superiores a 1,5% para a linha a vazio e a plena carga.

Na seção 4.3, a seguir, verifica-se a influência da implementação desta solução nos resultados das correntes e tensões induzidas na linha de transmissão.

### **4.3 Avaliação da Transposição da Linha de Transmissão**

Neste item são analisadas as diferenças entre os resultados obtidos na seção anterior com aqueles obtidos com a adoção da transposição da linha de transmissão. Nas análises, foi considerada a transposição com um ciclo completo, com trechos de 1/6, 1/3, 1/3 e 1/6 do comprimento total da linha.

As primeiras análises verificam os resultados em regime permanente para as correntes e tensões induzidas. Na Tabela 4.1 é possível visualizar as correntes induzidas na linha de

transmissão, para as lâminas fechadas, onde se verifica que o valor resultante na fase B é 55% menor para o caso com transposição. Além disso, observa-se que as correntes nas demais fases são praticamente iguais caso seja feita a transposição das linhas.

Tabela 4.1- Caso 1 - Corrente induzida na linha de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência no terminal carga.

<b>Corrente eficaz (A)</b> <b>sem Transposição</b>			<b>Corrente eficaz (A)</b> <b>com Transposição</b>		
<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
39	79	38	36	35	35

Na Tabela 4.2 é possível visualizar as tensões induzidas na linha de transmissão, para as lâminas abertas, onde se observa que os valores resultantes são bem distintos para o modelo com transposição, sendo em torno de 83% menores na fase B. Uma diferença relevante também é observada nas demais fases do circuito desenergizado.

Tabela 4.2- Caso 2 - Tensão induzida na linha de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência no terminal fonte.

<b>Tensão eficaz (V)</b> <b>sem Transposição</b>			<b>Tensão eficaz (V)</b> <b>com Transposição</b>		
<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
11706	13310	12751	2885	2247	2292

São apresentados agora os resultados dos eventos de manobras das lâminas de terra com o surgimento das tensões de restabelecimento transitórias. Para melhor visualização, avalia-se apenas a fase B nas figuras a seguir, circuito que tem a maior tensão de restabelecimento transitória resultante. Na Figura 4.12 é possível visualizar as tensões de restabelecimento transitórias induzidas na linha de transmissão, na condição de abertura de uma lâmina com a outra fechada, onde se pode verificar que os valores resultantes no modelo com transposição são bem distintos daqueles obtidos com o modelo sem transposição. No caso avaliado, o valor de pico para o caso com transposição é 50% menor que no caso sem transposição.

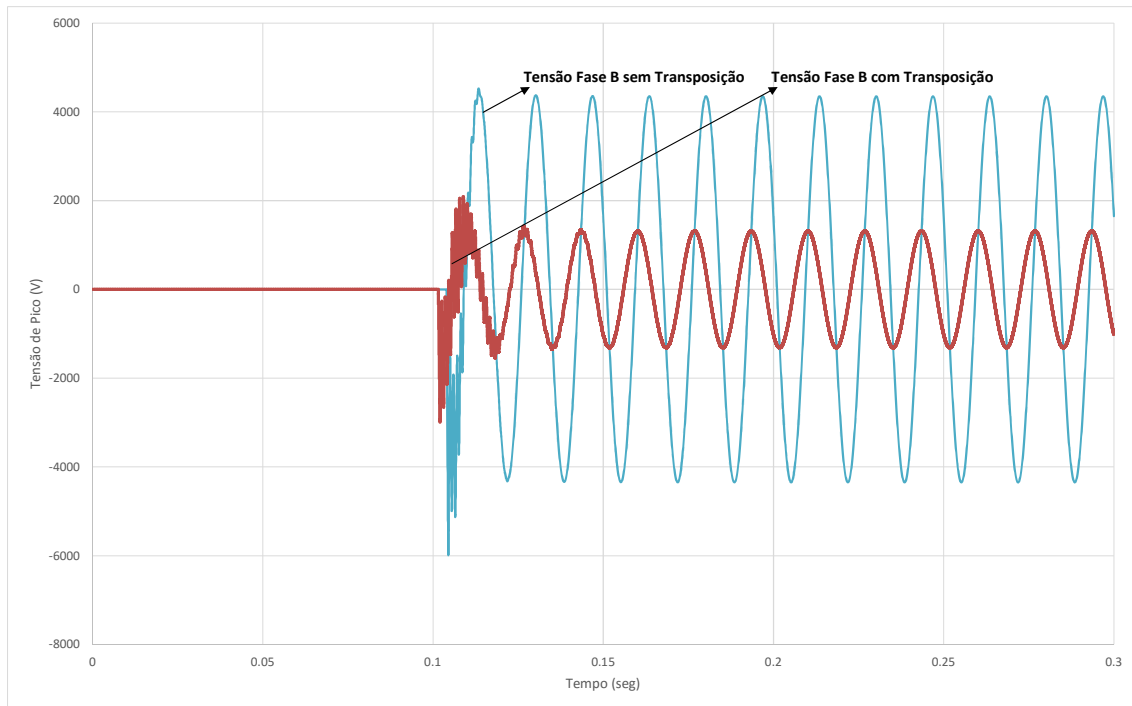


Figura 4.12- Caso 3 - Comparação das tensões de restabelecimento transitórias induzidas na fase B na linha de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência.

Na Figura 4.13 é possível visualizar as tensões de restabelecimento transitórias induzidas na linha de transmissão para as manobras com uma lâmina já aberta, onde se observa que os valores resultantes no modelo com transposição também diferem do caso sem transposição. Neste caso, o valor de pico na situação com transposição é significativamente menor que no caso sem transposição.

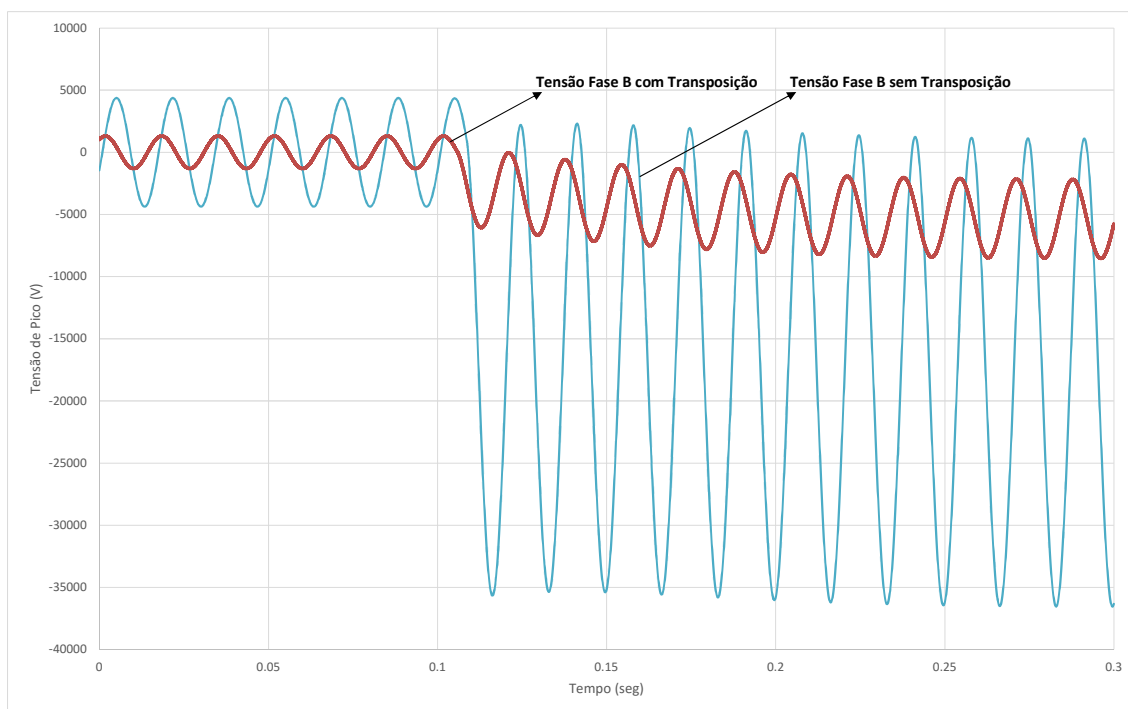


Figura 4.13- Caso 4 - Comparação das tensões de restabelecimento transitórias induzidas na fase B na linha de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência.

Dos resultados apresentados, confirma-se que a transposição da linha acarreta a redução das correntes e tensões induzidas na linha desenergizada.

#### 4.4 Avaliação da Influência da Resistência de Aterramento

Nesta seção são analisadas as diferenças entre os resultados obtidos anteriormente com aqueles referentes à adição de uma resistência de aterramento, no valor de  $10 \Omega$ , no cálculo das correntes e tensões induzidas na linha desenergizada. Vale notar que este valor de resistência de aterramento pode ser considerado elevado para subestações típicas, devendo ser visto como um valor limite abaixo do qual estarão valores típicos de resistência de malha de aterramento.

Na primeira análise são verificados os resultados em regime permanente para as correntes e tensões induzidas. Na Tabela 4.3 é possível visualizar as correntes induzidas na linha de transmissão, para as lâminas fechadas, onde se verifica que os valores resultantes nas fases A e C são bem menores com a inclusão da resistência de aterramento, enquanto na fase B se verifica um valor ligeiramente inferior.

Tabela 4.3- Caso 1 - Corrente induzida na linha de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência no terminal carga

<b>Corrente eficaz (A)</b> <b>sem Resistência</b>			<b>Corrente eficaz (A)</b> <b>Resistência 10 ohms</b>		
<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
39	79	38	23	74	27

Para o caso da tensão induzida com ambas as lâminas de terra abertas, a adição da resistência de aterramento não acarretou alterações nos valores encontrados no modelo sem resistência.

Na segunda análise, são verificados os resultados obtidos com a abertura das lâminas de terra. Para melhor visualização, ilustra-se apenas a tensão de restabelecimento transitória na fase B, que é aquela que atinge valores mais elevados. A Figura 4.14 ilustra as tensões de restabelecimento transitórias na fase B da linha desenergizada, na condição de abertura de uma lâmina com a outra fechada. Os resultados indicam diferenças desprezíveis entre as condições que consideram e ignoram a resistência de aterramento. Para o caso da tensão de restabelecimento transitória com abertura da lâmina de terra com a outra aberta, a adição da resistência de aterramento não acarretou alterações nos valores encontrados desprezando-se tal resistência.

Dos resultados apresentados, pode-se verificar que a adição da resistência de aterramento para os cálculos das correntes e tensões induzidas deve ser analisada caso a caso em relação ao sistema transmissão estudado. No caso prático do sistema de transmissão estudado neste trabalho, a pequena influência associada à adição da resistência de aterramento torna-se um argumento mais forte para realização da transposição da linha, já que os valores de corrente calculados sem adição da resistência de aterramento se aproximaram dos limites de suportabilidade da lâmina de terra.

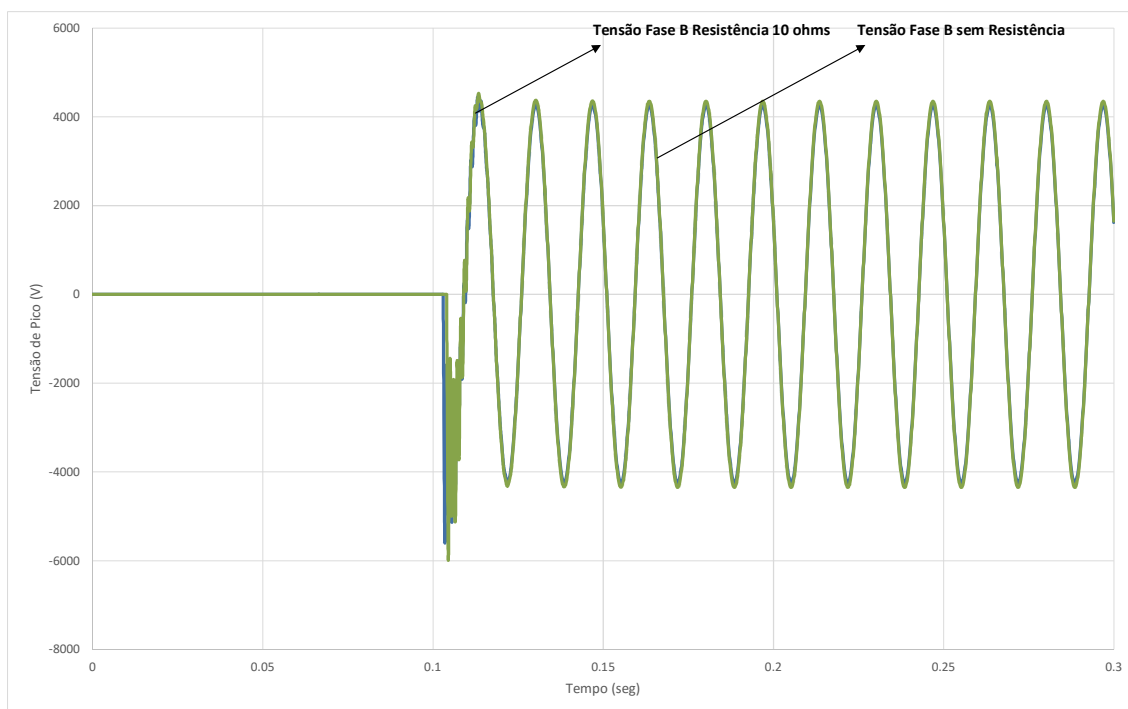


Figura 4.14- Caso 3 - Comparação das medições das tensões de restabelecimento transitórias induzidas na fase B na linha de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência

#### 4.5 Comparativo dos Modelos de Linhas de Transmissão Adotados

Nesta seção se avalia a influência do modelo de linha de transmissão adotado para simulação dos acoplamentos eletromagnético e eletrostático nos casos estudados. Para isso é feita uma comparação entre os resultados obtidos com diferentes modelos de linha, os modelos “Pi”, “Bergeron” e “J.Marti” disponíveis no ATPDraw.

O modelo “Pi” tem seu uso recomendado para análises em regime permanente, preferencialmente em linhas curtas. Nos casos de estudos de fenômenos transitórios que envolvem inúmeras frequências, como a abertura das lâminas de terra, este tipo de modelo não representa com precisão o comportamento do sistema.

O modelo de “Bergeron” representa os parâmetros da linha transmissão de forma distribuída. Contudo, concentra a resistência da linha em três pontos e parte do cálculo dos parâmetros de linha em uma única frequência escolhida pelo usuário.

O modelo “J.Marti” representa os parâmetros da linha de transmissão também de forma distribuída, porém considera a sua variação com a frequência em uma larga faixa de ajuste inserida pelo usuário. Este modelo é adequado para estudos transitórios com ampla faixa de frequências.

Na primeira análise são verificados os resultados em regime permanente para as correntes e tensões induzidas. Na Tabela 4.4 é possível visualizar as correntes induzidas na linha de transmissão, para as lâminas fechadas, onde se pode verificar que o valor resultante na fase B é bem próximo para os três modelos. Contudo, observa-se uma diferença relevante nas fases A e C dos modelos de “Bergeron” e “J.Marti” em relação ao modelo “Pi”. Apesar destas diferenças, estes resultados para as fases A e C não são relevantes, pois o valor a ser levantado para verificação dos limites de superação da suportabilidade das lâminas é praticamente idêntico.

Tabela 4.4- Caso 1 - Correntes induzidas na linha de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência no terminal carga

Corrente eficaz (A) Modelo “Pi”			Corrente eficaz (A) Modelo “Bergeron”			Corrente eficaz (A) Modelo “J.Marti”		
A	B	C	A	B	C	A	B	C
24	80	65	38	79	38	39	79	38

Na Tabela 4.5 é possível visualizar as tensões induzidas na linha de transmissão, para as lâminas abertas, onde se verifica que os valores resultantes nos modelos “Bergeron” e “J.Marti” apresentam diferenças consideráveis em relação ao “Pi” na fase A. Nestes modelos são encontradas diferenças em torno de 5% no resultado da tensão induzida nas fases B e C simuladas em relação ao modelo “Pi”, e uma diferença de 34% referente à fase A.

Tabela 4.5- Caso 2 - Tensão induzida na linha de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência no terminal fonte

Tensão eficaz (V) Modelo “Pi”			Tensão eficaz (V) Modelo “Bergeron”			Tensão eficaz (V) Modelo “J.Marti”		
A	B	C	A	B	C	A	B	C
7722	14233	12052	11705	13959	11536	11706	13310	12751

Apesar de os modelos com parâmetros distribuídos apresentarem resultados semelhantes, o usuário deve ter alguns cuidados na entrada dos dados no ATPDraw. Como o modelo de “Bergeron” não representa os parâmetros da linha dependentes da frequência, deve-

se configurar no elemento a frequência a ser trabalhada, no caso 60 Hz, em regime permanente. Já no modelo “J.Marti”, que considera parâmetros dependentes da frequência, o usuário também deve configurar no elemento a frequência de 60 Hz para o cálculo dos parâmetros em regime permanente e também da matriz de transformação. Para ambos os modelos, caso não sejam tomadas essas devidas precauções, os resultados encontrados nas simulações podem ser incorretos. Isto vale tanto para o cálculo das tensões quanto das correntes em regime permanente.

Na segunda análise são verificados os resultados dos eventos de manobras das lâminas de terra com o cálculo das tensões de restabelecimento transitórias. Para melhor visualização, é apresentada apenas a tensão na fase B, circuito que tem a maior tensão de restabelecimento transitória resultante. As Figuras 4.15 e 4.16 ilustram as tensões de restabelecimento transitórias na condição de abertura de uma lâmina com a outra fechada. Os resultados apresentados indicam que os modelos “Bergeron” e “Pi” levam a tensões muito próximas daquelas obtidas com o circuito “J.Marti”. Embora não ilustrado, outra grande diferença encontrada se refere à tensão de restabelecimento transitória mais elevada na fase C no modelo “Pi”. Porém, como este modelo não representa fenômenos transitórios fielmente considerou-se a fase B nas comparações conforme valor de pico mais elevado esperado. Nos cálculos realizados, foi considerada a frequência de 60 Hz para os cálculos dos parâmetros elétricos no modelo “Bergeron” e no cálculo da matriz de transformação no modelo “J.Marti”.

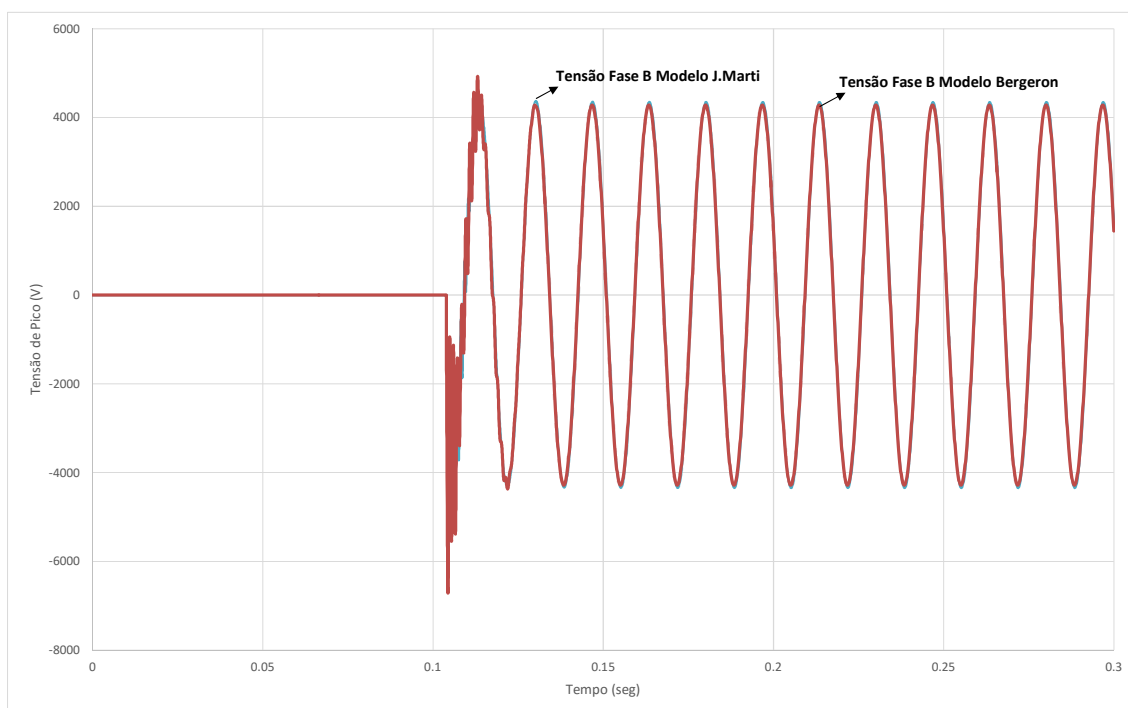


Figura 4.15- Caso 3 - Comparação das tensões de restabelecimento transitórias induzidas na fase B na linha de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência.

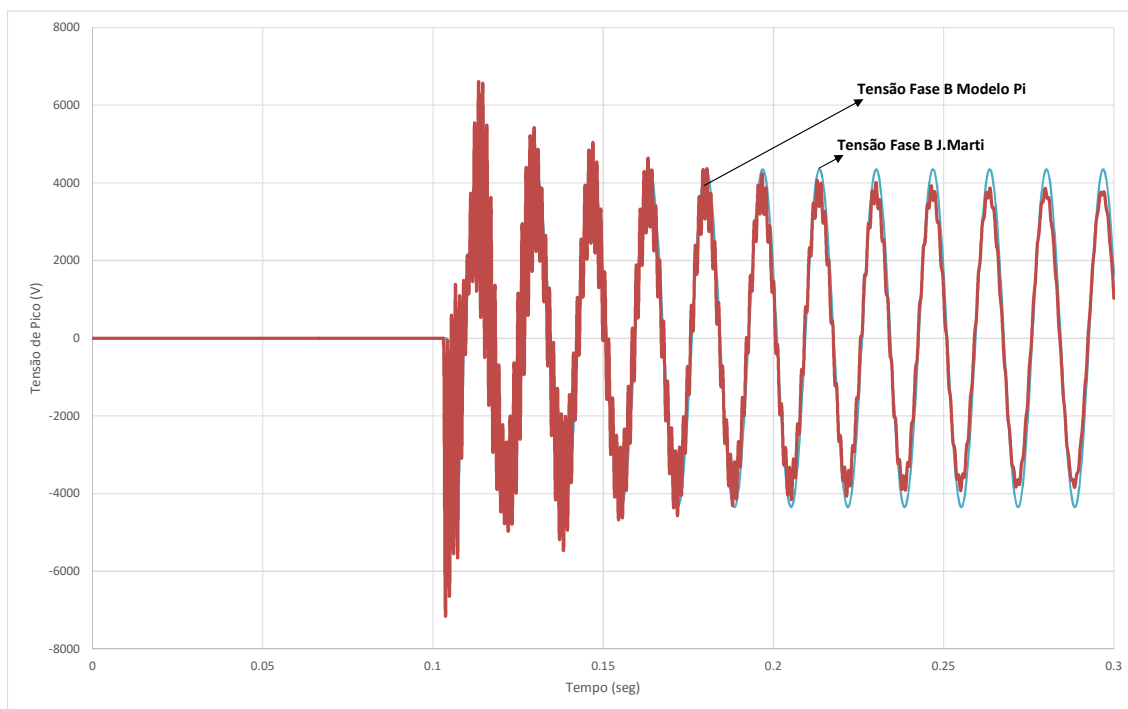


Figura 4.16- Caso 3 - Tensões de restabelecimento transitórias induzidas na fase B na linha de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência.

Nas figuras que comparam os resultados obtidos com os diferentes modelos, também é possível visualizar valores resultantes de tensão de restabelecimento transitória com diferenças em torno de 11% e 16% aproximadamente entre os modelos “Bergeron e “Pi”, respectivamente, em comparação com a tensão calculada na fase B para o modelo “J.Marti”.

As Figuras 4.17 e 4.18 ilustram as tensões de restabelecimento transitórias calculadas para as manobras com uma lâmina já aberta, onde se pode verificar os valores resultantes para os modelos “Bergeron”, “J.Marti” e “Pi”. As diferenças encontradas são de aproximadamente 4% entre os modelos “Bergeron” e “Pi” em comparação com a tensão calculada na fase B para o modelo “J.Marti”.

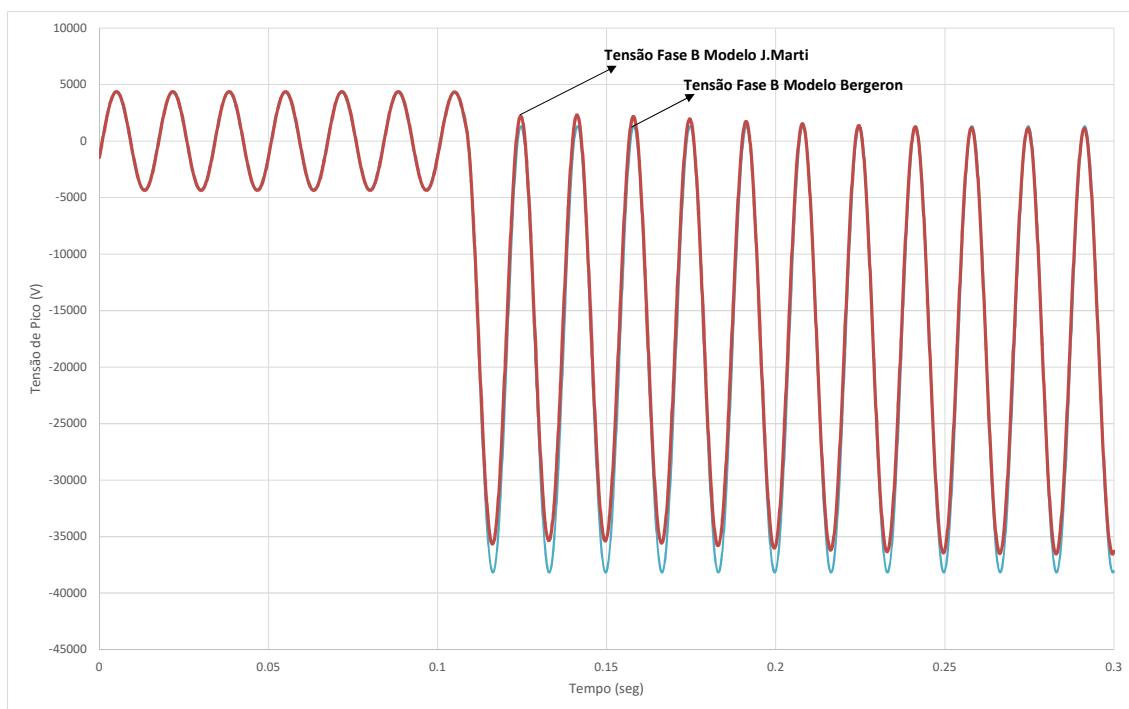


Figura 4.17- Caso 4 - Tensões de restabelecimento transitórias induzidas na fase B na linha de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência.

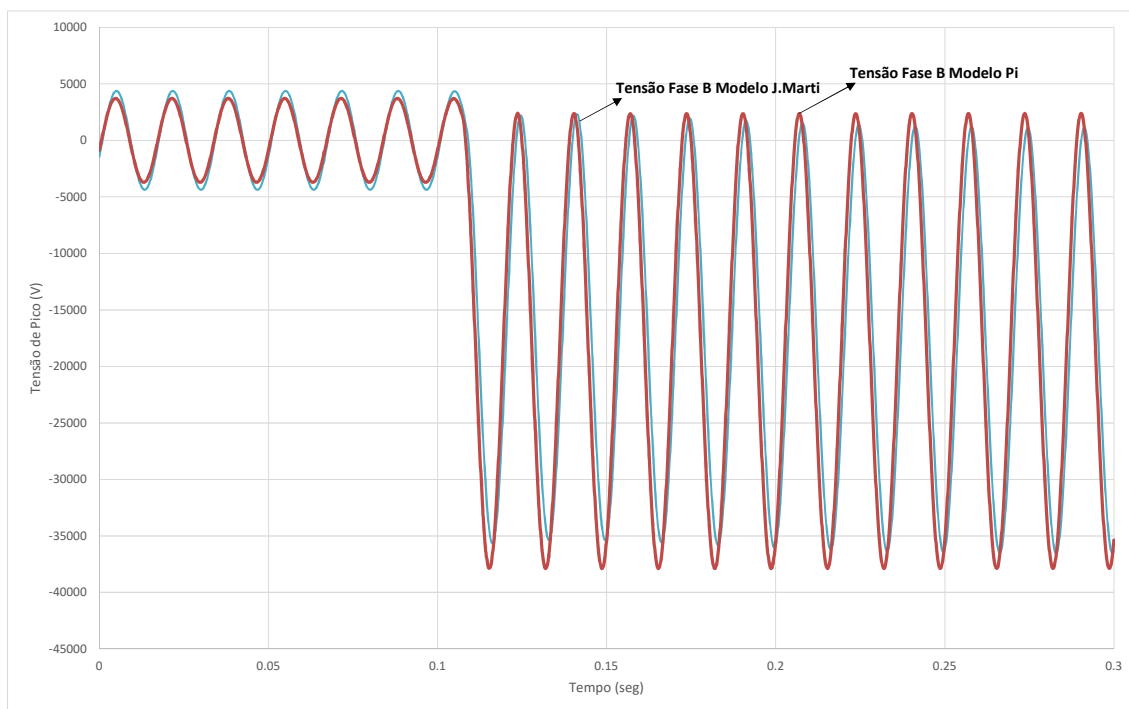


Figura 4.18- Caso 4 - Tensões de restabelecimento transitórias induzidas na fase B da linha de transmissão de Ilha Solteira 2 a Inocência.

Dos resultados apresentados, verifica-se que a escolha do modelo de linha de transmissão para o cálculo das correntes e tensões induzidas na linha desenergizada não tem grande influência nos resultados obtidos. Em tese, o modelo mais adequado para as análises

realizadas em regime transitório seria o modelo “J.Marti”, mas este apresenta dificuldades no cálculo de tensões induzidas em circuitos fortemente assimétricos. Investigações adicionais seriam necessárias para identificar o modelo mais adequado para a análise apresentada, de preferência tendo como base algum modelo de linha de transmissão com menos aproximações do que aqueles aqui considerados e também a identificação mais clara das frequências características apresentadas nas manobras das lâminas de terra.

---

# 5 Conclusões e Propostas de Continuidade

## 5.1 *Considerações Iniciais*

Este trabalho apresenta resultados relativos à investigação das correntes e tensões induzidas em linhas de transmissão que percorrem mesma faixa de servidão, verificando os limites suportáveis de corrente e tensão das seccionadoras de lâminas de terra utilizadas na manutenção de linhas desenergizadas.

Para a investigação das correntes e tensões induzidas foram descritos brevemente os fenômenos de acoplamento indutivo e capacitivo existentes em linhas de transmissão paralelas por meio das indutâncias e capacitâncias mútuas entre os circuitos. Também foram apresentados os impactos relacionados aos efeitos associados a estas induções na manutenção das linhas de transmissão e os limites de suportabilidade das lâminas de terra, tanto para as condições em regime permanente quanto para as condições transitórias, ou seja, de manobras do equipamento. Com isso, buscou-se destacar a importância das seccionadoras de lâminas de terra para a segurança de pessoal e equipamentos conforme normas de segurança vigentes no Brasil. Também foram analisados artigos técnicos relacionados ao tema.

Para demonstração dos efeitos associados aos acoplamentos eletromagnéticos em circuitos paralelos, apresentou-se a dedução das equações matriciais de uma linha de transmissão de circuito duplo na condição de operação em regime permanente senoidal. Estas equações permitiram a melhor compreensão do fenômeno analisado. Além disso, foi avaliada a consideração da influência da transposição da linha de transmissão como análise adicional.

Finalmente, realizou-se um estudo de caso prático através de simulações computacionais baseadas no software ATPDraw de uma linha de transmissão existente no

sistema elétrico brasileiro, com análise das correntes e tensões induzidas. Para isso, utilizou-se em um primeiro momento o modelo “J.Marti” de linha, sendo apresentada, posteriormente, uma comparação com os modelos “Bergeron” e “Pi”. Também foram avaliadas condições relacionadas à influência da resistência de aterramento da lâmina de terra e da transposição da linha de transmissão nos resultados obtidos.

## **5.2 Conclusões**

Com base nas simulações realizadas foi possível calcular as correntes e tensões induzidas nas lâminas de terra para um caso prático de uma linha de transmissão de circuito duplo paralela a uma linha de circuito simples, onde se verificou que as correntes na condição de lâminas de terra fechadas e as tensões de restabelecimento transitórias associadas à abertura de uma destas atingiram níveis elevados. Com isso, identificou-se a necessidade de utilização de uma alternativa para redução dos níveis de acoplamento existentes.

Verificou-se com a transposição da linha de transmissão que todos os acoplamentos sofrem redução significativa, sendo esta uma ótima alternativa para diminuição dos valores de corrente e tensão induzidas em linhas de transmissão paralelas.

Na avaliação da influência da resistência de aterramento da lâmina de terra, verificou-se que o seu aumento implica uma redução da corrente induzida na condição em que ambas as lâminas de terra encontram-se aterradas. Porém, esta redução não se mostrou significativa, devendo ser analisada caso a caso no dimensionamento da lâmina de terra. No que se refere à tensão de restabelecimento transitória associada à abertura de uma das lâminas de terra, esta não se mostrou sensível ao valor de resistência de aterramento considerado.

Nas simulações com a comparação dos modelos de linha de transmissão “Pi”, “Bergeron” e “J.Marti” disponíveis no software ATPDraw, foram observadas diferenças em algumas condições investigadas, mas comportamentos qualitativamente equivalentes na maioria dos casos.

Com a avaliação dos parâmetros apresentados neste trabalho, pode-se determinar com maior segurança os valores de correntes e tensões induzidas em linhas de transmissão em paralelo ou que possuem mesma faixa de servidão para a especificação correta das seccionadoras de lâminas de terra através da observação dos limites de suportabilidade destes equipamentos.

---

### ***5.3 Proposta de Continuidade***

Este trabalho apresentou uma investigação de diferentes modelos de linha de transmissão adotados na verificação dos acoplamentos indutivo e capacitivo, com intuito de avaliar as possíveis diferenças de valores calculados com cada modelo. Em trabalhos futuros, esta metodologia pode ser aprimorada realizando-se uma investigação mais aprofundada dos modelos “Bergeron” e “J.Marti”, com um levantamento das frequências características que surgem nas tensões de restabelecimento transitórias e uma investigação das diferenças encontradas entre os modelos para tensões resultantes nas fases A e C, tendo como base algum modelo de linha de transmissão que contenha menos simplificações do que ambos.

---

# Referências Bibliográficas

- [Mousa, 1981] MOUSA, A.M., “**Ground Switch Interruption Duty and Total Ground Current Imposed by Induction from Parallel Transmission Lines**”, IEEE – Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 8, August 1981.
- [Mousa, 1982] MOUSA, A.M., “**New Grounding Procedures Work on De-Energized Lines Eliminate the Need of Ground Switches**”, IEEE – Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 8, August 1982.
- [Luehrmann et al., 1985] LUEHRMANM, H.M., “**Stresses on Grounding Switches During Opening**”, IEEE – Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 5, May 1985.
- [D’Ajuz et al., 1997] D’AJUZ, A., FONSECA, C.S., CARVALHO, F.M.S., AMON, J.F., DIAS, L.E.N., PEREIRA, M.P., ESMERALDO, P.C., VAISMAN, R., FRONTIN, S.O., “**Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento - Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão**”, Rio de Janeiro, Furnas, UFF, 1987.
- [IEC 62271-102, 2001] INTERNATIONAL STANDARD, “**High-voltage Switchgear and Controlgear Part 102: Alternating current Disconnectors and Earthing Switches**”, IEC 62271-102.
- [ONS, 2013] OPERADOR NACIONAL SISTEMA ELÉTRICO, “**Diretrizes para Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão**”, Livro, ONS, 2013.
- [NR-10, 2004] NORMA REGULAMENTADORA 10, “**Segurança em Instalações e Serviços de Eletricidade**”, ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 2004.
- [Paul, 2006] PAUL, C.R., “**Introduction to Electromagnetic Compatibility**”, John Wiley & Sons, Inc., 2006
-