

**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia de Energia**

**ANÁLISE DE ENERGIZAÇÃO E RELIGAMENTO DE
LINHA DE TRANSMISSÃO NO *SOFTWARE* ATP**

**Autor: Guilherme Beloti Soares
Orientador: Prof. Dr. Alex Reis**

**Brasília, DF
2017**



GUILHERME BELOTI SOARES

**ANÁLISE DE ENERGIZAÇÃO E RELIGAMENTO DE LINHA DE TRANSMISSÃO
NO SOFTWARE ATP**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Alex Reis

**Brasília, DF
2017**



**REGULAMENTO E NORMA PARA REDAÇÃO DE RELATÓRIOS DE PROJETOS
DE GRADUAÇÃO FACULDADE DO GAMA - FGA**

GUILHERME BELOTI SOARES

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 09/12/16, apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr.: Alex Reis, UnB/ FGA
Orientador

Prof. Dr.: Flávio Henrique Justiniano Ribeiro Da Silva, UnB/ FGA
Membro Convidado 1

Prof. Dr.: Jorge Andrés Cormane Angarita, UnB/ FGA
Membro Convidado 2

Brasília, DF
2017

One man, one goal, one mission, one heart, one soul, just one solution.

Queen.

Don't let your dreams be dreams.

Jack Johnson.

RESUMO

Sistemas elétricos operam em regime permanente onde tensão, corrente e frequência mantêm-se em valores nominais. Em linhas de transmissão, manobras como energização e religamento geram sobretensões que não podem ser evitadas. A omissão destas sobretensões se torna um processo consideravelmente difícil, porém, o impacto no sistema pode ser reduzido. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo a realização de simulações de uma linha de transmissão de energia elétrica, utilizando o *software* ATP (*Alternative Transient Program*), uma plataforma computacional destinada à modelagem e simulação de circuitos e sistemas elétricos transitórios no domínio do tempo. E assim, analisar estes métodos de controle de sobretensões para os casos de energização e religamento tripolar da linha, determinando quais as melhores condições para fazer tais manobras. Apresentam-se os resultados através de informações estatísticas alcançadas a partir das simulações realizadas, analisando os valores máximos e médios das sobretensões que podem ocorrer no sistema. Por fim, concluiu-se com este trabalho a importância de serem feitas simulações para o estudo preventivo de manobras de energização de linha de transmissão.

Palavras-Chave: Energização, Religamento, Linha de Transmissão, Chaveamento Controlado, Chave Estatística, Para-raios, ATP.

SUMÁRIO

RESUMO.....	4
SUMÁRIO.....	5
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS.....	10
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	11
1.2 OBJETIVOS	12
1.3 ESTRUTURA DESTE TRABALHO	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1 SOBRETENSÕES DE MANOBRA.....	13
2.1.1 Energização de Linhas de Transmissão	14
2.1.2 Religamento de Linhas de Transmissão	15
2.2 MÉTODOS DE LIMITAÇÃO DE SOBRETENSÕES	18
2.2.1 Resistor de Pré-inserção.....	18
2.2.2 Para-raios	20
2.2.3 Instante de fechamento do disjuntor.....	21
2.3 SOFTWARE DE SIMULAÇÃO - ATP.....	22
2.3.1 Modelagem de Linhas de Transmissão.....	23
2.3.1.1 LR Sym. 51	23
2.3.1.2 LCC.....	24
2.3.1.3 Para-raios – MOV Tope 92.....	25
2.3.1.4 Chave Estatística	26
3 SIMULAÇÕES E ANÁLISE DE RESULTADOS	26
3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO	26
3.1.1 Linha de Transmissão	28
3.1.2 Reatores	29
3.1.3 Para-raios	30
3.1.4 Disjuntores.....	30
3.2.1 Resultados - Energização pelo terminal receptor	32
3.2.1.1 Comportamento do Terminal Receptor	32
3.2.1.2 Comportamento do Terminal Transmissor	33
3.2.1.3 Meio da Linha	35
3.2.1.4 Considerações Finais	37
3.2.2 Resultados - Energização pelo terminal transmissor.....	38
3.2.2.1 Terminal do Receptor	38
3.2.2.2 Terminal do Transmissor	40
3.2.2.3 Meio da Linha	41
3.2.2.4 Considerações Finais	43
3.3 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS – RELIGAMENTO	44
3.3.1 Resultados – Falta no terminal do Receptor do Circuito 1	46
3.3.1.1 Comportamento do Terminal Receptor	46
3.3.1.2 Comportamento do Terminal Transmissor	49
3.3.1.3 Meio da Linha	52

3.3.1.4 Considerações Finais	53
3.3.2 Resultados – Falta no terminal do Transmissor do Circuito 1	54
3.3.2.1 Comportamento do Terminal Receptor	54
3.3.2.2 Comportamento do Terminal Transmissor	57
3.3.2.3 Meio da Linha	60
3.3.2.4 Considerações Finais	62
4 CONCLUSÃO.....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
APÊNDICE	66
APÊNDICE A: CONFIGURAÇÕES - SETTINGS	66
APÊNDICE B: CHAVE ESTATÍSTICA	68
ANEXOS	71
ANEXO 1: Submódulo 23.3 – Diretrizes e critérios para estudos elétricos.	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sobretensões devido à energização de uma linha de transmissão.	14
Figura 2. Sobretensões devido ao religamento de uma linha de transmissão – sem compensação em derivação.	15
Figura 3. Sobretensões devido ao religamento de uma linha de transmissão – modelo trifásica – sem compensação em derivação.	16
Figura 4 - Sobretensões devido ao religamento de uma linha de transmissão – modelo trifásica – com compensação em derivação.....	16
Figura 5. Modelo de resistor de pré-inserção.	19
Figura 6. Comparação entre sobretensão e valor do resistor de pré-inserção.	20
Figura 7. Influência de uma para-raios em linhas de transmissão.	21
Figura 8. Representação do Modelo LR Sym. 51 pelo ATP.	23
Figura 9. Representação do Modelo LCC pelo ATP.	24
Figura 10. Caixa de entrada de dados - LCC.	24
Figura 11. Exemplo de configurações na aba Data.	25
Figura 12. Representação do Modelo Type 92 pelo ATP.	25
Figura 13. Representação do sistema simulado no ATP.	26
Figura 14. Esquema de transposição da linha.	27
Figura 15. Representação da torre.	28
Figura 16. Tensão simulada no Receptor – Circuito 1.....	32
Figura 17. Detalhe da tensão simulada no Receptor – Circuito 1.	32
Figura 18. Tensão simulada no Receptor – Circuito 2.....	33
Figura 19. Detalhe da tensão simulada no Receptor – Circuito 2.	33
Figura 20. Corrente simulada no Receptor – Circuito 1.	33
Figura 21. Corrente simulada no Receptor – Circuito 2.	33
Figura 22. Tensão simulada no Transmissor – Circuito 1.	34
Figura 23. Detalhe da tensão simulada no Transmissor – Circuito 1.	34
Figura 24. Corrente simulada no Transmissor – Circuito 1.	34
Figura 25. Detalhe da corrente simulada no Transmissor – Circuito 1.	34
Figura 26. Tensão simulada no Transmissor – Circuito 2.	35
Figura 27. Detalhe da tensão simulada no Transmissor – Circuito 2.	35
Figura 28. Corrente simulada no Transmissor – Circuito 2.	35
Figura 29. Detalhe da corrente simulada no Transmissor – Circuito 2.	35
Figura 30. Tensão simulada no meio da linha – Circuito 1.	36
Figura 31. Detalhe da tensão simulada no meio da linha – Circuito 1.	36
Figura 32. Tensão simulada no meio da linha – Circuito 2.	36
Figura 33. Detalhe da tensão simulada no meio da linha – Circuito 2.	36
Figura 34. Valores máximos de sobretensão.	37
Figura 35. Tensão simulada no Receptor – Circuito 1.....	38
Figura 36. Detalhe da tensão simulada no Receptor – Circuito 1.	38
Figura 37. Corrente simulada no Receptor – Circuito 1.	39
Figura 38. Detalhe da corrente simulada no Receptor – Circuito 1.....	39
Figura 39. Tensão simulada no Receptor – Circuito 2.....	39
Figura 40. Detalhe da tensão simulada no Receptor – Circuito 2.	39

Figura 41. Corrente simulada no Receptor - Circuito 2.....	39
Figura 42. Detalhe da corrente simulada no Receptor - Circuito 2.....	39
Figura 43. Tensão simulada no Transmissor - Circuito 1.....	40
Figura 44. Detalhe da tensão simulada no Transmissor - Circuito 1.....	40
Figura 45. Tensão simulada no Transmissor - Circuito 2.....	41
Figura 46. Detalhe da tensão simulada no Transmissor – Circuito 2.....	41
Figura 47. Corrente simulada no Transmissor - Circuito 1.....	41
Figura 48. Corrente simulada no Transmissor - Circuito 2.....	41
Figura 49. Tensão simulada no meio da linha - Circuito 1.....	42
Figura 50. Detalhe da tensão simulada no meio da linha - Circuito 1.....	42
Figura 51. Tensão simulada no meio da linha - Circuito 2.....	42
Figura 52. Detalhe da tensão simulada no meio da linha - Circuito 2.....	42
Figura 53. Valores máximos de sobretensão.....	43
Figura 54. Tensão simulada no Receptor - Circuito 1.....	47
Figura 55. Tensão simulada no Receptor - Circuito 2.....	47
Figura 56. Tensão simulada no Receptor - Circuito 1 – Fase A.....	47
Figura 57. Tensão simulada no Receptor - Circuito 2 – Fase A.....	47
Figura 58. Corrente simulada no Receptor - Circuito 1 – Fase A.....	48
Figura 59. Detalhe da corrente simulada no Receptor – Circuito 1 – Fases B e C.....	48
Figura 60. Detalhe da corrente simulada no Receptor durante o religamento – Circuito 1.....	48
Figura 61. Tensão simulada no Transmissor - Circuito 1.....	49
Figura 62. Tensão simulada no Transmissor - Circuito 1 – Fase A.....	49
Figura 63. Tensão simulada no Transmissor - Circuito 2.....	50
Figura 64. Tensão simulada no Transmissor - Circuito 2 – Fase A.....	50
Figura 65. Corrente simulada no Transmissor - Circuito 1 – Fase A.....	51
Figura 66. Detalhe da corrente simulada no Transmissor – Circuito 1 – Fases B e C.....	51
Figura 67. Detalhe da corrente simulada no Transmissor durante o religamento – Circuito 1.....	51
Figura 68. Tensão simulada no meio da linha - Circuito 1.....	52
Figura 69. Tensão simulada no meio da linha - Circuito 1.....	52
Figura 70. Tensão simulada no meio da linha - Circuito 2.....	53
Figura 71. Tensão simulada no meio da linha - Circuito 2.....	53
Figura 72 - Valores máximos de sobretensão.....	54
Figura 73. Tensão simulada no Receptor - Circuito 1.....	55
Figura 74. Tensão simulada no Transmissor - Circuito 1 – Fase A.....	55
Figura 75. Tensão simulada no Receptor - Circuito 2.....	55
Figura 76. Tensão simulada no Receptor - Circuito 2 – Fase A.....	55
Figura 77. Corrente simulada no Receptor - Circuito 1- Fase A.....	56
Figura 78. Detalhe da corrente simulada no Receptor – Circuito 1 – Fases B e C.....	57
Figura 79. Detalhe da corrente simulada no Receptor durante o religamento – Circuito 1.....	57
Figura 80. Tensão simulada no Transmissor - Circuito 1.....	58
Figura 81. Tensão simulada no Transmissor - Circuito 2.....	58
Figura 82. Tensão simulada no Transmissor - Circuito 1 – Fase A.....	58
Figura 83. Tensão simulada no.....	58
Figura 84. Corrente simulada no Transmissor - Circuito 1 – Fase A.....	59

Figura 85. Detalhe da corrente simulada no Transmissor – Circuito 1 – Fases B e C.	59
Figura 86. Detalhe da corrente simulada no Transmissor durante o religamento – Circuito 1.	60
Figura 87. Tensão simulada no meio da linha - Circuito 1.	61
Figura 88. Tensão simulada no meio da linha - Circuito 2.	61
Figura 89. Detalhe da tensão simulada no meio da linha - Circuito 1 – Fase A.	61
Figura 90. Detalhe da tensão simulada no meio da linha - Circuito 2 – Fase A.	61
Figura 91 - Valores máximos de sobretensão.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. - Resistência de aterramento utilizada na modelagem.....	27
Tabela 2. - Dados dos reatores.....	29
Tabela 3. - Dados para o para-raios.	30
Tabela 4. – Resumo dos parâmetros de simulação.	31
Tabela 5. - Parâmetros de simulação da linha.	31
Tabela 6. - Valores de tensão e dados estatísticos.	32
Tabela 7. - Valores de tensão e dados estatísticos.	34
Tabela 8. - Valores de tensão e dados estatísticos.	36
Tabela 9. - Valores de tensão e dados estatísticos.	38
Tabela 10. - Valores de tensão e dados estatísticos.	40
Tabela 11. - Valores de tensão e dados estatísticos.	42
Tabela 12. – Resumo dos parâmetros de simulação.	45
Tabela 13. - Parâmetros de simulação da linha.	45
Tabela 14. - Valores de tensão e dados estatísticos.	46
Tabela 15. - Valores de tensão e dados estatísticos.	49
Tabela 16. - Valores de tensão e dados estatísticos.	52
Tabela 17. - Valores de tensão e dados estatísticos.	55
Tabela 18. - Valores de tensão e dados estatísticos.	58
Tabela 19. - Valores de tensão e dados estatísticos.	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em maior parte do tempo, sistemas elétricos operam em regime permanente em que tensão, corrente e frequência se encontram em valores próximos aos nominais. Porém, tais instalações estão sujeitas a ocorrência de inúmeras perturbações, as quais, possivelmente, podem ocasionar riscos à segurança operacional do sistema e podem levar o sistema a operar em um novo ponto de equilíbrio (LEMOS, 2008).

Os equipamentos do sistema devem ser projetados para suportar estas perturbações, as quais, normalmente, estão associadas a períodos transitórios. Dentre uma diversa gama de fenômenos, deve-se destacar aqueles de natureza eletromagnética, os quais se caracterizam, basicamente, por sobretensões e sobrecorrentes. Tais condições podem causar danos aos equipamentos e redução de sua vida útil (D'AJUZ et al, 1987).

Muito embora a aleatoriedade dos fenômenos transitórios em sistemas de transmissão, existem condições para que as sobretensões possam ter suas amplitudes limitadas, de forma que sejam compatíveis aos níveis aceitáveis dos equipamentos elétricos do sistema. Por isso, é preciso pesquisar e adaptar novas soluções cada vez mais eficientes para que os efeitos causados pelas sobretensões sejam menores (VALERO, 2007). Nesse contexto, o estudo dos impactos que podem ocorrer em um sistema elétrico é um dos mais importantes objetivos da análise transitória. Estes fenômenos causados por distúrbios de grande magnitude acarretam a geração e propagação de surtos no sistema os quais devem ser minimizados. Logo, o estudo deste fenômeno é fundamental para o desenvolvimento e planejamento de sistemas, avaliação de fenômenos rápidos para o dimensionamento de equipamentos e formação de estratégias capazes o suficiente de suportar tais variações, além de possibilitar a identificação de falhas antes de seu acontecimento e corrigi-las (LEMES, 2008).

A ocorrência de faltas ou chaveamento dos equipamentos produzem as denominadas sobretensões de manobra. Um aspecto importante sobre condição é a propriedade probabilística, o qual podem alcançar diferentes valores para uma determinada manobra, tendo em vista a dependência de alguns fatores, tais como o instante de fechamento do disjuntor, configuração do sistema, características dos equipamentos, entre outros (D'AJUZ et al, 1987).

As sobretensões transitórias ocorridas devido a estas manobras podem ser limitadas por métodos já bastante consagrados, como a utilização de resistores de pré-inserção, juntamente com para-raios nos terminais da linha (VALERO, 2007). Um outro método consiste em controlar o instante de fechamento do disjuntor através da utilização de um dispositivo de

controle e chave síncrona (D'AJUZ et al, 1987). Caso estas manobras não tenham medidas preventivas aplicadas, em casos mais extremos, a tensão no terminal do disjuntor pode chegar a valores acima de 5 p.u. (D'AJUZ et al, 1987).

Este trabalho de conclusão de curso tem por objetivo a avaliação de linhas de transmissão em momentos de energização e religamento tripolar, pelos terminais receptor e transmissor, a fim de contemplar o desempenho da linha nestas manobras. Estas avaliações utilizam o software ATP (Alternative Transients Program), o qual é amplamente utilizado pelo setor elétrico para o estudo de transitórios eletromagnéticos.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é a realização de simulações, no domínio do tempo, de uma linha de transmissão de energia elétrica, de forma a explorar as condições transitórias advindas de manobras de energização e religamento tripolar da linha de transmissão. O sistema elétrico será modelado no *software* ATP, o qual se apresenta como uma ferramenta adequada para este tipo de avaliação.

1.3 ESTRUTURA DESTE TRABALHO

Este estudo está organizado em quatro capítulos:

- Capítulo 1: Expõe as considerações iniciais, problemática, objetivos, justificativa e proposta do trabalho;
- Capítulo 2: Exibe os conceitos básicos necessários para o desenvolvimento do projeto, abordando a teoria relacionada à eletricidade, linhas de transmissão e surtos de manobra;
- Capítulo 3: Apresenta a descrição do sistema elétrico a ser simulado e analisado, contendo a metodologia para o desenvolvimento das simulações e os resultados obtidos.
- Capítulo 4: Refere as conclusões obtidas, destacando os pontos onde a simulação apresenta funcionamento equivalente a operações adequadas e os pontos onde se pode aprimorá-la, elencando possíveis atividades futuras dentro do projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SOBRETENSÕES DE MANOBRA

Sobretensão de manobra é uma tensão variável no tempo, ocorrida em fase-neutro ou entre fases, em um dado ponto do sistema, devido à manobra de equipamentos, faltas, rejeição de carga ou qualquer outra variação brusca na rede. Em geral, tal sobretensão é intensamente amortecida e de curta duração, sendo sua magnitude influenciada pela configuração do sistema e pela potência de curto-circuito, bem como pelas características dos equipamentos e do instante na onda de tensão em que se ocorreu a manobra (D'AJUZ et al, 1987).

Embora este tipo de sobretensão esteja diretamente relacionado à operação dos disjuntores, estes equipamentos não são responsáveis por causá-las. Pelo contrário, eles proporcionam redução e controle, como por exemplo a utilização de resistores de pré-inserção e de chaveamento controlado dos seus contatos (DANTAS, 2007). Neste estudo, será dado ênfase às sobretensões de manobra provenientes da energização e religamento tripolar de linhas de transmissão.

A energização e o religamento de linhas de transmissão são manobras que ocorrem com frequência em sistemas elétricos de potência. Estas manobras podem ocasionar elevados níveis de sobretensão devido aos efeitos de propagação e reflexão de ondas eletromagnéticas nas linhas. D'AJUZ et al (1987) aponta as mais importantes condições do sistema para a ocorrência de sobretensão de manobras de energização e religamento de linha de transmissão:

- Parâmetros do sistema alimentador:
 - a. Potência de curto-circuito;
 - b. Tensão de pré-manobra;

- Parâmetros da linha de transmissão:
 - c. Comprimento da linha;
 - d. Grau de compensação;
 - e. Perdas no condutor;
 - f. Presença de equipamentos de proteção;
 - g. Resistência de aterramento do sistema;
 - h. Valor da tensão residual na linha;

- Parâmetros da manobra:
 - i. Ponto na onda de tensão em que o disjuntor é fechado;
 - j. Valor do resistor de pré-inserção;
 - k. Tempo de inserção do resistor;
 - l. Dispersão entre os contatos do disjuntor.

2.1.1 Energização de Linhas de Transmissão

A energização de linhas de transmissão deve ser considerada sob o ponto de vista trifásico, tanto para o disjuntor quanto para a linha de transmissão, uma vez que as três fases não são fechadas simultaneamente devido à dispersão mecânica dos contatos do disjuntor. De tal modo que, devido a perturbação eletromagnética que uma fase exerce na outra, após o fechamento do primeiro polo as fases não energizadas sofrem influência de transitórios, que se superpõem aos transitórios de energização, quando os respectivos polos se fecham (DANTAS, 2007).

A Figura (1) apresenta uma forma de onda típica de uma manobra de energização em uma fase de uma linha de transmissão, obtida a partir de simulações pelo *software* ATP. Na Figura (1) o instante 0,5 segundos representa o momento em que ocorre a energização da linha de transmissão. Após este instante, no sinal de tensão medido no terminal a ser energizado, ocorre um período transitório com duração de poucos milissegundos, momento em que os maiores valores de sobretensão são atingidos. Após este período transitório, o sistema alcança o regime permanente.

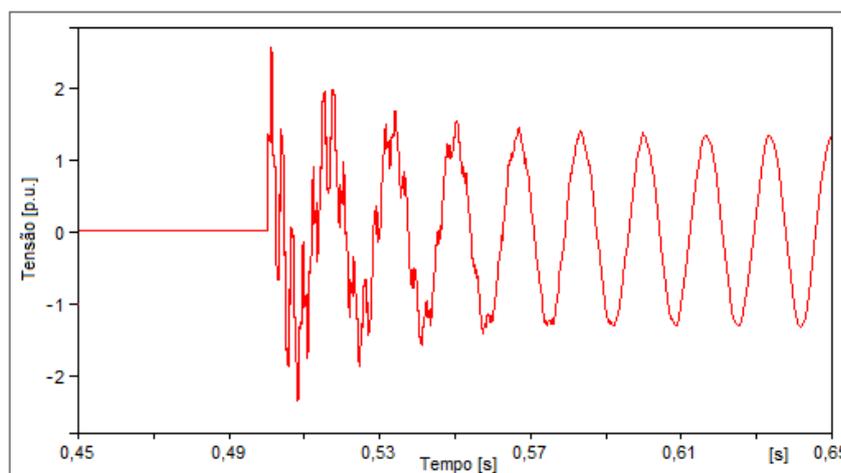


Figura 1. Sobretensões devido à energização de uma linha de transmissão.

2.1.2 Religamento de Linhas de Transmissão

No momento em que o fornecimento de energia elétrica é interrompido de forma não programada por meio do desligamento de uma linha de transmissão, realiza-se o religamento automático da linha, a fim de restabelecer o fornecimento de energia e garantir a estabilidade do sistema. A abertura e religamento da linha podem ser do tipo monofásico ou trifásico, as quais são definidas em função do esquema de proteção adotado e da causa da interrupção (DANTAS, 2007).

A diferença entre um religamento e energização de uma linha de transmissão consiste no fato de que, no religamento, ocorre a presença de cargas residuais no instante da manobra, ao contrário da energização. O decaimento da carga residual de uma linha em aberto, quando não há o uso de equipamentos especiais, é muito lento. Todavia, existem relatos na literatura de que este tempo pode ser reduzido com o uso de resistores de abertura acoplados ao disjuntor e transformadores de potencial indutivos conectados à linha (D'AJUZ et al, 1987).

A Figura (2) ilustra as sobretensões provenientes de uma manobra de religamento com a presença de uma carga residual na linha de -1 p.u.. A Figura (3) ilustra as sobretensões provenientes de uma manobra de religamento trifásico com a presença de diferentes cargas residuais para cada fase da linha de transmissão. A Figura (4) ilustra as sobretensões provenientes de uma manobra de religamento trifásico com a compensação em derivação da linha. As Figuras (2), (3) e (4) foram obtidas a partir de simulações no *software* ATP.

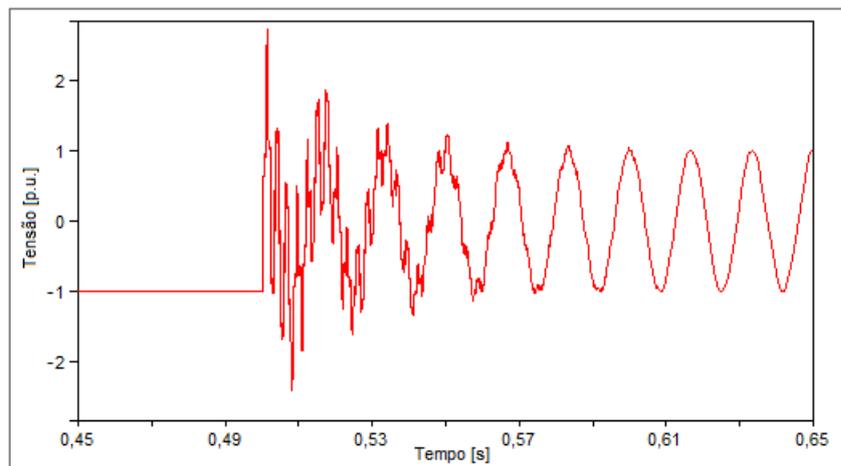


Figura 2. Sobretensões devido ao religamento de uma linha de transmissão – sem compensação em derivação.

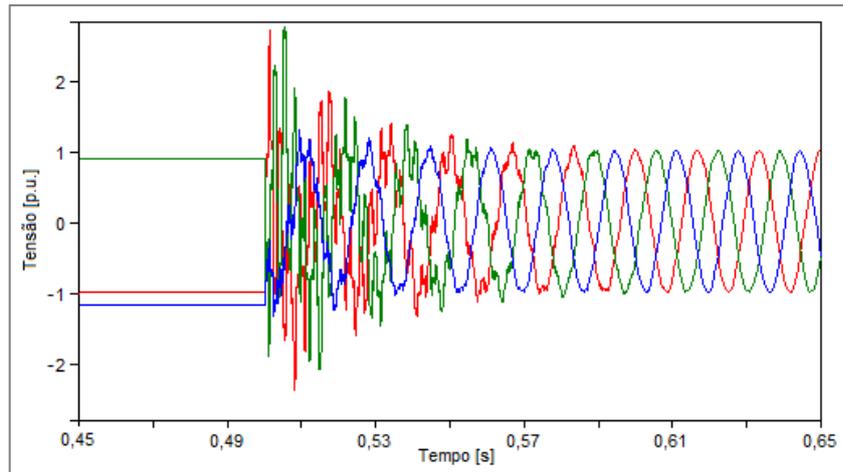


Figura 3. Sobretensões devido ao religamento de uma linha de transmissão – modelo trifásica – sem compensação em derivação.

Caso a linha de transmissão seja compensada por reatores em derivação, o comportamento da carga residual retida na linha assume forma oscilatória por causa do circuito formado por esta capacitância e a indutância dos reatores, conforme demonstra a Fig. (4), em que no instante 0,2 segundos ocorre a abertura da linha, que permanece neste estado até o instante 0,5 segundos, onde acontece o religamento da linha.

Esta oscilação em geral tem uma frequência menor que a frequência nominal do sistema, normalmente sendo valores entre 30 e 55 Hz, dependendo do grau de compensação da linha (DANTAS, 2007).

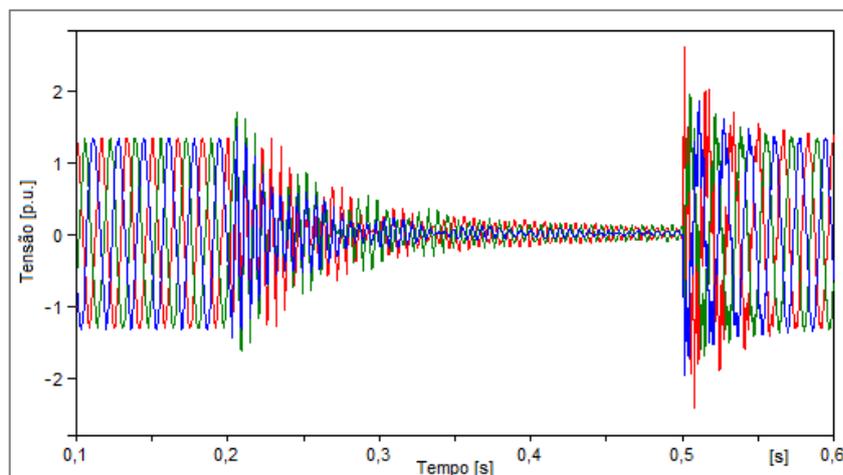


Figura 4 - Sobretensões devido ao religamento de uma linha de transmissão – modelo trifásica – com compensação em derivação.

Para melhor entendimento da natureza oscilatória da carga residual é considerada uma linha compensada com reatores em derivação e, assim, determina-se a frequência de oscilação da carga residual desprezando a reatância da linha por ser bem inferior à do reator.

Conforme D'AJUZ et al (1987), de início, são definidas as seguintes grandezas:

- f_{60} - Frequência fundamental de operação do sistema elétrico (60 Hz);
- f_l - Frequência de oscilação da carga residual na linha de transmissão;
- L_r - Indutância equivalente do reator;
- C_l - Capacitância equivalente da linha de transmissão;
- Q_l - Potência reativa capacitiva da linha de transmissão;
- Q_r - Potência do reator;
- V - Tensão nominal da linha de transmissão.

Assim, a frequência natural de oscilação do circuito formado entre a capacitância da linha e a indutância do reator é dada por:

$$f_l = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_l}} \quad (1)$$

Sabendo-se que as potências reativas da linha e do reator podem ser escritas da seguinte maneira:

$$Q_r = \frac{V^2}{\omega L_r} \quad (2)$$

$$Q_l = V^2 \omega C_l \quad (3)$$

Pelas equações (2) e (3) podemos chegar a:

$$L_r = V^2 / (\omega Q_r) \quad (4)$$

$$C_l = \frac{Q_l}{\omega V^2} \quad (5)$$

Definindo o grau de compensação da linha como:

$$k = \frac{Q_r}{Q_l} \quad (6)$$

Substituindo as Equações (4) e (5) na Equação (1), tem-se que:

$$f_l = \frac{\omega}{2\pi} \sqrt{k} = f_{60} \sqrt{k} \quad (7)$$

Assim, a frequência natural de oscilação do circuito formado entre a capacitância da linha e a indutância do reator, a qual é a frequência de oscilação da carga residual, é dada pela equação (7). Desta forma, para um grau de compensação de 70%, por exemplo, a carga residual na linha de transmissão irá oscilar a uma frequência de aproximadamente 50,2 Hz. Enquanto que para um grau de compensação de 40%, a frequência de oscilação da carga residual será de aproximadamente 37,9 Hz.

2.2 MÉTODOS DE LIMITAÇÃO DE SOBRETENSÕES

Nesta seção, apresentam-se métodos típicos para limitação de sobretensões oriundas de energização e religamento de linhas de transmissão, sendo elas: resistor de pré-inserção, para-raios e instante de fechamento do disjuntor.

2.2.1 Resistor de Pré-inserção

Um dos métodos mais efetivos utilizados em sistemas de potência para a redução de sobretensões transitórias, provenientes de manobras de chaveamento em linhas de transmissão, é o resistor de pré-inserção, o qual pode ser concebido pelo fechamento sequencial de duas chaves, tal como representado na Fig. (5). Inicialmente, quando a linha de transmissão é

energizada, se fecha o contato auxiliar contendo o resistor em série com a fonte e a linha. Após um curto período de tempo o contato principal se fecha, curto-circuitando o resistor e trazendo para a linha a tensão nominal da fonte (D'AJUZ et al, 1987).

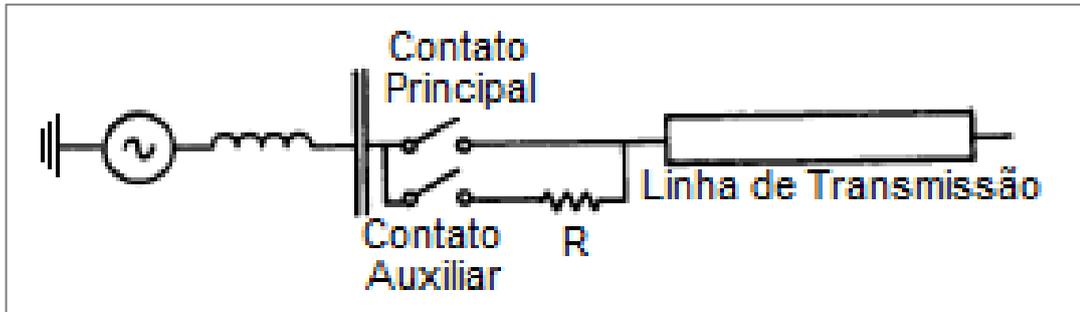


Figura 5. Modelo de resistor de pré-inserção.
Fonte: D'AJUZ et al, 1987.

Desta forma, podemos considerar que a linha é energizada em dois estágios. No primeiro estágio, fechando o contato auxiliar contendo o resistor, reduz-se as ondas de tensão aplicadas à linha devido ao divisor de tensão entre o resistor de pré-inserção e a própria linha. Assim, podemos esperar que, aumentando o valor do resistor, diminua-se as amplitudes das sobretensões, porém, no segundo estágio o resistor é posto em curto-circuito, o qual acarreta na criação de novas sobretensões, que aumentam com o valor da resistência (D'AJUZ et al, 1987).

Entretanto, apesar de que cada estágio produzir sobretensões ao longo da linha, ao ser realizar a escolha adequada do valor da resistência e do tempo de inserção do resistor, garante-se que as amplitudes das sobretensões sejam menores àquelas que seriam geradas sem a presença do resistor (DANTAS, 2007). Na Figura (6) tem-se um exemplo de como a sobretensão de manobras de religamento ou energização podem ser controladas com o uso de resistores de pré-inserção de acordo com o valor de sua resistência.

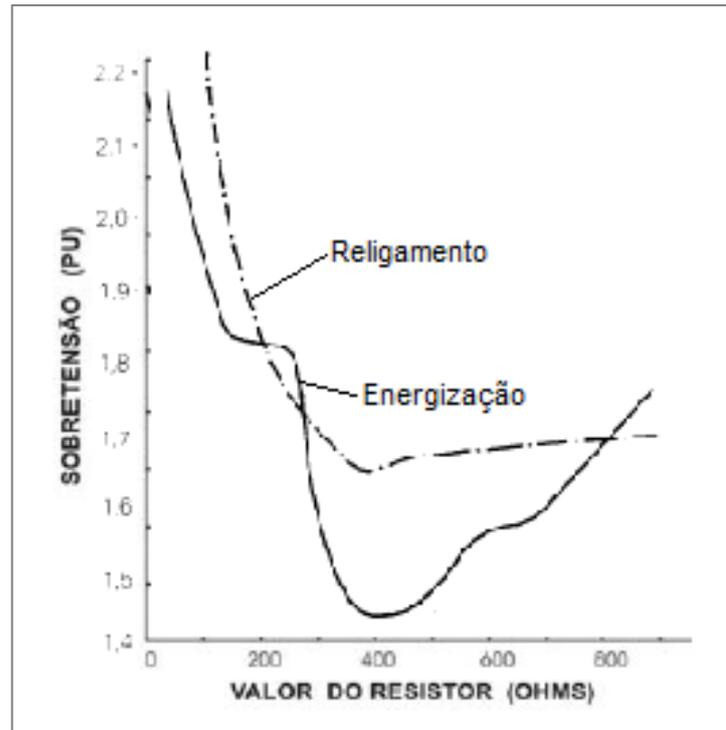


Figura 6. Comparação entre sobretensão e valor do resistor de pré-inserção.
Fonte: D'AJUZ et al, 1987.

2.2.2 Para-raios

Normalmente a solução adotada para a limitação de sobretensões de manobra de energização e religamento de linha são o aumento do nível de isolamento da linha e/ou o uso de resistores de pré-inserção (DANTAS, 2007). No entanto, adotaram-se soluções alternativas como o uso de chaveamento controlado e para-raios de Óxido de Zinco (ZnO) localizados nos terminais das linhas de transmissão ou, quando necessário, em outros pontos ao longo da linha (VALERO, 2007).

Na Figura (7), tem-se um comparativo das sobretensão de manobra quando da conexão de um para-raios em uma linha de transmissão.

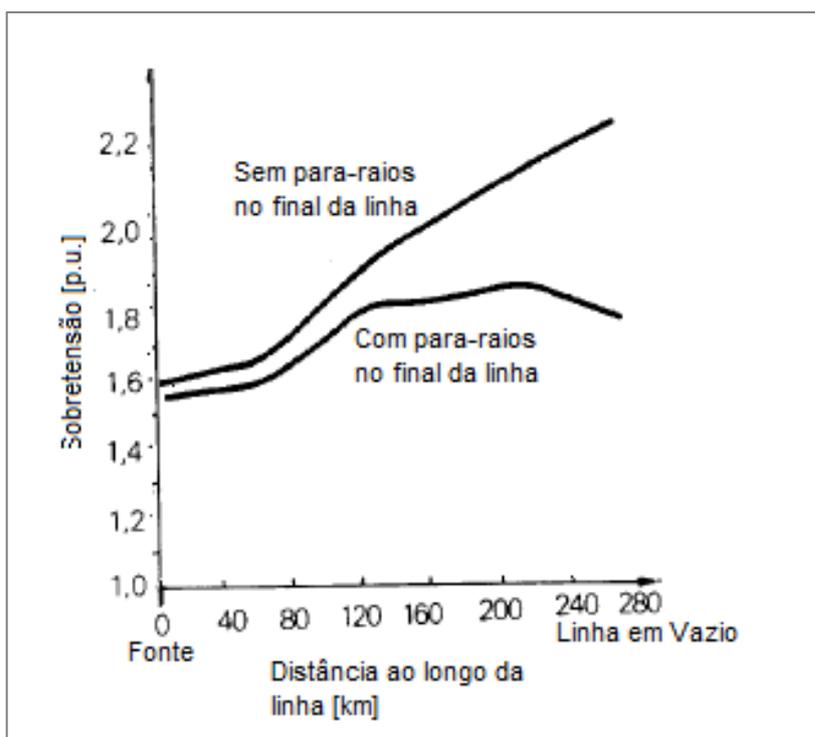


Figura 7. Influência de uma para-raios em linhas de transmissão.
Fonte: D'AJUZ et al, 1987.

Mesmo com a utilização dos para-raios, o resistor de pré-inserção não pode ser eliminado, e ainda por razões diversas, o uso do chaveamento controlado surge como uma alternativa, por ser capaz de reduzir as sobretensões transitórias e a energia dissipada pelos para-raios a níveis mais adequados (DANTAS, 2007).

2.2.3 Instante de fechamento do disjuntor

Outro método para reduzir as sobretensões de manobra de energização e religamento, é através do controle do instante de fechamento do disjuntor, por meio de uma chave síncrona. A propagação de sobretensões é iniciada quando a corrente circula pelo disjuntor, o que pode ocorrer antes mesmo do acoplamento físico dos contatos caso a tensão entre esses contatos seja suficiente para levar à ruptura do dielétrico do meio isolante, acarretando assim o surgimento do arco-elétrico.

A degradação da qualidade da energia e a redução da vida útil dos equipamentos do sistema elétrico são exemplos de problema que podem ser reduzidos usando o controle sobre a abertura e o fechamento dos contatos dos disjuntores, de forma que a manobra seja realizada em um instante ótimo conhecido. Como consequência das ondas viajantes, para o chaveamento de linhas de transmissão, o instante ótimo ocorre quando a tensão entre os contatos do disjuntor

é zero (DANTAS, 2007). O D'AJUZ et al (1987) diz que, considerando que linhas de transmissão são predominantemente sistemas trifásicos, para satisfazer esta condição, pode-se utilizar duas possibilidades de fechamento do disjuntor:

- a. Fechar as três fases simultaneamente, quando a tensão de apenas umas das fases é zero;
- b. Fechar as três fases consecutivamente, quando a tensão em cada uma delas for zero.

2.3 SOFTWARE DE SIMULAÇÃO - ATP

O ATP (*Alternative Transient Program*) se apresenta como uma plataforma computacional destinada à modelagem e simulação de circuitos e sistemas elétricos transitórios. Este programa é amplamente conhecido e difundido no setor elétrico nacional e internacional, tendo em vista que o mesmo corresponde a um software de domínio livre e permite a realização de diversos tipos de estudos investigativos contemplando condições de funcionamento de um complexo elétrico sob condições de regime permanente, dinâmico e transitório.

O ATP possui uma biblioteca constituída por um grande número de modelos elétricos, tais como: fontes de alimentação, chaves, linhas de transmissão, cabos, máquinas elétricas, cargas, transformadores, entre outros. Tais modelos encontram-se representados por parâmetros concentrados ou distribuídos, apresentando, ainda, possibilidades de inserção de eventuais não linearidades.

Outro ponto de destaque se refere à existência de uma linguagem de programação própria, chamada MODELS. Tal funcionalidade permite, a partir de um algoritmo, a modelagem de dispositivos e sistemas de controle não convencionais, tendo em vista sua avaliação de desempenho.

Baseado nos recursos disponibilizados pelo software ora descrito, e em atenção aos objetivos próprios deste trabalho, esta seção se destina à descrição da metodologia para a inserção, na base computacional preexistente, da estrutura física e das estratégias de controle apresentadas.

2.3.1 Modelagem de Linhas de Transmissão

Uma linha de transmissão de energia elétrica é o dispositivo que permite a ligação entre um centro produtor e o centro consumidor de energia elétrica. As linhas de transmissão possuem quatro parâmetros que influenciam em seu comportamento como componentes de um sistema de potência: resistência, indutância, capacitância e condutância (REIS et al, 2013).

Um problema relevante para o projeto e operação de uma linha de transmissão é a permanência da tensão, em vários pontos do sistema, dentro dos limites estabelecidos, seja para proteção de equipamentos, qualidade do serviço ou por leis e normas. Por isso a modelagem de linhas se faz necessária, visando soluções a este problema.

O menu de linhas de transmissão e cabos na biblioteca do ATP encontram-se em diferentes tipos de modelos:

LUMPED – Modelos de linhas de transmissão com parâmetros concentrados:

- Modelo Π : 1, 2 ou 3 fases;
- Elementos R-L acoplados mutuamente: 2, 3 ou 6 fases;
- Linha simétrica com elementos R-L acoplados: 3 ou 6 fases;

DISTRIBUTED – Modelos de linhas de transmissão com parâmetros distribuídos e constantes:

- Linhas transpostas – Modelo *Clarke*: 1, 2, 3, 6 e 9 fases;
- Linhas sem transposição – Modelo *KCLee*: 2 ou 3 fases;
- LCC (Line Constant, Cable Constants and Cables Constants) – Modelos de linhas e cabos com parâmetros constantes e dependentes da frequência: Modelos Bergeron, Π , Jmarti, Noda ou Semlyen.

2.3.1.1 LR Sym. 51

Este é um tipo de linha de transmissão de parâmetros concentrados, simétrica e com elementos de resistência e indutância acoplados. Nele, inserimos os valores de resistência e indutância para a sequência zero e sequência positiva.

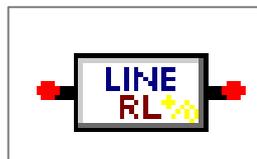


Figura 8. Representação do Modelo LR Sym. 51 pelo ATP.

2.3.1.2 LCC

O elemento LCC no software ATP baseia-se na inserção dos parâmetros geométricos da linha e as características dos materiais utilizados. Assim, a partir destes dados, o LCC calcula os parâmetros elétricos das linhas e cabos.

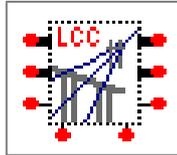


Figura 9. Representação do Modelo LCC pelo ATP.

A Figura (10) apresenta a tela principal de parametrização do elemento LCC, em que se define o tipo de linha a ser simulado, bem como a metodologia de cálculo dos parâmetros equivalentes. A aba *Data* se destina à inserção dos dados geométricos e características elétricas dos condutores, conforme a Fig. (11).

Line/Cable Data

Model | Data

System type

Overhead Line #Ph: 3

Overhead Line
Single Core Cable
Enclosing Pipe
Auto bundling

Skin effect
 Segmented ground
 Real transf. matrix

Units
 Metric
 English

Standard data

Rho [ohm*m] 0
Freq. init [Hz] 0
Length [km] 0

Model

Type

Bergeron
 Pl
 JMarti
 Semlyen
 Noda

Comment: Order: 0 Label: Hide

OK Cancel Import Save As Run ATP View Verify Edit icon Help

Figura 10. Caixa de entrada de dados - LCC.

	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]
1	1	0	1.2573	0.0913	0	25.36	11.36
2	2	0	1.2573	0.0913	0	21.59	7.585
3	3	0	1.2573	0.0913	5.2	23.5	9.5
4	4	0	0.47625	3.913	2.6	33.8	17.8

Figura 11. Exemplo de configurações na aba Data.

2.3.1.3 Para-raios – MOV Tope 92

No modelo *Tope 92*, podemos encontrar dois tipos de parâmetros: O primeiro é o para-raios de ZnO, e o outro é a resistência não-linear por fase, o qual devemos fornecer alguns pontos da curva entre tensão e corrente (V x I) divulgada pelo fabricante do para-raios.

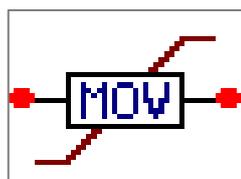


Figura 12. Representação do Modelo Type 92 pelo ATP.

Este componente é a representação dos para-raios colocados em cada extremo da linha de transmissão.

Para os cabos para-raios, presentes por toda a linhas de transmissão, os materiais usados nos cabos em geral são aço, alumínio e alumínio-liga. Assim, podemos encontrar os seguintes tipos de cabos para-raios (REIS, 2013):

- Cabos de aço galvanizado: composto de fios de aço galvanizado encordoados, de alta ou extra alta resistência mecânica;
- Cabos CAA: compostos de uma ou mais camadas de fios de alumínio encordoados em torno de um fio ou cabo de aço, denominado alma. São utilizados quando a linha de transmissão apresenta elevada corrente de curto-circuito;

- Cabos OPGW (*Optical Ground Wire*): Os cabos OPGW são constituídos por fios de alumínio-liga e/ou aço alumínio, encordoados em torno de um núcleo onde se encontram as fibras óticas, que permitem a transmissão de dados por meio digital, aumentando a confiabilidade e facilitando o gerenciamento do sistema de transmissão.

2.3.1.4 Chave Estatística

As chaves estatísticas são utilizadas para simular o disjuntor de forma a considerar a dispersão existente entre os tempos de fechamento de cada polo de contato. Estas chaves têm os tempos de fechamento gerados conforme uma distribuição estatística do tipo uniforme ou gaussiana, cujos parâmetros, tempo médio e desvio padrão, são definidos manualmente.

As chaves estatísticas são utilizadas para uma única manobra e existe a possibilidade de definir uma relação mestre-escravo: os tempos de manobra da chave “escrava” são gerados a partir da chave “mestre”. É possível ainda que a abertura de uma chave seja estatística.

O Apêndice 2 detalha a parametrização da chave estatística.

3 SIMULAÇÕES E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações referentes sobretensões para o caso de energização de linhas de transmissão.

3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO

Para o estudo utilizou-se como base uma linha de transmissão de 230 kV com 345,12 km de extensão, representados por uma combinação de 8 componentes do tipo LCC, sendo estes divididos em seis componentes de comprimento de 50 km e outros dois de 22,56 km, como mostrado na Fig. (13).

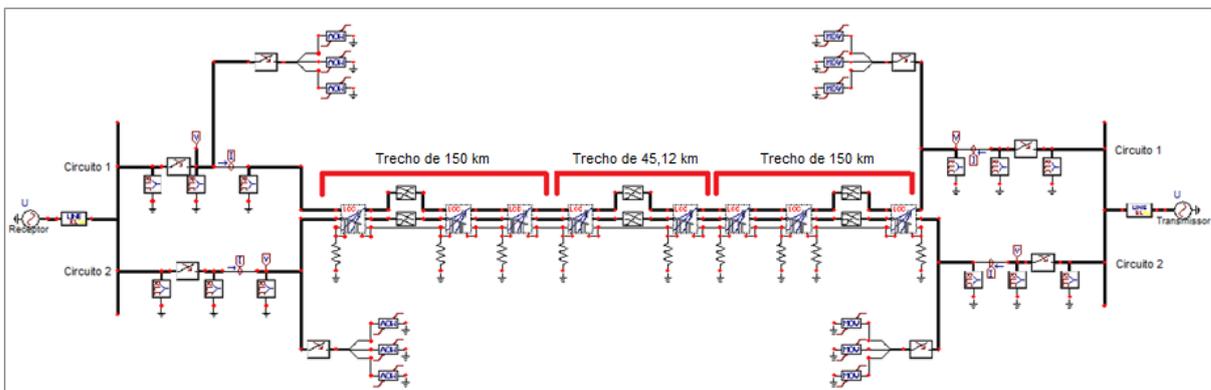


Figura 13. Representação do sistema simulado no ATP

A divisão do comprimento total da linha em oito trechos possibilita o cumprimento de alguns requisitos, tais como: viabilizar a simulação de faltas ao longo da extensão da linha de transmissão, representar a transposição de fases ao longo da linha e inserir os valores de resistência de aterramento para as diversas torres que compõem o sistema e que variam de acordo com a distância percorrida na linha de transmissão, como representados na Tab. (1).

Tabela 1. - Resistência de aterramento utilizada na modelagem.

Distância progressiva, a partir do terminal Receptor (m)	Resistência de aterramento medida (Ω)
0,71	12,85
50.028,00	14,20
99.963,00	16,64
150.000,00	35,00
172.593,00	54,50
195.035,00	52,40
245.120,00	61,10
295.000,00	30,50
345.120,27	5,66

A transposição da linha foi feita de forma externa ao LCC, em harmonia com as distâncias recomendadas, conforme a Fig. (14).

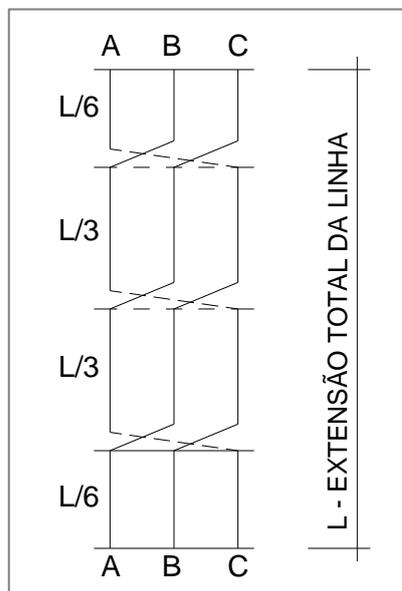


Figura 14. Esquema de transposição da linha.

3.1.1 Linha de Transmissão

A estrutura correspondente à linha de transmissão do sistema analisado é mostrada na Fig. (15). Os parâmetros geométricos das torres, assim como a posição dos condutores e para-raios, foram considerados para o uso no modelo LCC.

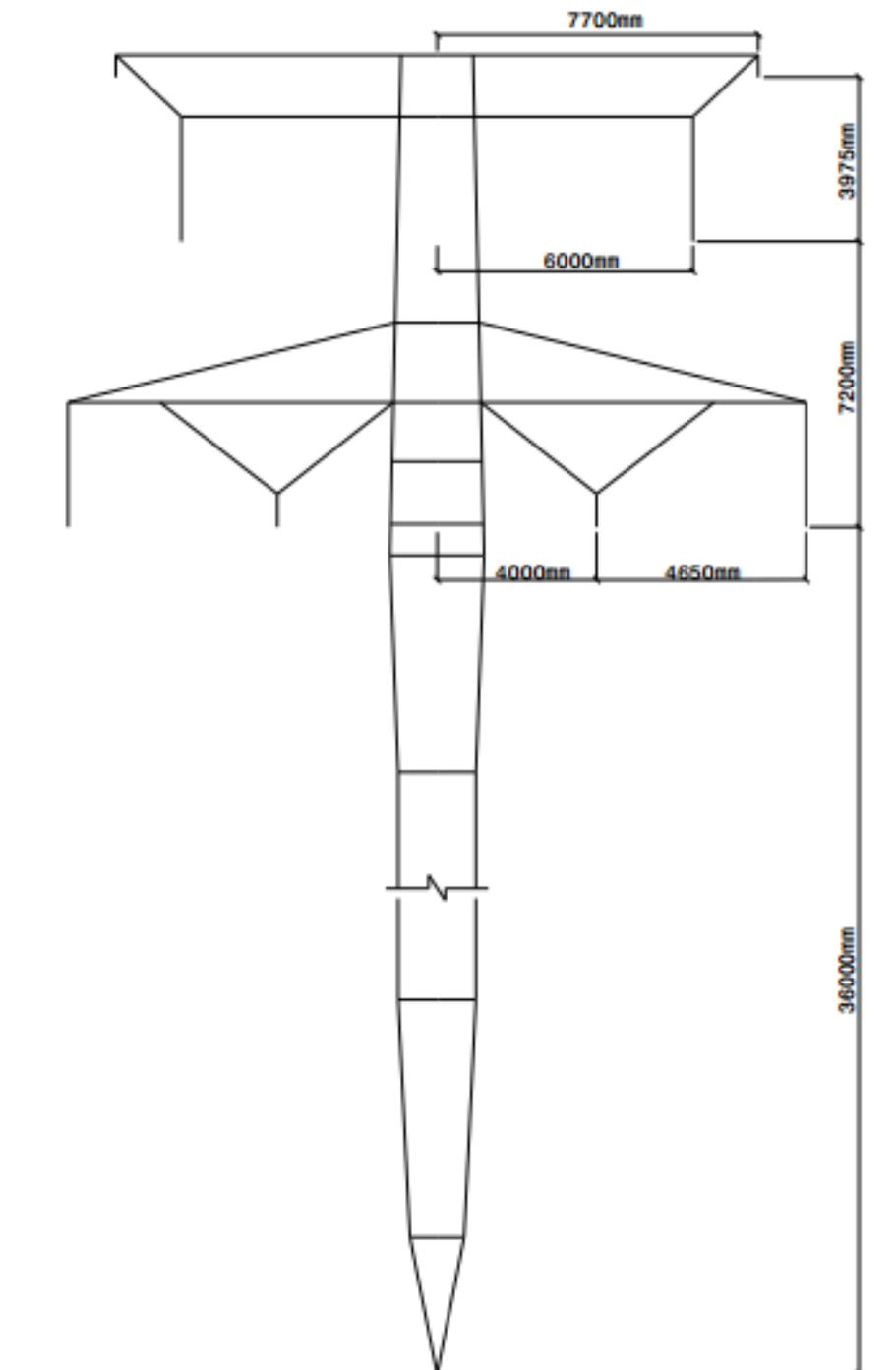


Figura 15. Representação da torre.

As especificações referentes aos condutores, mostrando suas principais características, bem como a resistividade do solo considerada.

- Conductor de fase:
 - Raio interno: 0,29945 cm;
 - Raio externo: 1,1713cm;
 - Resistência elétrica DC, a 20°C: 0,071918 Ω /km;
 - Altura do condutor em relação ao solo: 8,0 m.

- Cabo Para-raios 1:
 - Cabo para-raios OPGW;
 - Raio externo: 0,618 cm;
 - Resistência elétrica DC, a 20°C: 0,485 Ω /km;
 - Flecha do condutor, a 50°C: 20,405 m.

- Cabo Para-raios 2:
 - Cabo para-raios EAR;
 - Raio externo: 0,4035 cm;
 - Resistência elétrica DC, a 20°C: 3,368 Ω /km;
 - Flecha do condutor, a 50°C: 20,405 m.

- Resistividade do solo (ρ): 1000 Ω .m.

- Efeito pelicular é considerado da modelagem.

3.1.2 Reatores

A Tabela (2) apresenta os parâmetros dos reatores utilizados na simulação, a partir de uma associação série de indutores, considerando a resistência da bobina.

Tabela 2. - Dados dos reatores.

Barramento	Linha de Transmissão	Potência	Resistência do Enrolamento	Tensão
Transmissor	Circuito 1	30 MVAR	2,7 Ω	230 kV
	Circuito 2			
Receptor	Circuito 1			
	Circuito 2			

3.1.3 Para-raios

Para a modelagem dos para-raios, utilizou-se os dados constantes na Tabela (3). O componente “MOV – Type 92” foi utilizado para representação computacional no ATP.

Tabela 3. - Dados para o para-raios.

Corrente (A)	Tensão (kV)
100	410
200	420
500	445
1000	461
2000	473

3.1.4 Disjuntores

Com relação aos disjuntores, os mesmos foram representados através de chaves estatísticas, as quais são disponibilizadas no ATP. Ressalta-se que tais dispositivos foram modelados sem resistores de fechamento devido a simplicidade do equipamento (VALERO, 2007) e para facilitar a simulação. Para as capacitâncias parasitas, adotou-se um valor típico de 50 nF (CIGRE, 1972). Este valor expressa a capacitância equivalente dos diversos equipamentos existentes em subestações desta classe de tensão e não apenas o disjuntor.

3.2 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS – ENERGIZAÇÃO

Para as simulações, será seguido as instruções dadas segundo o Submódulo 23.3 – Diretrizes e critérios para estudos elétricos (Anexo 1), disponibilizado pelo Operador Nacional do Sistema de Transmissão (ONS). O recomendado por esta norma é para que, estudos estatísticos, devam ser efetuados por análise probabilística a execução de pelo menos, 200 (duzentos) casos, de forma a assegurar a representação estatística do estudo. O sistema empregado foi simulado por um período de 1 segundo. O tempo imposto para o fechamento dos polos do disjuntor segundo a chave estatística foi de 0,2 segundos, havendo desvio de 5,5 milissegundos, a fim de se representar a dispersão mecânica dos polos do disjuntor. Deste modo, a chave estatística irá, para cada caso simulado, apresentar um valor aleatório para o fechamento do disjuntor para cada fase, partindo do tempo estipulado e estando dentro do desvio informado.

Tabela 4. – Resumo dos parâmetros de simulação.

Parâmetro	Descrição
Passo de Integração	10^{-6}
Tempo de simulação (s)	1,0
Tipo de Simulação	Domínio do Tempo (<i>Time Domain</i>)
Instante de Fechamento do Disjuntor (s)	0,2
Distribuição	Gaussiana
Desvio (s)	0,0055

No final da simulação destes duzentos casos, o ATP fornece um parâmetro geral dos casos analisados, listando os maiores valores de sobretensão obtidos e, mostrando as maiores sobretensões, além da média de tensão analisada para todos os casos e seu desvio padrão. O Apêndice 2 exemplifica o arquivo de saída de uma simulação estatística.

Para as simulações, foram usados os equivalentes elétricos da Tabela 5, nas extremidades da linha:

Tabela 5. - Parâmetros de simulação da linha.

Terminal	Tensão (kV)	R+ (Ω)	X+ (mH)	R0 (Ω)	X0 (mH)
Transmissor	230	1,4409	57,3369	2,9975	72,3004
Receptor	230	6,4448	174,0368	10^{-6}	0,1402

As simulações foram divididas em dois casos:

- Caso 1: Energização de Linha de Transmissão pelo terminal do Receptor: as chaves estatísticas se encontram apenas no Circuito 1 e Circuito 2 no terminal do Receptor. O terminal do Transmissor se encontra em aberto;
- Caso 2: Energização de Linha de Transmissão pelo terminal do Transmissor: as chaves estatísticas se encontram apenas no Circuito 1 e Circuito 2 no terminal do Transmissor. O terminal do Receptor se encontra em aberto.

Para as figuras nos tópicos a seguir, a fase A será representada pela cor vermelha, a fase B pela cor verde e a fase C pela cor azul.

A análise da operação da linha de transmissão sob condição de Energização está presente ao longo dos tópicos a seguir:

3.2.1 Resultados - Energização pelo terminal receptor

Para a condição de energização da linha de transmissão a partir do terminal do receptor e, que o terminal do transmissor se encontra a vazio, temos os seguintes resultados:

3.2.1.1 Comportamento do Terminal Receptor

A Tabela (6) mostra, para cada circuito e fase analisada no terminal do Receptor, o valor nominal de tensão da fonte, o valor máximo de sobretensão encontrado após as duzentas simulações realizadas, a tensão média considerando todas estas simulações e seu desvio-padrão.

Tabela 6. - Valores de tensão e dados estatísticos.

Fase	Tensão Nominal		Valor Máximo		Tensão Média (p.u.)	Desvio-padrão
	p.u.	kV	p.u.	kV		
Circuito 1						
A	1	187,794	1,40	262,912	1,1420	0,0761
B			1,50	281,691	1,1432	0,0785
C			1,40	262,912	1,1408	0,0746
Circuito 2						
A	1	187,794	1,40	262,912	1,1460	0,0784
B			1,45	272,301	1,1437	0,0727
C			1,40	262,912	1,1453	0,0730

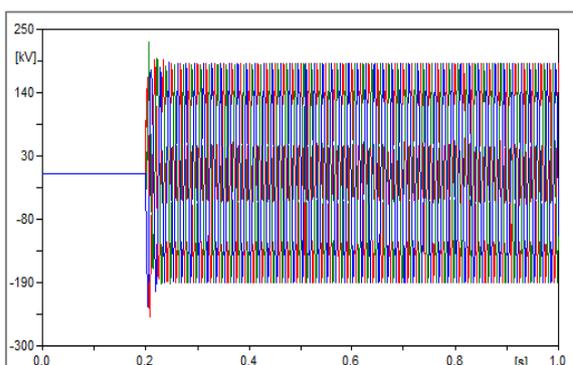


Figura 16. Tensão simulada no Receptor – Circuito 1.

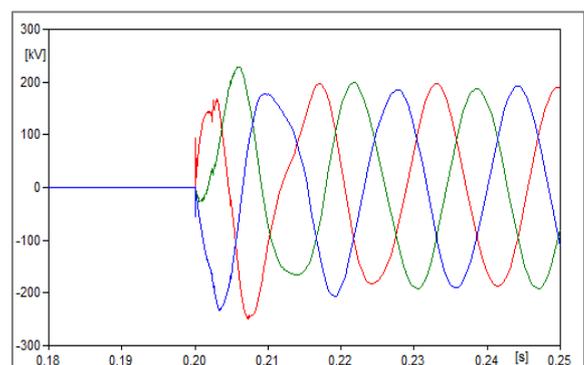


Figura 17. Detalhe da tensão simulada no Receptor – Circuito 1.

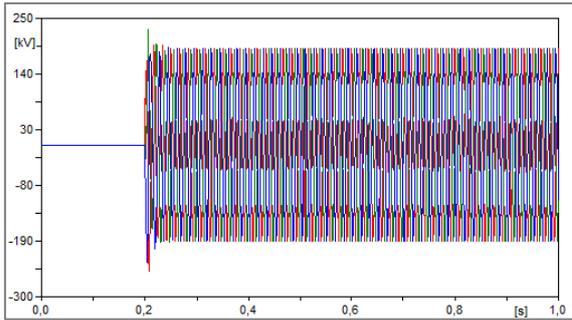


Figura 18. Tensão simulada no Receptor – Circuito 2.

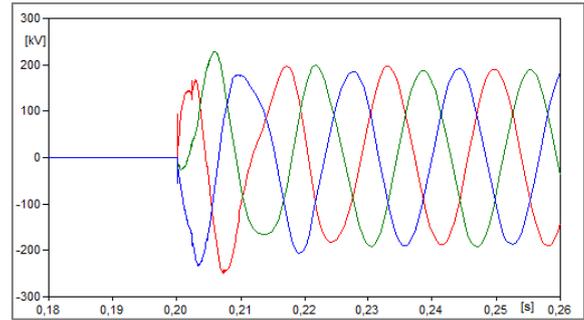


Figura 19. Detalhe da tensão simulada no Receptor – Circuito 2.

Como esperado, o valor de tensão se mantém nulo até o momento de fechamento do disjuntor, conforme as Figs. (16), (17), (18) e (19). Momento em que se observam as sobretensões e deformação das formas de onda nos primeiros milissegundos de energização da linha. Após este breve instante as tensões de cada fase se estabilizam, alcançando os valores nominais em regime permanente. A faixa de valores para os dois circuitos se mostram parecidas, tanto para as tensões máximas quanto para as médias.

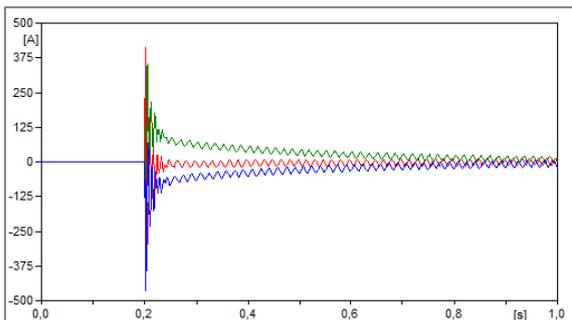


Figura 20. Corrente simulada no Receptor – Circuito 1.

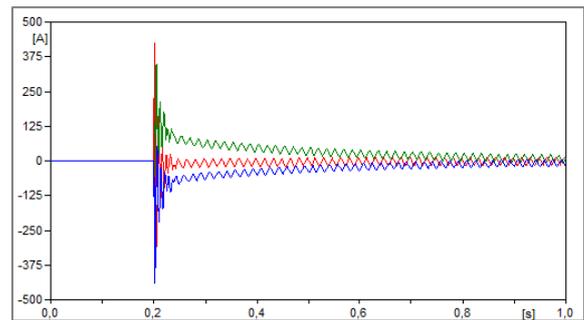


Figura 21. Corrente simulada no Receptor – Circuito 2.

Os valores de corrente são nulos até o momento de fechamento do disjuntor, onde ocorrem picos e, devido aos intervalos de fechamento dos polos serem diferentes, as ondas das fases B e C se encontram fora do eixo das abscissas, mas em menos de 1 segundo se estabilizam em valores nominais e em regime permanente.

3.2.1.2 Comportamento do Terminal Transmissor

A Tabela (7) mostra, para cada circuito e fase analisada no terminal do Transmissor, o valor nominal de tensão da fonte, o valor máximo de sobretensão encontrado após as duzentas simulações realizadas, a tensão média considerando todas estas simulações e seu desvio-padrão.

Tabela 7. - Valores de tensão e dados estatísticos.

Fase	Tensão Nominal		Valor Máximo		Tensão Média (p.u.)	Desvio-padrão
	p.u.	kV	p.u.	kV		
Circuito 1						
A	1	187,794	1,80	338,029	1,3515	0,1605
B			1,80	338,029	1,3265	0,1399
C			2,05	384,978	1,3900	0,1723
Circuito 2						
A	1	187,794	1,95	366,198	1,3825	0,1725
B			1,85	347,419	1,3500	0,1488
C			1,85	347,419	1,3800	0,1457

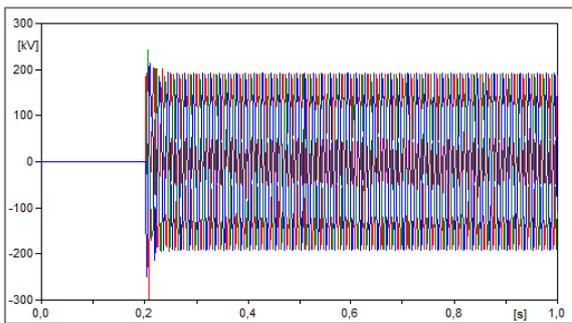


Figura 22. Tensão simulada no Transmissor – Circuito 1.

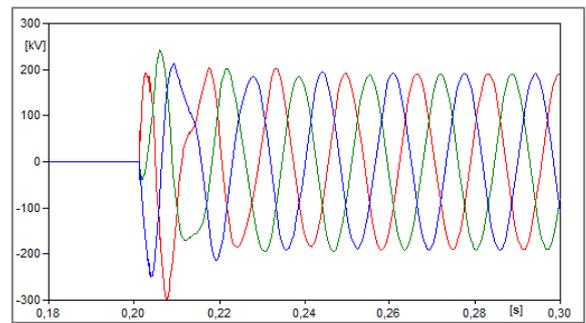


Figura 23. Detalhe da tensão simulada no Transmissor – Circuito 1.

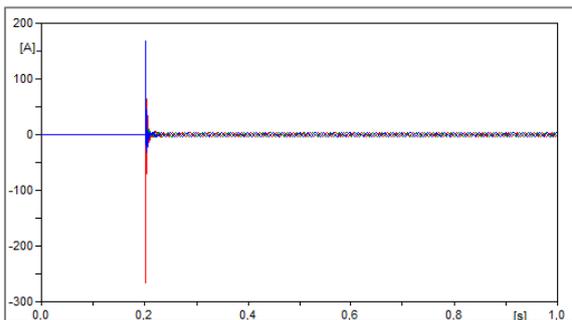


Figura 24. Corrente simulada no Transmissor – Circuito 1.

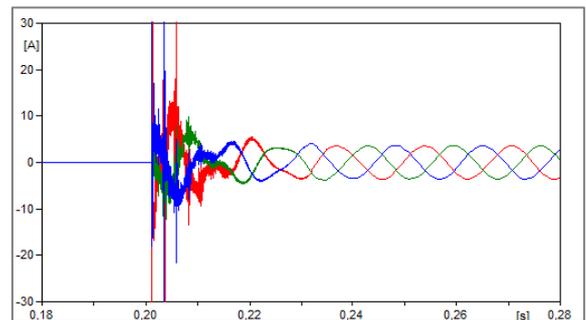


Figura 25. Detalhe da corrente simulada no Transmissor – Circuito 1.

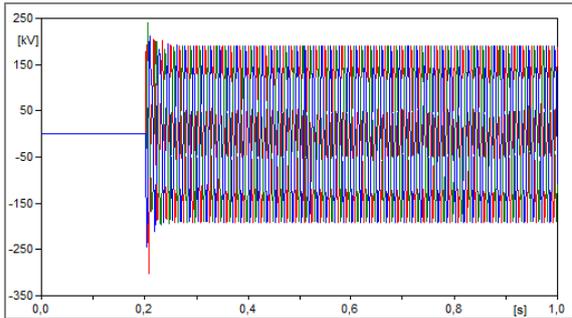


Figura 26. Tensão simulada no Transmissor – Circuito 2.

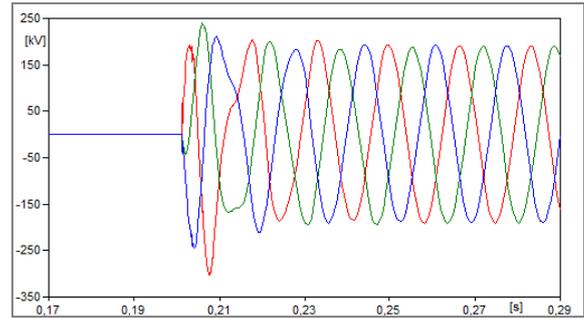


Figura 27. Detalhe da tensão simulada no Transmissor – Circuito 2.

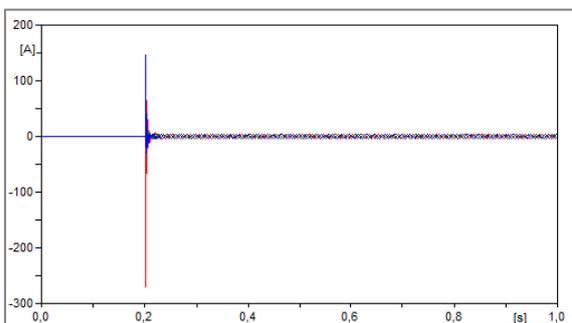


Figura 28. Corrente simulada no Transmissor – Circuito 2.

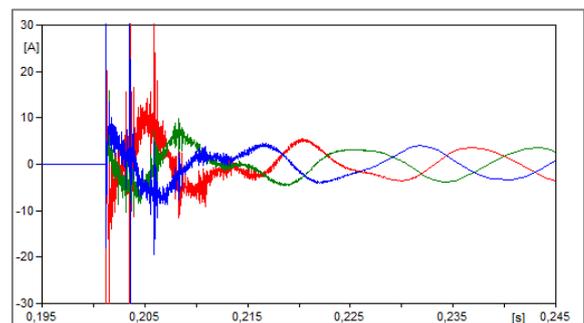


Figura 29. Detalhe da corrente simulada no Transmissor – Circuito 2.

Conforme esperado, os valores de tensão e corrente se mantêm nulos até o momento de fechamento do disjuntor, conforme as Figs. (22) a (29). Momento em que se observam as sobretensões e deformação das formas de onda nos primeiros milissegundos de energização da linha. Após este breve instante as tensões e correntes de cada fase se estabilizam, alcançando os valores nominais em regime permanente. A faixa de valores para os dois circuitos se mostram equivalentes para os valores médios, já para os valores máximos de sobretensão o Circuito 1 foi o que apresentou o maior valor analisado.

3.2.1.3 Meio da Linha

A Tabela (8) mostra, para cada circuito e fase analisada no meio da linha, o valor nominal de tensão da fonte, o valor máximo de sobretensão encontrado após as duzentas simulações realizadas, a tensão média considerando todas estas simulações e seu desvio-padrão.

Tabela 8. - Valores de tensão e dados estatísticos.

Fase	Tensão Nominal		Valor Máximo		Tensão Média (p.u.)	Desvio-padrão
	p.u.	kV	p.u.	kV		
Circuito 1						
A	1	187,794	1,85	347,419	1,3625	0,1584
B			1,95	366,198	1,3412	0,1469
C			2,10	394,367	1,3978	0,1793
Circuito 2						
A	1	187,794	1,95	366,198	1,3858	0,1753
B			2,00	375,588	1,3685	0,1446
C			1,95	366,198	1,3808	0,1496

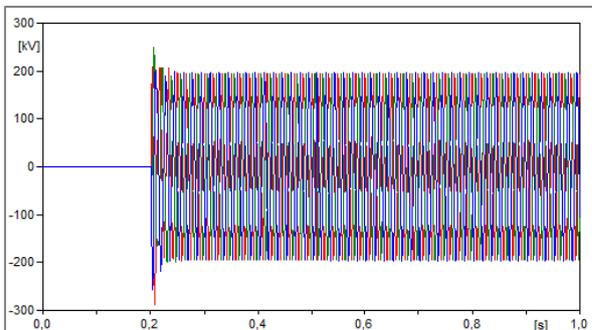


Figura 30. Tensão simulada no meio da linha – Circuito 1.

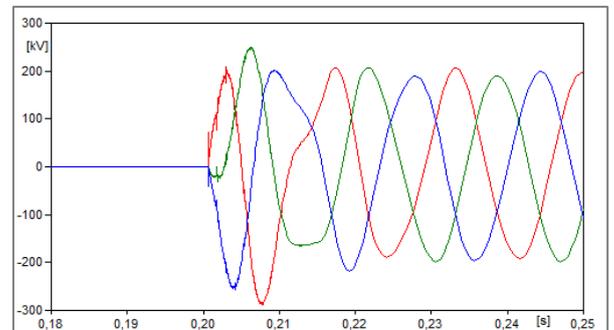


Figura 31. Detalhe da tensão simulada no meio da linha – Circuito 1.

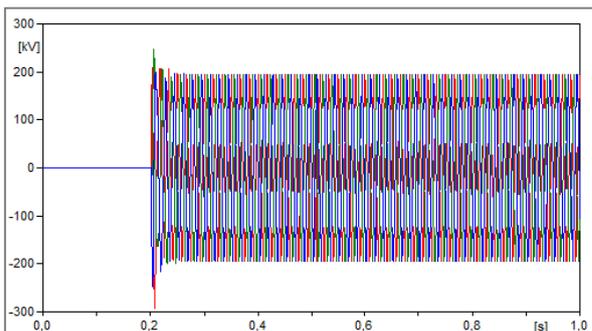


Figura 32. Tensão simulada no meio da linha – Circuito 2.

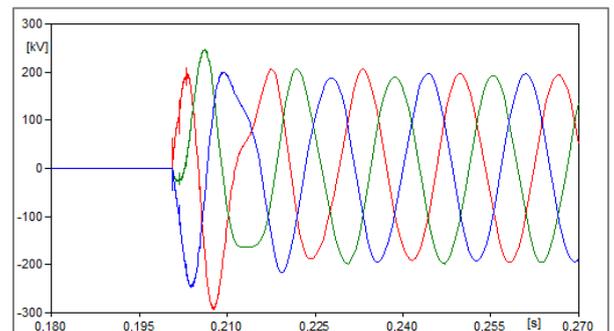


Figura 33. Detalhe da tensão simulada no meio da linha – Circuito 2.

Como esperado, o valor de tensão se mantém nulo até o momento de fechamento do disjuntor, conforme as Figs. (30), (31), (32) e (33). Momento em que se observam as sobretensões e deformação das formas de onda nos primeiros milissegundos de energização da linha. Após este breve instante as tensões de cada fase se estabilizam, alcançando os valores

nominais em regime permanente. A faixa de valores para os dois circuitos se mostram próximas, tanto para as tensões máximas quanto para as médias, com o Circuito 1 apresentando o maior valor médio analisado.

3.2.1.4 Considerações Finais

Na Figura (34) estão apresentados os valores máximos de sobretensões encontrados na simulação para o terminal do receptor, terminal do transmissor e no meio da linha, representando o valor de cada fase em seu respectivo circuito. Cada fase está representada com a legenda contendo sua sigla, e os Circuitos 1 e 2 estão representados pelos números 1 e 2, respectivamente. Então para a fase A no Circuito 1, encontraremos no gráfico o nome A1, por exemplo.

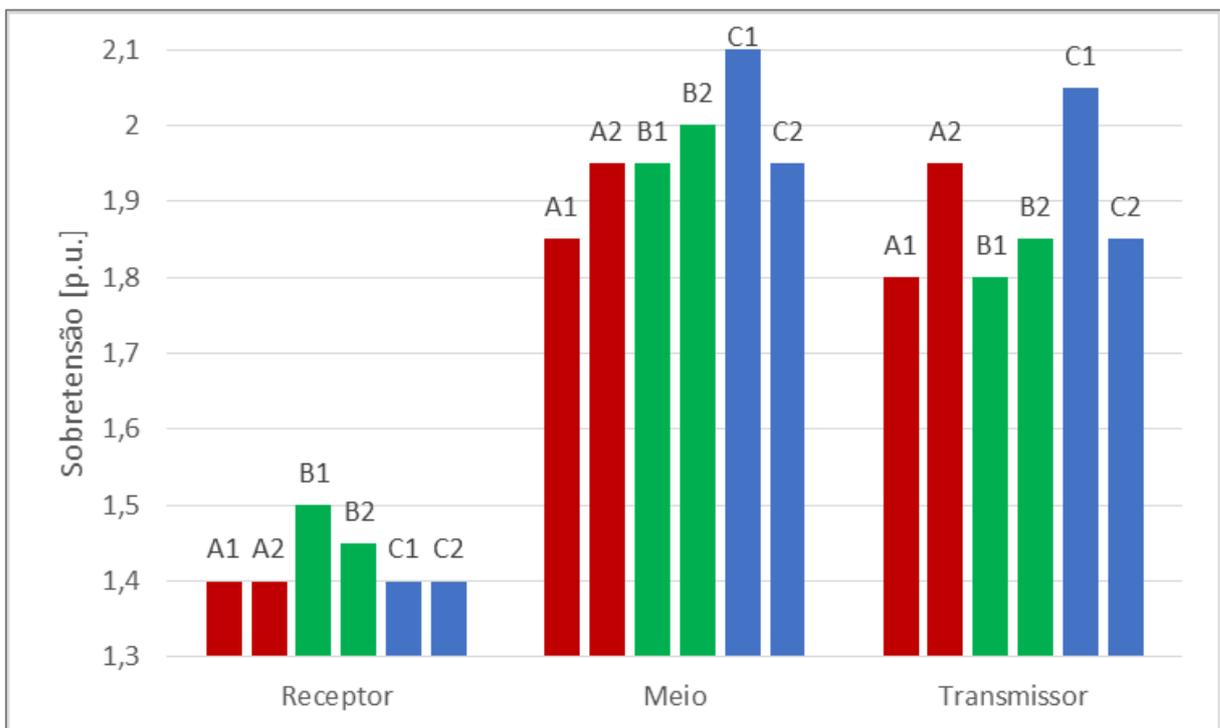


Figura 34. Valores máximos de sobretensão.

A partir da Figura (34) pode-se comprovar que os valores de sobretensão no Receptor são menores comparados ao meio da linha e ao terminal do Transmissor, por ser o ponto de partida da energização da linha, e também caracterizando o comportamento capacitivo da linha e o efeito Ferranti, onde a tensão aumenta ao longo da linha por estar em condição de carga em aberto.

3.2.2 Resultados - Energização pelo terminal transmissor

Para a condição de energização da linha de transmissão a partir do terminal do transmissor e, que o terminal do receptor se encontra a vazio, temos os seguintes resultados:

3.2.2.1 Terminal do Receptor

A Tabela (9) mostra, para cada circuito e fase analisada no terminal do Receptor, o valor nominal de tensão da fonte, o valor máximo de sobretensão encontrado após as duzentas simulações realizadas, a tensão média considerando todas estas simulações e seu desvio-padrão.

Tabela 9. - Valores de tensão e dados estatísticos.

Fase	Tensão Nominal		Valor Máximo		Tensão Média (p.u.)	Desvio-padrão
	p.u.	kV	p.u.	kV		
Circuito 1						
A	1	187,794	1,90	356,809	1,3545	0,1857
B			1,80	338,029	1,3512	0,1845
C			2,05	384,978	1,3888	0,1855
Circuito 2						
A	1	187,794	1,90	356,809	1,3980	0,1738
B			1,80	338,029	1,3530	0,1489
C			1,95	366,198	1,3810	0,1847

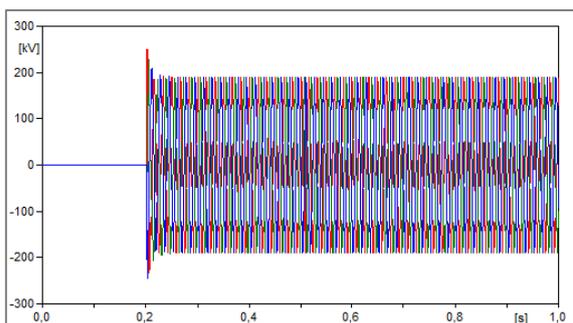


Figura 35. Tensão simulada no Receptor – Circuito 1.

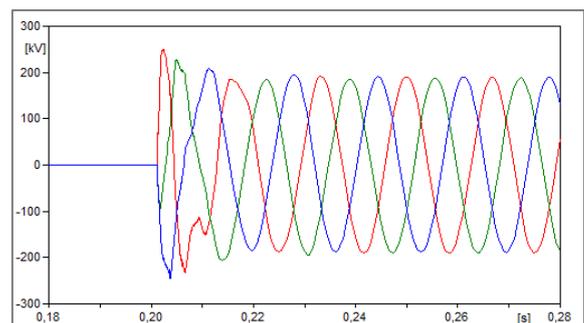


Figura 36. Detalhe da tensão simulada no Receptor – Circuito 1.

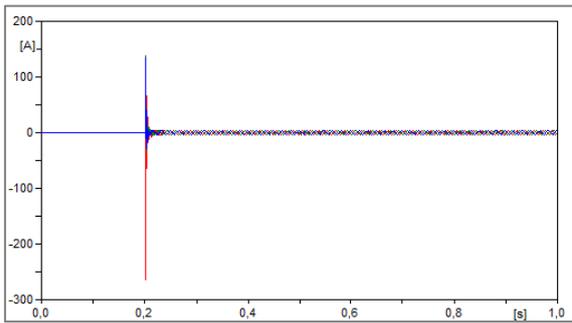


Figura 37. Corrente simulada no Receptor – Circuito 1.

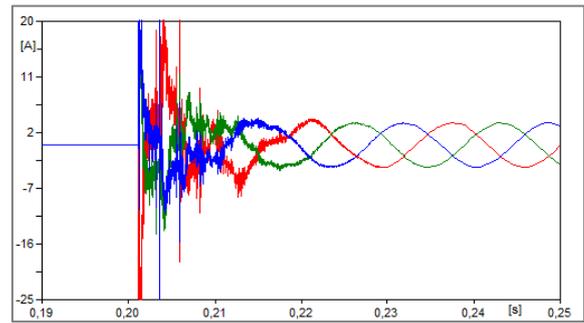


Figura 38. Detalhe da corrente simulada no Receptor – Circuito 1.

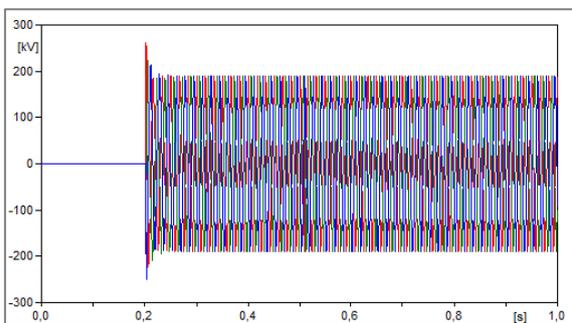


Figura 39. Tensão simulada no Receptor – Circuito 2.

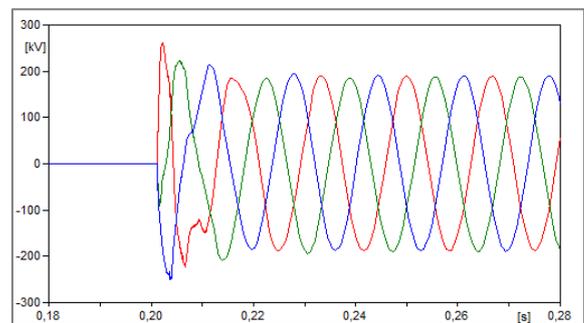


Figura 40. Detalhe da tensão simulada no Receptor – Circuito 2.

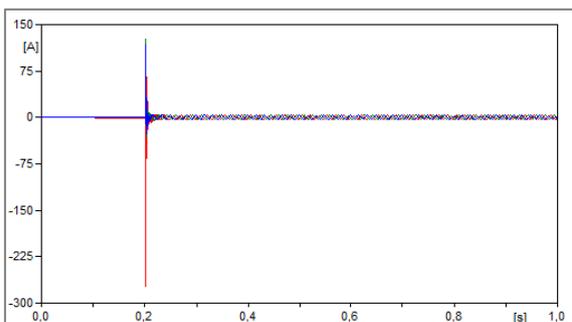


Figura 41. Corrente simulada no Receptor - Circuito 2.

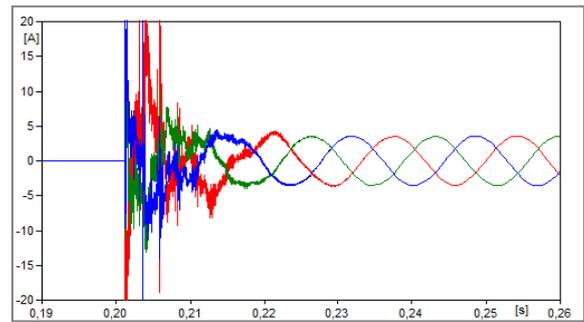


Figura 42. Detalhe da corrente simulada no Receptor - Circuito 2.

Conforme esperado, os valores de tensão e corrente se mantêm nulos até o momento de fechamento do disjuntor, conforme as Figs. (33) a (42). Momento em que se observam as sobretensões e deformação das formas de onda nos primeiros milissegundos de energização da linha de transmissão. Após este breve instante as tensões e correntes de cada fase se estabilizam, alcançando os valores nominais em regime permanente. A faixa de valores para os dois circuitos

se mostram parecidas para os valores médios, apesar do valor com maior sobretensão (Circuito 1, fase C) não ser a fase com maior média de tensão aferida (Circuito 2, fase A).

3.2.2.2 Terminal do Transmissor

A Tabela (10) mostra, para cada circuito e fase analisada no terminal do Transmissor, o valor nominal de tensão da fonte, o valor máximo de sobretensão encontrado após as duzentas simulações realizadas, a tensão média considerando todas estas simulações e seu desvio-padrão.

Tabela 10. - Valores de tensão e dados estatísticos.

Fase	Tensão Nominal		Valor Máximo		Tensão Média (p.u.)	Desvio-padrão
	p.u.	kV	p.u.	kV		
Circuito 1						
A	1	187,794	1,30	244,132	1,0825	0,0573
B			1,35	253,522	1,0838	0,0602
C			1,40	262,912	1,0925	0,0683
Circuito 2						
A	1	187,794	1,30	244,132	1,0875	0,0601
B			1,25	234,743	1,0805	0,0516
C			1,35	253,522	1,0878	0,0544

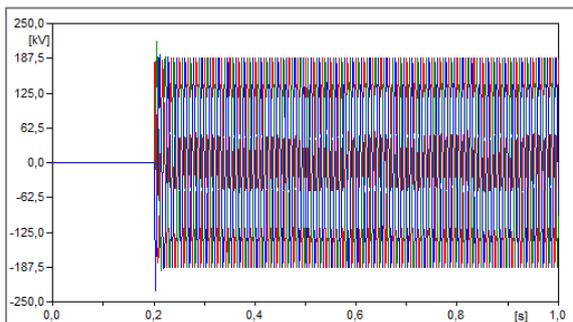


Figura 43. Tensão simulada no Transmissor - Circuito 1.

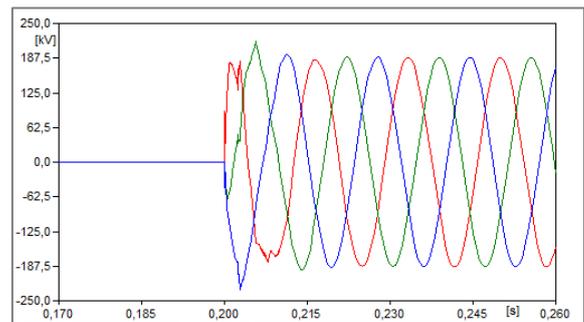


Figura 44. Detalhe da tensão simulada no Transmissor - Circuito 1.

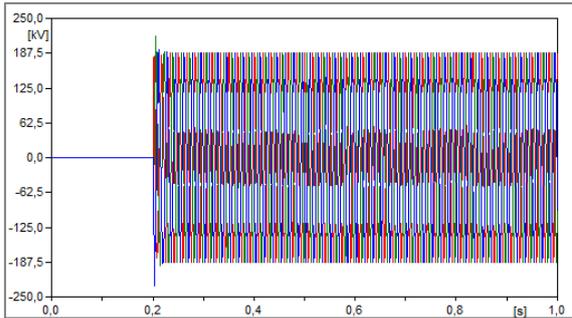


Figura 45. Tensão simulada no Transmissor - Circuito 2.

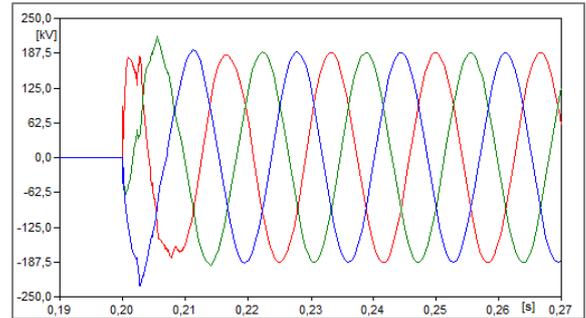


Figura 46. Detalhe da tensão simulada no Transmissor - Circuito 2.

Como esperado, o valor de tensão se mantém nulo até o momento de fechamento do disjuntor, conforme as Figs. (43), (44), (45) e (46). Momento em que se observam as sobretensões e deformação das formas de onda nos primeiros milissegundos de energização da linha. Após este breve instante as tensões de cada fase se estabilizam, alcançando os valores nominais em regime permanente. Os valores para os dois circuitos se mostram próximos, tanto para as tensões máximas quanto para as médias, com o Circuito 1 obtendo valores de sobretensões maiores.

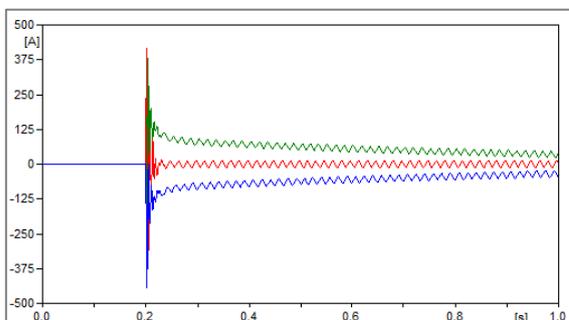


Figura 47. Corrente simulada no Transmissor - Circuito 1.

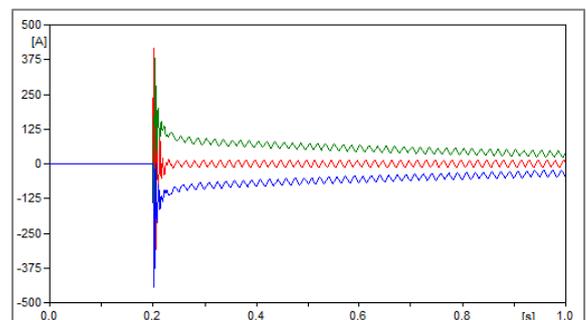


Figura 48. Corrente simulada no Transmissor - Circuito 2.

Os valores de corrente são nulos até o momento de fechamento do disjuntor, onde ocorrem picos e, devido aos intervalos de fechamento dos polos serem diferentes, as ondas das fases B e C se encontram fora do eixo das abscissas, mas em menos de 1 segundo se estabilizam em valores nominais e em regime permanente.

3.2.2.3 Meio da Linha

A Tabela (11) mostra, para cada circuito e fase analisada no meio da linha, o valor nominal de tensão da fonte, o valor máximo de sobretensão encontrado após as duzentas simulações realizadas, a tensão média considerando todas estas simulações e seu desvio-padrão.

Tabela 11. - Valores de tensão e dados estatísticos.

Fase	Tensão Nominal		Valor Máximo		Tensão Média (p.u.)	Desvio-padrão
	p.u.	kV	p.u.	kV		
Circuito 1						
A	1	187,794	1,85	347,419	1,3305	0,1783
B			1,90	356,809	1,3270	0,1687
C			1,95	366,198	1,3758	0,1907
Circuito 2						
A	1	187,794	1,85	347,419	1,3748	0,1787
B			1,80	338,029	1,3317	0,1534
C			1,85	347,419	1,3538	0,1789

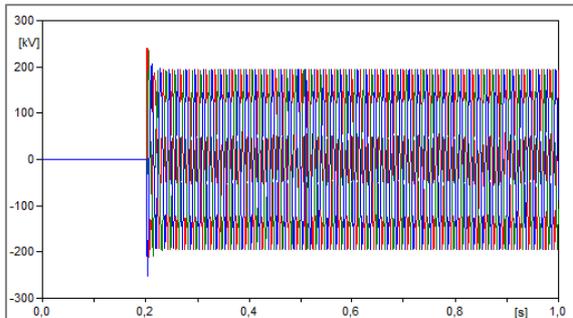


Figura 49. Tensão simulada no meio da linha - Circuito 1.

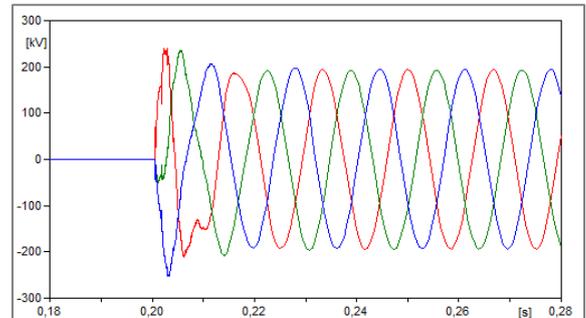


Figura 50. Detalhe da tensão simulada no meio da linha - Circuito 1

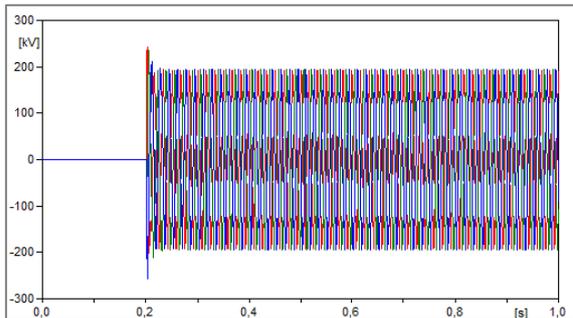


Figura 51. Tensão simulada no meio da linha - Circuito 2.

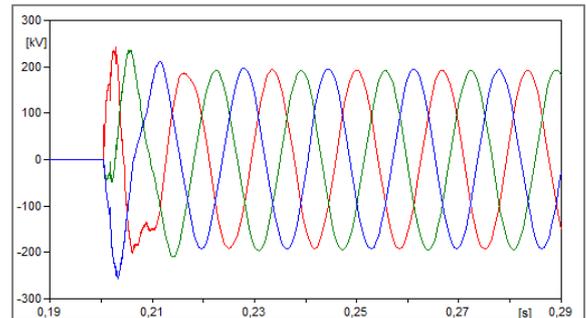


Figura 52. Detalhe da tensão simulada no meio da linha - Circuito 2.

Como esperado, o valor de tensão se mantém nulo até o momento de fechamento do disjuntor, conforme as Figs. (49), (50), (51) e (52). Momento em que se observam as sobretensões e deformação das formas de onda nos primeiros milissegundos de energização da linha. Após este breve instante as tensões de cada fase se estabilizam, alcançando os valores nominais em regime permanente. Os valores para os dois circuitos se mostram próximos, tanto para as tensões máximas quanto para as médias, com o Circuito 1 apresentando o maior valor médio analisado.

3.2.2.4 Considerações Finais

Na Figura (53) estão apresentados os valores máximos de sobretensões encontrados na simulação para o terminal do receptor, terminal do transmissor e no meio da linha, representando o valor de cada fase em seu respectivo circuito. Cada fase está representada com a legenda contendo sua sigla, e os Circuitos 1 e 2 estão representados pelos números 1 e 2, respectivamente. Então para a fase A no Circuito 1, encontraremos no gráfico o nome A1, por exemplo.

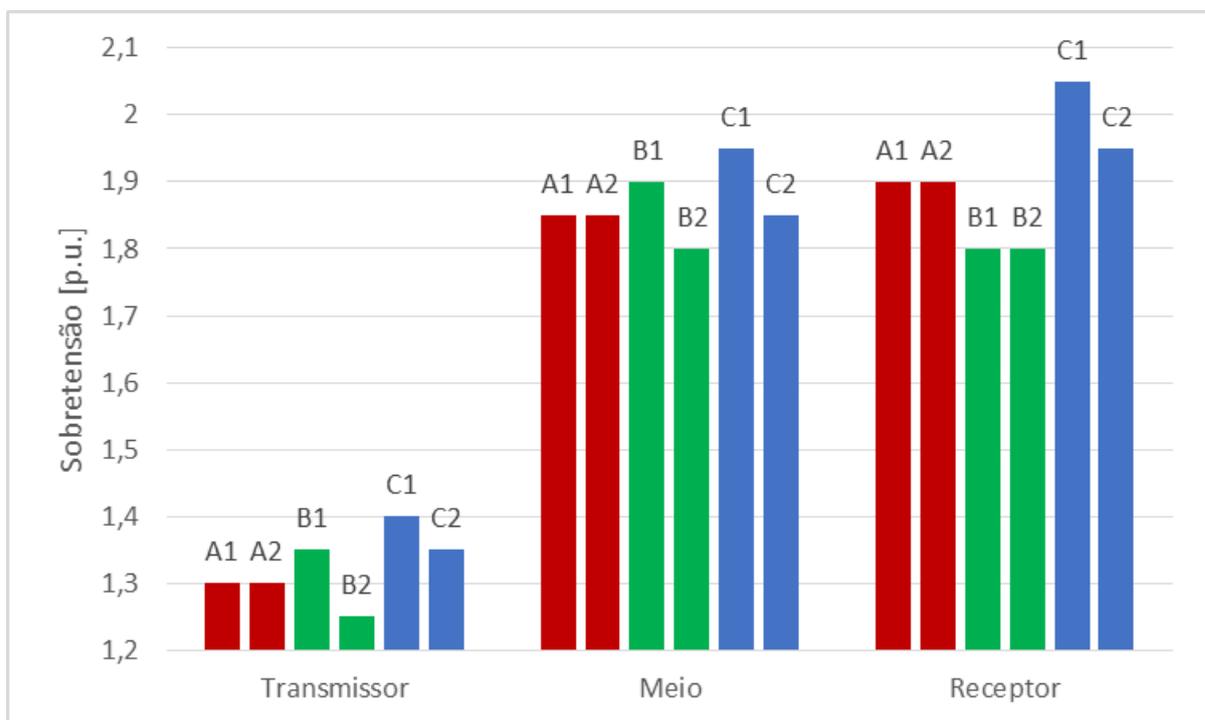


Figura 53. Valores máximos de sobretensão.

Com a Figura (53) podemos comprovar que os valores de sobretensão no Transmissor são menores comparados ao meio da linha e ao terminal do Receptor, por ser o ponto de partida da energização da linha, e também caracterizando o comportamento capacitivo da linha e o

efeito Ferranti, onde a tensão aumenta ao longo da linha por estar em condição de carga em aberto.

Os dados e figuras mostram que, para os dois casos de energização da linha de transmissão, a energização da linha pelo receptor apresenta valores máximos de sobretensão 7,1% maior em relação a energização pelo transmissor para a fase A, 13,8% para a fase B e 3,6% para a fase C, para o terminal o qual está sendo energizado.

No meio da linha, as maiores diferenças foram na fase B, com a energização pelo receptor apresentando o valor máximo de sobretensão 10,0% maior em relação a energização pelo transmissor.

Já no terminal oposto a energização, os valores de sobretensão máximos para o Circuito 1 não apresentaram diferenças em relação aos dois terminais de energização, com exceção da fase A o qual apresentou diferença de 5,6% da energização do transmissor em relação a energização do receptor. Porém, no Circuito 2 as fases A e B da energização pelo receptor apresentaram valores 2,7% maiores e, para a fase C, o valor foi 5,4% menor em relação a energização pelo transmissor.

3.3 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS – RELIGAMENTO

Para as simulações, será seguido as instruções dadas segundo o Submódulo 23.3 – Diretrizes e critérios para estudos elétricos (Anexo 1), disponibilizado pelo Operador Nacional do Sistema de Transmissão (ONS). O recomendado por esta norma é para que, estudos estatísticos, devam ser efetuados por análise probabilística a execução de pelo menos, 200 (duzentos) casos, de forma a assegurar a representação estatística do estudo.

O sistema empregado foi simulado por um período de 1 segundo. Foi imposto, no terminal de análise, um curto-circuito fase-terra na fase A. Onde o tempo de reação do sistema para a abertura tripolar do terminal mais próximo foi de 150 milissegundos. O disparo para abertura do terminal oposto ocorre após 20 milissegundos após a abertura do terminal mais próximo da falta. Após um tempo morto de 500 milissegundos de cada terminal, ocorre o religamento tripolar da linha.

Para representar a carga residual da linha aberta, é mantido o curto na linha após sua total abertura e o mesmo é eliminado após totalizar 200 milissegundos de duração.

As chaves estatísticas contém desvio de 5,5 milissegundos, a fim de se representar a dispersão mecânica dos polos do disjuntor. Deste modo, a chave estatística irá, para cada caso

simulado, apresentar um valor aleatório para a abertura e fechamento do disjuntor para cada fase, partindo do tempo estipulado e estando dentro do desvio informado.

Tabela 12. – Resumo dos parâmetros de simulação.

Parâmetro	Descrição
Passo de Integração	10^{-6}
Tempo de Simulação (s)	1,0
Tipo de Simulação	Domínio do Tempo (<i>Time Domain</i>)
Instante de Início do Curto Circuito (s)	0,186
Duração do Curto Circuito (s)	0,200
Instante de Abertura do Disjuntor (s)	0,336
Intervalo de Abertura do Terminal Oposto (s)	0,020
Tempo Morto (s)	0,500
Distribuição	Gaussiana
Desvio (s)	0,0055

No final da simulação destes duzentos casos, o ATP fornece um parâmetro geral dos casos analisados, listando os maiores valores de sobretensão obtidos e, mostrando as maiores sobretensões, além da média de tensão analisada para todos os casos e seu desvio padrão.

Para as simulações, foram usados os equivalentes elétricos da Tabela (13), nas extremidades da linha:

Tabela 13. - Parâmetros de simulação da linha.

Terminal	Tensão (kV)	R+ (Ω)	X+ (mH)	R0 (Ω)	X0 (mH)
Transmissor	230	1,4409	57,3369	2,9975	72,3004
Receptor	230	6,4448	174,0368	10^{-6}	0,1402

Assim, as simulações foram divididas em dois casos:

- Caso 1: Curto-circuito no terminal do Receptor do Circuito 1: as chaves estatísticas se encontram nos dois terminais do Circuito 1, onde é realizado o religamento tripolar. Nenhuma manobra é realizada sobre os terminais do Circuito 2;

- Caso 2: Curto-circuito pelo no terminal do Transmissor do Circuito 1: as chaves estatísticas se encontram nos dois terminais do Circuito 1, onde é realizado o religamento tripolar. Nenhuma manobra é realizada sobre os terminais do Circuito 2.

Para as figuras nos tópicos a seguir, a fase A será representada pela cor vermelha, a fase B pela cor verde e a fase C pela cor azul.

A análise da operação da linha de transmissão sob condição de Religamento está presente ao longo dos tópicos a seguir:

3.3.1 Resultados – Falta no terminal do Receptor do Circuito 1

Para a condição de falta na linha de transmissão localizada no terminal do Receptor do circuito, temos os seguintes resultados:

3.3.1.1 Comportamento do Terminal Receptor

A Tabela (14) mostra, para cada circuito e fase analisada no terminal do Receptor, o valor nominal de tensão da fonte, o valor máximo de sobretensão encontrado após as duzentas simulações realizadas, a tensão média considerando todas estas simulações e seu desvio-padrão.

Tabela 14. - Valores de tensão e dados estatísticos.

Fase	Tensão Nominal		Valor Máximo		Tensão Média (p.u.)	Desvio-padrão
	p.u.	kV	p.u.	kV		
Circuito 1						
A	1	187,794	1,45	272,301	1,1465	0,0485
B			1,60	300,470	1,3412	0,0839
C			1,35	253,522	1,1337	0,0609
Circuito 2						
A	1	187,794	1,45	272,301	1,0942	0,0815
B			1,30	244,132	1,0970	0,0522
C			1,35	253,522	1,1012	0,0714

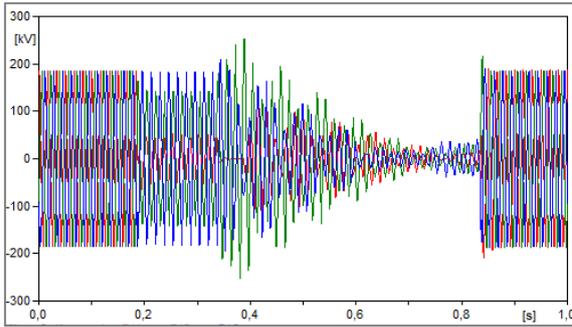


Figura 54. Tensão simulada no Receptor - Circuito 1.

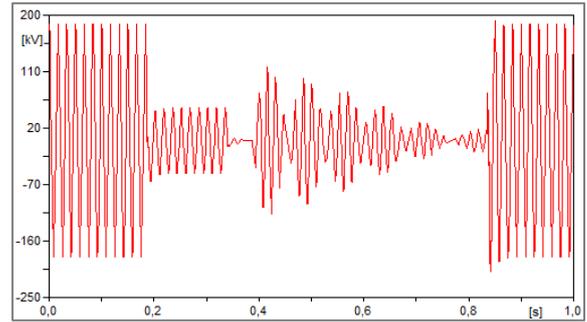


Figura 56. Tensão simulada no Receptor - Circuito 1 - Fase A.

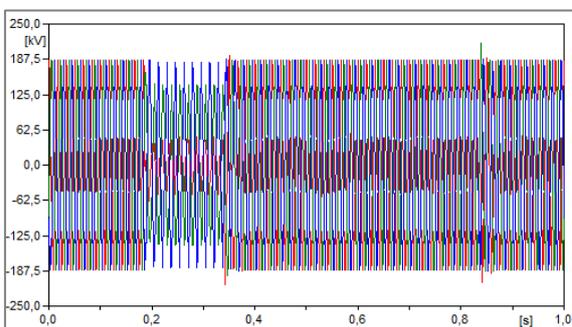


Figura 55. Tensão simulada no Receptor - Circuito 2.

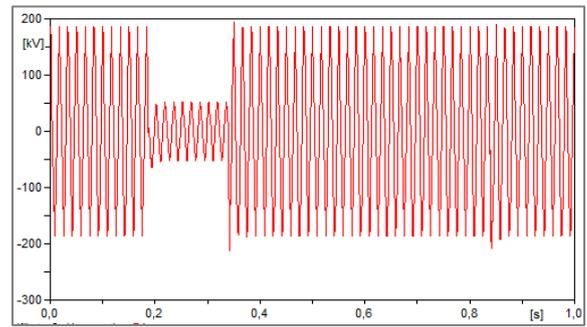


Figura 57. Tensão simulada no Receptor - Circuito 2 - Fase A.

Como esperado, o valor de tensão se mantém no valor nominal até o momento da falta, conforme as Figs. (54), (55), (56) e (57). Durante os 150 milissegundos em que o curto-circuito ocorre, sem a manobra da linha, a tensão na fase A diminui, também alterando as características das fases B e C devido ao seu acoplamento magnético. No instante da abertura do terminal mais próximo a falta (Receptor) a tensão permanece próxima de zero durante 20 milissegundos, que representa o tempo de defasagem da abertura do terminal oposto (Transmissor), devido ao curto ser conectado a terra.

Na abertura dos dois terminais, essa conexão com a terra é eliminada e a onda começa a se dissipar na própria linha, até o instante do religamento, em que se observa uma sobretensão inicial, a sem a presença da falta, o próprio sistema se estabiliza e alcança seus valores nominais em regime permanente.

Os valores para os dois circuitos se mostram próximos, tanto para as tensões máximas quanto para as médias, com exceção da fase B do Circuito 1 obtendo valores de sobretensões maiores.

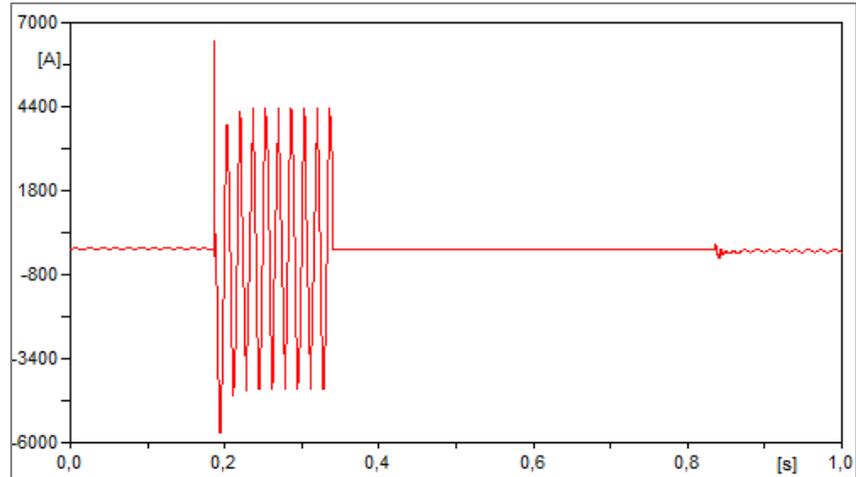


Figura 58. Corrente simulada no Receptor - Circuito 1 – Fase A.

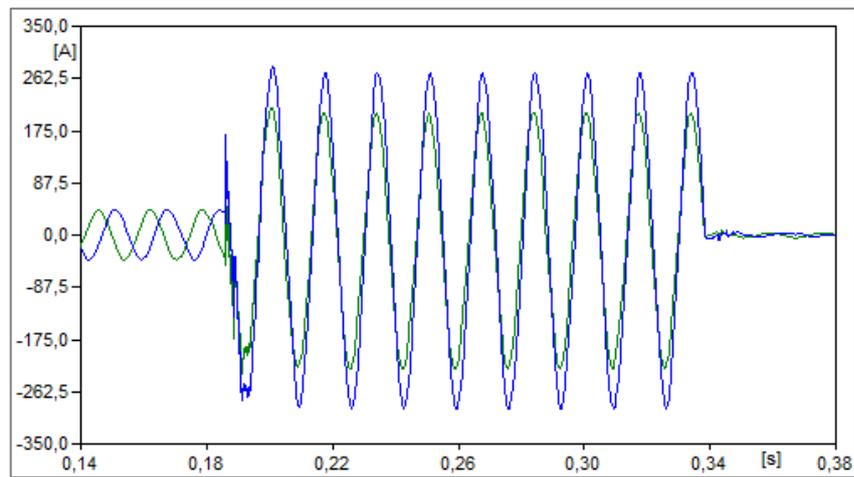


Figura 59. Detalhe da corrente simulada no Receptor – Circuito 1 – Fases B e C.

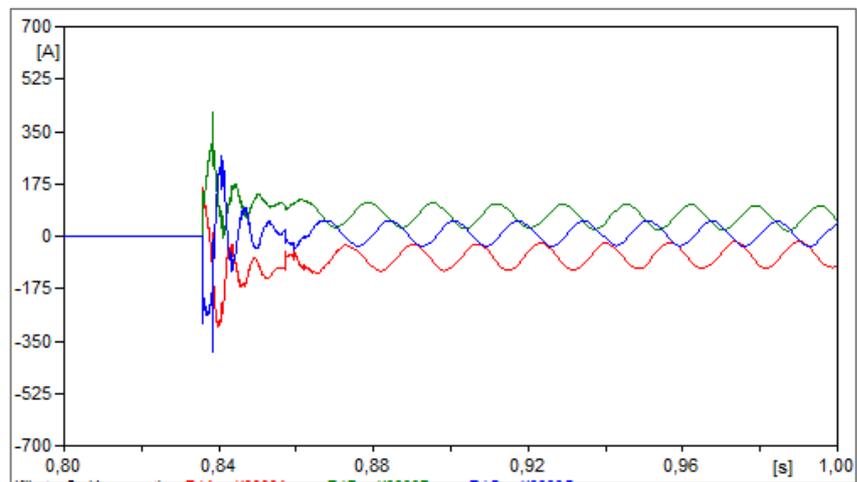


Figura 60. Detalhe da corrente simulada no Receptor durante o religamento – Circuito 1.

Os valores de corrente são os nominais até o início da falta na fase A, onde ocorrem picos que permanecem até a abertura trifásica dos disjuntores. Após os 500 milissegundos de tempo morto, a linha fecha e, devido aos intervalos de fechamento dos polos serem diferentes, as ondas das fases se encontram fora do eixo das abscissas devido a carga residual.

3.3.1.2 Comportamento do Terminal Transmissor

A Tabela (15) mostra, para cada circuito e fase analisada no terminal do Transmissor, o valor nominal de tensão da fonte, o valor máximo de sobretensão encontrado após as duzentas simulações realizadas, a tensão média considerando todas estas simulações e seu desvio-padrão.

Tabela 15. - Valores de tensão e dados estatísticos.

Fase	Tensão Nominal		Valor Máximo		Tensão Média (p.u.)	Desvio-padrão
	p.u.	kV	p.u.	kV		
Circuito 1						
A	1	187,794	1,55	291,081	1,2567	0,0848
B			1,60	300,470	1,2907	0,0889
C			1,55	291,081	1,2277	0,0107
Circuito 2						
A	1	187,794	1,30	244,132	1,1757	0,0079
B			1,20	225,353	1,1255	0,0050
C			1,20	225,353	1,0605	0,0412

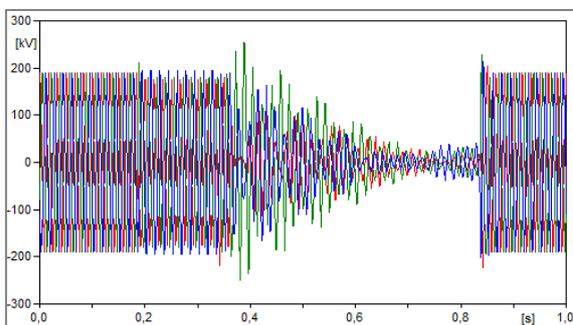


Figura 61. Tensão simulada no Transmissor - Circuito 1.

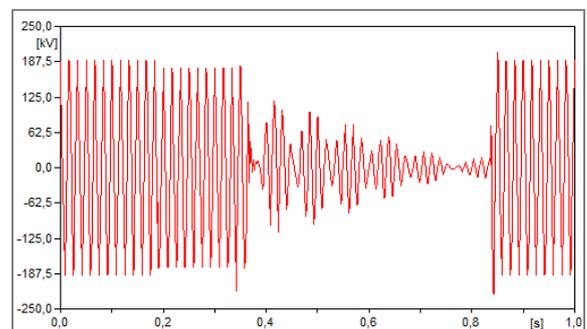


Figura 62. Tensão simulada no Transmissor - Circuito 1 – Fase A.

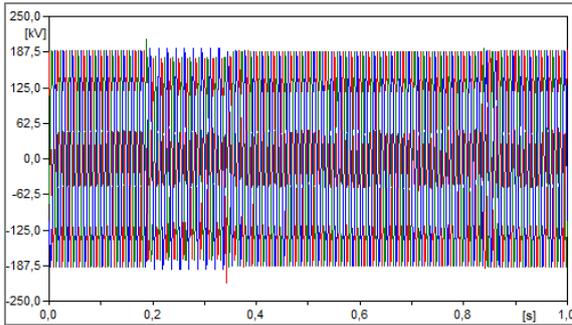


Figura 63. Tensão simulada no Transmissor - Circuito 2.

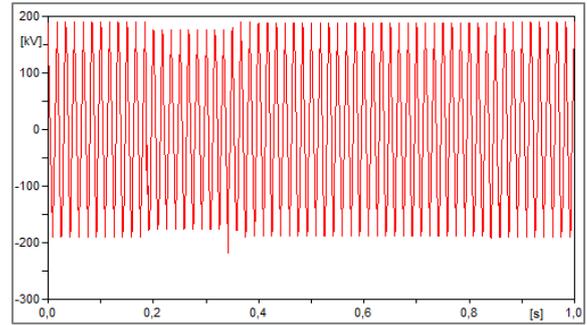


Figura 64. Tensão simulada no Transmissor - Circuito 2 – Fase A.

Como esperado, o valor de tensão se mantém no valor nominal até o momento da falta, conforme as Figs. (61), (62), (63) e (64). Durante os 150 milissegundos em que o curto-circuito ocorre, sem a manobra da linha, a tensão na fase A diminui levemente, pouco alterando as características das fases B e C. No instante da abertura do terminal mais próximo a falta (Receptor) a tensão permanece próxima de zero durante 20 milissegundos, que representa o tempo de defasagem da abertura do terminal oposto (Transmissor), devido ao curto ser conectado a terra.

Na abertura dos dois terminais, essa conexão com a terra é eliminada e a onda começa a se dissipar na própria linha, até o instante do religamento, em que se observa uma sobretensão inicial, a sem a presença da falta, o próprio sistema se estabiliza e alcança seus valores nominais em regime permanente.

Os valores para os dois circuitos se mostram próximos, tanto para as tensões máximas quanto para as médias, com exceção também da fase B do Circuito 1 obtendo valores de sobretensões maiores.

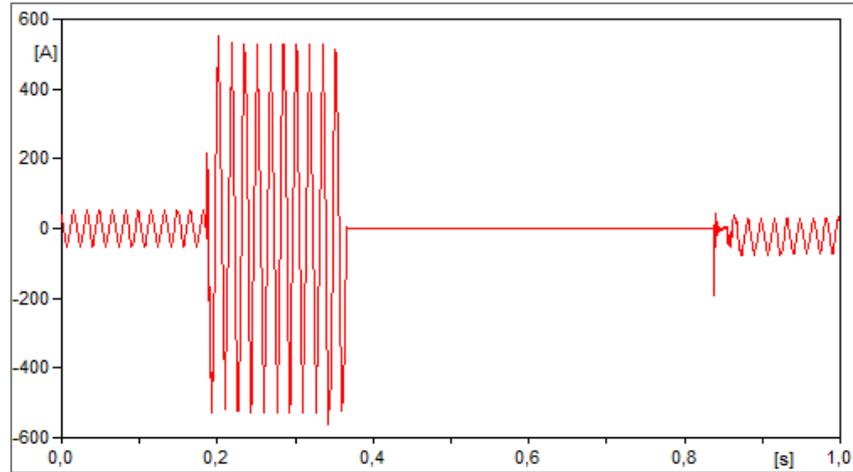


Figura 65. Corrente simulada no Transmissor - Circuito 1 – Fase A.

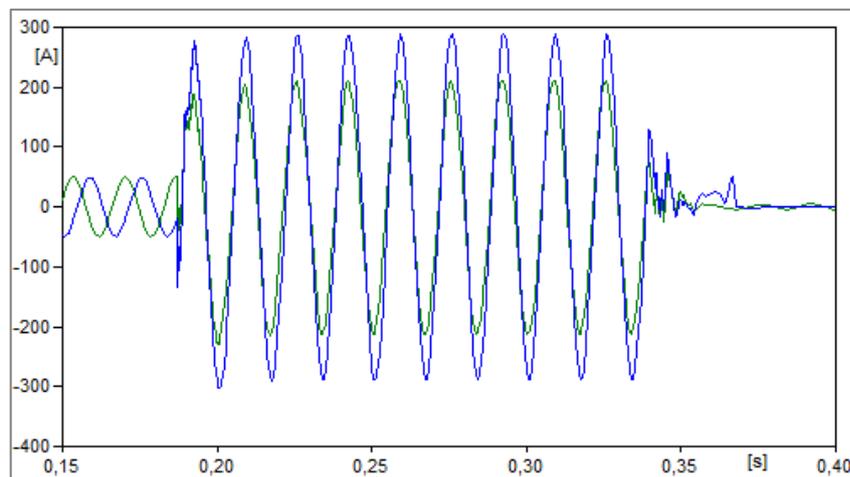


Figura 66. Detalhe da corrente simulada no Transmissor – Circuito 1 – Fases B e C.

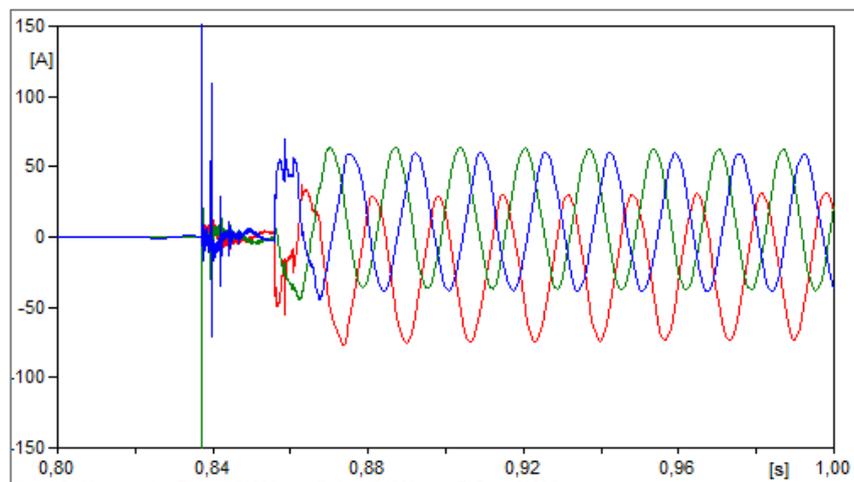


Figura 67. Detalhe da corrente simulada no Transmissor durante o religamento – Circuito 1.

Os valores de corrente são os nominais até o início da falta na fase A, onde ocorrem picos que permanecem até a abertura trifásica dos disjuntores. Após os 500 milissegundos de tempo morto, a linha fecha e, devido aos intervalos de fechamento dos polos serem diferentes, as ondas das fases se encontram fora do eixo das abscissas devido a carga residual. Nas Figuras (66) e (67) podemos notar a influência dos 20 milissegundos de atraso da abertura e do fechamento do terminal do Transmissor em relação ao terminal do Receptor, respectivamente.

3.3.1.3 Meio da Linha

A Tabela (16) mostra, para cada circuito e fase analisada no meio da linha, o valor nominal de tensão da fonte, o valor máximo de sobretensão encontrado após as duzentas simulações realizadas, a tensão média considerando todas estas simulações e seu desvio-padrão.

Tabela 16. - Valores de tensão e dados estatísticos.

Fase	Tensão Nominal		Valor Máximo		Tensão Média (p.u.)	Desvio-padrão
	p.u.	kV	p.u.	kV		
Circuito 1						
A	1	187,794	1,65	309,860	1,2780	0,1309
B			1,70	319,249	1,3220	0,0957
C			1,70	319,249	1,2610	0,1235
Circuito 2						
A	1	187,794	1,70	319,249	1,3767	0,0215
B			1,30	244,132	1,1155	0,0415
C			1,30	244,132	1,1365	0,0427

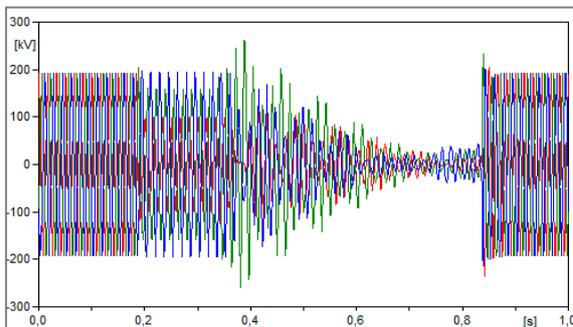


Figura 68. Tensão simulada no meio da linha - Circuito 1.

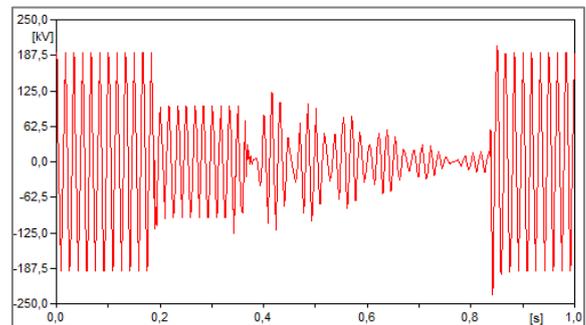


Figura 69. Tensão simulada no meio da linha - Circuito 1.

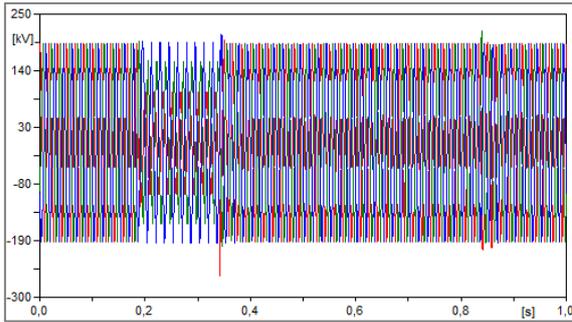


Figura 70. Tensão simulada no meio da linha - Circuito 2.

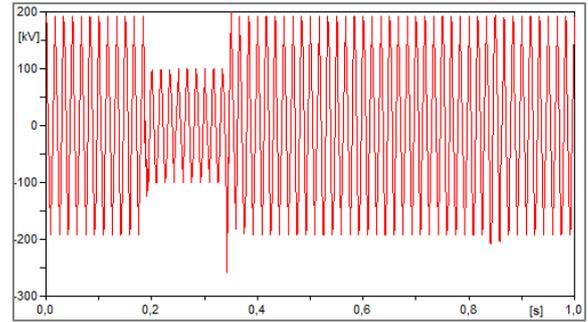


Figura 71. Tensão simulada no meio da linha - Circuito 2.

Como esperado, o valor de tensão se mantém no valor nominal até o momento da falta, conforme as Figs. (68), (69), (70) e (71). Durante os 150 milissegundos em que o curto-circuito ocorre, sem a manobra da linha, a tensão na fase A diminui, alterando as características das fases B e C. No instante da abertura do terminal mais próximo a falta (Receptor) a tensão permanece próxima de zero durante 20 milissegundos, que representa o tempo de defasagem da abertura do terminal oposto (Transmissor), devido ao curto ser conectado a terra.

Na abertura dos dois terminais, essa conexão com a terra é eliminada e a onda começa a se dissipar na própria linha, até o instante do religamento, em que se observa uma sobretensão inicial, a sem a presença da falta, o próprio sistema se estabiliza e alcança seus valores nominais em regime permanente.

Os valores para os dois circuitos se mostram próximos e com valores elevados como 1,70 p.u., com exceção também das fases B e C do Circuito 2, obtendo valores de sobretensões menores.

3.3.1.4 Considerações Finais

Na Figura (72) estão apresentados os valores máximos de sobretensões encontrados na simulação para o terminal do receptor, terminal do transmissor e no meio da linha, representando o valor de cada fase em seu respectivo circuito. Cada fase está representada com a legenda contendo sua sigla, e os Circuitos 1 e 2 estão representados pelos números 1 e 2, respectivamente. Então para a fase A no Circuito 1, encontraremos no gráfico o nome A1, por exemplo.

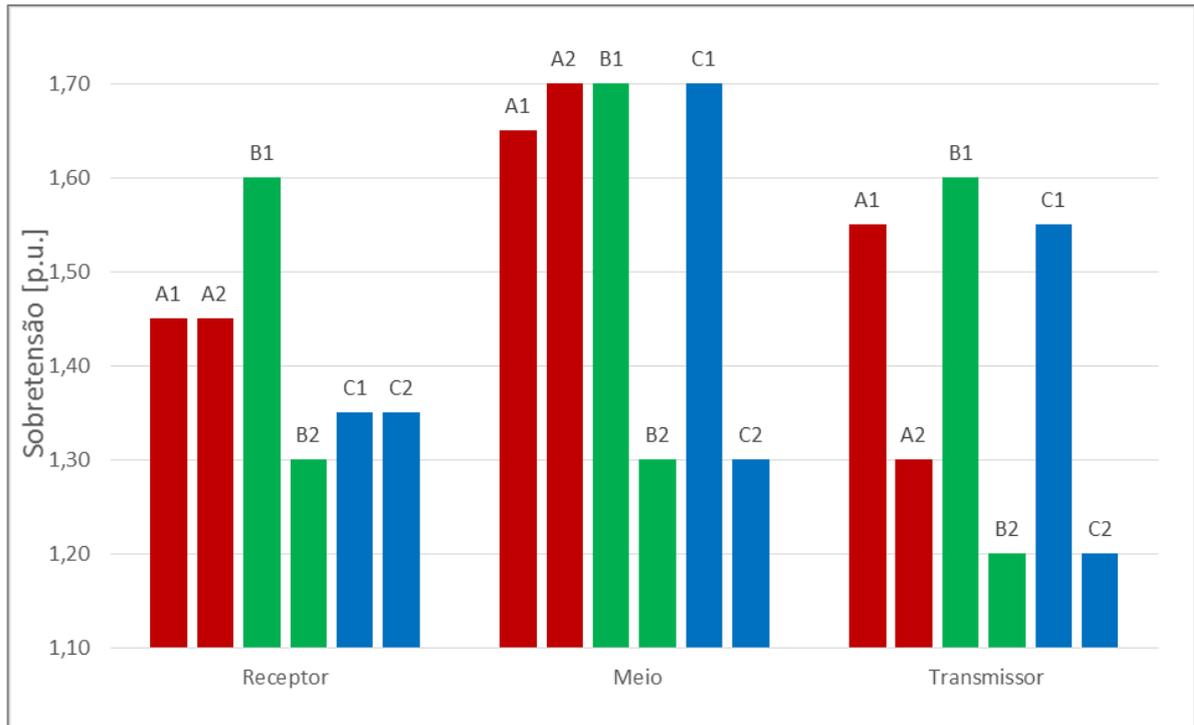


Figura 72 - Valores máximos de sobretensão.

Com a Figura (72) podemos comprovar que a falta influencia diretamente os valores das sobretensão nas fases B e C do Circuito 1 no Receptor, terminal de origem do curto-circuito. O Circuito 2 é influenciado principalmente na fase A. As transposições de fases que acontecem ao decorrer da linha de transmissão fazem com que as fases B e C sofram uma maior interferência da fase A, o que explica as maiores sobretensões serem no meio da linha.

3.3.2 Resultados – Falta no terminal do Transmissor do Circuito 1

Para a condição de falta na linha de transmissão localizada no terminal do Transmissor do circuito, temos os seguintes resultados:

3.3.2.1 Comportamento do Terminal Receptor

A Tabela (17) mostra, para cada circuito e fase analisada no terminal do Receptor, o valor nominal de tensão da fonte, o valor máximo de sobretensão encontrado após as duzentas simulações realizadas, a tensão média considerando todas estas simulações e seu desvio-padrão.

Tabela 17. - Valores de tensão e dados estatísticos.

Fase	Tensão Nominal		Valor Máximo		Tensão Média (p.u.)	Desvio-padrão
	p.u.	kV	p.u.	kV		
Circuito 1						
A	1	187,794	1,70	319,250	1,2940	0,1222
B			1,70	319,250	1,3345	0,1093
C			1,65	309,860	1,2640	0,1428
Circuito 2						
A	1	187,794	1,55	291,081	1,1852	0,0482
B			1,15	215,963	1,0420	0,0342
C			1,20	225,353	1,0575	0,0381

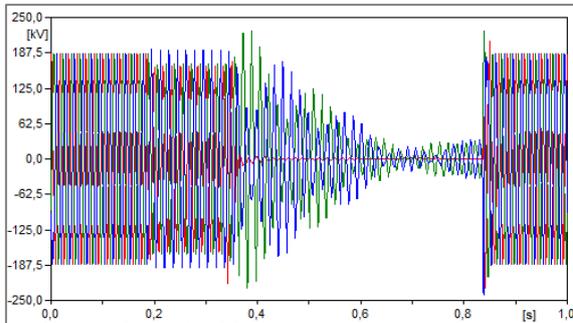


Figura 73. Tensão simulada no Receptor - Circuito 1.

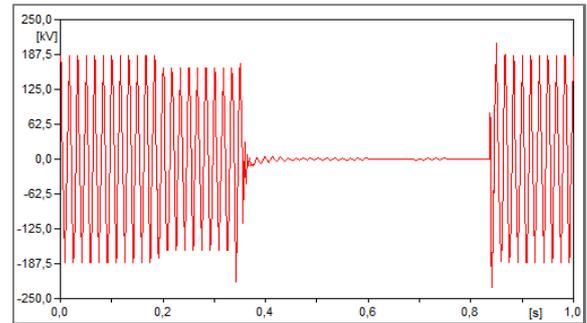


Figura 74. Tensão simulada no Transmissor - Circuito 1 - Fase A.

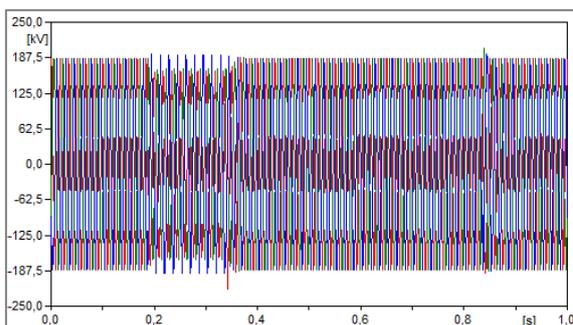


Figura 75. Tensão simulada no Receptor - Circuito 2.

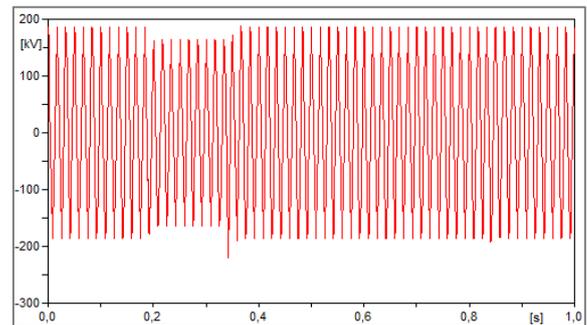


Figura 76. Tensão simulada no Receptor - Circuito 2 - Fase A.

Como esperado, o valor de tensão se mantém no valor nominal até o momento da falta, conforme as Figs. (73), (74), (75) e (76). Durante os 150 milissegundos em que o curto-circuito ocorre, sem a manobra da linha, a tensão na fase A diminui, também alterando as características das fases B e C devido ao seu acoplamento magnético. No instante da abertura do terminal mais próximo a falta (Transmissor) a tensão permanece próxima de zero durante 20 milissegundos, que representa o tempo de defasagem da abertura do terminal oposto (Receptor), devido ao curto ser conectado a terra.

Na abertura dos dois terminais, essa conexão com a terra é eliminada e a onda começa a se dissipar na própria linha, até o instante do religamento, em que se observa uma sobretensão inicial, a sem a presença da falta, o próprio sistema se estabiliza e alcança seus valores nominais em regime permanente.

Os valores para os dois circuitos se mostram próximos, tanto para as tensões máximas quanto para as médias, com exceção da fase B e C do Circuito 2, obtendo valores de sobretensões menores comparadas as outras fases.

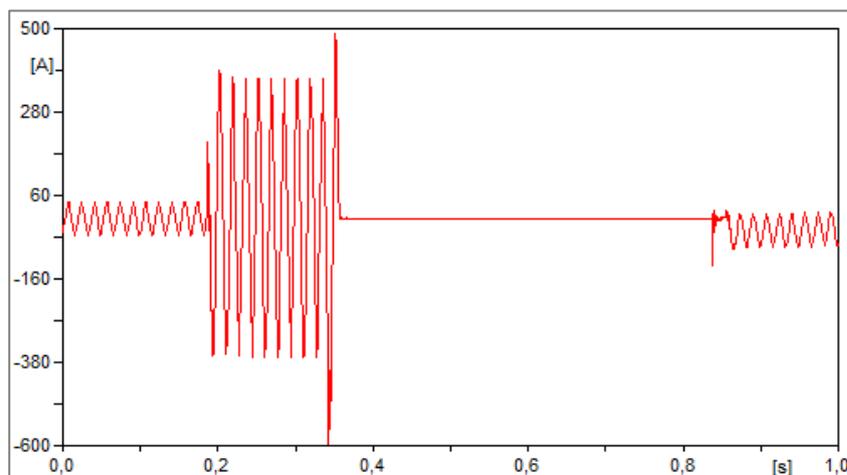


Figura 77. Corrente simulada no Receptor - Circuito 1- Fase A.

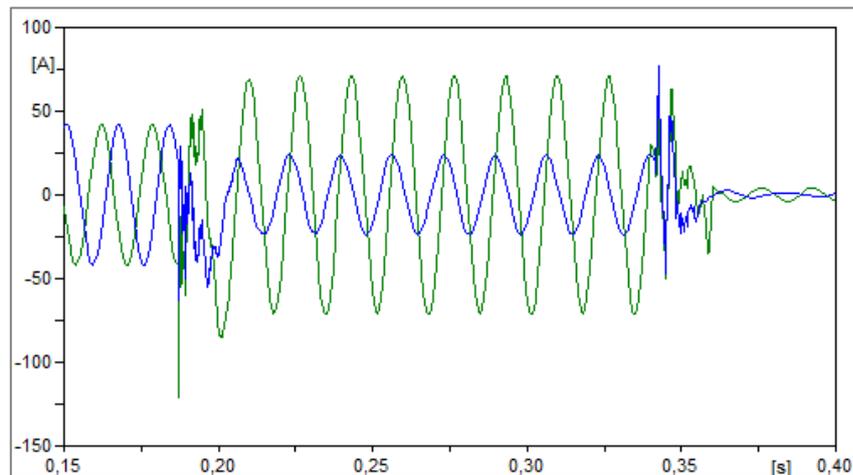


Figura 78. Detalhe da corrente simulada no Receptor – Circuito 1 – Fases B e C.

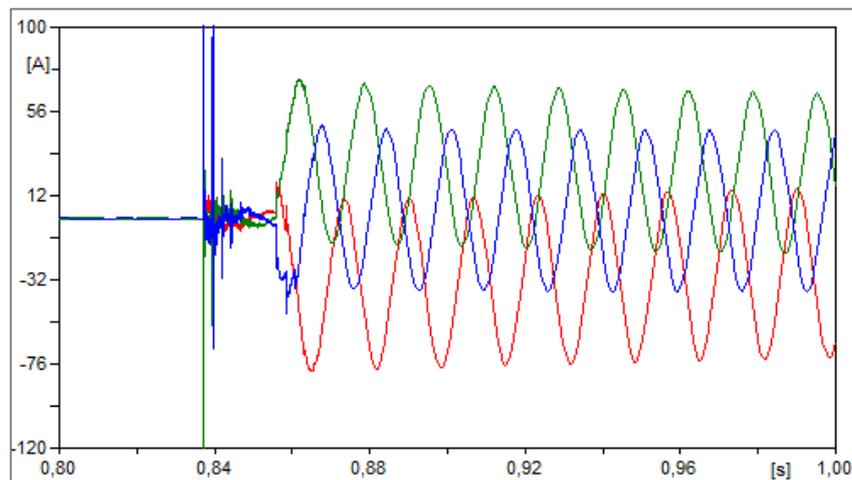


Figura 79. Detalhe da corrente simulada no Receptor durante o religamento – Circuito 1.

Os valores de corrente são os nominais até o início da falta na fase A, onde ocorrem picos que permanecem até a abertura trifásica dos disjuntores. Após os 500 milissegundos de tempo morto, a linha fecha e, devido aos intervalos de fechamento dos polos serem diferentes, as ondas das fases se encontram fora do eixo das abscissas devido a carga residual. Nas Figuras (78) e (79) podemos notar a influência dos 20 milissegundos de atraso da abertura e do fechamento do terminal do Transmissor em relação ao terminal do Receptor, respectivamente.

3.3.2.2 Comportamento do Terminal Transmissor

A Tabela (18) mostra, para cada circuito e fase analisada no terminal do Transmissor, o valor nominal de tensão da fonte, o valor máximo de sobretensão encontrado após as duzentas simulações realizadas, a tensão média considerando todas estas simulações e seu desvio-padrão.

Tabela 18. - Valores de tensão e dados estatísticos.

Fase	Tensão Nominal		Valor Máximo		Tensão Média (p.u.)	Desvio-padrão
	p.u.	kV	p.u.	kV		
Circuito 1						
A	1	187,794	1,35	253,522	1,0748	0,0605
B			1,65	309,860	1,2567	0,0832
C			1,25	234,742	1,1370	0,0242
Circuito 2						
A	1	187,794	1,25	234,742	1,1342	0,0230
B			1,25	234,742	1,1757	0,0061
C			1,25	234,742	1,1315	0,0202

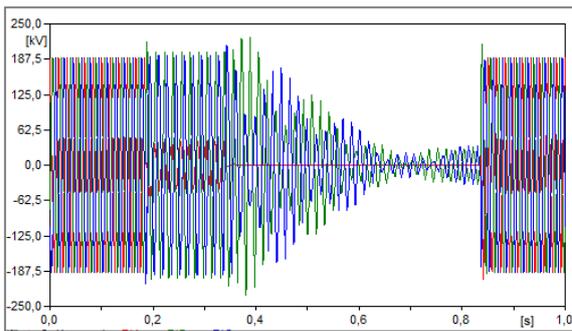


Figura 80. Tensão simulada no Transmissor - Circuito 1.

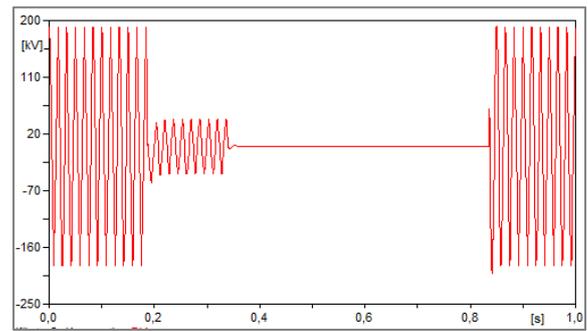


Figura 82. Tensão simulada no Transmissor - Circuito 1 – Fase A.

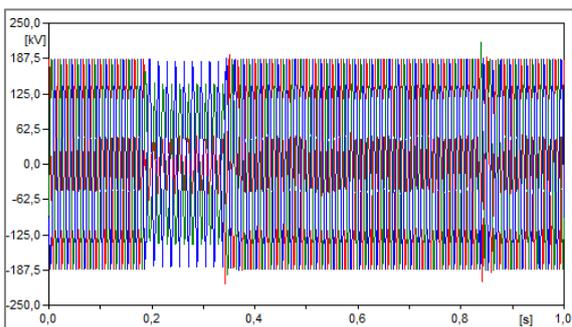


Figura 81. Tensão simulada no Transmissor - Circuito 2.

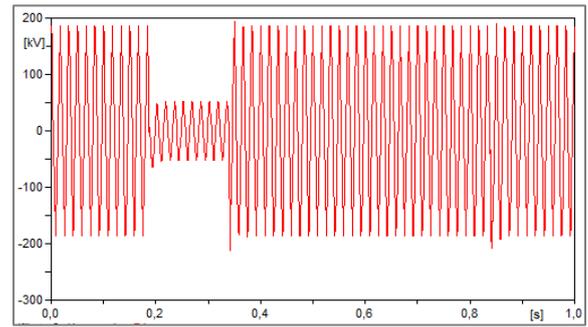


Figura 83. Tensão simulada no Transmissor - Circuito 2 – Fase A.

Como esperado, o valor de tensão se mantém no valor nominal até o momento da falta, conforme as Figs. (80), (81), (82) e (83). Durante os 150 milissegundos em que o curto-circuito ocorre, sem a manobra da linha, a tensão na fase A diminui, também alterando as características das fases B e C devido ao seu acoplamento magnético. No instante da abertura do terminal mais próximo a falta (Transmissor) a tensão permanece próxima de zero durante 20 milissegundos, que representa o tempo de defasagem da abertura do terminal oposto (Receptor), devido ao curto ser conectado a terra.

Na abertura dos dois terminais, essa conexão com a terra é eliminada e a onda começa a se dissipar na própria linha, até o instante do religamento, em que se observa uma sobretensão inicial, a sem a presença da falta, o próprio sistema se estabiliza e alcança seus valores nominais em regime permanente.

Os valores para os dois circuitos se mostram próximos, tanto para as tensões máximas quanto para as médias, com exceção da fase B do Circuito 1 obtendo valores de sobretensões maiores.

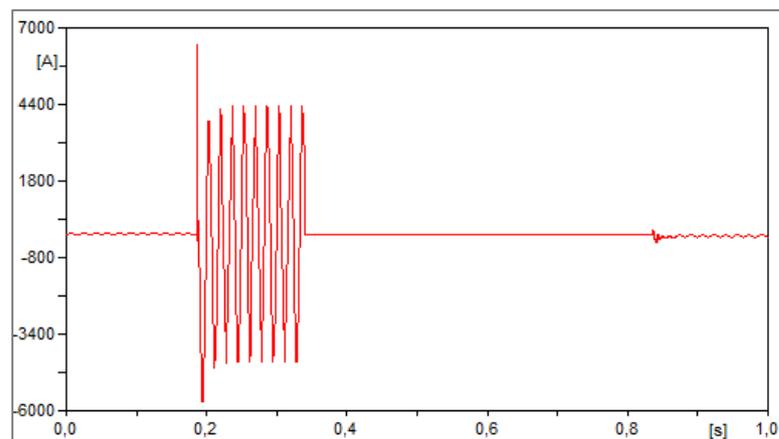


Figura 84. Corrente simulada no Transmissor - Circuito 1 – Fase A.

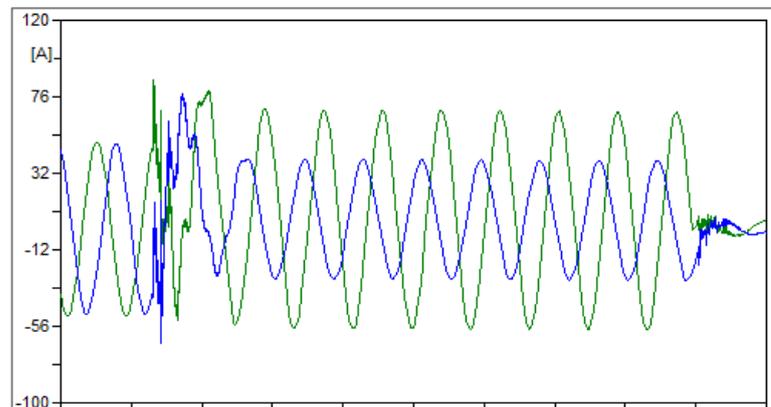


Figura 85. Detalhe da corrente simulada no Transmissor – Circuito 1 – Fases B e C.

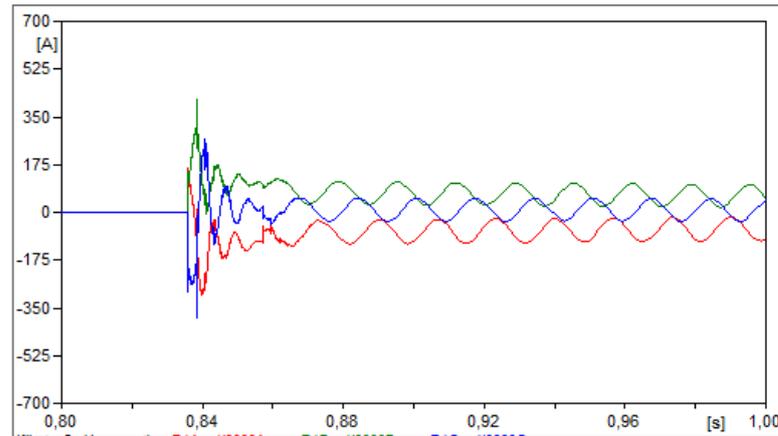


Figura 86. Detalhe da corrente simulada no Transmissor durante o religamento – Circuito 1.

Os valores de corrente são os nominais até o início da falta na fase A, onde ocorrem picos que permanecem até a abertura trifásica dos disjuntores. Após os 500 milissegundos de tempo morto, a linha fecha e, devido aos intervalos de fechamento dos polos serem diferentes, as ondas das fases se encontram fora do eixo das abscissas devido a carga residual.

3.3.2.3 Meio da Linha

A Tabela (19) mostra, para cada circuito e fase analisada no meio da linha, o valor nominal de tensão da fonte, o valor máximo de sobretensão encontrado após as duzentas simulações realizadas, a tensão média considerando todas estas simulações e seu desvio-padrão.

Tabela 19. - Valores de tensão e dados estatísticos.

Fase	Tensão Nominal		Valor Máximo		Tensão Média (p.u.)	Desvio-padrão
	p.u.	kV	p.u.	kV		
Circuito 1						
A	1	187,794	1,85	347,420	1,3142	0,1677
B			1,70	319,250	1,3410	0,1110
C			1,75	328,639	1,3280	0,1392
Circuito 2						
A	1	187,794	1,35	253,522	1,1287	0,0599
B			1,60	300,470	1,3795	0,0261
C			1,30	244,132	1,1405	0,0318

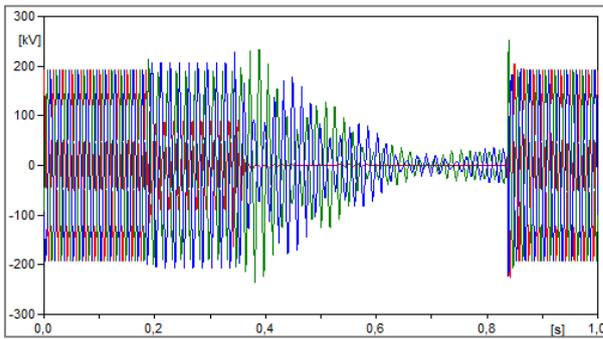


Figura 87. Tensão simulada no meio da linha - Circuito 1.

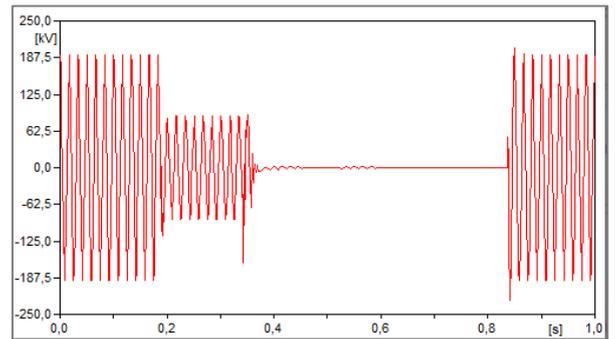


Figura 89. Detalhe da tensão simulada no meio da linha - Circuito 1 – Fase A.

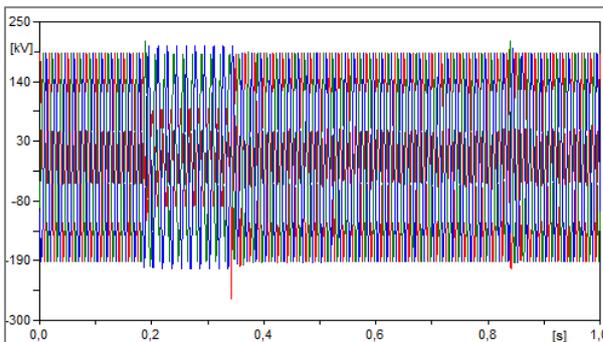


Figura 88. Tensão simulada no meio da linha - Circuito 2.

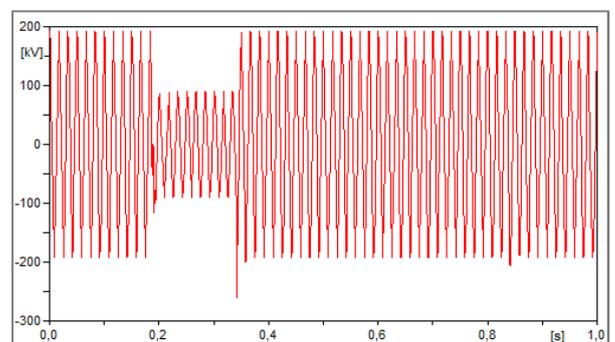


Figura 90. Detalhe da tensão simulada no meio da linha - Circuito 2 – Fase A.

Como esperado, o valor de tensão se mantém no valor nominal até o momento da falta, conforme as Figs. (87), (88), (89) e (90). Durante os 150 milissegundos em que o curto-circuito ocorre, sem a manobra da linha, a tensão na fase A diminui, alterando as características das fases B e C. No instante da abertura do terminal mais próximo a falta (Transmissor) a tensão permanece próxima de zero durante 20 milissegundos, que representa o tempo de defasagem da abertura do terminal oposto (Receptor), devido ao curto ser conectado a terra.

Na abertura dos dois terminais, essa conexão com a terra é eliminada e a onda começa a se dissipar na própria linha, até o instante do religamento, em que se observa uma sobretensão inicial, a sem a presença da falta, o próprio sistema se estabiliza e alcança seus valores nominais em regime permanente.

Os valores para os dois circuitos se mostram próximos e com valores elevados como 1,85 p.u., com exceção também das fases A e C do Circuito 2, obtendo valores de sobretensões menores.

3.3.2.4 Considerações Finais

Na Figura (91) estão apresentados os valores máximos de sobretensões encontrados na simulação para o terminal do receptor, terminal do transmissor e no meio da linha, representando o valor de cada fase em seu respectivo circuito. Cada fase está representada com a legenda contendo sua sigla, e os Circuitos 1 e 2 estão representados pelos números 1 e 2, respectivamente. Então para a fase A no Circuito 1, encontraremos no gráfico o nome A1, por exemplo.

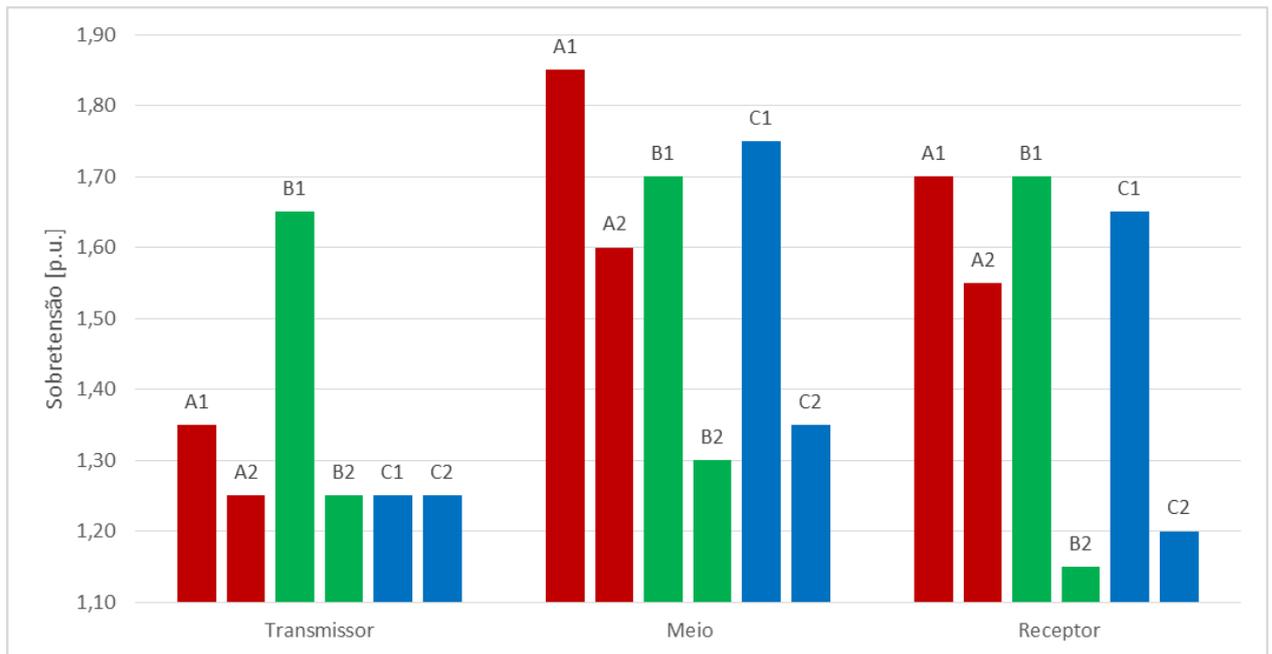


Figura 91 - Valores máximos de sobretensão.

Com a Figura (91) podemos comprovar que a falta influencia diretamente os valores das sobretensão nas fases B e C do Circuito 1 no Transmissor e no Receptor. O Circuito 2 é influenciado principalmente nas fases A e B. As transposições de fases que acontecem ao decorrer da linha de transmissão fazem com que as fases B e C sofram uma maior interferência da fase A, o que explica as maiores sobretensões serem no meio da linha.

Os dados e figuras mostram que para os dois casos de religamento da linha de transmissão, a falta no terminal do Receptor apresenta, em relação ao caso de falta no Transmissor, valor máximo de sobretensão 13,8% maior para a fase A, 7,4% maior para a fase C e 3,1% menor para a fase B.

No meio da linha, as maiores diferenças foram na fase A, com a falta no Receptor apresentando o valor máximo de sobretensão 12,1% menor em relação a falta no Transmissor. Os valores para a fase B foram iguais.

Já no terminal oposto a falta, os valores de sobretensão máximos para o Circuito 1 para a falta no Receptor apresentaram diferenças de 9,7%, 6,2% e 6,5% menores para as fases A, B e C, respectivamente, em relação a falta no Transmissor. O caso mais discrepante foi no Circuito 2, em que a fase A quando o curto-circuito ocorre no Receptor foi 19,2% menor em relação ao curto no Transmissor.

4 CONCLUSÃO

Mediante as simulações no *software* ATP, neste trabalho foi realizado um estudo abordando a operação de uma linha de transmissão de 230kV e 345,125 km, contendo circuito duplo. Foram consideradas algumas simplificações de modo que o sistema elétrico envolvido nesta linha pudesse ser representado de maneira satisfatória no programa utilizado, atendendo os objetivos do estudo.

O estudo analisa as piores condições do sistema no momento da energização e religamento da linha de transmissão, porém os resultados apresentados não devem ser generalizados, pois cada sistema deve ser estudado de forma específica por um vasto número de variáveis influenciarem nas sobretensões de manobra.

As simulações computacionais resumiram-se em verificar os maiores valores de tensões para cada fase envolvendo os dois circuitos. A partir dos resultados obtidos, conforme as tabelas e figuras apresentadas, verificou-se que, para este caso, a melhor maneira de ser energizar esta linha de transmissão seria pelo terminal do transmissor, por apresentar menores valores de sobretensão no terminal de energização e no meio da linha, e pela variação do terminal final ser de 0,1 p.u em relação a energização pelo terminal do receptor.

Em relação às condições de religamento trifásico da linha, constatou-se que no caso mais crítico a tensão no meio da linha chegou a 1,85 p.u. Assim, também se observou o efeito da indução de tensão de um circuito sobre o outro na ocorrência de uma falta monofásica. As tensões tendem a oscilar em valores que podem ser não-nulos e dependem principalmente do instante em que o disjuntor atua na interrupção da corrente de curto. Este valor tende a decrescer com o passar do tempo, mas em uma velocidade muito pequena.

A realização do estudo de sobretensões de manobras é imprescindível para a confiabilidade e seleção de equipamentos de proteção, assim como a escolha do terminal de energização da linha de transmissão, em que pode mudar a dinâmica do sistema referente aos distúrbios.

O chaveamento controlado em manobras de energização de linha de transmissão pode reduzir o nível de sobretensão quando o feito no momento em que o valor de cada fase é igual a zero. Entretanto, existem limitações intrínsecas ao chaveamento controlado de linhas de transmissão impostas pelo efeito do acoplamento eletromagnético entre as fases da linha e principalmente pelo carácter do tempo de fechamento dos disjuntores, de forma que a abertura e/ou fechamento dos polos destes equipamentos podem não ocorrer exatamente nos instantes ótimos previstos pelo sistema de controle, resultando na perda de eficiência na prevenção de sobretensões por meio do chaveamento controlado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CIGRE. **On the Influence of Transient Recovery Voltage Parameters on the Behavior of Voltage Circuit-breakers**. 1972.

D'AJUZ, A. et al. **Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento**: aplicação em sistema de potência de alta-tensão. Rio de Janeiro, FURNAS, Niterói. Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987.

DANTAS, K. M. C. **Chaveamento Controlado de Linhas de Transmissão**. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, 2007.

GUIMARÃES, L. H. N. **Sistema de simulação de circuitos trifásicos com variação de cenários de operação para análise de eficiência em redes de transmissão e distribuição de energia elétrica**. 85 p. Monografia (Graduação em Engenharia de Energia) - Faculdade do Gama, Universidade de Brasília, 2015.

IKEDA, H. et al. **Power System Transient Analysis: Theory and Practice using Simulation Programs**. Wiley, 2016.

LE MOS, J. R. F. **Modelagem de linhas de transmissão para estudos de transitórios eletromecânicos**. 70 p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

PERIN, A. C. C. COUTO, V. F. **Uso do Software ATPDraw no Estudo de Transitórios Eletromagnéticos**. Unoesc & Ciência - ACET Joaçaba, v. 6, n. 2, p. 247-252, jul./dez. 2015.

REIS, A. et al. **Curso de ATPDraw**. Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia - MG, 2013.

SAMPAIO, G. R. **Avaliação da Proteção de Distância de Linhas de Transmissão**. 87 p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2014.

VALERO, P. M. **Análise comparativa de técnicas de controle de sobretensões transitórias nas manobras de energização e religamento de linhas de transmissão**. 170 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 2007.

ONS. **Submódulo 23.3 – Diretrizes e critérios para estudos elétricos**. Rev, 2.0. 2011.

APÊNDICE

APÊNDICE A: CONFIGURAÇÕES - SETTINGS

Switch/UM Settings

No campo *Switch/UM*, Figura (1), podemos seleccionar algumas configurações para estudos com chaves estatísticas ou chaves sistemáticas.

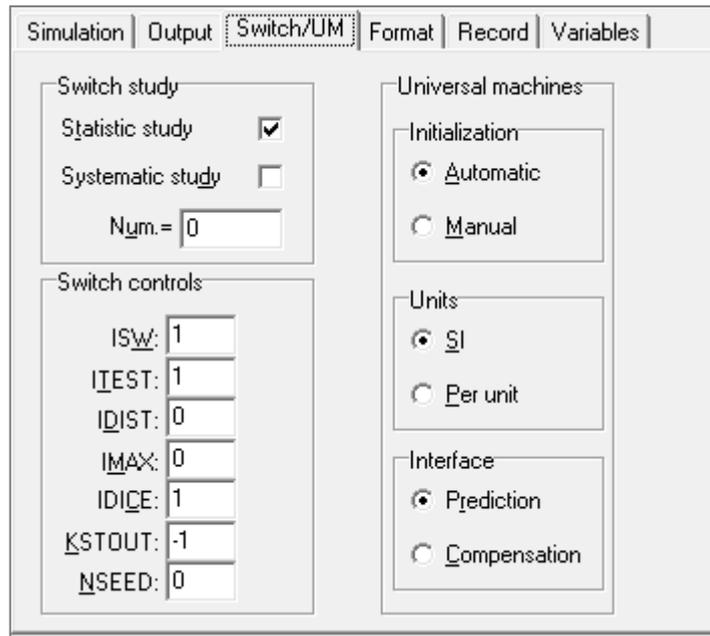


Figura 1. Janela de opções de simulação – *Switch/UM*.

No campo *Switch study* podemos seleccionar os métodos de simulação disponibilizados pelo ATP.

- **Statistic Study – Estudo Estatístico:**

Habilita um estudo com chaves estatísticas.

- **Systematic Study – Estudo Sistemático:**

Habilita um estudo com chaves sistemáticas.

- **Num – Número:**

Define o número de simulações estatísticas.

Switch controls

- ISW: Se 1, o tempo de fechamento/abertura de todas chaves aparecem no arquivo LIS. Para não aparecer o parâmetro deve ser zero.
- ITEST: Atraso aleatório extra usando DEGMIN, DEGMAX e STATFR em STARTUP. Os valores possíveis são:
 - 0: Atraso aleatório extra para todas as chaves.
 - 1: Sem atraso aleatório.
 - 2: Atraso aleatório extra para todas as chaves de fechamento.
 - 3: Atraso aleatório extra para todas as chaves de abertura.
- IDIST: Seleciona a função de distribuição de probabilidade de operações de fechamentos/aberturas subsequentes. Zero significa distribuição gaussiana e 1 significa distribuição uniforme.
- IMAX: Se 1, o valor extremo é gravado no arquivo LIS para cada energização. Se zero, nenhum valor é gravado.
- IDICE: Controla o uso do gerador aleatório. Um valor de zero implica em um gerador aleatório dependente do computador e o valor de 1 significa um gerador aleatório padrão.
- KSTOUT: Se zero, para cada energização é gravado um dado (LUNIT6) extra na saída. A saída do passo de integração será impressa. Se -1, nenhum dado de saída será gravado.
- NSEED: Simulações repetitivas de Monte-Carlo. Os valores possíveis são:
 - 0: Todas as simulações no mesmo caso de dados serão diferentes.
 - 1: Mesmo resultado cada vez que o caso de dados é executado no mesmo computador.

APÊNDICE B: CHAVE ESTATÍSTICA

Para selecionar a chave estatística devemos clicar com o botão direito do mouse, ir na aba *Switches* e escolher a opção *Statistic Switch*. O padrão que simula a chave estatística é representado na Figura (1). Este é um componente de uso monofásico, portanto em casos trifásicos é necessário o uso do objeto *Splitter* na aba *Probe & 3-phase*.

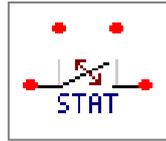


Figura 1. Representação do modelo de chave estatística.

As opções de simulação que temos no componente da chave estatística, na aba *Attributes*, são:

- Switch Type: Nesta lista temos 3 opções:

- Independent – Chave independente:

Contém apenas dois nós e trabalha com um tempo de fechamento/abertura inserido pelo usuário.

- Master – Chave Mestra:

Contém apenas dois nós e trabalha com um tempo de fechamento/abertura inserido pelo usuário. Cada simulação deve conter apenas uma chave mestra.

- Slave – Chave Escrava:

Contém quatro nós e trabalha com um tempo de fechamento/abertura relacionado com o inserido na chave mestra. Deve-se conectar os nós adicionais junto aos nós da chave mestra.

A Figura (2). Representa o uso do *Splitter* juntamente com uma chave mestra (chave superior na figura) e duas chaves escravas (chaves do meio e inferior).

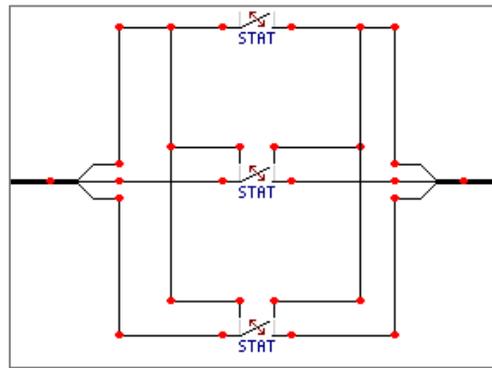


Figura 2. Representação do modelo de chave estatística.

Os parâmetros de entradas, representados na Figura (3), são:

- T: Instante de fechamento ou abertura da chave, em segundos. Para chaves escravas este valor significa o delay a partir do chaveamento da chave mestra.
- Dev.: Valor de desvio padrão, em segundos.
- Ie: A chave abre se em um instante $T > T_{\text{médio}}$ a corrente que passa na chave é menor que Ie.
- Open/Close: Seleciona se a chave irá fechar ou abrir.
- Distribution: Selecionar entre distribuição uniforme e gaussiana.

Component: Sw_stat.sup

Attributes

STATISTIC SWITCH

Switch type: Slave

T: 0.02

Dev.: 0.0055

Ie: 0

Open/Close: Opening Closing

Distribution: Uniform Gaussian

NODE	PHASE	NAME
SW_F	A	
SW_T	A	
REF_F	A	
REF_T	A	

Order: 0 Label:

Comment:

Output: 0 - No Hide Lock

Figura 3. Janela de entrada de dados – chave estatística.

A Figura (4) apresenta um exemplo dos resultados de um estudo estatístico através do arquivo .lis, o qual é gerado a partir da simulação:

```

7 ) -----
Statistical distribution of peak voltage at node "RA ". The base voltage for per unit printout is V-base = 1.87794000E+05
Interval      voltage      voltage in      Frequency      Cumulative      Per cent
number        in per unit    physical units  (density)      frequency      .GE. current value
23            1.1500000     2.15963100E+05  0              0              100.000000
24            1.2000000     2.25352800E+05  189            189            5.500000
25            1.2500000     2.34742500E+05  3              192            4.000000
26            1.3000000     2.44132200E+05  0              192            4.000000
27            1.3500000     2.53521900E+05  1              193            3.500000
28            1.4000000     2.62911600E+05  2              195            2.500000
29            1.4500000     2.72301300E+05  4              199            .500000
30            1.5000000     2.81691000E+05  0              199            .500000
31            1.5500000     2.91080700E+05  1              200            .000000
Summary of preceding table follows:      Grouped data      Ungrouped data
                                          Mean = 1.18525000E+00  1.17600701E+00
                                          Variance = 2.31903266E-03  2.63855898E-03
                                          Standard deviation = 4.81563357E-02  5.13669055E-02

```

Figura 4. Apresentação de dados no arquivo .LIS.

O arquivo demonstra primeiro o nó e a fase em análise. Por isso, neste caso o nome do nó é “R” com análise na fase A, gerando o nome “RA”.

Após a identificação do nó, o arquivo apresenta os maiores valores de tensões dentre todas as simulações. Na coluna *voltage in per unit* é apresentado, de forma crescente, as sobretensões em p.u., e ao lado são vinculados estes valores em Volts, a partir da tensão base (V-base) de 187,94 kV.

A partir destes dados, o programa calcula as variáveis estatísticas que representam os valores de sobretensões simuladas, são elas a média, variância e desvio padrão, representadas por *mean*, *variance* e *standad deviation*, respectivamente.

ANEXOS

ANEXO 1: Submódulo 23.3 – Diretrizes e critérios para estudos elétricos.

9 DIRETRIZES PARA ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS SOB CONDIÇÕES DE MANOBRA

9.2 Estudos de manobras em equipamentos

9.2.1 Estudos estatísticos

9.2.1.1 Os estudos estatísticos devem ser realizados para as situações em que seja necessário quantificar as solicitações transitórias considerando a simulação de parâmetros e as características probabilísticas dos equipamentos de manobra.

9.2.1.2 Em função da influência da aleatoriedade dos instantes de operação dos disjuntores, os estudos estatísticos devem ser efetuados por análise probabilística que envolva a execução de, pelo menos, duzentos casos, de forma a assegurar a representação estatística dos estudos. O disjuntor manobrado deve ser modelado como chave estatística. Os tempos de operação individuais de cada uma das três fases devem seguir uma distribuição gaussiana de probabilidades associada à dispersão do instante de fechamento entre os contatos principais (ou contatos auxiliares). Os tempos médios de operação do conjunto das três fases, em cada manobra, devem ser distribuídos uniformemente ao longo de um ciclo da frequência fundamental.

9.2.1.3 Na modelagem de disjuntores dotados de resistores de pré-inserção, tanto os contatos principais quanto os auxiliares devem ser modelados como chaves estatísticas. A operação dos contatos principais deve ocorrer de forma dependente daquela associada aos contatos auxiliares, após o tempo de inserção dos resistores das três fases, levando-se em conta sua dispersão e tempo médio.

9.2.1.4 Na modelagem de disjuntores dotados de dispositivos sincronizadores, é necessário definir-se previamente, com auxílio de simulação determinística, o instante ideal de fechamento de cada pólo do disjuntor. Esse instante de tempo é adotado como tempo médio de operação de cada pólo, que deve ser representado por chave estatística com distribuição gaussiana. As dispersões em torno dos tempos médios de cada pólo são representadas pelo desvio padrão do

tempo de fechamento do conjunto disjuntor-sincronizador. Essas dispersões são função da precisão mecânica do disjuntor, da precisão do sincronizador, bem como da variação da taxa de decremento da rigidez dielétrica do gap entre os contatos durante o fechamento do disjuntor.

9.2.1.5 A modelagem de disjuntores com sincronizadores deve seguir as diretrizes do CIGRE (abril, 1999¹⁶ e agosto, 1999¹⁷), que apresentam detalhes relevantes sobre esse tema para as condições de manobra às quais usualmente se aplica chaveamento controlado, levando-se em conta as informações garantidas pelo fabricante e fornecidas pelo agente.

9.2.1.6 Para os estudos pré-operacionais e de recomposição, adotam-se os parâmetros informados pelos agentes.

9.2.1.7 Energização de linhas de transmissão:

(a) para condição de fechamento mais crítica determinada pelas simulações probabilísticas, devem ser simuladas manobras com e sem a aplicação de curto-circuito fase-terra no terminal remoto da linha e com e sem reatores para o caso de circuitos com compensação em derivação, ou seja, compensação shunt:

(1) as indisponibilidades dos reatores deverão ser restritas somente aos reatores manobráveis;

(2) no caso específico dos estudos de projeto básico, a aplicação do defeito deve ser simulada, também, em ambos os terminais e no meio da linha;

(b) no caso de estudos de surtos de manobra, as linhas de transmissão devem ser modeladas considerando seus parâmetros distribuídos:

(1) no caso particular de linhas curtas – por exemplo, naquelas em que o tempo de tráfego das ondas eletromagnéticas é inferior ao passo de integração – a modelagem pode ser realizada por seções Pi (Π);

(2) nos casos em que o amortecimento das sobretensões for crítico para a análise do fenômeno, a dependência dos parâmetros da linha de transmissão com a frequência deve ser representada;

(3) em certos casos como, por exemplo, linhas não transpostas e em casos de influência dominante do modo terra (ou modo de sequência zero) na resposta, pode ser requerido o modelo que considera a variação dos seus parâmetros com a frequência.

9.2.1.10 Religamento tripolar:

- (a) os estudos de religamento tripolar avaliam as sobretensões transitórias e as energias dissipadas nos pára-raios causadas pelo religamento de linhas de transmissão;
- (b) esses estudos têm o objetivo de estabelecer as condições para a viabilização (por meio do estudo do projeto básico) e ativação (por meio do estudo pré-operacional) desses religamentos, de acordo com os critérios estabelecidos para os estudos de transitórios eletromagnéticos;
- (c) o sistema sob estudo deve ser modelado da forma explicitada a seguir:
 - (1) na modelagem das máquinas síncronas existentes na região em análise, devem ser considerados os efeitos subtransitórios e, se houver dados disponíveis, os efeitos de saturação magnética;
 - (2) devem ser considerados os acoplamentos capacitivos mútuos, por meio da representação adequada dos parâmetros das linhas de transmissão no trecho em análise; devem ser considerados os circuitos paralelos próximos à faixa de passagem da linha sob avaliação, bem como devem ser consideradas as transposições existentes;
 - (3) os defeitos são representados por curtos-circuitos francos fase-terra;
- (d) devem ser analisadas as indisponibilidades somente dos reatores manobráveis;
- (e) devem ser simulados religamentos com e sem sucesso;
- (f) devem ser realizadas simulações determinísticas para a condição mais crítica de religamento com os pára-raios representados;
- (g) nos estudos de religamento tripolar deve ser observada a sistemática descrita a seguir:
 - (1) aplicar defeito monofásico franco em um dos terminais da linha;
 - (2) se houver compensação série na linha a ser religada, utilizar as informações detalhadas do equipamento, que devem ser obtidas do projeto básico ou ser informadas pelo agente responsável; caso não disponíveis, realizar by-pass do capacitor série no terminal da linha do defeito, considerando os seguintes tempos:
 - (i) para bancos de capacitores com gap de disparo forçado: 10ms após a aplicação do defeito próximo ao capacitor ou 40ms após a aplicação do defeito remoto ao capacitor;

(ii) para bancos de capacitores desprovidos de gap deve-se acrescentar aos tempos anteriores o tempo de fechamento do disjuntor de bypass;

(3) realizar a abertura tripolar do terminal mais próximo do defeito conforme o tempo previsto pela proteção de linha; na falta dessa informação do sistema de proteção, utilizar o valor indicado na Tabela 3 do item 8.2.12 deste submódulo;

(4) realizar a abertura tripolar do terminal oposto ao defeito no tempo de transferência de disparo previsto pela proteção de linha; na falta dessa informação, utilizar o tempo de 20ms após a abertura do terminal mais próximo da falta;

(5) para representar carga residual da linha aberta, manter o curto na linha após sua total abertura e eliminá-lo no instante em que o valor eficaz da corrente de arco secundário for igual ou inferior a 20A para tempo morto de até 500ms;

(6) se houver compensação série na linha, reinserir o(s) banco(s) de capacitores série antes do religamento da linha, caso a proteção do equipamento permita;

(7) religar a linha por um dos terminais após o tempo morto e seguir os mesmos procedimentos utilizados para a energização de linha (item 9.2.1.7 deste submódulo);

(8) adotar o tempo morto de 500ms para estudos de projeto básico e, para os estudos pré-operacionais, definir o tempo morto em função dos resultados obtidos nos estudos de estabilidade eletromecânica;

(9) caso haja linhas em paralelo induzindo tensões na linha sob estudo, considerar também para o cálculo do tempo morto os resultados de estudos de extinção do arco secundário (vide item 10.10 deste submódulo).

9.2.1.11 Religamento monopolar:

(a) as alíneas (a) a (f) do item 9.2.1.10 deste submódulo aplicam-se também aos estudos de religamento monopolar, quando se fecha o terminal remoto, independentemente de existirem circuitos paralelos;

(b) adicionalmente, os estudos de religamento monopolar devem quantificar os valores das correntes de neutro nas transformações eletricamente próximas à manobra, durante a operação desequilibrada;

(c) nesse tipo de estudo, deve-se seguir a sistemática apresentada a seguir:

(1) aplicar defeito monofásico franco em um dos terminais da linha;

(2) se houver compensação série na linha a ser religada, utilizar as informações detalhadas do equipamento, que devem ser obtidas do projeto básico ou ser informadas pelo agente responsável; caso não disponíveis, realizar by-pass do capacitor série no terminal da linha do defeito considerando os seguintes tempos:

(i) para bancos de capacitores com gap de disparo forçado: 10 ms após a aplicação do defeito próximo ao capacitor ou 40 ms após a aplicação do defeito remoto ao capacitor;

(ii) para bancos de capacitores desprovidos de gap deve-se acrescentar aos tempos anteriores o tempo de fechamento do disjuntor de bypass;

(3) realizar a abertura monopolar do terminal mais próximo do defeito conforme o tempo previsto pela proteção de linha; na falta dessa informação do sistema de proteção, utilizar o valor indicado na Tabela 3 do item 8.2.12 deste submódulo;

(4) realizar a abertura monopolar do terminal oposto ao defeito no tempo de transferência de disparo previsto pela proteção de linha; na falta dessa informação, utilizar o tempo de 20ms após a abertura do terminal mais próximo da falta;

(5) para representar carga residual da linha aberta, manter o curto na linha após sua total abertura e eliminá-lo no instante em que o valor eficaz da corrente de arco secundário for igual ou inferior a 20A para tempo morto de até 500ms;

(6) se houver compensação série na linha, reinsserir o(s) banco(s) de capacitores série antes do religamento da linha, caso a proteção do equipamento permita;

(7) religar a linha por um dos terminais após o tempo morto e seguir a mesma sistemática utilizada para a energização de linha (vide item 9.2.1.7 deste submódulo);

(8) adotar o tempo morto conforme item 9.2.2.3 deste submódulo.