

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

NATHALIA DE MORAIS DIAS CAMPOS

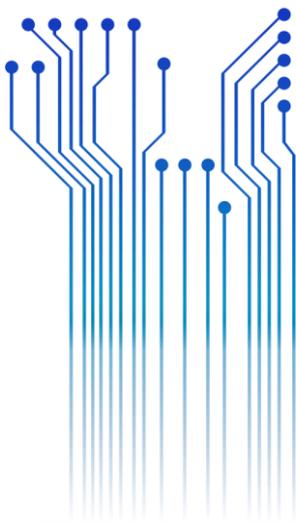


Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO CHAVEAMENTO CONTROLADO EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO DE CIRCUITO DUPLO



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2018

NATHALIA DE MORAIS DIAS CAMPOS

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO CHAVEAMENTO CONTROLADO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO
DE CIRCUITO DUPLO

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

Área de Concentração: Processamento de Energia

Professor Karcus Marcelus Colaço Dantas, D.Sc.
Orientador

Campina Grande
2018

NATHALIA DE MORAIS DIAS CAMPOS

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO CHAVEAMENTO CONTROLADO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO
DE CIRCUITO DUPLO

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

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em 21/03/2018

Professor George Rossany Soares de Lira, D.Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Karcus Marcelus Colaço Dantas, D.Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos os professores e funcionários que contribuíram para a minha formação ao longo destes anos e que me transmitiram conhecimentos essenciais para a minha trajetória profissional.

Em especial, agradeço ao professor Karcus Dantas pela oportunidade de realizar este trabalho sob sua orientação e por seu auxílio e ensinamentos durante não somente o desenvolvimento deste trabalho, mas também ao longo do curso de graduação.

Também gostaria de agradecer aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, Adail e Tchai, por toda ajuda dada ao longo do curso.

Agradeço também à minha família por terem me proporcionado uma boa educação e, em especial, ao meu pai por todo o incentivo e suporte ao longo desta caminhada.

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

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho do algoritmo de um método de chaveamento controlado quando aplicado ao religamento de linhas de transmissão de circuito duplo. Por meio do ATP (Alternative Transients Program) é modelado um sistema elétrico utilizando-se duas geometrias distintas de linhas de transmissão de circuito duplo. Simulações são feitas no ATP e o algoritmo é aplicado considerando a linha com ciclos de transposição. Os resultados são avaliados e verifica-se que o método escolhido de chaveamento controlado é capaz de identificar os instantes ótimos de religamento das linhas, exceto para as fases sob defeito. Com o intuito de superar esta limitação, foi proposta uma modificação na estratégia de cálculo dos instantes ótimos. A modificação proposta foi testada e observou-se uma melhoria na localização dos instantes ótimos das fases sob falta em alguns dos casos testados.

Palavras-chave: chaveamento controlado, linha de transmissão de circuito duplo, defeitos, simulação de transitórios eletromagnéticos, ATP.

ABSTRACT

The objective of this work is to evaluate the performance of the algorithm of a controlled switching method when applied to the reclosing of double circuit transmission lines. Using the ATP (Alternative Transients Program), an electric system is modeled using two different geometries of double circuit transmission lines. Simulations are done in ATP and the algorithm is applied considering the line with transposition cycles. The results are evaluated and it is verified that the chosen controlled switching method is able to identify the optimal reclosing instants of the line, except for the phases under fault. In order to overcome this limitation, a modified strategy for calculating the optimal reclosing instants was proposed. The proposed modification was tested and an improvement in the location of the optimal reclosing instants for the phases under fault was observed for some of the simulation cases.

Keywords: controlled switching, double circuit transmission line, faults, electromagnetic transients simulation, ATP.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de temporização do chaveamento controlado.....	14
Figura 2 - Tensão entre os contatos do disjuntor para a linha sem carga residual.	14
Figura 3 - Tensão entre os contatos do disjuntor para linha com carga residual.	15
Figura 4 - Tensão entre os contatos do disjuntor para linha com 30% de compensação.	16
Figura 5 - Tensão entre os terminais do disjuntor para linha com 80% de compensação.	16
Figura 6 - Circuito equivalentes em componentes simétricas para uma linha de transmissão de circuito duplo.....	23
Figura 7 - Modelo do sistema elétrico.	24
Figura 8 - Esquema de transposição da LT de circuito duplo.....	24
Figura 9 - Modelo do sistema elétrico com uma LT dupla com ciclos de transposição no ATPDraw.	26
Figura 10 - Geometria da LT de circuito duplo.	27
Figura 11 - Identificação da extinção de um defeito fase-terra.	28
Figura 12 – (a) Extrapolação dos sinais de tensão e (b) determinação dos instantes ótimos de fechamento do disjuntor.....	28
Figura 13 – Sobretensões observadas na metade do comprimento da linha.	29
Figura 14 - Identificação da extinção de um defeito fase-terra no (a) circuito 1 e no (b) circuito 2.....	30
Figura 15 – Extrapolação dos sinais de tensão no disjuntor para o (a) circuito 1 e o (b) circuito 2.	30
Figura 16 – Determinação dos instantes ótimos para religamento do (a) circuito 1 e do (b) circuito 2.	31
Figura 17 - Sobretensões observadas na metade do comprimento da linha no (a) circuito 1 e no (b) circuito 2.....	31
Figura 18 - Identificação da extinção de um defeito fase-terra no (a) circuito 1 e no (b) circuito 2.....	32
Figura 19 – Extrapolação dos sinais de tensão no disjuntor para o (a) circuito 1 e o (b) circuito 2.	33
Figura 20 – Determinação dos instantes ótimos para religamento do (a) circuito 1 e do (b) circuito 2.	33
Figura 21 - Sobretensões observadas na metade do comprimento da linha no (a) circuito 1 e no (b) circuito 2.....	34
Figura 22 - Geometria da linha de transmissão de circuito duplo com apenas uma torre.	35
Figura 23 - Identificação da extinção de um defeito fase-terra.	36
Figura 24 – (a) Extrapolação dos sinais de tensão e (b) determinação dos instantes ótimos de fechamento do disjuntor.....	36
Figura 25 – Sobretensões observadas na metade do comprimento da linha.	37
Figura 26 - Identificação da extinção de um defeito fase-terra no (a) circuito 1 e no (b) circuito 2.....	38
Figura 27 – (a) Extrapolação dos sinais de tensão e (b) determinação dos instantes ótimos de fechamento do disjuntor.....	38
Figura 28 – Determinação dos instantes ótimos para religamento do (a) circuito 1 e do (b) circuito 2.	39
Figura 29 - Sobretensões observadas na metade do comprimento da linha no (a) circuito 1 e no (b) circuito 2.....	39
Figura 30 - Identificação da extinção de um defeito fase-terra no (a) circuito 1 e no (b) circuito 2.....	40
Figura 31 – (a) Extrapolação dos sinais de tensão e (b) determinação dos instantes ótimos de fechamento do disjuntor.....	41
Figura 32 – Determinação dos instantes ótimos para religamento do (a) circuito 1 e do (b) circuito 2.	41
Figura 33- Sobretensões observadas na metade do comprimento da linha no (a) circuito 1 e no (b) circuito 2.....	42
Figura 34 – Estratégia de determinação dos instantes ótimos de fechamento do disjuntor de acordo com o proposto em (DANTAS, 2007).	43
Figura 35 – Melhoria proposta na estratégia do cálculo dos instantes ótimos.	44
Figura 36 - Instantes ótimos de religamento calculados antes e após a modificação proposta - falta simples fase-terra.....	45
Figura 37 - Instantes ótimos de religamento calculados antes e após a modificação proposta para o (a) circuito 1 e o (b) circuito 2 – falta simultânea.	46
Figura 38 - Instantes ótimos de religamento calculados antes e após a modificação proposta para o (a) circuito 1 e o (b) circuito 2 – falta simples seguida de falha na proteção.	46
Figura 39 - Instantes ótimos de religamento calculados antes e após a modificação proposta - falta simples fase-terra.....	47

Figura 40 - Instantes ótimos de religamento calculados antes e após a modificação proposta para o (a) circuito 1 e o (b) circuito 2 – falta simultânea.	48
Figura 41 - Instantes ótimos de religamento calculados antes e após a modificação proposta para o (a) circuito 1 e o (b) circuito 2 – falta simples seguida de falha na proteção.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados da compensação reativa.....	24
Tabela 2 - Tensão das fontes ($V_{base} = 500kV$).	25
Tabela 3 - Impedância das fontes.	25
Tabela 4 - Dados dos condutores da linha de transmissão.	25

SUMÁRIO

1	Introdução.....	11
1.1	Objetivos.....	12
1.2	Estrutura do Trabalho.....	12
2	Fundamentação Teórica.....	13
2.1	Chaveamento Controlado de Linhas de Transmissão.....	13
2.1.1	Energização de Linhas de Transmissão.....	14
2.1.2	Religamento de Linhas de Transmissão.....	15
2.2	Estratégia de Chaveamento Controlado.....	16
2.2.1	Filtragem e Amostragem.....	16
2.2.2	Análise da Carga Residual.....	17
2.2.3	Análise da Extinção de Faltas.....	19
2.2.4	Extrapolação dos Sinais.....	20
2.2.5	Determinação dos Instantes ótimos.....	20
2.3	Linhas de Transmissão de Circuito Duplo.....	21
3	Avaliação do Método.....	24
3.1	Cenário 1: Linha de Transmissão com Circuitos em Torres Distintas.....	26
3.1.1	Falta Simples.....	27
3.1.2	Falta Simultânea.....	29
3.1.3	Falta Simples Seguida de Falha na Proteção.....	31
3.2	Cenário 2: Linha de Transmissão com Circuitos em uma Única Torre.....	34
3.2.1	Falta Simples.....	35
3.2.2	Falta Simultânea.....	37
3.2.3	Falta Simples Seguida de Falha na Proteção.....	40
4	Melhoria Proposta.....	43
4.1	Resultados e Avaliação.....	44
4.1.1	Cenário 1: Linha de Transmissão com Circuitos em Torres Distintas.....	45
4.1.2	Cenário 2: Linha de Transmissão com Circuitos em uma Única Torre.....	47
5	Conclusão.....	49
	Referências.....	50

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos estão sujeitos a mudanças bruscas em sua condição de operação, o que pode acontecer devido à ocorrência de faltas ou, mais comumente, devido a manobras nas linhas de transmissão. O estudo e a quantificação dos níveis de sobretensão aos quais um sistema elétrico está sujeito forma a base para a determinação da coordenação de isolamento desse sistema. Além do aspecto técnico, a escolha dos níveis de isolamento dos equipamentos e linhas de transmissão está limitada por questões econômicas e, por esta razão, é de fundamental importância que as sobretensões afetando o sistema elétrico sejam minimizadas.

O aumento da tensão de operação das linhas de transmissão tornou as sobretensões de manobra um fator fundamental e determinante para a coordenação de isolamento. As sobretensões de manobra ocorrem quando há uma mudança na topologia do sistema elétrico, causada pela energização ou religamento de linhas de transmissão, eliminação de defeitos, manobras de cargas indutivas e capacitivas, etc. e possuem um caráter estatístico, pois dependem do instante na forma de onda da tensão em que os contatos do disjuntor se fecham eletricamente.

Diversas técnicas têm sido empregadas para reduzir os níveis deste tipo de sobretensão, como a utilização de resistores de pré-inserção, para-raios e chaveamento controlado. Este último consiste na utilização de um dispositivo eletrônico que permita o fechamento elétrico do disjuntor em um instante pré-determinado em relação a um sinal de referência de tensão ou corrente.

O algoritmo executado pelo controlador utiliza as medições do sinal de referência para determinar os instantes ótimos de fechamento do disjuntor. O tempo de operação do disjuntor bem como os intervalos de pré-arco e processamento são levados em consideração com o intuito de determinar o instante ótimo para execução do comando de operação do disjuntor. A utilização do chaveamento controlado tem se mostrado vantajosa, pois demonstra um desempenho superior ou igual em relação às outras técnicas citadas anteriormente.

No entanto, o método possui limitações quando aplicado a situações em que há acoplamento eletromagnético entre fases, o que resulta em formas de onda mais

complexas e que representam um desafio ao método. Este é o caso quando são utilizadas linhas de transmissão de circuito duplo, comumente encontradas em sistemas elétricos, em que os circuitos se encontram próximos resultando em um acoplamento indutivo e capacitivo entre as fases.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é uma revisão bibliográfica da aplicação do chaveamento controlado na redução de sobretensões de manobra em linhas de transmissão e, especificamente, o estudo da aplicação deste método em linhas de transmissão de circuito duplo utilizando o ATP (Alternative Transients Program).

Os objetivos específicos são:

- Estudar as particularidades da aplicação do método de chaveamento controlado em linhas de circuito duplo;
- Implementar o método de chaveamento controlado e modelar o sistema elétrico a ser estudado;
- Realizar simulação no ATP e avaliar os resultados.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Inicialmente, a fundamentação teórica sobre o método de chaveamento controlado e a modelagem de linhas de transmissão de circuito duplo é apresentada no Capítulo 2. No Capítulo 3 é detalhada a modelagem do sistema elétrico estudado e a avaliação do desempenho do método de chaveamento controlado em alguns cenários. Em seguida, no Capítulo 4 é apresentada uma proposta de melhoria do método e, por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir, desenvolvem-se os conceitos fundamentais relacionados ao chaveamento controlado de linhas de transmissão, detalhando-se o método que será empregado neste trabalho. Em seguida, são apresentadas as noções básicas sobre linhas de transmissão de circuito duplo para que se compreenda como estas podem afetar o desempenho do chaveamento controlado.

2.1 CHAVEAMENTO CONTROLADO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

O chaveamento controlado é uma das técnicas utilizadas para minimizar as sobretensões de manobra em linhas de transmissão e consiste em controlar os instantes de abertura e fechamento do disjuntor com o objetivo de realizar o chaveamento em um determinado ponto do sinal de referência. Tal operação é realizada através do monitoramento de sinais de referência de tensão ou de corrente por meio de dispositivos eletrônicos.

A estratégia utilizada varia conforme o tipo de manobra e as condições da linha, sendo destacadas neste trabalho as seguintes manobras de fechamento: energização e religamento com ou sem cargas residuais e com ou sem compensação reativa.

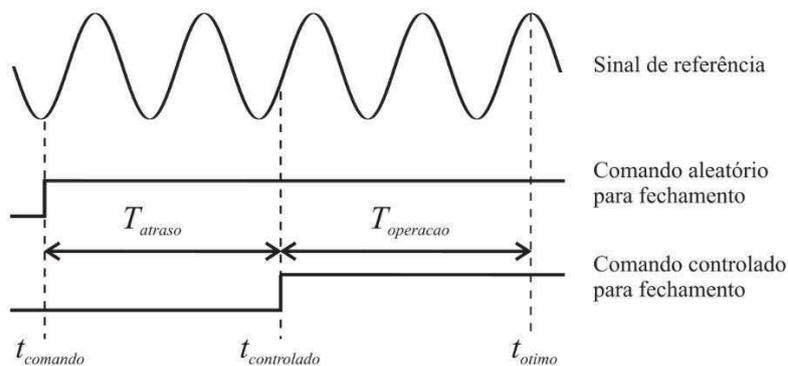
Em geral, a estratégia do chaveamento controlado consiste em atrasar o instante $t_{comando}$ em que é enviado o comando para o fechamento do disjuntor de um intervalo de tempo T_{atraso} de modo que os contatos do disjuntor fechem no instante de tempo desejado $t_{ótimo}$. Para isso, deve ser observado o tempo $T_{operação}$ para o fechamento mecânico dos contatos do disjuntor.

O cálculo de T_{atraso} deve levar em consideração os intervalos: $T_{pré-arco}$ entre o instante em que ocorre o pré-arco e o instante em que há o acoplamento físico dos contatos do disjuntor; $T_{cálculo}$ que é o tempo utilizado pelo controlador para operações e cálculos internos; e $T_{sincronização}$ em que o controlador introduz um atraso para que o fechamento ocorra no instante $t_{ótimo}$.

Conforme ilustrado na Figura 1, tem-se:

$$t_{\text{ótimo}} = t_{\text{comando}} + T_{\text{atraso}} + T_{\text{operação}} \quad (1)$$

Figura 1 - Esquema de temporização do chaveamento controlado.

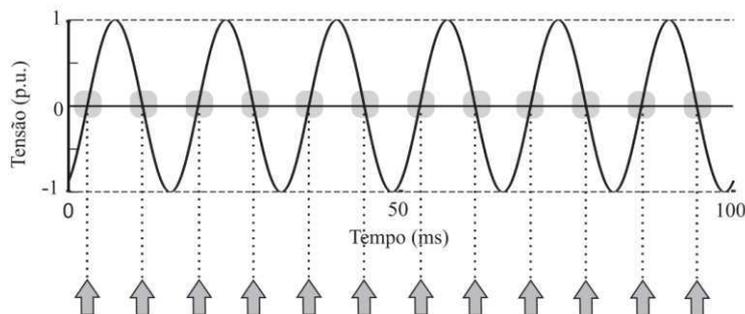


Fonte: (DANTAS, 2007).

2.1.1 ENERGIZAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

No caso de manobras de energização, o tempo transcorrido a partir do desligamento é suficiente para que a carga residual na linha de transmissão descarregue. Assim, a estratégia de chaveamento controlado é simplificada e consiste em monitorar a tensão do lado da fonte objetivando o fechamento do disjuntor na passagem por zero desse sinal de tensão. Na Figura 2 apresentam-se os possíveis instantes ótimos para o fechamento do disjuntor.

Figura 2 - Tensão entre os contatos do disjuntor para a linha sem carga residual.



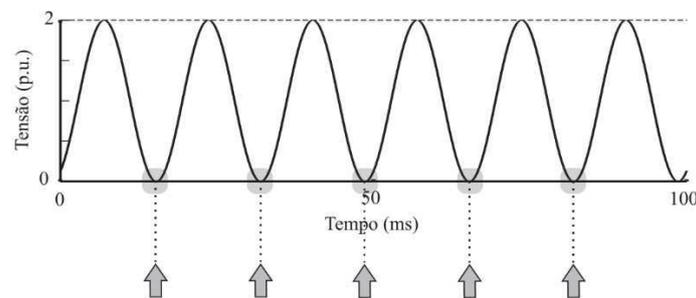
Fonte: (DANTAS, 2007).

2.1.2 RELIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

A manobra de religamento normalmente ocorre quando ainda há carga residual presente na linha. O comportamento desta carga pode ou não assumir um caráter oscilatório conforme o grau de compensação da linha de transmissão.

Para linhas sem compensação, a carga residual assume valor constante devido ao comportamento capacitivo da linha. O sinal a ser tomado como referência é a tensão nos contatos do disjuntor e o disjuntor deve ser fechado na passagem por zero deste sinal conforme indicado na Figura 3.

Figura 3 - Tensão entre os contatos do disjuntor para linha com carga residual.



Fonte: (DANTAS, 2007).

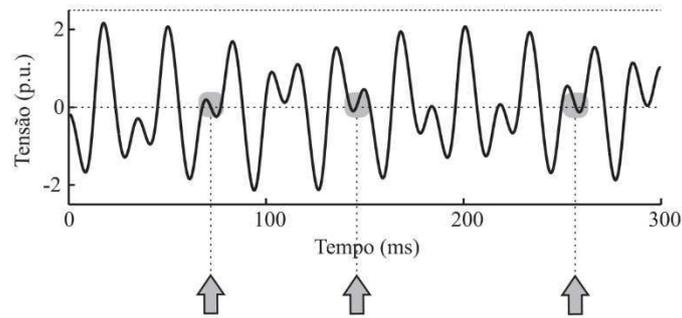
Quando a linha de transmissão possui compensação em derivação, a carga residual oscila com uma frequência dependente do grau de compensação da linha. Essa frequência assume normalmente valores entre 30 e 55 Hz e é dada pela equação:

$$f_l = f_{60} \sqrt{k}, \quad (2)$$

em que k é o grau de compensação da linha e f_{60} é a frequência fundamental do sistema.

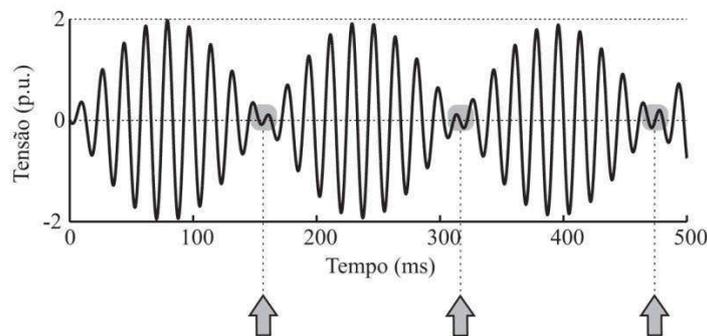
O sinal de referência a ser adotado é a tensão nos terminais do disjuntor, que apresenta uma forma de onda pulsante. Quanto maior o grau de compensação da linha, mais bem definida é a pulsação do sinal. Os instantes ótimos para o chaveamento são aqueles em que ocorre a passagem por zero da tensão e se encontram na região de menor pulsação do sinal. Nas Figura 4 e Figura 5, apresentam-se os sinais de tensão nos disjuntores bem como os instantes ótimos de chaveamento para linhas com compensação de 30% e 80%, respectivamente.

Figura 4 - Tensão entre os contatos do disjuntor para linha com 30% de compensação.



Fonte: (DANTAS, 2007).

Figura 5 - Tensão entre os terminais do disjuntor para linha com 80% de compensação.



Fonte: (DANTAS, 2007).

2.2 ESTRATÉGIA DE CHAVEAMENTO CONTROLADO

Para fins de estudo do comportamento do chaveamento controlado em linhas duplas de transmissão, foi adotado o método proposto por Dantas *et al* (2008). Esta estratégia de chaveamento controlado é baseada na detecção dos instantes de passagem por zero do sinal de tensão. Em especial, este método propõe uma abordagem para os casos de religamento de linhas de transmissão com ocorrência de defeitos fase-terra e fase-fase-terra que tem como objetivo evitar que o religamento ocorra enquanto a linha ainda está sob falta. A seguir é feito um detalhamento do algoritmo utilizado.

2.2.1 FILTRAGEM E AMOSTRAGEM

Inicialmente, os sinais de referência do lado da linha e do lado da fonte são recebidos e filtrados utilizando-se um filtro Butterworth passa-baixa de terceira ordem, com o intuito de minimizar o efeito *aliasing* e reduzir as componentes de alta frequência.

A seguir, os sinais filtrados são amostrados a uma taxa de 16 amostras por ciclo da frequência fundamental de 60 Hz.

2.2.2 ANÁLISE DA CARGA RESIDUAL

Após obtidos os sinais amostrados, as tensões do lado da linha de transmissão v_a , v_b e v_c são decompostas em componentes modais v_0 , v_1 e v_2 com o objetivo de determinar as componentes de frequência existentes nesse sinal. Para realizar essa transformação, utiliza-se a matriz de Karrenbauer como segue

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}. \quad (3)$$

A relação inversa é dada por

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

A partir das duas equações anteriores é possível derivar as relações que caracterizam a carga residual para casos de abertura trifásica e defeitos fase-terra, fase-fase-terra e fase-fase.

Quando há uma abertura trifásica sem ocorrência de defeitos, a carga residual oscila com duas componentes de frequência. Uma das componentes de frequência é comum às três fases e é dada por v_0 . A segunda componente de frequência depende da fase que está sendo avaliada e as expressões correspondentes às fases A, B e C são dadas pelas equações (5), (6) e (7), respectivamente.

$$(v_1 + v_2) = \frac{1}{3}(2v_a - v_b - v_c), \quad (5)$$

$$(-2v_1 + v_2) = \frac{1}{3}(-v_a + 2v_b - v_c), \quad (6)$$

$$(v_1 - 2v_2) = \frac{1}{3}(-v_a - v_b + 2v_c). \quad (7)$$

As duas componentes de frequência que compõem o sinal de tensão das fases assumem um comportamento senoidal, o que permite que sua amplitude e frequência sejam estimadas através da detecção da passagem por zero desses sinais.

Quando há ocorrência de defeitos do tipo fase-terra a análise é dividida em duas etapas: durante o defeito e após sua extinção. A componente do modo 0 apenas é avaliada após a extinção da falta. Por outro lado, a componente de modo 1 pode ser avaliada para as fases sãs a partir do instante de abertura da linha. Durante o defeito, têm-se as seguintes expressões:

$$v_2(t) = -\frac{v_0(t)}{2} + \left[\frac{v_2(0) - v_1(0)}{2} \right] \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}} t\right), \quad (8)$$

$$v_1(t) = -\frac{v_0(t)}{2} - \left[\frac{v_2(0) - v_1(0)}{2} \right] \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}} t\right). \quad (9)$$

Após a extinção do defeito, as componentes de modo 1 das fases sãs passam a ser determinadas por:

$$v_{bmod1} = -2v_1 + v_2 - \frac{1}{2}v_0, \quad (10)$$

$$v_{cmod1} = v_1 - 2v_2 - \frac{1}{2}v_0. \quad (11)$$

Ainda após o defeito ser extinto, pode aparecer na fase que estava sob defeito (fase A) tensões induzidas pelas duas outras fases. Neste caso, as tensões induzidas são determinadas pelas mesmas equações aplicadas à abertura trifásica sem ocorrência de defeitos.

Para defeitos do tipo fase-fase-terra, a frequência de oscilação da carga residual na fase sã (fase A) é dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + 2L_0}{L_1 L_0 (C_0 + 2C_1)}}. \quad (12)$$

Após a extinção do defeito, as frequências de oscilação da carga residual são dadas pelas equações:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}, \quad (13)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}. \quad (14)$$

Neste tipo de situação, a análise da carga residual deve começar apenas após a extinção do defeito. Caso, o defeito passe a envolver apenas uma das fases e a terra antes de ser extinto, a análise deve ser feita de acordo com o que foi estabelecido para as faltas do tipo fase-terra.

Quando há um defeito do tipo fase-fase, a análise da carga residual é iniciada no momento da abertura da linha e as frequências de oscilação observadas são idênticas antes e após a extinção do defeito, sendo determinadas pelas mesmas equações mostradas anteriormente.

No caso de defeitos trifásicos, não há nenhuma carga residual na linha e, portanto, a análise da carga residual não é necessária.

2.2.3 ANÁLISE DA EXTINÇÃO DE FALTAS

Caso a abertura da linha de transmissão tenha sido causada pela incidência de algum defeito na linha, é necessário determinar se o defeito foi extinto durante o tempo morto. Se esta condição não for satisfeita, o religamento automático deve ser bloqueado para evitar danos ou estresse adicional aos componentes do sistema elétrico.

O método de identificação da extinção de defeitos pode ser aplicado a faltas do tipo fase-terra e fase-fase-terra. Ele consiste, simplificadamente, em verificar para os sinais de tensão do lado da linha a igualdade

$$v_1 + v_2 = -v_0. \quad (15)$$

Caso a equação anterior seja verdadeira, o defeito está presente na linha. Caso contrário, pode-se afirmar que o defeito foi extinto. No entanto, esta análise apenas se aplica quando são desprezadas a impedância de falta e a reatância de série da linha. Em situações práticas, nota-se que a soma $v_0 + v_1 + v_2$ é proporcional à impedância de falta e a detecção da existência do defeito é realizada verificando se os sinais $v_1 + v_2$ e v_0 são próximos.

Logo, ao invés de ser verificada a igualdade, são utilizadas técnicas de ajuste de curvas por meio da determinação do coeficiente R^2 para verificar a semelhança entre os sinais. Este coeficiente é definido matematicamente como:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}. \quad (16)$$

em que SSE é a soma quadrática das diferenças entre os sinais $(v_1 + v_2)$ e $(-v_0)$ e SST é a soma quadrática das diferenças entre $(-v_0)$ e seu valor médio (\bar{v}_0) , respectivamente:

$$SSE = \sum_{k=1}^N \{ [v_1(k) + v_2(k)] - [-v_0(k)] \}^2, \quad (17)$$

$$SST = \sum_{k=1}^N \{ [-v_0(k)] - \bar{v}_0 \}^2. \quad (18)$$

Este coeficiente assume valores entre 0 e 1, sendo 1 uma indicação de que os sinais se ajustam perfeitamente e 0, a situação contrária.

2.2.4 EXTRAPOLAÇÃO DOS SINAIS

Posteriormente, a passagem por zero dos sinais é detectada a partir da mudança de polaridade de duas amostras consecutivas. Uma vez conhecendo-se as passagens por zero do sinal é possível determinar seu período. Conhecendo-se o valor de pico do sinal entre dois zeros consecutivos, determina-se a amplitude e de posse destes dois parâmetros é possível estimar os sinais de referência em instantes futuros.

2.2.5 DETERMINAÇÃO DOS INSTANTES ÓTIMOS

O instante ótimo de fechamento para manobras de energização ocorre na passagem por zero do sinal de tensão do lado da fonte. Em manobras de religamento, devido à tensão residual existente na linha, é necessário avaliar separadamente os sinais do lado da fonte do lado da linha para determinar o instante em que a tensão nos terminais do disjuntor passa por zero e tem menor pulsação. Neste caso, o instante ótimo ocorre quando os dois sinais de referência possuem o mesmo valor instantâneo e a derivada com o mesmo sinal. Para verificar esta condição é feita a interpolação linear entre dois

instantes futuros consecutivos, analisando se os segmentos obtidos se interceptam neste intervalo e se suas derivadas possuem o mesmo sinal.

2.3 LINHAS DE TRANSMISSÃO DE CIRCUITO DUPLO

Em uma linha de transmissão de circuito duplo, dois circuitos trifásicos estão presentes em uma mesma torre de transmissão ou em duas torres distintas, mas próximas. Neste tipo de configuração, os sinais de tensão de um dos circuitos influenciam o outro e vice-versa devido à proximidade entre esses circuitos.

Considerando que as fases de cada circuito são perfeitamente transpostas e que os circuitos também são perfeitamente transpostos entre si, pode-se escrever a seguinte relação:

$$\begin{bmatrix} {}^m_1V_a \\ {}^m_1V_b \\ {}^m_1V_c \\ {}^m_2V_a \\ {}^m_2V_b \\ {}^m_2V_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} {}^n_1V_a \\ {}^n_1V_b \\ {}^n_1V_c \\ {}^n_2V_a \\ {}^n_2V_b \\ {}^n_2V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m & Z'_m & Z'_m & Z'_m \\ Z_m & Z_s & Z_m & Z'_m & Z'_m & Z'_m \\ Z_m & Z_m & Z_s & Z'_m & Z'_m & Z'_m \\ Z'_m & Z'_m & Z'_m & Z_s & Z_m & Z_m \\ Z'_m & Z'_m & Z'_m & Z_m & Z_s & Z_m \\ Z'_m & Z'_m & Z'_m & Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} {}^1I_a \\ {}^1I_b \\ {}^1I_c \\ {}^2I_a \\ {}^2I_b \\ {}^2I_c \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Em que os sinais indicados por 1V e 1I são as tensões e correntes do circuito 1 e 2V e 2I são as tensões e correntes do circuito 2. Z_s e Z_m são as impedâncias próprias e mútuas, respectivamente, entre os condutores de um mesmo circuito enquanto Z'_m é a impedância mútua entre os condutores de circuitos diferentes. Por simplicidade, supõe-se que ambos os circuitos possuem as mesmas configurações.

A equação anterior pode ser representada de forma simplificada por:

$$\begin{bmatrix} {}^m_1V_{abc} \\ {}^m_2V_{abc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} {}^n_1V_{abc} \\ {}^n_2V_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{sm} & \mathbf{Z}'_m \\ \mathbf{Z}'_m & \mathbf{Z}_{sm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} {}^1I_{abc} \\ {}^2I_{abc} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Com o objetivo de facilitar a análise, pode-se introduzir uma transformação utilizando as componentes simétricas, que consiste na decomposição dos sinais de tensão ou corrente trifásicos em três componentes: zero, positiva e negativa. Matematicamente, a transformação é definida da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (21)$$

ou

$$\mathbf{V}_{012} = \mathbf{a} \cdot \mathbf{V}_{abc}. \quad (22)$$

em que os vetores a e a^2 são definidos como

$$a = e^{j120^\circ}, \quad (23)$$

$$a^2 = -e^{j120^\circ}. \quad (24)$$

Aplicando-se a transformação em componentes simétricas à linha de transmissão de circuito duplo, tem-se:

$$\begin{bmatrix} {}^1\mathbf{V}_{012} \\ {}^2\mathbf{V}_{012} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} {}^1\mathbf{V}_{012} \\ {}^2\mathbf{V}_{012} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a} \cdot \mathbf{Z}_{sm} \cdot \mathbf{a}^{-1} & \mathbf{a} \cdot \mathbf{Z}'_m \cdot \mathbf{a}^{-1} \\ \mathbf{a} \cdot \mathbf{Z}'_m \cdot \mathbf{a}^{-1} & \mathbf{a} \cdot \mathbf{Z}_{sm} \cdot \mathbf{a}^{-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} {}^1\mathbf{I}_{012} \\ {}^2\mathbf{I}_{012} \end{bmatrix}. \quad (25)$$

Desenvolvendo-se as expressões, obtém-se a seguinte equação:

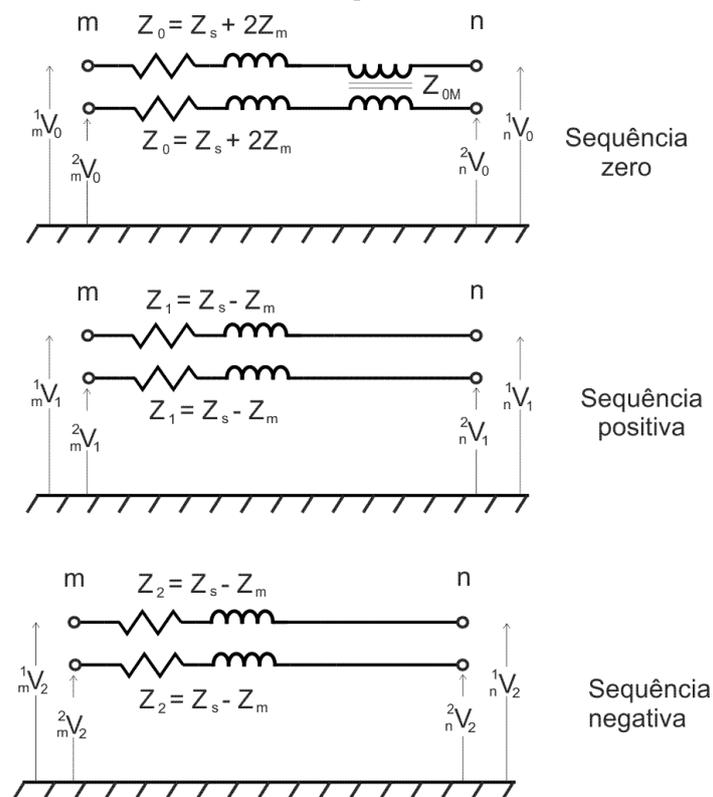
$$\begin{bmatrix} {}^1V_0 \\ {}^1V_1 \\ {}^1V_2 \\ {}^2V_0 \\ {}^2V_1 \\ {}^2V_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} {}^1V_0 \\ {}^1V_1 \\ {}^1V_2 \\ {}^2V_0 \\ {}^2V_1 \\ {}^2V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s + 2Z_m & 0 & 0 & 3Z'_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_s - Z_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_s - Z_m & 0 & 0 & 0 \\ 3Z'_m & 0 & 0 & Z_s + 2Z_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_s - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_s - Z_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} {}^1I_0 \\ {}^1I_1 \\ {}^1I_2 \\ {}^2I_0 \\ {}^2I_1 \\ {}^2I_2 \end{bmatrix}$$

Simplificadamente, a equação acima pode ser representada como:

$$\begin{bmatrix} {}^1V_0 \\ {}^1V_1 \\ {}^1V_2 \\ {}^2V_0 \\ {}^2V_1 \\ {}^2V_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} {}^1V_0 \\ {}^1V_1 \\ {}^1V_2 \\ {}^2V_0 \\ {}^2V_1 \\ {}^2V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 & Z_{0M} & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_1 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{0M} & 0 & 0 & Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} {}^1I_0 \\ {}^1I_1 \\ {}^1I_2 \\ {}^2I_0 \\ {}^2I_1 \\ {}^2I_2 \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Observando-se a equação anterior, conclui-se que as seqüências zero, positiva e negativa são independentes quando os circuitos são tomados separadamente. Quanto ao acoplamento entre os dois circuitos, este existe apenas para a seqüência zero e é indicado por Z_{0M} . A Figura 6 mostra os circuitos equivalentes em componentes simétricas resultantes.

Figura 6 - Circuito equivalentes em componentes simétricas para uma linha de transmissão de circuito duplo.

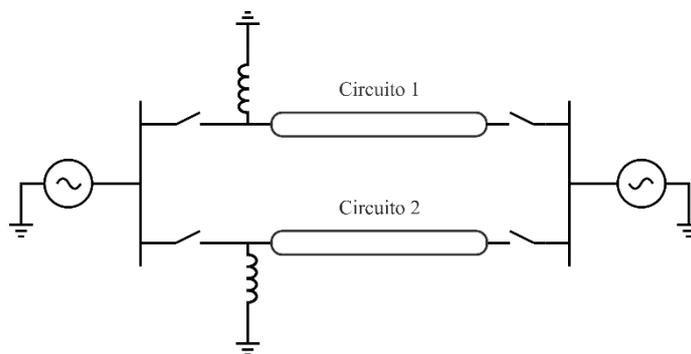


Fonte: (HASE, 2007).

3 AVALIAÇÃO DO MÉTODO

Com o objetivo de analisar o desempenho do algoritmo de chaveamento controlado, foi utilizado um modelo de sistema elétrico simplificado (Figura 7) que consiste em uma linha de transmissão de circuito duplo de 175 km com reatores em derivação em uma das extremidades, cujos parâmetros estão descritos na Tabela 1.

Figura 7 - Modelo do sistema elétrico.



Fonte: o próprio autor.

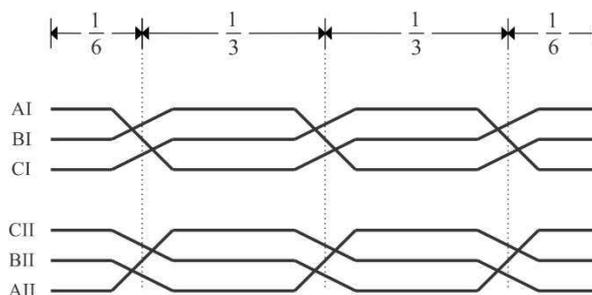
Tabela 1 - Dados da compensação reativa.

$R (\Omega)$	$X (\Omega)$	Fator de Qualidade
3,47	1388,9	400

Fonte: o próprio autor.

Os dados referentes às fontes de tensão são apresentados nas Tabelas 2 e 3. A linha de transmissão foi modelada utilizando o esquema de transposição ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Esquema de transposição da LT de circuito duplo.



Fonte: o próprio autor.

Tabela 2 - Tensão das fontes ($V_{base} = 500kV$).

Barra	Módulo (p.u.)	Fase (°)
Fonte 1	1	0
Fonte 2	1	10

Fonte: o próprio autor.

Tabela 3 - Impedância das fontes.

Fonte	Sequência Zero		Sequência Positiva	
	$R_0(\Omega)$	$X_0(\Omega)$	$R_1(\Omega)$	$X_1(\Omega)$
Fonte 1	-2,750	142,505	5,307	73,520
Fonte 2	-2,750	142,505	5,307	73,520

Fonte: o próprio autor.

As especificações dos condutores da linha de transmissão podem ser encontradas na Tabela 4.

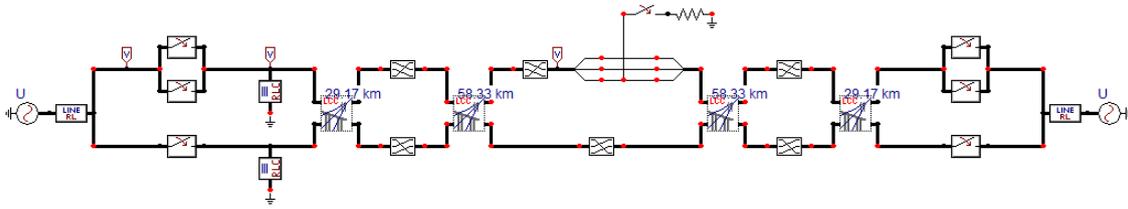
Tabela 4 - Dados dos condutores da linha de transmissão.

Parâmetros	Condutor fase	Condutor para-raios
Tipo de cabo	Cabo Rail 954MCM	Cabo EHS 3/8''
Diâmetro externo (cm)	2,9591	0,9140
Espessura/Diâmetro externo	0,2751	0,5
Resistência DC (Ω/km)	0,0696	0,9140

Fonte: o próprio autor.

Os dados apresentados acima foram utilizados para implementar o modelo do sistema elétrico utilizando o software ATPDraw, que consiste em um pré-processador gráfico que auxilia na criação dos arquivos de entrada do ATP. O sistema elétrico modelado no ATPDraw está ilustrado na Figura 9. A depender da simulação realizada, os disjuntores foram substituídos por chaves aleatórias com tempo de fechamento determinado pelos instantes ótimos calculados pelo algoritmo e com desvio padrão de 0,667 ms.

Figura 9 - Modelo do sistema elétrico com uma LT dupla com ciclos de transposição no ATPDraw.



Fonte: o próprio autor.

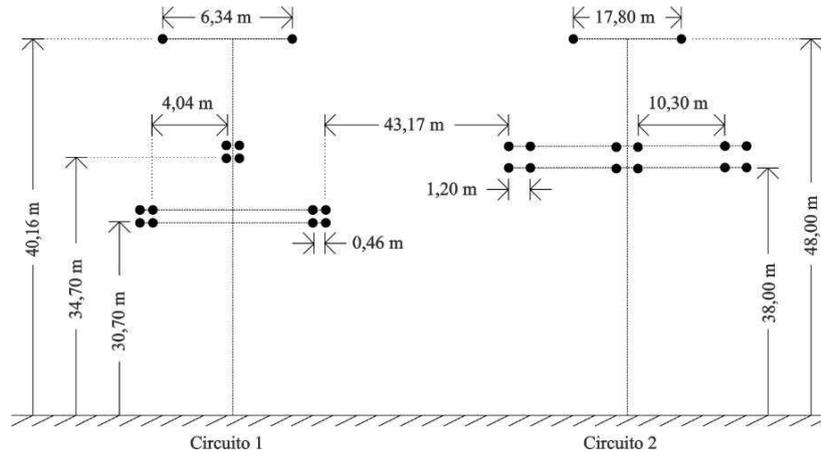
A avaliação do método de chaveamento controlado foi realizada para dois cenários distintos em que apenas é mudada a geometria da linha de transmissão. No primeiro cenário, utilizou-se uma LT em que os circuitos se encontram em torres distintas. No segundo cenário, ambos os circuitos estão em uma mesma torre. Todos os outros parâmetros são mantidos constantes, de acordo com o especificado previamente. A escolha destes dois cenários tem como objetivo verificar o desempenho do método de chaveamento controlado para linhas de transmissão com diferentes graus de acoplamento entre os circuitos.

3.1 CENÁRIO 1: LINHA DE TRANSMISSÃO COM CIRCUITOS EM TORRES DISTINTAS

A geometria da linha de transmissão de circuito duplo de 500 kV consta na Figura 10. Esta geometria é baseada em dados reais do Sistema Interligado Nacional (SIN). Nota-se que neste cenário a linha de transmissão conta com duas torres, havendo um circuito por torre.

Os sinais de referência a serem utilizados pelo método de chaveamento controlado foram obtidos inicialmente no ATP por meio do modelo de sistema elétrico descrito na seção anterior e, a partir desses sinais, foram aplicadas as etapas do algoritmo. As simulações realizadas consistiram de manobras de religamento após a ocorrência de defeitos na linha e tiveram como objetivo verificar o desempenho do método para diferentes situações considerando uma linha de transmissão de circuito duplo.

Figura 10 - Geometria da LT de circuito duplo.



Fonte: o próprio autor.

3.1.1 FALTA SIMPLES

As simulações realizadas consistiram de manobras de religamento com falta AT aplicada na metade do comprimento da linha de transmissão. A resistência de falta utilizada foi de 10Ω e a simulação consistiu nas seguintes etapas:

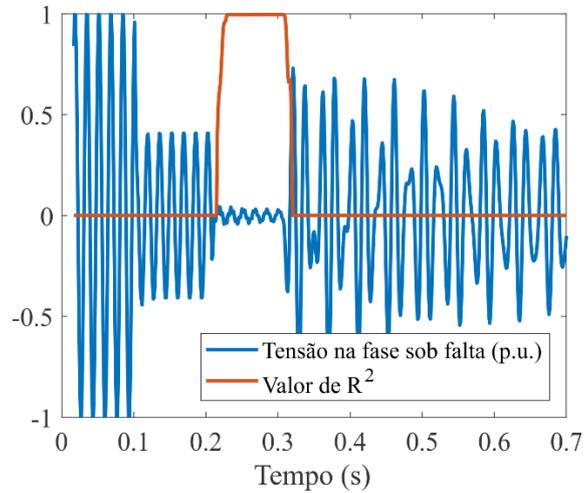
- Em $t = 0,1$ s, a falta ocorre na fase A do circuito 1;
- Em $t = 0,2$ s, a proteção atua e o circuito sob falta é aberto;
- Em $t = 0,3$ s, a falta é extinta.

A partir do momento em que a linha é aberta, o algoritmo inicia a análise das cargas residuais na linha de transmissão e o monitoramento do coeficiente R^2 da fase sob defeito. Quando a extinção da falta é detectada, o algoritmo seleciona os instantes ótimos de religamento da linha de transmissão e o comando de fechamento é enviado para os disjuntores. No caso do sistema com linha de transmissão de circuito duplo, existe um acoplamento entre circuitos e deseja-se verificar se esse fator prejudica o desempenho do algoritmo.

Os resultados obtidos na identificação do defeito são apresentados na Figura 11. Além disso, a extrapolação dos sinais se encontra ilustrada na Figura 12 (a) e os instantes ótimos são mostrados na Figura 12 (b). Nota-se que os instantes ótimos calculados estão localizados na região de menor batimento do sinal de tensão, com exceção da fase A. Por fim, na Figura 13 apresentam-se os sinais de tensão na metade do comprimento da linha.

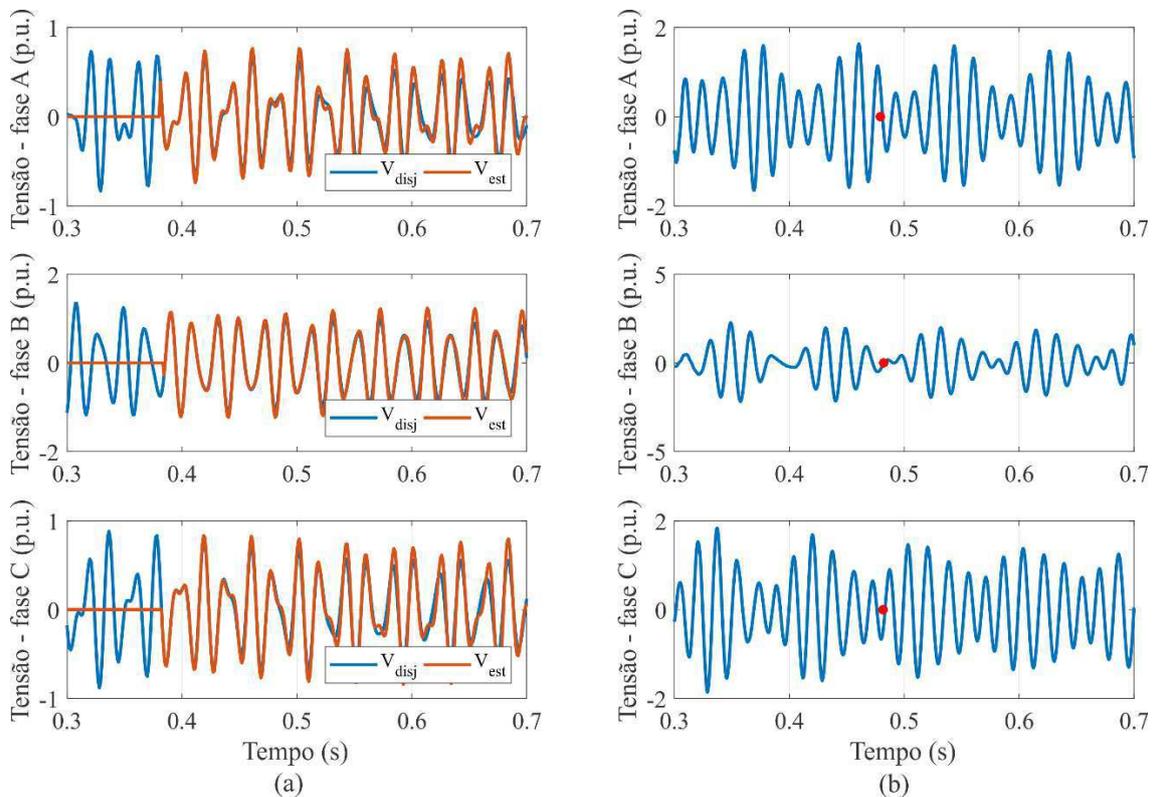
Neste gráfico é possível observar as sobretensões de manobra após a manobra de religamento.

Figura 11 - Identificação da extinção de um defeito fase-terra.



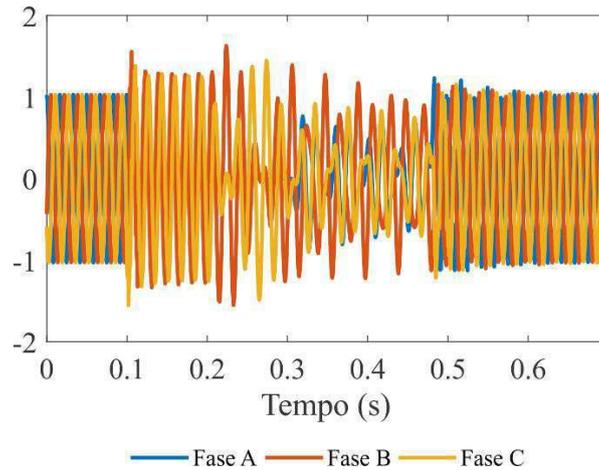
Fonte: o próprio autor.

Figura 12 – (a) Extrapolação dos sinais de tensão e (b) determinação dos instantes ótimos de fechamento do disjuntor.



Fonte: o próprio autor.

Figura 13 – Sobretensões observadas na metade do comprimento da linha.



3.1.2 FALTA SIMULTÂNEA

Uma falta simultânea ocorre quando defeitos incidem em ambos os circuitos da LT dupla, coexistindo durante um intervalo de tempo. Neste tipo de situação, em ambas as linhas as tensões apresentam componentes de sequência zero e, devido ao acoplamento eletromagnético que existe entre os circuitos para as componentes desta sequência, os sinais tornam-se mais complexos. Desta forma, deseja-se verificar se o algoritmo apresenta um desempenho satisfatório nestas condições.

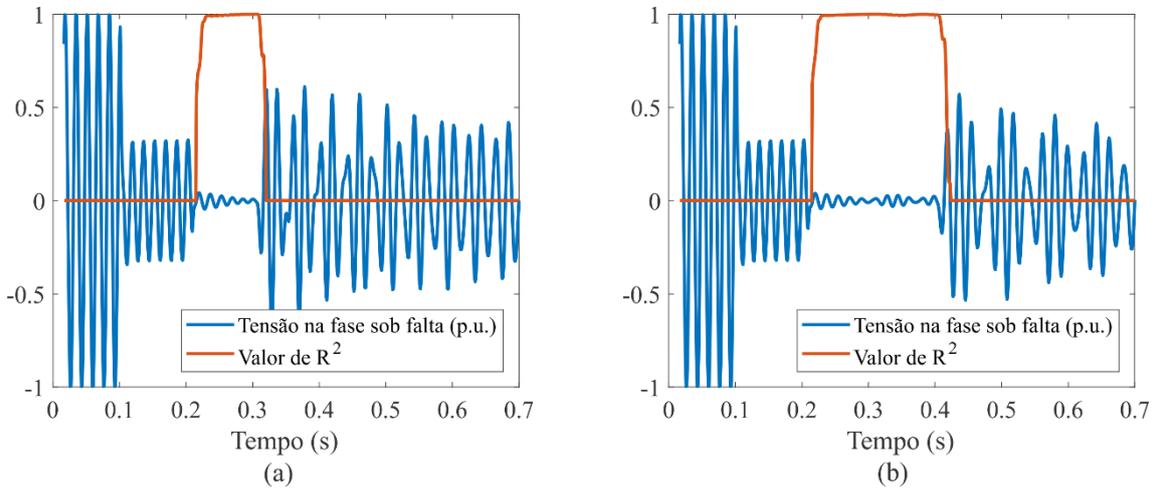
Foram realizadas simulações de defeitos do tipo fase-terra incidindo em uma linha de transmissão de circuito duplo com ciclos de transposição. Inicialmente, a falta é aplicada em ambas as linhas na metade de seu comprimento, de acordo com as seguintes etapas:

- Em $t = 0,1$ s, a falta ocorre na fase A dos circuitos 1 e 2;
- Em $t = 0,2$ s, a proteção atua e os circuito sob falta são abertos;
- Em $t = 0,3$ s, a falta é extinta no circuito 1;
- Em $t = 0,4$ s, a falta é extinta no circuito 2.

O desempenho do algoritmo de identificação de faltas por meio do coeficiente R^2 é verificado e os resultados são mostrados na Figura 14. A extrapolação dos sinais se mostra satisfatória, de acordo com o observado na Figura 15 e os instantes ótimos identificados estão destacados na Figura 16. Apenas para as fases sob falta (fase A de ambos os circuitos), os instantes ótimos não estão localizados na região de menor

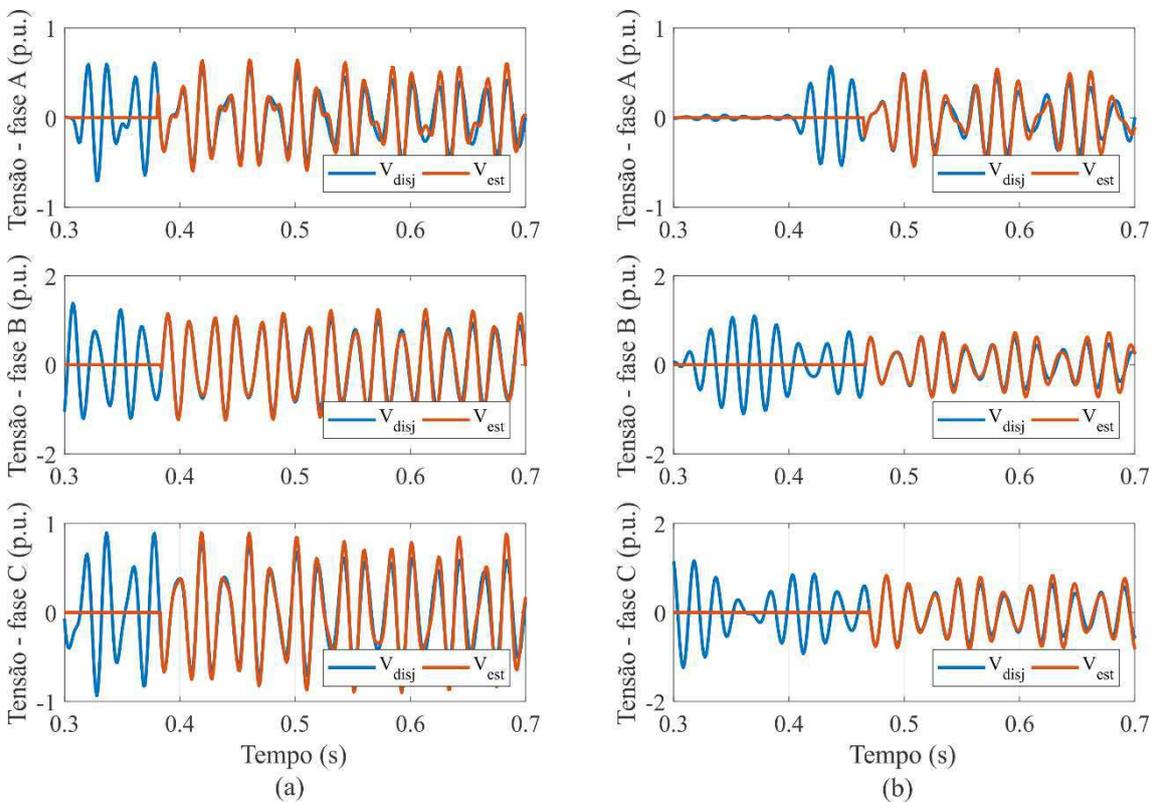
batimento do sinal, indicando que para esta situação o algoritmo de chaveamento controlado não fornece um resultado satisfatório. Por fim, as sobretensões resultantes do religamento da linha nos instantes determinados são ilustradas na Figura 17.

Figura 14 - Identificação da extinção de um defeito fase-terra no (a) circuito 1 e no (b) circuito 2.



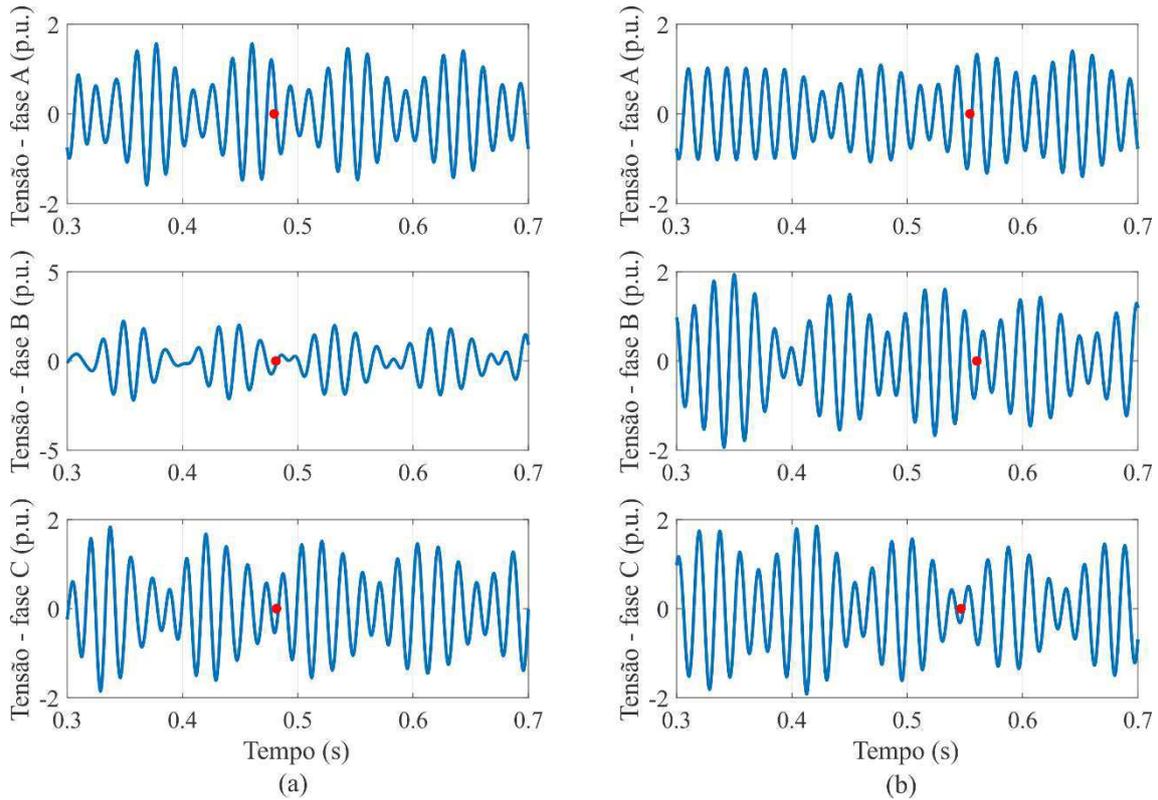
Fonte: o próprio autor.

Figura 15 – Extrapolação dos sinais de tensão no disjuntor para o (a) circuito 1 e o (b) circuito 2.



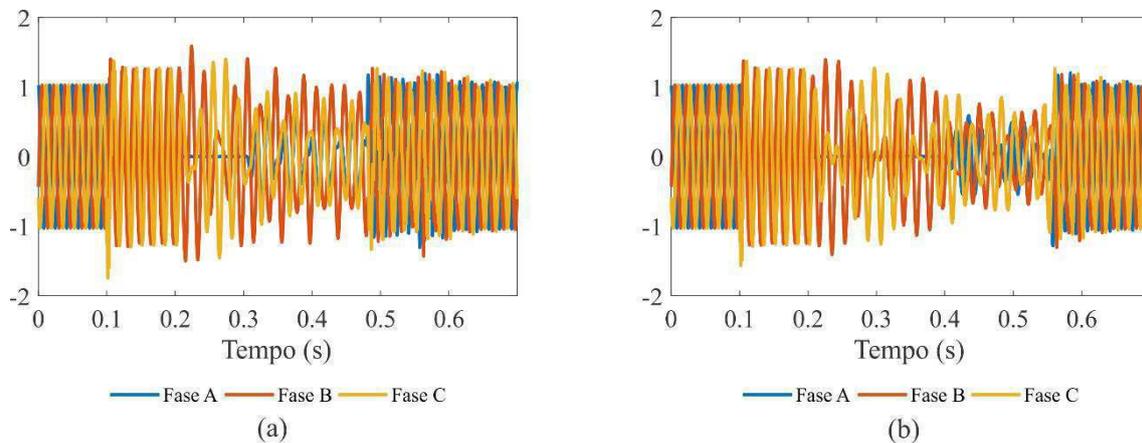
Fonte: o próprio autor.

Figura 16 – Determinação dos instantes ótimos para religamento do (a) circuito 1 e do (b) circuito 2.



Fonte: o próprio autor.

Figura 17 - Sobretensões observadas na metade do comprimento da linha no (a) circuito 1 e no (b) circuito 2.



Fonte: o próprio autor.

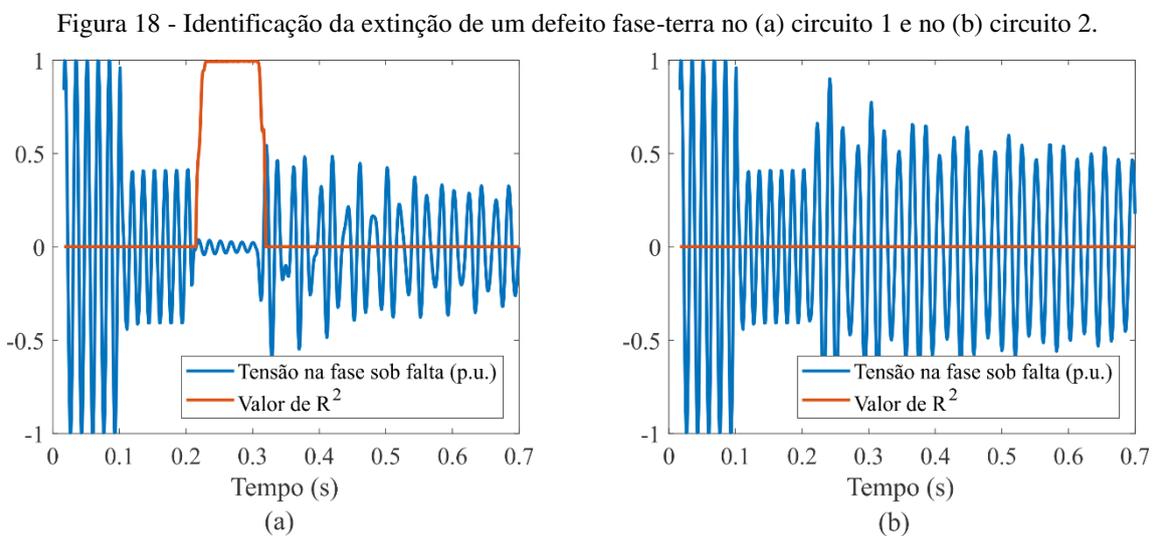
3.1.3 FALTA SIMPLES SEGUIDA DE FALHA NA PROTEÇÃO

Quando um defeito ocorre em apenas um dos circuitos de uma LT de circuito duplo, apenas o circuito sob defeito deve ser interrompido, permitindo o funcionamento parcial da linha de transmissão. No entanto, por falha do sistema de proteção, pode acontecer uma situação em que ambos os circuitos são interrompidos. Este caso foi

testado por meio de simulações em que ocorre uma falta fase-terra em um dos circuitos de uma LT dupla, com abertura de ambos os circuitos. A sequência de eventos é detalhada abaixo:

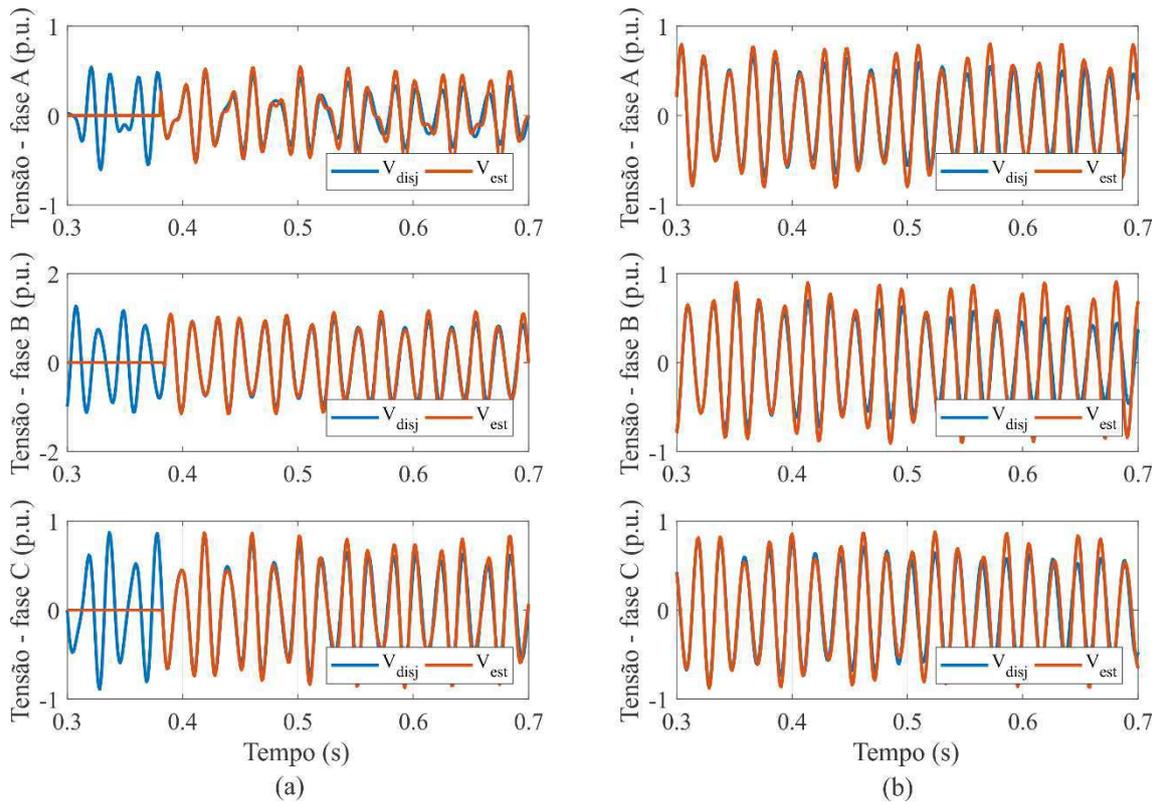
- Em $t = 0,1$ s, a falta ocorre na fase A do circuito 1;
- Em $t = 0,2$ s, a proteção atua e ambos os circuitos são abertos;
- Em $t = 0,3$ s, a falta é extinta no circuito 1;

Novamente são avaliadas as etapas do método de chaveamento controlado. O desempenho do método de detecção da extinção de faltas é mostrado na Figura 18. A extrapolação dos sinais e a determinação dos instantes ótimos estão ilustrados nas Figura 19 e Figura 20, respectivamente. De forma semelhante ao que foi observado anteriormente, nota-se que o cálculo dos instantes ótimos é realizado de forma satisfatória para todas as fases, excetuando-se a fase sob falta (fase A do circuito 1). Também são observadas na Figura 21 as sobretensões induzidas no circuito 2 devido ao religamento do circuito 1.



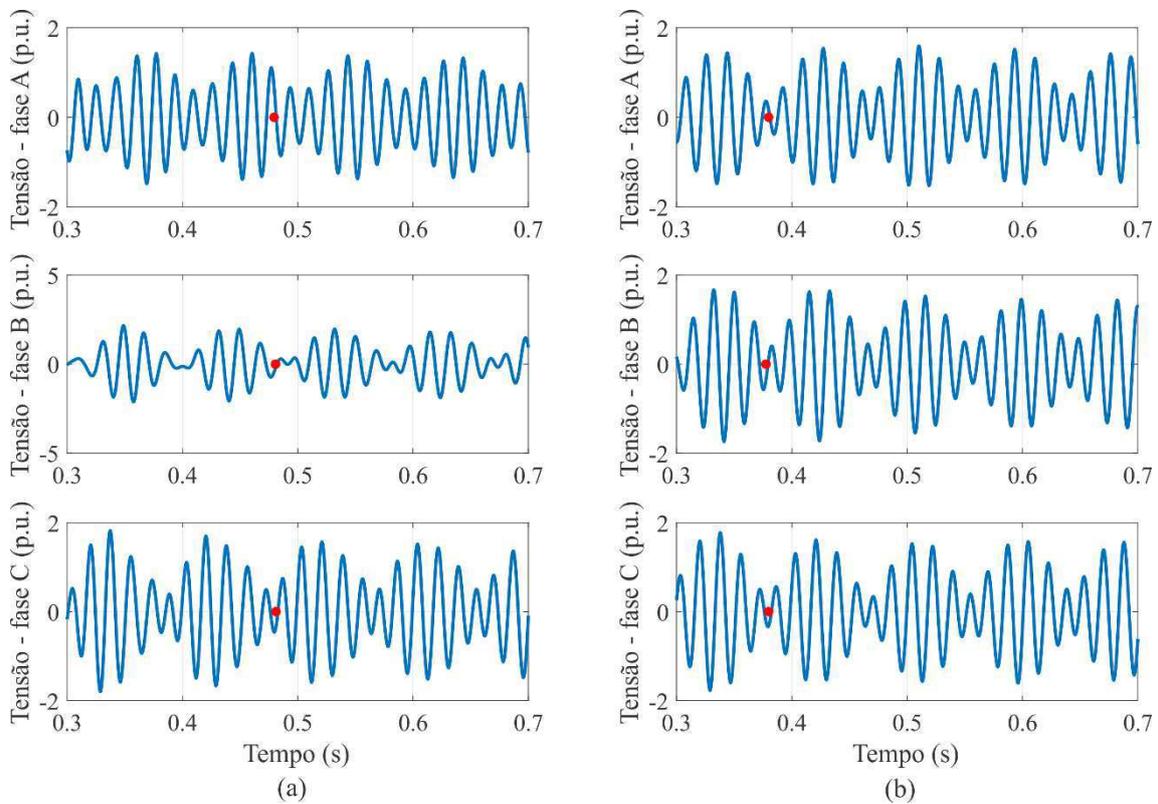
Fonte: o próprio autor.

Figura 19 – Extrapolação dos sinais de tensão no disjuntor para o (a) circuito 1 e o (b) circuito 2.



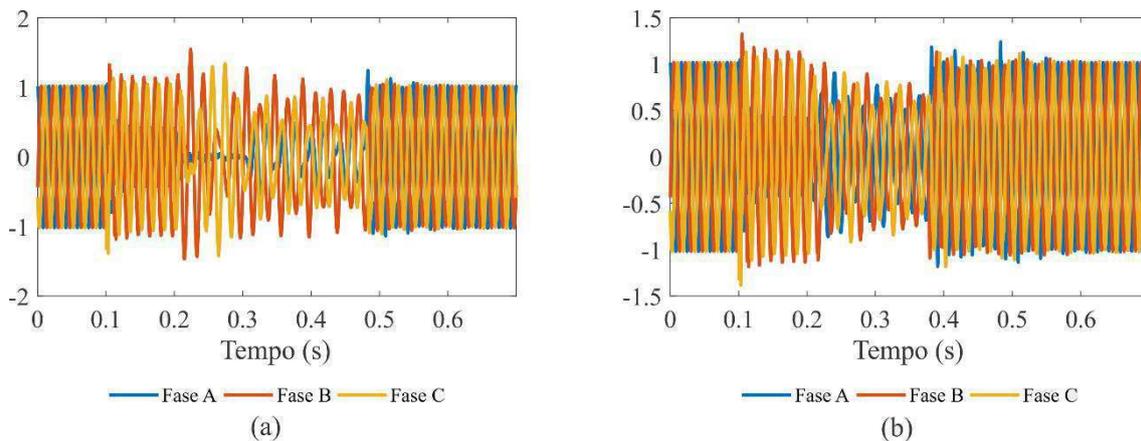
Fonte: o próprio autor.

Figura 20 – Determinação dos instantes ótimos para religamento do (a) circuito 1 e do (b) circuito 2.



Fonte: o próprio autor.

Figura 21 - Sobretensões observadas na metade do comprimento da linha no (a) circuito 1 e no (b) circuito 2.



Fonte: o próprio autor.

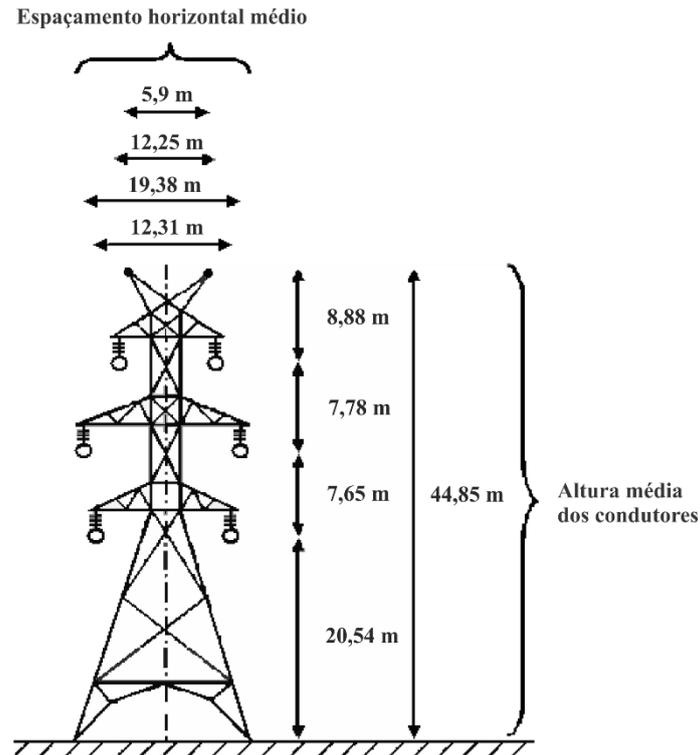
Em geral, nota-se que o método de chaveamento controlado possui um bom desempenho, sendo capaz de identificar a extinção da falta, extrapolar os sinais e identificar os instantes ótimos na região de menor batimento dos sinais de tensão. No entanto, para as fases sob falta, a identificação dos instantes ótimos não possui o desempenho esperado.

3.2 CENÁRIO 2: LINHA DE TRANSMISSÃO COM CIRCUITOS EM UMA ÚNICA TORRE

Em seguida, foi testado um segundo cenário em que se utiliza uma linha de transmissão de circuito duplo com ambos os circuitos presentes em uma mesma torre. Todos os outros parâmetros do sistema elétrico apresentados anteriormente foram mantidos iguais. A geometria da linha pode ser vista na Figura 22. O objetivo deste teste é verificar o desempenho do algoritmo de chaveamento controlado em uma situação em que há um maior acoplamento entre os circuitos da linha de transmissão devido à proximidade entre os condutores.

As simulações realizadas foram as mesmas do cenário anterior: falta simples fase-terra, falta simultânea fase-terra e falta fase-terra seguida de falha do sistema de proteção.

Figura 22 - Geometria da linha de transmissão de circuito duplo com apenas uma torre.



3.2.1 FALTA SIMPLES

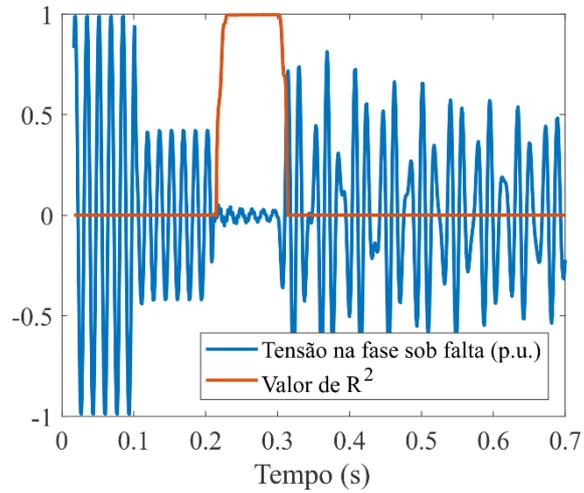
De forma semelhante ao que foi realizado anteriormente, as simulações consistiram de manobras de religamento com falta AT aplicada na metade do comprimento da linha de transmissão. A resistência de falta utilizada foi de 10Ω e a simulação consistiu nas seguintes etapas:

- Em $t = 0,1$ s, a falta ocorre na fase A do circuito 1;
- Em $t = 0,2$ s, a proteção atua e o circuito sob falta é aberto;
- Em $t = 0,3$ s, a falta é extinta.

Os resultados da identificação da extinção do defeito estão presentes na Figura 23. Na Figura 24 (a), nota-se que os sinais de tensão extrapolados são bem próximos aos que foram medidos. Isto é esperado uma vez que o defeito ocorre apenas no circuito 1 enquanto o circuito 2 continua funcionando normalmente. Logo, não são induzidas tensões significativas de sequência zero no circuito 1 devido ao circuito 2. Apesar disto,

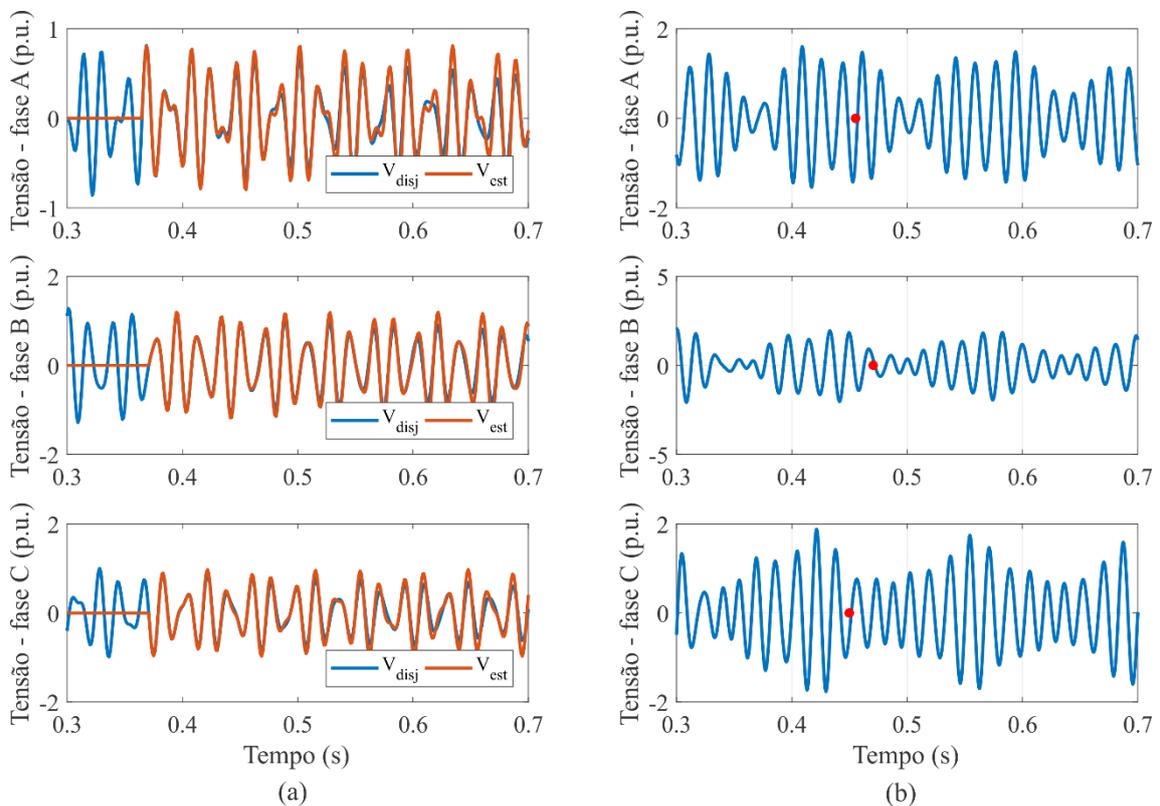
na Figura 24 (b) observa-se que a determinação do instante ótimo de religamento para a fase sob falta não é satisfatória.

Figura 23 - Identificação da extinção de um defeito fase-terra.



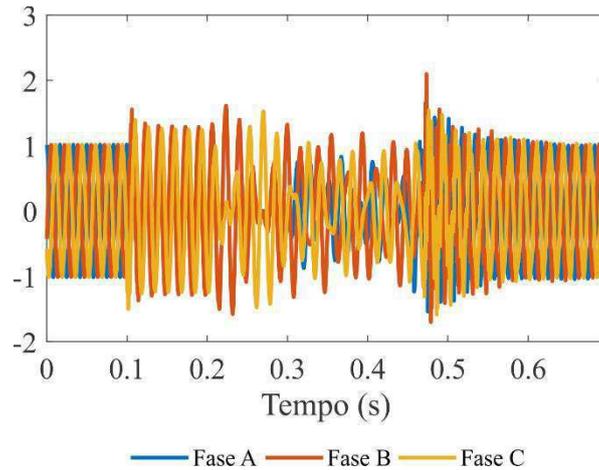
Fonte: o próprio autor.

Figura 24 – (a) Extrapolação dos sinais de tensão e (b) determinação dos instantes ótimos de fechamento do disjuntor.



Fonte: o próprio autor.

Figura 25 – Sobretensões observadas na metade do comprimento da linha.



Fonte: o próprio autor.

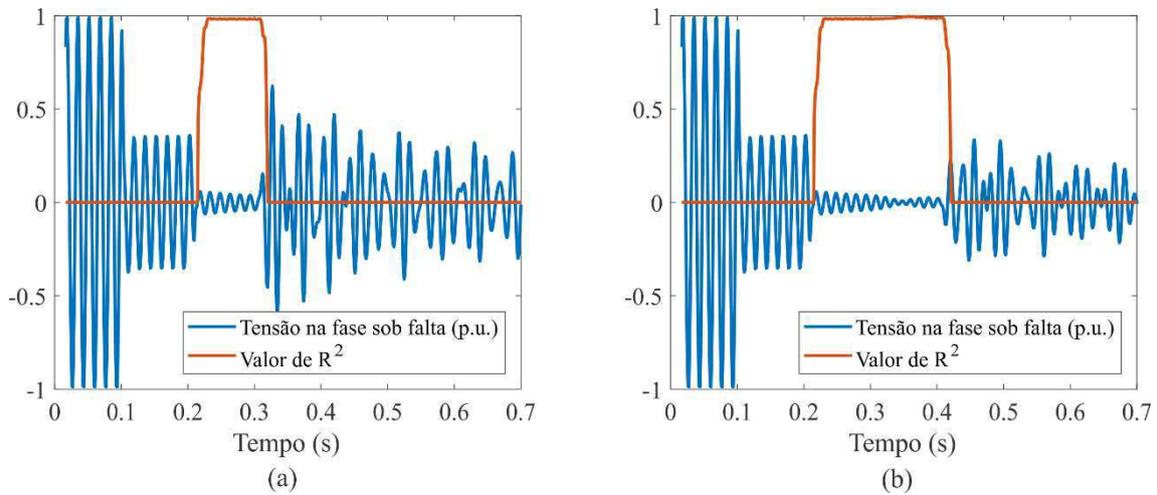
3.2.2 FALTA SIMULTÂNEA

Foram realizadas simulações de defeitos do tipo fase-terra incidindo em ambos os circuitos da linha de transmissão. A falta é aplicada na metade do comprimento da linha utilizando-se uma resistência de falta de 10Ω , de acordo com as seguintes etapas:

- Em $t = 0,1$ s, a falta ocorre na fase A dos circuitos 1 e 2;
- Em $t = 0,2$ s, a proteção atua e os circuitos sob falta são abertos;
- Em $t = 0,3$ s, a falta é extinta no circuito 1;
- Em $t = 0,4$ s, a falta é extinta no circuito 2.

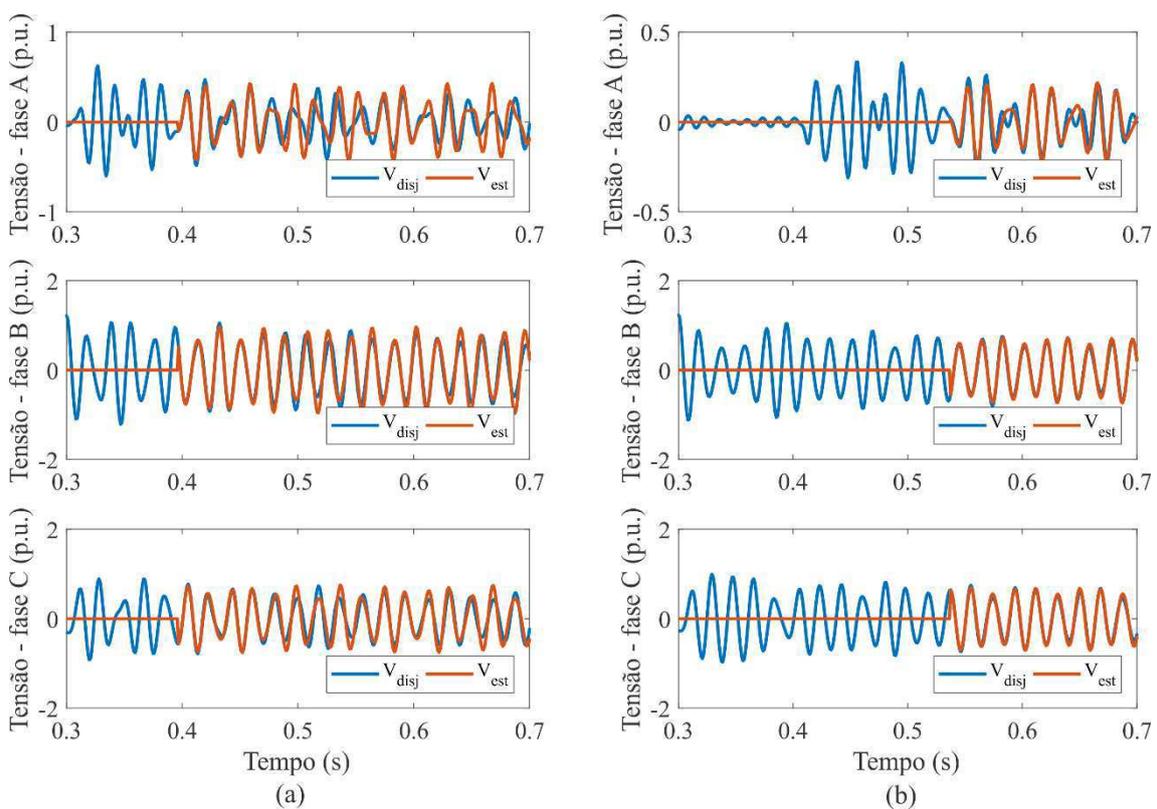
Os resultados mostram que o método de chaveamento controlado foi capaz de identificar a extinção do defeito, de acordo com o observado na Figura 26. A influência do acoplamento de sequência zero entre os dois circuitos pode ser notada na extrapolação dos sinais de tensão, pois surge uma diferença mais significativa entre os sinais extrapolados e aqueles medidos, como visto na Figura 27. Este comportamento é notado sobretudo nas fases sob defeito. Ainda, observa-se que o cálculo dos instantes ótimos de religamento foi satisfatório para todas as fases, exceto para as fases A de ambos os circuitos.

Figura 26 - Identificação da extinção de um defeito fase-terra no (a) circuito 1 e no (b) circuito 2.



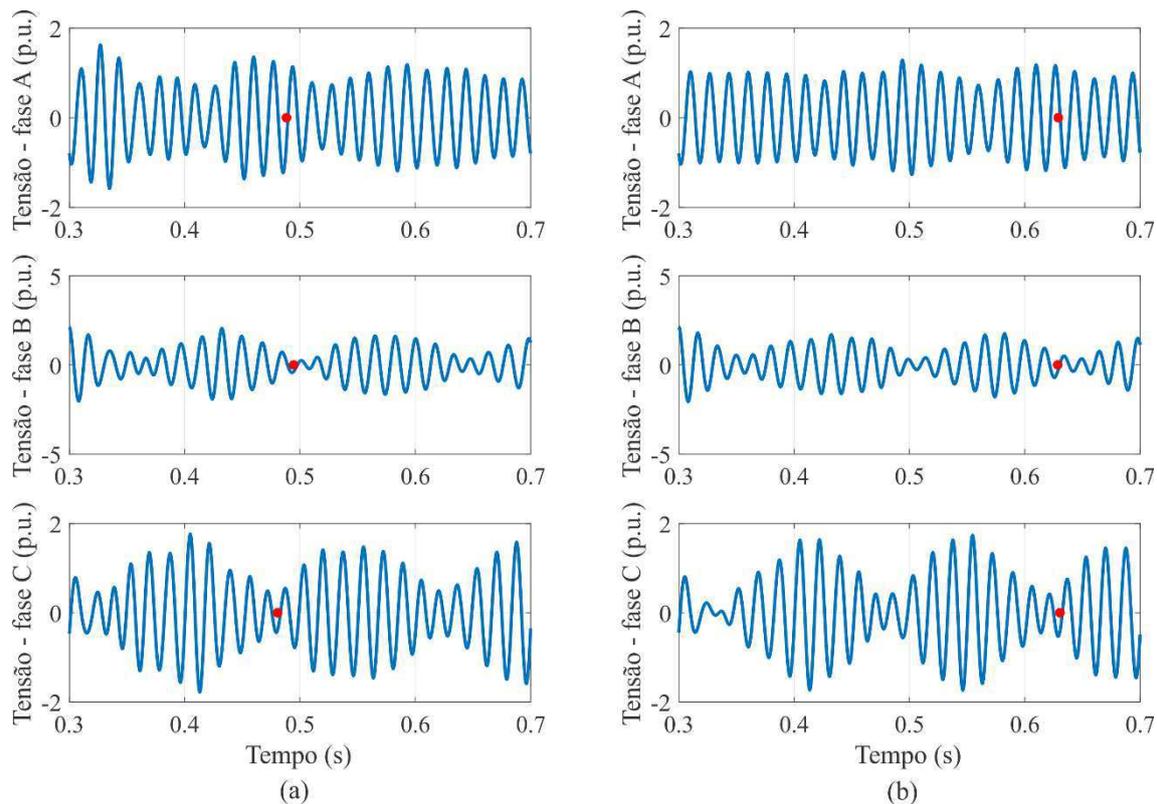
Fonte: o próprio autor.

Figura 27 – (a) Extrapolação dos sinais de tensão e (b) determinação dos instantes ótimos de fechamento do disjuntor.



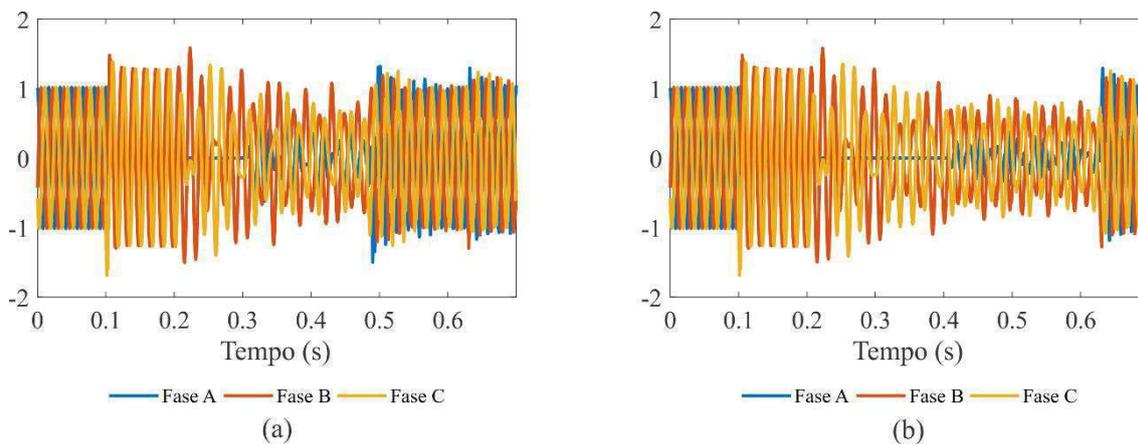
Fonte: o próprio autor.

Figura 28 – Determinação dos instantes ótimos para religamento do (a) circuito 1 e do (b) circuito 2.



Fonte: o próprio autor.

Figura 29 - Sobretensões observadas na metade do comprimento da linha no (a) circuito 1 e no (b) circuito 2.



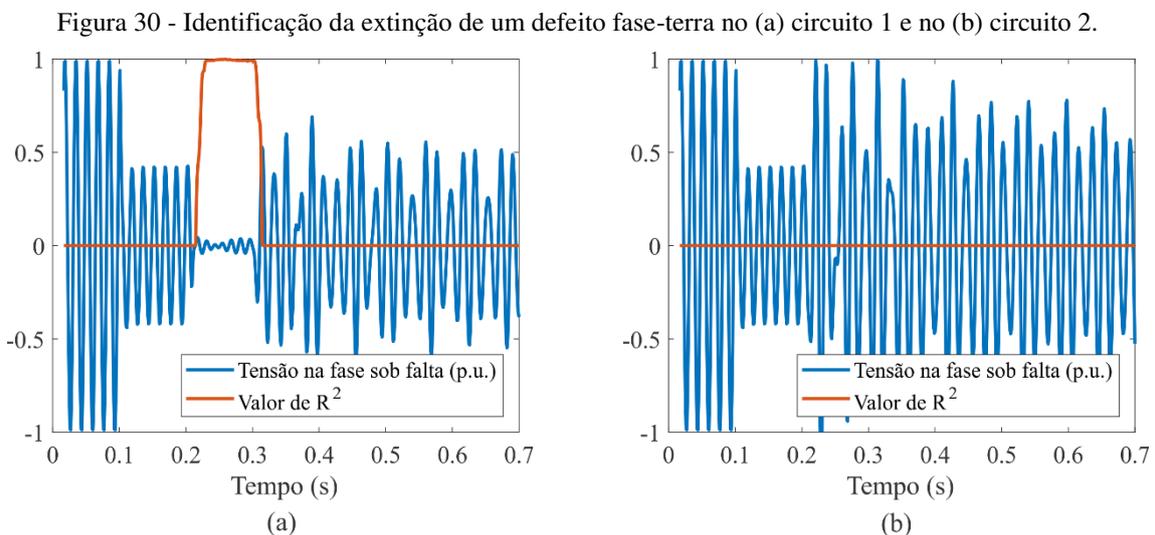
Fonte: o próprio autor.

3.2.3 FALTA SIMPLES SEGUIDA DE FALHA NA PROTEÇÃO

A simulação seguinte consistiu na aplicação de um defeito-fase terra no circuito 1, havendo a abertura de ambas as linhas devido a uma falha na proteção. A sequência de eventos é novamente detalhada abaixo:

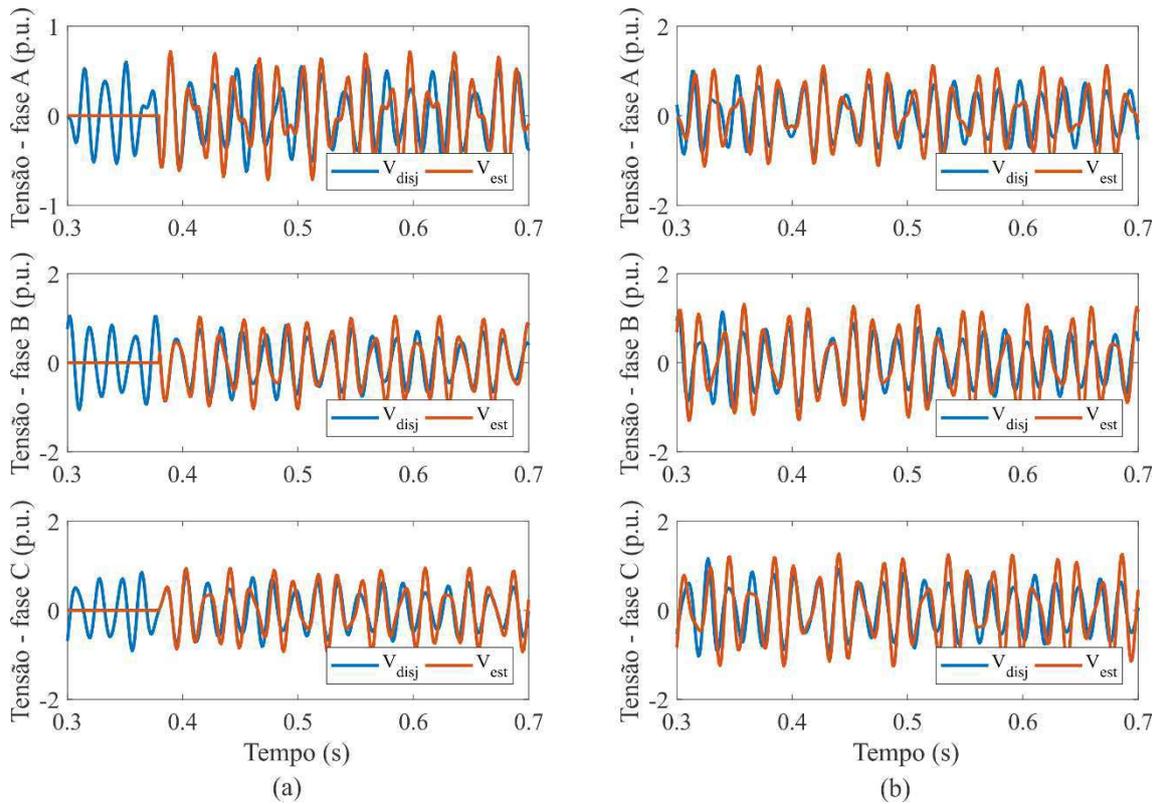
- Em $t = 0,1$ s, a falta ocorre na fase A do circuito 1;
- Em $t = 0,2$ s, a proteção atua e ambos os circuitos são abertos;
- Em $t = 0,3$ s, a falta é extinta no circuito 1;

Inicialmente, verifica-se que o algoritmo é capaz de identificar a extinção do defeito no circuito 1 bem como identificar que não houve nenhum defeito no circuito 2. Este comportamento é observado na Figura 30. Nota-se na Figura 31 que o acoplamento de sequência zero entre os circuitos influenciou de forma significativa a extrapolação dos sinais. No entanto, os instantes ótimos calculados pelo algoritmo e destacados na Figura 32 estão todos localizados na região de menor batimento do sinal, exceto para a fase A do circuito 1 (fase sob falta).



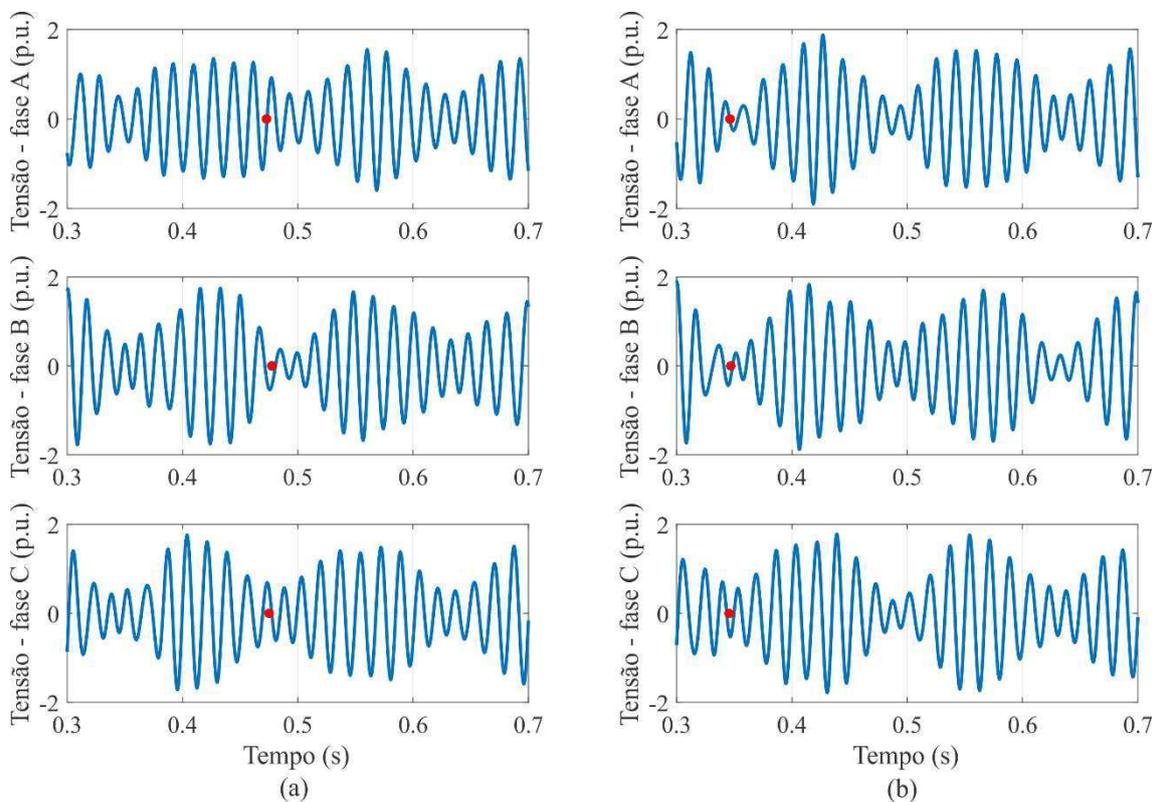
Fonte: o próprio autor.

Figura 31 – (a) Extrapolação dos sinais de tensão e (b) determinação dos instantes ótimos de fechamento do disjuntor.



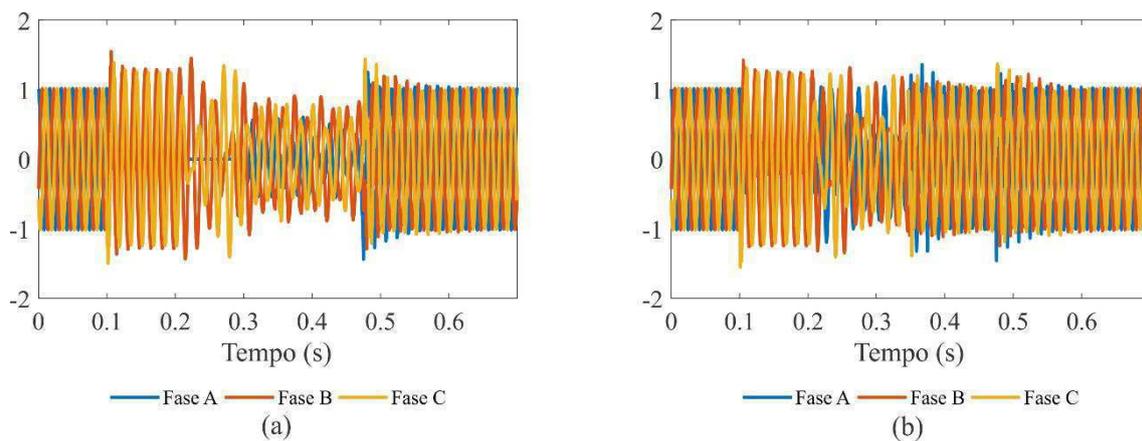
Fonte: o próprio autor.

Figura 32 – Determinação dos instantes ótimos para religamento do (a) circuito 1 e do (b) circuito 2.



Fonte: o próprio autor.

Figura 33- Sobretensões observadas na metade do comprimento da linha no (a) circuito 1 e no (b) circuito 2.



Fonte: o próprio autor.

4 MELHORIA PROPOSTA

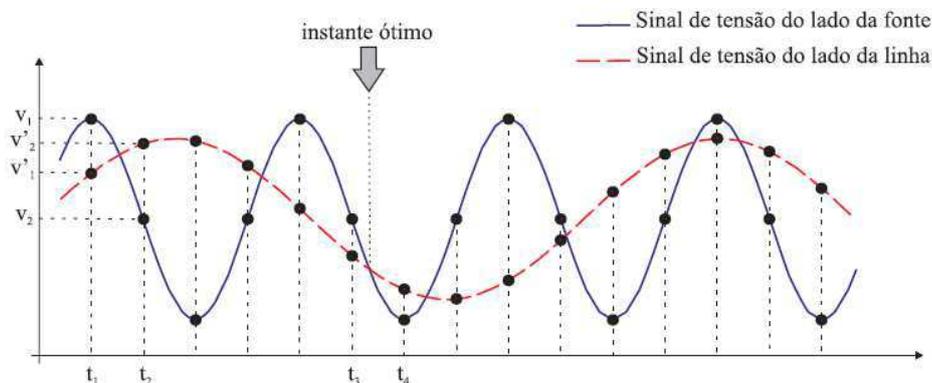
Os resultados obtidos através das simulações realizadas para o primeiro cenário, em que os circuitos estão localizados em torres distintas, demonstraram que o método de chaveamento controlado testado neste trabalho possuiu um desempenho geral satisfatório. Foi observado, no entanto, que há uma dificuldade em determinar o instante ótimo de religamento para as fases sob defeito.

A avaliação do método para o segundo cenário, em que os circuitos se encontram na mesma torre, mostrou que o método foi bem-sucedido na identificação da extinção dos defeitos. No entanto, o acoplamento entre os circuitos passou a afetar de forma mais significativa a etapa de extrapolação dos sinais. Também neste cenário, o cálculo dos instantes ótimos de religamento foi satisfatório, exceto para as fases sob defeito.

Nesta seção será apresentada uma proposta de melhoria para a etapa de cálculo dos instantes ótimos de religamento com o intuito de melhorar seu desempenho sobretudo quando aplicado às fases sob falta.

A estratégia de cálculo dos instantes ótimos para manobras de religamento proposta em (DANTAS, 2007) consiste em avaliar separadamente os sinais de tensão de lado da fonte e do lado da linha para determinar o instante em que a tensão nos terminais do disjuntor passa por zero e tem menor pulsação. O instante ótimo ocorre quando os dois sinais de referência se cruzam e possuem derivada com o mesmo sinal, conforme ilustrado na Figura 34.

Figura 34 – Estratégia de determinação dos instantes ótimos de fechamento do disjuntor de acordo com o proposto em (DANTAS, 2007).



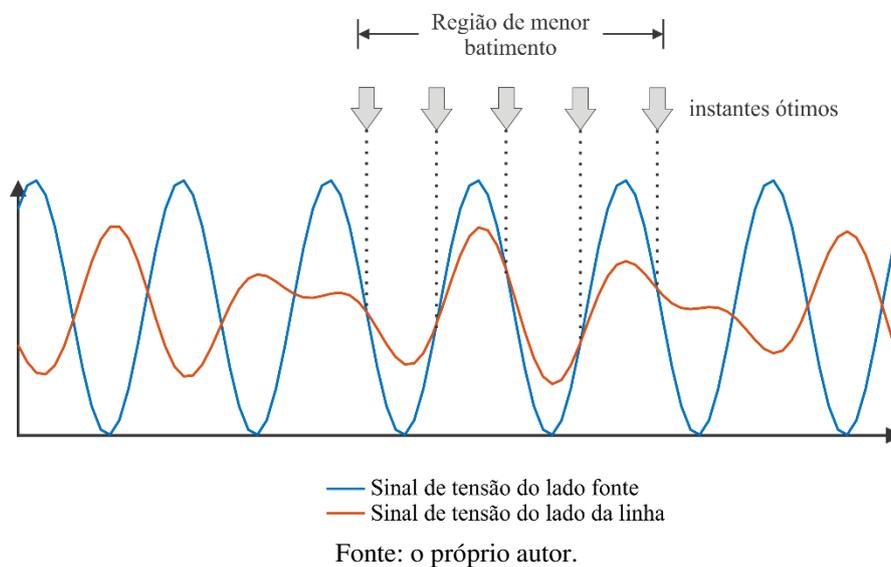
Fonte: (DANTAS, 2007).

No entanto, para algumas das simulações avaliadas neste trabalho, nota-se que existem diversos instantes ótimos que atendem ao critério estabelecido, como pode ser observado na Figura 35. Neste caso, o método de chaveamento controlado tende a selecionar o primeiro instante ótimo encontrado. Este ponto normalmente se encontra às margens da região de menor batimento e não corresponde, de fato, ao menor batimento observado no sinal. Idealmente, o instante ótimo deveria ser escolhido entre os pontos localizados no centro desta região.

Ao comparar os valores das derivadas do sinal de tensão do lado da fonte e do lado da linha, nota-se que estes valores são mais próximos para os pontos localizados no centro da região de menor batimento. Logo, a determinação dos instantes ótimos deve levar em consideração não apenas o sinal da derivada da tensão nos pontos de cruzamentos dos sinais, mas também sua magnitude.

O algoritmo modificado do chaveamento controlado calcula a razão entre as derivadas dos sinais para todos os instantes ótimos da região de menor batimento e seleciona aqueles pontos cuja razão entre as derivadas está mais próxima de 1.

Figura 35 – Melhoria proposta na estratégia do cálculo dos instantes ótimos.



4.1 RESULTADOS E AVALIAÇÃO

Com o intuito de verificar o desempenho da modificação proposta, foram calculados os instantes ótimos de religamento de acordo com o método de chaveamento

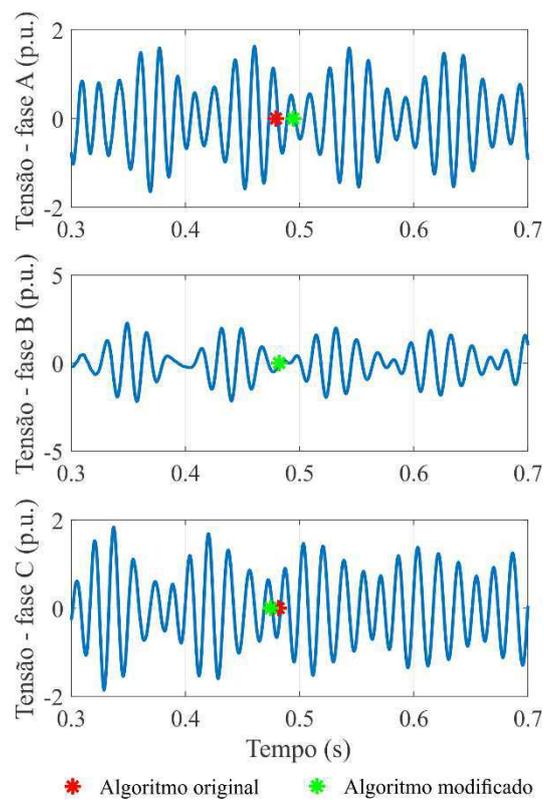
controlado original e o modificado. Isto foi realizado para todos os casos abordados anteriormente.

4.1.1 CENÁRIO 1: LINHA DE TRANSMISSÃO COM CIRCUITOS EM TORRES DISTINTAS

Para o primeiro cenário, foram realizadas as mesmas simulações realizadas anteriormente. Os resultados do cálculo dos instantes ótimos estão ilustrados nas Figura 36, Figura 37 e Figura 38 para os casos de falta simples, falta simultânea e falta simples seguida de falha na proteção, respectivamente. Os instantes ótimos obtidos com o algoritmo original foram destacados em vermelho enquanto aqueles obtidos com a modificação proposta foram destacados em verde.

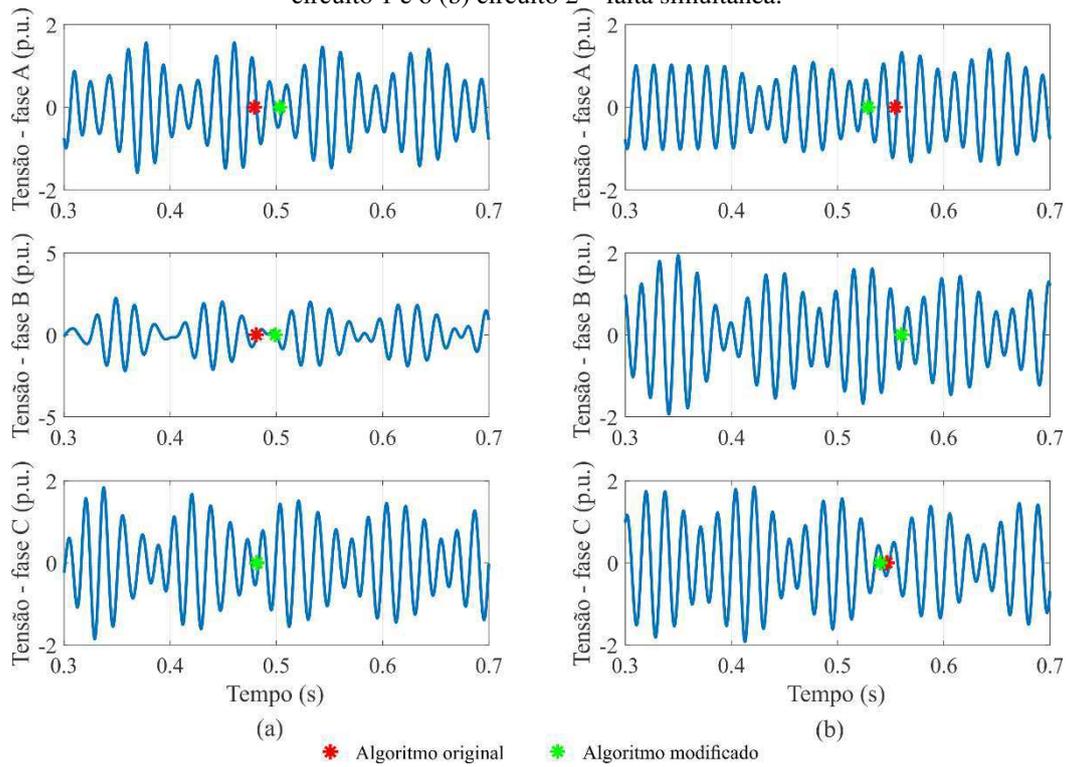
Nota-se que, em todos os três casos simulados, os instantes ótimos calculados a partir da modificação sugerida estão mais próximos da região de batimento mínimo do sinal.

Figura 36 - Instantes ótimos de religamento calculados antes e após a modificação proposta - falta simples fase-terra.



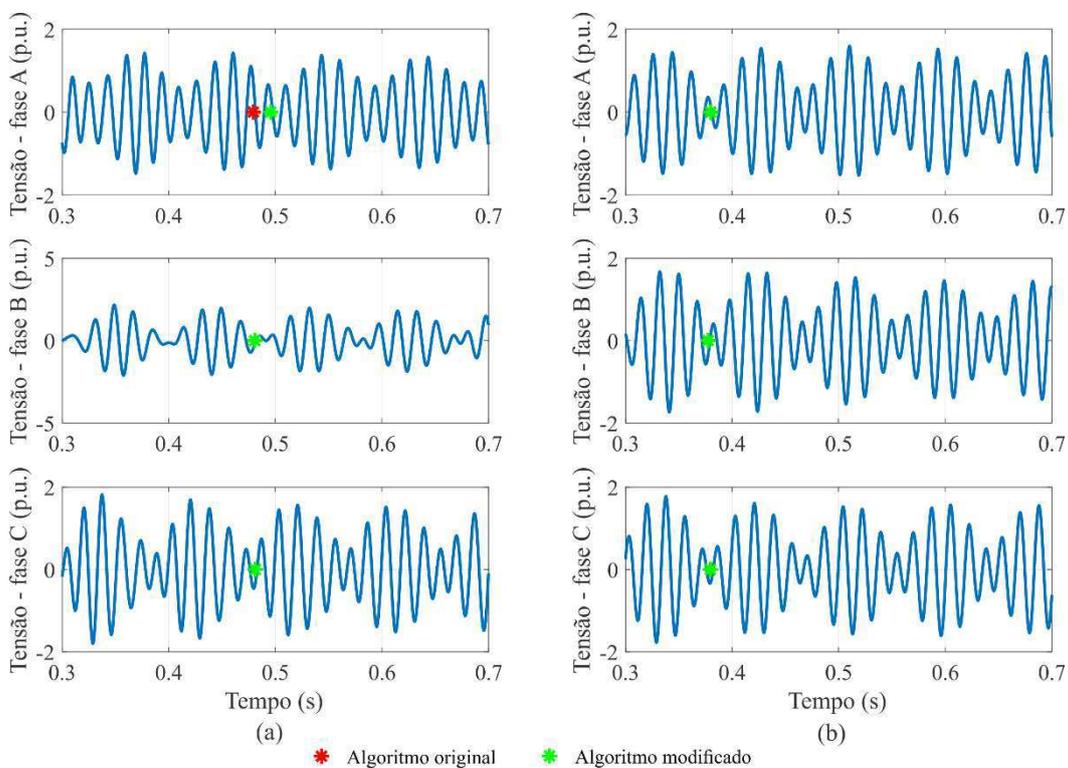
Fonte: o próprio autor.

Figura 37 - Instantes ótimos de religamento calculados antes e após a modificação proposta para o (a) circuito 1 e o (b) circuito 2 – falta simultânea.



Fonte: o próprio autor.

Figura 38 - Instantes ótimos de religamento calculados antes e após a modificação proposta para o (a) circuito 1 e o (b) circuito 2 – falta simples seguida de falha na proteção.



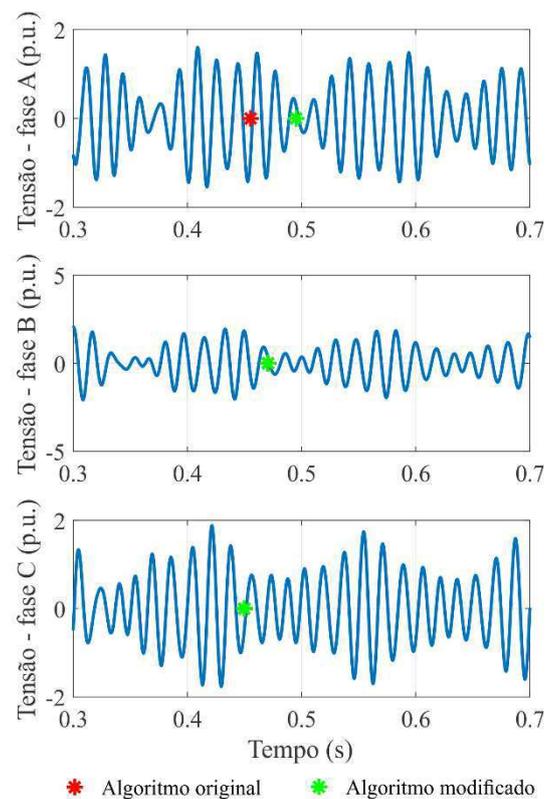
Fonte: o próprio autor.

4.1.2 CENÁRIO 2: LINHA DE TRANSMISSÃO COM CIRCUITOS EM UMA ÚNICA TORRE

As mesmas simulações foram realizadas para o cenário 2, em que os circuitos se encontram em uma única torre. Para o caso da falta simples, foi possível obter uma melhoria na determinação do instante ótimo da fase sob falta (fase A), como observado na Figura 39.

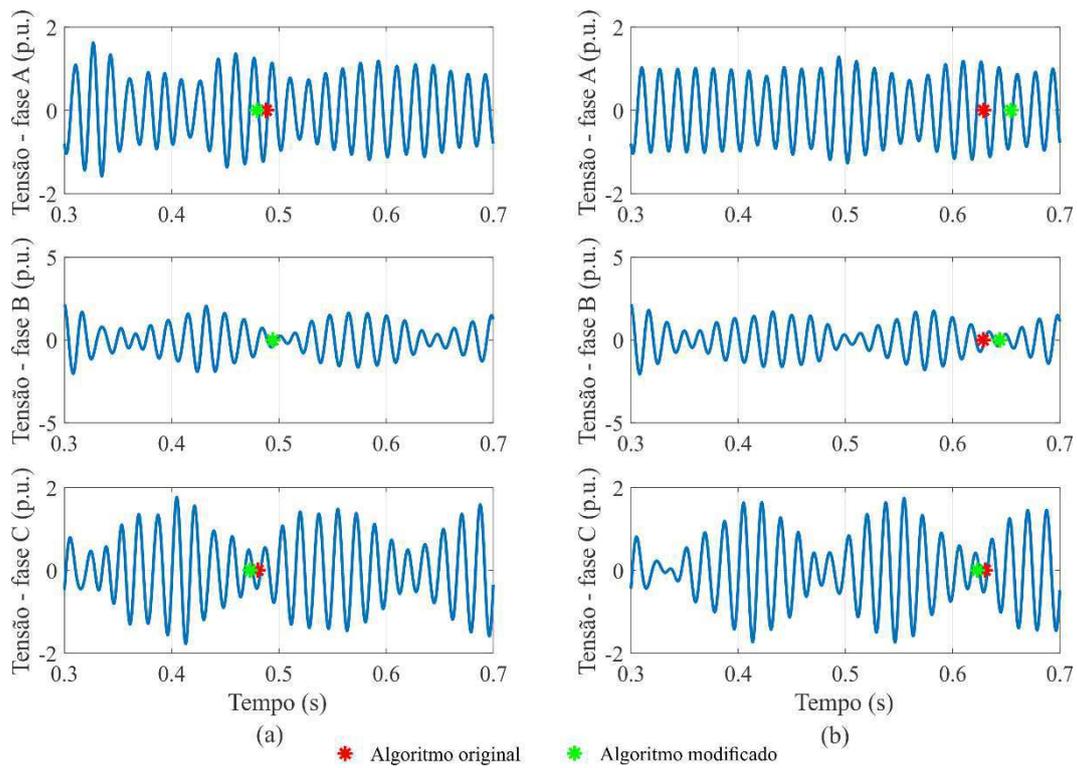
Nos casos em que ocorre falta simultânea ou falta simples seguida de falha na proteção, algumas fases apresentaram uma pequena melhoria na localização dos instantes ótimos enquanto em outras fases houve uma pequena piora. Isto acontece porque a estimação do sinal de tensão do lado da linha não representa fielmente a tensão que, de fato, está presente da linha, levando o algoritmo a cometer erros. Estes dois casos representam as situações de maior influência do acoplamento de sequência zero entre os circuitos, pois estão próximos (em uma mesma torre) e houve defeito em ambos os circuitos. Resultados melhores seriam obtidos se houvesse uma melhoria na estimação do sinal. Para isto, o acoplamento de sequência zero entre os circuitos da linha de transmissão deveria ser modelado.

Figura 39 - Instantes ótimos de religamento calculados antes e após a modificação proposta - falta simples fase-terra.



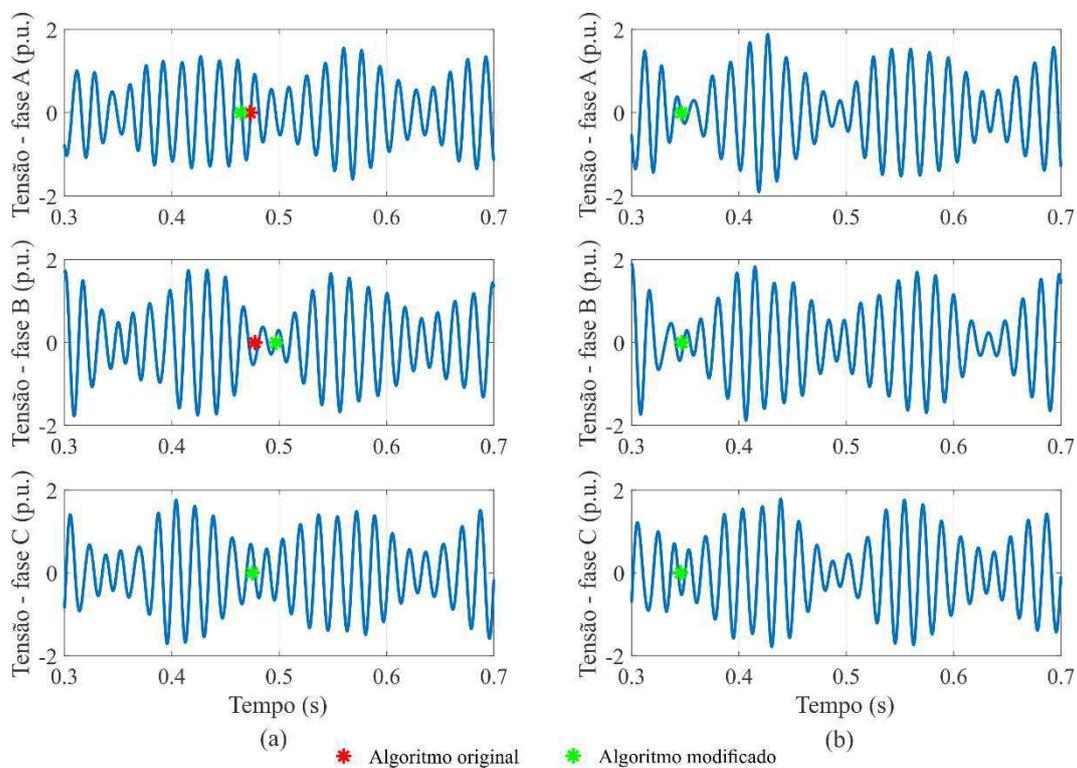
Fonte: o próprio autor.

Figura 40 - Instantes ótimos de religamento calculados antes e após a modificação proposta para o (a) circuito 1 e o (b) circuito 2 – falta simultânea.



Fonte: o próprio autor.

Figura 41 - Instantes ótimos de religamento calculados antes e após a modificação proposta para o (a) circuito 1 e o (b) circuito 2 – falta simples seguida de falha na proteção.



Fonte: o próprio autor.

5 CONCLUSÃO

O chaveamento controlado é um método utilizado para reduzir as sobretensões de manobra e utiliza sinais de referência de tensão ou corrente para determinar os instantes ótimos de fechamento ou abertura do disjuntor. Em linhas de transmissão de circuito duplo, existe acoplamento indutivo e capacitivo entre fases, o que torna os sinais de referência mais complexos e impõem um desafio ao método. Foram realizadas simulações no ATP para avaliar o desempenho do método de chaveamento controlado quando aplicado a linhas de transmissão de circuito duplo. Foram avaliados dois cenários: uma LT em que ambos os circuitos estão localizados em uma única torre e uma LT em que os circuitos se encontram em duas torres distintas.

Os resultados obtidos demonstraram que, em geral, o algoritmo possui um desempenho satisfatório, exceto na determinação dos instantes ótimos de religamento das fases sob falta. Nesta situação, o instante ótimo calculado está fora da região de menor batimento do sinal de tensão entre os disjuntores.

Foi proposta uma modificação no cálculo dos instantes ótimos de chaveamento que considera não apenas o sinal da derivada no cálculo, mas também sua magnitude. A modificação proposta foi testada em diferentes casos, sendo observada uma melhoria na localização dos instantes ótimos das fases sob falta. Apenas para os casos em que a estimação do sinal de tensão apresentava uma grande divergência em relação ao sinal real não foi possível obter uma melhoria no cálculo dos instantes ótimos. Isto ocorreu porque o erro foi proveniente da estimação inapropriada dos sinais e não do cálculo dos instantes ótimos.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se modelar a influência do acoplamento de sequência zero entre os circuitos na etapa de estimação dos sinais, o que deve conduzir à obtenção de sinais mais próximos dos observados e, conseqüentemente, reduzir os erros no cálculo dos instantes ótimos. Além disso, pode-se avaliar as sobretensões de manobra devido a nova escolha dos instantes ótimos. Para isto, deve-se considerar que uma vez que a primeira fase seja fechada, os sinais nas outras fases serão modificados e os instantes ótimos poderão ser deslocados.

REFERÊNCIAS

APOSTOLOPOULOS, C. A.; KORRES, G. N. A Novel Fault-Location Algorithm for Double Circuit Transmission Lines without Utilizing Line Parameters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 26, n. 3, p. 1467-1478, Fevereiro 2011.

DANTAS, K. M. C. **Chaveamento Controlado de Linhas de Transmissão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p. 84. 2007.

DANTAS, K. M. C. et al. **Mitigation of Switching Overvoltages in Transmission Lines via Controlled Switching**. Power and Energy Society General Meeting. Pittsburgh: IEEE. 2008. p. 1-8.

FROEHLICH, K. et al. Controlled Closing on Shunt Reactor Compensated Transmission Lines. Part I: Closing Control Device Development. **IEEE Transaction on Power Delivery**, v. 12, n. 2, p. 734-740, Abril 1997.

HASE, Y. **Handbook of Power Systems Engineering**. Chichester: John Wiley & Sons Ltda, 2007.

ZANETA JUNIOR, L. C. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**. São Paulo: Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, 2003.