



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica
Grupo de Sistemas Elétricos



Trabalho de Conclusão de Curso

Uma Técnica para Detecção de Distúrbios em Linhas de Transmissão

Aluna: Yonatha Marques Pereira de Melo

Orientador: Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.

Campina Grande
Maio de 2011

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica
Grupo de Sistemas Elétricos

Uma Técnica para Detecção de Distúrbios em Linhas de Transmissão

*Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande, em cumprimento parcial às
exigências para Obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.*

ALUNA: _____
Yonatha Marques Pereira de Melo

ORIENTADOR: _____
Damásio Fernandes Júnior

Campina Grande
Maio de 2011

Agradecimentos

A Deus por me dar forças, sabedoria e paciência para enfrentar os momentos mais difíceis e por ter colocado pessoas em meu caminho que estão sempre dispostas a me auxiliar.

Aos meus pais Bismarck e Clores por toda dedicação, pelo amor e por todos os esforços realizados para me fornecer uma boa educação.

À minha irmã Yamê pelo companheirismo, pelas palavras de apoio e incentivo constantes.

À minha avó Albertina pelas conversas, pelo incentivo e por ser um exemplo em minha vida.

A Iane (*In Memoriam*) pela amizade e carinho inenarráveis.

À minha tia Maria de Lourdes e a todo o restante de minha família pelos momentos de desconcentração, união e apoio.

A Daphne Barros por sua amizade, pelo auxílio constante, pelas palavras de incentivo e toda compreensão.

Ao professor Damásio Fernandes Júnior pela orientação, pela amizade, por sempre se dispor a me auxiliar e pelos ensinamentos em minha formação acadêmica.

Aos professores Washington Luís Araújo Neves, Edson Guedes da Costa e demais professores do DEE/UFCG pelos conhecimentos fornecidos que foram de grande importância para a minha formação acadêmica.

Aos amigos Raphaela, Helder, Raphael, Mariana, Tony, João Cabral, Juliana, Jamile, Leticia e Roberto por estarem presentes em todas as situações e sempre se disporem a ajudar, mostrando o verdadeiro significado da palavra amizade.

Aos senhores Antônio Modesto e Abílio Vigolvino pela amizade e por todos os incentivos.

A todos aqueles do período 2006.1 pela amizade durante a graduação.

A Felipe Lopes por todo auxílio e pela paciência para retirar as dúvidas que surgiram ao longo do trabalho.

Aos amigos do LIEC.

A Adail, Tchaikovsky e os demais funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, pela presteza e amizade durante o curso.

Yonatha Marques Pereira de Melo

Sumário

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vii
1. Introdução	1
1.1. Objetivos.....	1
1.2. Metodologia.....	2
2. Fundamentação Teórica	3
2.1. Faltas em Linhas de Transmissão	3
2.2. Ondas Viajantes em Linhas de Transmissão	4
2.3. Transformada de Park (Tdq0) Aplicada à Detecção de Distúrbios em Sistemas de Potência	6
3. Softwares Utilizados.....	9
3.1. ATP (<i>Alternative Transients Program</i>).....	9
3.2. MATLAB®	11
4. Método Proposto.....	12
4.1. Cálculo dos Parâmetros da Linha de Transmissão e Aquisição de Dados nos Terminais da Linha.....	13
4.2. Aplicação da Tdq0 e Cálculo dos coeficientes $[C_{dif}]^2$	16
4.3. Detecção do Instante Inicial dos Transitórios.....	19
5. Resultados e Análise	20
5.1. Linha de Transmissão de 230 kV	20
5.2. Linha de Transmissão de 500 kV	27
6. Conclusões	33
7. Referências Bibliográficas	34

Lista de Figuras

Figura 1 – Elemento Incremental de uma Linha Monofásica sem Perdas (LOPES, 2011)	4
Figura 2 – Ondas viajantes progressivas e regressivas.....	6
Figura 3 – Aplicação da Transformada de Park (Tdq0): (a) transformação realizada no estudo de máquinas elétricas; (b) transformação realizada como método de detecção de distúrbios (LOPES, 2011)	7
Figura 4 – Esquema dos sistemas elétricos que serão avaliados	14
Figura 5 – Geometria da LT 500 kV Jardim - Camaçari (DANTAS, 2007)	15
Figura 6 – Gráfico do coeficiente V_d e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo	17
Figura 7 – Onda senoidal na frequência de 60 Hz, que relaciona os ângulos de incidência e o tempo em ms	23
Figura 8 – Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 230 kV – Caso 1.	24
Figura 9 – Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 230 kV – Caso 2	24
Figura 10 – Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 230 kV – Caso 3	25
Figura 11 – Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 230 kV – Caso 4	25
Figura 12 – Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 230 kV – Caso 5	26
Figura 13 – Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 230 kV – Caso 6	26
Figura 14 – Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 230 kV – Caso 7	27
Figura 15 – Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 500 kV – Caso 1	29
Figura 16 – Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 500 kV – Caso 2	30
Figura 17 – Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 500 kV – Caso 3	30

Figura 18 – Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 500 kV	
– Caso 4	31
Figura 19 – Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 500 kV	
– Caso 5	31
Figura 20 – Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 500 kV	
– Caso 6	32
Figura 21 – Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 500 kV	
– Caso 7	32

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Linhas de transmissão avaliadas	13
Tabela 2 – Variações dos parâmetros para a linha de 230 kV.....	13
Tabela 3 – Variações dos parâmetros para a linha de 500 kV.....	13
Tabela 4 – Dados de sequência para a linha de transmissão de 230 kV.....	14
Tabela 5 – Dados de sequência para a linha de transmissão de 500 kV.....	15
Tabela 6 – Tensão das fontes ($V_{Base} = 230$ kV)	16
Tabela 7 – Impedâncias das fontes (Sistema de 230 kV)	16
Tabela 8 – Tensão das fontes ($V_{Base} = 500$ kV)	16
Tabela 9 – Impedâncias das fontes (Sistema de 500 kV)	16
Tabela 10 – Transformada de Clarke e Transformada de Park	17
Tabela 11 – Descrição de cada caso para o sistema de 230 kV.....	21
Tabela 12 – Início dos Transitórios para cada um dos casos do sistema de 230 kV.....	22
Tabela 13 – Descrição de cada caso para o sistema de 500 kV.....	28
Tabela 14 – Início dos Transitórios para cada um dos casos do sistema de 500 kV.....	28

1. Introdução

As linhas de transmissão são uma parte do sistema elétrico de potência (SEP) de grande relevância, pois são as responsáveis pela interligação entre os sistemas de geração de energia elétrica e os sistemas de distribuição de energia para os consumidores finais. Logo, é imprescindível que as linhas de transmissão operem adequadamente, de maneira a evitar prejuízos ao SEP como um todo. Porém, nem sempre é possível que estas operem normalmente, pois estão susceptíveis as intempéries do ambiente. Portanto, é fundamental que os distúrbios que venham a ocorrer nas linhas de transmissão sejam detectados de forma rápida e eficiente, para que assim, medidas possam ser tomadas a fim de reparar o eventual problema.

A importância deste trabalho se torna evidente, pois permite uma detecção mais precisa do instante de início de transitórios eletromagnéticos nas linhas de transmissão, possibilitando a solução do defeito de maneira mais rápida. Logo, será realizado um estudo sobre a detecção de distúrbios em linhas de transmissão através da teoria de ondas viajantes. A detecção dos transitórios eletromagnéticos será realizada por meio da Transformada de Park, através dos sinais de tensão capturados nas extremidades da linha de transmissão pelos RDP (Registradores Digitais de Perturbações), que devem estar sincronizados através de um GPS (*Global Positioning System*).

1.1. Objetivos

Os objetivos deste trabalho de conclusão de curso foram divididos em duas partes, o objetivo geral e os objetivos específicos.

- Geral:

A elaboração e implementação, em *software*, de um algoritmo utilizando os programas ATP e MATLAB[®] capaz de realizar a detecção do instante da ocorrência de distúrbios em linhas de transmissão, sendo este baseado na teoria de ondas viajantes.

- Específicos:
 - Desenvolver um algoritmo para detecção de distúrbios aplicável em linhas de transmissão monitoradas em dois terminais;
 - Avaliar o desempenho do método considerando diferentes situações de faltas em linhas de transmissão variando a resistência da falta, o ângulo de incidência da falta e o local de ocorrência da falta.

1.2. Metodologia

Inicialmente será realizada uma revisão bibliográfica sobre os pontos mais relevantes e imprescindíveis para a compreensão dos fenômenos a serem analisados. Em seguida, prevê-se a utilização do ATP (*Alternative Transients Program*) para a realização do cálculo dos parâmetros das linhas de transmissão em estudo. Após estas etapas, o sistema detector proposto irá obter os dados de tensão nas extremidades das linhas, fará a filtragem dos sinais adquiridos e, por fim, realizará a detecção de transitórios por meio do *software* MATLAB[®]. Para a avaliação da metodologia proposta serão utilizadas duas linhas de transmissão, sendo uma linha fictícia de 230 kV e a outra uma linha real de 500 kV.

2. Fundamentação Teórica

As linhas de transmissão presentes no SIN (Sistema Interligado Nacional) são geralmente de grandes extensões, ou seja, maiores que 240 km. Este fato ocorre devido ao Brasil ser um país de grandes dimensões territoriais e possuir suas maiores usinas geradoras de energia elétrica localizadas distantes dos grandes centros consumidores. Logo, é de fundamental importância que os distúrbios que ocorrem nas LT (linhas de transmissão) possam ser detectados de forma precisa para que os mesmos possam ser sanados de maneira mais rápida e garantir a maior continuidade do serviço de transmissão de energia elétrica. Portanto, será considerada a natureza dos parâmetros distribuídos de uma linha de transmissão para proporcionar uma maior precisão da detecção dos eventuais distúrbios.

2.1. Faltas em Linhas de Transmissão

Os parâmetros das linhas de transmissão na frequência da rede são praticamente constantes, logo qualquer situação que venha a alterar os parâmetros R , L e C das linhas pode acarretar em uma sobretensão (LOPES, 2011). Portanto, as linhas de transmissão são susceptíveis a diversos tipos de distúrbios, entre eles as sobretensões de manobras e as faltas. Faltas em sistemas elétricos de potência são classificadas como desligamentos não programados de seus componentes e podem ser ocasionadas por motivos diversos como, por exemplo, por queda de condutores devido a intempéries, por problemas de natureza elétrica, mecânica ou térmica, entre outros (COSTA, 2006).

As faltas podem ser classificadas em monofásicas, bifásicas, bifásicas para a terra e trifásicas. Estes tipos de faltas ainda podem ser inseridos em dois grupos: as faltas simétricas e as faltas assimétricas. O grupo das faltas simétricas é formado pela falta trifásica, enquanto que o grupo das faltas assimétricas é constituído por todos os tipos restantes de falta. A falta que possui uma maior ocorrência, cerca de 70% dos casos, é a do tipo monofásica (COSTA, 2006).

A elevação da tensão nas demais fases são provocadas pela falta fase-terra depende do grau de aterramento do sistema no ponto em questão (D'AJUZ *et al*, 1987). Logo, a resistência de aterramento é um fator de grande relevância e deve ser levada em consideração para uma análise mais detalhada.

2.2. Ondas Viajantes em Linhas de Transmissão

Uma linha de transmissão tem seus parâmetros distribuídos ao longo da sua extensão. Qualquer perturbação gerada por chaveamentos ou descargas atmosféricas, resulta na propagação de ondas ao longo da linha (ARAÚJO, NEVES, 2005). Logo, o efeito de uma variação de tensão ou corrente em um dos terminais da linha só será sentido pelo outro terminal quando ondas eletromagnéticas geradas por essa mudança percorrerem toda a extensão da linha. Então, observa-se que as ondas levam um determinado tempo de propagação para alcançar a extremidade da linha.

Os modelos mais utilizados para a realização da modelagem de LTs se baseiam na solução das equações de onda de tensão e corrente. Na figura 1 é mostrado o circuito equivalente para um elemento incremental de uma linha de transmissão monofásica, considerando que a mesma não apresente perdas.

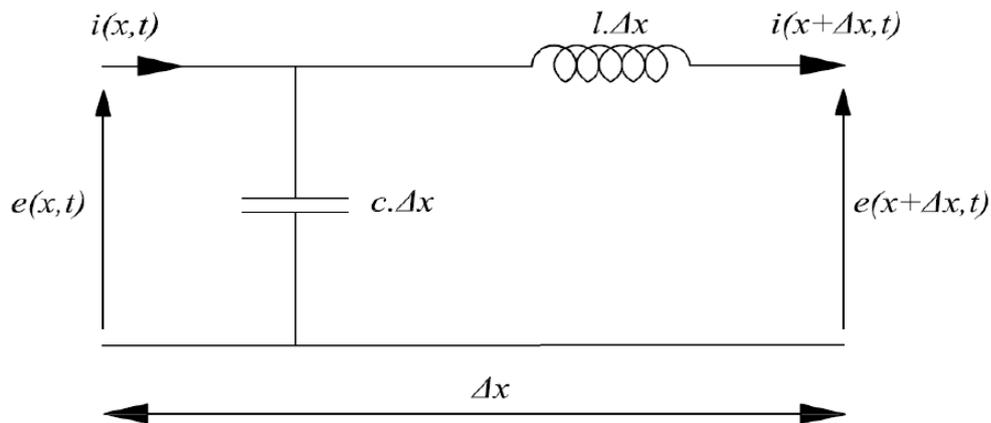


Figura 1: Elemento Incremental de uma Linha Monofásica sem Perdas.
Fonte: LOPES (2011).

Em que: l é a indutância série da linha por unidade de comprimento (H/m);

c é a capacitância shunt da linha por unidade de comprimento (F/m).

As equações que relacionam as tensões e correntes são dadas a seguir.

$$e(x + \Delta x, t) = e(x, t) - l\Delta x \frac{\partial}{\partial t} i(x + \Delta x, t) \quad (01)$$

$$i(x + \Delta x, t) = i(x, t) - c\Delta x \frac{\partial}{\partial t} e(x, t) \quad (02)$$

Através das equações (01) e (02) pode-se obter as equações de ondas da tensão e da corrente, também chamadas de equações “telegráficas”, que podem ser utilizadas em qualquer local da linha de transmissão. As equações de ondas também são denominadas de equações “telegráficas” porque o propósito inicial destas era o de representar os fenômenos referentes à transmissão de pulsos telegráficos.

$$\frac{\partial^2 e}{\partial x^2} = lc \frac{\partial^2 e}{\partial t^2} \quad (03)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = cl \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (04)$$

A seguir é apresentada a solução geral das equações de ondas da tensão e da corrente no domínio do tempo.

$$e(x,t) = A\left(t - \frac{x}{v}\right) \cdot u\left(t - \frac{x}{v}\right) + B\left(t + \frac{x}{v}\right) \cdot u\left(t + \frac{x}{v}\right) \quad (05)$$

$$i(x,t) = \frac{1}{Z} A\left(t - \frac{x}{v}\right) \cdot u\left(t - \frac{x}{v}\right) - \frac{1}{Z} B\left(t + \frac{x}{v}\right) \cdot u\left(t + \frac{x}{v}\right) \quad (06)$$

Em que: $Z = \frac{l}{c}$ é a impedância característica da linha de transmissão.

As equações (05) e (06) podem ser escritas ainda de outra maneira, como indicadas a seguir.

$$e(x,t) = f_1\left(t - \frac{x}{v}\right) + f_2\left(t + \frac{x}{v}\right) \quad (07)$$

$$i(x,t) = \frac{1}{Z} f_1\left(t - \frac{x}{v}\right) - \frac{1}{Z} f_2\left(t + \frac{x}{v}\right) \quad (08)$$

As funções f_1 e f_2 presentes nas equações (07) e (08) representam ondas que se propagam na linha de transmissão com sentidos opostos. Portanto, pode-se admitir que f_1 irá se propagar no sentido de x positivo, denominada de progressiva, e f_2 irá se propagar no sentido oposto, chamada de regressiva. A seguir, pode-se observar na figura 2 a propagação das ondas de corrente e de tensão.

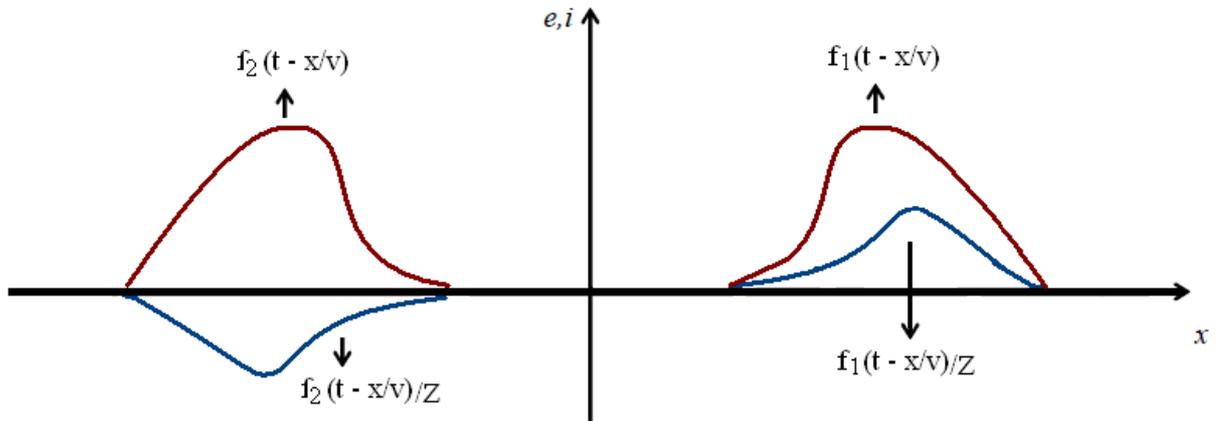


Figura 2: Ondas viajantes progressivas e regressivas.

As ondas eletromagnéticas serão as grandezas analisadas a seguir para a detecção do instante inicial dos transitórios.

2.3. Transformada de Park (Td_{q0}) Aplicada à Detecção de Distúrbios em Sistemas de Potência

A transformada de Park é assim chamada por ter sido desenvolvida por R. H. Park e seus associados nos Estados Unidos. Esta transformada também pode ser denominada de transformada dq0 e é utilizada primordialmente para realizar uma transformação matemática formal das grandezas trifásicas de um estator em suas componentes de eixos direto e em quadratura. Ou seja, a Td_{q0} decompõe as grandezas de armadura de uma máquina síncrona em duas componentes girantes, sendo uma delas alinhada com o eixo do enrolamento de campo, que é a componente de eixo direto *d*, e a outra em quadratura com este mesmo eixo, chamada de componente de eixo em quadratura *q* (FITZGERALD *et al*, 2006).

A Td_{q0} pode ser utilizada para a detecção de distúrbios nas linhas de transmissão. Esta transformação fará com que o sistema referencial gire na frequência da rede em sincronismo com os fasores de fase de sistema trifásico. Logo, em regime permanente, não serão identificadas variações de frequência, pois a velocidade angular relativa entre os referidos vetores será nula. Na situação em que ocorrem os transitórios, a velocidade relativa entre os fasores passa a ser diferente de zero, o que faz com que os sinais gerados possuam amplitudes

não nulas e comportamento oscilatório (LOPES, 2011). A figura 3 ilustra a aplicação da Tdq0 em máquinas elétricas e como método de detecção de distúrbios em um sistema trifásico.

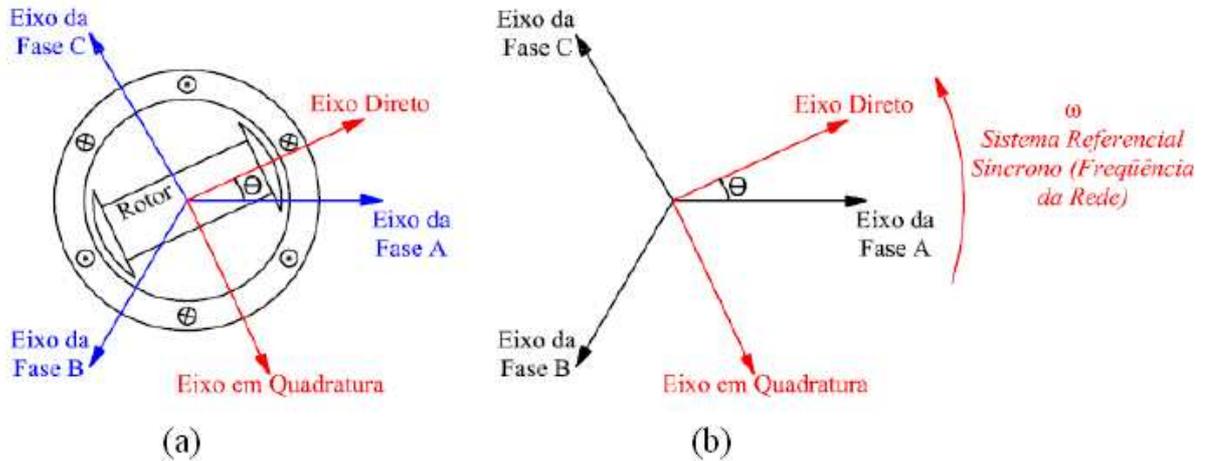


Figura 3: Aplicação da Transformada de Park (Tdq0): (a) transformação realizada no estudo de máquinas elétricas; (b) transformação realizada como método de detecção de distúrbios. Fonte: LOPES (2011).

Os transitórios variam de acordo com certas características da falta, logo, o sistema pode apresentar transitórios amortecidos e com frequências próximas a frequência da rede, a depender do ângulo de incidência da falta, da resistência da falta, do fluxo de potência na linha, do local da falta, entre outros fatores. Então, a detecção do instante inicial dos transitórios através dos coeficientes da tensão de eixo direto (V_d) pode ser prejudicada, pois a falta pode não ser observada. Portanto, deve-se utilizar um coeficiente mais robusto para detectar o início dos transitórios em quaisquer situações deste tipo, visto que não se podem prever as condições em que uma falta irá ocorrer. Logo, utiliza-se o coeficiente C_{dif} que é mais sensível à ocorrência de qualquer tipo de distúrbio. Este coeficiente pode ser obtido utilizando-se informações do valor do V_d atual e um imediatamente anterior, como observado pela equação (09).

$$[C_{dif}(t)] = \left[\frac{V_d(t) - V_d(t - \Delta t)}{\Delta t} \right] \quad (09)$$

Onde: V_d = componente de eixo direto;

Δt = passo de integração.

Na seção 4.2 será demonstrado como o componente do eixo direto é calculado.

Visto que o valor do coeficiente C_{dif} é obtido através da diferença entre o componente de eixo direto atual e o componente de eixo direto de uma amostra de tempo imediatamente anterior, em regime permanente, o valor de C_{dif} deve ser zero ou próximo de zero. Enquanto que, quando ocorre um distúrbio, esta diferença é considerável. Mas a depender das condições em que a falta venha a ocorrer, podem ocorrer transitórios amortecidos, o que aproxima o valor do coeficiente C_{dif} da situação de falta ao C_{dif} da situação de regime permanente. Portanto, utiliza-se o coeficiente C_{dif} elevado ao quadrado como forma de diferenciar ainda mais estas duas situações. Pois, sabe-se que quando um número entre zero e um é elevado ao quadrado, irá se aproximar de zero e quando um número superior a um é elevado ao quadrado irá se distanciar de zero.

3. Softwares Utilizados

A utilização de *softwares* é imprescindível para a realização das simulações acerca da detecção de distúrbios em linhas de transmissão. Os *softwares* utilizados para realizar as simulações foram o ATP (*Alternative Transients Program*) e o MATLAB[®] (*Matrix Laboratory*).

O ATP foi utilizado para a modelagem dos sistemas de potência, tanto o sistema de 230 kV como o sistema de 500 kV. Já o MATLAB[®] foi utilizado para a realização do processamento das informações de tensão das linhas para que a detecção dos distúrbios fosse possível.

3.1. ATP (*Alternative Transients Program*)

O ATP é um *software* que derivou do programa EMTP (*Eletromagnetic Transients Program*) e é uma poderosa ferramenta para o estudo de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos. O EMTP, que foi a base para os demais programas de análise de transitórios eletromagnéticos, foi desenvolvido por Herman W. Dommel na década de 60 para a *Bonneville Power Administration* (BPA).

O ATP é um *software* que permite a resolução de equações diferenciais algébrica, ordinárias e parciais, que estão associadas com resistências, capacitâncias, indutâncias, circuitos pi-equivalentes, linhas de transmissão com parâmetros distribuídos, chaves, fontes de corrente e tensão, e demais equipamentos presentes em um sistema elétrico. A integração é realizada pelo programa por meio da regra trapezoidal (LEUVEN EMTP CENTER, 1987).

O ATP trabalha com arquivos de dados em formato de texto, o que possibilita que os seus arquivos possam ser editados por qualquer editor de texto, como o *Notepad* ou o *EditPlus*. Logo, é requerido apenas deste *software* que os seus arquivos de dados sejam salvos no formato ASCII. Junto a este fator, acrescenta-se o fato de que o ATP é um *software* gratuito, justificando sua larga utilização.

Após o processamento de um arquivo no ATP, são gerados dois arquivos, um no formato *.lis* e outro no formato *.pl4*, e ainda é possível a observação dos seus resultados em um módulo gráfico. O arquivo no formato *.lis* possui as informações do estudo realizado pelo ATP, enquanto que o arquivo no formato *.pl4* contém informações acerca dos resultados

obtidos através da simulação, como tensões e correntes, dispostos em um conjunto de vetores coluna. As informações contidas no arquivo no formato *.pl4* podem ser utilizadas para a realização dos gráficos de tensões, correntes, potência e energia em outros ambientes computacionais.

A rígida estrutura do ATP é uma de suas principais características, onde cada informação presente nos arquivos de dados possui uma formatação previamente estabelecida. Portanto, os dados são alocados em posições definidas e caso esse padrão não seja obedecido, irão ocorrer erros de processamento, porém, a depender do caso, pode-se detectar o local do erro através do arquivo gerado no formato *.lis*.

O ATP é constituído de dois grupos de informações, as informações essenciais e as opcionais. O grupo das informações essenciais é composto por: o primeiro e segundo cartões de dados miscelâneos, cartão para especificação dos nós do sistema, cartão para a especificação das chaves e cartão para as fontes do sistema. Já o grupo das informações opcionais pode conter dados acerca de transformadores, linhas de transmissão, resistores não-lineares, entre outros dispositivos. O ATP possui ainda, duas linguagens que permitem uma maior liberdade ao usuário para criar os próprios modelos, elas são a linguagem MODELS e a TACS.

A linguagem TACS é utilizada para a modelagem de sistemas de controle. Esta linguagem é constituída por diversos componentes, entre eles: somadores, limitadores, operações lógicas e algébricas. Portanto, cabe ao usuário utilizar os componentes presentes na TACS para realizar um sistema de controle adequado ao seu caso a ser analisado.

A linguagem MODELS é mais moderna que a TACS e permite a utilização de seus componentes como um modelo em separado ou um conjunto de componentes. Deve-se ressaltar ainda que as duas linguagens não podem ser utilizadas em um mesmo caso.

O ATP possui também rotinas auxiliares, entre elas se destaca a *line constants*. A *line constants* é uma rotina usada para o cálculo dos parâmetros de uma linha de transmissão. Logo, a *line constants* permite a obtenção das resistências e reatâncias das sequências zero, positivas e negativas, quando são fornecidas as informações dos parâmetros físicos da torre e da disposição dos cabos, para linhas transpostas ou não transpostas.

3.2. MATLAB[®]

O MATLAB[®] é *software* que possui uma linguagem de alto nível em um ambiente interativo onde são desenvolvidos algoritmos, há a visualização de dados, a análise de dados e são realizados cálculos numéricos (MathWorks[®], 2011). Ele é um *software* que tem aplicações em diversas áreas, entre elas: sistemas embarcados, sistemas de controle, sistemas de comunicação, processamento digital de sinais, processamento de áudio e vídeo, mecatrônica e biologia computacional.

O MATLAB[®] foi desenvolvido pela MathWorks[®], empresa norte-americana que fica localizada em Massachusets, e possui como principais características:

- Uma linguagem de alto nível, um ambiente de desenvolvimento que permite o gerenciamento de códigos, arquivos e dados;
- A presença de ferramentas iterativas para análise, modelagem e solução de problemas; diversas funções matemáticas para álgebra linear, estatística, análise de Fourier, otimização, filtragem e integração numérica;
- A visualização de dados por meio de gráficos em 2-D e em 3-D; ferramentas para que o usuário construa a própria interface gráfica;
- E, ainda, funções para relacionar os algoritmos realizados no ambiente MATLAB[®] com aplicações externas e com algumas linguagens, como: C, C++, Fortran, Java, COM e Microsoft Excel.

O MATLAB[®] possui um ambiente denominado de *Simulink*, que é um ambiente gráfico que facilita a resolução e a compreensão de diversos tipos de modelos. Outra característica deste *software* é a possibilidade do uso de bibliotecas externas, denominadas de *Toolbox*, que possuem as mais diversas aplicações, como: redes neurais e processamento de imagens. Um diretório presente no MATLAB[®] que facilita bastante o uso deste *software* é o *Help*. O *Help* fornece a definição de cada uma das funções presentes no *software*, além de explicar como a mesma deve ser utilizada. Logo, este diretório possibilita que o MATLAB[®] seja um *software* de fácil aprendizado para os novos usuários.

O usuário do MATLAB[®] pode criar o próprio algoritmo por meio do arquivo *M-file* e o arquivo é salvo no formato *.m*. Há ainda a possibilidade de importação de dados no formato *.dat* e de dados gerados na linguagem MODELS do ATP para o arquivo *M-file*.

Logo, o MATLAB[®] é um *software* robusto que tem uma enorme variedade de aplicações.

4. Método Proposto

O modelo proposto visa à detecção de distúrbios em linhas de transmissão provocados por faltas monofásicas, por representarem em torno de 70% das ocorrências de faltas. As linhas de transmissão analisadas são idealmente transpostas e tem seus níveis de tensão e comprimentos dispostos na tabela 1. Ainda serão avaliados os parâmetros que exercem uma maior influência nas características da falta, como: o ângulo de incidência, a resistência e a localização da falta (ANDERSON, 1999). As variações utilizadas para esses parâmetros estão presentes na tabela 2 e na tabela 3.

Tabela 1: Linhas de transmissão avaliadas.

Linha de 230 kV	Linha de 500 kV
500 km	249 km

Tabela 2: Variações dos parâmetros para a linha de 230 kV.

Resistência (Ω)	Ângulo de Incidência ($^\circ$)	Local da Falta (km) em relação ao terminal emissor
90	90	250
30	45	100
0	0	30

Tabela 3: Variações dos parâmetros para a linha de 500 kV.

Resistência (Ω)	Ângulo de Incidência ($^\circ$)	Local da Falta (km) em relação ao terminal emissor
90	90	124,5
30	45	80
0	0	30

Um esquema do sistema elétrico adotado para a realização das simulações é indicado a seguir na figura 4.

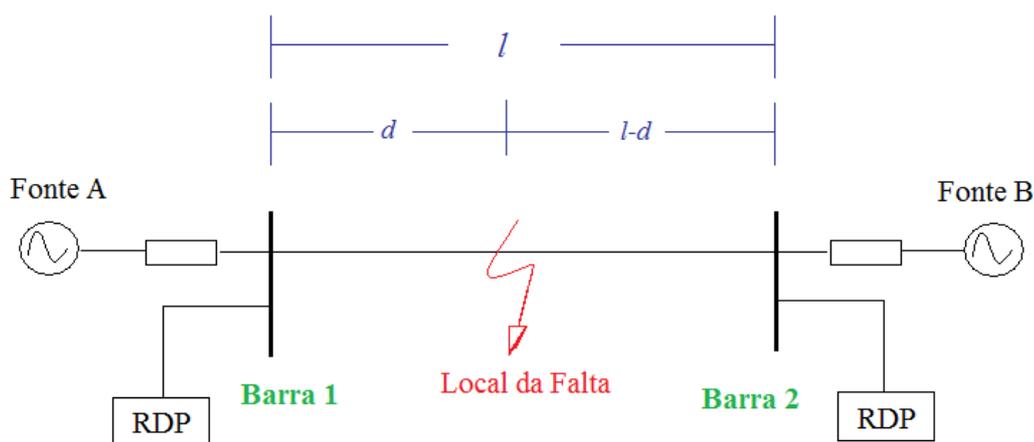


Figura 4: Esquema dos sistemas elétricos que serão avaliados.

4.1. Cálculo dos Parâmetros da Linha de Transmissão e Aquisição de Dados nos Terminais da Linha

Os dois fatores que influenciam na precisão da localização de faltas em linhas de transmissão pelo método das ondas viajantes são a velocidade de propagação da onda e os parâmetros desta linha (FENG *et al*, 2008). Dentre estes dois fatores, o cálculo correto dos parâmetros da linha é primordial para a detecção do instante inicial do transitório eletromagnético provocado por algum distúrbio. Logo, uma sequência adequada de ações deve ser realizada para que os parâmetros obtidos sejam os corretos.

Inicialmente deve ser realizado o modelo das linhas de transmissão no *software* ATP por meio do programa *Line Constants*, especificando os parâmetros físicos da torre e da disposição dos cabos e o tipo dos mesmos. Através do programa *Line Constants*, pode-se obter os valores de resistência e de reatância de sequência zero e positiva, e ainda a velocidade de propagação das ondas viajantes pelos cabos na frequência de 60 Hz. Os valores obtidos para as resistências, reatâncias e susceptâncias das sequências zero e positiva para as linhas de transmissão dos sistemas de 230 kV e 500 kV são apresentados nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4: Dados de sequência para a linha de transmissão de 230 kV.

Sequência	R(Ω /km)	X(Ω /km)	ω C (μ ho/km)
Zero	0,236	1,035	2,490
Positiva	0,054	0,527	3,144

Tabela 5: Dados de sequência para a linha de transmissão de 500 kV.

Sequência	R(Ω/km)	X(Ω/km)	ωC ($\mu\text{mho}/\text{km}$)
Zero	0,192	1,472	3,563
Positiva	0,017	0,263	6.358

A linha de transmissão de 230 kV utilizada foi fictícia, porém a LT de 500 kV utilizada foi uma pertencente ao sistema da CHESF (Companhia Hidro Elétrica do São Francisco) e apresenta a estrutura indicada na figura 5.

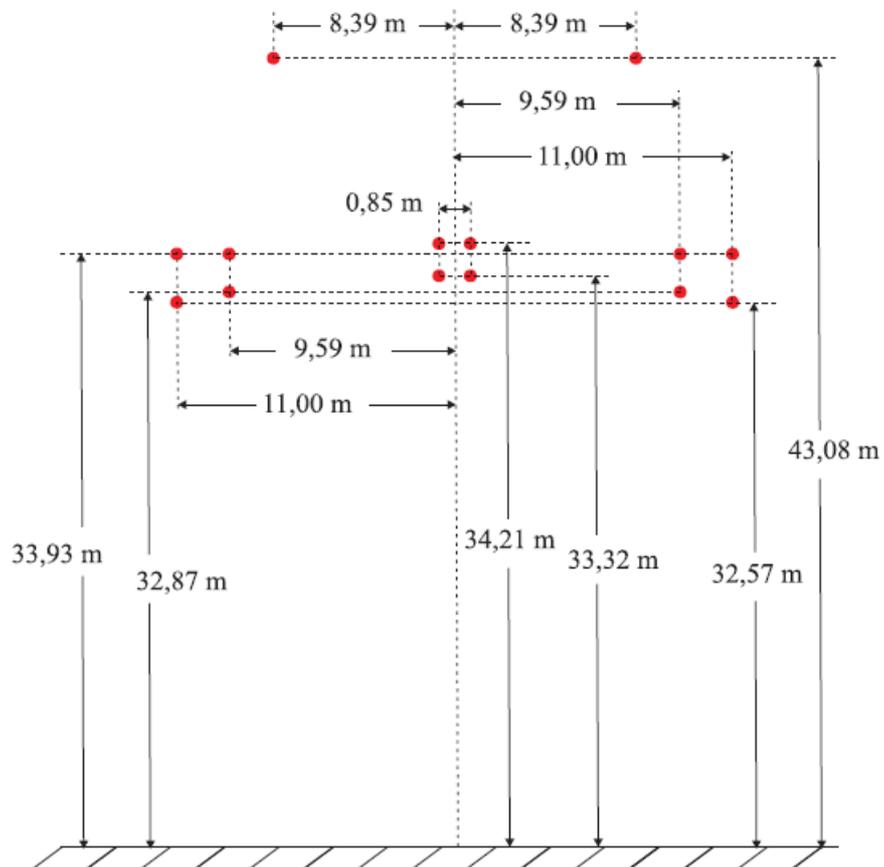


Figura 5: Geometria da LT 500 kV Jardim - Camaçari.
Fonte: DANTAS (2007).

Em seguida, realiza-se a modelagem, ainda no *software* ATP, do restante do sistema, constituído por: duas fontes e sete chaves, para cada um dos sistemas. As chaves são utilizadas como pontos de medição de tensões e correntes, e ainda como uma forma de

simular a falta monofásica. A seguir, nas tabelas 6 a 9, têm-se os parâmetros de cada uma das fontes utilizadas, tanto para o sistema de 230 kV, como para o sistema de 500 kV.

Tabela 6: Tensão das fontes ($V_{Base} = 230$ kV).

Fonte	Módulo (p.u.)	Fase (°)
Fonte A	1,014	10
Fonte B	1,000	0

Tabela 7: Impedâncias das fontes (Sistema de 230 kV).

Fonte	Sequência Zero		Sequência Positiva	
	$R_0(\Omega)$	$X_0(\Omega)$	$R_1(\Omega)$	$X_1(\Omega)$
Fonte A	1,445	5,276	1,963	5,648
Fonte B	1,445	5,276	1,963	5,648

Tabela 8: Tensão das fontes ($V_{Base} = 500$ kV).

Fonte	Módulo (p.u.)	Fase (°)
Fonte A	1,100	0
Fonte B	1,089	-10

Fonte: DANTAS (2007).

Tabela 9: Impedâncias das fontes (Sistema de 500 kV).

Fonte	Sequência Zero		Sequência Positiva	
	$R_0(\Omega)$	$X_0(\Omega)$	$R_1(\Omega)$	$X_1(\Omega)$
Fonte A	1,1268	20,838	0,9681	28,513
Fonte B	1,1268	20,838	0,9681	28,513

Fonte: DANTAS (2007).

A linguagem *MOLDELS* do ATP deve ser utilizada para salvar as informações a respeito das tensões e correntes medidas nos terminais da linha de transmissão, de forma a simular os dados que seriam fornecidos pelos dois RDP. Admite-se, ainda, que os dados obtidos pelos RDP estão perfeitamente sincronizados via GPS.

O passo seguinte é o carregamento destas informações acerca do sistema no *software* MATLAB[®]. No MATLAB[®] as informações serão processadas para que possa ser detectado o início dos transitórios. Na próxima subseção serão descritas as ações realizadas pelo *software* MATLAB[®].

4.2. Aplicação da Tdq0 e Cálculo dos coeficientes $[C_{dif}]^2$

O *software* MATLAB[®] é utilizado para realizar a normalização dos vetores, a transformada de Clarke, a transformada dq0 e o cálculo dos coeficientes $[C_{dif}]^2$. As transformadas de Clarke e de Park são apresentadas na tabela 10.

Tabela 10: Transformada de Clarke e Transformada de Park.

Transformada de Clarke	Transformada de Park (Tdq0)
$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega t) & \text{sen}(\omega t) \\ 0 & -\text{sen}(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix}$

Logo, através da tabela 10, podem-se obter os valores de V_d e V_q , como observado pela equação (10).

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega t + \theta) & \text{sen}(\omega t + \theta) \\ 0 & -\text{sen}(\omega t + \theta) & \cos(\omega t + \theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \sqrt{\frac{2}{3}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (10)$$

Onde: V_A, V_B e V_C = tensões de fase do sistema trifásico em análise;

V_d e V_q = componentes de eixo direto e em quadratura, respectivamente;

ω = frequência angular das tensões e correntes da rede;

t = instantes de tempo sincronizados via GPS;

θ = ângulo de fase da componente de eixo direto V_d .

Em regime permanente, o valor de V_d deve ser aproximadamente nulo, sendo necessário para isto, que ocorra primeiramente o alinhamento entre o eixo direto e o eixo da fase A, podendo ser escolhido o eixo de outra fase. A Tdq0 foi utilizada para realizar tal

procedimento. Visto que o sistema analisado foi um sistema trifásico que se encontrava inicialmente em regime permanente, as tensões de fase do mesmo são da estrutura das equações (11), (12) e (13).

$$V_A = V \text{sen}(\omega t + \theta_V) \quad (11)$$

$$V_B = V \text{sen}(\omega t + \theta_V - 120^\circ) \quad (12)$$

$$V_C = V \text{sen}(\omega t + \theta_V + 120^\circ) \quad (13)$$

Então, podem-se obter pela equação (10) e pelas equações das tensões de fase os valores dos coeficientes V_d e V_q .

$$V_d = -V \cdot \sqrt{\left(\frac{3}{2}\right)} \cdot \text{sen}(\theta - \theta_V) \quad (14)$$

$$V_q = -V \cdot \sqrt{\left(\frac{3}{2}\right)} \cdot \text{cos}(\theta - \theta_V) \quad (15)$$

A partir das equações (14) e (15), obtém-se a expressão (16).

$$\frac{V_d}{V_q} = \tan(\theta - \theta_V) \Rightarrow \theta_V = -\tan^{-1}\left(\frac{V_d}{V_q}\right) + \theta \quad (16)$$

O valor de θ pode ser escolhido aleatoriamente na equação (10), desde que seja o mesmo utilizado na expressão (16). O passo seguinte é a utilização da Tdq0 e simultaneamente fazendo $\theta = \theta_V$. Logo, em regime permanente, tem-se:

$$V_d = 0 \quad (17)$$

$$V_q = -V \cdot \sqrt{\left(\frac{3}{2}\right)} \quad (18)$$

Outro passo importante que deve ser realizado em seguida é a normalização dos sinais de tensão. A normalização é realizada fazendo-se uso da propriedade da ortogonalidade entre

os coeficientes de eixo direto e do eixo em quadratura. Analisando as equações (14) e (15), obtém-se a expressão (19).

$$V_M = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} = \sqrt{\left(-V \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \text{sen}(\theta - \theta_V)\right)^2 + \left(-V \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \text{cos}(\theta - \theta_V)\right)^2}$$

$$\Rightarrow V_M = \left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right) \cdot V \quad (19)$$

Logo, através da equação (19), pode-se obter a tensão V em função de V_d e V_q , como indicado na equação (20).

$$V = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (20)$$

Portanto, os sinais analisados para a detecção do início dos transitórios serão: $\frac{V_A}{V}$, $\frac{V_B}{V}$ e $\frac{V_C}{V}$. No regime permanente, as amplitudes dos novos sinais analisados serão em torno de um.

Em seguida, observando o fato de que os transitórios podem ser amortecidos e o coeficiente V_d pode não ser capaz de detectar a falta, utiliza-se o coeficiente C_{dif} , que é mais sensível às ocorrências de distúrbios. De maneira a melhorar ainda mais a detecção de distúrbios, o coeficiente C_{dif} é elevado ao quadrado. Portanto, o cálculo do $[C_{dif}]^2$ é realizado de acordo com a equação (21).

$$[C_{dif}(t)]^2 = \left[\frac{V_d(t) - V_d(t - \Delta t)}{\Delta t} \right]^2 \quad (21)$$

Onde: V_d = componente de eixo direto;

Δt = passo de integração.

Na figura 6 é mostrado como o coeficiente $[C_{dif}]^2$ torna bem mais robusta a detecção do início dos transitórios provocados por uma falta monofásica em um sistema de 500 kV.

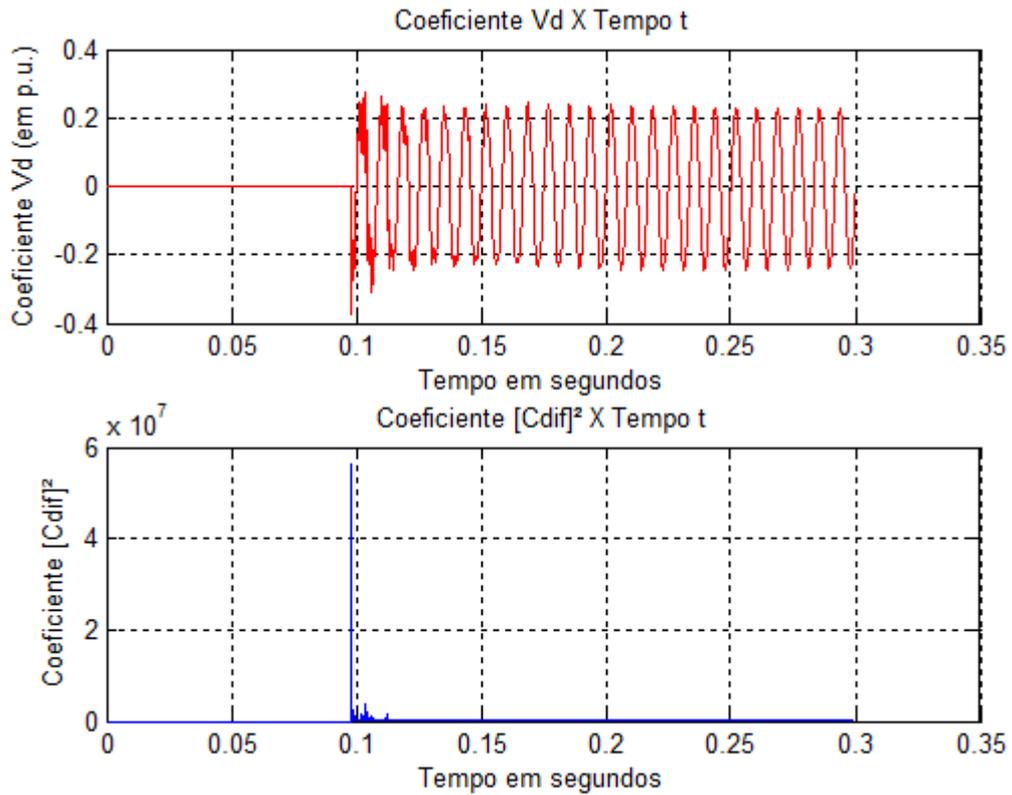


Figura 6: Gráfico do coeficiente V_d e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo.

4.3. Detecção do Instante Inicial dos Transitórios

A detecção do instante inicial dos transitórios é realizada através do cálculo do coeficiente $[C_{dif}]^2$ no *software* MATLAB[®]. Tomando i como o índice do número de amostras, F_S a frequência de amostragem dos RDP e $T_{transitório}$ o instante em que se inicia o transitório, pode-se detectar o instante inicial dos transitórios por meio do primeiro coeficiente $[C_{dif}]^2$ não nulo. Logo, caso o $[C_{dif}]^2$ seja igual a zero, o transitório não deve ser detectado. Já para a situação em que o $[C_{dif}]^2$ é maior que zero, o $T_{transitório}$ é calculado pela equação (22).

$$T_{transitório} = \left(\frac{i-1}{F_S} \right) \quad (22)$$

Por fim, após a detecção do instante em que a falta monofásica se inicia, são gerados os gráficos das tensões de fases e dos coeficientes $[C_{dif}]^2$, pelo lado do terminal emissor.

5. Resultados e Análise

Utilizando-se os *softwares* ATP e MATLAB[®] foram detectados os instantes iniciais dos transitórios provocados por uma falta monofásica, na fase A, em diversas situações. Foram analisados dois sistemas, um de 230 kV e outro de 500 kV, que tiveram como parâmetros variáveis o local da falta, a resistência da falta e o ângulo de incidência da falta. Os resultados obtidos para cada uma destas situações foram obtidos utilizando-se o passo de integração de 50 μ s.

5.1. Linha de Transmissão de 230 kV

O sistema de 230 kV foi analisado observando-se o comportamento da detecção dos transitórios na ocorrência de uma falta monofásica para sete casos diferentes, em que se variou a resistência de falta, o ângulo de incidência de falta e o local da falta. A descrição de cada caso está mostrada na tabela 11.

Tabela 11: Descrição de cada caso para o sistema de 230 kV.

Casos	Resistência de Falta (Ω)	Ângulo de Incidência da Falta ($^\circ$)	Local da Falta - d (km)
Caso 1	90	0	100
Caso 2	30	0	100
Caso 3	0	0	100
Caso 4	0	45	100
Caso 5	0	90	100
Caso 6	0	0	250
Caso 7	0	0	30

Observa-se pela tabela 11 que os casos 1, 2 e 3 retratam as situações da variação da resistência de falta enquanto os demais parâmetros permanecem fixos. Ainda na tabela 11, nota-se que os casos 3, 4 e 5 representam as situações em que os ângulos de incidência são analisados e os outros parâmetros permanecem com um valor constante. Por fim, tem-se que

os casos 3, 6 e 7 tratam da situação em que será analisado o local da falta, logo nestas situações, os valores da resistência e do ângulo de incidência da falta não são alterados.

Os valores obtidos como instantes iniciais dos transitórios para cada um dos casos e para cada um dos RDP são apresentados na tabela 12.

Tabela 12: Início dos Transitórios para cada um dos casos do sistema de 230 kV.

Casos	Início dos Transitórios - RDP₁ (segundos)	Início dos Transitórios - RDP₂ (segundos)
Caso 1	0,097900	0,098950
Caso 2	0,097900	0,098950
Caso 3	0,097900	0,098950
Caso 4	0,100000	0,101050
Caso 5	0,102050	0,103100
Caso 6	0,098450	0,098450
Caso 7	0,097700	0,099200

Por meio da tabela 12, pode-se observar que a mudança dos valores da resistência de falta, casos 1, 2 e 3, não influencia na detecção do início do transitório, isto ocorre porque a detecção realizada pelo coeficiente $[C_{dif}]^2$ é robusta e mesmo que a queda na tensão seja pequena o transitório é detectado rapidamente. Quando o local de falta é modificado é possível notar que os instantes de faltas são modificados e quando a falta é aplicada exatamente no meio da linha, caso 6, os dois RDP levam o mesmo tempo para detectá-la, mostrando que estão idealmente sincronizados e que a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas é igual nos dois sentidos de propagação.

Ainda observando a tabela 12, tem-se que na situação em que o ângulo de incidência é variado, casos 3, 4 e 5, há uma diferença entre os instantes iniciais dos transitórios, fato que já era esperado, pois o ângulo de incidência está relacionado com o início da falta. Logo, como pode ser observado na figura 7, se a falta ocorrer em um ângulo de incidência de 45° (caso 4), acarretará em um atraso em torno de 2,08 ms, visto que a frequência do sistema é de 60 Hz, em relação ao caso em que o ângulo de incidência da falta é de 0° (caso 3). Calculando-se a diferença entre o instante inicial do caso 4 e do caso 3 para ambos RDP, tem-se:

$$RDP_1: 0,10000 \text{ s} - 0,09790 \text{ s} = 0,00210 \text{ s} = 2,1 \text{ ms}$$

$$\text{RDP}_2: 0,10105 \text{ s} - 0,098950 \text{ s} = 0,0021 \text{ s} = 2,1 \text{ ms}$$

Portanto, observa-se que o atraso encontrado é próximo do atraso esperado de 2,08 ms. É interessante ressaltar ainda que o tempo efetivo de detecção para os casos 3, 4 e 5 são iguais. Como forma de observar que o atraso é igual para os dois RDP, e, sabendo que o RDP₁ leva um tempo t para realizar a detecção e o RDP₂ leva um tempo $t + \Delta t$, será feita a diferença dos instantes iniciais de transitórios dos dois RDP para cada um dos casos.

- Caso 3: $\text{RDP}_2 - \text{RDP}_1 = 0,098950 \text{ s} - 0,097900 \text{ s} = 1,05 \text{ ms}$
- Caso 4: $\text{RDP}_2 - \text{RDP}_1 = 0,101050 \text{ s} - 0,100000 \text{ s} = 1,05 \text{ ms}$
- Caso 5: $\text{RDP}_2 - \text{RDP}_1 = 0,103100 \text{ s} - 0,102050 \text{ s} = 1,05 \text{ ms}$

Logo, nota-se que a diferença entre os instantes da detecção é igual para todos os casos, pois quando a diferença é realizada o atraso causado pelo ângulo de incidência é eliminado.

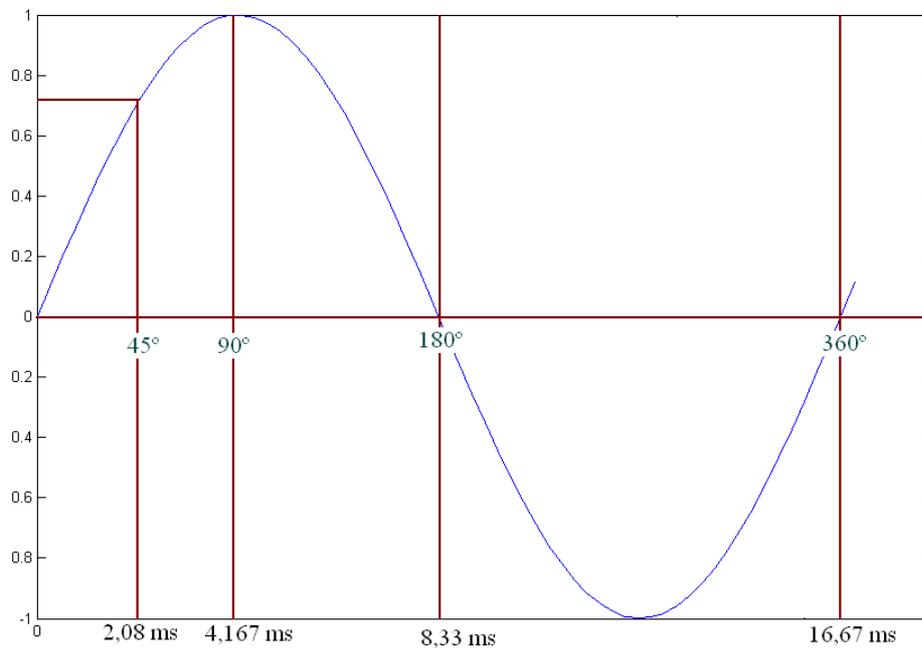


Figura 7: Onda senoidal na frequência de 60 Hz que relaciona os ângulos de incidência e o tempo em ms.

A seguir é possível verificar por meio dos gráficos mostrados nas figuras 8 a 14 os níveis das tensões de fase e os coeficientes $[C_{dif}]^2$ para cada um dos casos.

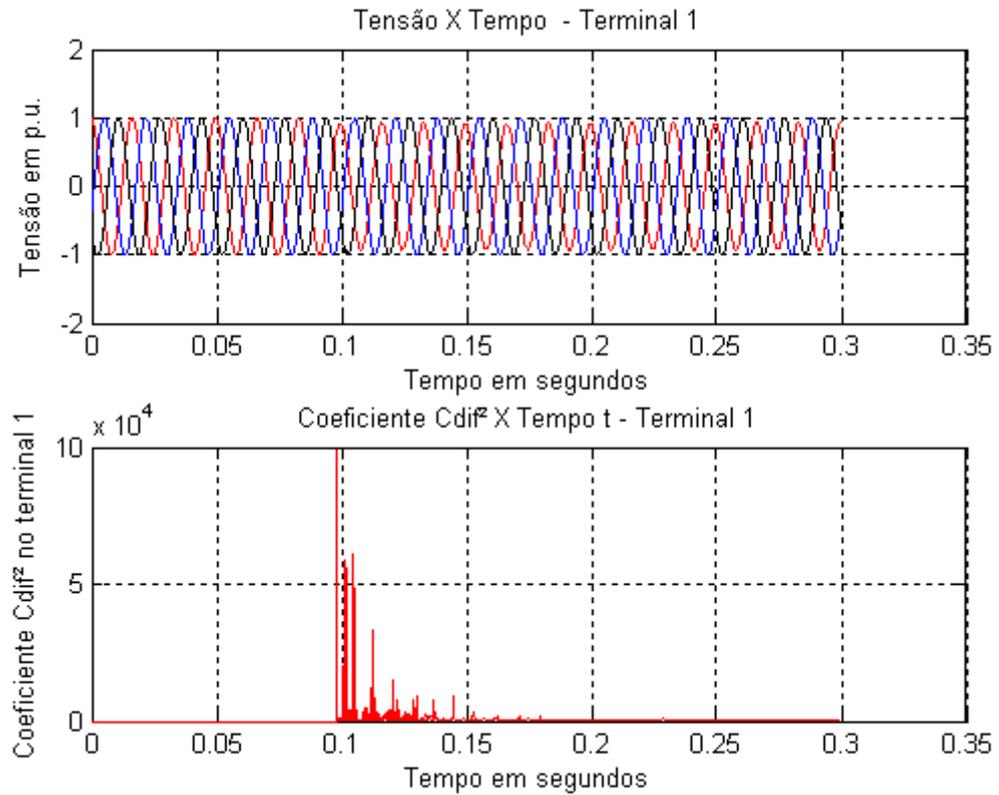


Figura 8: Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 230 kV – Caso 1.

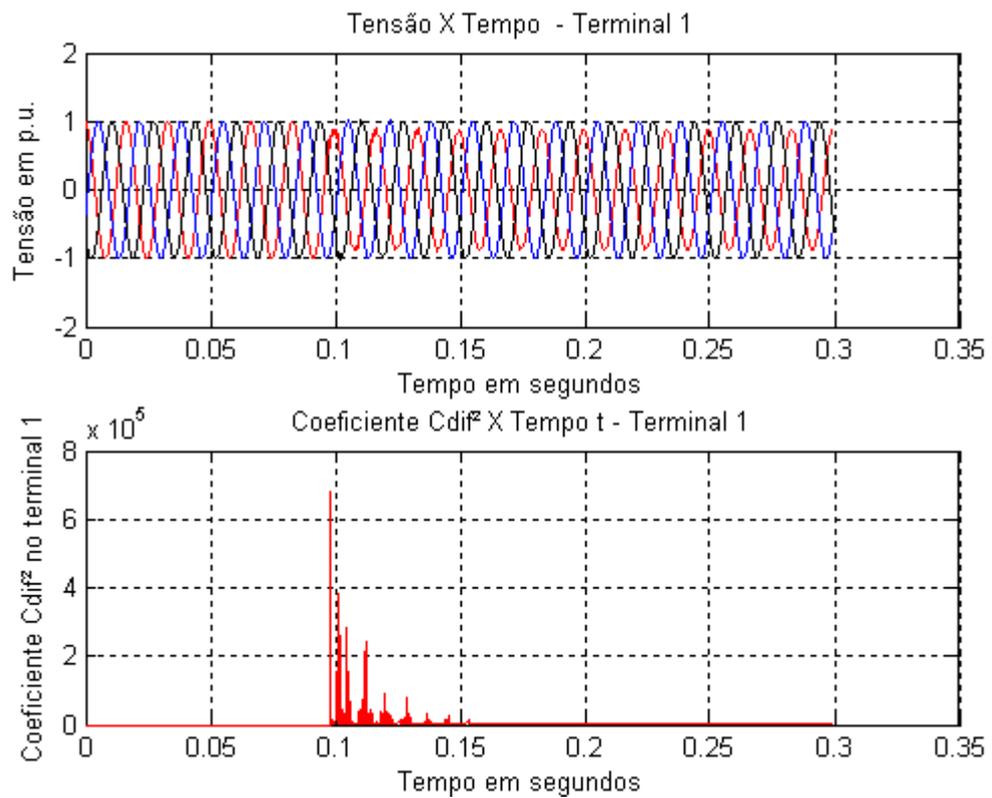


Figura 9: Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 230 kV – Caso 2.

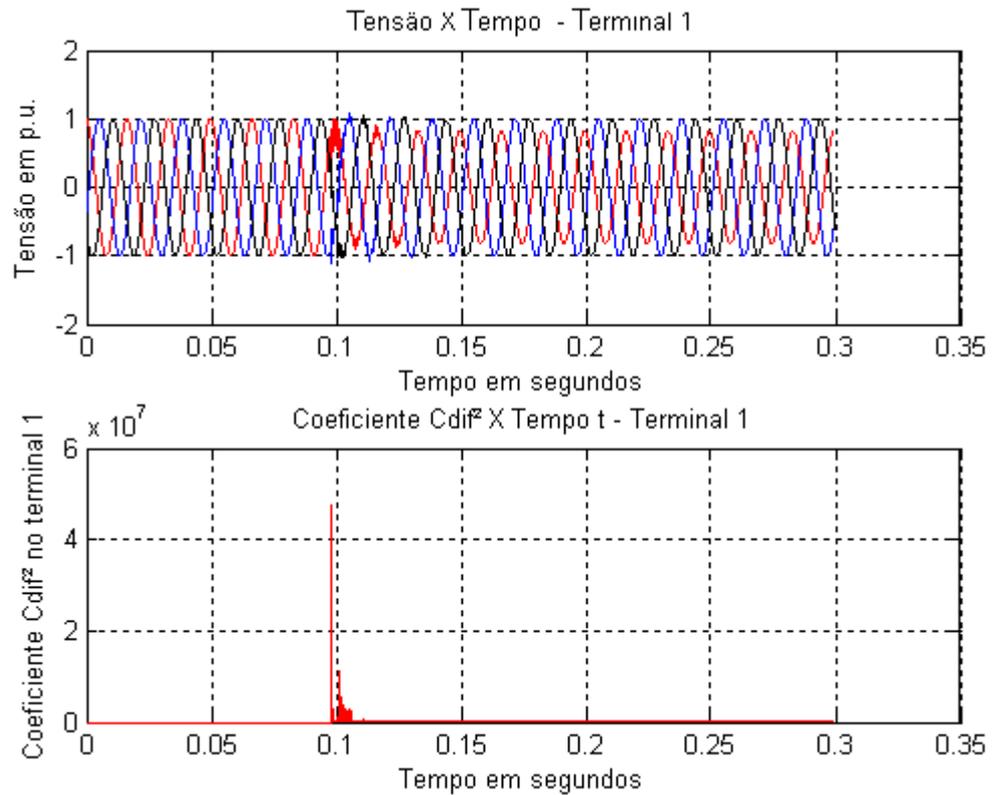


Figura 10: Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 230 kV – Caso 3.

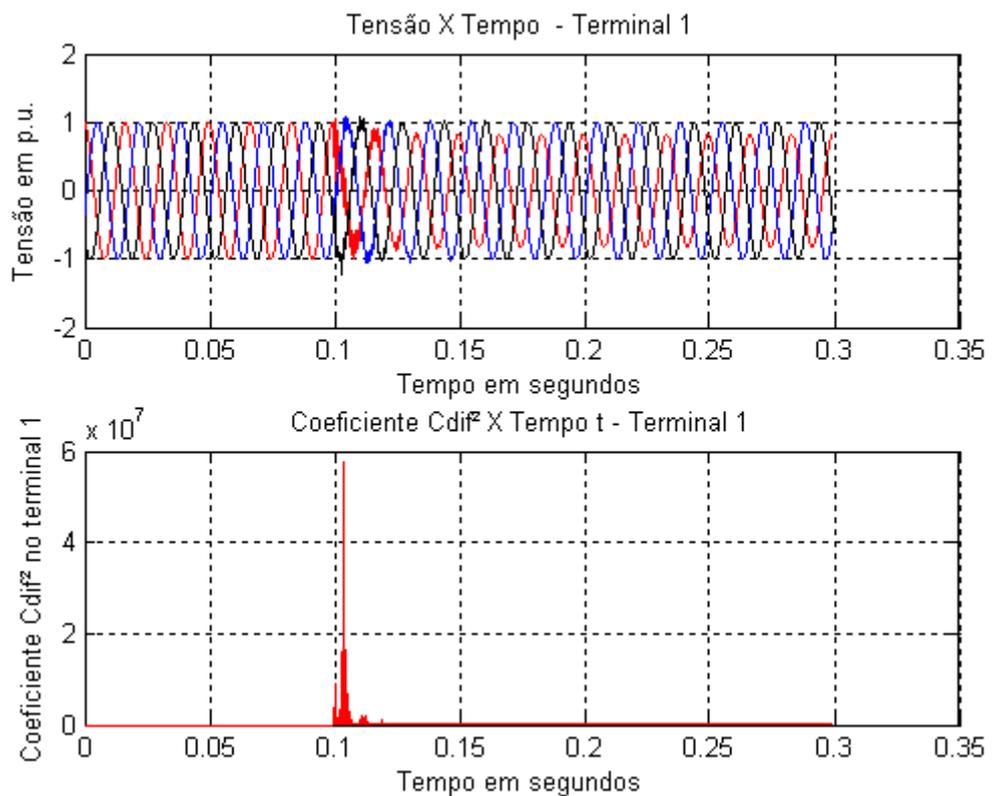


Figura 11: Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 230 kV – Caso 4.

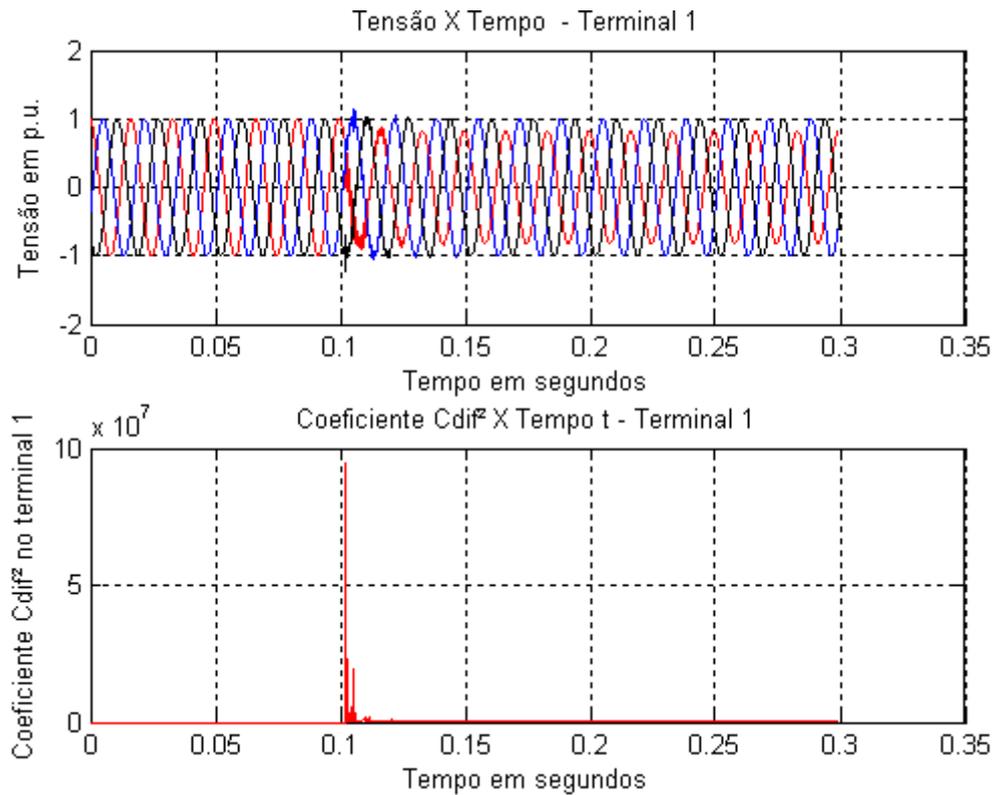


Figura 12: Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 230 kV – Caso 5.

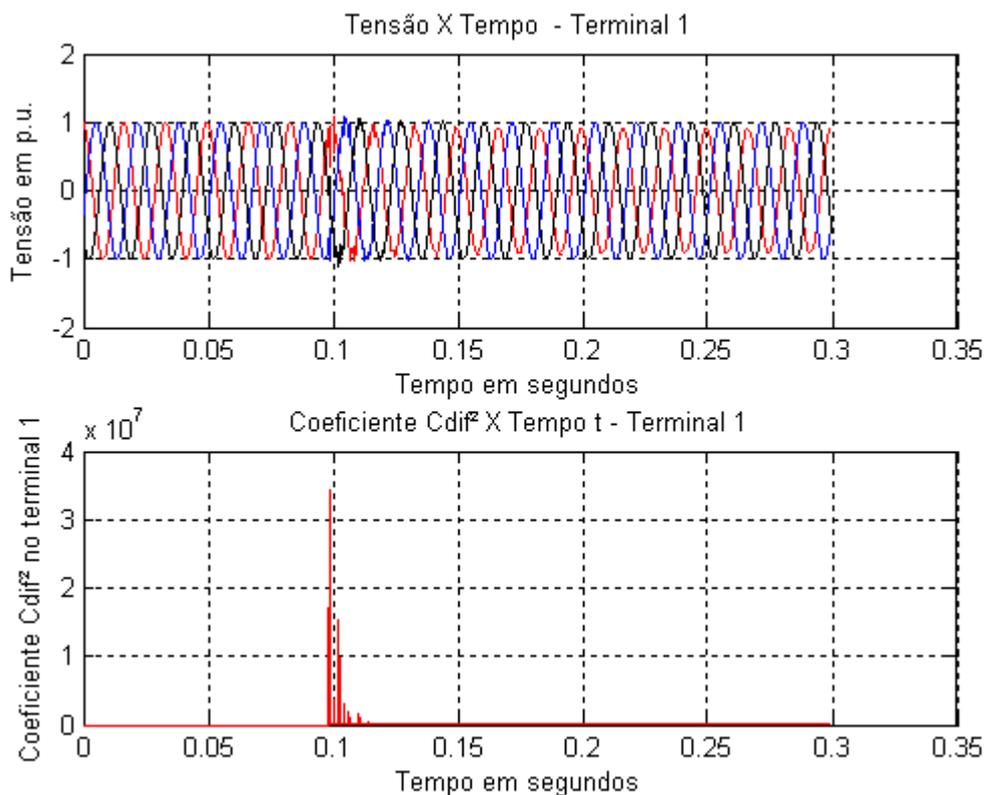


Figura 13: Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 230 kV – Caso 6.

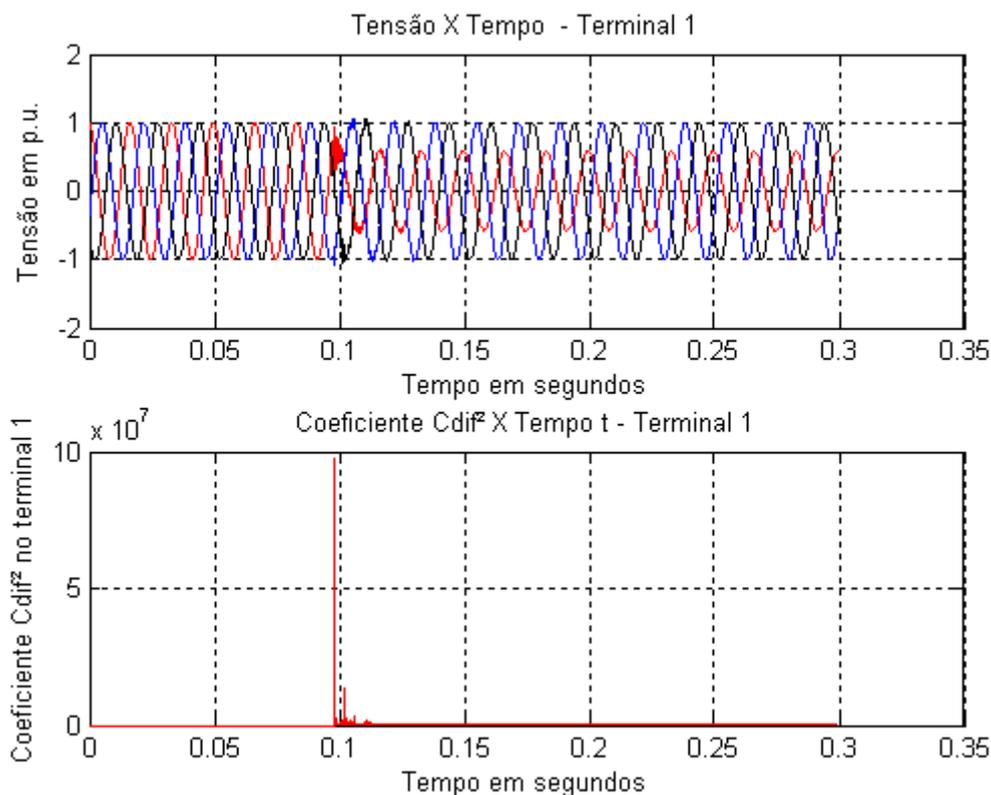


Figura 14: Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 230 kV – Caso 7.

Nota-se nas figuras 8 a 14, que a queda de tensão provocada pela falta monofásica é relativamente pequena. Este fato pode ser justificado por problemas no aterramento do sistema. Nos gráficos 8, 9 e 14 (casos 1, 2 e 6, respectivamente) a pequena queda de tensão é ainda mais ressaltada. Nos casos 1 e 2, isto ocorre porque a resistência de falta é maior, o que faz com que a tensão tenha um menor decaimento, visto que a tensão na fase A será a impedância da linha (do terminal emissor até o local da falta) acrescida da resistência da falta multiplicada pela corrente de falta. Já no caso 6, a baixa queda de tensão ocorre porque a falta ocorreu em um local mais distante do terminal emissor da linha, o qual é analisado, e com isso a impedância da linha que será levada em consideração para a tensão na fase A será maior.

Observa-se ainda nos gráficos das figuras 8 a 14 que os valores dos coeficientes $[C_{dif}]^2$ são de ordem elevada, cerca de 10^7 . Nota-se ainda que, os menores valores do coeficiente $[C_{dif}]^2$ são alcançados quando a resistência de falta é igual a 90Ω , que pode ser considerada de alta impedância, fato que dificulta a detecção do distúrbio, porém mesmo nesta situação o coeficiente $[C_{dif}]^2$ é da ordem de 10^4 , tornando clara a robustez do método.

5.2. Linha de Transmissão de 500 kV

De maneira semelhante ao sistema de 230 kV, para o sistema de 500 kV, analisou-se o comportamento da detecção dos transitórios para sete diferentes casos, onde se variou a resistência, o ângulo de incidência e o local da falta, como apresentado na tabela 13.

Tabela 13: Descrição de cada caso para o sistema de 500 kV.

Casos	Resistência de Falta (Ω)	Ângulo de Incidência da Falta ($^\circ$)	Local da Falta – d (km)
Caso 1	90	0	80
Caso 2	30	0	80
Caso 3	0	0	80
Caso 4	0	45	80
Caso 5	0	90	80
Caso 6	0	0	124,5
Caso 7	0	0	30

Analogamente a tabela 11 do sistema de 230 kV, a tabela 13 possui os casos 1, 2 e 3 para retratar as situações da variação da resistência de falta, os casos 3, 4 e 5 para representar as situações em que os ângulos de incidência são analisados e os casos 3, 6 e 7 tratam da situação em que será analisado o local da falta. Em seguida, conforme a tabela 14 anotou-se os instantes iniciais dos transitórios para cada um dos RDP.

Tabela 14: Início dos transitórios para cada um dos casos do sistema de 500 kV.

Casos	Início dos Transitórios - RDP₁ (segundos)	Início dos Transitórios - RDP₂ (segundos)
Caso 1	0,097850	0,098150
Caso 2	0,097850	0,098150
Caso 3	0,097850	0,098150
Caso 4	0,099950	0,100250
Caso 5	0,102000	0,102300
Caso 6	0,098000	0,098000
Caso 7	0,097700	0,098350

Nota-se, pela tabela 14, que a variação da resistência de falta, casos 1, 2 e 3, não altera o instante inicial do transitório no sistema de 500 kV. Diferentemente da mudança da resistência de falta, que não acarreta em mudanças nos instantes iniciais dos transitórios, a variação do local de falta, casos 3, 6 e 7, provocam alterações nos instantes iniciais dos distúrbios, visto que o percurso que as ondas viajantes devem percorrer é maior ou menor. Para a situação de variação do ângulo de incidência, foram obtidos valores distintos de início de transitórios, fato esperado e que pode ser explicado de maneira análoga ao ocorrido no sistema de 230 kV. Pois, quando o ângulo de incidência é modificado, também é variado o tempo em que a falta foi aplicada. Logo, observando-se os casos 3, 4 e 5 da tabela 14, nota-se que o atraso presente a cada 45° é da ordem de 2,08 ms, que é o tempo esperado, visto que a frequência do sistema é 60 Hz. Como: $45^\circ = \frac{1}{8} \cdot 360^\circ \Rightarrow \frac{1}{60\text{Hz}} \cdot \frac{1}{8} = 2,083 \text{ ms}$.

Em seguida, foram obtidas as figuras 15 a 21, que possuem os gráficos dos níveis das tensões de fase e os coeficientes $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para cada um dos casos do sistema de 500 kV, vistos do terminal emissor.

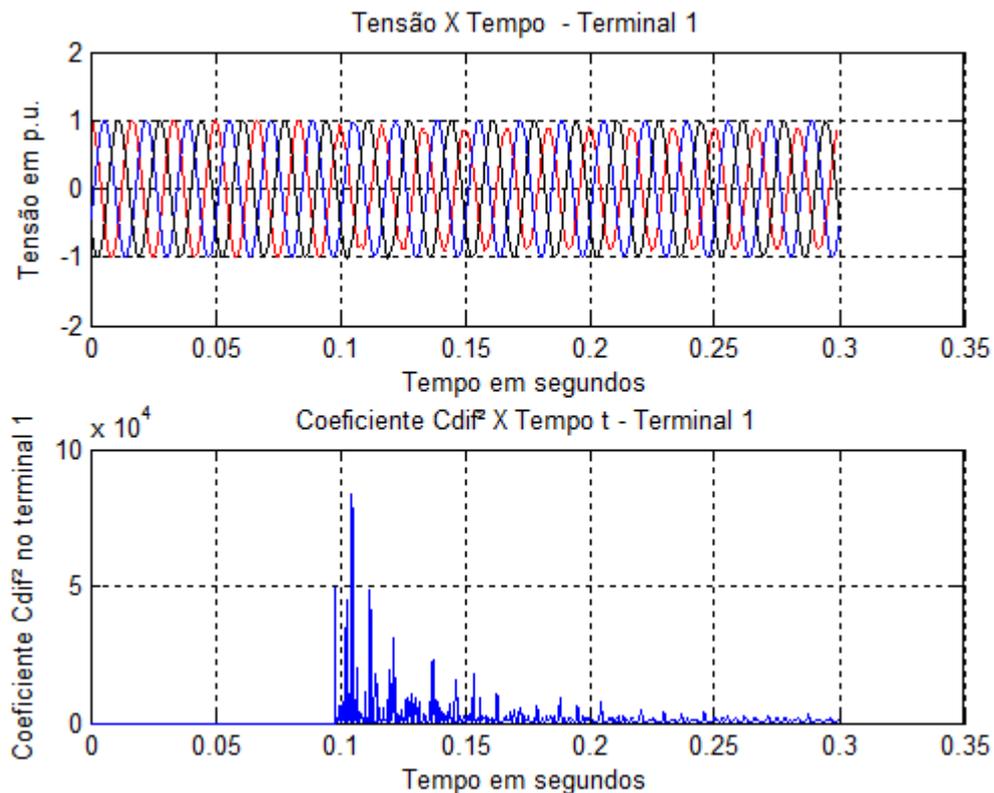


Figura 15: Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 500 kV – Caso 1.

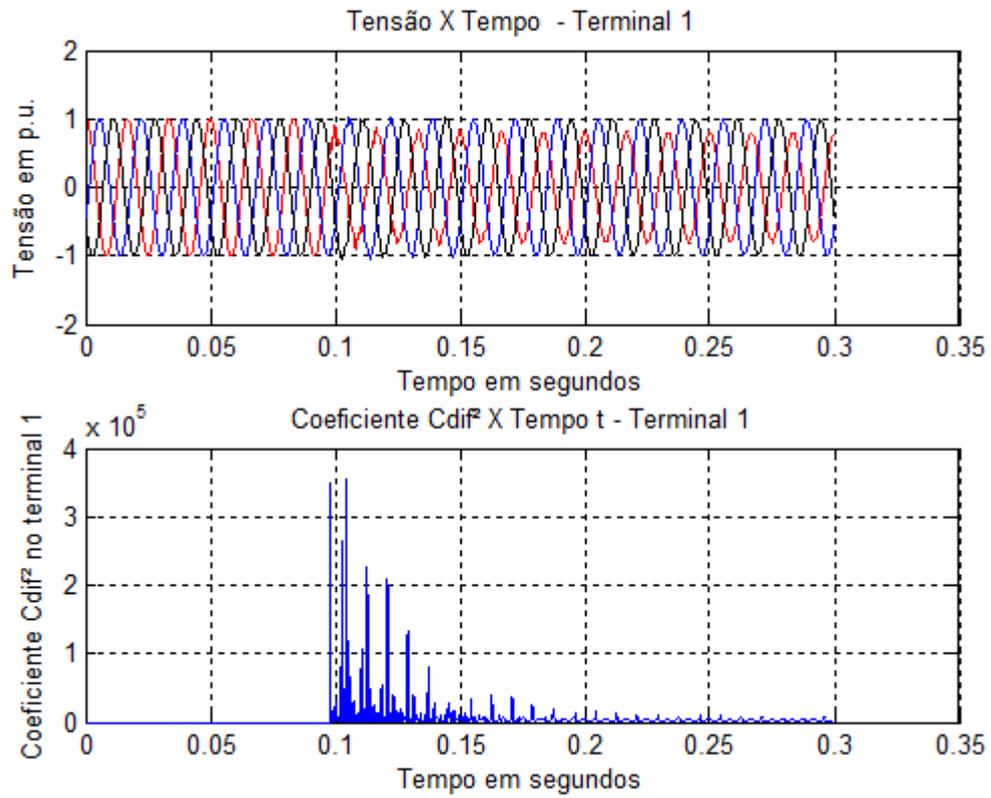


Figura 16: Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 500 kV – Caso 2.

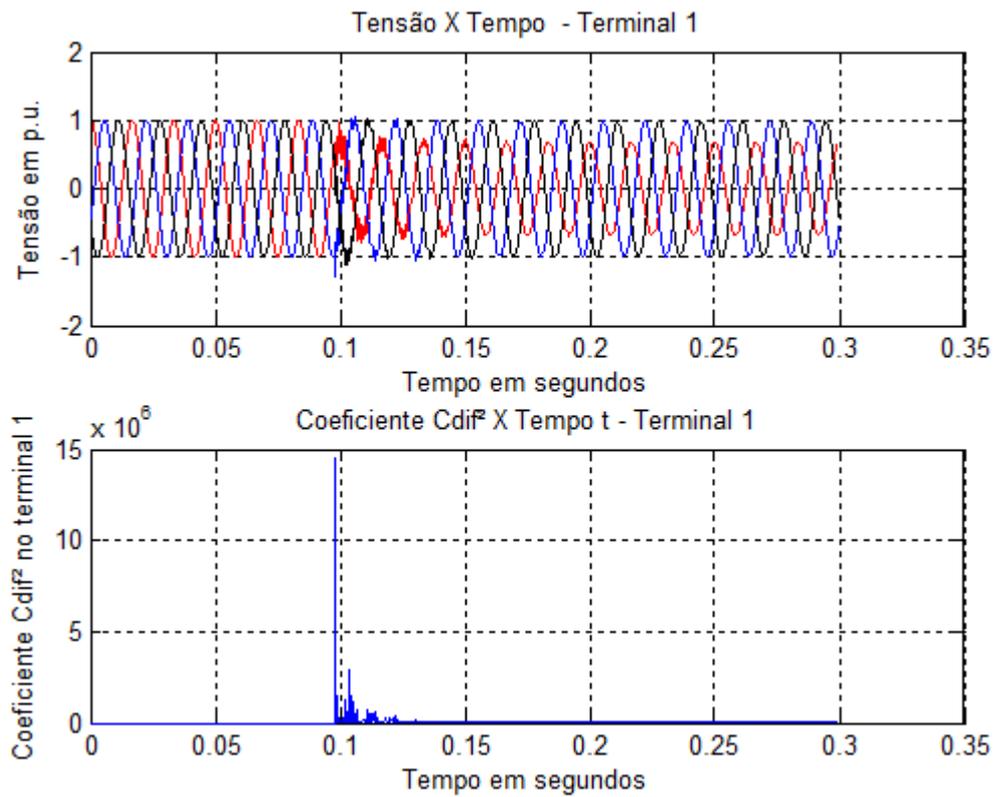


Figura 17: Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 500 kV – Caso 3.

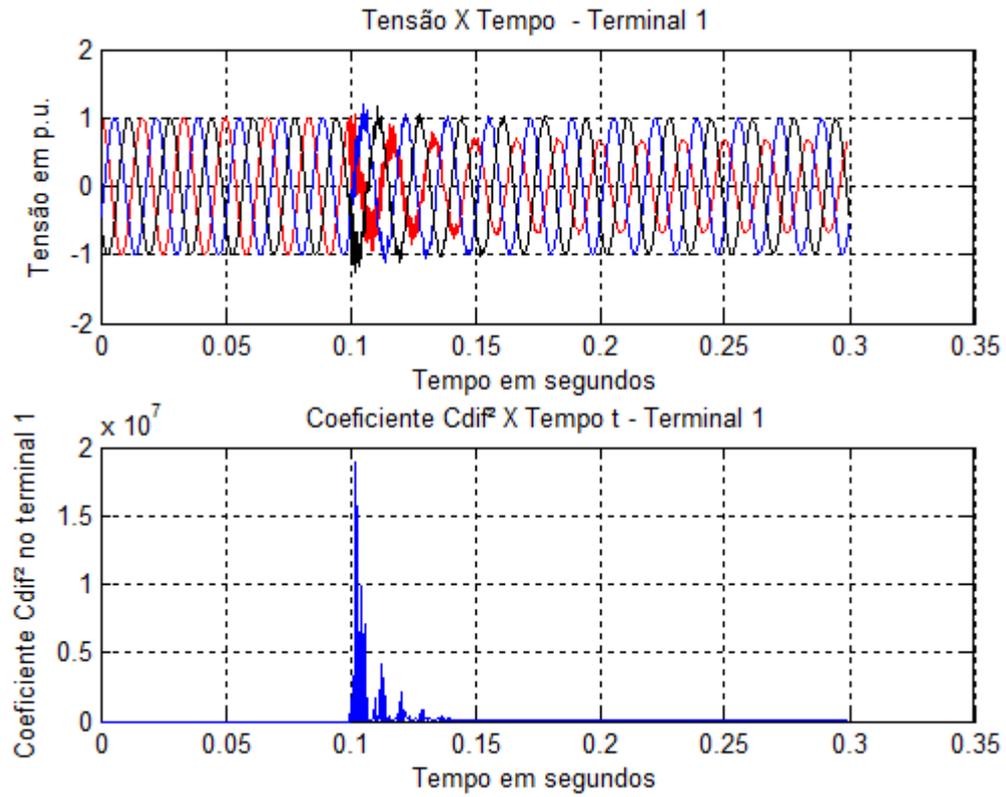


Figura 18: Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 500 kV – Caso 4.

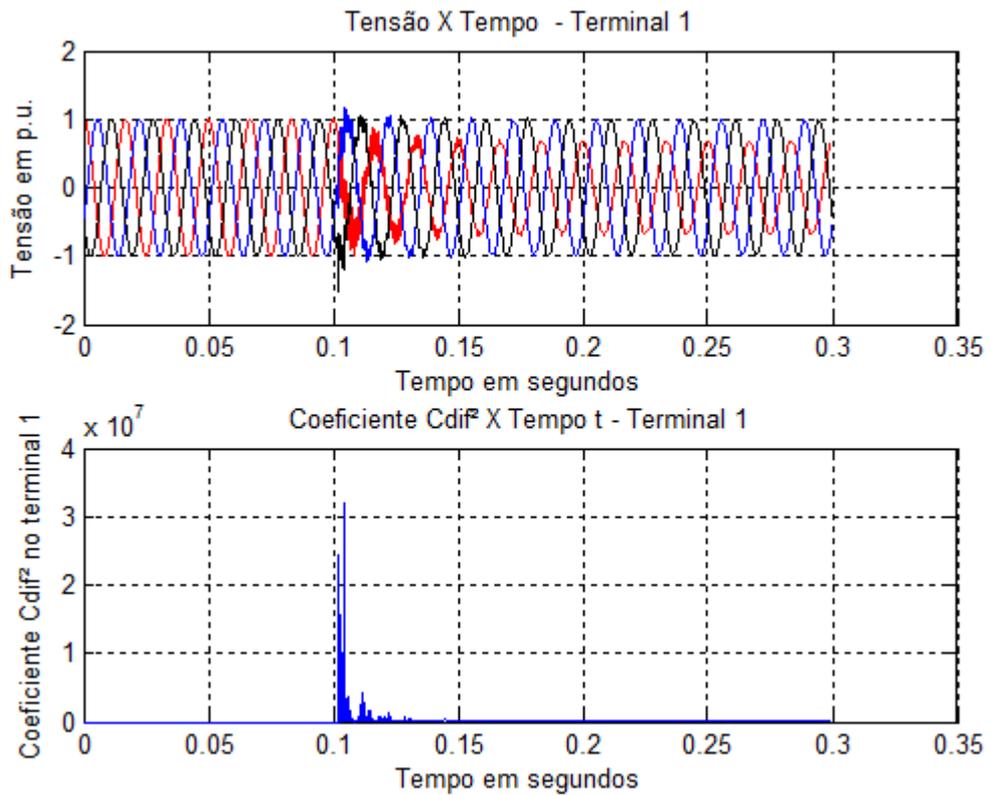


Figura 19: Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 500 kV – Caso 5.

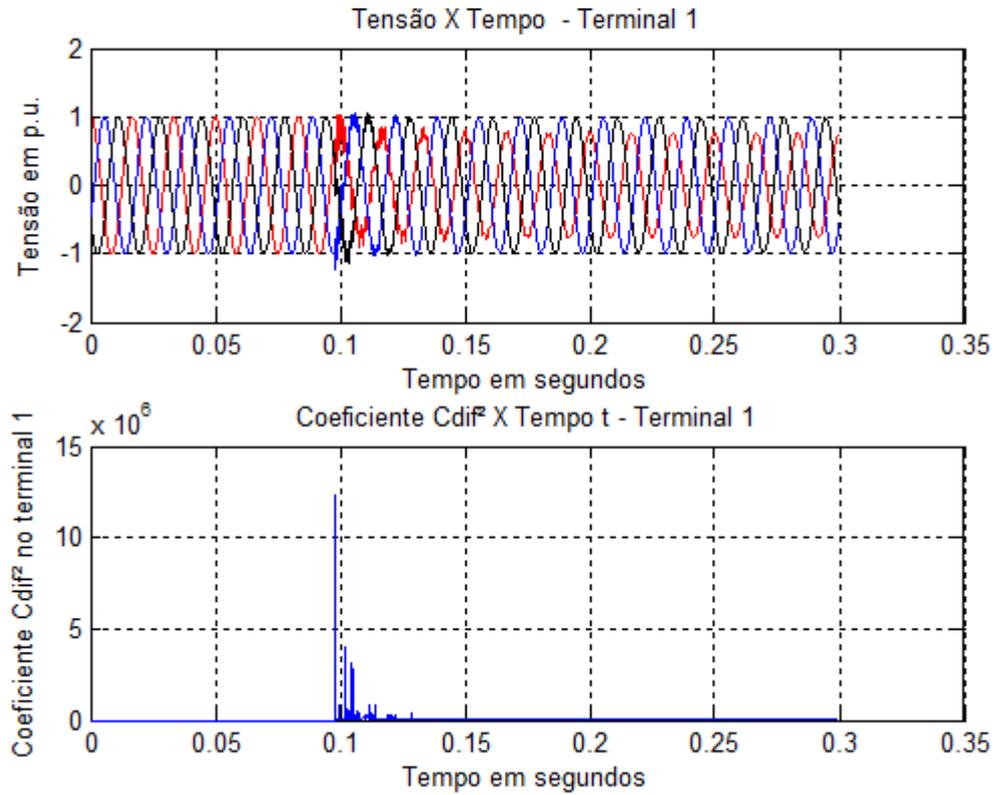


Figura 20: Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 500 kV – Caso 6.

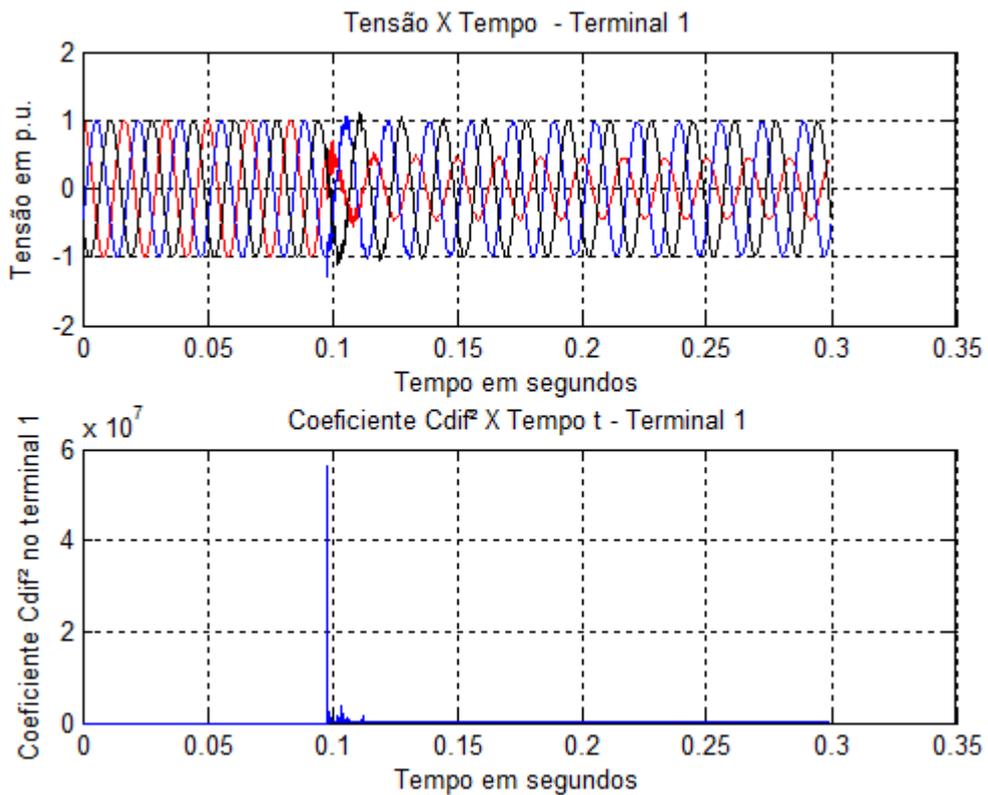


Figura 21: Tensões de fase e do coeficiente $[C_{dif}]^2$ versus o tempo para o sistema de 500 kV – Caso 7.

Observando os gráficos do coeficiente $[C_{dif}]^2$ para o sistema de 500 kV, figuras 15 a 21, verifica-se a robustez na detecção dos distúrbios, uma vez que o coeficiente $[C_{dif}]^2$ tem seu valor da ordem de 10^4 , o que facilita a distinção entre os sinais transitórios e os sinais em regime permanente, mesmo em situações em que a queda de tensão na fase sob falta não é superior a 0,5 p.u.

A tensão na fase em que ocorreu a falta (neste caso, na fase A) teve valores altos mesmo após a falta. Esta situação pode ser justificada, assim como ocorreu no sistema de 230 kV, por problemas no aterramento. As situações mais críticas ocorreram para os casos 1, 2 e 6, onde foram aplicadas resistências de falta maiores e a falta foi aplicada na metade da extensão da linha de transmissão, que foi a maior distância entre o terminal emissor e o local da falta, para todas as situações simuladas. Como explicado na seção anterior, isto ocorre nestes três casos porque a tensão na fase A após a presença do distúrbio será a impedância da linha (do terminal emissor até o local da falta) acrescida da resistência da falta multiplicada pela corrente de falta. Logo, o aumento da impedância na linha ou da resistência de falta irá acarretar na diminuição da queda de tensão na fase sob falta.

6. Conclusões

Neste trabalho de conclusão de curso foi realizada uma revisão bibliográfica sobre a teoria de ondas viajantes em linhas de transmissão (LT) e da Transformada Park (Tdq0). Foram utilizados o ATP (*Alternative Transients Program*) e o MATLAB[®] para realizar as simulações de dois sistemas elétricos de potência, um de 230 kV e outro de 500 kV.

A LT do sistema de 230 kV analisada foi fictícia, possuía 500 km de comprimento e a simulação foi realizada considerando-a perfeitamente transposta. Enquanto que a LT utilizada no sistema de 500 kV foi uma linha pertencente ao sistema CHESF que conecta as subestações Jardim a Camaçari, com 249 km de extensão, e que foi modelada como perfeitamente transposta.

O ATP foi utilizado para modelar e reproduzir as condições dos sistemas elétricos, tanto o sistema de 230 kV, como o de 500 kV. A linguagem MODELS do ATP também foi utilizada, a função desta foi armazenar as informações de tensões em cada terminal da LT de forma a simular os valores que seriam oriundos dos RDP (Registadores Digitais de Perturbações).

Em seguida, os dados que simulavam os sinais dos RDP foram carregados no MATLAB[®]. Então, foi utilizada a transformada Park e foi possível detectar os instantes iniciais dos transitórios eletromagnéticos causados por uma falta monofásica na fase A. Além da obtenção dos instantes iniciais dos transitórios, foram apresentados e analisados gráficos das tensões de fase dos sistemas trifásicos e o coeficiente $[C_{dif}]^2$.

As simulações foram realizadas analisando-se 7 casos, em que foram variados o local da falta, a resistência de falta e o ângulo de incidência da mesma. Observou-se que o parâmetro que mais exerceu influência no coeficiente $[C_{dif}]^2$ foi a resistência de falta. Em situações de maior impedância o coeficiente $[C_{dif}]^2$ teve valores menores, mas mesmo assim ele foi capaz de detectar a ocorrência da falta monofásica na fase A.

É interessante ressaltar a importância de ser detectado o início de transitórios com precisão, pois com o instante inicial da falta e a velocidade de propagação das ondas viajantes no instante da falta, pode-se localizar a falta ao longo de toda a extensão da linha de transmissão.

7. Referências Bibliográficas

ANDERSON, P. M. *Power System Protection*. Piscataway, NJ - USA: IEEE Press Series on Power Engineering, 1999.

ARAÚJO, A. E. A., NEVES W. L. A. *Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia*. Belo Horizonte, MG – Brasil: Editora UFMG, 2005.

COSTA, F. B. *Detecção e Classificação de Falhas em Linhas de Transmissão Baseadas na Transformada Wavelet*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, agosto 2006.

D'AJUZ, A., FONSECA, C. S., CARVALHO, F. M. S., FILHO, J. A., DIAS, L. E. N., PEREIRA, M. P., ESMERALDO, P. C. V., VAISMAN, R., FRONTIN, S. O. *Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamentos - Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão*. Niteroi, Rio de Janeiro: FURNAS, Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987.

DANTAS, K. M. C. *Chaveamento Controlado de Linhas de Transmissão*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, setembro 2007.

FENG, Z., JUN, L., LI, Z., ZHIHAO, Y. “A New Fault Location Method Avoiding Wave Speed and Based on Traveling Waves for EHV Transmission Line”. *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies - DRPT 2008*, Nanjing, China, April 6-9, 2008.

FITZGERALD, A. E., KINGSLEY Jr., C., UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas - 6a edição*. Porto Alegre, RS – Brasil: Editora Bookman, 2006.

LEUVEN EMTP CENTER, *ATP - Alternative Transients Program: Rule Book*. Heverlee, Belgium, July 1987.

LOPES, F. V. *Localização de Falhas em Linhas de Transmissão Baseada em Ondas Viajantes*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, março 2011.

MathWorks[®]. *MATLAB - The Language of Technical Computing*. Disponível: www.mathworks.com. Acesso em: 21 de março de 2011.