



**ESTUDO DA FUNÇÃO DE PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA NO
DOMÍNIO DO TEMPO TD21**

ANA LUIZA CARDOSO DE SOUSA

TRABALHO DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

ESTUDO DA FUNÇÃO DE PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA NO
DOMÍNIO DO TEMPO TD21

ANA LUIZA CARDOSO DE SOUSA

Trabalho final de graduação submetido ao Departamento de Engenharia elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

APROVADO POR:

Prof. D. Sc. Felipe Vigolvino Lopes, UnB/ENE
(Orientador)

Prof. D. Sc. Kleber Melo e Silva, UnB/ENE
(Examinador Interno)

Edson de Assis Custódio (Banco do Brasil)
(Examinador Externo)

Brasília – DF, Junho de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por permitir mais essa conquista em minha vida e ter me dado forças para superar as dificuldades na conclusão desta etapa.

Ao professor, Felipe Lopes, por todo o apoio e sábia orientação na realização deste trabalho.

À Universidade de Brasília por todas as oportunidades proporcionadas a mim, além de inúmeras experiências enriquecedoras.

A toda a minha família, especialmente minha mãe Andreia, por sempre acreditar em mim e me motivar a seguir em frente.

Ao meu namorado Carlos Henrique, pelo companheirismo nos momentos mais difíceis, pelas palavras de incentivo e por toda paciência que foi essencial na etapa final deste trabalho.

A todos os professores que contribuíram para a minha formação profissional e individual.

Aos meus amigos da UnB pelas horas de estudos em grupo que contribuíram fortemente para o meu aprendizado, além das experiências juntos ao longo desta graduação.

Aos amigos da Renova Engenharia, por terem me proporcionado uma experiência de estágio enriquecedora e essencial para a minha formação.

A todos que direta, ou indiretamente, me ajudam a ser uma pessoa melhor a cada dia.

RESUMO

No trabalho que se segue, será apresentada uma função de proteção de distância no domínio do tempo, presente no relé SEL-T400L fabricado pela SEL (*Schweitzer Engineering Laboratories*), chamada *Time Domain 21* (ou TD21). Ela se trata de uma função de proteção de distância baseada na teoria de grandezas incrementais. Serão analisadas as vantagens do uso desta função em comparação à proteção de distância tradicional, baseada em fasores. Uma vez apresentados os fundamentos da TD21, torna-se possível entender as vantagens da função do ponto de vista de tempo de atuação.

Foram feitas simulações de diversos cenários de falta pelo programa ATP (*Alternative Transients Program*) com o objetivo de mostrar a atuação desta função considerando situações realísticas de curto-circuito e assim facilitar a compreensão do funcionamento da TD21. Dos resultados, conclui-se que a função é segura e rápida, promovendo atuações em tempos da ordem de poucos milissegundos.

Palavras-chave: Função de proteção de distância no domínio do tempo; SEL; grandezas incrementais; vantagens; TD21.

ABSTRACT

At the following work, a time domain distance protection function, present in the SEL-T400L relay manufactured by SEL (Schweitzer Engineering Laboratories), called Time Domain 21 (or TD21), will be presented. It is a distance protection function based on incremental quantities. The benefits of using this protection function in real life will be analyzed, compared to the traditional protection, based on phasors. It will be possible to perceive these benefits after a detailed understanding of the TD21, from the concepts that base this function up to its logic of operation, which is what will be seen throughout this document.

Simulations of several fault scenarios were performed by the ATP (Alternative Transients Program) program to show the performance of this function considering realistic short-circuit situations and thus facilitate the understanding of TD21 operation. From the results, it is concluded that the function is safe and fast, promoting performances in the order of a few milliseconds.

Keywords: Time domain distance protection function; SEL; incremental quantities; benefits; TD21.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA E PROBLEMA.....	11
1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO.....	12
1.3 OBJETIVOS	13
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
3.1 FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	18
3.2 PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO E GRANDEZAS INCREMENTAIS	21
3.3 PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.....	23
3.3.1 Fundamentos.....	24
3.3.2 Zonas de Proteção.....	25
3.4 PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA NO DOMÍNIO DO TEMPO.....	26
3.4.1 Loops de Falta e a Corrente Réplica Incremental.....	28
3.4.2 Seleção de Fases e Lógica de Partida	34
4. A FUNÇÃO TD21	36
4.1 PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO	37
4.2 LÓGICAS DE OPERAÇÃO E RESTRIÇÃO.....	41
5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	47
5.1 SISTEMA SIMULADO E PARÂMETROS CONSIDERADOS	47
5.2 SISTEMA COM <i>INFEED</i>	59
6. CONCLUSÕES	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Falta monofásica AT (Benedito 2015).	10
Figura 3.2 Relação entre grandezas de fase e sequência (ZANETTA, 2006)	12
Figura 3.3 Aplicação do princípio da superposição para análise de falta (KASZTENNY, 2016).	13
Figura 3.4 Diagrama R-X (NEPOMUCENO, 2013, apud SEL 2004).	15
Figura 3.5 Princípio da Proteção de distância: Zonas de proteção (ZIEGLER, 2006)	16
Figura 3.6 Diagrama de aquisição de dados simplificado para os algoritmos de proteção baseados em grandezas incrementais e ondas viajantes (SCHWEITZER, 2016)	18
Figura 3.7 Bloco integrador (SCWEITZER, 2016).	19
Figura 3.8 Lógica de identificação de falta e lógica de partida (SEL_T400L DATASHEET p. 49)	27
Figura 4.1 Característica de operação do elemento de subalcance (SCHWEITZER, 2014).....	30
Figura 4.2 Sinal de operação para uma falta dentro da zona de proteção ocorrendo próximo ao valor de tensão de pico (SCHWEITZER, 2014).....	31
Figura 4.3 Esquema de filtro para algoritmos de quantidade incremental (SCHWEITZER, 2015)	31
Figura 4.4 Princípio de operação do elemento de subalcance para zona protegida (a) e além da zona protegida (b) (KASZTENNY, 2016).....	32
Figura 4.5 Esquema para obtenção de V_{21RST} e exemplo de operação (SCHWEITZER, 2015).....	34
Figura 4.6 Lógica de comparação da TD21 (SCHWEITZER, 2015).....	35
Figura 4.7 Tensões de operação (vermelho) e restrição (preto) (acima) e a diferença $V_{21OP} - V_{21RST}$ integrada e comparada à margem de segurança (abaixo). Tempo de atuação de 3,4 ms (SCHWEITZER, 2015 p.10).....	36
Figura 4.8 Forma de onda da corrente réplica incremental e integral da mesma no tempo (SEL-T400L DATASHEET p. 2.23).....	37

Figura 4.9 Princípio de operação do elemento de sobrecorrente (SEL-T400L DATASHEET p. 2.23)	38
Figura 5.1 Sistema simulado no ATP	49
Figura 5.2 Tempo médio de operação do elemento TD21 em função da distância da falta para diferentes valores de SIR (SCHWEITZER, 2015)	50
Figura 5.3 Tempo de atuação para diferentes distâncias de falta	51
Figura 5.4 Resultado da simulação para distância de 0,1 p.u e 0,75 p.u respectivamente	52
Figura 5.5 Falta AT franca com início em 0 grau	53
Figura 5.6 Falta AT franca com início em 90 graus	53
Figura 5.7 Resultado da simulação para ângulo de incidência de 0 grau	54
Figura 5.8 Resultado da simulação para ângulo de incidência de 90 grau	55
Figura 5.9 Resultado da simulação para falta com resistência de 50 Ω a 0,6 p.u de distância	56
Figura 5.10 Resultado da simulação para falta com resistência de 100 Ω a 0,6 p.u de distância	57
Figura 5.11 Resultado da simulação para falta com resistência de 50 Ω a 0,1 p.u de distância	58
Figura 5.12 Resultado da simulação para falta com resistência de 100 Ω a 0,1 p.u de distância	58
Figura 5.13 Tempo de atuação da proteção para carregamentos diferentes	60
Figura 5.14 Sistema com três terminais	61
Figura 5.15 Sistema com <i>infeed</i> (HOROWITZ & PHADKE, 2014)	61
Figura 5.16 Tempo de atuação para diferentes distâncias de falta (sistema com <i>infeed</i>)	64
Figura 5.17 Resultado da simulação para distância de 0,1 p.u e 0,75 p.u respectivamente (sistema com <i>infeed</i>)	64
Figura 5.18 Resultado da simulação para uma falta a 0,6 p.u com resistência igual a 0 Ω (sistema com <i>infeed</i>)	66
Figura 5.19 Resultado da simulação para uma falta a 0,6 p.u com resistência igual a 50 Ω (sistema com <i>infeed</i>)	67

Figura 5.20 Resultado da simulação para uma falta a 0,6 p.u com resistência igual a 100Ω (sistema com <i>infeed</i>)	67
Figura 5.21 Resultado da simulação para uma falta a 0,1 p.u com resistência igual a 0Ω (sistema com <i>infeed</i>)	68
Figura 5.22 Resultado da simulação para uma falta a 0,1 p.u com resistência igual a 50Ω (sistema com <i>infeed</i>)	68
Figura 5.23 Resultado da simulação para uma falta a 0,1 p.u com resistência igual a 100Ω (sistema com <i>infeed</i>)	69
Figura 5.24 Tempo de atuação para diferentes carregamentos (sistema com <i>infeed</i>)	.70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Loop de Tensões e correntes réplica incrementais no domínio do tempo.	34
Tabela 2 Tempo de atuação da proteção para diferentes resistências de falta em 0,6 pu	56
Tabela 3 Tempo de atuação da proteção para diferentes resistências de falta em 0,1 pu.	57
Tabela 4 Tempos de Atuação de sistema com e sem ramificação para diferentes ângulos de incidência.....	65
Tabela 5 Tempo de atuação da proteção para diferentes resistências de falta em 0,6 pu (sistema com <i>infeed</i>)	66
Tabela 6 Tempo de atuação da proteção para diferentes resistências de falta em 0,1 pu	67

1. INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA E PROBLEMA

O Sistema Interligado Nacional, conhecido como SIN, é bastante complexo tendo em vista a sua dimensão e a quantidade de componentes que geralmente necessitam de manutenção e monitoramento contínuo. De maneira geral, este sistema pode ser resumido em três partes: geração, transmissão e distribuição.

O percurso da energia elétrica proveniente da fonte geradora até as unidades consumidoras é feito por meio de linhas de transmissão (LTs), as quais necessitam de uma proteção eficaz tendo em vista o longo caminho que devem percorrer, fazendo com que estas estejam sujeitas a falhas de diversas naturezas, com destaque para os eventos decorrentes de causas naturais. Segundo o ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), são consideradas linhas de transmissão aquelas cujas tensões são 230, 345, 500 kV e acima, compondo à Rede Básica do SIN (MAMEDE FILHO, 2014).

As causas mais frequentes da ocorrência de curtos-circuitos em sistemas de potência são: Descargas atmosféricas, queimadas, vendavais ou similares, queda de árvores sobre linhas aéreas, vandalismo (MAMEDE FILHO, 2014).

Como na maioria das vezes as causas das faltas não podem ser evitadas, é necessário o uso de equipamentos de proteção nos terminais das LTs, como relés de proteção e disjuntores, que atuam na localização de falhas na rede e isolamento automático da linha com defeito, a fim de proteger o sistema como um todo. Desse modo, a proteção de distância é uma função de grande importância para que haja uma distribuição de energia confiável e seletiva para os consumidores, tornando possível a detecção rápida de falhas em linhas de transmissão que podem ser isoladas e reparadas sem que isso sobrecarregue o sistema e prejudique grandes áreas.

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO

Os sistemas de proteção de sistemas elétricos são ajustados para operar o mais rápido possível, porém a atuação coordenada de relés de proteção e disjuntores pode levar à permanência do curto-circuito por alguns ciclos. (ZANETTA JR., 2006).

Na tentativa de melhorar cada vez mais a proteção de distância e ter-se o mínimo de danos possível no sistema elétrico, a busca por dispositivos mais rápidos e eficientes é sempre feita. Uma forma de proteção com essas características que vem sendo estudada é a proteção no domínio do tempo, sendo esta uma aplicação recente, que se trata de diferentes ajustes de relés com funções que operam de forma distinta da proteção de distância tradicional.

Na proteção de sistemas elétricos, cada milésimo de segundo é importante. A eliminação de faltas mais rápida melhora a segurança do público e dos funcionários, amplia as margens de estabilidade do sistema, minimiza o desgaste do equipamento, melhora a qualidade da energia e limita os danos a propriedades. (SEL-T400L DATASHEET).

Para uma proteção de distância eficiente, é preciso que aspectos como confiabilidade, seletividade, coordenação, velocidade, economia e simplicidade sejam simultaneamente satisfeitos da melhor forma possível.

De maneira geral, sistemas de proteção que possuem uma boa seletividade são aqueles capazes de perceber exatamente quando devem ou não atuar, tendo em vista que uma atuação desnecessária pode causar a falta de abastecimento de alguma área ou sobrecarga no sistema como um todo. Da mesma forma que uma não atuação da proteção durante uma falta na linha pode causar um prejuízo de maior proporção para o sistema que poderia ser evitado. Além disso, a característica de confiabilidade é importante para que o relé atue conforme o esperado, diante de uma situação anormal, garantindo assim a estabilidade do sistema. O relé deve ser sensível o suficiente para garantir a detecção de falhas como foi ajustado para fazer. Deve existir uma coordenação entre os relés, já que estes fazem parte de todo um sistema, e não atuarem mais de um por vez quando não houver a necessidade. É importante que o sistema seja o mais veloz possível para que haja o isolamento instantâneo da área com defeito, evitando a instabilidade do sistema. Por fim, é interessante que seja um sistema relativamente simples de ser implementado e de executar manutenção, além de ter um custo razoável para uma boa proteção. (NEPOMUCENO, 2013 apud ANDERSON, 1999).

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo o estudo da função TD21, elemento de distância baseado em grandezas incrementais, disponível no relé SEL-T400L.

Serão analisados diferentes cenários de falta para que seja possível visualizar o modo de operação desta função.

As simulações computacionais foram feitas utilizando as ferramentas *Matlab* e ATP (*Alternative Transients Program*).

Em resumo, os principais objetivos contemplados são:

- Implementação da lógica de operação da TD21.
- Mostrar vantagens da função principalmente quanto à velocidade de atuação.
- Apresentar a influência de alguns fatores na proteção estudada, como distância de falta, ângulo de incidência e resistência de falta.
- Apresentar a influência do efeito do *infeed* para o funcionamento da TD21.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este documento será dividido em cinco seções. A seção 1, já apresentada, contém toda a introdução que envolve a contextualização do tema e relevância do trabalho além dos principais objetivos deste.

- Na seção 2 será descrita uma revisão bibliográfica contendo a evolução dos estudos sobre a proteção de distância.
- Na seção 3, será exposta uma fundamentação teórica a fim de se ter um embasamento para a melhor compreensão da função estudada.
- Na seção 4, analisa-se a função TD21 mostrando a lógica de operação e princípio de funcionamento desta.
- Na seção 5, são apresentadas as simulações computacionais de alguns cenários de falta e os resultados obtidos.
- Na seção 6, são apresentadas as conclusões dos resultados obtidos e considerações finais deste trabalho.
- Ao final do documento, são descritas as referências bibliográficas utilizadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será apresentada uma revisão bibliográfica com a finalidade de constatar o que existe na literatura sobre o tema apresentado seguindo uma sequência cronológica conforme o avanço dos estudos sobre este assunto. O objetivo aqui é mostrar os trabalhos desenvolvidos ao longo dos anos destacando a função de proteção de distância no domínio do tempo, a TD21.

O estudo da proteção de distância teve início ainda na década de 60. No fim dos anos 70, trabalhos com propostas de melhorias na proteção de distância que foram de grande importância para os dias atuais, foram desenvolvidos. (W.C. KOTHEIMER, 1977).

No ano de 1978, Chamia, M. e Liberman, S. já descreviam uma nova forma de proteção de alta velocidade baseada na variação de transientes em LTs de forma a aumentar a velocidade de atuação dos relés de proteção. (CHAMIA & LIBERMAN, 1978)

Alguns conceitos muito utilizados neste trabalho como a ideia do princípio da superposição e grandezas incrementais estão presentes no trabalho de M. Vitins publicado em 1981 (VITINS, 1981), o qual também propõe conceitos para proteção de alta velocidade e para isso baseia-se na detecção da direção da falta e avaliação de variações de valores de tensão e corrente da linha causadas pela ocorrência desta. Assim, de forma semelhante ao trabalho de Chamia e Liberman, também são analisadas variações de transitórios na rede para percepção mais rápida da falta pelo relé visando uma proteção mais eficiente.

Um método de localização de falta utilizando apenas um terminal foi proposto por T. Takagi em 1982. A ideia descrita pelo método é calcular a reatância de uma linha sob falta a partir da medição da distância entre o ponto de medição e a falta, do valor da tensão de um terminal e dos dados de corrente medidos da linha. Este método faz uso dos mesmos conceitos e procedimentos da proteção de distância baseada em fasores, consistindo em uma das técnicas mais difundidas na literatura. Segundo Takagi, por mais que pudesse ser vantajoso usar ambos os terminais da linha para se obter parâmetros e localizar a falta, do ponto de vista prático, é desejável o uso de equipamentos simples, que requeiram dados de apenas um terminal e que sejam robustos à influência da resistência de falta, *infeed*, carregamento, entre outros. Essas mesmas fontes de erro afetam a proteção de distância no domínio da frequência

e no domínio do tempo, sendo ainda assim uma das funções mais importantes nos esquemas de proteção de LTs.

Em 1985, F.Engler também publicou um trabalho sobre detecção da direção de faltas em LTs por relés direcionais de alta velocidade. Contudo, são apresentados algoritmos que garantem uma proteção mais confiável fazendo o uso de grandezas incrementais de forma que a direção da falta é detectada com mais precisão simulando toda sua trajetória a partir de valores de impedância da fonte e da linha, agregando assim o trabalho de Vitins (1981). (F.Engler, 1985). Um problema que poderia atrapalhar a detecção de variação de transitórios na rede eram as componentes de decaimento exponencial que surgem a partir das constantes de tempo do sistema, como por exemplo, a componente CC de decaimento exponencial de corrente. Neste contexto, pode ser citado o trabalho de G. Benmouyal (1995), que apresenta um filtro-passa altas capaz de suprimir a componente de CC de formas de onda de corrente em uma ampla faixa de constantes de tempo como encontradas em sistemas elétricos de potência reais. Esse filtro foi chamado de filtro mímico digital e mesmo que não seja utilizado atualmente em larga escala, foi de grande importância para a estimação de fasores utilizada na proteção no domínio da frequência. (BENMOUYAL, 1995).

Os esquemas de comunicação entre relés ultrarrápidos foram apresentados por Schweitzer (1996). Neste trabalho são descritos alguns esquemas de teleproteção e lógicas de comunicação entre os relés nos terminais da linha, dentre eles o esquema de Transferência de Disparo Direto que atualmente é utilizado pela TD21 quando operando em esquemas de teleproteção.

De forma a melhorar o trabalho de Engler (1985), G. Benmouyal em 2001 propõe um elemento capaz de detectar a fase com falta e a direção simultaneamente baseando-se em grandezas incrementais (G. BENMOUYAL, 2001). É mostrado que isto pode ser realizado através da realização de três produtos escalares entre três pares de fasores de tensão e corrente. Os níveis relativos desses mesmos três produtos escalares também podem ser usados para identificar as fases com falta. Todavia os cálculos são desenvolvidos no domínio da frequência, podendo resultar em atrasos de atuação típicos de aproximadamente um ciclo fundamental.

Em 2012, Zubic desenvolve um algoritmo de proteção de distância baseado em um comparador de fase no domínio do tempo, sendo este mais rápido quando comparado aos algoritmos tradicionais baseados no domínio da frequência. O comparador de fase é baseado

na potência média em uma janela de dados de meio ciclo. Além disso, é utilizado um filtro que elimina o decaimento DC da corrente além de outros transitórios provenientes da operação de TPs, por exemplo. Zubic também mostra a relação existente entre a zona protegida e o SIR que é a razão de impedâncias da fonte e da linha, que também será mencionado neste documento. (S.J. ZUBIC, 2012).

Trabalhos mais recentes, publicados pela Schweitzer em 2014, 2015 e 2016 trouxeram uma abordagem mais detalhada sobre as funções no domínio do tempo, apresentando as funções presentes no relé SEL-T400L bem como seus princípios de funcionamento, tendo como base grandezas incrementais e ondas viajantes. No trabalho de Schweitzer (2014) é recordado primeiramente a implementação da proteção fasorial a título de comparação para em seguida apresentar a proteção no domínio do tempo e suas vantagens. Assim como os trabalhos mais antigos, a ideia inicial do estudo segue pelo princípio da superposição, para em seguida introduzir os conceitos de grandezas incrementais e corrente réplica a fim de diminuir os efeitos da componente CC de decaimento exponencial. São também revisados conceitos de transferência de disparo direto de elementos de subalcançe, que é utilizado pela TD21. (SCHWEITZER, 2014).

Em Schweitzer (2015), já são apresentadas as lógicas de operação das funções TD32 e TD21, que utilizam grandezas incrementais e a TW87 baseada na teoria de ondas viajantes. São mostradas algumas simulações de faltas reais, analisando assim o desempenho de cada função. Ao final do artigo é apresentada uma tabela com os resultados das simulações para faltas em linhas sob as mesmas condições para a proteção fasorial e proteção no domínio do tempo, comparando os tempos de atuação. Os resultados mostram um tempo de atuação consideravelmente menor da TD21 comparando com a proteção 21 no domínio da frequência PH21 a qual chega a um tempo de 20,4 ms para uma falta fase-terra no meio da linha, contra um tempo de atuação de 6,9 ms da TD21, demonstrando a redução de tempo de atuação promovida pela função TD21. (SCHWEITZER, 2015).

No ano de 2016, um artigo publicado pela Schweitzer mostra os princípios e implementação da proteção no domínio do tempo discutindo os novos elementos direcionais e diferenciais baseados nas ondas viajantes e dos elementos de distância de primeira zona e direcionais baseados nas grandezas incrementais. São mostrados resultados de implementações reais detalhadas em uma plataforma de relés de alto desempenho, como o SEL-T400L (SCHWEITZER, 2016). No mesmo ano, Kasztenny (2016) em seu artigo explica

detalhadamente os cálculos para a obtenção das grandezas incrementais e corrente réplica incremental como não havia sido feito anteriormente de tal forma, facilitando ainda mais o entendimento do princípio de operação dessas funções. Ele também introduz e fornece justificativas para as configurações de alguns parâmetros estabelecidos para cada função, como diferentes valores de alcance da proteção a depender do tipo da falta, como no caso da TD21. Também explica as lógicas de operação de forma ainda mais detalhada com maior embasamento, melhorando assim a compreensão sobre o funcionamento dessas funções. (KASZTENNY, 2016).

A TD21, como visto aqui, é uma função de estudo relativamente atual e que ainda não possui uma vasta bibliografia disponível sobre ela. Este documento tem como principal objetivo agrupar as referências e estudos sobre tal função, além de mostrar simulações de sistemas reais para facilitar a compreensão sobre o funcionamento desta. A proteção no domínio do tempo vem conquistando mais espaço a cada ano tendo em vista suas vantagens principalmente em relação à velocidade de atuação, e por isso se faz importante a propagação de estudos e pesquisas sobre este assunto até mesmo para esclarecer qualquer incerteza em relação a ajustes de parâmetros estabelecidos pelo fabricante ou algumas peculiaridades que se aplicam a essas funções especificamente.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção tem como objetivo explicar alguns fundamentos necessários para o melhor entendimento do princípio de operação da função TD21 apresentada neste trabalho. A ideia é que com esses conceitos as análises dos resultados das simulações sejam mais intuitivas

3.1 FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

O fenômeno da falta em sistemas elétricos pode ser caracterizado como a perda do meio básico de isolamento a qual pode ser causada por diversos fatores. Independente da causa, é de grande importância que elas sejam localizadas precisamente e extintas o mais rápido possível. (MAMEDE FILHO, 2014).

Os parâmetros das LTs são praticamente constantes em regime permanente. Elas apresentam pequenas variações decorrentes de fatores relacionados principalmente às condições climáticas e vegetação da região onde a linha encontra-se instalada. (ZANETTA Jr., 2003)

Dessa forma, se houverem modificações relevantes de tais parâmetros podem ser geradas sobretensões, cujas amplitudes dependem das características de operação e de aterramento do SEP em questão (ZANETTA Jr., 2003).

A ocorrência de faltas nos sistemas elétricos muitas vezes podem ocasionar desligamentos não previstos no sistema, resultando em uma repentina mudança de operação. Isso faz com que estas estejam entre os distúrbios mais graves que podem ocorrer em um SEP sendo necessária uma proteção rápida e eficiente para evitar sobrecarregar e comprometer os sistemas adjacentes.

As faltas podem ser de diversos tipos. Entretanto, neste trabalho será analisado principalmente o tipo de falta fase-terra, o qual é mais frequente em sistemas de potência. Segundo Benedito (2015), através de análise estatística dos dados sobre curtos-circuitos, foi constatado que aproximadamente 70% das faltas que se sucedem são desse tipo. Elas ocorrem basicamente quando há contato entre uma fase e a terra.

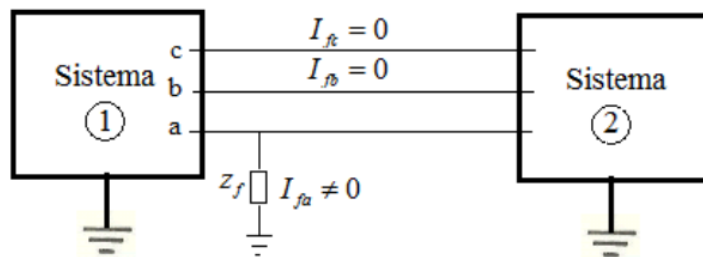


Figura 3.1 - Falta monofásica AT (BENEDITO, 2015)

Em alguns casos pode existir uma resistência no ponto do defeito, chamada resistência de falta. Por outro lado, se esta não existir, o curto-circuito é dito franco, ou seja, não existe resistência entre a falta e a terra. (BENEDITO, 2015).

3.1.1 Componentes Simétricas

No estudo de sistemas elétricos de potência é comum utilizar sistemas equilibrados para análises diversas. Entretanto, sabe-se que os sistemas reais são desequilibrados devido ao desbalanceamento natural das cargas e outros elementos que podem dificultar essas análises (ZANETTA Jr., 2006). Dessa forma, o uso das componentes simétricas vem para avaliar os sinais desequilibrados de curto-circuito em um sistema transposto. Este método, também conhecido como Teorema de Fortescue, consiste em decompor um sistema trifásico de tensões e correntes desequilibrado em três equilibrados, formado por componentes de sequência positiva (1), negativa (2) e zero (0). Sendo o sistema transposto, torna-se possível obter três subsistemas independentes e desacoplados entre si.

As tensões e correntes trifásicas senoidais para um ponto da rede em regime permanente são chamadas componentes de fase.

$$\hat{V}_{abc} = \begin{bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{V}_b \\ \hat{V}_c \end{bmatrix}, \quad \hat{I}_{abc} = \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Pode-se definir, portanto, uma transformação de coordenadas $[\hat{V}_{abc}]$, $[\hat{I}_{abc}]$, para um novo sistema de coordenadas $[V_{012}]$ e $[I_{012}]$, as quais são chamadas de componentes simétricas. A matriz de transformação utilizada em sistemas trifásicos, em regime permanente senoidal, a sequência de fases ABC é dada por: (ZANETTA Jr. 2006)

$$[\hat{V}_{012}] = \frac{1}{3} \cdot [T]^{-1} \cdot [\hat{V}_{abc}] \quad (3.2)$$

Em que,

$$[\hat{V}_{012}] = \begin{bmatrix} \hat{V}_0 \\ \hat{V}_1 \\ \hat{V}_2 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Sendo $\alpha = 1 \angle 120^\circ$. O mesmo vale para \hat{I}_{012} .

Assim, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{V}_b \\ \hat{V}_c \end{bmatrix} = \hat{V}_0 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \hat{V}_1 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha^2 \\ \alpha \end{bmatrix} + \hat{V}_2 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha \\ \alpha^2 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Em que, partindo do princípio que α é um defasador de 120° , analisando (3.5), nota-se que o sistema de sequência zero será formado por três fasores de módulos e fases iguais, o de sequência positiva terá três fasores equilibrados defasados de 120° com a mesma sequência do sistema original (ABC) e o de sequência negativa terá a sequência inversa à original (CBA), também sendo composta por fasores equilibrados.

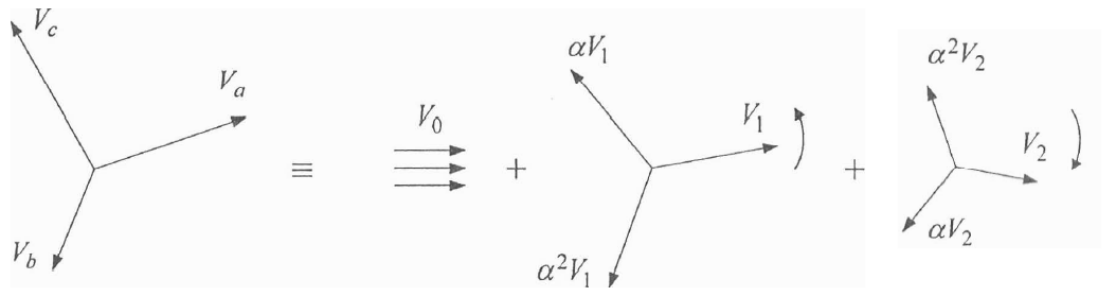


Figura 3.2 - Relação entre grandezas de fase e seqüência (ZANETTA Jr., 2006)

No estudo de faltas é comum fazer o uso deste conceito, sendo possível representar um caso como um modelo equivalente em componentes simétricas para facilitar a resolução do problema.

Em análises de curtos-circuitos envolvendo a terra são consideradas as componentes de seqüência positiva, negativa e zero. Para os casos de faltas entre fases sem a presença do terra, consideram-se apenas as seqüências positiva e negativa. (ZANETTA Jr., 2006).

Esta ideia das componentes de seqüência irá facilitar o entendimento de alguns cálculos mais adiante.

3.2 PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO E GRANDEZAS INCREMENTAIS

O Princípio da Superposição é uma propriedade básica dos sistemas lineares, que pode ser aplicada a circuitos elétricos sempre que seus componentes são lineares. (J.D. Irwin, 2005). O entendimento desta propriedade é importante para compreender o comportamento da função TD21.

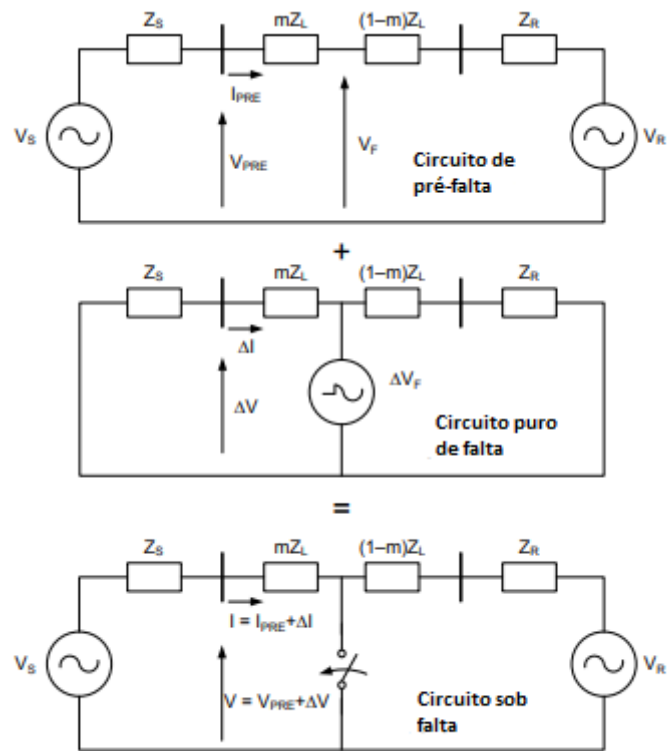


Figura 3.3 - Aplicação do princípio da superposição para análise de falta (KASZTENNY, 2016)

Na ocorrência de uma falta entre dois terminais na rede, é possível usar o princípio de superposição para detectá-la. Para resolver isso devemos analisar separadamente um circuito de pré-falta, para obter as componentes de pré-falta das tensões e correntes, e o circuito puro de falta para obter as componentes dessas tensões e correntes geradas durante a falta. A solução final - tensões e correntes em qualquer ponto do circuito sob falta - é a soma das componentes de pré-falta, isto é, imediatamente antes da falta ocorrer, e componentes geradas durante a falta. (SCHWEITZER, et al, 2014).

Para melhor exemplificar o princípio apresentado, considere o sistema da Figura 3.3. Este é um exemplo de curto-circuito franco (sem resistência de falta). Os valores medidos pelo relé são exatamente as tensões e correntes do circuito sob falta (valores instantâneos). Além disso, os relés também irão medir os valores de pré-falta e comparar com uma amostra atrasada no tempo, contudo, essa amostra é válida apenas por um tempo limitado, tendo em vista o curto período de tempo em que as fontes do sistema permanecem estacionárias. (SCHWEITZER et al, 2014).

As grandezas do circuito puro de falta surgem apenas no momento da falta, sendo nulas antes da falta. A proteção, portanto, deve atuar no período em que essas grandezas surgem. São as chamadas grandezas incrementais, cujo conceito será apresentado a seguir.

A função apresentada neste trabalho é baseada em grandezas incrementais, que dentre outras vantagens permite o uso das grandezas de tensões e correntes instantâneas, evitando assim o atraso inerente da estimação fasorial desses parâmetros, o que torna a função de proteção mais rápida.

As grandezas incrementais são basicamente sinais resultantes das grandezas medidas no momento da falta subtraindo-se os efeitos de pré-falta, como visto anteriormente no princípio da superposição. (ROCHA, 2017). Para esse cálculo utiliza-se a expressão a seguir:

$$\Delta s(t) = s(t) - s(t - p.T) \quad (3.6)$$

Em que s pode ser um sinal de tensão ou corrente.

Na expressão acima, T é o período fundamental, mostrando que a quantidade de períodos resultante da grandeza $\Delta s(t)$ (tensão ou corrente incremental) irá depender do valor da constante p , visto que após a subtração, o que sobra é a parte referente ao distúrbio. Assim, é possível saber a duração dessa grandeza incremental e a proteção deve atuar nesse intervalo. Então, o valor de p a ser utilizado na aplicação desejada para a grandeza incremental, isto é, para que se possa utilizar os valores de grandeza incremental por dois ciclos, deve-se utilizar um valor de p que seja maior ou igual a 2, por exemplo, $p=3$. (SCHWEITZER *et al*, 2014)

Mais à frente, este conceito será retomado aplicado à função TD21.

3.3 PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Nesta seção será visto brevemente o funcionamento da proteção de distância no domínio da frequência, que é a mais utilizada nos sistemas de energia elétrica atualmente,

com o intuito de fazer uma comparação, posteriormente, com a proteção no domínio do tempo, mostrando as principais vantagens da segunda em termos de tempo de atuação. Além disso, serão conceitos importantes para facilitar o entendimento da proteção no domínio do tempo e fazer esta comparação.

3.3.1 Fundamentos

A proteção de distância tradicional é baseada na estimativa de impedâncias calculadas pelos relés, localizados nos terminais das LTs, a partir dos valores de corrente e tensão medidos pelos transformadores de corrente (TCs) e transformadores de potencial (TPs), respectivamente. (NEPOMUCENO, 2013). Normalmente, o relé de proteção é ajustado com uma zona de atuação, sendo, portanto, identificada uma falta quando a impedância medida fica dentro desta zona. Essa distinção é possível fazendo a comparação das condições durante a falta com as condições para os limites da zona protegida.

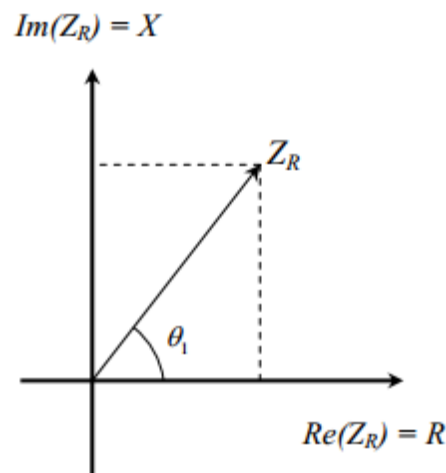


Figura 3.4 - Diagrama R-X (SEL, 2004)

Esta zona protegida ajustada é dada em um percentual da impedância da linha, e a partir de um diagrama R-X, que é um plano de coordenadas em que a parte real da impedância está representada no eixo das abscissas e a parte imaginária, no eixo das ordenadas, como representado na Figura 3.4. (SEL 2004).

3.3.2 Zonas de Proteção

De forma geral, na proteção de distância mais usual existe o conceito de zonas de proteção. Trata-se de dividir regiões que deverão ser protegidas por um mesmo relé, porém quanto maior for a distância entre a falta e o relé, maior será o tempo de atuação (ZIEGLER, 2006). Normalmente, segundo ZIEGLER, 2006, são divididas duas zonas da seguinte forma:

- 1ª Zona: 80% da linha principal – A proteção atua instantaneamente.
- 2ª Zona: 100% da linha principal mais 50% da menor linha à jusante – A proteção possui um atraso de aproximadamente 0,3 segundos no seu tempo de atuação..

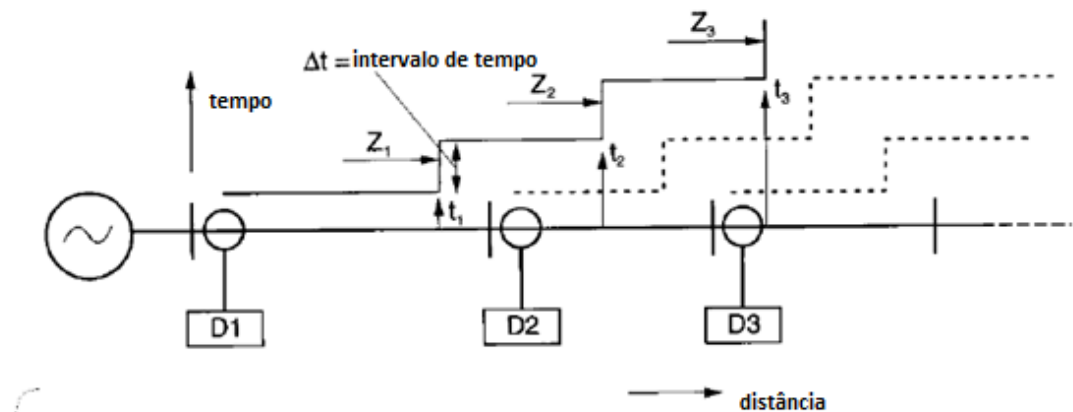


Figura 3.5 - Princípio da proteção de distância: Zonas de proteção (ZIEGLER, 2006)

Isso significa que se existir uma falta a uma distância de até 80% da linha em que o relé se encontra, ou seja, na primeira zona, a proteção deverá atuar o mais rapidamente possível emitindo comandos de abertura dos disjuntores associados de forma instantânea. Na segunda zona, a atuação da proteção será um pouco mais atrasada. Com isso, caso haja alguma falha na atuação da proteção de primeira zona de uma linha adjacente, ainda se pode contar com a segunda zona da linha principal, mesmo que não atue instantaneamente, a falta poderá ser isolada até que se resolva o problema, evitando assim a sobrecarga e estresse do sistema como um todo. (NEPOMUCENO, 2013) Assim, as zonas secundárias irá cobrir uma área maior principalmente para esses tipos de situações.

A Figura 3.5 mostra exatamente essa relação de tempo e distância da falta e a delimitação aproximada das zonas de proteção.

Vale ressaltar ainda que em alguns casos também é considerada uma quarta zona de proteção chamada Zona Reversa. (NEPOMUCENO, 2013) Esta zona irá abranger uma região que está atrás do ponto de medição, com o objetivo de aumentar a seletividade da proteção e evitar desligamentos desnecessários.

3.4 PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA NO DOMÍNIO DO TEMPO

A TD21 surgiu como uma alternativa à proteção 21 tradicional para acelerar o processo de identificação de faltas em situações de curtos-circuitos mais adversos. A proteção no domínio do tempo estudada nesse trabalho é baseada em grandezas incrementais instantâneas e, portanto, elimina os atrasos intrínsecos do processo de estimação fasorial. Para tanto, utilizam-se elevadas taxas de amostragem, armazenamentos de dados, processadores modernos e recursos de comunicação das novas plataformas de hardware dos relés permitindo o processamento em tempo real de um grande número de amostras coletadas do sistema, sem perda de confiabilidade. (SCHWEITZER, 2016).

O princípio básico de operação da proteção no domínio do tempo é diferente da proteção de distância tradicional, explicado anteriormente. Por ser baseado em grandezas incrementais, utiliza-se apenas uma zona de proteção, equivalente a zona 1 para atuações instantâneas.

O diagrama da Figura 3.6 mostra o processo simplificado de aquisição dos algoritmos das grandezas incrementais.

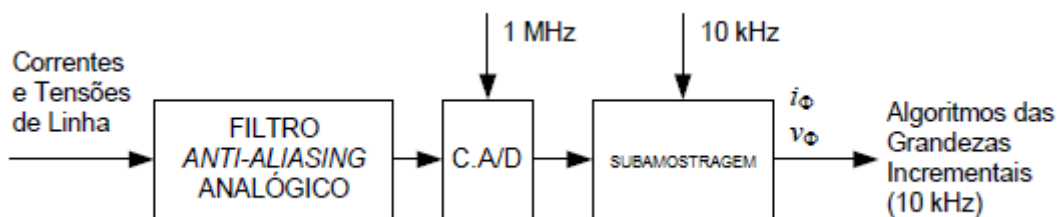


Figura 3.6 – Diagrama de aquisição de dados simplificado para os algoritmos de proteção baseados em grandezas incrementais (SCHWEITZER, 2016).

As tensões e correntes da linha também são obtidas pelos TCs e TPs. Essas grandezas medidas passam pelo filtro anti-aliasing, que tem como finalidade evitar a sobreposição dos espectros analisados. Em seguida, os sinais são convertidos de analógicos para digitais, através do conversor A/D com frequência de 1 MHz. Como os algoritmos baseados em grandezas incrementais não requerem uma taxa de amostragem tão alta, é feito ainda um processo de subamostragem dos sinais que foram digitalizados a 1 MHz em uma frequência de 10 kHz, conforme representado na Figura 3.6.

Um elemento importante que está presente no princípio de funcionamento da proteção no domínio do tempo é o bloco integrador, que permite adicionar ou acumular valores de entrada. Ele possui entradas de controle que determinarão se ele será ativado ou não, dependendo dos valores de entrada. Isso poderá ser mais bem compreendido posteriormente na seção sobre o princípio de operação da TD21.

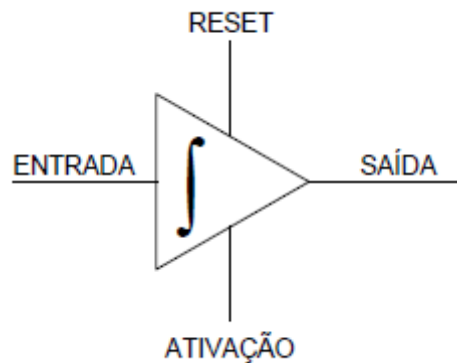


Figura 3.7 - Bloco integrador (SCHWEITZER, 2016)

Um integrador poderia ser visto como um equivalente a um estimador de fasor dos relés baseados em fasores, pois suaviza as oscilações dos sinais analisados. Entretanto, integrar um sinal que se desenvolve a partir do zero não reduz a velocidade das decisões baseadas no sinal integrado, garantindo atuações mais rápidas de forma mais segura do ponto de vista da influência de possíveis oscilações espúrias que venham a surgir nos sinais avaliados. (SCHWEITZER, 2016).

3.4.1 Loops de Falta e a Corrente Réplica Incremental

O princípio de funcionamento da proteção de distância baseia-se no cálculo das impedâncias dos *loops* monitorados entre as fases e entre as fases e o retorno por terra, desta forma o IED (Dispositivo Eletrônico Inteligente) identifica quais as fases em curto-circuito e realiza a tomada de decisão de envio de sinal de disparo (*trip*) aos disjuntores de manobra da LT, havendo a possibilidade de abertura monopolar para faltas fase-terra e abertura tripolar para todos os tipos de faltas. (MASCHER, L.J.D).

Em um sistema trifásico equilibrado, podem ocorrer até 10 tipos distintos de faltas: uma trifásica, três bifásicas, três bifásicas envolvendo a terra e três monofásicas. (ROBERTS & GUZMAN, 1993).

Existem seis loops de falta, que são as unidades de medição que representam adequadamente as fases envolvidas no defeito, dependendo do tipo de falta (fase-fase, fase-terra).

Quando se tratam de faltas fase-terra, que podem envolver uma ou mais fases com a terra, as unidades de impedância em relés de distância tradicionais serão: ZAT (fase A), ZBT (fase B) e ZCT (fase C). Para as faltas entre fases que não envolvem a terra, as unidades de impedância são: ZAB, ZBC e ZCA as quais envolvem respectivamente as fases A e B, B e C, C e A.

Os loops de falta são obtidos da seguinte forma:

$$Z_{AT} = \frac{\hat{V}_A}{\hat{I}_A + k_0 \cdot \hat{I}_{R0}} \quad (3.7)$$

$$Z_{BT} = \frac{\hat{V}_B}{\hat{I}_B + k_0 \cdot \hat{I}_{R0}} \quad (3.8)$$

$$Z_{CT} = \frac{\hat{V}_C}{\hat{I}_C + k_0 \cdot \hat{I}_{R0}} \quad (3.9)$$

$$Z_{AB} = \frac{\hat{V}_A - \hat{V}_B}{\hat{I}_A - \hat{I}_B} \quad (3.10)$$

$$Z_{BC} = \frac{\hat{V}_B - \hat{V}_C}{\hat{I}_B - \hat{I}_C} \quad (3.11)$$

$$Z_{CA} = \frac{\hat{V}_C - \hat{V}_A}{\hat{I}_C - \hat{I}_A} \quad (3.12)$$

Em que, \hat{I}_R é o somatório de $\hat{I}_A + \hat{I}_B + \hat{I}_C = 3\hat{I}_0$. E $k_0 = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{3Z_{L1}}$, em que Z_{L0} é a impedância de sequência zero da LT, e Z_{L1} é a impedância de sequência positiva.

Podemos resolver os valores da rede de faltas no domínio da frequência ou no domínio do tempo. Para acelerar a proteção oferecida pelo relé, deseja-se resolver os valores da rede de faltas no domínio do tempo. No entanto, no domínio do tempo, as relações tensão-corrente são governadas por equações diferentes das utilizadas na versão fasorial, muito embora se baseiem nos mesmos fundamentos. A solução para esse desafio é o uso da corrente réplica, que efetivamente transforma uma rede de RL em uma rede somente de resistência equivalente (KASZTENNY, 2016).

Considere a Figura 3.3 que mostra o princípio da superposição. Como visto anteriormente, o circuito puro de falta faz o uso de grandezas incrementais. No terminal local, onde está localizado o relé, as tensões e correntes incrementais são relacionadas por uma equação de queda de tensão (3.13) considerando R_F e L_F a resistência e a indutância da fonte, respectivamente.

$$\Delta v = -(R_F \cdot \Delta i + L_F \cdot \frac{d}{dt} \cdot \Delta i) \quad (3.13)$$

Para simplificar, pode-se dividir e multiplicar tudo pela impedância da fonte Z_F :

$$\Delta v = -|Z_F| \cdot \left(\frac{R_F}{|Z_F|} \cdot \Delta i + \frac{L_F}{|Z_F|} \cdot \frac{d}{dt} \Delta i \right) \quad (3.14)$$

Em (3.14) é possível observar um sinal de corrente composto pela corrente incremental instantânea e sua derivada, podendo assim definir este sinal de corrente como:

$$\Delta i_Z = \frac{R_F}{|Z_F|} \cdot \Delta i + \frac{L_F}{|Z_F|} \cdot \frac{d}{dt} \Delta i = D_0 \cdot \Delta i + D_1 \cdot \frac{d}{dt} \Delta i \quad (3.15)$$

Em que,

$$D_0 = \frac{R_F}{|Z_F|} \text{ e } D_1 = \frac{L_F}{|Z_F|}.$$

Com isso, vale a relação:

$$\Delta v = -|Z_F| \cdot \Delta i_Z \quad (3.16)$$

A corrente Δi_Z chama-se corrente réplica incremental, a qual representa uma soma da queda de tensão provocada por Δi na resistência e indutância do circuito equivalente RL. As constantes D_1 e D_0 estão relacionadas às grandezas da fonte, que podem ser ajustadas para que se tenha um ganho unitário na frequência nominal do sistema. Como a corrente réplica representa uma queda de tensão, o atraso desta em relação à tensão do sistema é reduzido significativamente e assim tem-se uma corrente em fase com a tensão. Pode-se dizer que a corrente réplica incremental atua como um filtro mímico que dispensa a componente CC de decaimento exponencial presente em circuitos indutivos.

Podemos então escrever a corrente réplica (3.15) de uma forma mais genérica, como mostrado em (3.17).

$$\Delta i_Z = f_{IZ} (\Delta i \cdot R_F \cdot L_F) = D_0 (R_F \cdot L_F) \cdot \Delta i + D_1 (R_F \cdot L_F) \cdot \frac{d}{dt} \Delta i \quad (3.17)$$

Para entender como serão calculados os loops de falta da função TD21, transformar-se-á a corrente replica incremental do domínio do tempo para a frequência. Assim a transformada de Laplace será aplicada:

$$\Delta I_Z = \frac{R_F}{|Z_F|} \cdot \Delta I + \frac{j\omega L_F}{|Z_F|} \cdot \Delta I = \frac{|Z_F| \angle Z_F}{|Z_F|} \cdot \Delta I = \Delta I \angle Z_F \quad (3.18)$$

Normalmente os relés são projetados com loops de correntes e tensões específicas de forma que a impedância aparente medida, a partir das grandezas de falta, seja exatamente a impedância de sequência positiva. No caso da proteção no domínio do tempo, conforme visto em (3.16), a tensão incremental está relacionada à corrente réplica incremental por meio da magnitude da impedância de sequência positiva da fonte. Ela representa uma queda de tensão através do circuito RL. Assim, para uma falta AT, a tensão no ponto de medição é dada por (3.19).

$$\hat{V}_A = Z_{1L} \cdot \hat{I}_1 + Z_{1L} \cdot \hat{I}_2 + Z_{0L} \cdot \hat{I}_0 \quad (3.19)$$

Em que Z_{1L} e Z_{0L} são impedâncias de sequência positiva e zero da linha respectivamente.

Somando e subtraindo o termo $(Z_{1L} \cdot \hat{I}_0)$ em (3.19), obtém se

$$\hat{V}_A = Z_{1L} \cdot \hat{I}_A - (Z_{1L} - Z_{0L}) \cdot \hat{I}_0 = Z_{1L} \cdot [\hat{I}_A - \left(1 - \frac{Z_{0L}}{Z_{1L}}\right) \cdot \hat{I}_0] \quad (3.20)$$

A fim de obter o loop da corrente réplica, I_{zat} , a partir do loop de corrente I_A os termos de fase das impedâncias serão associados às correntes da seguinte forma:

$$\hat{V}_A = |Z_{1L}| \cdot [\hat{I}_A \angle Z_{1L} - \left(1 - \frac{Z_{0L}}{Z_{1L}}\right) \cdot \hat{I}_0 \angle Z_{1L}] \quad (3.21)$$

Em que,

$$\hat{I}_A \angle Z_{1L} - \left(1 - \frac{Z_{0L}}{Z_{1L}}\right) \cdot \hat{I}_0 \angle Z_{1L} = \hat{I}_{ZAT} \quad (3.22)$$

Então

$$\hat{V}_A = |Z_{1L}| \cdot \hat{I}_{ZAT} \quad (3.23)$$

Por fim, podemos definir uma relação para \hat{I}_{ZAT} em função das magnitudes e ângulos das impedâncias Z_1 e Z_0 :

$$\hat{V}_{ZAT} = \hat{I}_A \angle Z_{1L} - \hat{I}_0 \left(1 \angle Z_{1L} - \frac{|Z_{0L}|}{|Z_{1L}|} \angle Z_{0L}\right) \quad (3.24)$$

Assim, no domínio do tempo será:

$$i_{zat} = f_{IZ}(i_a, R_{1L}, L_{1L}) - \left[f_{IZ}(i_0, R_{1L}, L_{1L}) - \frac{|Z_{0L}|}{|Z_{1L}|} \cdot f_{IZ}(i_0, R_{0L}, L_{0L}) \right] \quad (3.25)$$

E para obter a corrente réplica incremental Δi_{zat} , basta substituir em (3.25) as correntes i pela incremental Δi da rede de falta.

No caso de uma falta envolvendo duas fases, por exemplo B e C, partindo do princípio da Lei de Kirchoff das Tensões (LKT), será definido um loop de tensão entre o relé e o ponto de falta, resultando em:

$$\hat{V}_1 - \hat{V}_2 = Z_{1L} \cdot \hat{I}_1 - Z_{2L} \cdot \hat{I}_2 \quad (3.26)$$

Como a falta é entre B e C e sabendo que $V_{BC} = V_B - V_C$, e ainda relacionando as grandezas de fase e sequência a partir de (3.26), obtemos (3.27).

$$\hat{V}_{BC} = Z_{1L} \cdot \hat{I}_{BC} \quad (3.27)$$

Novamente para obter uma relação para a corrente réplica, serão relacionadas as fases das impedâncias às correntes. Então

$$\hat{V}_{BC} = |Z_{1L}| \cdot \hat{I}_{BC} \angle Z_{1L} \quad (3.28)$$

Em que o termo $(\hat{I}_{BC} \angle Z_{1L})$ é a corrente réplica \hat{I}_{ZBC} . Assim,

$$\hat{V}_{BC} = |Z_{1L}| \cdot \hat{I}_{ZBC} \quad (3.29)$$

Voltando para o domínio do tempo, a corrente réplica será:

$$i_{zbc} = f_{iz}(i_b, R_{1L}, L_{1L}) - f_{iz}(i_c, R_{1L}, L_{1L}) \quad (3.30)$$

Para obter a corrente réplica incremental Δi_{ZBC} basta substituir em (3.30) as grandezas i_B e i_C pelas grandezas incrementais Δi_B e Δi_C .

Após apresentadas as relações para loops de tensões e correntes incrementais, pode-se definir os seguintes sinais como base para todos os loops de grandezas incrementais de fase e terra no domínio do tempo a partir de (3.30).

$$\Delta i_0 = \frac{1}{3} (\Delta i_a + \Delta i_b + \Delta i_c) \quad (3.31)$$

$$\Delta i_{z0} = f_{iz}(\Delta i_0, R_{1L}, L_{1L}) - \frac{|Z_{0L}|}{|Z_{1L}|} \cdot f_{iz}(\Delta i_0, R_{0L}, L_{0L}) \quad (3.32)$$

$$\Delta i_{za} = f_{iz}(\Delta i_a, R_{1L}, L_{1L}) \quad (3.33)$$

$$\Delta i_{zb} = f_{iz}(\Delta i_b, R_{1L}, L_{1L}) \quad (3.34)$$

$$\Delta i_{zc} = f_{iz}(\Delta i_c, R_{1L}, L_{1L}) \quad (3.35)$$

Loop	Tensão, Δv	Corrente Réplica, Δi_z
ΔAT	Δv_A	$\Delta i_{ZA} - \Delta i_{Z0}$
ΔBT	Δv_B	$\Delta i_{ZB} - \Delta i_{Z0}$
ΔCT	Δv_C	$\Delta i_{ZC} - \Delta i_{Z0}$
ΔAB	$\Delta v_A - \Delta v_B$	$\Delta i_{ZA} - \Delta i_{ZB}$
ΔBC	$\Delta v_B - \Delta v_C$	$\Delta i_{ZB} - \Delta i_{ZC}$
ΔCA	$\Delta v_C - \Delta v_A$	$\Delta i_{ZC} - \Delta i_{ZA}$

Tabela 1 – Loop de Tensões e correntes réplica incrementais no domínio do tempo (KASZTENNY,2016)

3.4.2 Seleção de Fases e Lógica de Partida

Os cálculos descritos na Tabela 1 são executados em grandezas de loop e somente a saída do loop correto (para um determinado tipo de falta) deve ser analisada. Como regra, as fases com falta possuem as maiores quantidades incrementais de tensão e corrente réplica. Uma comparação simples entre grandezas incrementais permite a seleção das fases com falta. (SCHWEITZER, 2014). Este conceito será melhor compreendido na seção referente ao princípio de operação da TD21.

O SEL-T400L combina uma lógica de identificação do tipo de falta com uma lógica de partida não direcional. Essas lógicas determinam qual dos seis loops de medição de proteção deve ser avaliado e libera os elementos de proteção associados a esse loop impedindo que os elementos de proteção realizem medições nos loops que não estão envolvidos na falta. A função secundária da lógica de partida é ativar a lógica de proteção somente durante eventos (incluindo faltas) e evitar medições em pequenos sinais incrementais durante condições de estado estacionário e condições próximas de estado estacionário. (SEL T400-L DATA SHEET)

A lógica combinada de partida e identificação de falta é baseada em tensões incrementais em seis loops de medição. Ela calcula tensões incrementais a certa distância do

relé usando as tensões e correntes do ponto de medição e os dados da linha RL. Para que os elementos incrementais de proteção sejam ativados, a alteração nessas tensões incrementais calculadas deve ser maior que um valor mínimo selecionado de fábrica (Δv_{START}), de acordo com (3.36). Ao comparar as mudanças de tensão em todos os seis loops de medição, o relé identifica o tipo de falta. Na Figura 3.8 é possível visualizar a lógica de identificação de falta e a lógica de partida. Este conceito será importante para entender a lógica de operação da TD21 mais à frente. (SEL-T400L DATASHEET P.49).

$$|\Delta v| + Z_x \cdot |\Delta i_z| > \Delta v_{START} \quad (3.36)$$

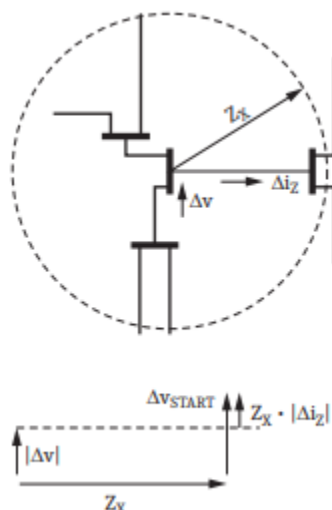


Figura 3.8 - Lógica de identificação de falta e lógica de partida (SEL T400-L DATA SHEET p. 49)

O princípio de operação da TD21 será aprofundado mais adiante, contudo, de antemão, podemos dizer que esta é uma função de distância aplicada no domínio do tempo que pode atuar utilizando relés individuais nos terminais das LTs ou associados por teleproteção de transferência de disparo direto por subalcançe (DTT), visto que se tratam de elementos de subalcançe.

4. A FUNÇÃO TD21

Nesta seção será apresentada a função de estudo deste trabalho descrevendo o seu princípio de operação e lógicas utilizadas por esta, tendo como base os conceitos vistos até então.

Diferentemente da proteção baseada em fasores, a TD21 não utiliza três zonas de proteção, nem mesmo estima impedância entre o ponto de medição e a falta. A TD21 se baseia na comparação de uma tensão de operação (V_{op}) e uma tensão de restrição (V_{RST}) para determinar a localização da falta e atua simplesmente quando a falta encontra-se dentro do alcance para o qual ela foi ajustada. (SCHWEITZER, 2015).

O alcance da função normalmente é ajustado com valores diferentes dependendo se a falta envolve ou não a terra. Isso porque este alcance deve estar antes do barramento remoto com uma margem de segurança capaz de considerar erros de medição de TCs e TPs, dados de impedância da linha, etc. Além disso, é levado em conta que os dados de impedância de sequência zero são menos precisos do que os de sequência positiva, por isso é aplicada uma margem maior de segurança ao definir o alcance da proteção envolvendo a terra. Assim, considerando todos os possíveis erros, o fabricante recomenda que o ajuste de alcance seja 0,7 pu da impedância total da linha quando a falta envolve a terra (TD21MG), e 0,75 pu quando a falta é entre fases (TD21MP). (KASZTENNY, 2016).

A proteção por meio desta função pode ser efetuada utilizando relés individuais nos terminais da LTs ou por teleproteção no esquema de transferência de disparo direto (DTT). A teleproteção é um método de proteção de linha, através de relés de proteção e meios de comunicação, no qual um defeito interno é detectado e determinado comparando-se as condições do sistema nos terminais do circuito protegido, utilizando canais de comunicação. (SCHWEITZER, 2015).

4.1 PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO

É possível realizar o esquema de proteção de disparo direto sem comunicação entre os relés com a função TD21. Para isso, iremos considerar a Figura 3.3 que mostra a relação entre os circuitos de pré-falta e puro de falta a partir do princípio da superposição. Do circuito puro de falta pode-se obter (SCHWEITZER,2014):

$$\Delta v - m \cdot |Z_L| \cdot \Delta i_z = \Delta v_F \quad (4.1)$$

Em que Δv_F é a tensão do circuito sob falta menos a tensão de pré-falta (princípio da superposição). A equação 4.1 está relacionada ao circuito puro de falta da Figura 3.3, onde Δv é a tensão incremental no terminal local, m é a distância entre o ponto de medição e a falta, Z_L é a impedância da linha e Δi_z é a corrente réplica incremental.

Como na TD21 é ajustado um ponto de alcance para que a proteção atue, chamado m_0 , de modo que deseja-se que a proteção atue para faltas até este ponto m_0 e não atue para faltas após o mesmo, lembrando que este ponto deve estar antes do terminal remoto. Assim, considerando o pior caso, um curto-circuito franco, a tensão Δv_F seria a própria tensão do sistema (V_{sis}) mais alguma margem k_0 (por segurança). Dessa forma, a proteção deverá atuar sempre que:

$$|\Delta v_F| > k_0 \cdot V_{SIS} \quad (4.2)$$

K_0 pode ser um valor um pouco maior que 1, para dar uma margem um pouco acima de V_{sis} . Por exemplo, $k_0 = 1,1$.

Substituindo o Δv_F obtemos $|\Delta v - m_0 \cdot |Z_L| \cdot \Delta i_z| > k_0 \cdot V_{SIS}$ (4.3)

Para obter uma resposta do elemento de subalcançe para diferentes condições de sistema iremos dividir (4.3) por m_0 , obtendo a seguinte relação:

$$\left| \frac{\Delta v}{m_0} - |Z_L| \cdot \Delta i_z \right| > \frac{k_0 \cdot V_{SIS}}{m_0} \quad (4.4)$$

Além disso, em seções anteriores foi mostrado que a tensão incremental está relacionada com a corrente réplica incremental pela relação $\Delta v = -|Z_f| \cdot \Delta i_z$.

Que também pode ser escrita como

$$-\frac{|Z_F|}{|Z_L|} \cdot |Z_L| \cdot \Delta i_Z \quad (4.5)$$

Sendo $\frac{|Z_F|}{|Z_L|}$ a relação entre a impedância da fonte e a impedância da LT, chamada SIR (source-to-line impedance ratio). Com isso, é possível visualizar a característica de operação do elemento de subalcançe no plano $|Z_L|\Delta i_Z$ em função de Δv .

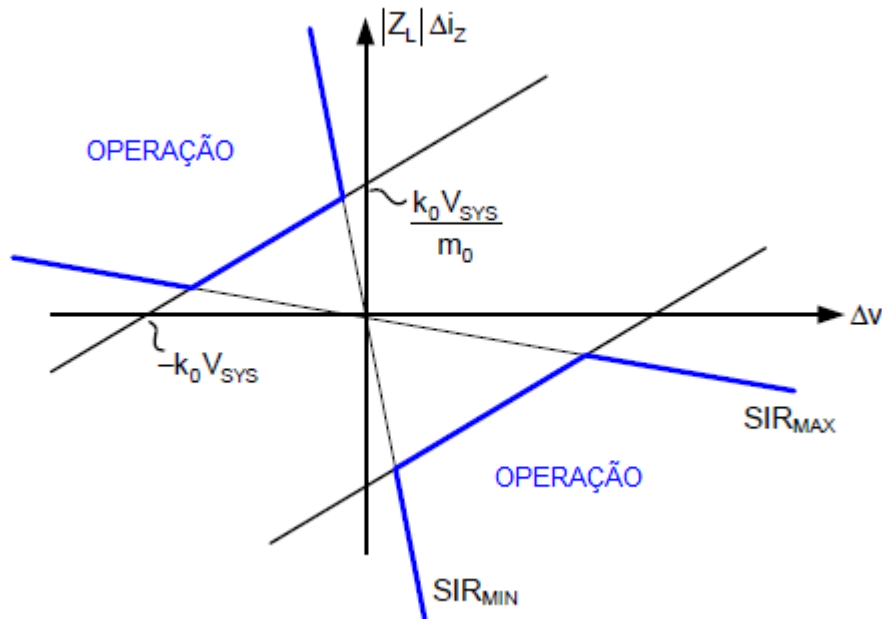


Figura 4.1 - Característica de operação do elemento de subalcançe (SCHWEITZER, 2014)

A tensão no ponto de falta possui uma variação brusca durante a falta, como pode ser percebido na Figura 4.2. Isso se deve ao valor de $|\Delta_{VF}|$ nos primeiros instantes da falta. Com isso, o tempo de atuação será menor quão maior for a perturbação no sistema causando um pico na onda de tensão, mostrado no gráfico a partir da equação (4.3).

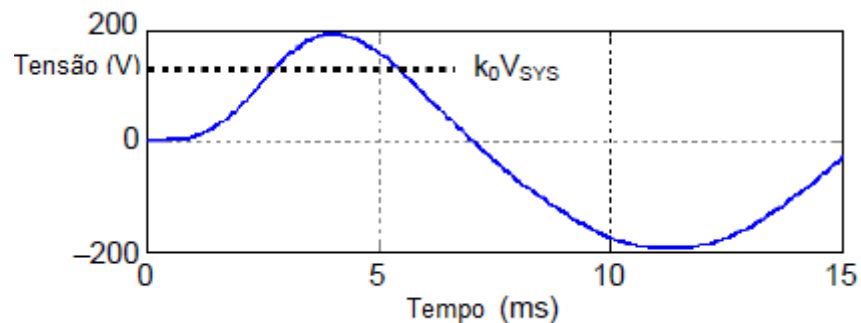


Figura 4.2 - sinal de operação para uma falta dentro da zona de proteção ocorrendo próximo ao valor da tensão de pico (SCHWEITZER, 2014)

O aumento inicial do valor da tensão de pico é diminuído pelo filtro passa-baixas que deve ser usado para as tensões de entrada e correntes, a fim de utilizar o método de proteção com base no modelo RL. Mudando a frequência de corte desse filtro, é possível selecionar uma faixa de frequência desejada e ajustar os sinais de tensão que irão ser considerados. (SCHWEITZER, 2014).

O filtro passa baixas com frequência de corte de algumas centenas de hertz é utilizado para que o sistema com a linha protegida possa ser representado por um circuito equivalente RL. O diagrama de blocos da Figura 3.6 mostra de forma simplificada os passos para a obtenção dos algoritmos de grandezas incrementais as quais baseiam a operação da função.

Na Figura 4.3 é representado o esquema de obtenção dos elementos de proteção baseados em grandezas incrementais (corrente incremental e corrente réplica incremental). A ideia é análoga para sinais de tensão exceto a parte dos valores de réplica.

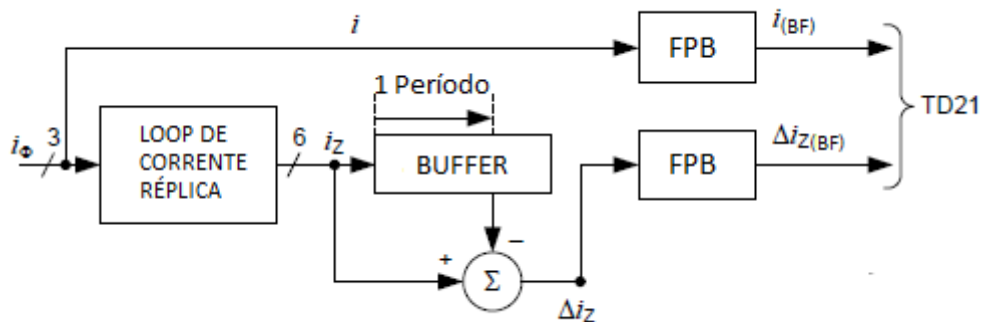


Figura 4.3 - Esquema de filtro para algoritmos de quantidade incremental (SCHWEITZER, 2015)

A partir das correntes de linha são calculados seis loops de corrente réplica i_z (três fase-fase e três fase-terra), levando em consideração a característica RL da linha protegida. Desses valores de loop é subtraído um período no BUFFER-1 e depois utilizado um filtro passa baixas para controlar transientes no sinal de operação e finalmente obter os sinais de loop de corrente replica incremental (Δi_z).

Como já dito, o princípio da TD21 se baseia na comparação da tensão calculada no ponto de alcance m_0 , que é chamada de tensão de operação (V_{21OP}) com a tensão de pré-falta no mesmo ponto, chamada tensão de restrição (V_{21RST}). Considerando uma falta no ponto de alcance, o maior valor possível da variação de tensão neste ponto é a própria tensão de pré-

falta (curto-circuito franco). Se a variação for maior ($V_{21OP} > V_{21RST}$), a falta deve estar entre o relé e o ponto de alcance e o elemento é ativado. (SCHWEITZER, 2016).

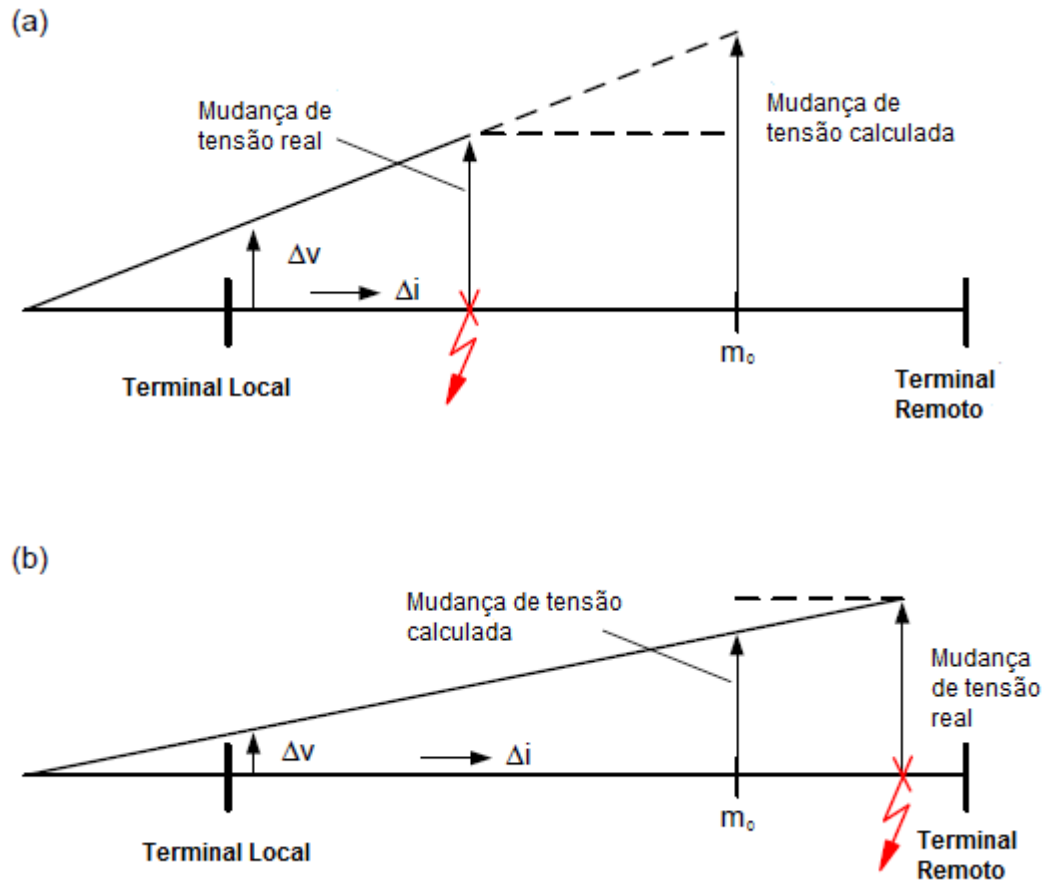


Figura 4.4 - Princípio de operação do elemento de subalcance para zona protegida (a) e além da zona protegida (b) (KASZTENNY, 2016)

A Figura 4.4 ilustra o princípio de operação da função TD21. Como já visto, no circuito puro de falta estão presentes as grandezas incrementais. É possível observar que se a tensão calculada durante a falta no ponto de alcance, m_0 , for maior do que a tensão de pré-falta no mesmo ponto, então a falta deve estar dentro do alcance e a proteção deve atuar, caso contrário, a função deve restringir (KAZSTENNY, 2016). As equações que regem essas tensões a serem comparadas serão mostradas na seção 4.2.

4.2 LÓGICAS DE OPERAÇÃO E RESTRIÇÃO

A tensão de operação V_{21OP} é obtida a partir do circuito puro de falta e por isso está relacionada às grandezas incrementais, podendo ser representada por (4.6).

$$V_{21OP} = \Delta v_{(PB)} - m_0 \cdot |Z_1| \cdot \Delta i_{Z(PB)} \quad (4.6)$$

Em que $\Delta v_{(PB)}$ e $\Delta i_{Z(PB)}$ são as quantidades incrementais de baixa frequência obtidas após o filtro passa-baixas mostrado na Figura 4.3.

A tensão de restrição está relacionada às grandezas de pré-falta, isto é, as próprias tensões e correntes de linha do sistema, em que também é utilizado um filtro passa-baixas para controlar variações dos sinais, observado na Figura 4.3.

$$V_{21R} = v_{(PB)} - m_0 \cdot |Z_1| \cdot i_{Z(PB)} \quad (4.7)$$

Contudo, foi observado que se for utilizado diretamente o V_{21R} como calculado em (4.7) para fazer a restrição na relação $V_{21OP} > V_{21R}$, pode acontecer de a proteção ser acionada mesmo quando V_{21OP} for menor em valor de pico do que V_{21R} (isto é, fora da zona de proteção) em decorrência de variações inesperadas no sinal ou mesmo nas regiões de zero da tensão. Por isso, para aumentar a precisão e evitar que a proteção atue indevidamente, é definida uma variável de restrição mais segura, V_{21RST} .

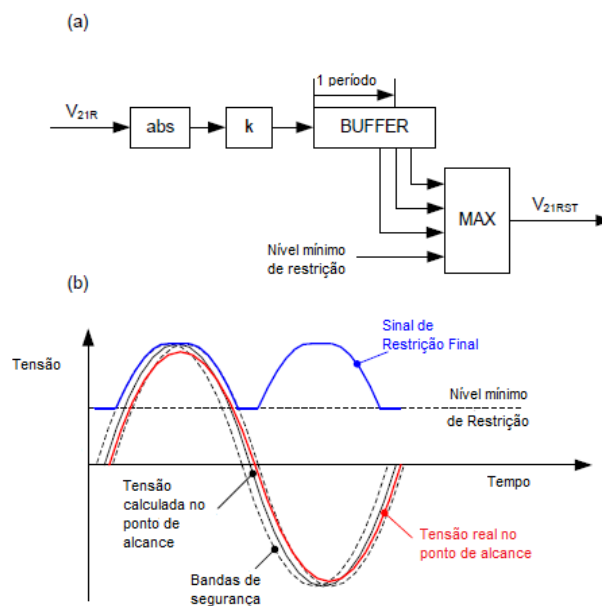


Figura 4.5 - Esquema para obtenção de V_{21RST} e exemplo de operação (SCHWEITZER, 2015)

Para contornar o problema de V_{21R} foi implementada a lógica mostrada na Figura 4.5 para obter-se um valor de restrição mais confiável. No diagrama de blocos (a) é possível ver o esquema passo a passo.

Considera-se o valor absoluto de V_{21R} obtido em (4.7) o qual é multiplicado por um fator k , um pouco acima de 1, apenas para se ter uma margem de segurança. Em seguida, são tomadas amostras de valores de tensão de pré-falta, isto é, são extraídos dados de um período mais dois conjuntos de dados extras: uma amostra anterior e outra posterior a esse período. Além disso, é considerado um valor mínimo de restrição para impor a restrição mínima da função em intervalos de tempo para casos em que o sinal é muito pequeno ou zero. O valor máximo entre o nível mínimo de restrição e as três amostras será o V_{21RST} final, garantindo assim um valor de restrição seguro em diferentes cenários de falta em qualquer instante de tempo. (SCHWEITZER, 2015).

A forma de onda da tensão de restrição V_{21RST} deve ser a maior possível para que se tenha uma boa sensibilidade e alta velocidade da proteção e deve ainda envolver a tensão do ponto de alcance real na presença de várias fontes de erro.

De posse de um valor de restrição confiável, é possível fazer a comparação entre V_{21OP} e V_{21RST} .

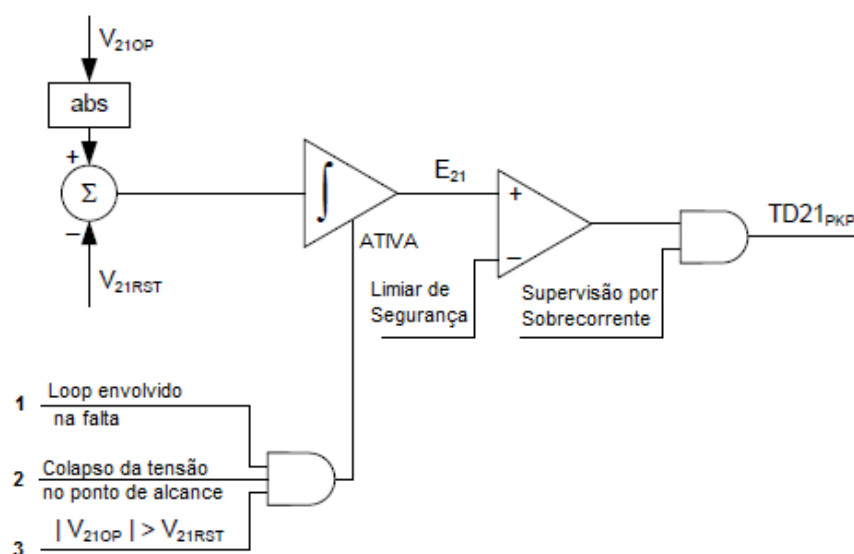


Figura 4.6 - Lógica de comparação da TD21 (SCHWEITZER, 2015)

No esquema da Figura 4.6 está representada a lógica desde a comparação das tensões de operação e restrição até que seja emitido o *trip*. É possível ver que existem alguns fatores que devem ser satisfeitos além de $V_{21OP} > V_{21RST}$. O bloco integrador possui uma entrada de controle, o que significa que ele só será ativado quando a condição descrita nessa entrada for verdadeira, e só então a diferença entre os dois sinais de tensão será integrada para se obter o sinal E_{21} .

Pode-se observar que existem três condições que devem ser satisfeitas simultaneamente, devido à presença da porta AND, para que a entrada de controle seja verdadeira e o integrador seja ativado. Para que se tenha um melhor entendimento sobre essas condições, alguns conceitos devem apresentados.

Na seção 3.4.2 foi explicado brevemente sobre a lógica de seleção de fases em que as fases com falta são as que possuem maior quantidade incremental, o que é constatado a partir da comparação entre as grandezas incrementais de cada loop. Além disso, deve ser satisfeita a lógica de partida (3.36). Esta é a condição 1 que deve ser satisfeita para permitir que o integrador seja ativado.

A segunda condição a ser satisfeita é que a tensão incremental no ponto de alcance seja resultado de um decaimento brusco de tensão, que é a forma esperada da tensão no ponto de falta, como visto na Figura 4.2 . Então se deve garantir que a TD21 seja ativada apenas se houver esse colapso. Isso pode ser confirmado verificando a polaridade relativa do valor de V_{21R} antes da falta e comparar com a tensão de operação V_{21OP} . A tensão incremental na falta deve ser negativa para V_{21R} positivo e vice-versa (SCHWEITZER, 2015). Essa verificação fornece segurança já que ao executá-la o elemento TD21 responde efetivamente à tensão de restrição real, e não ao seu valor absoluto.

O integrador será ativado no momento em que o valor absoluto da tensão de operação for maior do que o valor da tensão de restrição obtendo assim o sinal E_{21} . O elemento TD21 é ativado se esse valor integrado estiver acima de uma margem de segurança ajustada (Figura 4.7) e se a corrente réplica incremental estiver acima de um limite definido pela supervisão por sobrecorrente (limite de *pickup*).

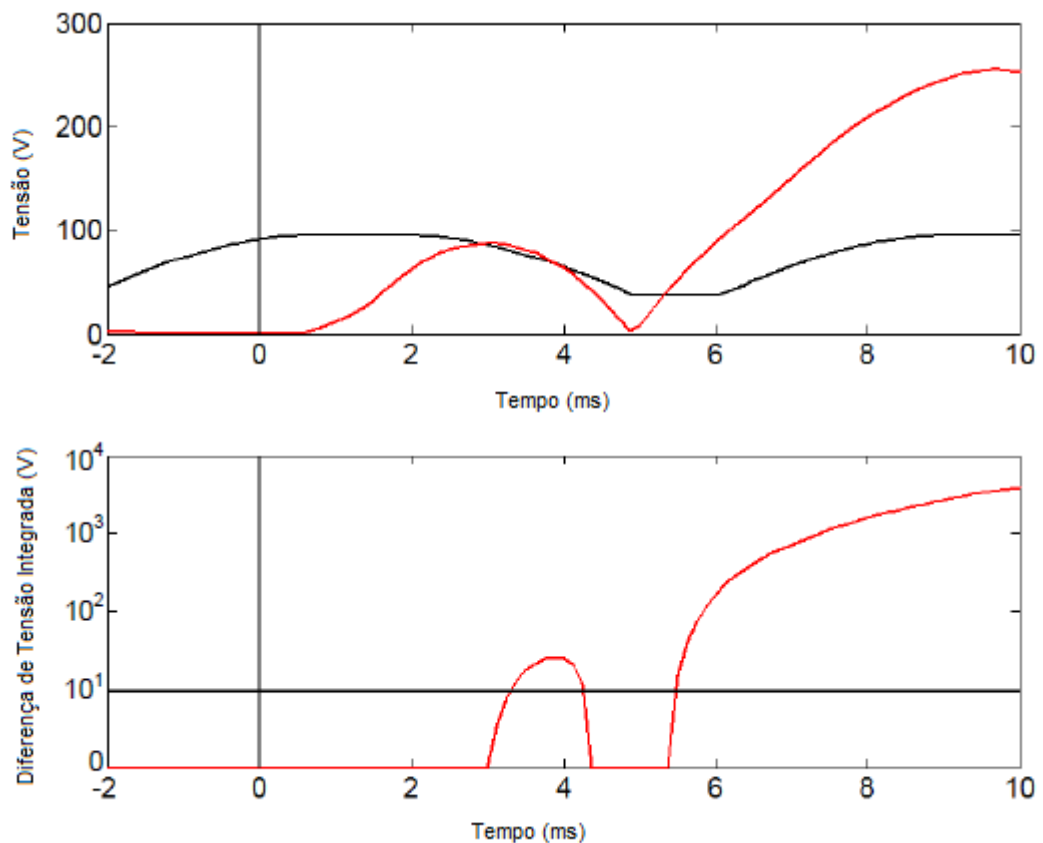


Figura 4.7 - Tensões de operação (vermelho) e restrição (preto) (acima), e a diferença $V_{21op} - V_{21RST}$ integrada e comparada à margem de segurança (abaixo). Tempo de atuação de 3,4 ms. (SCHWEITZER, 2015 p.10)

A supervisão por sobrecorrente é utilizada para garantir a segurança durante eventos de chaveamento que possam gerar transitórios nos sinais avaliados. Os elementos de sobrecorrente respondem a loops de correntes réplica incrementais e, portanto, medem o nível de corrente no espectro de baixa frequência, incluindo a componente de frequência fundamental do sistema de potência. Ao fazer isso, eles verificam que um evento, contém energia suficiente para ser considerada uma falta, autorizando a emissão do trip. O SEL-T400L inclui três elementos de sobrecorrente de seis loops. O elemento direcional de sobrecorrente OC21 é o responsável por supervisionar a operação do elemento de proteção TD21. Ele aplica um limite de pick-up que o relé obtém das configurações de impedância da linha e do alcance. (T400L DATASHEET, p.2.22).

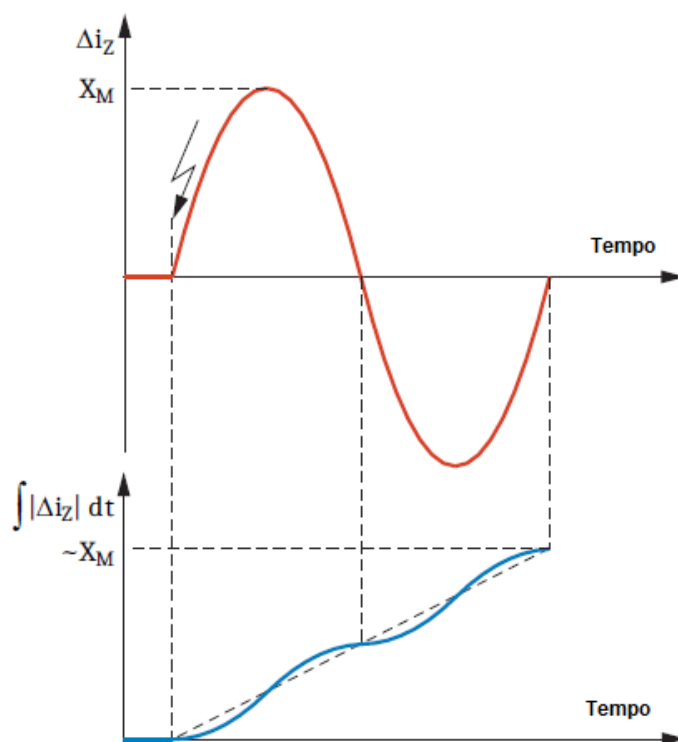


Figura 4.8 - Forma de onda da corrente réplica incremental e integral da mesma no tempo. (SEL-T400L DATASHEET P.2.23)

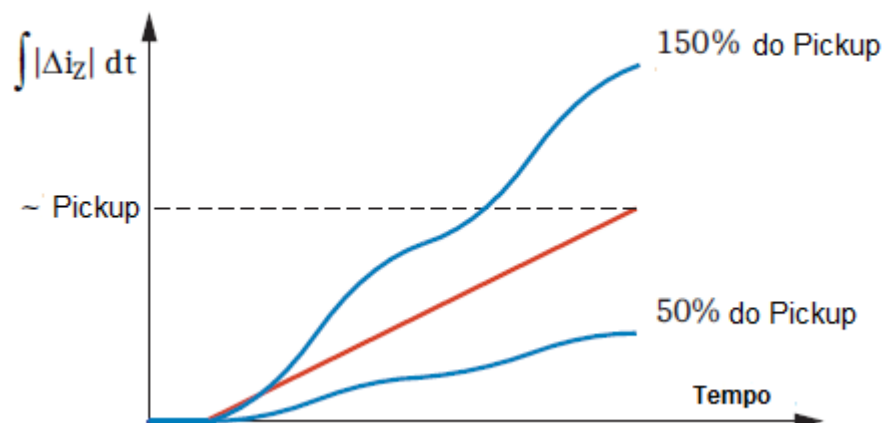


Figura 4.9 - Princípio de operação do elemento de sobrecorrente (SEL-T400L DATASHEET P.2.23)

A lógica do elemento de sobrecorrente integra as correntes réplica incrementais e as compara a uma linha reta que representa o elemento de *pick-up*. Se a magnitude da corrente

exceder o limite de *pick-up*, a integral da corrente ultrapassa a linha contínua, que representa o *pick-up*. Se a magnitude da corrente for menor do que o limite de *pick-up* ajustado, a integral da corrente permanece abaixo da linha reta. (SEL-T400L DATASHEET).

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esta seção tem como objetivo avaliar os fatores que podem interferir na atuação da TD21. Para isso, são apresentadas simulações computacionais feitas com base na variação desses fatores para um melhor entendimento do comportamento da função estudada. O intuito é mostrar se existe alguma influência destes na atuação da proteção e, para os casos em que existe, exibir o que aconteceria na prática. Além disso, serão vistas algumas configurações que devem ser evitadas, a fim de mostrar a importância dos parâmetros considerados na função.

Para todas as simulações computacionais apresentadas aqui foi utilizado o programa *Alternative Transients Program* (ATP) para gerar registros oscilográficos e uma ferramenta matemática computacional externa para implementar a função TD21.

5.1 SISTEMA SIMULADO E PARÂMETROS CONSIDERADOS

O sistema utilizado para o estudo da influência da variação de parâmetros na proteção em questão foi de 230 kV com uma falta AT (monofásica fase-terra) franca em uma linha de 400 km. O alcance da função considerado foi de 0,7 pu conforme recomendado para faltas monofásicas. Com isso, é esperado que após essa distância, a proteção não atue.

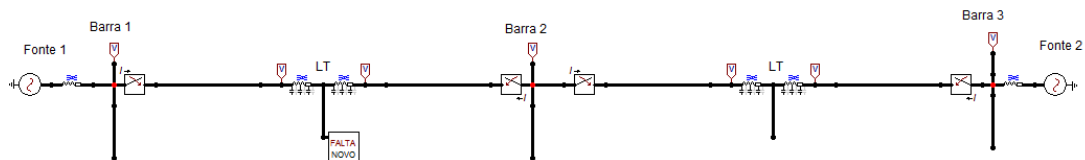


Figura 5.1 - Sistema simulado no ATP

O ponto de medição encontra-se na Barra 1. As linhas possuem dados de sequência positiva e zero iguais a $R_1 = 0,098 \Omega/m$, $L_1 = 0,53$ e $R_0 = 0,522 \Omega/m$ e $L_0 = 1,43$ respectivamente. O valor do SIR utilizado foi de 1.0. A quantidade de ciclos da grandeza incremental, que é o valor de p em (3.6) foi fixado em 1. E, além disso, parâmetros fixos como Δv_{START} e limite de *pick-up* para o elemento de sobrecorrente foram de 10^4 e aproximadamente 10^5 respectivamente.

a. Distância de falta

De posse dos conceitos apresentados neste documento até então, pode-se notar a relação existente entre a distância da falta e o tempo de atuação da proteção. O esperado é que quão mais longe a falta estiver do ponto de medição, mais tempo leva para ocorrer o *trip*.

Na seção 4.1, segundo Schweitzer *et al* (2014), foi visto que a tensão no local da falta é aproximado pela tensão no terminal local (considerando este o ponto de medição) menos o termo $m_0 \cdot |Z_L| \cdot \Delta i_z$, em que m_0 é a distância da falta, Z_L a impedância da linha e Δi_z é a corrente réplica incremental. Em (4.3) é possível ver que quão maior for a distância m_0 , menor será o valor do lado esquerdo da expressão ($|\Delta v - m_0 \cdot |Z_L| \cdot \Delta i_z|$), e por isso, maior é o tempo de atuação e ainda, dependendo da distância, a proteção pode não atuar.

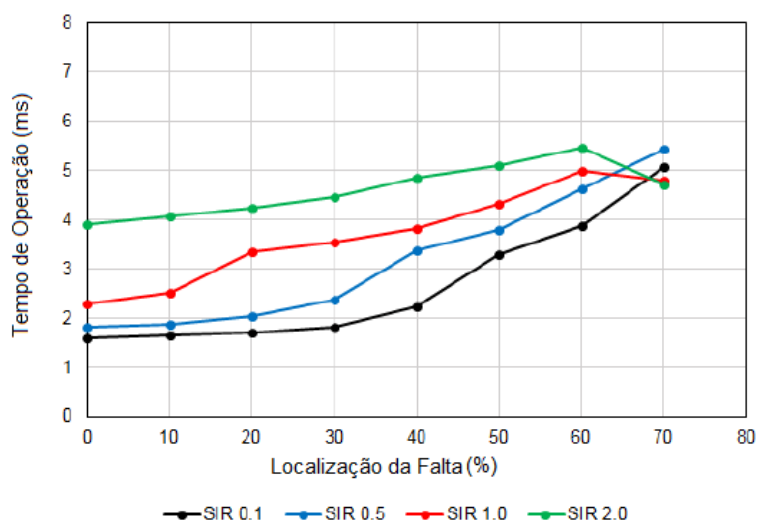


Figura 5.2 – Tempo médio de operação do elemento TD21 em função da distância da falta para diferentes valores de SIR (SCHWEITZER, 2015).

Como mostrado anteriormente, o alcance da proteção é ajustado de 0,7 a 0,8 pu. Sendo assim, as faltas a distâncias maiores do que isso serão consideradas fora do alcance da proteção.

Também é válido mostrar o impacto da relação de impedância entre a fonte e a linha (SIR) nesse tipo de proteção. Analisando a Figura 5.2, apenas para introduzir os resultados que serão apresentados, é possível observar que quanto maior for a impedância da fonte, ou seja, maior o SIR, maior é o tempo de atuação para pequenas distâncias de falta. (SCHWEITZER, 2015). Entretanto, à medida que a falta se aproxima do ponto de alcance, para valores de SIR menores que 1, o tempo de atuação é crescente quanto maior a distância por toda a área protegida. Já para os casos do SIR maior que 1, ou seja, a impedância da fonte maior que a impedância da linha, o tempo é crescente até certa distância e depois ele diminui, sendo o tempo de atuação nesses casos ainda menores do que os anteriores. Obviamente, neste cenário, o importante é perceber a tendência no aumento dos tempos de atuação para maiores distâncias de falta, o que será comprovado pelos resultados apresentados nessa seção.

CASO 1

O primeiro caso apresentado tem como objetivo aumentar gradativamente a distância entre a falta e o ponto de medição do relé de proteção (na Barra 1) e analisar o comportamento da função, ou seja, até quando a proteção vai atuar, se ela vai atuar em todos os casos e se haverá uma variação significativa no tempo de atuação. As distâncias simuladas foram: 0,1 p.u, 0,25 p.u, 0,5 p.u, 0,75 p.u e 0,9 p.u.

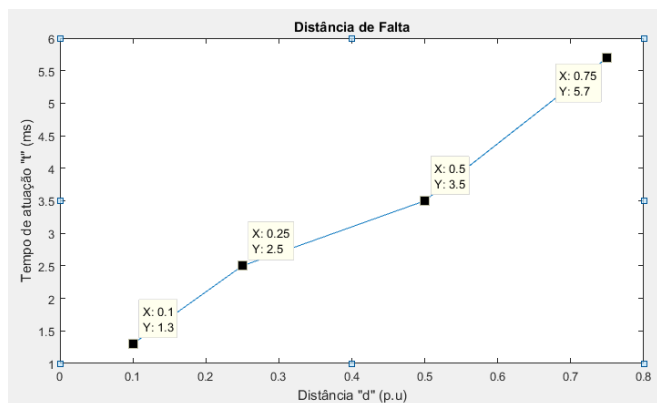


Figura 5.3 - Tempo de atuação para diferentes distâncias de falta

Além disso, o carregamento do sistema foi ajustado de modo a considerar as fontes do sistema com ângulos de fase de $\theta_{\text{Fonte1}} = 0^\circ$ e $\theta_{\text{Fonte2}} = -30^\circ$. O ângulo de incidência da falta foi de 90° para todas as distâncias.

Os resultados obtidos estão resumidos no gráfico da Figura 5.3, constatando que, de fato, quanto mais próximo o curto estiver do alcance, mais tempo leva para o sistema ser isolado.

É possível que a proteção atue um pouco além do alcance ajustado, como neste caso em 0,75 pu. Isto se deve ao limite de segurança ajustado, o qual deve ser ultrapassado para que seja ativado o integrador (Figura 4.7 (b)) tornando a proteção mais sensível quanto menor for esta margem. É importante destacar que esta margem não deve ser muito pequena para que não ocorram casos de sobre alcance, isto é, para que não haja uma atuação indevida da proteção quando a falta ocorrer além da zona protegida causando um desligamento desnecessário. No caso da falta em 0,9 p.u, a proteção não atua, como esperado, já que para uma linha de tal dimensão a proteção não atuaria a essa distância.

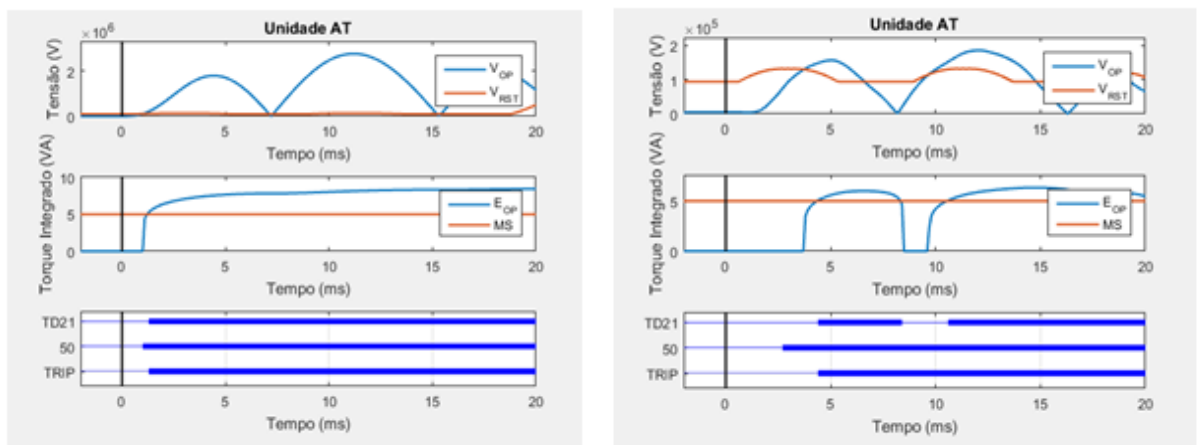


Figura 5.4 - Resultado da simulação para distância de 0,1 pu e 0,75 pu respectivamente

Na Figura 5.4 acima, são mostrados os resultados entre a distância mais próxima do ponto de medição que foi simulada, em comparação com a mais distante na qual a proteção ainda atuou. No gráfico mais acima é feita a comparação entre as tensões de operação e restrição em função do tempo. No instante em que a relação $V_{21OP} > V_{21RST}$ é verdadeira, é ativada a energia E_{21} da saída da porta AND (Figura 4.6), como visto na seção de princípio de

operação da função, e comparada com a margem de segurança (ou limiar de torque), neste caso fixado em 10^5 V como visto no gráfico do meio. Por fim, no instante em que a energia vinda do integrador (torque integrado) chega a um valor suficientemente alto para ultrapassar a margem de segurança estabelecida, o *trip* é gerado.

Comparando os dois extremos, é fácil ver que o tempo de atuação é menor para a menor distância visto que a tensão de operação leva mais tempo para ultrapassar a tensão de restrição no segundo caso. Para o caso de 0,75 pu, a proteção ainda atuou, porém se a margem de segurança estabelecida fosse um pouco maior ela não atuaria. Além disso, é possível observar que após ativado o integrador e o *trip* disparado, ele automaticamente isola o sistema, mesmo quando a tensão de operação torna a ser menor do que a de restrição.

Para as faltas dentro do alcance da proteção, pode-se observar que o tempo de atuação é bem pequeno, mesmo que aumente conforme a distância. Mesmo para faltas mais distantes, ainda é considerada uma atuação de alta velocidade e eficiente, com boa seletividade.

b. Ângulo de incidência da falta

As faltas que ocorrem nos sistemas elétricos de modo geral são imprevisíveis. Contudo, este tópico tem como objetivo mostrar a diferença de uma falta ocorrendo com um ângulo de incidência de 0° e uma falta com ângulo de 90° , e como essa diferença afeta no tempo de atuação da proteção.

Para entender a relação existente entre o tempo de atuação e o ângulo de incidência da falta vamos analisar a expressão (3.6) vista na seção referente a grandezas incrementais.

Assumindo uma falta com ângulo de 0° e pegando apenas um ciclo, ou seja, $p=1$, vale a relação (5.1)

$$\Delta v(t_0) = v(t_0) - v(t_0 - T) \quad (5.1)$$

Mostrando que a tensão incremental no instante da falta é aproximadamente zero.

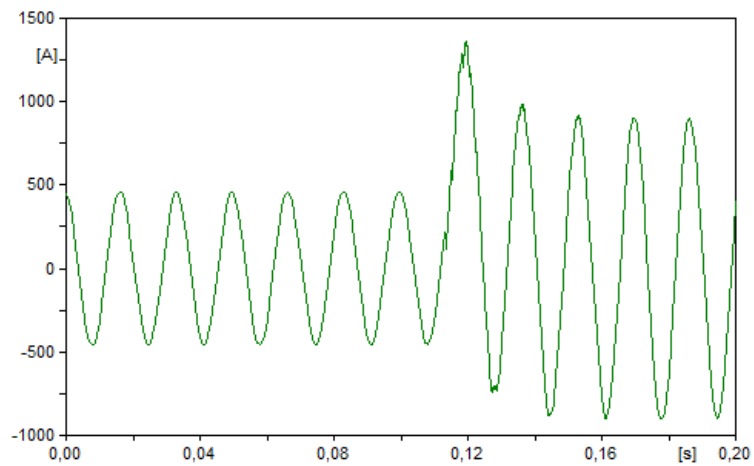


Figura 5.5 - Falta AT franca com início em 0 grau

Na Figura 5.5 é possível ver a mudança da forma de onda da tensão no momento da falta.

Considerando agora uma falta com ângulo de incidência de 90 graus, de (5.1) é possível ver que a grandeza incremental no instante da falta será máxima e por isso o momento de início dessa falta é um pouco maior do que com ângulo zero, já que ela acontece no pico da onda. (Figura 5.6)

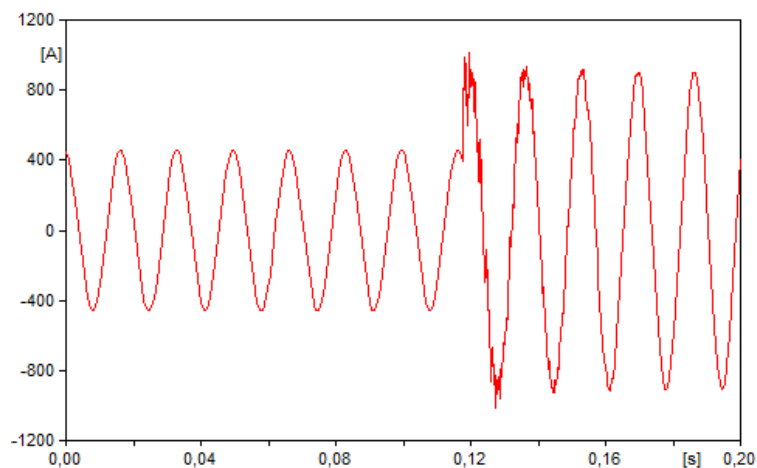


Figura 5.6 - Falta AT franca com início em 90 graus

Uma vez que a grandeza incremental é máxima para falta em 90°, ao relacionar com a equação (4.3) é possível ver que quanto maior o valor de Δv maior é o lado esquerdo da equação, tornando-a verdadeira em um menor tempo para faltas em 90°.

CASO 2

Para o sistema da Figura 5.1 foi simulada uma falta com ângulo de incidência de 0° e 90° com a finalidade de fazer uma comparação e constatar o que foi explicado na seção 4.1.

Foi considerada ainda uma distância de falta igual a 0,6 p.u e as fases das tensões nas fontes do sistema foram de $\theta_{\text{Fonte1}} = 0^\circ$ e $\theta_{\text{Fonte2}} = -30^\circ$.

Como esperado, a proteção para a falta em 0° foi mais lenta do que para 90° com os tempos de atuação de 6,30 ms e 4,20 ms respectivamente, mostrando uma diferença de 2,1 ms, quando se trata de proteção de distância.

Além disso, também foram simulados casos de faltas com esses dois ângulos de incidência para diferentes distâncias e constatando que quão mais próxima a falta ocorrer do alcance da proteção, maior é essa diferença entre os tempos de atuação, ou seja, mais atrasada é a proteção para uma falta incidindo em 0° (Figura 5.7).

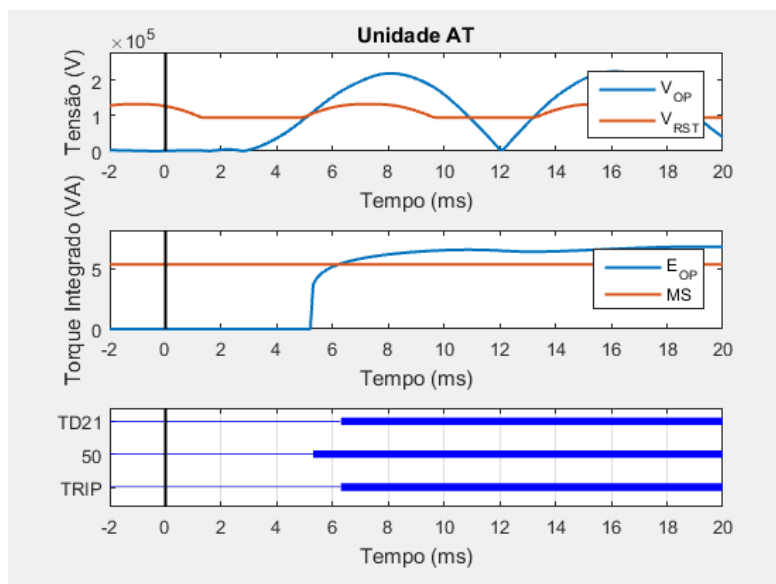


Figura 5.7 – Resultado da simulação para ângulo de incidência de 0 graus

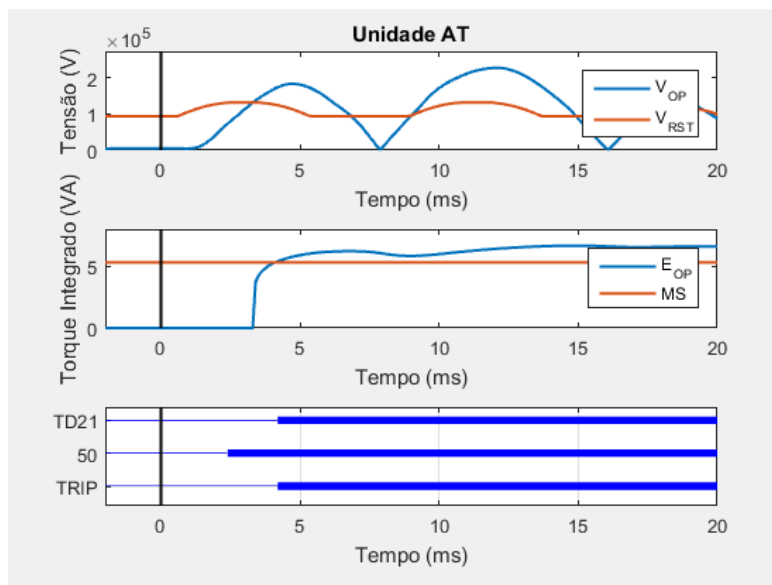


Figura 5.8 - Resultado da simulação para ângulo de incidência de 90 graus

Assim, é possível concluir que para ângulos de incidências mais próximos de zero os tempos de atuação tendem a ser maiores devido às baixas variações das grandezas incrementais de tensão nos primeiros instantes da falta, fazendo com que os elementos de operação levem um tempo maior para serem variados.

c. Resistência da Falta

Conforme visto na seção 3.1, a resistência de falta é aquela que aparece no caminho do curto-circuito. No caso de uma falta AT, por exemplo, é a resistência entre a fase A e a terra. Essa resistência pode causar alterações no efeito da proteção quanto aos resultados, como aumentar ou diminuir o tempo de atuação dependendo do valor desta. Isso porque quando a falta não é franca, existe ainda uma parcela de queda de tensão que não está considerada em (4.1), ou seja, para uma falta com resistência de R_F é correto afirmar que haverá uma parcela de impedância maior.

Pode-se notar que quão maior for o valor da resistência de falta, maior será a parcela da queda de tensão e, por isso, menor o valor da tensão medida no ponto da falta. Como visto em (4.3) quanto menor for essa tensão medida, mais lenta é a atuação da proteção.

CASO 3

No caso da resistência de falta, foi considerada uma falta em 0,6 pu com ângulo de incidência de 90° e ângulo das fontes de $\theta_{\text{Fonte1}} = 0^\circ$ e $\theta_{\text{Fonte2}} = -30^\circ$. O resultado obtido pode ser visto na Tabela 2

Resistência de Falta (Ohms)	Tempo de Atuação (ms)
0	4,2
50	9,2
100	9,5

Tabela 2 – Tempo de atuação da proteção para diferentes resistências de falta em 0,6 pu

Para uma falta franca $R_F = 0$, a proteção foi bem mais rápida do que para os outros casos. Assim, quão maior for o valor da resistência de falta maior será o tempo de atuação da proteção, podendo a mesma não atuar para valores altos de resistência, isso porque a tensão medida no ponto da falta será muito pequena para esses casos. Com essa simulação é possível ver que a resistência de falta influencia significativamente na proteção, principalmente para maiores distâncias, sendo este um fator que pode comprometer a seletividade e confiabilidade da proteção.

O resultado das curvas obtidas na simulação para a falta franca é o mesmo da Figura 5.8.

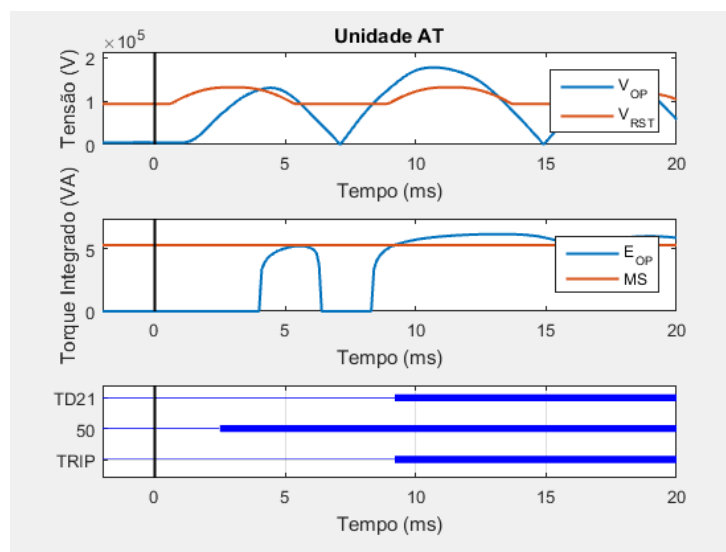


Figura 5.9 – Resultado da simulação para falta com resistência de 50Ω a 0,6 pu de distância

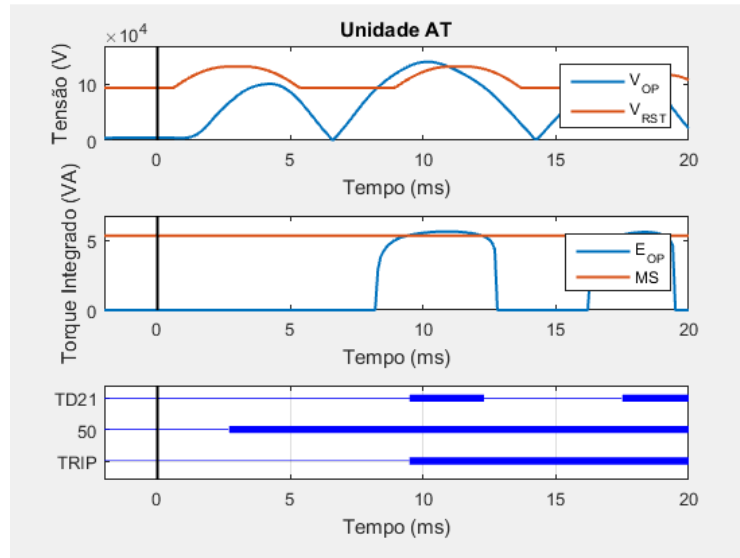


Figura 5.10 – Resultado da simulação para falta com resistência de 100Ω a $0,6 pu$ de distância

Para as mesmas condições foi simulada uma falta em $0,1 pu$ a título de comparação na próxima seção. O resultado obtido encontra-se na Tabela 3

Resistência de Falta (Ohms)	Tempo de Atuação (ms)
0	1,9
50	2,2
100	2,5

Tabela 3 - Tempo de atuação da proteção para diferentes resistências de falta em $0,1 pu$

Da mesma forma, as curvas obtidas para a falta franca são as mesmas da Figura 5.4 para a distância de $0,1 pu$.

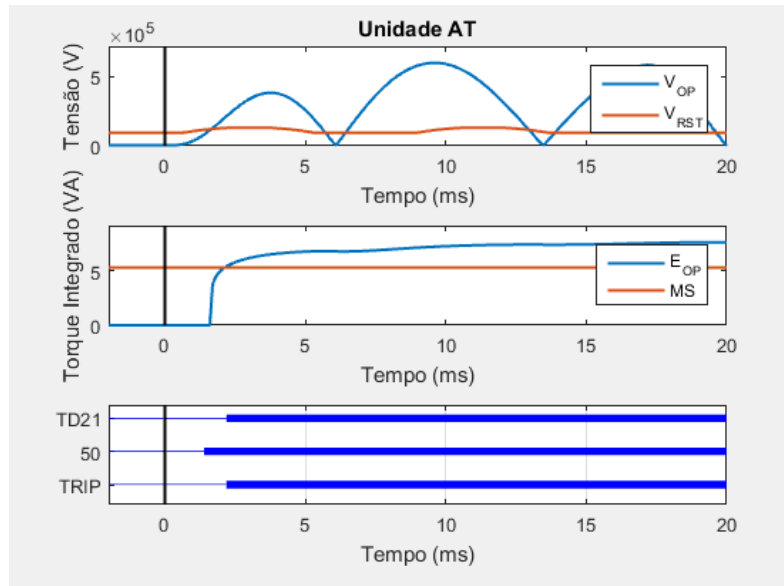


Figura 5.11 – Resultado da simulação para falta com resistência de 50Ω a $0,1$ pu de distância

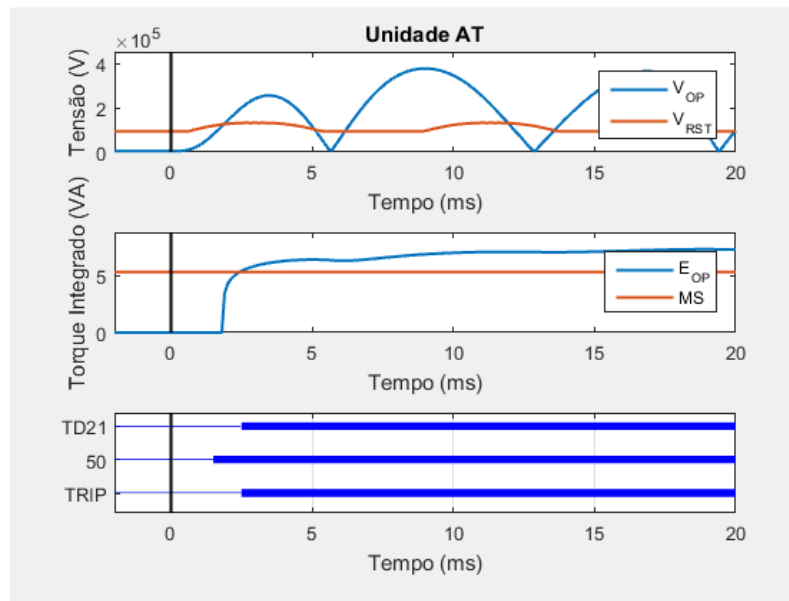


Figura 5.12 - Resultado da simulação para falta com resistência de 100Ω a $0,1$ pu de distância

Conforme esperado, a proteção atuou mais rapidamente já que a falta ocorreu mais próximo ao ponto de medição.

d. Carregamento do Sistema

O sistema da Figura 5.1 apresenta duas fontes de tensão, uma em cada terminal da linha. O carregamento do sistema é proporcional à diferença angular entre as fontes nos terminais local e remoto que pode vir a influenciar a atuação de funções de proteção de distância tradicionais a depender do valor do carregamento. Sabendo que para ângulos negativos de carregamento o sentido da corrente é oposto ao caso de carregamento positivo, entende-se que a contribuição de corrente no caso de ângulo de carregamento de -30° é diferente do caso de uma fase de 30° positivo, por exemplo.

Para o melhor entendimento deste conceito vamos analisar o caso da ocorrência de uma falta entre as Barras 1 e 3 da Figura 5.1, supondo o ponto de medição na Barra 1. É possível perceber que quanto maior for o carregamento positivamente, menor será a contribuição de corrente no sentido da Fonte 2 para a Fonte 1 o que tornará menor o valor da corrente resultante na linha e conseqüentemente influenciará na tensão de pré-falta considerada. Assim, considerando a expressão para obter a tensão de restrição $V_{21RST} = V_F - |Z_{LT}| \cdot \Delta i$, quanto menor é a corrente Δi na linha, maior será o valor de V_{21RST} . Fazendo com que a tensão de operação leve um tempo maior para ultrapassar a curva de restrição.

CASO 4

O próximo caso simulado irá mostrar a relação existente entre o tempo de atuação da proteção e a fase da tensão da Fonte 2, a qual tem relação com o carregamento do sistema visto que o ângulo de fase da fonte local foi ajustada em 0 graus. Para esta análise variou-se o ângulo da Fonte 2 com valores de: -30° , -15° , -5° , 5° , 15° e 30° . Além disso, a distância da falta foi fixada em 0,6 pu e o ângulo de incidência da falta foi de 90° para todos os casos.

O resultado obtido para essa simulação visto na Figura 5.13 foi como explicado anteriormente. Os tempos de atuação foram maiores para maiores valores de carregamentos, contudo, em todos os casos a proteção atuou em um tempo razoável, mostrando assim que este fator, para o caso de uma linha simples (com dois terminais), não prejudicaria tanto a atuação da proteção em casos reais.

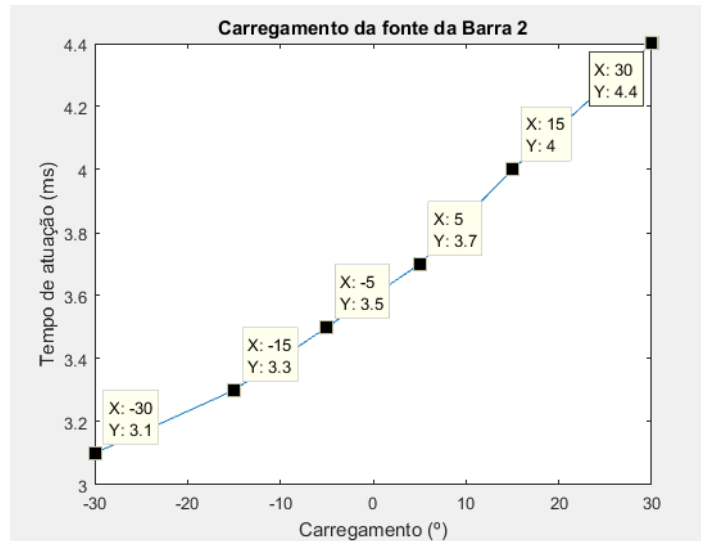


Figura 5.13 - Tempo de atuação da proteção para carregamentos diferentes

5.2 SISTEMA COM *INFEED*

O *Infeed* é um problema que está muito presente em sistemas elétricos reais. Esta seção tem como objetivo apresentar o que seria tal problemática, relacionada a sistemas de proteção no domínio da frequência e em seguida será mostrado como este seria um problema na atuação da proteção no domínio do tempo, apresentando uma simulação de um sistema com *infeed* (Figura 5.14) e comparando com o sistema simulado anteriormente (da Figura 5.1).

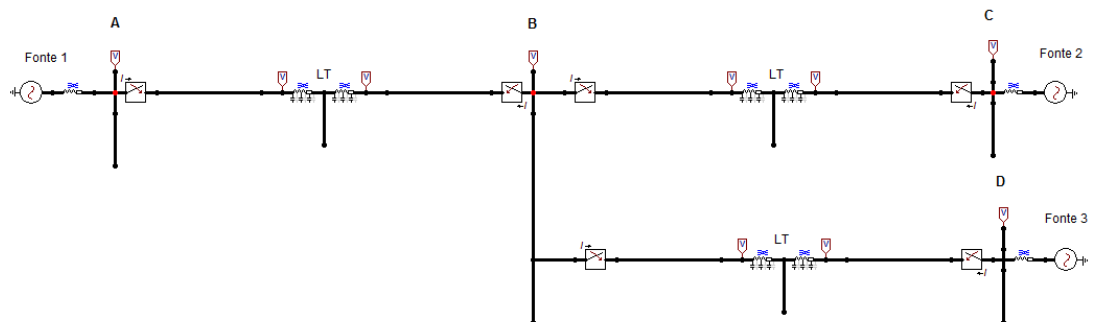


Figura 5.14 - Sistema com três terminais

No sistema da Figura 5.14, o ponto de medição encontra-se na Barra 1. As linhas possuem dados de sequência positiva e zero equivalentes ao sistema apresentado na Figura 5.1. O valor do SIR utilizado foi de 1.0 e a quantidade de ciclos da grandeza incremental, p , foi unitário. Os ajustes de ΔV_{START} e limite de *pick-up* foram mantidos os mesmos.

Em sistemas de grande porte com linhas de transmissão multi-terminais, o problema de *infeed* é muito comum. Os sistemas multi-terminais são aqueles em que as linhas de transmissão possuem derivações, podendo ser empregadas tanto para conectar uma carga como para reforçar o sistema, embora em alguns países não se possa ter um ponto de derivação sem subestação intermediária para conectar unidades geradoras.

Como visto anteriormente, na proteção baseada em fasores, o relé no terminal da linha calcula a impedância entre ele e o ponto da falta a partir dos valores de tensão e corrente medidos e analisa se esta impedância se encaixa dentro da faixa ajustada. O problema do *infeed* é o efeito das contribuições de correntes provenientes de linhas adjacentes, as quais podem atrapalhar a medição de corrente vista pelo relé e causar um erro no cálculo da impedância.

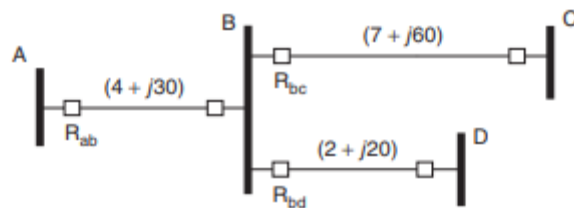


Figura 5.15 - Sistema com infeed (HOROWITZ E PHADKE,2014)

No sistema mostrado na Figura 5.15, o relé R_{ab} é ajustado para proteger a linha AB e também fornece proteção de backup para as linhas conectadas à barra B, BC e BD. Considerando as impedâncias mostradas e que a primeira zona cobre 80% da linha AB, a primeira zona de R_{ab} será $0,8 \times (4 + j30) = (3,20 + j24) \Omega$.

A segunda zona é ajustada para cobrir 100% da linha principal, AB, mais 50% da menor linha à jusante, ou seja, $(4 + j30) + 0,5 \cdot (2 + j20) = (5 + j40) \Omega$.

A terceira zona deve cobrir a linha principal AB e ainda além das linhas BC e BD. Podendo ser considerada $[4 + j30 + 1,25 \times (7 + j60)] = (12,75 + j105) \Omega$.

O cálculo da impedância vista por R_{ab} para uma falta em 70% de AB, por exemplo, será:

$$Z_{Rab} = 0,7 \cdot Z_{LT} \quad (5.3)$$

Em que, Z_{LT} é a impedância da linha AB.

Agora supondo uma falta na linha BC, ela será detectada pelo relé da Barra A em segunda zona. Além disso, nota-se que a corrente vista por R_{ab} irá mudar, visto que devido à presença de outra linha conectada, BD, a corrente vista pelo relé não será mais apenas I_{ab} . A corrente I_{ab} será dividida entre as duas linhas conectadas à Barra B. Neste caso, a impedância medida pelo relé será:

$$Z_{Rab} = Z_{ab} + (h \cdot Z_{bc}) + (\text{contribuição de infeed}) \quad (5.4)$$

Em que, Z_{BC} é a impedância da linha BC e h é a distância da Barra B ao ponto de falta.

A contribuição de *infeed* neste caso será $h \cdot Z_{bc} \cdot \frac{I_{bd}}{I_{ab}}$, que é exatamente a parcela de corrente da linha BD que contribui para a alimentação da falta.

Assim,

$$Z_{Rab} = Z_{ab} + (h \cdot Z_{bc}) + \left(h \cdot Z_{bc} \cdot \frac{-\hat{I}_{bd}}{\hat{I}_{ab}} \right) = Z_{ab} + h \cdot Z_{bc} \cdot \left(1 - \frac{\hat{I}_{bd}}{\hat{I}_{ab}} \right) \quad (5.5)$$

O sinal negativo em I_{BD} é devido ao sentido contrário da corrente quando ela está “entrando” na Barra B.

Pode-se notar que nesta configuração de sistema, na ocorrência de uma falta depois da Barra B, o relé da Barra A irá medir uma impedância menor ou maior do que a impedância real, devido à contribuição de corrente proveniente da terceira linha a depender do sentido da corrente de *infeed*.

Vale ressaltar que é possível que se tenha uma fonte conectada à Barra D gerando uma corrente no sentido contrário (da direita pra a esquerda), fazendo com que a corrente resultante da linha BD seja a subtração entre a corrente proveniente da fonte e a corrente vinda da Barra B, podendo minimizar o valor da contribuição de *infeed* para a falta em BC, a depender do valor dessa corrente.

Diante do exposto sobre a problemática do *infeed*, nota-se que se trata de um problema para proteção no domínio da frequência a qual é baseada em zonas de proteção, já que existe a

influência apenas em segunda zona. Em contrapartida, na proteção no domínio do tempo, a qual não utiliza segunda zona, vale mostrar o que aconteceria caso uma linha fosse conectada dentro da zona de proteção (no meio da linha principal), seja devido a erro de ajuste ou utilização inadequada da função, e é com essas considerações que se basearão as análises mostradas a seguir.

A Figura 5.14 também se trata de um sistema de 230 kV sendo simuladas faltas AT (monofásica fase-terra) francas em uma linha de 400 km onde foi conectada uma segunda linha de 200 km em 50% desta. O alcance da função considerado foi de 0,7 pu conforme recomendado para uma falta desse tipo. Com isso, é esperado que após essa distância, a proteção não atue.

Nas simulações do circuito com *infeed* o objetivo é apresentar as mesmas variações de parâmetros feitas para o sistema da Figura 5.1, contudo será utilizado um sistema de três terminais e ainda supondo que a ligação da terceira linha tenha sido feita em 50% da linha principal, observando assim as consequências da ocorrência deste caso na vida real.

CASO 5

O quinto caso é semelhante ao primeiro, porém agora para o circuito da Figura 5.14. A ideia é ver o que acontece com o tempo de atuação ao aumentar a distância da falta para esse sistema. Neste caso foram feitas as seguintes considerações: $\theta_{\text{Fonte1}} = 0^\circ$, $\theta_{\text{Fonte2}} = -30^\circ$, $\theta_{\text{Fonte3}} = 30^\circ$. O ângulo de incidência da falta foi de 90° para todas as distâncias, as quais foram variadas da mesma forma que no Caso 1.

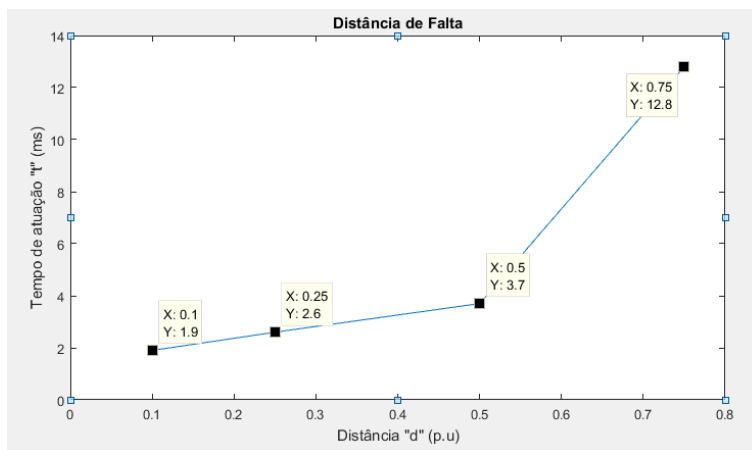


Figura 5.16 – Tempo de Atuação para diferentes distâncias de falta (sistema com infeed)

Para o sistema com *infeed* pode-se observar que praticamente não houve aumento do tempo de atuação para distâncias até 50% da linha. A proteção ainda pode ser considerada rápida e eficiente para esses casos.

Para as distâncias de falta após 50% da linha, houve um grande aumento do tempo de atuação, visto que no alcance da proteção, com a mesma margem de segurança, a proteção já não atua, enquanto no caso sem *infeed* a proteção atuava mesmo com um pouco de atraso. Isso mostra que para o caso da distância de falta, o *infeed* pode ser um problema causando atraso na proteção quando comparado a um sistema nas mesmas condições, porém sem o *infeed*.

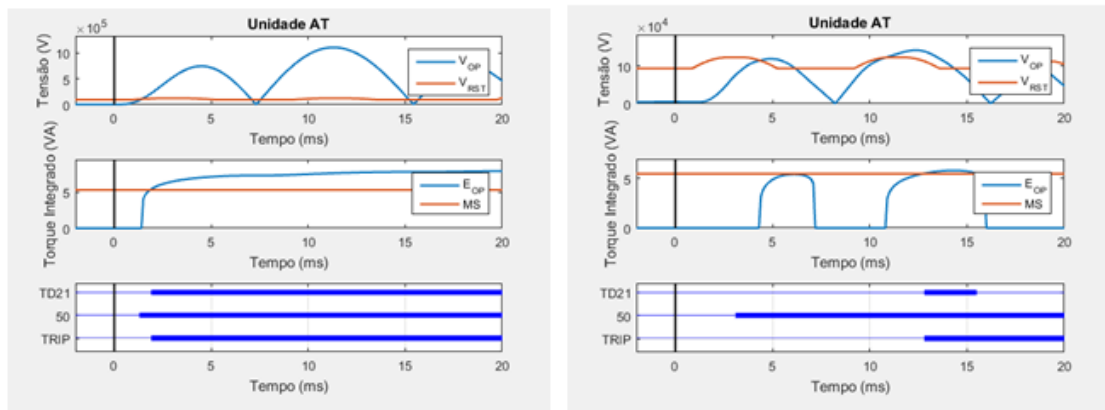


Figura 5.17 – Resultado da simulação para distância de 0,1 pu e 0,75 pu respectivamente (sistema com *infeed*)

Comparando os casos mais extremos e ainda comparando com os resultados do sistema sem *infeed* (Figura 5.4) é possível ver que para 0,75 p.u o *trip* é dado em aproximadamente 13 ms, o que na realidade representaria uma não atuação da proteção devido ao fato de existir um bloqueio da função para um tempo maior que 10 ms após a detecção do distúrbio. Além disso, é válido observar que no primeiro instante em que a tensão de operação ultrapassa a tensão de restrição fazendo com que a saída da porta AND seja verdadeira gerando a energia E_{21} , ela ainda não ultrapassa a margem de segurança para ativar a decisão da proteção, fazendo com que o *trip* só seja realmente executado quando todas as condições são verdadeiras simultaneamente, o que irá acontecer com atraso muito grande de forma que ela acabe não atuando na realidade.

CASO 6

Avaliamos agora a influência do ângulo de incidência no sistema com *infeed*. No caso 2 foram apresentados alguns conceitos e simulações considerando o sistema da Figura 5.1 e mostrando que para faltas mais próximas de zero, a proteção tendia a ser mais atrasada em relação a faltas mais próximas de 90°. Assim, foram simuladas faltas com ângulo de incidência de 0° e de 90° e para ambos os casos foram simuladas nas distâncias de 0,1 e 0,6 p.u, que seria uma falta antes da ramificação BD e outra depois (em BC) no sistema da Figura 5.14. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4

Ângulo de incidência	Distância	Tempo de Atuação	
		Sem <i>infeed</i>	Com <i>infeed</i>
0	0,1 p.u	3,1 ms	3,1 ms
	0,6 p.u	6,3 ms	6,6 ms
90	0,1 p.u	1,9 ms	1,9 ms
	0,6 p.u	4,2 ms	4,4 ms

Tabela 4 – Tempos de Atuação de sistema com e sem ramificação para diferentes ângulos de incidência

A Tabela 4 mostra uma comparação dos tempos de atuação da proteção para o caso com e sem o *infeed*. Claramente a proteção atua com maior velocidade para uma falta com incidência de 90°, como visto anteriormente. Além disso, é possível notar que para as faltas em 0,1 pu, ou seja antes da ramificação, tanto para 0° quanto para 90° o tempo de atuação não muda quando comparamos os circuitos com e sem *infeed*. Já para as faltas após a ramificação, ocorre um pequeno aumento no tempo de atuação quando inserida a linha adjacente, contudo, a diferença é de 0,2 ms, não sendo um grande prejuízo a presença desta linha nesta análise.

Os resultados das simulações das curvas obtidas nas simulações foram similares aos já apresentados para o caso do sistema sem ramificação (Caso 2).

CASO 7

Anteriormente, no caso 3 foram apresentados resultados referentes ao tempo de atuação da proteção estudada para três valores diferentes de resistência de falta, observando que quanto maior a resistência de falta, mais atrasada é a atuação da proteção. Vamos agora

aplicar as mesmas condições para o sistema da Figura 5.7, com $\theta_{\text{Fonte3}} = -30^\circ$. Os resultados obtidos para distâncias de 0,6 pu e 0,1 pu estão resumidos nas Tabelas 5 e 6 respectivamente.

Resistência de Falta (Ohms)	Tempo de Atuação (ms)
0	4,4
50	9,6
100	-

Tabela 5 – Tempo de atuação da proteção para diferentes resistências de falta em 0,6 pu (sistema com infeed)

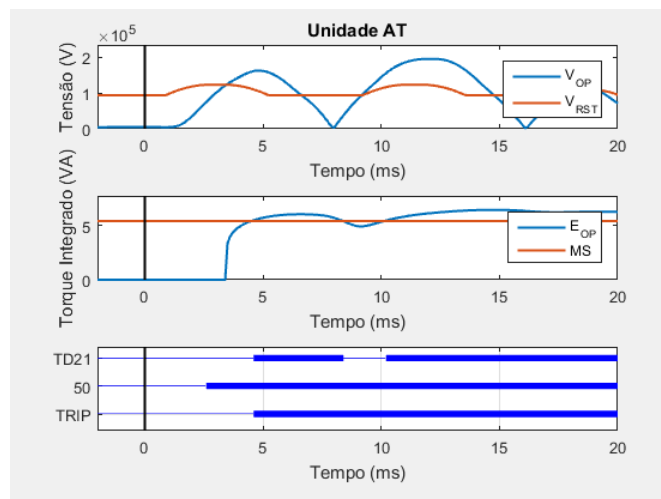


Figura 5.18 – Resultado da simulação para falta a 0,6 pu com resistência igual a 0 (sistema com infeed)

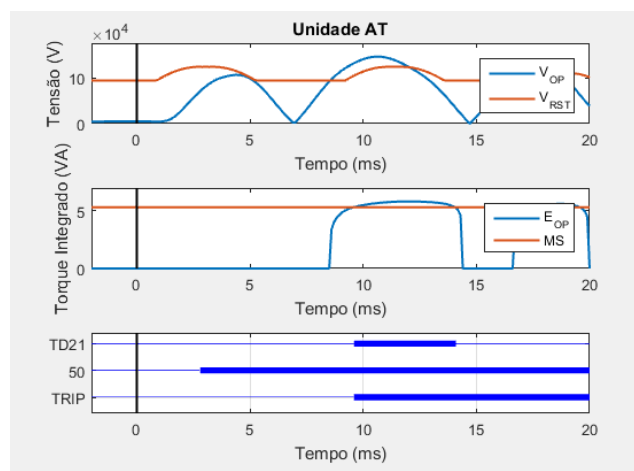


Figura 5.19 – Resultado da simulação para falta a 0,6 pu com resistência igual a 50 Ω (sistema com infeed)

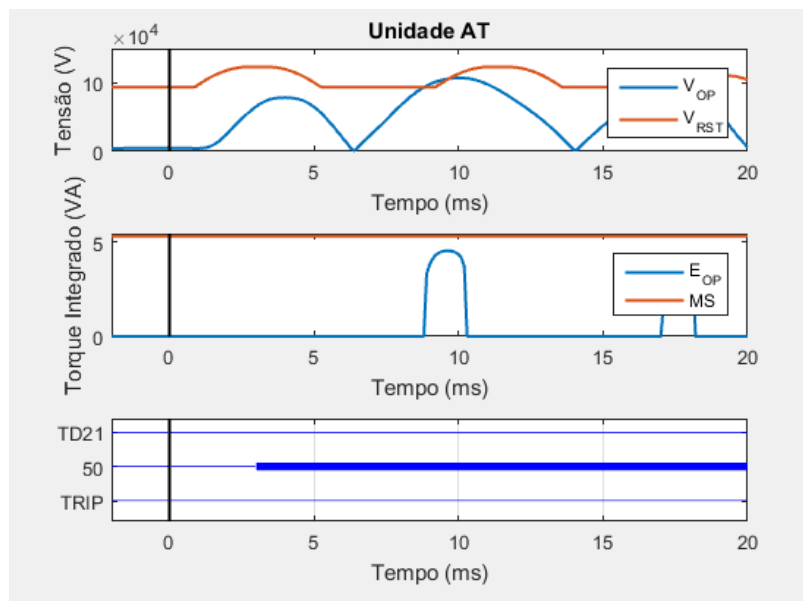


Figura 5.20 – Resultado da simulação para falta a 0,6 pu com resistência de 100Ω (sistema com infeed)

Resistência de Falta (Ohms)	Tempo de Atuação (ms)
0	1,9
50	2,1
100	2,4

Tabela 6 – Tempo de atuação da proteção para diferentes resistências de falta em 0,1 pu (sistema com infeed)

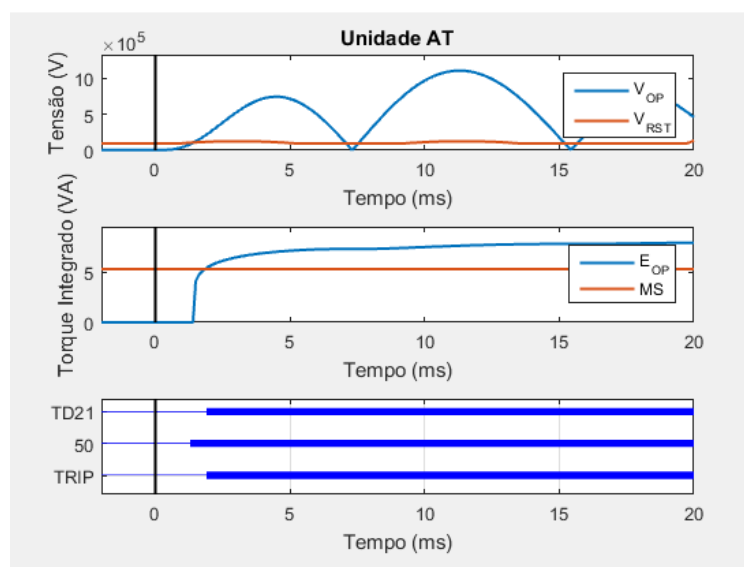


Figura 5.21 – Resultado da simulação para falta a 0,1 pu com resistência de 0Ω (sistema com infeed)

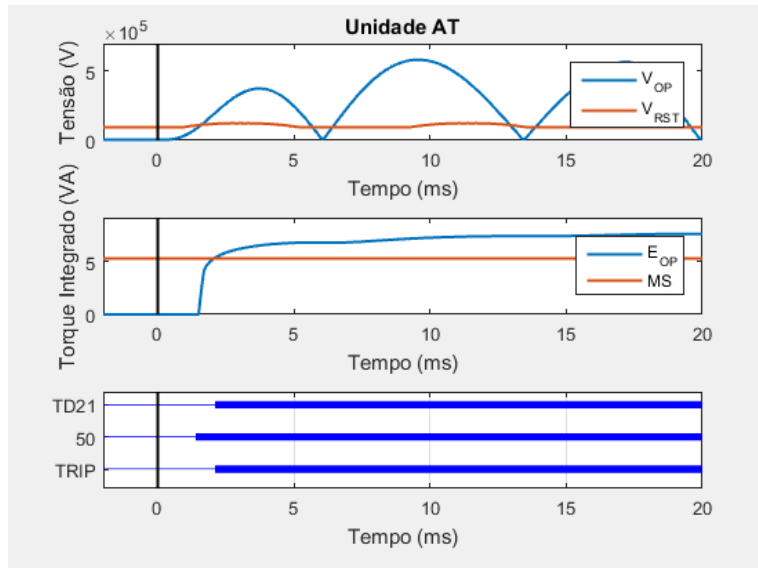


Figura 5.22 – Resultado da simulação para falta a 0,1 pu com resistência de 50Ω (sistema com *infeed*)

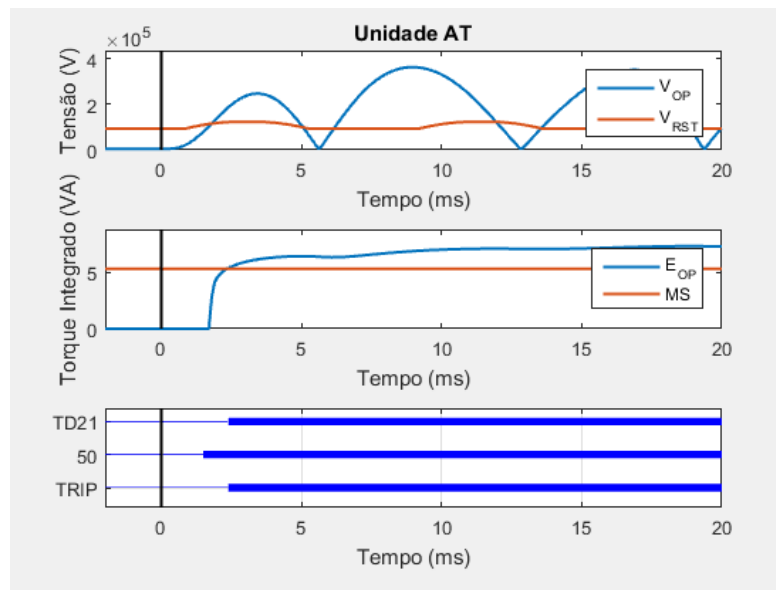


Figura 5.23 – Resultado da simulação para falta a 0,1 pu com resistência de 100Ω (sistema com *infeed*)

Fazendo uma comparação com os resultados obtidos no sistema da Figura 5.1, é possível observar que para faltas mais próximas do ponto de medição, antes da ramificação da linha BD, não há diferença entre o sistema com ou sem o *infeed*. Após a ramificação, contudo, há um atraso maior da atuação da proteção, visto que ela chega a não atuar no caso em que a

resistência de falta é igual a 100Ω , enquanto no caso 3 sob as mesmas condições, ela ainda atuava mesmo que com atraso. Observa-se pela Figura 5.20 que o sinal E_{21} nem chega perto de ultrapassar a margem de segurança, mostrando que mesmo que esta fosse um pouco mais baixa, a proteção ainda não atuaria. Deste modo, conclui-se que uma alta resistência de falta pode vir a prejudicar a proteção, e ainda, para um sistema de três terminais em que existe uma linha dentro da zona protegida, o atraso pode ser maior, diminuindo a eficiência da proteção.

CASO 8

Por fim, comparamos o caso da variação do carregamento no sistema da Figura 5.14 com o caso 4 (sistema sem *infeed*).

Neste caso, as fases das Fontes 1 e 2 foram mantidas constante, em 0° e -30° respectivamente, enquanto a fase da Fonte 3 foi variada. Os valores simulados foram: $-30^\circ, -20^\circ, -10^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ e 30° , obtendo assim sete resultados para comparação. Além disso, foi variada também a distância da falta, de forma que para cada distância foram simulados os sete casos de carregamento. A ideia é analisar a influência da contribuição de corrente proveniente da linha adjacente e se esta contribuição é suficiente para prejudicar a atuação da proteção comparando ao caso 4, em que não há ramificação.

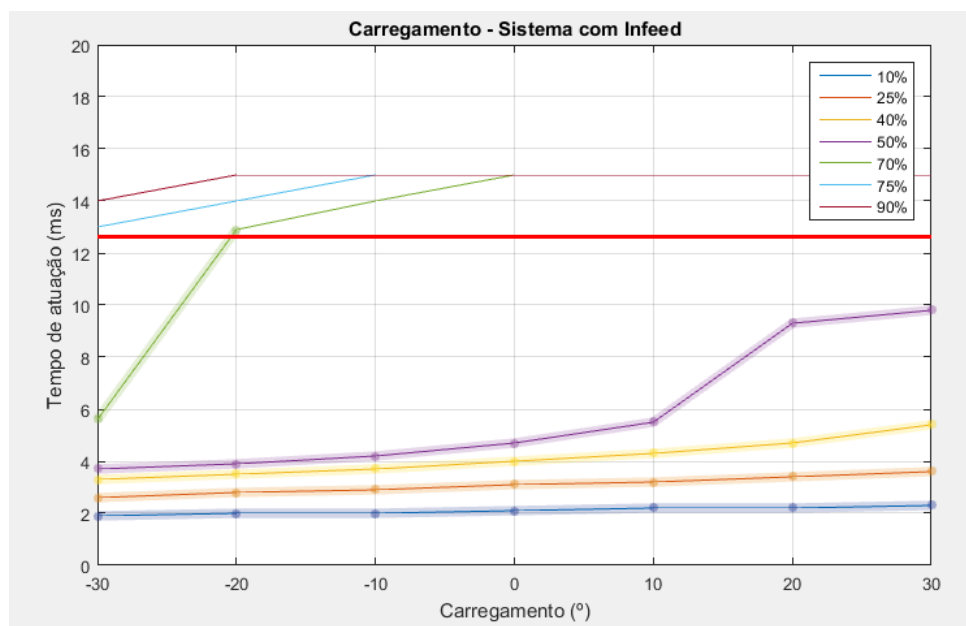


Figura 5.24 - Tempo de atuação para diferentes carregamentos (sistema com infeed)

Pelo gráfico da Figura 5.24 é possível observar que para faltas ocorrendo entre as Barras A e B do sistema com *infeed*, isto é, antes da ramificação, a proteção atua normalmente dentro do alcance. Já para distâncias de falta a partir de 50% da linha, ocorre uma contribuição maior de corrente proveniente da linha BD, mostrando que na realidade prejudicaria a atuação da proteção, visto que ela não atua para essas distâncias (no gráfico a linha contínua vermelha em aproximadamente 12,8 ms representa o tempo máximo em que ocorreu o *trip*. Os pontos acima desta linha se mostraram fora do alcance e a proteção não atuou).

Foi ainda simulada uma falta no ponto de alcance da proteção, 0,7 pu, não considerando o *infeed* e foi possível ver que a proteção atua neste caso para todos os valores de fase da Fonte 3 e de forma relativamente rápida, tendo em vista a distância do ponto de medição. Em contrapartida, para o sistema com *infeed*, a proteção já não atua neste ponto a partir de uma fase igual a -20° para a Fonte 3 como visto no gráfico.

Deste modo, constata-se que para uma mesma distância quão maior for o valor do carregamento, maior será o tempo de atuação da proteção devido ao fato de que dependendo do sentido da corrente proveniente da fonte presente no terminal da linha adjacente, a corrente na linha principal será maior ou menor do que se não existisse essa ramificação, sendo esta uma influência considerável do carregamento na proteção. Comparando os tempos de atuação no caso de linha simples (caso 4) e o caso da linha com ramificação (caso 8), houve um maior tempo de atuação para o segundo para distâncias após a ramificação, sendo visto que no ponto de alcance da linha sem ramificação a proteção ainda atua, no entanto, com a ramificação ela atua apenas para o carregamento de -30 (com um tempo maior).

Por isso, uma linha inserida na zona de proteção da função, em geral, irá aumentar o tempo de atuação e, a depender do ângulo de fase da fonte e distância da falta, poderá impedir que a proteção atue. Este caso é importante para mostrar que o alcance da proteção deve ser respeitado para que não ocorram erros de atuação.

6. CONCLUSÕES

Foi apresentado um tipo de proteção de distância relativamente atual sendo possível entender um pouco mais sobre a proteção no domínio do tempo baseada em grandezas incrementais, a qual está conquistando mais espaço a cada ano tendo em vista as suas vantagens principalmente em relação à velocidade de atuação, além de contornar limitações presentes na proteção fasorial.

Na seção de revisão bibliográfica foi visto que ainda não existem muitas referências que tratam da TD21, mostrando que este documento pode vir a contribuir para quem tiver interesse de entender especificamente sobre esta função, sendo descrito aqui apenas pontos da proteção no domínio do tempo que sejam relevantes para o princípio de funcionamento e operação da função TD21.

Com este trabalho foi possível ver alguns fatores que podem influenciar nesse tipo de proteção, contudo, de forma geral, a TD21 mostrou-se uma função com boa seletividade, confiabilidade e alta velocidade, desde que respeitados os parâmetros estabelecidos pelo fabricante, como alcance da proteção e o limite de distância para adição de uma segunda linha dentro da zona protegida.

Vale ressaltar que o sistema com *infeed* apresentado não é nenhum caso real, já que não seria correto instalar uma linha dentro da zona de proteção da TD21, porém é válido para mostrar o comportamento da função neste caso e enfatizar a importância de obedecer corretamente os parâmetros da função.

A resistência de falta, por outro lado, é um problema que pode ser real e mostrou ter um impacto relevante nesse tipo de proteção, visto que o tempo de atuação aumentou muito para grandes resistências de falta e chegou a não atuar no caso do sistema de três terminais para resistência de 100 Ω . Isso pode ser considerado uma limitação, contudo a incidência de faltas com altas resistências não é muito comum em SEPs reais, por isso a função ainda assim pode ser considerada eficiente na maioria dos casos.

Neste trabalho foi enfatizado o tipo de falta fase-terra franca, tanto na fundamentação teórica quanto na apresentação dos resultados, em que para todos os casos foi considerada uma falta AT. Para uma visão mais abrangente do funcionamento desta função, sugere-se para trabalhos futuros análises semelhantes a estas apresentadas aqui, porém para outros tipos de

falta a fim de fazer uma comparação e analisar diferentes loops de falta. Além disso, é válida também a utilização do relé SEL-T400L para estudos e simulações reais com o intuito de se obter resultados ainda mais próximos da realidade do que utilizando ferramentas computacionais.

É válido também investigar mais sobre a influência do carregamento do sistema nesta função, variando este juntamente com o valor do SIR, analisando o comportamento da função nestes casos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Apostila Teleproteção Estácio – “*Sistemas de Proteção e Medição*”

BENEDITO, R.A.S - <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/raphaelbenedito> (Acessado em 20/04) - Aula SEP1 cap. 5.3, 2015.

ELMORE, W.A – “Protective Relaying Theory and Applications”, 2003.

F. ENGLER, O.E. LANZ M. HANGGLI AND G. BACCHINI - “Transient Signals and Their Processing and Ultra High-Speed Directional Relay for EHV/UHV Transmission Line Protection,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-104, No. 6, Junho 1985, pp. 1463-1473

G. BENMOUYAL – “Removal of DC-Offset in Current Waveforms Using Digital Mimic Filtering” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 2, April 1995.

G. BENMOUYAL – “A Combined Directional and Faulted Phase Selector Element Based on Incremental Quantities” , 2001

HOROWITZ, S.H & PHADKE A.G – “*Power System Relaying*”, 2014.

IRWIN, J. D.; NELMS, R. M. *Análise Básica de Circuitos para Engenharia*. 10. ed. [S.l.]: Wiley, 2013.

KASZTENNY, B. – “*Practical Setting Considerations for Protective Relays That Use Incremental Quantities and Traveling Waves*”, 2016.

KENNETH C. BEHRENDT SEL Inc. – “Digital Relay-to-Relay Communication for Transmission Line Control, Monitoring and Protection,” 1996

LOPES, F.V. – “*Localização de Faltas em Tempo Real Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados Não Sincronizados de Dois Terminais*”, 2014. Tese de Doutorado.

M. CHAMIA AND S. LIBERMAN - “Ultra High Speed Relay for EHV/UHV Transmission Lines – Development Design and Application,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol PAS-97, Issue 6, November 1978, pp. 2104-2116

M. VITINS - “A Fundamental Concept for High Speed Relaying,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, Issue 1, January 1981, pp. 163-173.

MAMEDE FILHO, J. – *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*, 2014. P.444

MASCHER, L.J.D. – “*Impedâncias dos Loops F-F e F-T*” Literatura Técnica – PSYS Ltda.

NEPOMUCENO, R. – “*Análise das Correntes de Infeed no Desempenho da Proteção de Distância de Linhas de Transmissão*”, 2013 Trabalho de Graduação.

ROBERTS, J., & GUZMAN, A. (1993). *Z=V/I Não Faz Um Relé de Distância*. WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE. SPOKANE, WASHINGTON.

ROCHA, G – “*Como Funciona a Proteção de Distância no Domínio do Tempo?*”, publicado em *selinc.com* em 2017. Acessado em 29/04

SCHWEITZER, *et al.* – “*Speed of Line Protection – Can We Break Free of Phasor Limitations?*”, 2014.

SCHWEITZER, *et al* – “*Performance of Time-Domain Line Protection Elements on Real-World Faults*”, 2015

SCHWEITZER, *et al* – “*Princípios e Implementação da Nova Proteção de Linha no Domínio do Tempo*”, 2016

SCHWEITZER, *et al* – “*Defining and Measuring the Performance of Lines Protection Relays*,” 2016

SEL. (2004) – *Proteção de Sistemas Elétricos para Engenheiros*. SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, COMERCIAL LTDA.

SEL-T400L DATASHEET – “*Ultra High-Speed Transmission Line Relay Traveling-Wave Fault Locator High-Resolution Event Recorder*”, 2017.

SINISA J. ZUBIC, MILENKO B. DJURIC – “*A Distance Relay Algorithm Based on the Phase Comparison Principle*,” 2012.

T. TAKAGI, Y.YAMAKOSHI – “Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 8 August 1982.

T400L-PF00545 – Manual SEL-T400L, 2017

ZANETTA Jr., L.C. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. São Paulo, SP – Brasil: Edusp – Editora da Universidade de São Paulo, 2003

ZANETTA Jr., L.C – “*Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência*”, 2006.

ZIEGLER – “*Numerical Distance Protection*”, 2006.