MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

João Victor Moraes Labre
Matheus Vicente de Paula

Desempenho da Função de Sobrecorrente Aplicada à Proteção de Linhas de Transmissão: Avaliação de Falha de Seletividade

Goiânia – GO

2021

SIBI
SISTEMA DE BIBLIOTECAS UFG

EMC

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC nº 1204/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura; impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG):

Nomes completos dos autores: João Victor Moraes Labre e Matheus Vicente de Paula

Título do trabalho: Desempenho da Função de Sobrecorrente Aplicada à Proteção de Linhas de Transmissão: Avaliação de Falha de Seletividade.

2. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [ ] NÃO[1]

Independente da concordância com a disponibilização eletrônica, é imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF do TCCG.

João Victor Moraes Labre Matheus Vicente de Paula
Assinatura dos autores[2]

Ciente e de acordo:
Igor Kopcak
Assinatura do orientador[2]

Data: 20 / 01 / 2021

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: (a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.
Casos de embargo:
- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;

[2] As assinaturas devem ser originais sendo assinadas no próprio documento, imagens coladas não serão aceitas.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

João Victor Moraes Labre
Matheus Vicente de Paula

Desempenho da Função de Sobrecorrente Aplicada à Proteção de Linhas de Transmissão: Avaliação de Falha de Seletividade

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à disciplina TCC, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Igor Kopcak

Universidade Federal de Goiás – UFG

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação

Goiânia – GO

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Moraes Labre, João Victor
Desempenho da Função de Sobrecorrente Aplicada à Proteção de Linhas de Transmissão [manuscrito] : Avaliação de Falha de Seletividade / João Victor Moraes Labre, Matheus Vicente de Paula. - 2021.
XVII, 17 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Igor Kopcak.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Elétrica, Goiânia, 2021.
Bibliografia.
Inclui gráfico, tabelas.

1. Sistemas elétricos de potência. 2. Proteção de sobrecorrente. 3. Relé 51. 4. Proteção de linhas de transmissão. I. Vicente de Paula, Matheus. II. Kopcak, Igor, orient. III. Título.

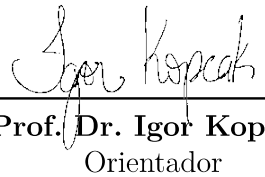
CDU 621.3

João Victor Moraes Labre
Matheus Vicente de Paula

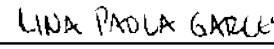
Desempenho da Função de Sobrecorrente Aplicada à Proteção de Linhas de Transmissão: Avaliação de Falha de Seletividade

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à disciplina TCC, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

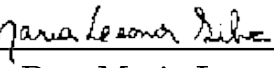
Trabalho aprovado. Goiânia – GO, 18 de janeiro de 2021:



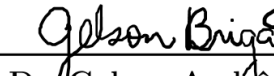
Prof. Dr. Igor Kopcak
Orientador



Profa. Dra. Lina Paola Garces Negrete
Convidada



Profa. Dra. Maria Leonor Silva de Almeida
Convidada



Prof. Dr. Gelson Andrêa Brigatto
Convidado

Goiânia – GO
2021

Desempenho da Função de Sobrecorrente Aplicada à Proteção de Linhas de Transmissão: Avaliação de Falha de Seletividade

João Victor Moraes Labre & Matheus Vicente de Paula

***Resumo*—A proteção de Sistemas Elétricos de Potência tem como principal componente os relés de proteção. Quando há algum defeito ou perturbação no sistema, os relés devem ser sensibilizados para que, numa ação coordenada, atuem isolando o defeito pela desconexão da menor porção possível do sistema. Este trabalho de conclusão de curso tem como proposta analisar o desempenho da função de sobrecorrente temporizada de fase e de neutro (ANSI 51/51N), com o intuito de verificar possíveis situações de atuação indevida, especialmente quanto à perda de seletividade. Para tanto, realizaram-se diversas simulações de condições de falta em um sistema constituído de duas linhas de transmissão paralelas, desconsiderando o acoplamento magnético, em tensão de 230 kV, cujos dados são baseados em um sistema real. Toda a modelagem foi realizada no ambiente *ATP*. Foram simuladas as seguintes faltas: monofásica-terra, bifásica, bifásica-terra, e trifásica. As faltas foram aplicadas ao longo de toda a extensão das linhas de transmissão, em intervalos de 10% do seu comprimento, mantendo-se um circuito são e outro defeituoso. Também foram consideradas faltas francas e com resistência de falta de $40\ \Omega$. Os resultados foram analisados de acordo com os sinais de TRIP de cada relé após a aplicação da falta. Verificou-se que a função de sobrecorrente é insuficiente para uma proteção satisfatória do sistema analisado, no que diz respeito à seletividade da eliminação do defeito, tendo em vista que foram observadas situações em que haveria a abertura de pelo menos um dos extremos da linha de transmissão sã. Por outro lado, observou-se que a função de sobrecorrente de neutro contribui para o aumento da sensibilidade do sistema de proteção, facilitando o ajuste da proteção de sobrecorrente de fase, complementando-a.**

***Palavras-chave*—Sistemas elétricos de potência, proteção de sobrecorrente, relé 51, proteção de linhas de transmissão.**

Abstract*—*The protection of Electrical Power Systems has relays as main components. When there is a defect or disturbance in the system, the relays must be sensitized and, in a coordinated action, they act by isolating the defect by disconnecting the smallest possible portion of the system. This paper aims to analyze the performance of the phase overcurrent and neutral function (ANSI 51 / 51N), in order to check possible situations of improper performance, especially regarding the loss of selectivity. For this purpose, several simulations of fault conditions were applied in a system consisting of two parallel transmission lines, disregarding the magnetic coupling, at a voltage of 230 kV, based on a real system. All modeling was performed in the ATP environment. The following faults were simulated: single-phase, two-phase, two-phase-ground, and three-phase. The faults were applied along the entire length of the transmission lines, at intervals of 10% of their length, maintaining a healthy circuit and a defective one. Faults with $0.1\ \Omega$ and $40\ \Omega$ fault resistance were considered. The results were analyzed according to the TRIP signals of each relay after the fault was applied. It was found that the overcurrent function is insufficient for satisfactory protection of the analyzed system, with regard to the selectivity of defect elimination, considering that situations were observed in which there would be the opening of at least one of the sides of the healthy line. On the other hand, it was observed that the neutral overcurrent function contributes to increase the sensitivity of the protection system, facilitating the adjustment of the phase overcurrent protection, complementing it.

Index Terms*—*Electric power systems, overcurrent protection, relay 51, protection of transmission lines.

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação – EMC
Universidade Federal de Goiás – UFG

I. Introdução

A Energia elétrica é um bem essencial para o desenvolvimento econômico e social. Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) têm como fundamento garantir um fornecimento amplo, seguro, e contínuo de energia, tal que, quando condições adversas ocorrerem, sejam capazes de minimizar a duração e a extensão de desligamentos emergenciais do sistema. Diante disso, é constante a busca pelo aprimoramento e o desenvolvimento de técnicas que assegurem melhores sistemas de proteção.

Perturbações que afetem a continuidade ou a qualidade do fornecimento sempre irão ocorrer, devido a eventos naturais, como descargas atmosféricas, imprevistos causados por condições climáticas adversas, falhas em equipamentos, erros humanos, dentre outras perturbações. Boas práticas de manutenção preventiva são essenciais para evitar faltas em um sistema elétrico. Em áreas rurais, contaminações de isoladores por poeira, pesticidas, *sprays* fertilizantes, ou até mesmo sal, em áreas costeiras, são fatores que criam pontos de possíveis curtos-circuitos decorrentes de falha na isolação. Uma boa manutenção da faixa de servidão de uma linha de transmissão é de extrema importância para diminuir o índice de faltas ocasionadas por contato entre a vegetação e os condutores energizados. Entretanto, independentemente das ações de manutenção, uma vez que ocorra um curto-circuito, o trecho defeituoso deve ser desenergizado o mais rapidamente possível, para evitar que as elevadas correntes de falta causem danos às linhas de transmissão e/ou aos demais equipamentos da rede [1].

A Tabela I apresenta o percentual de incidência de falhas em equipamentos típicos de SEP [2]. Nota-se que mais de 69% dos registros referem-se a faltas em linhas de transmissão, visto serem os elementos mais expostos do sistema.

Na Tabela II retratam-se os principais tipos de falta em linhas de transmissão, em termos percentuais de ocorrência,

Tabela I
ESTATÍSTICA DE FALHA PARA ALGUNS EQUIPAMENTOS DO SISTEMA. FONTE: [3].

Equipamento	Desligamento	Porcentagem (%)
Linhas de transmissão	6490	69,3
Transformadores	1306	13,9
Geradores	873	9,3
Barramentos	129	1,4
Reatores	108	1,2
Banco de capacitores	343	3,7
Compensadores síncronos	59	0,6
Compensadores estáticos	63	0,7
Total	**9371**	**100**

conforme a quantidade de fases envolvidas no curto-circuito, com ou sem contato com a terra.

Tabela II
FALTAS EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO. FONTE: [1]

Tipo de curto	Ocorrência (%)
Monofásico-terra	70% - 80%
Bifásico-terra	10% - 17%
Bifásico	8% - 10%
Trifásico	2% - 3%

Os dados da Tabela I permitem concluir que as linhas de transmissão são componentes do sistema que merecem atenção especial quanto ao estudo e implementação de sistemas de proteção. Já a Tabela II, mostra que faltas monofásicas são muito mais frequentes, colocando como desafio adicional para os sistemas de proteção a garantia de sensibilidade a faltas que podem apresentar correntes com magnitudes da mesma ordem de grandeza das correntes normais de carga. Não obstante, a literatura é rica em métodos para proteção de linhas de transmissão, como as diversas variantes das funções de proteção de distância, direcional, diferencial [1], [2], [4], [5].

Os sistemas de proteção de linhas de transmissão têm como principais dispositivos os relés de proteção, cuja função é detectar e determinar rapidamente sobre a interrupção (ou não) da porção defeituosa da rede, resguardando-se os SEP contra uma vasta gama de faltas possíveis. Os atuais relés de proteção digitais, também conhecidos como IED (*Intelligent Electronic Devices*), podem ter implementadas uma ou mais funções de proteção, conforme as especifidades do componente ou equipamento a ser protegido. Dentre os vários tipos existentes de funções de proteção, neste trabalho serão avaliadas as funções de sobrecorrente temporizada de fase (ANSI 51) e de neutro (ANSI 51N), para proteção de linhas de transmissão em um sistema malhado.

É objetivo deste trabalho apontar, por meio de simulações no *software ATP*, as limitações da função de sobrecorrente 51 e 51N, quando aplicadas à proteção de sistemas elétricos malhados. Para tanto, será considerado um sistema teste com duas subestações interligadas por duas linhas de transmissão de 230 kV idênticas, paralelas e com o acoplamento desconsiderados, as quais operam com uma corrente de carga aproximada de 388 ampères, cada. As simulações consistiram em submeter essas linhas a faltas francas e de baixas impedâncias dos tipos monofásica-terra, bifásica isolada, trifásica isolada, e bifásica-terra em intervalos de 10% do comprimento total das linhas, mantendo um circuito são e outro defeituoso.

O presente trabalho está dividido como se segue. A Seção II aborda alguns conceitos básicos de sistemas de potência, como: componentes simétricas, análise de curtos-circuitos e o funcionamento dos relés de sobrecorrente temporizados, além de uma breve apresentação do *software* de simulação *ATP*. Já na Seção III será descrita a metodologia e todos os parâmetros utilizados para, por meio de simulações, apontar possíveis comportamentos inadequados dos relés de sobrecorrentes em sistemas malhados. Na Seção IV são expostos resultados obtidos e sua respectiva análise. Por fim, na Seção V são apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

II. BASE TEÓRICA

A. Conceito de SEP

Um Sistema Elétrico de Potência (SEP) é constituído por usinas geradoras, linhas de transmissão de alta tensão e sistemas de distribuição como mostrado na Figura 1. As usinas geradoras são responsáveis pela geração de energia e, a partir de então, as linhas de transmissão são encarregadas de transportar grandes quantidades de energia elétrica até o sistema de distribuição, este que é responsável de garantir que a eletricidade chegue ao consumidor final.

No sistema elétrico brasileiro, as usinas geradoras se situam em pontos favoráveis ao aproveitamento dos recursos energéticos, próximas aos recursos naturais disponíveis para a geração de energia, predominando usinas hidrelétricas. A Figura 2 ilustra a composição percentual dos tipos de fonte de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional.

Nas usinas hidrelétricas, a energia elétrica é produzida em um nível de tensão da ordem de uma ou duas dezenas de kV, sendo a tensão mais comum 13,8 kV [6]. Entretanto, para longas distâncias de transmissão, esta tensão é muito baixa para que o transporte da energia seja economicamente viável. Desse modo, utilizam-se transformadores encarregados de elevar o nível de tensão, proporcionando assim uma maneira viável de transporte de energia elétrica em um país com dimensões continentais como o Brasil.

B. Componentes Simétricas

Os circuitos que compõem os SEP são projetados para operar de forma balanceada, ou equilibrada, ou seja, com tensões e correntes de mesmo módulo, defasadas de 120° entre si. No entanto, faltas como os curtos-circuitos podem gerar desbalanceamentos, dificultando a análise da resposta do sistema a tais contingências. O caminho para a obtenção de uma ferramenta analítica que facilitasse os estudos dos comportamentos de sistemas desequilibrados foi proposto por Leblanc em 1915 [9], da seguinte maneira: decompor fasores de corrente/tensão trifásicas desequilibradas em três grupos de fasores de corrente/tensão equilibradas.

Com essa ideia amadurecida, no mesmo ano, Fortescue [9] formulou uma ferramenta analítica, que de maneira genérica, é capaz de decompor um sistema de n fases desequilibradas nas

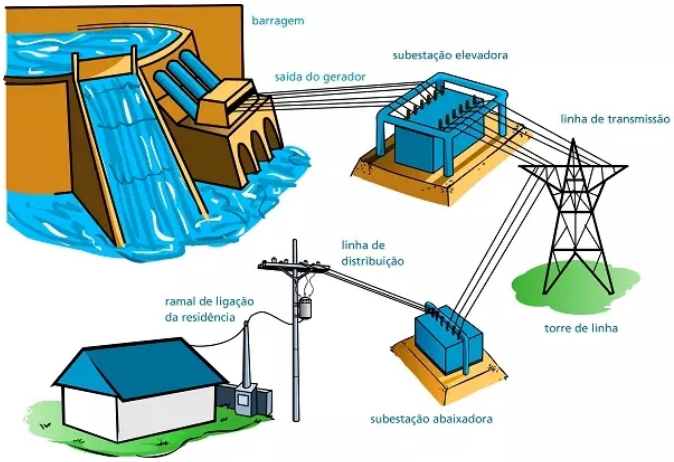


Figura 1. Diagrama esquemático de um SEP. Fonte: [7].

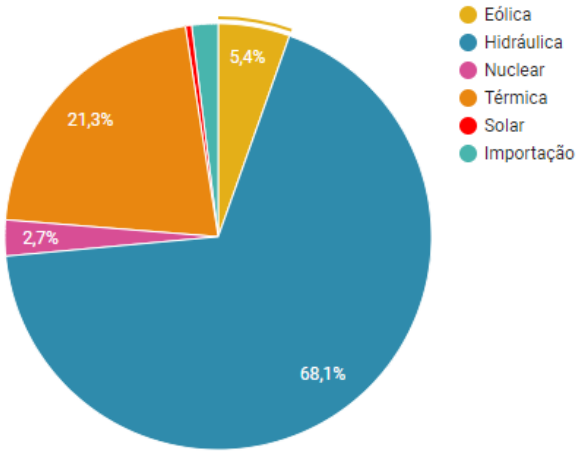


Figura 2. Composição percentual dos tipos de fonte de energia elétrica do SIN em 11 de Janeiro. de 2021. Fonte: [8].

suas respectivas componentes simétricas equilibradas. Mesmo tendo a formulação válida para inúmeras fases, será detalhado o uso desta ferramenta matemática para o sistema elétrico adotado internacionalmente, que é o trifásico.

Um sistema de 3 fasores desequilibrados pode ser decomposto em 3 sistemas de fasores equilibrados, denominados componentes simétricas dos fasores originais. O sistema desequilibrado original de sequência de fase a,b e c é representado pelo seus 3 fasores $\hat{V}_a, \hat{V}_b, \hat{V}_c$ que giram em velocidade síncrona na frequência da rede trifásica. Cada um dos fasores originais é decomposto em 3 fasores, designados componentes de sequência positiva, negativa e zero. Com isto, se obtém um conjunto de 3 sistemas equilibrados, ou seja, os 3 sistemas de sequências descritos a seguir: [9].

Sistema trifásico de sequência positiva, mostrado na Figura 3: é um conjunto de 3 fasores balanceados, de mesmo módulo, defasados de $120°$ e com a sequência de fase idêntica a do sistema trifásico original desequilibrado. Para a sequência positiva, adota-se o índice 1.

Sistema trifásico de sequência negativa, mostrado na Figura 4: é o conjunto de 3 fasores equilibrados, de mesmo módulo, defasados de $120°$ e girando no sentido contrário ao sistema trifásico original desequilibrado. O índice 2 representa sequência negativa.

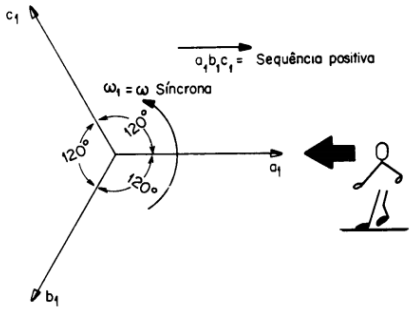


Figura 3. Sequência Positiva. Fonte: [9].

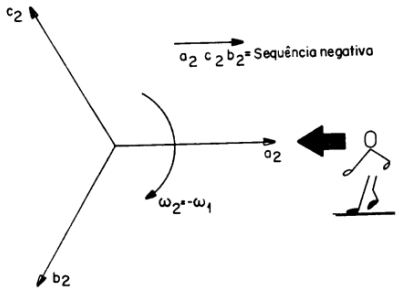


Figura 4. Sequência Negativa. Fonte: [9].

Sistema trifásico de sequência zero, mostrado na Figura 5: é um conjunto de 3 fasores iguais, em fase, girando no mesmo sentido do sistema original trifásico desbalanceado. O índice 0 representa sequência zero.

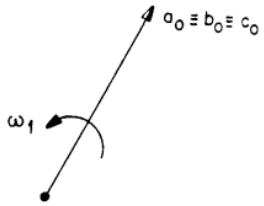


Figura 5. Sequência Zero. Fonte: [9].

Após apresentados os três sistemas trifásicos equilibrados que quando superpostos representam o sistema trifásico desequilibrado original, tem-se a expressão analítica do teorema de Fortescue (1)–(3).

$$\hat{V}_a = \hat{V}_{a_0} + \hat{V}_{a_1} + \hat{V}_{a_2} \quad (1)$$

$$\hat{V}_b = \hat{V}_{b_0} + \hat{V}_{b_1} + \hat{V}_{b_2} \quad (2)$$

$$\hat{V}_c = \hat{V}_{c_0} + \hat{V}_{c_1} + \hat{V}_{c_2} \quad (3)$$

Utilizando-se do operador α ($\alpha = 1\angle 120°$) de modo a colocar todas as tensões em função da fase a obtém-se (4)–(6).

$$\hat{V}_a = \hat{V}_{a_0} + \hat{V}_{a_1} + \hat{V}_{a_2} \quad (4)$$
$$\hat{V}_b = \hat{V}_{a_0} + \alpha^2 \hat{V}_{a_1} + \alpha \hat{V}_{a_2} \quad (5)$$
$$\hat{V}_c = \hat{V}_{a_0} + \alpha \hat{V}_{a_1} + \alpha^2 \hat{V}_{a_2} \quad (6)$$

Ou melhor representado, em forma de matriz (7),

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{V}_b \\ \hat{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_{a_0} \\ \hat{V}_{a_1} \\ \hat{V}_{a_2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

sendo a matriz

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}$$

chamada matriz transformação das componentes de sequência nos fasores originais do sistema desbalanceado.

Ao realizar o caminho contrário, ou seja, obter componentes de sequência em função dos sistema desbalanceado, tem-se (8)

$$\begin{aligned} \hat{V}_{a_0} &= \frac{1}{3}\left(\hat{V}_a + \hat{V}_b + \hat{V}_c\right) \\ \hat{V}_{a_1} &= \frac{1}{3}\left(\hat{V}_a + \alpha \hat{V}_b + \alpha^2 \hat{V}_c\right) \\ \hat{V}_{a_2} &= \frac{1}{3}\left(\hat{V}_a + \alpha^2 \hat{V}_b + \alpha \hat{V}_c\right) \end{aligned} \quad (8)$$

ou em forma matricial (9)

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_{a_0} \\ \hat{V}_{a_1} \\ \hat{V}_{a_2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{V}_b \\ \hat{V}_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

sendo T^{-1} a matriz inversa de T, ou seja, matriz de transformação dos fasores originais das componentes de fase, para os fasores das componentes de sequência.

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix}$$

De maneira análoga à feita para a tensão, temos paras as correntes as mesmas conclusões do teorema de Fortescue, conforme (10) e (11).

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_{a_0} \\ \hat{I}_{a_1} \\ \hat{I}_{a_2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_{a_0} \\ \hat{I}_{a_1} \\ \hat{I}_{a_2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

1) Análise da Corrente de Sequência Zero: O estudo da corrente de sequência zero merece destaque, pois sua interpretação é de extrema importância para aplicação direta à proteção de sistemas elétricos. Ao explicitar o fasor $\hat{I}_{a0}$ na equação (11), tem-se (12).

$$\hat{I}_{a_0} = \frac{1}{3}\left(\hat{I}_a + \hat{I}_b + \hat{I}_c\right) \quad (12)$$

Em um sistema como o da Figura 6, ao aplicarmos a primeira Lei de Kirchhoff, tem-se (13)

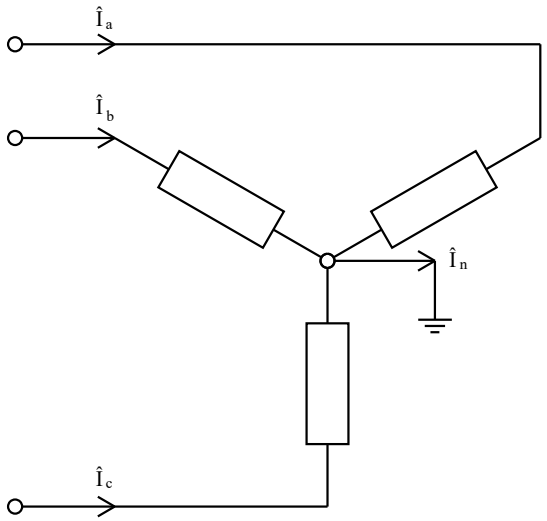


Figura 6. Carga ligada em **Y**. Fonte: Próprios autores.

$$\hat{I}_N = \hat{I}_a + \hat{I}_b + \hat{I}_c \quad (13)$$

$$\hat{I}_{a_0} = \frac{1}{3}\hat{I}_N \quad (14)$$

Conclui-se, assim, que só há circulação de corrente de sequência zero em um sistema com neutro aterrado. Além disso, nota-se que a corrente de neutro/terra em um sistema trifásico pode ser obtida diretamente da componente de sequência zero.

C. Curto-Circuito

O curto-circuito, apesar de indesejável, sempre ocorre em pontos aleatórios da rede elétrica. Se estes não forem rapidamente eliminados, podem causar danos severos em equipamentos e dispositivos que constituem o sistema elétrico envolvido. O conhecimento da corrente de curto-circuito é de extrema importância para efetuar a coordenação de relés de proteção. As principais causas de falhas que levam a curtos-circuitos são [9]:

- Problemas de isolação: rupturas para terra ou entre condutores;
- Problemas mecânicos: ação do vento, neve, árvores;
- Problemas elétricos: descargas atmosféricas diretas ou indiretas, manobras, sobretensão no sistema;
- Problemas de manutenção: substituição inadequada de peças e equipamentos, erros humanos;

- Problemas de natureza térmica: sobrecorrentes decorrentes de sobrecarga;
- Problemas de outra natureza: vandalismo, queimadas, inundações, desmoronamentos, entre outros.

Para fins de estudo, dividem-se os curtos-circuitos em dois tipos, simétricos e assimétricos.

Os curtos-circuitos simétricos são aqueles que no momento da falta as fases ficam equilibradas, com mesmo módulo de corrente e tensão e defasadas entre si em $120°$. Portanto, faltas trifásicas são simétricas, desta maneira se utiliza apenas o circuito de sequência positiva para seu estudo.

Já os curtos-circuitos assimétricos são aqueles que no momento da falta as fases sofrem desequilíbrio de tensão e/ou corrente. Portanto, curtos-circuitos bifásicos, bifásicos-terra, e monofásicos-terra são faltas assimétricas e, para esses casos, circuitos de sequência positiva, negativa e zero são objetos de estudos para auxiliar na análise.

D. Relés de proteção

Um relé de proteção pode ser definido como [10]: "um relé cuja função é detectar linhas ou aparelhos defeituosos ou outras condições do sistema de energia de uma natureza anormal ou perigosa e iniciar a ação do circuito de controle apropriado". A proteção dos sistemas elétricos de potência é feita por esquemas de proteção que, por sua vez, são basicamente comandados por relés. A função primordial desses relés é identificar os defeitos, localizá-los da maneira mais exata possível e executar a medida de proteção adequada para o sistema, promovendo o disparo de alarmes, sinalizações. Dependendo do caso, promovendo a abertura de disjuntores de modo a isolar o defeito, mantendo o resto do sistema em operação normal, sem que os efeitos dessa falha se propaguem e danifiquem equipamentos sãos [11]. Tendo os relés como o principal elemento da proteção de um SEP, estes dispositivos são responsáveis por serem sensíveis a algum defeito, como por exemplo, uma corrente de curto-circuito, e tomar a decisão de enviar um sinal de abertura para o disjuntor.

Um bom desempenho de um sistema de proteção garante a redução de danos em equipamentos devido às elevadas correntes de curto-circuito, bem como aumentam a segurança daqueles que operam ou até mesmo residem próximos às linhas de transmissão. Além disso, garante maior confiabilidade na transmissão de energia elétrica, atuando precisamente nos momentos de faltas e ocorrências anormais.

Atualmente, um mesmo relé digital pode executar diversas **funções de proteção**, dentre as quais podem ser destacadas: a proteção de distância, a proteção direcional de corrente, a proteção direcional de distância, a proteção diferencial, a proteção de sobrecorrente instantânea e temporizada, a proteção de sub e sobretensão, entre várias outras. Neste trabalho, serão estudados os elementos de sobre corrente temporizado de fase e de neutro.

1) Proteção de Sobrecorrente Temporizada: A proteção de sobrecorrente temporizada se baseia nas características dos antigos Relés de Sobrecorrente eletromecânicos. Faz parte da família de relés de magnitude, em que a grandeza monitorada é comparada a uma referência, e considera como situação anormal de operação sempre que a magnitude dessa grandeza ultrapassa o valor da referência ajustada.

A função de sobrecorrente temporizada é sensibilizada por correntes medidas maiores do que o seu ajuste (denominado corrente de *pickup*) e, a partir de então, respondem segundo uma curva de tempo inverso, que emula o comportamento dos relés eletromecânicos para, eventualmente, fornecer um sinal de *TRIP*. Este último é o comando enviado ao disjuntor para realizar a abertura do circuito e, consequentemente, isolar o trecho defeituoso do sistema [1], [2], [11].

O tempo decorrido desde a ocorrência do defeito até o envio do sinal de *TRIP* para o(s) disjuntor(es) é chamado de tempo de resposta do relé (t_s), e será tão menor, quanto maior for a corrente de falta. Desta característica decorre o nome de relé/função de sobrecorrente de "tempo inverso".

As curvas de tempo inverso são normatizadas pelo IEC e pelo IEEE. Neste trabalho, foram adotados os valores característicos das curvas do IEEE [12], Figura 7. A equação que define estas curvas é dada por (15).

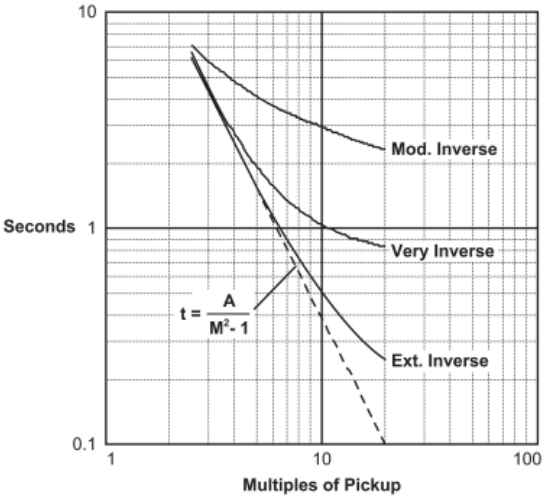


Figura 7. Comparação das características das curvas de tempo dos relés de sobrecorrente extremamente, muito e normalmente inversas. Fonte: [13].

$$t_s = D\left[\frac{A}{\left(\frac{I_{rms}}{I_s}\right)^{Q} - 1} + B\right] \tag{15}$$

em que t_s é o tempo de atuação do dispositivo, I_{rms} é a corrente no momento da falta, I_s a corrente de ajuste de *pickup*, D o *dial*, que é multiplicador de ajuste da curva, e A, Q e B variáveis que definem as curvas como normal inversa, muito inversa ou extremamente inversa, de acordo com a Tabela III.

Note-se que a Tabela III apresenta o parâmetro t_r, correspondente ao 'tempo de *reset*' do relé, o qual não é uma variável da equação (15). Este parâmetro é exclusivo da normatização das curvas de tempo inverso do IEEE e se refere ao tempo necessário para que o relé retorne ao seu estado de repouso inicial, caso a corrente de curto-circuito tenha sido extinta (pela abertura de outro dispositivo de proteção, ou pela auto-

Tabela III
PARÂMETROS DAS CURVAS DE TEMPO INVERSO IEEE. FONTE: [12].

	Normal Inversa	Muito Inversa	Extremamente Inversa
A	0,0515	19,61	28,20
B	0,1140	0,491	0,1217
Q	0,02	2	2
t_r	4,85	21,6	29,1

extinção da falta) antes de decorrido o tempo para que o relé processe e envie um sinal de TRIP ao seu disjuntor.

E. Alternative Transient Program (ATP)

A presente seção apresenta o *software* utilizado nas simulações presentes no artigo. O *ATP* é um sistema de programa universal para simulação digital de fenômenos transitórios de natureza eletromagnética e eletromecânica. Com este programa digital, redes complexas e sistemas de controle de estrutura arbitrária podem ser simulados. O *ATP* possui amplos recursos de modelagem e recursos adicionais importantes, além do cálculo de transientes. Ele tem sido desenvolvido continuamente por meio de contribuições internacionais a mais de 30 anos.

O sistema proposto neste trabalho foi desenhado e simulado completamente dentro do ambiente *ATPDraw* [14]. O *ATPDraw* é um pré-processador gráfico dirigido por *mouse* para a versão *ATP* do *EMTP* (*Electromagnetic Transients Program*). O sistema desenhado no *ATPDraw* é convertido para uma linguagem que o *ATP* é capaz de interpretar e calcular todos os seus comportamentos.

No *ATPDraw* é possível desenhar sistemas a partir do *mouse*, selecionando dispositivos e equipamentos através de menus no *display* de maneira fácil e rápida. Então o arquivo que será simulado pelo *ATP* é gerado pelo *ATPDraw* de maneira fácil e conveniente para o usuário.

Também dentro do *ATPDraw*, existe a biblioteca *Power System Tools*, onde são disponibilizados modelos de dispositivos e equipamentos utilizados em simulações de SEP. Os elementos presentes nesta biblioteca foram implementados na linguagem *MODELS*, uma linguagem de descrição de propósito geral suportada por um conjunto de ferramentas de simulação para a representação e estudo de sistemas variantes no tempo.

III. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A Figura 8 apresenta o diagrama unifilar do sistema teste utilizado, o qual consiste de duas linhas de transmissão de 230 kV, paralelas, idênticas e com o acoplamento desconsiderado, que têm seus extremos conectados a equivalentes do sistema.

A. Sistema Teste

Como previamente citado, o objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho da função de sobrecorrente temporizada quanto à proteção de sistemas de transmissão minimamente malhados.

Para tanto, o SEP ilustrado pela Figura 8 foi implementado no *ATPDraw*, conforme mostra a Figura 9.

O sistema implementado no *ATPDraw* consiste nos seguintes elementos:

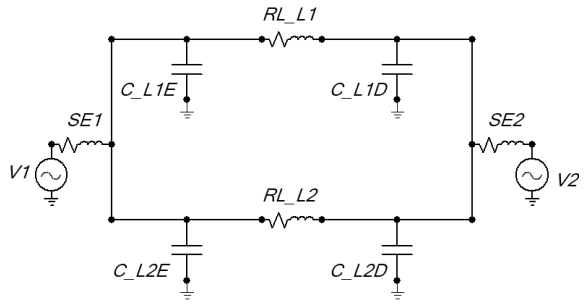


Figura 8. Diagrama unifilar do sistema teste proposto. Fonte: Próprios autores.

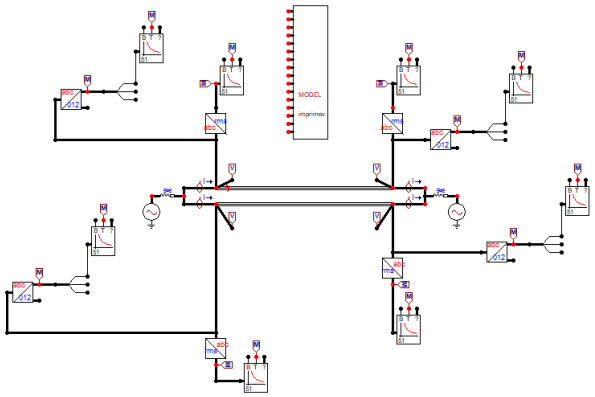


Figura 9. Representação do Sistema Teste no *ATPDraw*. Fonte: Próprios autores.

- 2 Linhas de transmissão;
- 4 Relés de sobrecorrente temporizados - Elemento de fase;
- 4 Relés de sobrecorrente temporizados - Elemento de neutro;
- 4 Voltímetros;
- 4 Amperímetros;
- 2 Fontes CA Ideais;
- 4 Conversores *abc/RMS*, para obtenção do valor eficaz;
- 4 Conversores *abc/012* para obtenção das componentes de sequência (positiva, negativa e zero);
- *MODEL de saída* para envio de dados para a área de trabalho;

A Figura 10 mostra em detalhe dois dos elementos de proteção, 51 e 51N, incluídos no sistema da Figura 9, bem como seus respectivos blocos de alimentação. Como em sistemas reais, esses estão situados nos extremos das linhas, ou seja, cada extremo de linha possui dois dispositivos, um de fase e outro de neutro. Na prática, a posição dos dispositivos de proteção é definida pela posição dos transformadores de corrente, TC, que fornecerão a amostra de corrente para os relés. Cada voltímetro é responsável pela medição das tensões em cada barra, representando os transformadores de potencial (TP), assim como o amperímetro amostra as correntes de cada extremo das linhas, como fariam os TC. Os blocos *abc/rms* convertem as correntes de valor instantâneo para valor eficaz, para alimentação dos relés de proteção de fase (51). Já o

bloco *abc/012* converte as correntes de fase em correntes de sequência, para alimentação dos relés de sobrecorrente de neutro (51N).

Todos os blocos apresentados nas Figuras 9 e 10 estão disponíveis nas bibliotecas do *ATPDraw*, no entanto, por conveniência deste estudo, foram implementadas alterações em alguns deles, as quais serão pormenorizadas na Subseção III-B.

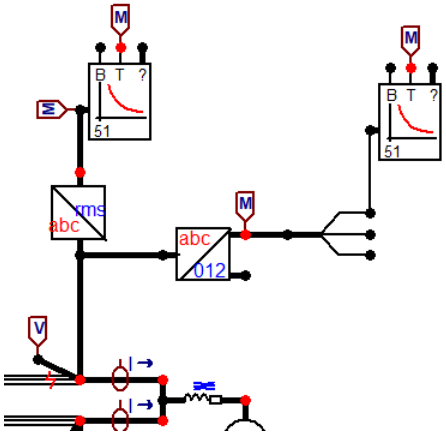


Figura 10. Disposição dos elementos no sistema. Fonte: Próprios autores.

As linhas de transmissão foram implementadas usando o modelo 'LINE3', disponibilizado pela biblioteca *Power System Tools* do *ATPDraw*. O bloco LINE3 utiliza o modelo Π de parâmetros concentrados para a modelagem matemática da LT e requer, como dados de entrada, os valores das impedâncias de sequência positiva e zero, em Ω/km, e o comprimento, em km, da Linha de Transmissão. A LT é considerada perfeitamente transposta, tal que as impedâncias de sequência positiva são iguais as impedâncias de sequência negativa. É também no próprio modelo da linha de transmissão em que são definidas as características da falta, como a quantidade de fases envolvidas, sua conexão (ou não) com a terra, o valor da resistência de falta, o instante de ocorrência do curto-circuito e de sua extinção, e o local de ocorrência, em percentual do comprimento total da LT.

As Linhas de Transmissão do sistema teste utilizado neste trabalho têm seus dados baseados em um circuito real, os quais são listados a seguir:

- Nível de tensão: 230 kV;
- Comprimento: 94,3 km;
- $Z_1 = 9{,}3159 + j48{,}8727\ \Omega$;
- $Z_0 = 48{,}1184 + j141{,}428\ \Omega$;
- $B_1 = 300{,}304\ \mu S$;
- $B_0 = 207{,}804\ \mu S$;

sendo que Z_1 e B_1 são, respectivamente, a impedância e a susceptância de sequência positiva e, por sua vez, Z_0 e B_0 são a impedância e a susceptância de sequência zero, de cada uma das linhas de transmissão.

As LT fazem a conexão de duas subestações, as quais são representações dos equivalentes de *Thévenin* vistos em cada extremo das linhas. A modelagem desses equivalentes é dada pelos níveis de curto-circuito em cada extremo das LT.

A SE situada à esquerda do sistema teste, conforme Figura 9, denominada **SE 1** possui a seguinte característica:

- $Z1_1 = 0{,}3219 + j9{,}1305\ \Omega$
- $Z1_0 = 0{,}4447 + j5{,}2263\ \Omega$

em que $Z1_1$ e $Z1_0$ são, respectivamente, as impedâncias de sequência positiva e sequência zero da Subestação 1.

Já a subestação situada no lado direito do diagrama da Figura 9, é denominada **SE 2**, e é definida por:

- $Z2_1 = 9{,}4675 + j57{,}5869\ \Omega$
- $Z2_0 = 0{,}9838 + j19{,}8158\ \Omega$

em que $Z2_1$ e $Z2_0$ são, respectivamente, as impedâncias de sequência positiva e sequência zero da Subestação 2.

E, compondo o equivalente *Thévenin*, foram inseridas duas fontes senoidais de tensão ideal:

- $\hat{V}_1 = V_1 \angle \theta_1 = 1 \angle 0°\ pu$, e;
- $\hat{V}_2 = V_2 \angle \theta_2 = 1 \angle 32°\ pu$;

tal que os índices '1' e '2' referem-se aos barramentos das **SE 1** e **SE 2**, respectivamente.

A diferença angular arbitrada entre os barramentos ($\theta_2 - \theta_1 = 32°$), também entendida como a abertura angular das LT, impõe um fluxo de potência ativa de 154,6 MW em cada LT, no sentido de **SE 2** para **SE 1**, correspondendo a uma corrente de carga de aproximadamente 388 A nas LT. Na ausência de maiores informações sobre os níveis de carregamento dos circuitos, optou-se neste trabalho por arbitrar um carregamento elevado ao sistema, de forma a dificultar o ajuste das proteções de sobrecorrente quanto a sua sensibilidade às correntes de curto-circuito mínimo, visto que estas últimas teriam valores mais próximos das correntes normais de carga do sistema.

B. Modificações realizadas em modelos do ATP

Além dos componentes previamente definidos no *ATP*, novos componentes podem ser criados utilizando-se a linguagem de simulação *MODELS*. O *ATPDraw* possibilita apenas uma utilização restrita da linguagem *MODELS*, que permite ao usuário escrever um modelo, ficando o *ATPDraw* encarregado da inserção das variáveis de entrada e saída do arquivo ATP [15].

Diversos componentes disponibilizados na Biblioteca *Power System Tools* foram utilizados para a composição do sistema teste utilizado nas simulações, conforme Figura 9. Entretanto, foram implementadas algumas alterações na modelagem de alguns destes dispositivos para adequá-los à necessidade deste trabalho.

1) Alteração no relé de sobrecorrente de fase.: No *ATPDraw*, o modelo do Relé de Sobrecorrente Temporizado 51 está configurado para ter seu sinal de *TRIP* ativo em nível baixo (0 – zero). Com objetivo de adequar aos padrões mais usuais da representação do *status* de atuação de relés, o *MODELS* correspondente foi alterado para que o sinal de *TRIP* ativo seja representado por nível lógico alto (1 – um).

2) Alteração no conversor de componentes de fase para componentes de sequência.: Normalmente não há a medição direta da corrente de neutro/terra em linhas de transmissão, visto não ser disponível um ponto físico para a instalação de TC com essa finalidade (o aterramento do neutro, se houver, se

dá nos transformadores). Portanto, a corrente de neutro/terra da LT é obtida da conexão Y dos secundários dos TC de fase, ou é numericamente calculada pelo *IED*/Relé a partir da amostra das correntes de fase.

No *ATPDraw* os modelos gráficos das linhas de transmissão, em consonância com uma LT real, não disponibilizam as correntes de neutro. Portanto, para a obtenção de um ponto de neutro ou terra, uma opção para a proteção de sobrecorrente de neutro está na análise do domínio das sequências. Desta maneira, para se obter o módulo da corrente de neutro, o bloco conversor do domínio das fases para o da sequência foi alterado.

Originalmente, este modelo tem duas saídas trifásicas, uma com a parte real do domínio da sequência e outra com uma saída trifásica da parte imaginária. Como o elemento de sobrecorrente de neutro utiliza o módulo da corrente de neutro, a alteração realizada foi quanto à saída deste *MODEL*, que neste trabalho tem uma única saída utilizada. Após feita a modificação, esta saída agora está fornecendo os módulos, em valores de pico, das correntes de sequências 0, 1 e 2.

3) Implementação do Relé de Sobrecorrente de Neutro Temporizado: Neste trabalho foi implementado um Relé de Sobrecorrente de Neutro 51N a partir do modelo de relé de sobrecorrente (de fase) disponível no *ATPDraw*.

O bloco que representa o elemento 51 original foi modelado para receber como entrada um sinal multiplexado das correntes trifásicas de fase amostradas. Entretanto, para a implementação do relé de sobrecorrente de neutro deste trabalho, considerou-se utilizar como entrada apenas o sinal correspondente a corrente de neutro propriamente, aqui calculada pelo triplo da corrente de sequência zero. Com isso, não é necessário calcular a corrente de neutro internamente no bloco do relé a partir das 3 correntes de fase. Optou-se por essa estratégia de modelagem, para que o elemento de neutro possa ser utilizado em sistemas em que a corrente de neutro/terra possa ser medida diretamente, quando há acesso físico disponível, como nos pontos de aterramento de conexão Y de transformadores e geradores.

Dessa forma, para as simulações deste trabalho, a saída do bloco conversor *abc/012* foi submetida a um *splitter*, cuja função é separar os sinais multiplexados de sequência positiva, negativa e zero, em três sinais que pudessem ser acessados separadamente no ambiente gráfico do *ATPDraw*, como visto na figura 11. Assim a saída deste dispositivo fica separada em: um "condutor" representando a sequência 0, outro a sequência positiva, e o terceiro a sequência negativa.

Além disso, foi necessário alterar a lógica interna do *MODEL* referente ao relé 51 original, para que este passa-se a considerar apenas o elemento referente à entrada de corrente de sequência zero graficamente conectada ao bloco. Pois sem essa alteração, o modelo mantinha o processamento de 3 elementos, podendo gerar *TRIP* para as correntes de sequência positiva e negativa, mesmo estas não estando graficamente conectadas à entrada do relé.

Com essa modelagem, o elemento de sobrecorrente de neutro proposto pode ser utilizado de forma independente, seja a corrente de neutro diretamente acessível no sistema, ou obtida da componente de sequência zero das correntes de fase.

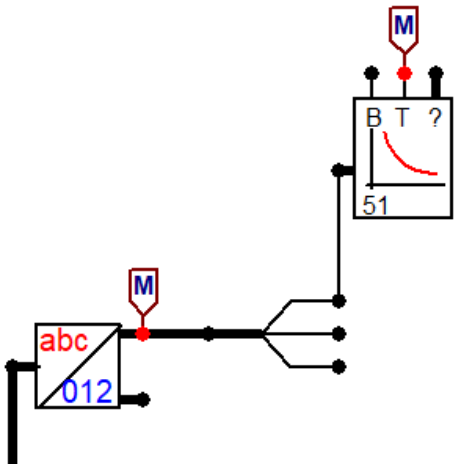


Figura 11. Splitter utilizado para obter o módulo da seq. 0. Fonte: Próprios autores.

C. Parametrização dos Relés

Quanto aos relés, estes precisam de leituras de corrente oriundas do sistema para exercerem seus papéis no sistema de proteção. As informações de corrente de fase, chegam através do bloco conversor *abc/RMS* ao elemento de sobrecorrente temporizado. Este *MODEL* está ajustado para analisar 32 amostras por ciclo da corrente medida, tendo na sua entrada os sinais trifásicos da corrente e, em sua saída, o valores RMS destas correntes.

Tratando-se do elemento de sobrecorrente de neutro, como visto anteriormente na Subseção II-B, somente em situações de faltas que envolvam a terra ou o neutro existirá corrente de sequência 0. Dessa maneira, necessita-se que a entrada do relé de neutro seja sensibilizada para as faltas que envolvam a terra. A biblioteca *Power System Tools* fornece um bloco conversor em que a entrada são as correntes no domínio das fases e em suas saídas se obtém estas correntes no domínio das sequências. Dessa maneira é possível se obter a corrente da sequência 0, que foi conectada ao elemento de sobrecorrente temporizado de neutro.

Para facilitar a compreensão, foram definidas algumas nomenclaturas em conformidade com a Figura 9:

- L1 – Linha de transmissão 1, posicionada na parte superior do diagrama;
- L2 – Linha de transmissão 2, posicionada na parte inferior do diagrama;
- E – Terminal esquerdo de L1 e L2, conectado à SE 1;
- D – Terminal direito de L1 e L2, conectado à SE 2;
- F – Elemento de proteção de fase;
- N – Elemento de proteção de neutro;
- R – Relé de Sobrecorrente Temporizado;

tal que **RF1E** se refere ao relé de sobrecorrente de fase instalado no terminal esquerdo da Linha de Transmissão 1,

ou **RN2D** é o relé de sobrecorrente de neutro instalado no terminal direito da linha de transmissão 2, por exemplo.

Ressalta-se que é comum na literatura sobre sistemas de proteção fazer referência aos relés, e/ou aos seus pontos de instalação, como relé/terminal "local" e "remoto", ou à "montante" e à "jusante". No entanto, os dois últimos são aplicáveis apenas a redes radiais, enquanto os primeiros são bastante relativizados quando o estudo envolve a modelagem de mais de uma linha de transmissão em sistemas malhados. Por essa razão esses termos foram evitados neste texto, lançando-se mão da nomenclatura descrita acima, supondo facilitar para o leitor a identificação do tipo e local de instalação do relé, em relação aos diagramas mostrados nas Figuras 8 e 9.

O elemento de sobrecorrente temporizado requer a escolha de uma curva de tempo inverso padronizada, responsável pelo desempenho do relé no sistema protegido. De acordo com [11], linhas de comprimento médio, devem adotar a curva de tempo muito inversa. Assim, a equação (15) será usada com os seguintes parâmetros [12]:

$$t_s = D\left[\frac{19{,}61}{\left(\frac{I_{rms}}{I_s}\right)^2 - 1} + 0{,}491\right] \tag{16}$$

sendo que o dial de tempo, D, e a corrente de ajuste de *pickup*, I_s, serão definidos nas Subseções III-C1 e III-C2.

Os tempos de isolamento dos defeitos devem considerar os tempos dos dispositivos de manobra/interrupção, os quais dependem dos equipamentos correspondentes e do arranjo físico da subestação, somados aos tempos de atuação do próprio sistema de proteção. Tempos indicativos de isolamento do defeito são apresentados na Tabela IV. Estes valores só devem ser utilizados quando não houver informações disponíveis nos bancos de dados ou quando não forem fornecidas pelos agentes [16]. Como o sistema proposto não possui informações disponíveis, será utilizado o valor sugerido pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) em [16]. Para uma tensão de 230 kV e considerando que o disjuntor tenha uma abertura instantânea, tem-se um tempo de eliminação de 150 ms.

Tabela IV
TEMPOS INDICATIVOS DE ELIMINAÇÃO DE DEFEITOS. FONTE: [16]

Tensão nominal de operação (kV)	**Tempo de eliminação (ms)**	
	Sem falha do disjuntor	**Com falha do disjuntor**
765	80	200
525 e 500	100	250
440	100	250
345	100	400
230	150	500
138	150	500

1) Parametrização do Elemento de Fase: Ao se tratar do ajuste dos elementos de sobrecorrente de fase, foi adotada a metodologia sugerida por [1] em que, em uma linha de transmissão, o elemento de fase deverá atuar para a menor corrente de curto-circuito possível (em um tempo adequado), que neste caso é o curto-circuito bifásico no extremo da linha mais distante do relé ($I_{CC2\phi 100\%LT}$). Considerando que as LT são idênticas e paralelas, os relés **RF1E** e **RF2E** terão o mesmo ajuste. Diante disso, por meio de simulações no *software ATPDraw* obteve-se o valor da corrente de curto-circuito mínima que deve sensibilizar os elementos de fase dos relés instalados no terminal esquerdo das LT:

$$I^E_{CC2\phi 100\%LT} = 1493\ A$$

Similarmente, os relés **RF1D** e **RF2D**, instalados no extremo direito das LT, compartilham do mesmo ajuste. Para estes, a menor corrente de curto-circuito bifásica, obtida por meio de simulação, é:

$$I^D_{CC2\phi 100\%LT} = 1506\ A$$

De acordo com [11], para uma proteção adequada, tal que o relé tenha sensibilidade para detectar todas as possíveis correntes de curto-circuito no seu trecho, o ajuste da corrente no relé deve satisfazer a inequação (17).

$$1{,}5\ I_{nominal} \leq I_{pickup} \leq \frac{I_{CC2\phi 100\%L.T}}{1{,}5} \tag{17}$$

Considerando uma $I_{nominal} = 388\ A$ e as respectivas correntes de curto-circuito bifásico mínimas para cada conjunto de relés, tem-se:

a) para o ajuste de RF1E e RF2E

$$584\ A \leq I_{pickup} \leq 995{,}33\ A$$

b) para o ajuste de RF1D e RF2D

$$584\ A \leq I_{pickup} \leq 1004\ A$$

Ainda de acordo com [11], dependendo da análise, pode-se considerar o limite térmico da LT como condicionante do ajuste dos relés, conforme inequação (18):

$$I_{pickup} \leq \text{Limite térmico da LT} \tag{18}$$

Sabendo-se que o limite térmico das linhas de transmissão modeladas neste trabalho é de 700 A, e que esse valor satisfaz o critério definido em (17), determinou-se:

$$I_{pickup} = I_s = 700\ A$$

.

Por fim, para garantir um tempo de atuação desejável de $t_s = 150\ ms$, ajustou-se o dial de tempo (D) pela equação (16), tal que:

a) dial de tempo para os relés RF1E e RF2E

$$D_E = 0{,}150\left[\frac{19{,}61}{\left(\frac{1493}{700}\right)^2 - 1} + 0{,}491\right]^{-1} = 0{,}025$$

b) dial de tempo para os relés RF1D e RF2D

$$D_D = 0{,}150 \left[\frac{19{,}61}{\left(\frac{1506}{700}\right)^2 - 1} + 0{,}491 \right]^{-1} = 0{,}0045$$

A Tabela V sintetiza todos os parâmetros de ajuste dos relés de sobrecorrente temporizados de fase.

Tabela V
SÍNTESE DOS PARÂMETROS UTILIZADOS PARA OS ELEMENTOS DE SOBRECORRENTE DE FASE. FONTE: PRÓPRIOS AUTORES.

Ajuste dos relés conforme equação (16)						
Relé	**Curva IEEE [12]**	**A**	**B**	**D**	**Q**	I_s
RF1E	Muito Inversa	19,61	0,491	0,0250	2	700
RF2E	Muito Inversa	19,61	0,491	0,0250	2	700
RF1D	Muito Inversa	19,61	0,491	0,0045	2	700
RF2D	Muito Inversa	19,61	0,491	0,0045	2	700

2) Parametrização do Elemento de Neutro: No elemento de sobrecorrente de neutro, analogamente ao elemento de fase, o relé tem de se sensibilizar com a pior situação de um curto-circuito monofásico possível, atuando em tempo adequado. Desta maneira, foram aplicados curtos-circuitos monofásicos nos extremos opostos aos do ponto de instalação dos relés em estudo, com o sistema operando em vazio, obtendo-se:

a) para RN1E e RN2E

$$I^{E}_{CC1\phi 100\% L.T} = 309\ A$$

b) para RN1D e RN2D

$$I^{D}_{CC1\phi 100\% L.T} = 228\ A$$

tal que a corrente de *pickup* de neutro deverá ser menor que estes valores.

Segundo [11], o ajuste da corrente de *pickup* de neutro deve estar no intervalo de 10% a 45% da $I_{nominal}$ do circuito, como mostra a expressão (19):

$$0{,}1\ I_{nominal} \ \leq \ I_{pickup} \ \leq \ 0{,}45\ I_{nominal} \qquad (19)$$

lembrando-se que, para as LT deste trabalho, $I_{nominal} = 388\ A$.

A escolha do ajuste do elemento de sobrecorrente de neutro deve levar em consideração as características da carga do SEP, para evitar que a proteção interprete como defeito correntes de neutro/terra decorrentes de desbalanços aceitáveis da carga. Assim, a porcentagem utilizada da corrente nominal como corrente de *pickup* depende da proximidade da linha de transmissão aos barramentos de carga. A Figura 12 ilustra a faixa de ajuste da corrente do relé de neutro [11], conforme as áreas de geração, transmissão e distribuição de um SEP. Nota-se que as linhas de transmissão situam-se na faixa de valores intermediários, portanto, na ausência de maiores informações sobre a carga do sistema teste, foi escolhido o valor médio do intervalo dado por (19) como ajuste do elemento de sobrecorrente de neutro, tal que $I_{pickup} = 27{,}5\%\ I_{nominal} = 106{,}7\ A$.

Note-se que essa escolha, embora arbitrária, satisfaz a inequação (19), bem como garante sensibilidade à menor corrente de curto-circuito monofásico obtida.

Figura 12. Ilustração da faixa de ajuste da corrente de *pickup* em função da proximidade com as barras de carga do sistema. Fonte: Adaptado de [11].

Como exposto na Subseção III-B2, o relé de sobrecorrente de neutro modelado neste trabalho tem como entrada o valor de pico da corrente de sequência zero. Devido a esta particularidade da modelagem, a corrente de *pickup* parametrizada no elemento 51N foi adequada conforme (20) para ter ordem de grandeza comparável ao sinal de entrada do relé.

$$I_{pickup} = (27{,}5\%\ I_{nominal})\ \frac{\sqrt{2}}{3} \qquad (20)$$
$$I_{pickup} = I_s = 50{,}3\ A$$

Por fim, similarmente ao elemento de fase, foi utilizada a curva Muito Inversa e um tempo de atuação desejável de 150 ms. De posse de todos esses parâmetros para o elemento de sobrecorrente de neutro, calculou-se o dial (D) a partir da equação (16). A Tabela VI apresenta todos os valores para ajuste do elemento de sobrecorrente de neutro.

Tabela VI
SÍNTESE DOS PARÂMETROS UTILIZADOS PARA OS ELEMENTOS DE SOBRECORRENTE DE NEUTRO. FONTE: PRÓPRIOS AUTORES.

Ajuste dos relés conforme equação (16)						
Relé	**Curva IEEE [12]**	**A**	**B**	**D**	**Q**	I_s
RN1E	Muito Inversa	19,61	0,491	0,1470	2	50,3
RN2E	Muito Inversa	19,61	0,491	0,1470	2	50,3
RN1D	Muito Inversa	19,61	0,491	0,1000	2	50,3
RN2D	Muito Inversa	19,61	0,491	0,1000	2	50,3

D. Faltas Simuladas

Por meio do modelo de linha de transmissão *LINE3* (utilizado neste trabalho para representação das LT), disponível na Biblioteca *Power System Tools*, é possível simular todas as combinações de curto-circuito possíveis.

Esse modelo de LT permite, inclusive, a inserção de resistências de falta nas simulações. De tal forma que: quando há terra envolvida, a resistência de falta está situada entre a(s) fase(s) e a terra; já quando a terra não está envolvida na falta, a resistência de falta situa-se entre as fases.

Para o sistema teste deste trabalho, foram simuladas as seguintes situações de falta:

a) aplicação de curtos-circuitos monofásicos, bifásicos, bifásicos-terra e trifásicos francos (considerando a resistência de falta $R_f = 0{,}1\ \Omega$);

b) aplicação de curtos-circuitos monofásicos, bifásicos, bifásicos-terra e trifásicos com alta resistência de falta ($R_f = 40\ \Omega$);

para os quais, foram ainda considerados os seguintes ajustes:

- em todos os casos, as faltas foram aplicadas em apenas uma das linhas de transmissão, preservando-se uma das linhas sã;
- em todos os tipos de curto-circuito considerados, variou-se o ponto de aplicação das faltas de 0% até 100% do comprimento total da LT, em intervalos de 10%;
- em todos os casos, a falta foi aplicada no instante $t = 100\ ms$ e o tempo total de simulação foi de $500\ ms$.

IV. Análise de resultados

De acordo com a Subseção III-D, as simulações podem ser classificadas em duas séries principais, divididas em curtos-circuitos francos ($R_f = 0{,}1\Omega$) e curtos-circuitos de alta impedância ($R_f = 40\Omega$). Os resultados das simulações para os diversos tipos de curto-circuito franco aplicados às linhas de transmissão foram organizados e estão apresentados nas Tabelas VII à XII.

Como visto na Subseção III-C, foi estipulado como tempo máximo admissível para atuação do dispositivo de proteção $t_s = 150ms$, conforme Tabela IV. Este critério de tempo de atuação é baseado no *tempo crítico de eliminação de falta* para garantia de estabilidade transitória dos geradores síncronos. Tal limite foi aqui utilizado, indiscriminadamente para os elementos de fase e de neutro, em função da ausência de maiores informações sobre os tempos necessários de eliminação de falta com base em outros critérios, como a coordenação com outros dispositivos de proteção presentes na rede, por exemplo.

O desempenho dos elementos de proteção será analisado basicamente segundo dois critérios:

a) seu tempo de atuação, t_s, e;
b) sua seletividade.

Quanto ao *tempo de atuação*, será considerada adequada a resposta dos elementos de proteção que atuarem até o limite de 150 ms, acrescidos de uma tolerância de 1 ciclo de onda em 60 Hz, ou seja, serão adequados os tempos de atuação $t_s \leq 167\ ms$. Essa tolerância foi arbitrada em função de possíveis atrasos nos tempos de processamento dos sinais até a abertura efetiva do disjuntor.

Já quanto à *seletividade*, a resposta do relé será considerada adequada sempre que atuação se der apenas nos elementos que protegem a LT defeituosa.

Portanto, será considerada *satisfatória* a resposta dos elementos que satisfizerem aos critérios de tempo de atuação e de seletividade descritos acima.

Já os desempenho *insatisfatório*, os quais estão destacados em vermelho nas tabelas, serão as respostas que não satisfazerem um dos dois critérios citados acima.

Ainda existe uma terceira possibilidade para a classificação da resposta. A resposta será classificada como inconclusiva quando ao se tratar da proteção de uma linha, ao menos um elemento estiver dentro do tempo de atuação de 167 ms e o outro, no outro extremo da linha, ultrapassado este limite. Devido à limitação do ATP não dispor de um disjuntor, não é possível analisar o comportamento do sistema após a eliminação de um dos lados do circuito defeituoso após a recepção do sinal de *TRIP*. Nas tabelas, as resposta classificadas como inconclusivas estão destacadas em azul.

Nas figuras 13 e 14 são retratados o desempenhos que os relés tiveram no decorrer dos estudos. No geral, foram efetuadas 264 simulações, sendo 132 com faltas de alta impedância e 132 para faltas de baixa impedância. Dentre todas as simulações realizadas, serão apresentadas as que demonstram resultados que são ressaltados devido a implementação das funções 51 e 51N no sistema proposto.

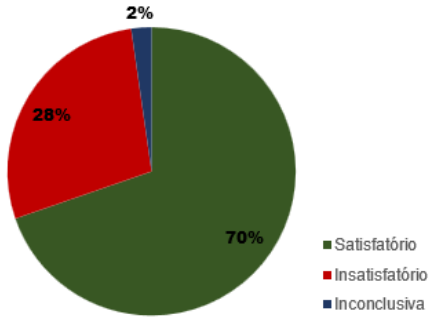


Figura 13. Desempenho das atuações dos relés de proteção para faltas francas. Fonte: Próprios Autores

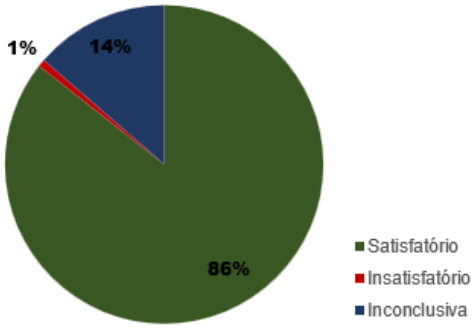


Figura 14. Desempenho das atuações dos relés de proteção para faltas de alta impedância. Fonte: Próprios Autores

Quando a tabela for preenchida por "/", ou não houve atuação dentro do tempo simulado de 0,5s, ou o relé não foi sensibilizado.

Além da variação do local de falta impactar nas correntes de curto na linha defeituosa, também influencia na linha sã. Foi observado que, em curtos-circuitos localizados próximos às barras, as correntes de falta tem maiores magnitudes em ambos os circuitos. Desta maneira, os relés de proteção são sensibilizados com maiores correntes e, assim, atuem de maneira mais rápida, eliminando a falta e podendo também eliminar o circuito não defeituoso. Isto ocorre pois, com os níveis de curtos propostos na simulação, a alteração do local da falta faz com que a impedância equivalente do sistema se altere, ocasionando assim diferentes correntes de falta.

A. *Curtos-circuitos Francos ($R_f = 0{,}1\Omega$)*

1) Caso 1: Curto monofásico-terra - fase a: Para o curto-circuito monofásico-terra, devido a parametrização proposta neste trabalho, o dispositivo diretamente responsável para proteger o sistema é o elemento de neutro. Desta maneira, a análise de desempenho do sistema de proteção é direcionada à função 51N. Com isso, para análise dos dados no que se trata ao *Caso 1*, os resultados obtidos referentes ao elemento de fase serão suprimidos.

Nesta situação de falta o sistema de proteção referente à linha defeituosa atuou de maneira adequada conforme mostrado na tabela VII. Contudo, no que se refere à proteção da linha sã, o sistema de proteção de neutro comportou-se de maneira insatisfatória para o curto-monofásico franco, enviando sinal de *TRIP* em situações aonde a falta estava fora da linha protegida, como apresentando na tabela VII. Desta maneira o circuito são poderia ser aberto acidentalmente.

2) Caso 2: Curto bifásico isolado - fases a e b: Para faltas bifásicas, como visto na seção II-B na discussão acerca de componentes simétricas, foi demonstrado que não há presença de correntes de sequência 0 em faltas que não envolvem a terra. Assim, para a análise deste tipo de falta, não é necessário a exposição dos dados relativos aos elementos de sobrecorrente temporizado de neutro, visto que toda corrente de neutro será igual a 0 e, consequentemente, não haverá atuação do dispositivo de proteção de neutro.

Se tratando do elemento de sobrecorrente temporizado de fase como o encarregado para este tipo de falta na L.T defeituosa, os dispositivos demonstram respostas satisfatórias, visto que todas as faltas foram eliminadas antes do tempo limite como visto na tabela VIII.

Porém para a linha sã, o sistema de proteção também é sensibilizado para a falta que ocorre na linha paralela, fazendo com que o relé RF2E e RF2D atue de maneira insatisfatória podendo assim eliminar o circuito são como apresentado na tabela VIII.

3) Caso 3: Curto trifásico isolado - fases a,b e c: Na falta trifásica, similarmente ao que ocorre em curtos bifásicos isolados, não há presença de correntes de sequência 0. Devido a isso, os dados referentes às correntes de neutro e aos elementos de sobrecorrente temporizado de neutro serão suprimidos.

Referindo-se então aos elementos de fase, nota-se pela tabela IX que a atuação do dispositivo RF1E é considerada satisfatória, pois em todas as situações simuladas tiveram seus tempos de respostas dentro do esperado. Já o elemento RF1D teve uma atuação tardia para uma falta aplicada em 0% do comprimento da LT, com cerca de 145ms de atraso. Tal fato classifica esta atuação como inconclusiva.

Quanto aos dispositivos de proteção da linha sã, RF2E e RF2D atuaram insatisfatoriamente. O elemento RF2E efetuou atuações inapropriadas a partir de 70% do comprimento da LT. Tratando-se de RF2D, este teve uma atuação indevida em 0%, e após isso, a partir de 40% em diante, as atuações indevidas prosseguem até o final da linha de transmissão podendo eliminar assim o circuito que não possui defeito.

4) Caso 4: Curto bifásico-terra - fases a e b: Na simulação da falta bifásica-terra, haverá correntes de sequência 0. Desta maneira, haverá responsabilidade dos elementos de sobrecorrente de fase e neutro de desempenhar o sistema de proteção no sistema proposto, como visto nas tabelas X e XI.

Mais uma vez, o elemento RF1E se demonstrou eficiente atuando dentro do tempo estimado. E, novamente, o dispositivo RF1D foi ineficiente apenas em 0% da L.T, atuando de maneira eficiente durante as faltas simuladas em todo o resto da linha.

Quanto aos elementos de proteção da linha sã, estes atuaram de maneira indevida durante faltas na linha paralela. RF2E teve atuações errôneas a partir de 70% do comprimento da L.T., enquanto RF2D teve uma atuação indevida em 0% e então a partir de 40% até a totalidade da linha passou a atuar de maneira indevida.

Tratando-se do elemento de sobrecorrente temporizado de neutro, o sistema de proteção da linha defeituosa foi eficiente na sua totalidade, com todas as suas atuações efetuadas dentro do tempo estimado. Entretanto, a proteção de neutro da linha sã efetuou *trips* indevidos, como visto na tabela XI. RN2E atuou insatisfatoriamente em 0%,90% e 100%. Já RN2D atuou de maneira indevida em 0%, e de 80% a 100%.

B. *Curtos-circuitos de alta impedância ($R_f = 40\Omega$)*

Nas simulações envolvendo alta impedância de falta, com exceção de uma situação (curto-circuito bifásico-terra), não houveram atuações indevidas, mantendo assim o sistema são operante durante a falta no circuito defeituoso no intervalo de tempo proposto de 0,5s.

1) Caso 5: Curto-circuito bifásico terra - fases a e b: A situação em que foi registrada uma atuação indevida está representada na tabela XII. Neste caso, o relé RN2D, quando o sistema é submetido a uma falta bifásica-terra em 100% da LT um, enviou sinal de *TRIP* indevidamente.

Tratando-se do sistema de proteção de neutro da linha defeituosa, o relé RN1E teve atuações satisfatórias de 0% a 80%, e a partir de então, passou a responder de maneira inconclusiva. Já RN2E foi satisfatório de 20% a 100%, e foi inconclusivo em 0% e 10%.

Em muitos casos as atuações foram inconclusivas, visto que, enquanto no dispositivo situado em um extremo o tempo de atuação aumentava, no outro extremo este tempo diminuía de maneira gradativa. Desta maneira, é necessário que todas as situações propostas fossem realizadas da maneira que será discutida na subseção IV-C.

2) Caso 6: Dificuldade para Ajuste: Os dados colhidos apresentados nas tabelas XIII e XIV expõem a dificuldade envolvida na parametrização do elemento de fase para este elemento proteger o sistema em casos de faltas de alta impedância. Nota-se que em faltas monofásicas-terra aplicadas a partir de 50% do comprimento da linha de transmissão, a corrente de curto-circuito tem o valor na mesma ordem de grandeza ou até menores que a I_{pickup} para elementos de fase. Se demonstra neste caso que, com a implementação da proteção de sobrecorrente de neutro, as faltas de alta impedância que envolvem a terra são detectadas sem que o ajuste desta proteção seja sensível para possíveis correntes de carga.

Tabela VII
CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO FRANCO ($R_f = 0{,}1\Omega$) APLICADO À FASE A, DA LINHA DE TRANSMISSÃO 1
ELEMENTOS DE NEUTRO. FONTE: PRÓPRIOS AUTORES.

Local da Falta em % da L.T	Correntes de neutro medidas nos pontos de instalação dos relés (A)				Tempo de atuação - TRIP (ms)			
	RN1E	RN1D	RN2E	RN2D	RN1E	RN1D	RN2E	RN2D
0%	17734	484	473	484	72	152	230	152
10%	8173	1050	123	129	73	71	/	/
20%	5231	1322	6	11	74	64	/	/
30%	3797	1544	64	59	75	60	/	/
40%	2940	1776	117	110	77	57	/	/
50%	2361	2045	163	159	79	55	/	/
60%	1933	2378	214	210	82	54	/	/
70%	1589	2815	276	269	86	52	/	/
80%	1290	3422	354	346	93	52	370	263
90%	995	4338	467	458	107	51	238	162
100%	655	5545	655	645	153	2	153	106

Tabela VIII
CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO FRANCO ($R_f = 0{,}1\Omega$) APLICADO ÀS FASES AB, DA LINHA DE TRANSMISSÃO 1
ELEMENTOS DE FASE.

Local da Falta em % da L.T	Correntes de fase medidas nos pontos de instalação dos relés (A)												Tempo de atuação - TRIP (ms)			
	RF1E			RF1D			RF2E			RF2D						
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	RF1E	RF1D	RF2E	RF2D
0%	12929	13301	388	886	504	399	881	522	388	886	504	399	13	158	/	158
10%	7965	8342	388	1205	809	399	475	379	388	487	367	399	17	54	/	/
20%	57067	6086	388	1420	1022	399	401	544	388	424	547	399	19	36	/	/
30%	4414	4794	388	1604	1205	399	446	695	388	473	704	399	22	32	/	/
40%	3576	3957	388	1786	1387	399	528	826	388	555	838	399	31	20	/	217
50%	2896	3367	388	1981	1582	399	625	951	388	651	965	399	37	19	/	110
60%	2547	2928	388	2201	1802	399	736	1080	388	761	1096	399	46	17	377	72
70%	2204	2585	388	2461	2062	399	866	1224	388	888	1239	399	56	15	260	53
80%	1927	2308	388	2779	2380	399	1025	1392	388	1045	1407	399	69	13	187	38
90%	1695	2075	388	3182	2783	399	1226	1600	388	1243	1615	399	83	11	137	25
100%	1494	1873	388	5159	5159	399	1494	1873	388	1506	1886	399	100	9	100	20

C. *Sistema Simulado Considerando Abertura do Circuito Defeituoso*

Exemplificando um caso em que a operação da proteção é inconclusiva, foi proposto para um curto bifásico em 70% do comprimento da linha entre as fases a e b, uma simulação em que a abertura do circuito defeituoso foi realizada de acordo com o envio do sinal de *TRIP* dos relés. O instante do primeiro *TRIP* é enviado pelo relé R1D com o instante que foi obtido através da simulação mostrada na tabela XV. A partir de então, posicionou-se uma chave trifásica temporizada inicialmente fechada para abrir neste instante e observado o comportamento do circuito após a eliminação de um dos lados da linha que possui a falta em questão. Com isso, as novas correntes de contribuição de curto-circuito fazem com que o elemento RF1E, diferentemente do mostrado na tabela XV, tenha o sinal de *TRIP* enviado com $112ms$, ao invés de $374ms$.

As ilustração do comportamento do sistema está exposto pelas figuras 15 à 18. Aonde a figura 15 apresenta as correntes entre SE1 e LT1, a figura 16 as correntes entre SE2 e LT1, a figura 17 as correntes entre SE1 e LT2 e finalmente a figura 18 mostra as correntes entre SE2 e LT2.

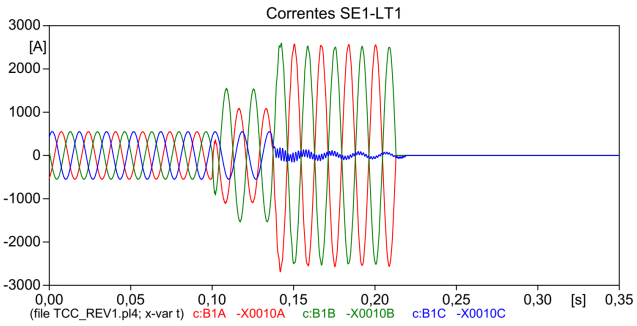


Figura 15. Correntes entre SE1-LT1. Fonte: Próprios autores.

V. CONCLUSÃO

Com os dados obtidos referentes ao tempo de atuação de todos os relés propostos no sistema, a análise ideal de atuações corretas e indevidas seria fielmente representada com a eliminação do circuito defeituoso a partir do primeiro sinal de *TRIP* enviado. Desta maneira, com a eliminação de um dos pontos de contribuição da falta, o sistema resultante geraria novas correntes e, consequentemente, um novo comportamento do sistema de proteção. Tal feito é possível com a implementação de um modelo de disjuntor controlado por relé

Tabela IX
CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO FRANCO ($R_f = 0{,}1\Omega$) APLICADO ÀS FASES ABC, DA LINHA DE TRANSMISSÃO 1
ELEMENTOS DE FASE.

Local da Falta em % da L.T	Correntes de fase medidas nos pontos de instalação dos relés (A)												Tempo de atuação - TRIP (ms)			
	RF1E			RF1D			RF2E			RF2D						
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	RF1E	RF1D	RF2E	RF2D
0%	15145	15143	15150	800	800	800	806	806	806	800	800	800	15	295	/	295
10%	9415	9415	9416	1163	1163	1163	443	443	443	442	442	442	16	53	/	/
20%	6808	6808	6808	1410	1410	1410	505	505	505	516	516	516	18	31	/	/
30%	5316	5317	5317	1622	1622	1622	636	636	636	653	653	653	20	17	/	/
40%	4349	4349	4349	1832	1832	1832	769	768	769	788	788	788	27	15	/	341
50%	3668	3668	3668	2057	2057	2057	902	902	902	922	922	922	32	14	/	129
60%	3160	3160	3160	2311	2311	2311	1044	1044	1044	1064	1064	1064	38	11	/	77
70%	2765	2765	2765	2611	2611	2611	1203	1203	1204	1224	1224	1224	49	9	269	50
80%	2445	2445	2445	2978	2978	2978	1393	1393	1394	1412	1412	1413	59	8	183	33
90%	2177	2177	2177	3444	3444	3444	1631	1631	1631	1648	1648	1648	73	7	128	19
100%	1943	1943	1943	4062	4062	4062	1943	1943	1943	1957	1957	1958	90	6	90	7

Tabela X
CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO TERRA FRANCO ($R_f = 0{,}1\Omega$) APLICADO ÀS FASES AB, DA LINHA DE TRANSMISSÃO 1
ELEMENTOS DE FASE.

Local da Falta em % da L.T	Correntes de fase medidas nos pontos de instalação dos relés (A)												Tempo de atuação - TRIP (ms)			
	RF1E			RF1D			RF2E			RF2D						
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	RF1E	RF1D	RF2E	RF2D
0%	17059	16454	395	821	767	391	826	777	395	821	767	391	14	248	/	248
10%	9302	8550	397	1193	1033	409	444	431	398	450	424	409	17	56	/	/
20%	6504	6083	402	1431	1232	417	423	532	402	442	538	416	20	37	/	/
30%	4995	4745	405	1634	1418	423	504	659	406	527	672	422	23	23	/	/
40%	4042	3892	410	1836	1612	430	607	778	410	631	794	428	28	19	/	322
50%	3382	3296	416	2056	1830	437	720	894	416	744	912	436	37	17	/	140
60%	2896	2854	425	2309	2089	448	847	1015	425	870	1034	447	46	15	/	88
70%	2522	2512	441	2617	2415	466	996	1150	440	1018	1169	464	56	13	311	59
80%	2224	2238	470	3011	2854	497	1181	1311	470	1201	1330	495	71	11	217	41
90%	1978	2013	533	3554	3519	562	1424	1518	532	1442	1536	561	87	9	153	34
100%	1769	1832	700	4417	4781	730	1769	1832	700	1785	1847	730	103	6	103	11

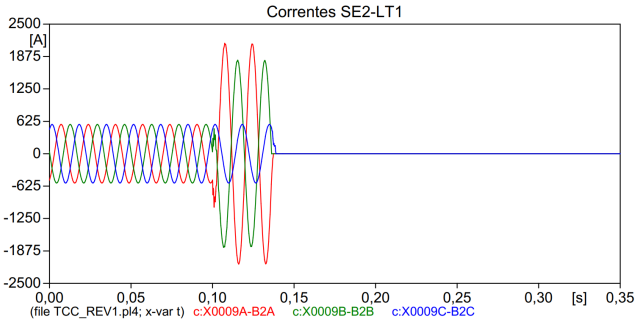


Figura 16. Correntes entre SE2-LT1. Fonte: Próprios autores.

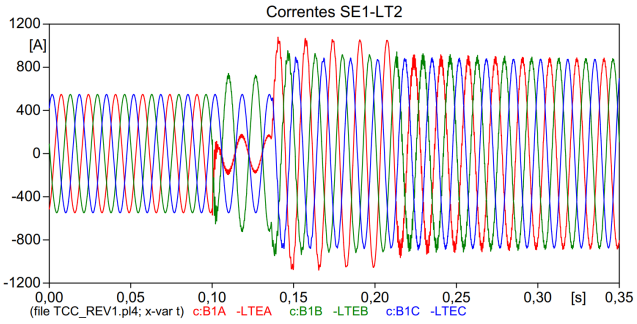


Figura 17. Correntes entre SE1-LT2. Fonte: Próprios autores.

no ambiente *MODELS* do *ATPDraw*.

Entretanto, com os resultados colhidos oriundos das simulações, nota-se que em situações de curtos com baixa impedância de falta, $R_f = 0{,}1\ \Omega$, vários comportamentos indevidos são efetuados pelos dispositivos de proteção ao longo de todas as faltas simuladas.

Já para faltas com $R_f = 40\ \Omega$, que é considerada uma falta de alta impedância, ao se tratar do sistema de proteção que envolve a linha 1, diversas atuações dos elementos de proteção foram inconclusivas. Pois nas situações apresentas pelas simulações, muitas vezes foram observados o envio do sinal de *trip* tardio por um dos elementos da linha defeituosa.

Notando-se a grande falha dos relés de sobrecorrente quando este se sensibiliza para faltas externas ao elemento protegido, mostrou-se neste trabalho que para uma proteção de um circuito duplo o elemento de sobrecorrente temporizado de fase e neutro é falho no quesito seletividade.

Uma solução recomendada para ser avaliada em trabalhos futuros é o uso do elemento direcional (ANSI 67). Este tipo de relé de proteção reconhece o sentido em que a corrente

Tabela XI
CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO TERRA FRANCO ($R_f = 0{,}1\Omega$) APLICADO ÀS FASES AB, DA LINHA DE TRANSMISSÃO 1 ELEMENTOS DE NEUTRO.

Local da Falta em % da L.T	Correntes de neutro medidas nos pontos de instalação dos relés (A)				Tempo de atuação - TRIP (ms)			
	RN1E	RN1D	RN2E	RN2D	RN1E	RN1D	RN2E	RN2D
0%	20938	571	558	571	73	123	184	123
10%	7258	932	109	115	74	77	/	/
20%	4351	1098	5	9	75	70	/	/
30%	3088	1255	52	48	77	66	/	/
40%	2379	1437	94	90	79	63	/	/
50%	1921	1664	133	129	82	58	/	/
60%	1596	1964	177	173	87	56	/	/
70%	1348	2387	233	228	93	54	/	/
80%	1142	3032	313	307	100	52	/	323
90%	950	4144	446	438	112	51	250	175
100%	724	6503	724	711	139	50	139	97

Tabela XII
CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO TERRA DE ALTA IMPEDÂNCIA ($R_f = 40\Omega$) APLICADO ÀS FASES AB, DA LINHA DE TRANSMISSÃO 1 ELEMENTOS DE NEUTRO. FONTE: PRÓPRIOS AUTORES.

Local da Falta em % da L.T	Correntes de neutro medidas nos pontos de instalação dos relés (A)				Tempo de atuação - TRIP (ms)			
	RN1E	RN1D	RN2E	RN2D	RN1E	RN1D	RN2E	RN2D
0%	3113	85	83	85	77	/	/	/
10%	2504	322	38	40	78	295	/	/
20%	2024	511	2	4	81	142	/	/
30%	1659	674	28	26	85	102	/	/
40%	1376	832	54	52	91	84	/	/
50%	1150	996	80	77	99	74	/	/
60%	961	1182	107	104	110	67	/	/
70%	793	1404	137	134	127	63	/	/
80%	634	1683	174	171	158	58	/	/
90%	470	2049	221	217	232	55	/	/
100%	283	2542	283	278	/	53	/	395

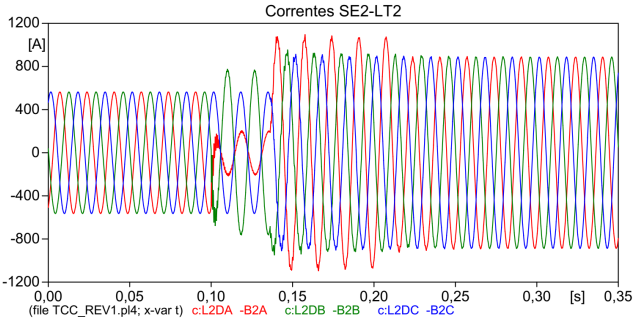


Figura 18. Correntes entre SE2-LT2. Fonte: Próprios autores.

está fluindo em determinada parte do sistema. Caso a corrente flua num sentido inverso ao normal, o relé deve ser capaz de bloquear o envio para o disjuntor um sinal de *TRIP*.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer: Eng. Carlos Antonio Faria Floriano, Eng. Colemar Labres da Silva, Eng. Khristian Marques de Andrade Jr. e Eng. Jéssica Lima.

REFERÊNCIAS

[1] BLACKBURN, J. Lewis and DOMIN, Thomas J., "Protective Relaying Protective Relaying". Third Edition. London: CRC Press, 2006.

[2] PAITHANKAR, Y. G. and BHIDE, S. R., "Fundamentals of Power System Protection". PrenticeHall of India Pvt. Ltd, 2004.

[3] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (Brasil). Análise Estatística dos Desligamentos Forçados de Componentes do Sistema Elétrico Brasileiro Referente ao Ano de 2012 - RE 3/076/2013. Rio de Janeiro, 2013. APUD: ALMEIDA, M. L. S. (2016). Proteção Diferencial de Linhas de Transmissão Baseada no Plano Alfa de Potências Complexas, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.TD - 111/2016, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 157p.

[4] Anderson, Paul; "Power System Protection", New York, IEEE Press, 1998, ISBN7780334272.

[5] Mason, C. R.; "Art and Science of Protective Relaying", New York, John Wiley, 1956, ISBN: 0471575526.

[6] ZANETTA JR., Luiz Cera, "Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência". 1ª Edição. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.

[7] MATTEDE, Henrique. Um pouco mais sobre o sistema elétrico de potência (SEP). 2021. Disponível em: https://www.mundodaeletrica.com.br/um-pouco-mais-sobre-o-sistema-eletrico-de-potencia-sep/. Acesso em: 19 jan. 2021.

[8] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (Brasil). Carga e Geração. 2021. Disponível em: http://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/carga-e-geracao. Acesso em: 11 jan. 2021.

[9] KINDERMANN, Geraldo, "Curto-Circuito", 2ª Edição, Porto Alegre: SAGRA LUZZATO, 2005.

[10] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (Usa) (org.). IEEE 100: the authoritative dictionary of ieee standards terms. 7. ed. New York City: Standards Information Network, IEEE Press, 2000.

[11] KINDERMANN, Geraldo, "Proteção de Sistemas Elétricos de Potência", Volume 1, 2ª Edição, Florianópolis: Edição do autor, 2005.

[12] IEEE Std C37.112-2018. "IEEE Standard for Inverse-Time Charac-

Tabela XIII
CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO TERRA DE ALTA IMPEDÂNCIA ($R_f = 40\Omega$) APLICADO À FASES A, DA LINHA DE TRANSMISSÃO 1 ELEMENTOS DE FASE. FONTE: PRÓPRIOS AUTORES.

Local da Falta em % da L.T	Correntes de fase medidas nos pontos de instalação dos relés (A)												Tempo de atuação - TRIP (ms)			
	RF1E			RFD1			RF2E			RF2D						
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	RF1E	RF1D	RF2E	RF2D
0%	2720	391	407	523	400	420	511	391	407	523	400	420	49	/	/	/
10%	2294	391	385	690	403	397	423	391	384	437	402	397	66	/	/	/
20%	1934	398	365	834	411	376	360	398	363	378	410	376	90	224	/	/
30%	1640	406	346	967	421	357	318	406	344	341	420	356	126	109	/	/
40%	1397	415	328	1100	431	339	292	415	327	319	430	339	184	71	/	/
50%	1193	424	311	1241	442	321	278	424	309	309	440	321	279	52	/	/
60%	1016	434	293	1398	452	302	274	433	291	309	451	303	/	40	/	/
70%	857	443	273	1580	462	282	282	443	272	317	461	283	/	31	/	/
80%	707	452	252	1798	473	260	303	452	251	337	472	261	/	22	/	/
90%	559	460	230	2065	483	236	342	460	229	371	482	236	/	18	/	/
100%	404	467	210	2397	491	211	404	467	210	426	491	211	/	17	/	/

Tabela XIV
CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO TERRA DE ALTA IMPEDÂNCIA ($R_f = 40\Omega$) APLICADO À FASES A, DA LINHA DE TRANSMISSÃO 1 ELEMENTOS DE NEUTRO. FONTE: PRÓPRIOS AUTORES.

Local da Falta em % da L.T	Correntes de neutro medidas nos pontos de instalação dos relés (A)				Tempo de atuação - TRIP (ms)			
	RN1E	RN1D	RN2E	RN2D	RN1E	RN1D	RN2E	RN2D
0%	3101	85	83	85	76	/	/	/
10%	2595	333	39	41	78	280	/	/
20%	2167	547	2	5	80	130	/	/
30%	1815	738	31	28	83	93	/	/
40%	1524	921	60	58	88	78	/	/
50%	1277	1106	89	86	94	69	/	/
60%	1060	1304	118	115	103	64	/	/
70%	861	1525	149	146	119	59	/	/
80%	672	1783	184	181	150	57	/	/
90%	480	2094	226	221	229	55	/	/
100%	275	2476	275	271	/	53	/	/

teristics Equations for Overcurrent Relays". 2019. DOI: 10.1109/IEEESTD.2019.8635630
[13] IEEE Std C37.112-1996, "IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays". 2018.
[14] HOIDALEN, H. K. *ATPDraw Version 5 - User Manual Supplements. November 2009*. Disponível em: http://www.elkraft.ntnu.no/atpdraw/ATPDMan56.pdf
[15] MIGUEL, Pablo Mourente. Introdução à Simulação de Relés de Proteção Usando a Linguagem "Models"do ATP. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2011.
[16] ONS, P. d. R., "Submódulo 23.3–Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos". Rio de Janeiro: Agosto, 2018.

Tabela XV
CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO ISOLADO DE ALTA IMPEDÂNCIA ($R_f = 40\Omega$) APLICADO ÀS FASES AB, DA LINHA DE TRANSMISSÃO 1 ELEMENTOS DE FASE. FONTE: PRÓPRIOS AUTORES.

Local da Falta em % da L.T	Correntes de fase medidas nos pontos de instalação dos relés (A)												Tempo de atuação - TRIP (ms)			
	RF1E			RFD1			RF2E			RF2D						
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	RF1E	RF1D	RF2E	RF2D
0%	2226	2442	388	536	486	399	518	480	388	536	486	399	58	/	/	/
10%	1948	2193	388	695	585	399	417	414	388	435	425	399	71	/	/	/
20%	1694	1961	388	840	689	399	325	380	388	345	398	399	90	217	/	/
30%	1468	1751	388	975	795	399	243	374	388	265	397	399	113	105	/	/
40%	1265	1561	388	1105	904	399	169	390	388	197	417	399	144	70	/	/
50%	1084	1388	388	1233	1017	399	109	420	388	145	450	399	188	52	/	/
60%	919	1230	388	1363	1139	399	84	459	388	122	491	399	256	42	/	/
70%	767	1082	388	1499	1270	399	119	506	388	141	537	399	374	34	/	/
80%	624	943	388	1644	1414	399	184	557	388	193	589	399	/	28	/	/
90%	488	809	388	1802	1574	399	263	615	388	262	646	399	/	25	/	/
100%	353	678	388	1976	1754	399	353	678	388	345	708	399	/	21	/	/