

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LEANDRO SILVA DE CAUX

**ESTUDO DE FALTA FASE-TERRA EM UM SEP E
COMPORTAMENTO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO**

VIÇOSA
2017

LEANDRO SILVA DE CAUX

**ESTUDO DE FALTA FASE-TERRA EM UM SEP E
COMPORTAMENTO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates.

VIÇOSA
2017

LEANDRO SILVA DE CAUX

**ESTUDO DE FALTA FASE-TERRA EM UM SEP E
COMPORTAMENTO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO**

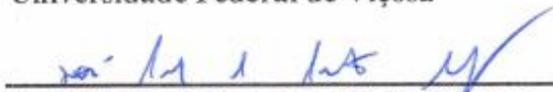
Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 28 de Novembro de 2017.

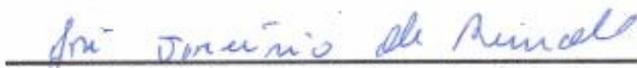
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates - Orientador
Universidade Federal de Viçosa



Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos- Membro
Universidade Federal de Viçosa



Prof. Dr. José Tarcísio de Resende - Membro
Universidade Federal de Viçosa

“Se uma pessoa não tem mais sonhos, perde o sentido de viver.

Sonhar é preciso...”

(Ayrton Senna)

Dedico este trabalho para minha família e amigos.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a minha família, a base e inspiração para tudo, fundamentais para a realização deste trabalho.

Um agradecimento especial a meu Professor Orientador, Mauro de Oliveira Prates, pela disponibilidade e ensinamentos oferecidos, não só durante a realização deste trabalho, mas durante toda a graduação, contribuindo para minha formação.

Um abraço para todos os amigos e pessoas que contribuíram de alguma forma para meu aprendizado.

Resumo

Este trabalho estuda o comportamento de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) e um sistema de proteção diante da ocorrência de faltas fase-terra na Transmissão e Distribuição. Uma revisão teórica sobre a estrutura de um SEP (incluindo detalhes dos modelos de linhas de transmissões), sobre os diversos tipos de faltas (ou curto-circuitos) e sistemas de proteção são estudados, contribuindo para diversas análises. As simulações são feitas no ambiente de simulação do Simulink. Os parâmetros utilizados e a posição das faltas na simulação são feitos de modo a aproximar o circuito simulado com a realidade. São feitas simulações com diversas faltas e sem o sistema de proteção, permitindo uma vasta opção de análises. Os resultados obtidos comprovam a importância da proteção em um SEP e da magnitude das correntes de curto-circuito.

Abstract

This thesis studies the behavior of a Power System and its protection system after a phase-ground fault on the transmission and distribution. A teoric study is made about the structure of a Power System (including details about line transmittion models), types of faults and protection system contributing for the analysis. For simulation, Simulink is utilized. All parameters and position of the faults on simulations are chosen to approach the cicuit simulated with reality. A lot of faults are simulated including the circuit without protection, contributing for analysis. The results reached prove the importance os protection for Power System and the magnitude of faults currents.

Sumário

1	Introdução.....	15
1.1	Objetivos.....	16
1.2	O SEP	17
1.2.1	Geração.....	17
1.2.2	Transmissão.....	19
1.2.2.1	Características Físicas das Linhas de Transmissão	20
1.2.2.2	Parâmetros das Linhas de Transmissão.....	21
1.2.2.3	Modelos de Linhas de Transmissão	22
1.2.2.4	Linha de Transmissão de Parâmetros Concentrados	23
1.2.3	Distribuição	25
1.3	Sistemas de Proteção	26
1.3.1	Relé de Proteção	27
1.3.2	Relé de Sobrecorrente.....	29
1.3.3	Disjuntores.....	30
1.3.3.1	Classe de Tensão de Disjuntores	31
1.3.3.2	Parâmetros para especificação de disjuntores alta/média tensão	32
1.4	Faltas trifásicas	34
1.4.1	Análise de Faltas.....	35
1.4.1.1	Falta Fase-Terra.....	36
1.4.1.2	Falta Fase-Fase	39
1.4.1.3	Falta Entre 2 Fases-Terra.....	41
1.4.1.4	Falta Trifásica ou Simétrica.....	42
1.5	Falhas em um SEP.....	43
2	Materiais e Métodos	46
2.1	Simulações.....	46
2.1.1	Introdução.....	46
2.1.2	Parâmetros dos blocos	46
2.1.3	Modelagem Relés de Sobrecorrente	49
3	Resultados e Discussões.....	52
3.1	Falta na Distribuição.....	52
3.2	Diferenças entre correntes de curto-circuito entre fases.....	54
3.3	Mal dimensionamento Relé de Sobrecorrente.....	55

3.4 – Falta na Distribuição seguida de Falta na Transmissão.....	57
3.5 – Falta na Transmissão seguida de Falta na Distribuição.....	58
4 Conclusões.....	61
Referências Bibliográficas	63

Lista de Figuras

Figura 1 - Estrutura Básica de um SEP.....	17
Figura 2 - Banco de Informações Matriz Energética Geração de Energia.....	18
Figura 3 - Torre típica LT.....	19
Figura 4 - Circuito Equivalente LT com parâmetros distribuídos.....	22
Figura 5 - Circuito π de uma linha de transmissão.....	23
Figura 6 - Quadripolo Representativo de uma Linha de Transmissão.....	23
Figura 7 - Circuito π de uma linha de transmissão Simétrica.....	24
Figura 8 - Circuito modelo π nominal.....	25
Figura 9 - Sistemas de Proteção em um SEP.....	27
Figura 10 - Tipos de curvas características de operação.....	28
Figura 11 - Circuito proteção alimentador por relés de sobrecorrente.....	29
Figura 12 - Disjuntor de 17,5kV, fabricante WEG.....	31
Figura 13 - Modelo de um Curto-circuito Fase-Terra.....	37
Figura 14 - Diagrama elétrico do curto-circuito fase A-terra e componentes da corrente.....	38
Figura 15 - Modelo de um Curto-circuito Fase-Fase.....	39
Figura 16 - Diagrama elétrico do curto-circuito fases B-C e componentes corrente.....	41
Figura 17 - Modelo de um Curto-circuito 2 Fases-Terra.....	41
Figura 18 - Modelo de um Curto-Circuito Trifásico.....	43
Figura 19 - Diagrama elétrico do Curto-Circuito trifásico.....	43
Figura 20 - Circuito de um SEP com falhas.....	44
Figura 21 - Eventos que causam mal funcionamento em equipamentos industriais.....	44
Figura 22 - Circuito simulado sem as faltas.....	46
Figura 23 - Parâmetros Fonte Trifásica 138kV.....	47
Figura 24 - Determinação dos parâmetros RLC por unidade de comprimento da LT.....	48
Figura 25 - Parâmetros bloco Linha de Transmissão.....	49
Figura 26 - Modelagem relés de Sobrecorrente.....	50

Figura 27 - Circuito simulado com falta na Distribuição.....	52
Figura 28 - Correntes Fases A,B e C Circuito com Falta na Distribuição na Fase A.....	53
Figura 29 - Corrente de curto Circuito com Falta na Distribuição e na Fase A.....	53
Figura 30 - Corrente de curto Circuito Fase B Falta na Distribuição.....	55
Figura 31 - Corrente de curto Circuito Fase C Falta na Distribuição	55
Figura 32 - Correntes Fases A,B e C - Relé Sobrecorrente Mal dimensionado.....	56
Figura 33 - Corrente Fase A- Falta Fase A-Terra Relé Mal dimensionado.....	56
Figura 34 - Circuito simulado com falta na Distribuição e Transmissão A.....	57
Figura 35 - Correntes Fases A,B e C Falta na Distribuição seguido de Falta na Transmissão.	58
Figura 36 - Correntes Fases A,B e C Falta na Transmissão seguido de Falta na Distribuição.	59
Figura 37 - Corrente Fase A Falta na Transmissão seguido de Falta na Distribuição.....	59
Figura 38 – Aproximação Corrente Fase A.....	60

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Banco de Informações Matriz Energética Geração de Energia Elétrica.....	18
--	----

1 Introdução

Um Sistema Elétrico de Potência (SEP) é definido como um conjunto constituído por centrais elétricas, subestações de transformação e de interligação, linhas de transmissão e receptores, ligados eletricamente entre si. São grandes sistemas de energia que englobam geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, até os consumidores. [1]

O Brasil possui uma matriz energética considerada renovável no mundo industrializado, as usinas hidrelétricas são os principais responsáveis pela geração de eletricidade do País. Uma consequência desse aspecto, é a necessidade de utilizar longas linhas de transmissão, visto que os centros de consumo nem sempre estão localizados próximos aos centros de geração. Além disso, o desenvolvimento industrial aliado ao aumento dos núcleos populacionais necessita ser acompanhado do crescimento dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica.

Sendo assim, o SEP é um sistema grande e complexo, e portanto surgem problemas relacionados com a Qualidade da Energia. O termo Qualidade de Energia Elétrica (QEE) pode ser definida como qualquer problema relacionado a variação de tensão, corrente e frequência que traz como consequência falha ou má operação dos equipamentos dos consumidores. Sendo assim, o termo QEE trata da compreensão do distúrbio eletromagnético como um todo, ou seja, as possíveis causas e consequências associadas ao consumidor. [2]

O surgimento de diversos distúrbios associados a utilização de dispositivos eletrônicos combinados a fenômenos tradicionais como curtos-circuitos e descargas elétricas geram um desafio junto às concessionárias de distribuição de energia elétrica: fornecer energia elétrica aos consumidores de maneira sustentável e confiável. [3]

Para gerar e fornecer energia elétrica dentro dos padrões de qualidade e segurança, um sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica deve dispor de sistemas altamente confiáveis que executem proteções e de um sistema de controle e automação, capazes de controlar em tempo real, grandes quantidades de informações. [4]

Ainda de acordo com [4] para um sistema de proteção ser considerado robusto, deve ter características como seletividade, rapidez, sensibilidade, segurança e economia. Um sistema de automação atualmente exige a instalação de equipamentos de aquisição de dados e

dispositivos (sensores, relés) remotamente controlados, com capacidade de processar as informações advindas do sistema de aquisição e suporte de funções de decisão.

Uma condição anormal de operação do sistema elétrico e que necessitam da atuação do sistema de proteção e automação, são situações de curto-circuito (ou falta). As causas para tal estado associam a falhas de isolamento devido à temperatura, umidade, corrosão e sobretensões internas ou de origem atmosférica e falhas mecânicas relacionadas a quebra ou corte e contato forçado ou acidental dos condutores. [5]

Os curto-circuitos podem ser classificados como:

- Curto-circuito Trifásico ou Simétrico;
- Curto-circuito Bifásico, sem contato de terra;
- Curto-circuito Bifásico, com contato de terra;
- Curto-circuito Monofásico ou Curto para a terra.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo inicial fazer um estudo teórico sobre um SEP, detalhando as fases de geração, transmissão (incluindo modelos de linhas de transmissão) e distribuição. Além disso, objetiva-se estudar os diversos tipos de falta, detalhando as equações e modelos que representam cada tipo de falta.

Realizado o estudo teórico, objetiva-se analisar a atuação do sistema de proteção em um sistema de transmissão/distribuição, quando o mesmo é submetido a diversos tipos de falta, além de analisar as correntes de curto-circuito. Para tal estudo, foram realizadas simulações através do software, Matlab/Simulink.

Para garantir um estudo completo do tema, os objetivos específicos podem ser definidos como:

- Analisar a magnitude e duração da corrente de curto-circuito, para cada tipo de falta simulado com e sem atuação do sistema de proteção;
- Analisar o tempo de resposta para atuação do sistema de proteção após cada tipo de falta simulado, comprovando a importância do correto dimensionamento de componentes.

1.2 O SEP

De acordo com a norma regulamentadora nº 10, regulamentada pela portaria nº3214, de 08 de junho de 1978, o Sistema Elétrico de Potência significa o conjunto de instalações e equipamentos destinados à geração, transmissão, medição e distribuição de energia elétrica.

Um Sistema Elétrico de Potência tem como objetivo fornecer energia elétrica aos consumidores, sejam eles grandes ou pequenos, com qualidade adequada e no instante em que for solicitada.

Sendo assim, esse sistema deve possuir alguns requisitos como continuidade (energia elétrica sempre disponível ao consumidor), conformidade (fornecimento de energia deve obedecer a padrões), flexibilidade (adaptação as mudanças contínuas de topologia), segurança (fornecimento de energia elétrica não deve causar riscos aos consumidores), manutenção (propriedade de ser devolvido à operação o mais rápido possível em caso de panes no sistema), tudo isso com o mínimo impacto ambiental possível. [6]

Pode-se subdividir os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) em 3 grandes blocos: geração, transmissão e distribuição, a Figura 1 ilustra a Estrutura básica de um SEP.

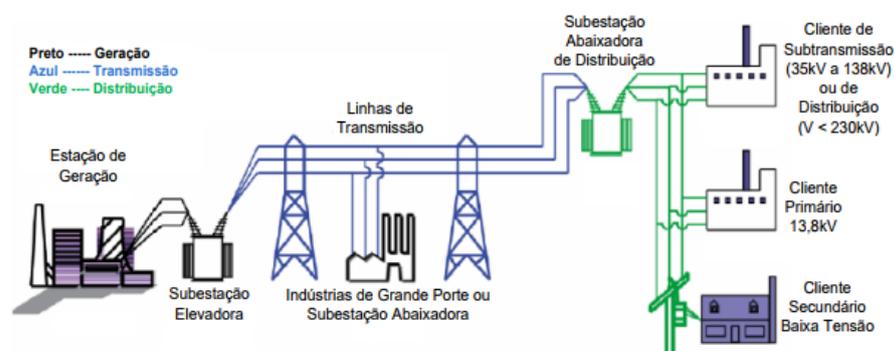


Figura 1- Estrutura básica de um SEP [6]

1.2.1 Geração

A energia elétrica é gerada, principalmente, nas usinas hidrelétricas, usando o potencial energético da água. Porém, ela pode ser produzida também em usinas eólicas, termoelétricas, solares, nucleares entre outras, o processo de geração consiste, portanto, na conversão de alguma forma de energia (cinética, calor, mecânica, solar, nuclear, etc) para obter energia elétrica.

De acordo com dados de Outubro de 2017, do Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), a maior parte da energia elétrica gerada no

Brasil tem procedência de empreendimentos hidrelétricos, correspondendo a cerca de 60,82 % de toda a capacidade instalada do País, hoje em cerca de 154 mil megawatts (MW). Os dados da matriz energética de geração de energia elétrica do Brasil podem ser verificados através da Tabela 1 e de seu gráfico correspondente, representado pela Figura 2.

Tabela 1 – Banco de Informações Matriz Energética Geração de Energia Elétrica [20]

Empreendimentos em Operação				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	%
CGH	618	562.368	564.824	0,37
EOL	470	11.551.739	11.512.743	7,46
PCH	431	4.970.991	4.955.175	3,21
UFV	60	386.248	359.151	0,23
UHE	219	101.188.678	93.877.884	60,82
UTE	2.933	42.494.554	41.099.989	26,63
UTN	2	1.990.000	1.990.000	1,29
Total	4.733	163.144.578	154.359.766	100

Os valores de porcentagem são referentes a Potência Fiscalizada. A Potência Outorgada é igual a considerada no Ato de Outorga. A Potência Fiscalizada é igual a considerada a partir da operação comercial da primeira unidade geradora.

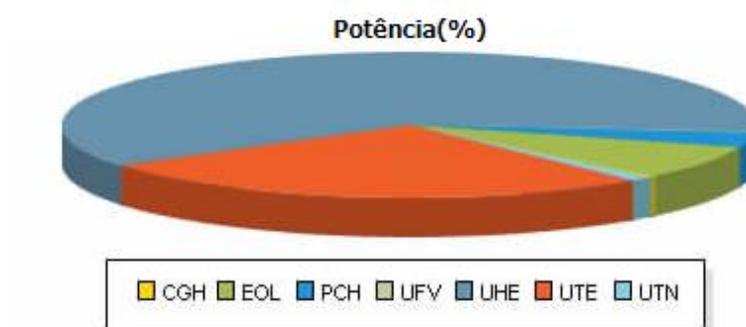


Figura 2 – Banco de Informações Matriz Energética Geração de Energia Elétrica, Aneel Outubro 2017 [20]

As usinas termelétricas movidas a carvão mineral, óleo combustível, gás natural ou nucleares representam o segundo maior potencial de geração de energia elétrica do Brasil, correspondendo a cerca de 26,63% da potência instalada. As fontes alternativas de energia elétrica, entre elas a energia solar fotovoltaica, eólicas, a co-geração como a queima da biomassa (madeira e cana de açúcar), pequenas centrais hidrelétricas, etc, vêm merecendo destaques, conforme verificado na Tabela 1.

No Brasil, nas grandes usinas geradoras, o nível de tensão na saída dos geradores está normalmente na faixa entre 6,9 a 30 kV. No caso das hidroelétricas e termelétricas os geradores são do tipo síncrono operando na frequência nominal de 60 Hz, que é a frequência dos sistemas elétricos brasileiros. [7]

1.2.2 Transmissão

A transmissão da energia elétrica pode ser definida como o transporte do fluxo de energia de uma região para outra. O Sistema Elétrico de Potência do Brasil apresenta como característica principal as grandes distâncias entre as fontes geradoras e os centros consumidores. Daí surge a necessidade de transmitir de maneira eficaz, com as menores perdas possíveis.

A linha de transmissão em corrente contínua é utilizada apenas em aplicações muito específicas, como na interligação de sistemas com frequências diferentes ou para transmissão de energia a grandes distâncias, isso ocorre pelo fato das estações conversoras apresentarem um custo ainda muito alto atualmente. [7]

No Brasil, o nível de tensão estabelecido está entre 230 kV e 750 kV. A necessidade de sistemas de transmissão em tensão superior à de geração e de distribuição se deve a viabilizar técnica e economicamente a transmissão. [8].

A Figura 3 representa a transmissão de energia na Islândia, são utilizadas torres de transmissão modernas, com design inovador e formato de humanos, transformando-as em obras de arte.



Figura 3 – Torres LT

1.2.2.1 Características Físicas das Linhas de Transmissão

O estudo de linhas de transmissão é muito importante, tendo como destaque avaliar as perdas por efeito Joule relativas ao processo. O desempenho elétrico de uma linha de transmissão depende de suas características físicas, que podem ser divididas em: condutores, isoladores, estruturas de suporte, cabos para-raios (cabos de aço colocados no topo da estrutura para proteção contra raios). [6]

- **Condutores**

Os condutores constituem os elementos ativos das linhas de transmissão. Devem possuir as características: alta condutibilidade elétrica, baixo custo, boa resistência mecânica, baixo peso específico e alta resistência a oxidação e à corrosão por agentes químicos poluentes.

A Equação 1 representa a resistência elétrica de um condutor.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

Em que ρ é a resistividade do condutor, que depende do material de que ele é feito e da sua temperatura, L é o comprimento do condutor e A é a área de sua seção reta.

Atualmente os cabos de alumínio têm sido os mais utilizados em grandes redes de transmissão, por serem mais baratos, mais leves, requerem área da seção reta maior que o cobre para as mesmas perdas e o custo é em torno de 25% do cobre. Enquanto os cabos de cobre vêm sendo mais usadas em instalações domésticas e urbanas. [9]

- **Isoladores**

Em relação aos condutores, os isoladores têm a função de suspensão, fixação e separação. Além disso, os isoladores estão sujeitos a solicitações mecânicas como: forças verticais pelo peso dos condutores, forças horizontais axiais para suspensão, forças horizontais transversais pela ação dos ventos e solicitações elétricas: tensão nominal e sobretensão em frequência industrial, oscilações de tensão de manobra, transitórios de origem atmosférica. [10]

De maneira geral, os isoladores devem oferecer uma alta resistência para correntes de fuga de superfície e ser suficientemente espesso para prevenir ruptura sob as condições de tensão que devem suportar.

- **Estrutura**

Em relação a estrutura, as dimensões e formas da estrutura das torres de uma Linha de Transmissão dependem de fatores como a disposição dos condutores, distância entre

condutores, dimensões e forma de isolamento, número de circuitos, materiais estruturais, etc. Uma característica em comum de todas as torres é que devem ser solidamente aterradas.

- **Cabos para-raios**

Os cabos para-raios se localizam no topo da torre e são usados com o objetivo de proteger a Linha de Transmissão, interceptando as descargas atmosféricas que do contrário incidiriam diretamente sobre a linha. [10]

1.2.2.2 Parâmetros das Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão em corrente alternada possuem parâmetros como resistência, condutância, indutância e capacitância que estão uniformemente distribuídas ao longo da linha. De acordo com [11], esses parâmetros podem ser definidos conforme:

- **Resistência (R)**

Pode ser definida como o parâmetro responsável pela dissipação ativa de potência, conforme a Equação 2, pela passagem da corrente.

$$P = RI^2 \quad (2)$$

Em que P representa a potência ativa, R a resistência e I a corrente.

- **Indutância (L)**

A indutância é o parâmetro que representa o armazenamento de energia no campo magnético com a circulação da corrente.

- **Condutância (G)**

Representa as correntes de fuga entre condutores e principalmente nos isoladores. Como esse parâmetro depende das condições da linha (umidade relativa do ar, nível de poluição, por exemplo), é muito variável, além disso, seu efeito normalmente é desprezado, devido a seu comportamento ser muito pequeno em relação ao geral da linha.

- **Capacitância (C)**

Esse parâmetro representa o armazenamento da energia no campo elétrico devido a diferença de potencial.

Segundo [12], a partir desses parâmetros, que representam os fenômenos físicos em uma linha de transmissão, é possível obter um modelo para representá-la. O modelo da linha de transmissão depende do comprimento da linha e da precisão que se deseja ter da modelagem matemática.

1.2.2.3 Modelos de Linhas de Transmissão

A Figura 4 representa o circuito equivalente monofásico de uma Linha de Transmissão com parâmetros distribuídos.

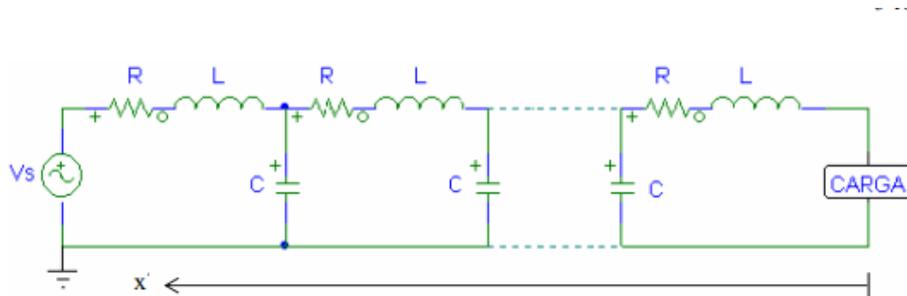


Figura 4 – Circuito Equivalente Monofásico Linha de Transmissão com parâmetros distribuídos

De acordo com [11] e a Figura 4, as análises a seguir são feitas. É importante destacar que as relações indicadas nas Equações 3 e 4 foram obtidas da linha de transmissão em corrente alternada, senoidal, atuando em regime permanente e com parâmetros distribuídos:

$$V(x) = \cosh(\gamma x) V_r + Z_c \sinh(\gamma x) I_r \quad (3)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x) V_r + \cosh(\gamma x) I_r \quad (4)$$

Sendo que:

- $V(x)$: Tensão fase neutro em qualquer ponto de linha, medido a partir do terminal receptor.
- $I(x)$: corrente de linha em qualquer ponto de linha, medido a partir do terminal receptor.
- V_r : Tensão fase neutro no terminal receptor.
- I_r : Corrente de linha no terminal receptor.
- Z_c : Impedância característica da linha, também representada pela Equação 5.

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} [\Omega] \quad (5)$$

Em que z e y são a impedância série e admitância shunt da linha, por unidade de comprimento e γ é a constante de propagação que define a amplitude e fase da onda ao longo da linha, representada pela Equação 6:

$$\gamma = \sqrt{zy} [m^{-1}] \quad (6)$$

1.2.2.4 Linha de Transmissão de Parâmetros Concentrados

Convencionalmente, considera-se linhas de transmissão média aquelas com extensão de 80 km até 240 km. Nesse trabalho, será considerada uma linha com extensão de 200km, portanto ela se enquadra em uma linha de transmissão média. [12]

Neste modelo o parâmetro da capacitância é considerado na representação do circuito, enquanto despreza-se a condutância em derivação.

Considere uma linha de transmissão representada por parâmetros concentrados como a Figura 5:

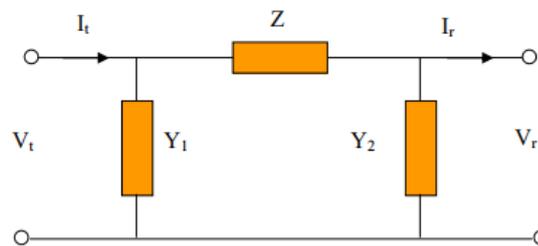


Figura 5– Circuito π de uma linha de transmissão

A partir da análise do circuito da Figura 5 pelas Leis de Kirchoff para corrente e tensão obtém-se as Equações 7 e 8 abaixo:

$$\begin{aligned} V_t &= V_r + Z(I_r + Y_2 V_r) \\ &= (1 + ZY_2)V_r + ZI_r \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} I_t &= Y_1 V_t + (Y_2 V_r + I_r) \\ &= Y_1 [V_r + Z(I_r + Y_2 V_r)] + Y_2 V_r + I_r \\ &= [Y_1(1 + ZY_2) + Y_2]V_r + (1 + ZY_1)I_r \end{aligned} \quad (8)$$

A representação de uma linha de transmissão pelo modelo de quadripolo pode ser feita conforme a Figura 6, de acordo com [11]:

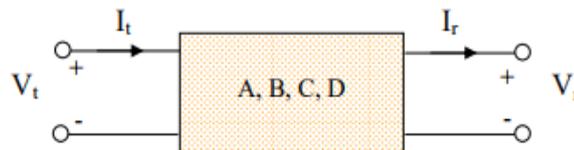


Figura 6– Quadripolo Representativo de uma Linha de Transmissão

A Equação 9 representa a relação entre as saídas V_r e I_r e as entradas V_t e I_t em função dos parâmetros A, B, C e D do quadripolo.

$$\begin{bmatrix} V_t \\ I_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (9)$$

Das Equações 7, 8 e 9, pode-se tirar as seguintes relações indicadas pela Equação 10:

$$A = (1 + ZY_2) \quad (10)$$

$$B = Z$$

$$C = [Y_1(1 + ZY_2) + Y_2]$$

$$D = (1 + ZY_1)$$

A partir da Figura 5 , fazendo $Y_1=Y_2$ e igual a metade da admitância total, pode-se representar o modelo π pela Figura 7 que representa uma Linha de Transmissão simétrica.

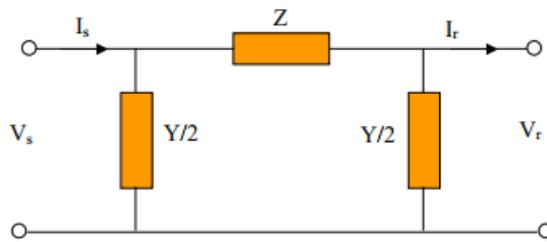


Figura 7 – Circuito π de uma Linha de Transmissão Simétrica

Através do conceito de Linha de Transmissão Simétrica e pelas Equações 7 e 8, obtém-se as Equações 11 e 12:

$$V_t = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right)V_r + ZI_r \quad (11)$$

$$I_t = Y\left(1 + \frac{ZY}{4}\right)V_r + \left(1 + \frac{ZY}{2}\right)I_r \quad (12)$$

Sendo assim, os parâmetros genéricos do modelo π simétrico, representando no formato da Equação 10 são indicados pela Equação 13:

$$A = D = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) [\text{p.u.}] \quad (13)$$

$$B = Z[\Omega]$$

$$C = Y\left(1 + \frac{ZY}{4}\right) [S]$$

Relacionando os parâmetros do modelo de linha concentrado, indicados pela Equação 13, com parâmetros da linha distribuída, representados pelas Equações 3 e 4, obtém-se as relações indicadas na Equação 14:

$$1 + \frac{ZY}{2} = \cosh(\gamma x) \quad (14)$$

$$Z = Z_c \sinh(\gamma x)$$

$$Y \left(1 + \frac{ZY}{4} \right) = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x)$$

Sendo assim, explicitando Z e $Y/2$ obtém-se os parâmetros concentrados, obtidos a partir de parâmetros do modelo distribuído, conforme a Equação 15, sendo Z_c a impedância característica da linha, γ a constante de propagação e l o comprimento da linha.

$$Z = Z_c \sinh(\gamma l) \quad (15)$$

$$\frac{Y}{2} = \frac{1}{Z_c} \tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right)$$

O modelo explicitado a partir da Equação 15, é chamado de modelo π Equivalente e é usado para representar linhas longas, quando o comprimento é maior que 250km. [9]

Como o estudo deste trabalho trata de uma linha de transmissão média o modelo a ser utilizado será o modelo π nominal.

Segundo [11], no modelo π nominal, os parâmetros da linha, Z e Y , são obtidos pelo produto da impedância z e admitância y por unidade de comprimento, e o comprimento l da linha, conforme a Equação 16.

$$Z = zl \quad (16)$$

$$Y = yl$$

Ainda de acordo com [11], o circuito indicado na Figura 8 representa o modelo π nominal.

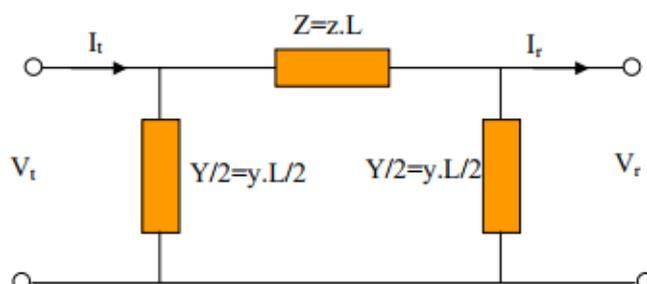


Figura 8– Circuito modelo π nominal

1.2.3 Distribuição

A rede de distribuição de energia elétrica é um setor do sistema elétrico, cuja construção, manutenção e operação é de responsabilidade das companhias distribuidoras de energia. As redes de distribuição alimentam consumidores industriais, comerciais e de serviços residenciais.

De acordo com a Resolução N°456/2000 da ANEEL e o Módulo 3 do Prodist (Procedimentos de Distribuição), a tensão de fornecimento para a unidade consumidora se dará de acordo com a potência instalada. Os níveis de tensão de distribuição, segundo o Prodist, são assim classificados:

- Alta tensão (AT): Tensão entre fases cujo valor eficaz é igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV.
- Média tensão de distribuição (MT): tensão entre fases cujo valor eficaz é superior a 1kV e inferior a 69kV.
- Baixa tensão de distribuição (BT): tensão entre fases cujo valor eficaz é igual ou inferior a 1kV. A rede BT representa o nível final na estrutura de um SEP. [13]

1.3 Sistemas de Proteção

Assim como exposto anteriormente, os sistemas elétricos de potência (SEP) tem como objetivo disponibilizar energia com qualidade, confiabilidade e continuidade. Entretanto, garantir isso nem sempre é uma tarefa fácil, visto que os SEP estão constantemente expostos a fatores como descargas atmosféricas, catástrofes naturais, falhas na operação, falhas em seus dispositivos (geradores, transformadores, cabos, disjuntores, chaves de manobra, barramentos, relés, motores, etc.).

Esses fatores acabam prejudicando todos os sistemas que estejam interligados, sendo necessário o isolamento da parte afetada, com o fim de minimizar os efeitos danosos e manter a maior parte possível dos sistemas em funcionamento. Assim, é necessário um sistema de proteção seletivo e eficaz para assegurar a confiabilidade e a continuidade no suprimento de energia. [14]

Portanto, em resumo, a proteção de qualquer sistema elétrico é diminuir ou evitar risco de vida e danos materiais, diminuindo despesas com manutenção corretiva, por exemplo, quando ocorrer situações anormais durante a operação do mesmo. Normalmente, os sistemas elétricos são protegidos contra sobrecorrentes (curtos-circuitos) e sobretensões (internas e descargas atmosféricas). A proteção contra curtos-circuitos, é feita, basicamente, empregando-se fusíveis e relés que acionam disjuntores. [21]

Na Figura 9, tem-se um sistema elétrico e seus diversos níveis de proteção (retângulos tracejados). Neste trabalho o foco será sistema de proteção do transformador abaixador controlado por relé de sobrecorrente, que será analisado posteriormente.

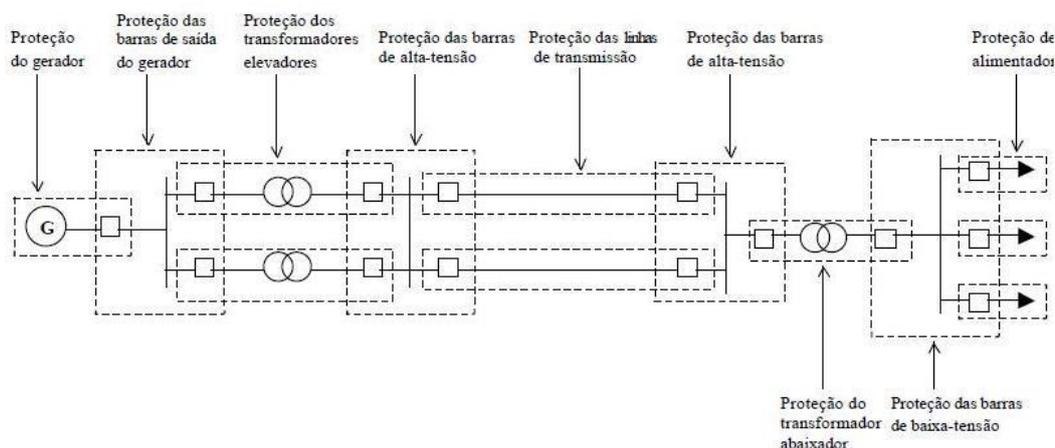


Figura 9– Sistemas de Proteção em um SEP [15]

1.3.1 Relé de Proteção

O relé de proteção pode ser definido como sendo um dispositivo sensor que comanda a abertura do disjuntor quando surgem, no sistema elétrico protegido, condições anormais de funcionamento. Ele é o elemento responsável pela tomada de decisão, sendo considerado o principal equipamento de proteção dos sistemas elétricos. O relé tem o objetivo de realizar a retirada rápida do elemento (equipamento, barra ou seção de linha) quando este está em curto-circuito ou operação anormal de funcionamento, impedindo que o problema se propague a outros elementos do sistema.

Além disso, é importante que os relés informem a devida localização da falta garantindo uma rápida manutenção do elemento causador da falta e, portanto o rápido religamento. Outra característica importante que esse dispositivo deve possuir, é realizar o registro de informações, como grandezas analógicas e digitais, possibilitando a análise da falta e da atuação da proteção usada. Podem ser de vários tipos como sobrecorrente, distância, impedância, direcional entre outros e encontrados com construção eletromecânica ou eletrônica. [16]

Segundo [16], a descrição do funcionamento do relé pode ser dividida em etapas:

- O relé encontra-se permanentemente recebendo informações da situação elétrica do sistema protegido sob a forma de corrente, tensão, frequência ou uma combinação dessas grandezas (potência, impedância, ângulo de fase, etc.);
- Se, em um dado momento, surgirem condições anormais de funcionamento do sistema protegido tais que venham a sensibilizar o relé, este deverá atuar de acordo com a maneira que lhe for própria.

- A atuação do relé é caracterizada pelo envio de um sinal que resultará em uma ação de sinalização (alarme), bloqueio ou abertura de um disjuntor (ou nas três ao mesmo tempo).
- A abertura ou disparo do disjuntor, comandada pelo relé, irá isolar a parte defeituosa do sistema.

Os relés são dotados de características definidas a fim de se ajustarem às várias condições impostas pelo sistema de proteção. Uma dessas características mais importantes são as curvas de temporização. [21]

A partir da declividade e do tempo de operação em função da grandeza da corrente de atuação, pode-se especificar o relé adequadamente para o esquema de proteção desejado. A Figura 10 representa alguns tipos de curvas características de operação dos relés.

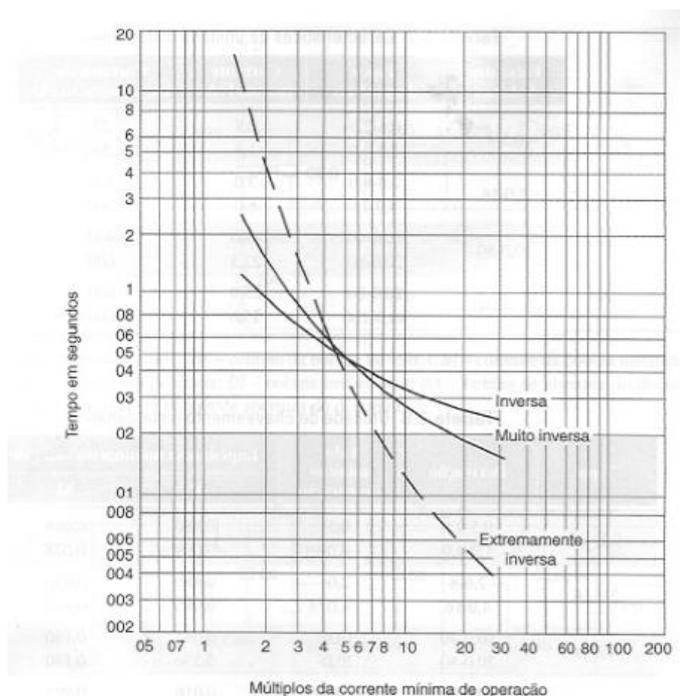


Figura 10 - Tipos de curvas características de operação [21]

Os relés de temporização inversa são empregados normalmente em sistemas elétricos em que o valor da corrente de curto-circuito circulando no relé depende muito da capacidade do sistema de geração. Os relés de temporização muito inversa são empregados normalmente em sistemas elétricos em que o valor da corrente de curto-circuito circulando no relé depende da localização do ponto onde ocorreu o defeito em relação ao relé. Os relés de temporização extremamente inversa são empregados na proteção de alimentadores de distribuição primária e são adequados à operação das cargas de sistemas de distribuição. [21]

1.3.2 Relé de Sobrecorrente

Esse tipo de Relé tem como grandeza de atuação a corrente elétrica do sistema, ou seja, quando a corrente do sistema atingir um valor igual ou superior ao ajuste previamente estabelecido o relé irá atuar.

A Figura 11 representa o esquema básico tradicional de proteção de um alimentador radial, trifásico e aterrado, na saída de subestação, onde foram utilizados três relés de fase e um de neutro ou terra, ligados através de três transformadores de corrente, comandando um disjuntor (52).

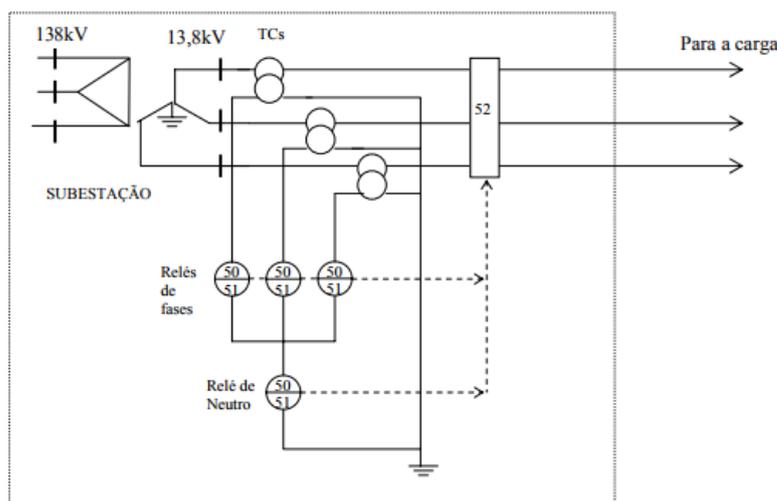


Figura 11– Circuito proteção alimentador por relés de sobrecorrente [16]

Os relés de fase irão proporcionar proteção ao alimentador contra os curtos-circuitos que envolvam, principalmente, as fases (trifásico e bifásico). O relé de neutro ou terra dará proteção contra os curtos para a terra (fase-terra e bifásico-terra). A vantagem desse esquema é que, para qualquer tipo de curto-circuito, haverá, no mínimo, dois relés sendo percorrido pela corrente de curto.

Atualmente, novos sistemas de proteção são implementados, utilizando-se relés microprocessados e digitais, nesses sistemas, os quatro relés do esquema da Figura 11 são substituídos por um único que realiza as funções 50 e 51 de fase e terra. Além disso, desempenham outras funções tais como: medição de corrente, registros de dados, de perturbações, etc. São conhecidos como relés de multifunções.

Apesar de todas as vantagens dos relés multifuncionais, ainda atualmente existem muitos casos em que os equipamentos eletromecânicos e estáticos, como representados na Figura 10 são mantidos, por questões econômicas.

1.3.3 Disjuntores

Os disjuntores são dispositivos eletromecânicos que protegem determinada instalação elétrica contra curto-circuitos ou sobrecargas, atuando também no reestabelecimento da corrente elétrica no circuito em que se encontra. [15]

São dispositivos de seccionamento de circuito dos sistemas elétricos, que podem operar em condições de carga ou de curto-circuito. O disjuntor possui uma bobina de abertura e uma bobina de fechamento que, quando energizadas, promovem respectivamente a abertura e o fechamento dos contatos principais que irão interromper a passagem da corrente. Os disjuntores possuem também contatos auxiliares que informam a posição dos contatos principais. Esses contatos são utilizados para informar a situação do disjuntor para os operadores de subestações, para os despachantes dos centros de operação de sistema e para os relés de proteção.

O disjuntor é projetado para suportar uma determinada corrente elétrica, caso ocorra um pico de corrente ou mesmo um curto circuito que eleve consideravelmente a corrente acima do limite suportado por esse, o mesmo interrompe o circuito, protegendo todos os elementos que compõem esse circuito, após sanado esse sinistro o disjuntor pode ser rearmado (manual ou eletricamente) para a continuidade do funcionamento deste circuito. Sendo assim, o disjuntor deve interromper a corrente de falta de uma instalação elétrica antes que os efeitos térmicos e dinâmicos desta corrente possam se tornar perigosos para a instalação. Por essa razão, ele pode atuar como dispositivo de manobra ou de proteção. [16]

O disjuntor também pode ser acoplado a um relé que atuará como elemento responsável pela detecção de condições anormais no circuito (como curto-circuitos, por exemplo) e envio do sinal para abertura do disjuntor. Portanto, um disjuntor instalado sem relé se torna apenas uma chave de manobra, não sendo considerado um dispositivo de proteção. [15]

No circuito a ser estudado ao longo do trabalho, um disjuntor tripolar é controlado por um relé de sobrecorrente interrompendo o fornecimento de energia ao circuito em caso de anormalidade com a corrente e realizando assim a proteção do circuito.

1.3.3.1 Classe de Tensão de Disjuntores

Segundo [15] pode-se dividir os disjuntores de acordo com a tensão do sistema em que estão inseridos, conforme:

- **Disjuntores de alta/média tensão**

Como esse tipo de disjuntor deve realizar a interrupção de altas correntes, são necessários mecanismos especiais para a interrupção do arco voltaico ou elétrico que é resultante na abertura dos polos. Em circuitos de grande potência, a corrente de curto-circuito pode alcançar valores muito altos, na ordem de 100kA, sendo assim após a interrupção, o disjuntor deve isolar e resistir às tensões do sistema. A Figura 12 representa um disjuntor a vácuo desenvolvido para a aplicações em redes com classe de tensão de 17,5kV, capacidade de interrupção de 25kA e com correntes de 630A a 2000A.



Figura 12 – Disjuntor de 17,5kV, fabricante WEG

Os disjuntores de alta/média tensão não atuam instantaneamente, isto é, passam alguns ciclos entre o instante em que ocorre o curto circuito e a extinção completa do arco. Isso decorre de alguns fatores como:

- Tempo para que o relé detecte o defeito e feche os contatos;
- Tempo para que haja o destravamento do mecanismo de acionamento, pela bobina de disparo;
- Tempo para que ocorra a abertura dos contatos;
- Tempo de extinção completa do arco.

Enquanto decorre este tempo, esforços mecânicos muito grandes no disjuntor e a todo o circuito são produzidos, este esforço ocorre instantaneamente, e é proporcional ao quadrado da corrente.

A corrente máxima, ocorre no primeiro ciclo, em função da componente contínua da corrente (assimétrica). Portanto o esforço máximo ocorre também no primeiro ciclo do tempo contado do início do curto circuito até a extinção completa do arco. Após esse primeiro ciclo, o valor da corrente decresce em função do decréscimo do valor da componente contínua, portanto, a corrente que o disjuntor deverá interromper, quatro a oito ciclos depois do início do curto circuito é geralmente de valor menor que a corrente máxima do primeiro ciclo.

Sendo assim, dois conceitos necessários para compreender a correta especificação dos disjuntores de alta/média tensão são:

- Corrente momentânea: Capacidade do disjuntor de suportar os esforços mecânicos produzidos pela corrente de curto circuito, do primeiro ciclo.
- Corrente de interrupção: Capacidade do disjuntor de interromper a corrente de curto circuito até a sua extinção. [18]
- **Disjuntores de baixa tensão**

Os disjuntores de baixa tensão mais comuns são os conhecidos como disjuntores termomagnéticos, que operam com disparadores térmicos e eletromagnéticos. Neles, a atuação dos disparadores é geralmente caracterizada por um limite próximo da corrente nominal, permitindo assim detectar sobrecorrentes de pequena intensidade. Eles podem ser divididos em três categorias: lentos, rápidos e limitadores, baseado no tempo de abertura, ou seja, tempo decorrido a partir do instante em que os contatos se separam dando início ao arco.

1.3.3.2 Parâmetros para especificação de disjuntores alta/média tensão

De acordo com [18], os dados a seguir devem ser considerados antes da especificação completa de um disjuntor de alta/média tensão em um circuito:

- **Tipo do Disjuntor**

Esse parâmetro é definido de acordo com o meio que utilizam para a extinção do arco:

- Disjuntores a pequeno volume de óleo
- Disjuntores a vácuo
- Disjuntores a SF₆
- Disjuntores a ar comprimido.

- **Características de Tensão**

É importante destacar o conceito de alguns termos relativos a tensão como:

-Tensão Nominal: É a tensão ou classe de tensão em que o disjuntor irá operar.

-Tensão Máxima: É a máxima tensão em que o disjuntor irá operar.

-Tensão Mínima de Operação: É a mínima tensão com que o disjuntor irá interromper a capacidade nominal de interrupção (MVA).

- **Característica de Isolamento**

-Tensão de Ensaio a Frequência Industrial: é o valor de tensão aplicada, de acordo com ensaios normalizados, com frequência de 60Hz, que define suas características de isolamento para sua classe de tensão.

-Nível Básico de Impulso: define a capacidade do disjuntor de superar efeitos causados por uma descarga atmosférica, direta ou indireta, e outros surtos. Este ensaio é realizado através de um gerador de impulsos, com um formato de onda padrão.

- **Capacidade de Corrente**

-Corrente Nominal: é a corrente que o disjuntor deverá suportar continuamente, sem que a sua temperatura exceda a temperatura máxima para qual foi dimensionado.

-Corrente Momentânea: é a máxima corrente assimétrica que o disjuntor deverá suportar, incluindo a contribuição de todas as fontes, motores síncronos e assíncronos e a componente contínua da corrente. Este valor define a capacidade do disjuntor de suportar os esforços de curto circuito assimétrico do primeiro ciclo. Este valor é definido aproximadamente como sendo de 1,6 a 1,8 vezes a corrente máxima (valor de pico).

-Corrente Suportável de Curta Duração: (1 seg.): é a corrente máxima que o disjuntor deverá suportar na posição fechada, por um período de 1 segundo, dando-se o tempo para que o relê opere. Este valor é o mesmo da máxima corrente de interrupção em amperes.

- **Capacidade de Interrupção**

-Capacidade Nominal de Interrupção (MVA): é a máxima potência de interrupção que o disjuntor irá interromper operando entre a tensão máxima e a tensão mínima de operação.

-Corrente Nominal de Interrupção: é a máxima corrente que o disjuntor irá interromper, operando na sua tensão nominal, obedecendo o limite de sua capacidade nominal de interrupção.

-Corrente Máxima de Interrupção: é a máxima corrente que o disjuntor irá interromper com tensão abaixo da tensão mínima de operação. Como Consequência o disjuntor terá uma

capacidade de interrupção menor, para essa tensão, que sua capacidade nominal de interrupção.

- **Tempo Interrupção**

Pode ser definido como o tempo total de operação contando da energização da bobina de disparo até a extinção completa do arco.

- **Corrente de Fechamento**

Definida como a máxima corrente de crista que o disjuntor poderá suportar no primeiro instante após o seu fechamento, em um sistema em curto circuito.

- **Ciclo de Operações**

Definido como o número de operações, dentro de um tempo pré-determinado, que o disjuntor deverá suportar em caso de curto circuito. [17]

1.4 Faltas trifásicas

Uma situação inesperada em um sistema de transmissão, conhecida como falta, pode gerar uma interrupção no fornecimento de energia. Essa ocorrência é aleatória e imprevisível na maior parte das vezes. A interrupção do fornecimento dessa energia é realizada por equipamentos de proteção (como os disjuntores e relés discutidos anteriormente) e tem como objetivo garantir a estabilidade do sistema e equipamentos envolvidos na transmissão de energia. Para efetuar o reestabelecimento da energia é importante localizar o ponto onde ocorreu a falta no sistema e a realização dos reparos necessários.

Como as linhas de transmissão de energia elétrica compõem a maior parte, em extensão, do sistema de transmissão de energia, a maioria das faltas que ocorrem no sistema elétrico de potência, envolvem as linhas de transmissão. Os motivos das faltas em linhas de transmissão podem ocorrer, devido a diversos fatores: problemas na isolação, “queimadas” próximas a linha de transmissão, contatos entre os cabos da linha de transmissão, entre outros. [9]

A importância de se analisar curtos-circuitos se dá para garantir a proteção de sistemas elétricos, tendo em vista que os cálculos de redes em curto são fundamentais no dimensionamento e ajuste dos diversos componentes de proteção.

Um curto-circuito pode ser definido como uma conexão intencional ou acidental, normalmente de baixa impedância, entre dois ou mais pontos que normalmente estão em diferentes potenciais elétricos. A consequência resultante é uma corrente elétrica que pode

atingir valores muito elevados, dependendo do tipo do curto-circuito. As consequências no sistema variam da elevação da temperatura nos condutores e equipamentos reduzindo a vida útil do mesmo a uma destruição completa dos dispositivos e cabos. Barramentos e bobinas de máquinas elétricas também podem sofrer danos mecânicos devido à alta força eletromagnética gerada em uma condição de curto-circuito. [15]

1.4.1 Análise de Falhas

Analisando as estatísticas em relação as falhas, constatou-se que em relação a quantidade de ocorrências, os curto-circuitos entre uma fase e a terra é o mais comum, com cerca de 70% das ocorrências. Em sistemas industriais a maior corrente normalmente se verifica em curtos trifásicos. Em termos de estabilidade transitória e dinâmica, o curto trifásico é o mais prejudicial à estabilidade e sincronismos dos geradores síncronos. [15]

De acordo com [6], em relação aos cálculos de curtos-circuitos em sistemas de transmissão e sub-transmissão é usual a adoção de simplificações, sem prejuízo ao ajuste dos equipamentos de proteção:

- As resistências em presença das reatâncias são desprezadas, para geradores, linhas, trafos, etc.;
- Admite-se impedância nula no ponto de ocorrência do curto-circuito;
- As correntes de carga no sistema, existentes antes do curto ocorrer, normalmente são desprezadas em presença das elevadas correntes de curto-circuito;
- Admite-se que todas as tensões geradas por vários geradores em paralelo estejam em fase e sejam iguais em módulo no instante do curto.

Além dessas simplificações, utiliza-se ferramentas para os cálculos de curtos-circuitos, como o uso do Teorema da Superposição de Efeitos, Teorema de Thevenin e método das componentes simétricas (ou Teorema de Fortescue). [6]

O método das componentes simétricas também conhecido como Teorema de Fortescue é muito utilizado para o estudo de sistemas polifásicos desequilibrados e será brevemente explicado sendo utilizado posteriormente para o estudo de alguns casos de falta.

Esse método consiste na decomposição dos elementos de tensão ou corrente das fases, em parcelas iguais, mas com ângulos diferentes. Assim, é possível desmembrar o circuito polifásico desequilibrado em 'n' circuitos monofásicos, supondo válido o princípio da superposição, ou seja, que os circuitos sejam lineares. No caso do sistema trifásico, haverá três componentes: zero, positiva e negativa. A componente positiva representa o elemento de

tensão ou corrente em condições normais equilibradas, com um sentido de giro, convencionalmente, o positivo. [6]

A componente de sequência negativa representa o elemento de tensão ou corrente com sentido de giro inverso. A componente de sequência zero ou homopolar representa o elemento de tensão ou corrente não girante. Ainda de acordo com [6], toma-se como exemplo, um vetor de tensões de fase pode ser expresso pela Equação 17:

$$V_{abc} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (17)$$

Analogamente, em componentes simétricas temos a Equação 18:

$$V_{012} = \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

A relação entre as tensões de fase e suas componentes simétricas é dada pela Equação 19:

$$V_{abc} = AV_{012} \quad (19)$$

Em que A é a matriz de transformação, também chamada matriz de Fortescue, e definida pela Equação 20:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Já α representa a defasagem de 120° entre cada fase, ou seja $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}$.

Das relações acima, tem-se a Equação 21:

$$V_{abc} = \begin{bmatrix} V_0 + V_1 + V_2 \\ V_0 + \alpha^2 V_1 + \alpha V_2 \\ V_0 + \alpha V_1 + \alpha^2 V_2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

1.4.1.1 Falta Fase-Terra

Esse tipo de falta é o mais usual em um sistema elétrico de potência. Considere a ocorrência de um curto-circuito fase-terra, na fase A, conforme ilustrado na Figura 13 e de

acordo com [9]. Em que Z_f é a impedância de falta fase-terra e Z_0, Z_1 e Z_2 são as impedâncias do sistema vistas a partir do ponto de falta.

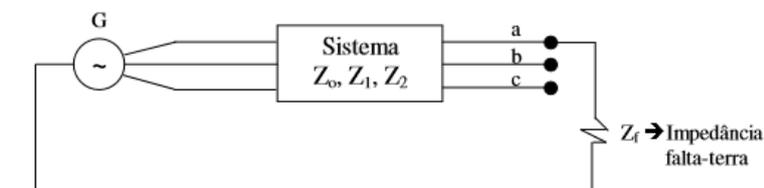


Figura 13 – Modelo de um Curto-circuito Fase-Terra

Segundo [9] e a partir das condições de falta e da Figura 13 faz-se as análises representadas pelas Equações 22 e 23:

$$V_a = Z_f I_a \quad (22)$$

$$I_b = I_c = 0 \quad (23)$$

Para realizar a análise desse curto-circuito pode-se utilizar as componentes simétricas e o Teorema de Fortescue tanto para as análises em tensão quanto para corrente.

Analogamente a Equação 21, da relação da tensão, pode-se obter uma relação com corrente conforme a Equação 24:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Fazendo a multiplicação de matrizes, obtém-se a seguinte relação indicada na Equação 25:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (25)$$

Desprezando as correntes de carga, as componentes zero, positiva e negativa na fase A podem ser representadas pela Equação 26:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\text{Daí, } I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{1}{3} I_a$$

Segundo [9], tem-se que em relação as tensões, a presença apenas da f.e.m. de sequência positiva E_1 deve ser considerada devido ao fato das tensões trifásicas internas geradas (E_a , E_b e E_c) serem simétricas, portanto não afetam as sequências inversa e zero, apenas a sequência direta. Daí, pode-se tirar a seguinte relação indicada na Equação 27:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_1 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_a \\ I_a \\ I_a \end{bmatrix} \quad (27)$$

Daí, a seguinte relação indicada pela Equação 28 pode ser obtida:

$$V_{a0} = -Z_0 \frac{1}{3} I_a \quad (28)$$

$$V_{a1} = E_1 - Z_1 \frac{1}{3} I_a$$

$$V_{a2} = -Z_2 \frac{1}{3} I_a$$

A partir da Equação 22, obtém-se a Equação 29:

$$I_a = \frac{V_a}{Z_f} = \frac{-Z_0 \frac{1}{3} I_a + E_1 - Z_1 \frac{1}{3} I_a - Z_2 \frac{1}{3} I_a}{Z_f} \quad (29)$$

Finalmente, obtém-se a corrente de curto-circuito fase-terra pela Equação 30:

$$I_a = I_f = \frac{3E_1}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \quad (30)$$

Sendo assim, o diagrama elétrico do curto-circuito fase-terra na fase A, assim como as componentes da corrente, podem ser representados como na Figura 14. [9]

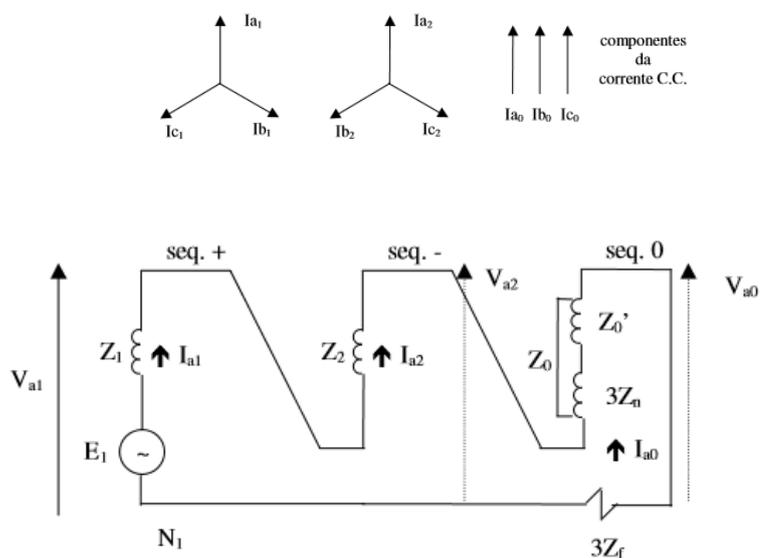


Figura 14 - Diagrama elétrico do curto-circuito fase A-terra e componentes da corrente

Verifica-se que no circuito acima a presença das componentes positiva (E_1, V_{a1}, Z_1, I_{a1}), negativa (V_{a2}, Z_2, I_{a2}) e zero (V_{a0}, Z_0, I_{a0}). Em que, Z_0, Z_1 e Z_2 são as componentes das impedâncias do sistema, visto a partir do ponto de defeito e E_1 a f.e.m. de sequência positiva. Além disso, a impedância de sequência zero, Z_0 leva em conta a impedância de aterramento do centro-estrela, representada por $3Z_n$. [9]

1.4.1.2 Falta Fase-Fase

A falta Fase-Fase é o segundo tipo mais comum entre os tipos de falta, em um sistema elétrico de potência. Considere a ocorrência de um curto-circuito fase-fase, nas fases B e C, conforme ilustrado na Figura 15. Em que Z_f é a impedância de falta fase-fase e Z_0, Z_1 e Z_2 são as impedâncias do sistema vistas a partir do ponto de falta. [9]

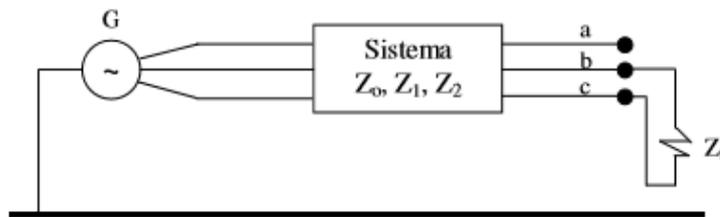


Figura 15 - Modelo de um Curto-circuito Fase-Fase

A análise do modelo da Figura 15 juntamente com as condições no ponto de falta nos fornecem as Equações 31, 32 e 33:

$$V_b - V_c = Z_f I_b \quad (31)$$

$$I_a = 0 \quad (32)$$

$$I_b = -I_c \quad (33)$$

De maneira semelhante ao que foi feito na falta fase-terra, as análises da falta fase-fase serão feitas, segundo [9].

Portanto, em relação as componentes simétricas da corrente, tem-se a Equação 34:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -I_c \\ I_c \end{bmatrix} \quad (34)$$

Assim, as Equações 35 e 36 são obtidas:

$$I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} = 0 \quad (35)$$

$$I_{a2} = -I_{a1} \quad (36)$$

Em relação as componentes simétricas das tensões, tem-se a Equação 37:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_1 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (37)$$

Daí as relações abaixo foram obtidas conforme indicado na Equação 38, 39,40,41,42,43,44,45 e 46:

$$V_{a0} = -Z_0 I_{a0} = 0 \quad (38)$$

$$V_{b0} = -Z_0 I_{b0} = 0 \quad (39)$$

$$V_{c0} = -Z_0 I_{c0} = 0 \quad (40)$$

$$V_{a1} = E_{a1} - Z_1 I_{a1} \quad (41)$$

$$V_{b1} = E_{b1} - Z_1 I_{b1} \quad (42)$$

$$V_{c1} = E_{c1} - Z_1 I_{c1} \quad (43)$$

$$V_{a2} = Z_2 I_{a1} \quad (44)$$

$$V_{b2} = Z_2 I_{b1} \quad (45)$$

$$V_{c2} = Z_2 I_{c1} \quad (46)$$

Ainda segundo o Teorema de Fortescue, sabe-se as seguintes Equações 47, 48 e 49:

$$V_b = V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} \quad (47)$$

$$V_c = V_{c0} + V_{c1} + V_{c2} \quad (48)$$

$$I_b = I_{b0} + I_{b1} + I_{b2} \quad (49)$$

Substituindo as Equações 38, 39,40,41,42,43,44,45 e 46 nas Equações 47,48 e 49 e utilizando as Equações 35 e 36 e suas expressões correspondentes para V_b, V_c , partindo da Equação 31, obtém-se a Equação 50:

$$I_a = \frac{E_1}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (50)$$

A corrente de falta I_f corresponde a $I_b = -I_c$, daí a partir da Equação $I_b = I_{b0} + I_{b1} + I_{b2}$ sabe-se que:

A partir da Equação 49 e conhecendo as propriedades das componentes positiva, negativa e zero, obtém-se a Equação 51:

$$I_b = I_{b0} + I_{b1} + I_{b2} = \alpha^2 I_{a1} + \alpha I_{a2} \quad (51)$$

Sabendo que a corrente de falta, I_f corresponde a Equação 33, obtém-se a Equação 52:

$$I_f = \alpha^2 I_{a1} - \alpha I_{a1} = (\alpha^2 - \alpha) I_{a1} \quad (52)$$

Ainda pelas propriedades das componentes positiva, negativa e zero, sabe-se a seguinte relação, representada pela Equação 53:

$$(\alpha^2 - \alpha) = -j\sqrt{3} \quad (53)$$

Assim, finalmente obtém-se a corrente de falta, I_f fase-fase como indicada na Equação 54 :

$$I_f = -j \frac{\sqrt{3} E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (54)$$

A partir das análises realizadas, o circuito equivalente pode ser obtido conforme indicado pela Figura 16, note que não há circulação de corrente de neutro do gerador, ou seja, o circuito de sequência zero é desconsiderado. [9]

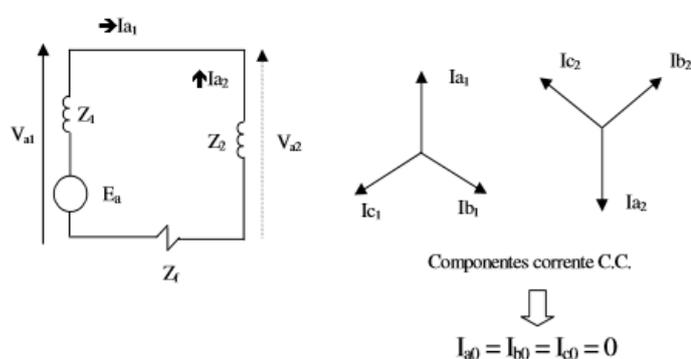


Figura 16 - Diagrama elétrico do curto-circuito fase B-fase C e componentes da corrente

1.4.1.3 Falta Entre 2 Fases-Terra

Esse tipo de falta é o que tem terceira maior quantidade de ocorrências. E pode ser representado conforme indicado na Figura 17.

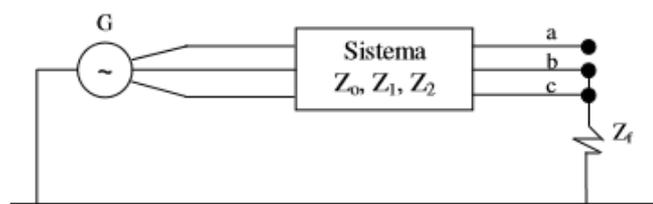


Figura 17 - Modelo de um Curto-circuito 2 Fases-Terra

Pela a análise do circuito da Figura 16, assim como as condições de falta obtém-se as Equações 55,56 e 57:

$$I_a = 0 \quad (55)$$

$$V_b = V_c = Z_f I_f \quad (56)$$

$$I_b + I_c = I_f \quad (57)$$

Os componentes simétricos da tensão são representados pela Equação 58:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (58)$$

Semelhante a análise feita na falta fase-terra, através da Equação 28, obtém-se as relações indicadas na Equação 59:

$$V_{a0} = 0 - I_{a0} Z_0 \quad (59)$$

$$V_{a1} = E_{a1} - I_{a1} Z_1$$

$$V_{a2} = 0 - I_{a2} Z_2$$

De acordo com [9] e partindo da Equação 56 e a partir de substituições utilizando as relações representadas pela Equação 59, obtém-se as equações 60,61 e 62:

$$I_{a0} = \frac{-Z_2}{Z_1 Z_2 + (Z_0 + 3Z_f)(Z_1 + Z_2)} E_{a1} \quad (60)$$

$$I_{a1} = \frac{Z_0 + Z_2 + 3Z_f}{Z_1 Z_2 + (Z_0 + 3Z_f)(Z_1 + Z_2)} E_{a1} \quad (61)$$

$$I_{a2} = \frac{Z_0 + 3Z_f}{Z_1 Z_2 + (Z_0 + 3Z_f)(Z_1 + Z_2)} E_{a1} \quad (62)$$

Finalmente, sabendo da Equação 63:

$$I_f = 3I_{a0} \quad (63)$$

Tem-se que a corrente de falta duas fases-terra, é dada pela Equação 64:

$$I_f = \frac{-3Z_2}{Z_1 Z_2 + (Z_0 + 3Z_f)(Z_1 + Z_2)} E_{a1} \quad (64)$$

1.4.1.4 Falta Trifásica ou Simétrica

O curto-circuito Trifásico, também chamado de curto simétrico, é o tipo que ocorre com menor frequência. Nesta situação, admite-se que todos os condutores da rede são solicitados de modo idêntico e conduzem o mesmo valor eficaz da corrente de curto, por essa razão, é classificado como curto Simétrico.[17]

A Figura 18 representa um modelo desse tipo de falta.

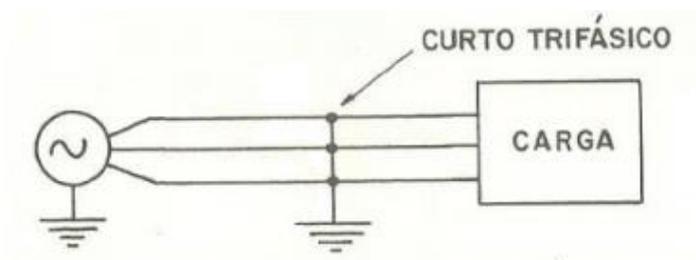


Figura 18 - Modelo de um Curto-circuito Trifásico

O cálculo da corrente de falta trifásica pode ser efetuado por fase, considerando apenas o circuito equivalente de sequência positiva. O circuito equivalente é dado pela Figura 19.

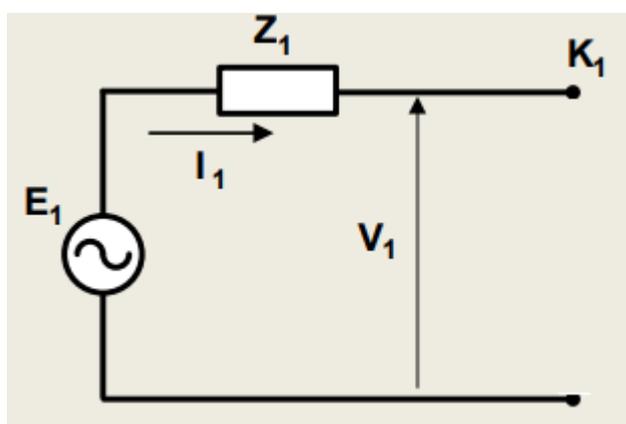


Figura 19 – Diagrama elétrico do curto-circuito trifásico

A Equação 65 representa o curto-circuito trifásico no ponto K1, a partir da Figura 18.

$$I_f = \frac{E_1}{Z_1} \quad (65)$$

1.5 Falhas em um SEP

Em um Sistema Elétrico de Potência, interrupções provocadas pelo sistema de proteção normalmente tem origem em faltas (curto-circuitos). Nessa situação, o disjuntor desarma, causando a interrupção temporária do sistema e necessitando de um rearme para reestabelecer energia novamente no sistema e acabar com a interrupção.

Os casos típicos de faltas ocorrem na alimentação das subestações, alguma linha de alimentação paralela ou ainda em algum ponto na linha de transmissão. A Figura 20 representa possíveis falhas em um Sistema Elétrico de Potência. [2]

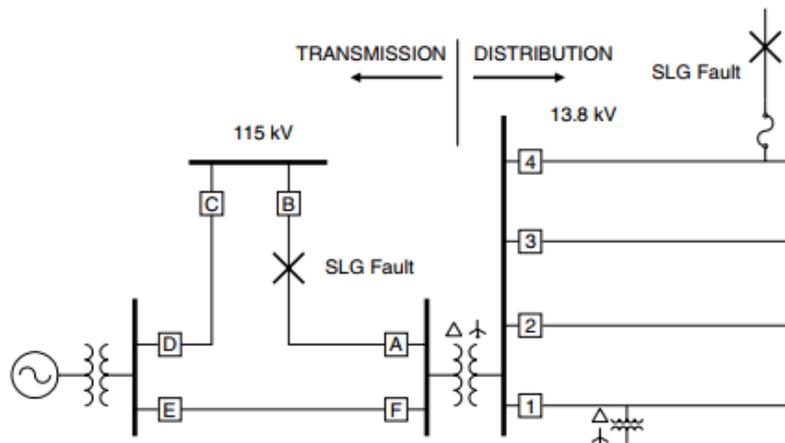


Figura 20 – Circuito de um SEP com falhas

Em relação a falta na linha de transmissão observada na Figura 19, os disjuntores responsáveis pelo desarme (nesse caso A e B) tipicamente irão fazer a interrupção em 5 ou 6 ciclos após a falta. Nesse caso, como existem duas linhas de transmissão e apenas uma possui falta, o consumidor não ficará sem energia, visto que será alimentado pela linha de transmissão sem falta, e assim não haverá interrupção, mas apenas uma queda de tensão será notada pelo consumidor. [2]

Em relação a falta no alimentador 4 do sistema de distribuição, a proteção deve ser feita tanto pelo fusível quanto pelo disjuntor 4. Qualquer uma dessas falhas pode causar problemas na operação de equipamentos do consumidor. A importância de se entender os efeitos provados por faltas, seja na transmissão quanto na distribuição dependem das características específicas do sistema, além da sensibilidade dos equipamentos em relação a quedas de tensão.

De acordo com [2], a Figura 21 indica a porcentagem dos eventos que causam mal funcionamento em equipamentos de consumidores industriais.

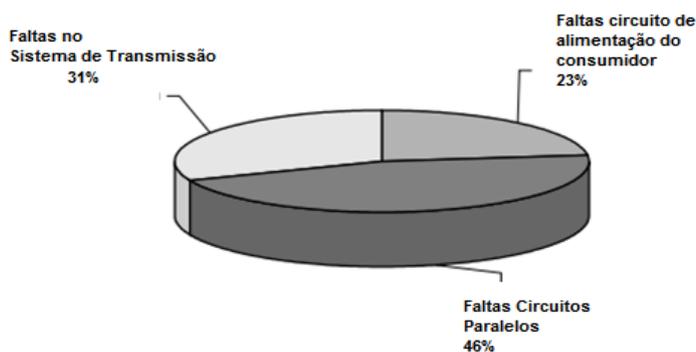


Figura 21 – Eventos que causam mal funcionamento em equipamentos industriais

A análise da Figura 21 indica que a maior parte dos eventos (cerca de 46%) advém de faltas em circuitos paralelos ao circuito no qual o equipamento industrial do consumidor está inserido. Além disso, cerca de 31% dos eventos são resultados em faltas no sistema de transmissão, enquanto faltas provocadas pelo circuito de alimentação do consumidor contabilizam 23% dos eventos que resultam em mal funcionamento de equipamentos.

2 *Materiais e Métodos*

2.1 *Simulações*

2.1.1 *Introdução*

As simulações realizadas nesse trabalho são baseadas no circuito da Figura 19 e são realizados com o intuito de analisar a magnitude e duração da corrente de curto-circuito, para cada tipo de falta simulado com e sem atuação do sistema de proteção. O tempo de resposta para atuação do sistema de proteção após cada tipo de falta simulado também são analisados.

O software utilizado é o Simulink, desenvolvido pela companhia MathWorks, que é uma ferramenta para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. A Figura 22 representa o circuito simulado, ainda sem a representação das faltas.

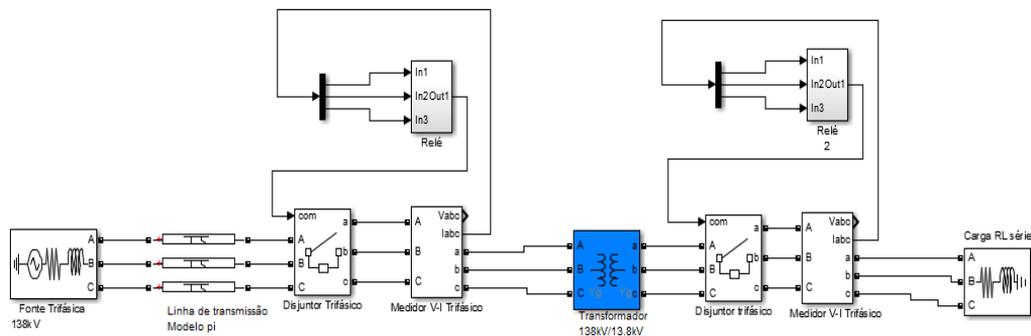


Figura 22 – Circuito simulado sem as faltas

A Figura 22 representa a transmissão e distribuição de um Sistema Elétrico de Potência alimentando uma carga RL assim como abordado em [19]. Cada bloco utilizado será devidamente explicado a seguir.

2.1.2 *Parâmetros dos blocos*

A Fonte Trifásica 138kV representa a tensão da linha de transmissão do sistema, onde os seus parâmetros são definidos conforme a Figura 23.

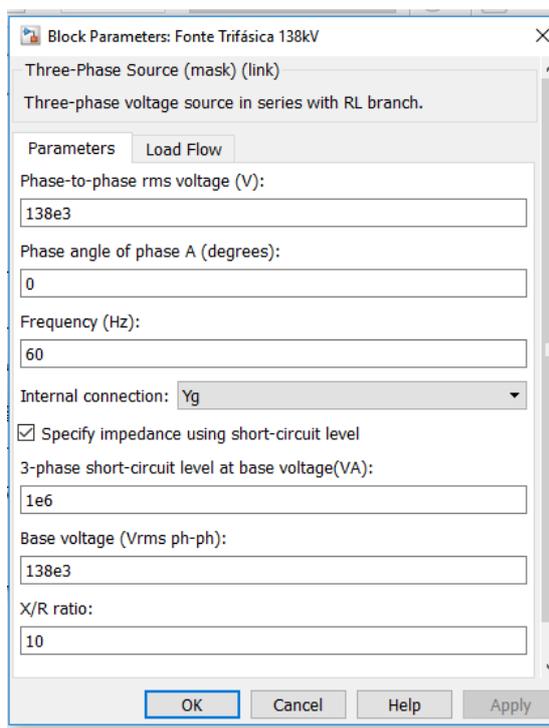


Figura 23 – Parâmetros Fonte Trifásica 138kV

Os valores definidos são os parâmetros convencionais em Sistemas Elétricos de Potência no Brasil, sendo a frequência 60Hz e considerado a Potência Aparente de base 10MVA, a tensão de base 138kV e a relação X/R como 10 para representar a impedância da fonte, como possíveis perdas do sistema. O valor de 138kV é escolhido por se tratar de uma tensão usual nas linhas de transmissão no Brasil, como já abordado anteriormente e pode ser visualizado na Figura 1.

Para representar a linha de transmissão, o modelo π nominal é utilizado, visto que essa simulação representa uma linha de tamanho média (200km) e como já foi explicado anteriormente para esse tipo de linha de transmissão esse modelo é o mais aconselhável, a Figura 8 representa esse modelo e a Figura 22 o circuito simulado. Os valores de resistência, indutância e capacitância por unidade de comprimento do bloco foram determinados com o auxílio do Simulink, que determina os parâmetros RLC da linha de acordo com o tipo do cabo utilizado e da torre da linha de transmissão, conforme indicado na Figura 24.

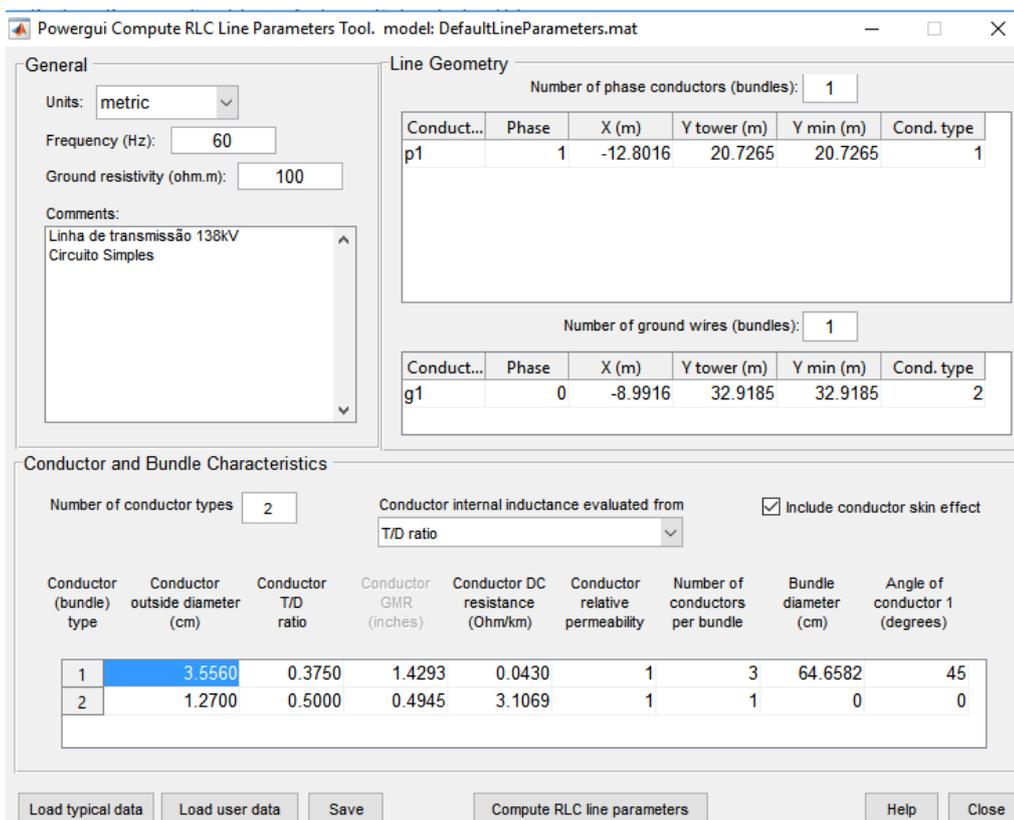


Figura 24 – Determinação dos parâmetros RLC por unidade de comprimento da linha de transmissão. Assim conforme detalhado ao longo do trabalho, é importante notar as características físicas das linhas de transmissão. Os valores utilizados nos condutores e na torre são os valores usuais em linhas de transmissão de 138kV com circuitos simples. Daí, após obter-se os valores da resistência, indutância e capacitância por unidade de comprimento, é possível modelar o bloco da linha de transmissão conforme indicado na Figura 25.

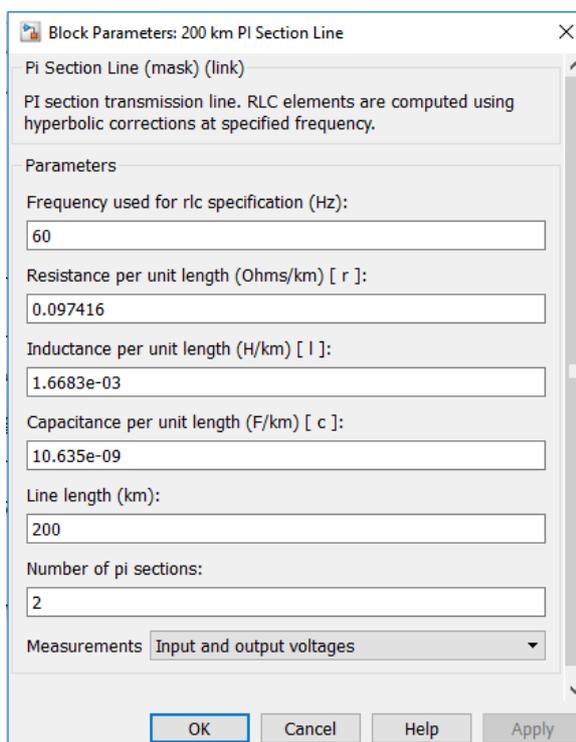


Figura 25 – Parâmetros bloco linha de transmissão

É importante o correto dimensionamento dos parâmetros de cada bloco para garantir que a simulação tenha o resultado mais próximo do real possível. Os outros blocos foram utilizados com parâmetros padrões do Simulink.

2.1.3 Modelagem Relés de Sobrecorrente

O sistema de proteção é composto por um Disjuntor Trifásico controlado por um relé, o qual foi modelado conforme a Figura 26.

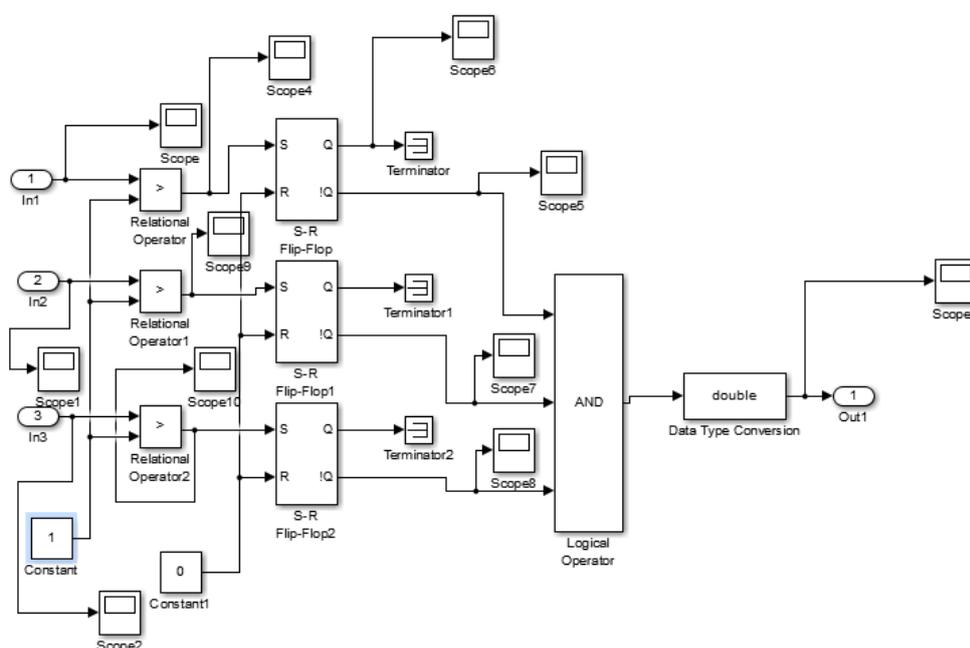


Figura 26 – Modelagem relés de Sobrecorrente

De acordo com o modelo da Figura 25, quando a corrente de alguma fase (A,B ou C) do sistema (indicados pelas entradas 1,2 e 3 respectivamente) for maior do que 1,0 p.u. o relé irá emitir um sinal junto ao disjuntor que irá desarmar, protegendo o sistema. O valor 1,0 p.u. foi escolhido pelo fato do valor de pico da corrente do sistema ser cerca de 0,6 p.u., como será representada posteriormente. Sendo assim, como explicado ao longo deste Trabalho, a máxima corrente que o disjuntor poderá suportar, pode ser definida como sendo de 1,6 a 1,8 vezes o valor de pico da corrente nominal, portanto cerca de 1,0p.u.. O correto dimensionamento dos dispositivos de proteção é muito importante na proteção de Sistemas Elétricos de Potência como será comprovado ao longo do trabalho.

Nota-se que no circuito representado pela Figura 21 foram representados os blocos de transmissão e distribuição de um SEP, e o transformador (138kV/13,8kV), que separa a Transmissão da Distribuição.

Assim, após o transformador abaixador (138kV/13.8kV) tem-se o Sistema de Distribuição, alimentando uma carga RL. O segundo relé foi modelado de maneira semelhante ao primeiro.

Esse circuito apresenta apenas uma linha de transmissão, sendo assim qualquer interrupção na linha significa falta de energia junto ao consumidor e na carga. Foram feitas simulações com duas faltas, que foram analisadas inicialmente separadamente e posteriormente de maneira simultânea. O posicionamento das faltas partiu da análise do gráfico indicado na Figura 20. Sendo assim, elas foram posicionadas no circuito de

distribuição (circuito da carga) e também no sistema de transmissão. Não foram feitas análises em circuitos paralelos pelo fato do Sistema Elétrico de Potência simulado possuir apenas uma linha de transmissão, sendo sugerido para trabalhos futuros.

3 Resultados e Discussões

O foco da simulação será dado nas faltas Fase-Terra, pelo fato de serem as que mais ocorrem, como já foi relatado neste trabalho.

3.1 Falta na Distribuição

A primeira simulação realizada se dá no circuito da carga e está indicada na Figura 27.

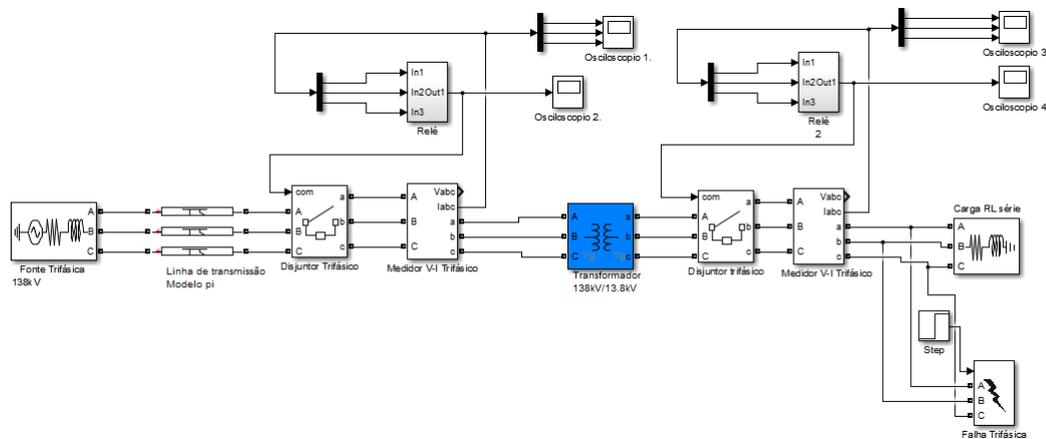


Figura 27 – Circuito simulado com falta na Distribuição

A falha realizada foi Fase A-Terra e foi programada para ser aplicada no instante de tempo $t=0,1s$ (programada pelo degrau). Os osciloscópios 1 e 3 indicam as correntes nas fases A, B e C em seus respectivos pontos enquanto os osciloscópios 2 e 4 indicam o momento em que os respectivos relés 1 e 2 dão o sinal para o respectivo disjuntor desarmar.

Por se tratar de uma falha no circuito da carga a análise será feita em relação ao Relé 2 e sua atuação. As formas de onda das correntes nas fases A, B e C, obtidas a partir do Osciloscópio 3 são representadas pela Figura 28.

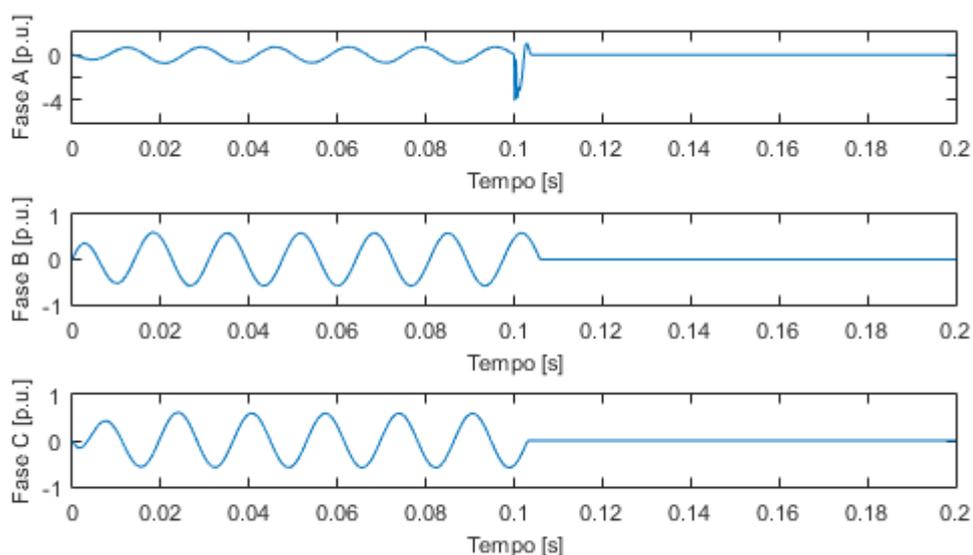


Figura 28 – Correntes Fases A,B e C Circuito com Falta na Distribuição na Fase A

Nota-se que as correntes apresentam a mesma forma de onda (defasadas de 120°) até o instante $t=0,1s$, no qual a falta na Fase A-Terra foi inserida, como era de se esperar. O valor máximo da corrente é cerca de $0,6p.u.$, daí, assim como já foi relatado anteriormente verifica-se a necessidade do correto dimensionamento do relé (projetado no caso, para enviar o sinal de desarme quando alguma corrente for superior a $1,0 p.u.$).

A Figura 29 representa a corrente de curto-circuito na fase A aproximada para realização das análises.

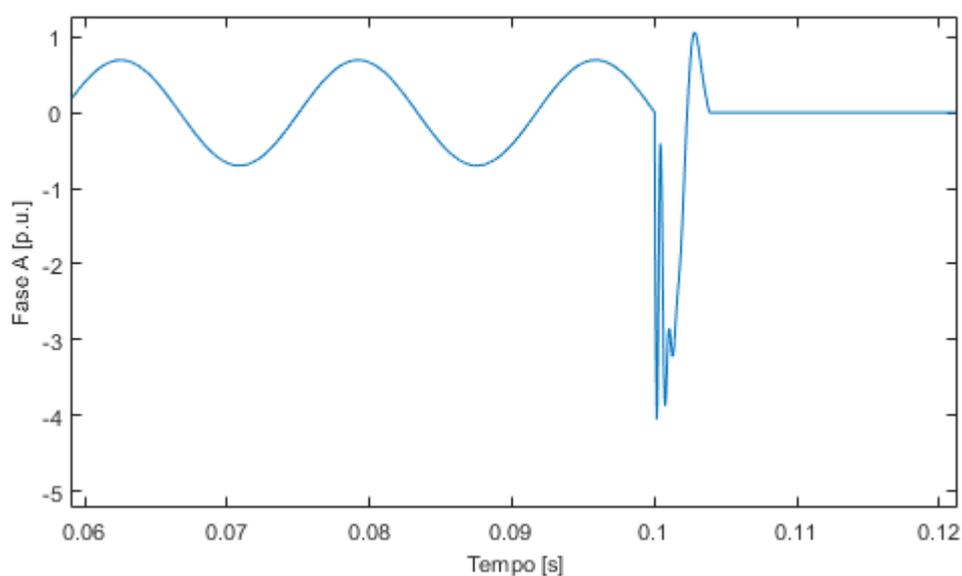


Figura 29 – Corrente de curto Circuito com Falta na Distribuição e na Fase A

Observa-se claramente os efeitos da falta inserida no instante $t=0,1s$, na forma de onda da corrente da Fase A que atinge picos de até cerca de $-4,0p.u.$. Além disso, a corrente apresenta valor nulo no instante de tempo, $t= 0,104s$.

Através do osciloscópio 4, é possível analisar que o relé emite um sinal para desarme do disjuntor no instante de tempo $t=0,1027s$. Essa diferença entre o instante de tempo do sinal enviado pelo relé ($t=0,1027s$) e o instante de tempo no qual as correntes estão completamente nulas ($t=0,104s$) se dá pela atuação do disjuntor, que desarma e provoca a interrupção no sistema e é compatível com o que foi estudado anteriormente neste Trabalho.

Outra análise a ser feita, em relação ao tempo de atuação do relé dado pela diferença entre o sinal enviado para o disjuntor ($t=0,104s$) e o instante de tempo em que a falta é inserida ($t=0,1s$), ou seja, cerca de $40ms$ é diferente dos 5 ou 6 ciclos ($83ms$ e $100ms$) que, de acordo com [2] é o tempo típico de atuação dos relés nesses casos de falta, assim como já foi abordado anteriormente neste trabalho, essa diferença pode ser explicada devido aos parâmetros escolhidos para a simulação.

Além disso, é possível concluir que o maior valor da corrente de curto-circuito (cerca de $-4,0p.u.$) realmente se dá no primeiro ciclo após a ocorrência da falta, como se era esperado segundo [18] e já abordado neste trabalho.

3.2 Diferenças entre correntes de curto-circuito entre fases

Se forem feitas simulações semelhantes, com a Falta Fase-Terra inseridas na Fase B e posteriormente na Fase C, obtém-se resultados semelhantes aos obtidos na Fase A, daí a mesma análise feita para a Fase A poderá ser feita para as outras fases.

As pequenas diferenças existentes relativas as correntes de curto circuito em cada fase, podem ser explicadas em virtude da Equação (30) e conseqüentemente, da diferença das impedâncias em cada sequência entre cada fase. Como exemplo, a Figura 30 representa a corrente de curto-circuito na Fase B e a Figura 31 na Fase C, considerando o mesmo circuito da Figura 27.

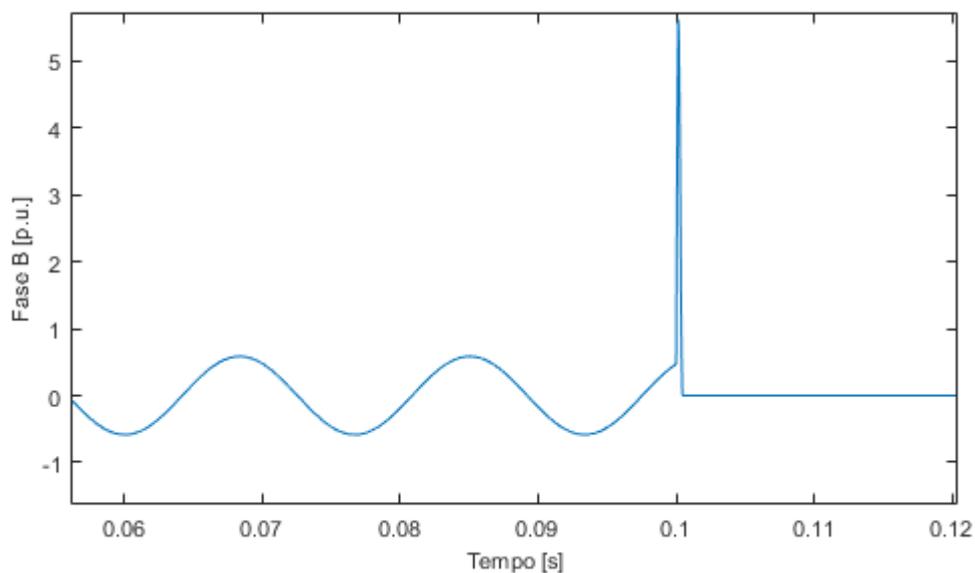


Figura 30 – Corrente de curto Circuito Fase B Falta na Distribuição

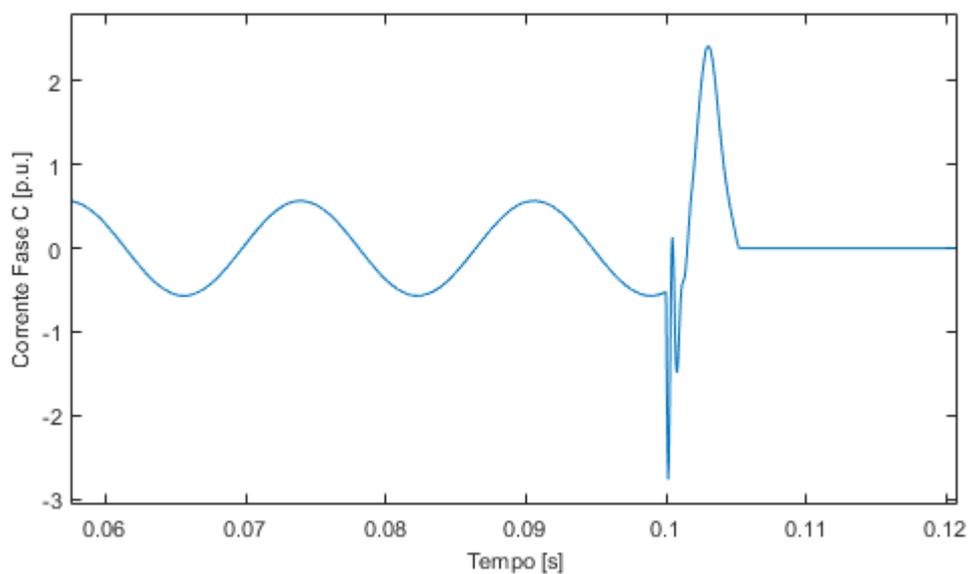


Figura 31 – Corrente de curto Circuito Fase C Falta na Distribuição

3.3 Mal dimensionamento Relé de Sobrecorrente

Nas simulações realizadas até aqui, os relés de sobrecorrente, foram dimensionados para desarmar o disjuntor caso detectassem a presença de uma corrente maior do que 1,0p.u.. Ainda utilizando o circuito da Figura 27 com uma falta na fase A, porém alterando o valor dos

relés de sobrecorrente para 10,0p.u. (o que seria um erro grave de ajuste no relé) tem-se as formas de onda para as correntes nas fases A,B e C como indicado na Figura 32.

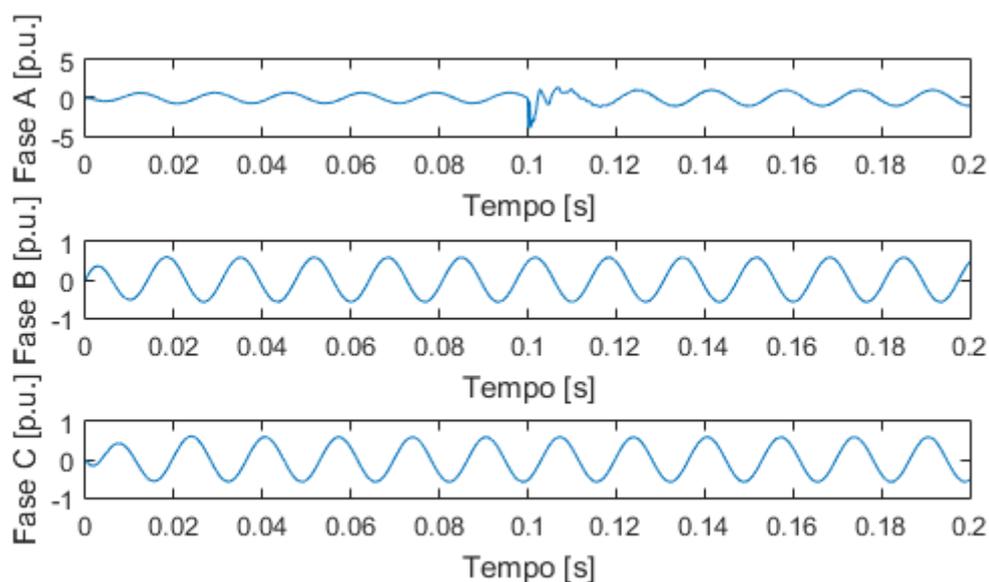


Figura 32 – Correntes Fases A,B e C- Falta Fase A-Terra Relé Sobrecorrente mal dimensionado

Observa-se claramente que os disjuntores não desarmam mesmo após a ocorrência da falta. Isso pode ser comprovado através da forma de onda da corrente de curto-circuito na Fase A indicada na Figura 33, que foi ampliada para melhor visualização.

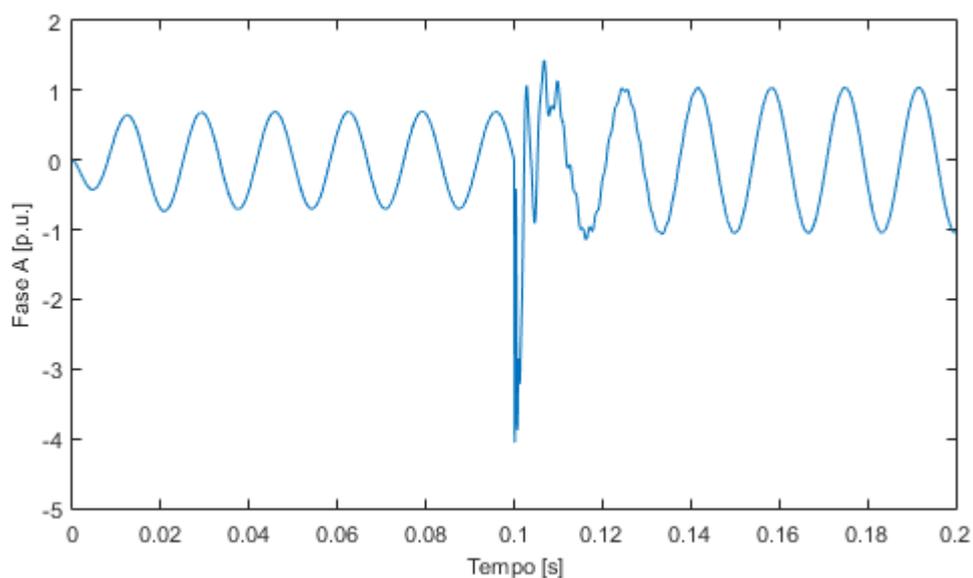


Figura 33 – Corrente Fase A- Falta Fase A-Terra Falta na distribuição Relé mal dimensionado

3.4 – Falta na Distribuição seguida de Falta na Transmissão

Novamente dimensionando os relés para 1,0p.u. e se inspirando na Figura 19, o bloco descrito como Falta Trifásica 2, que representa uma falta Fase-Terra na fase A, a partir do instante $t=0,15s$ foi adicionado. O local da falta foi escolhido para simular uma falta na subestação do sistema de transmissão, conforme pode ser observado na Figura 34. Os parâmetros de todos os blocos foram mantidos os mesmos.

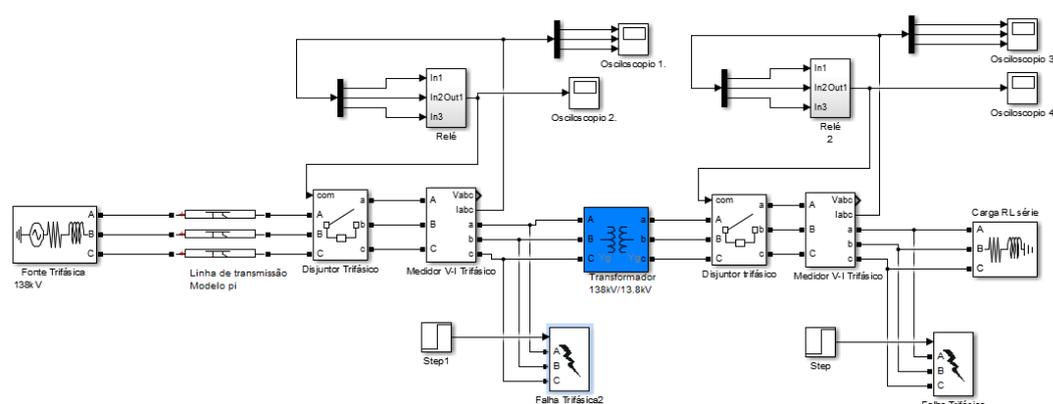


Figura 34 – Circuito simulado com falta na Distribuição e Transmissão

É importante salientar que, embora nessa simulação uma falha na transmissão signifique interrupção no fornecimento de energia junto ao consumidor (pelo fato de existir apenas uma linha de transmissão), nos sistemas atuais normalmente as linhas de transmissão possuem mais do que uma linha em paralelo. Nesses tipos de sistema, embora uma falha não signifique interrupção ao fornecimento de energia elas podem acabar provocando quedas de tensão na rede do consumidor que pode provocar mal funcionamento da carga. Simular esse tipo de sistema não é o foco deste trabalho sendo recomendado para simulação em trabalhos futuros.

Quando acontecem mais de uma falta em um Sistema Elétrico de Potência, a Proteção do mesmo deve atuar na falta que acontecer primeiro, protegendo o Sistema e interrompendo o fornecimento de energia. [2]

Para o circuito da Figura 34, a Falta Trifásica 1, do sistema de Distribuição, acontece antes ($t=0,1s$), portanto o Sistema de proteção deve atuar com o disjuntor desarmando no instante de tempo mais próximo possível de $t=0,1s$. Através do Osciloscópio 4, é possível analisar a atuação do relé 2 no instante $t=0,104s$. Portanto, o tempo de atuação do relé (cerca de 40ms) é próximo a simulação realizada anteriormente, com o circuito da Figura 27 e a mesma análise pode ser feita. Além disso, o comportamento das correntes obtidas pelo

Osciloscópio 3 representado pela Figura 35, são bem semelhantes aos da Figura 28, portanto a mesma análise pode ser feita novamente.

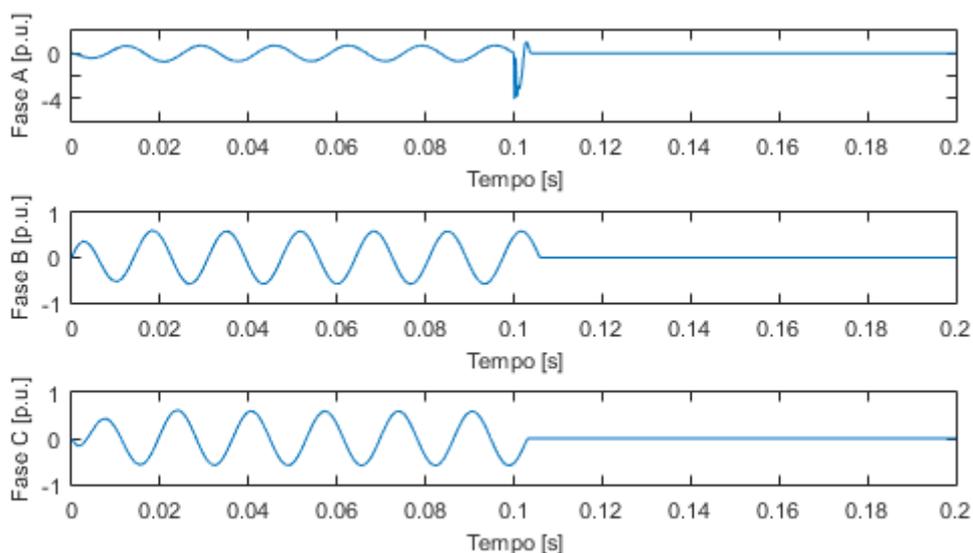


Figura 35 – Correntes Fases A,B e C Circuito com Falta na Distribuição seguido de Falta na Transmissão

3.5 – Falta na Transmissão seguida de Falta na Distribuição

Alterando os instantes de tempo entre os dois blocos de Falha Trifásica e fazendo a Falha Trifásica 2 assumir o instante de tempo $t=0,10s$ e assim acontecer primeiramente tem-se a atuação apenas do Relé 1, como era de se esperar visto que a proteção deve acontecer sobre o sistema de Transmissão.

Analisando a atuação o Relé 1, através do Osciloscópio 2 verifica-se que ele envia o sinal de desarme para o disjuntor no instante de tempo, $t=0,1024s$. As formas de onda das correntes obtidas a partir do Osciloscópio 1 são representadas na Figura 36.

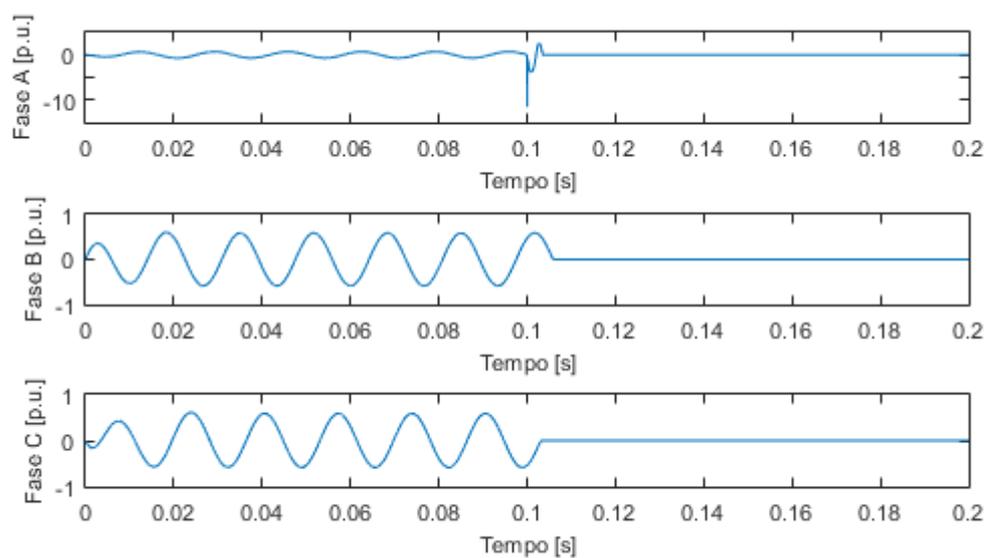


Figura 36 – Correntes Fases A,B e C Circuito com Falta na Transmissão seguido de Falta na Distribuição

A Figura 37 representa a forma de onda da corrente da fase A ainda obtido a partir do Osciloscópio 1.

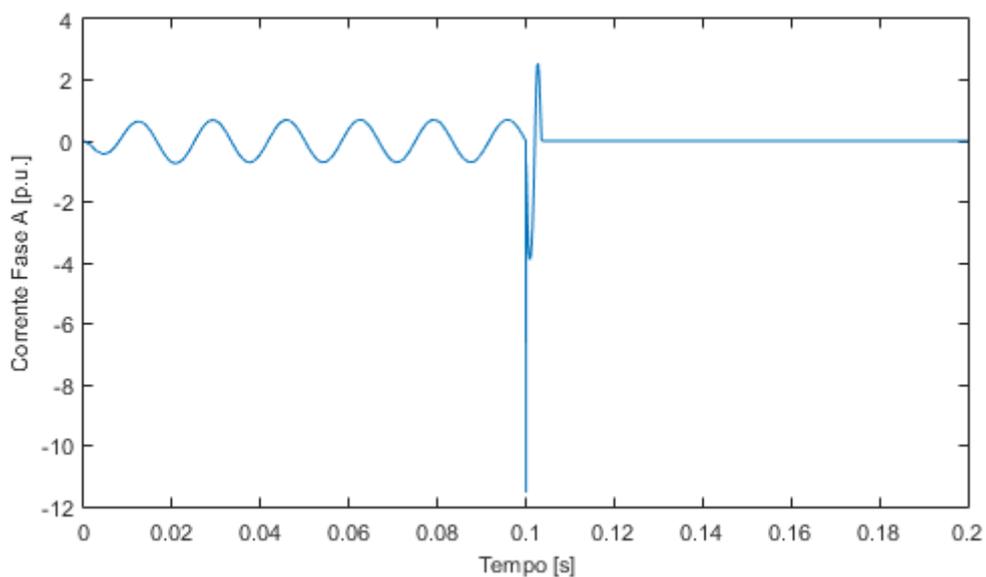


Figura 37 – Corrente Fase A, Circuito com Falta na Transmissão seguido de Falta na Distribuição

Para facilitar a análise, a corrente da Fase A foi aproximada conforme a Figura 38.

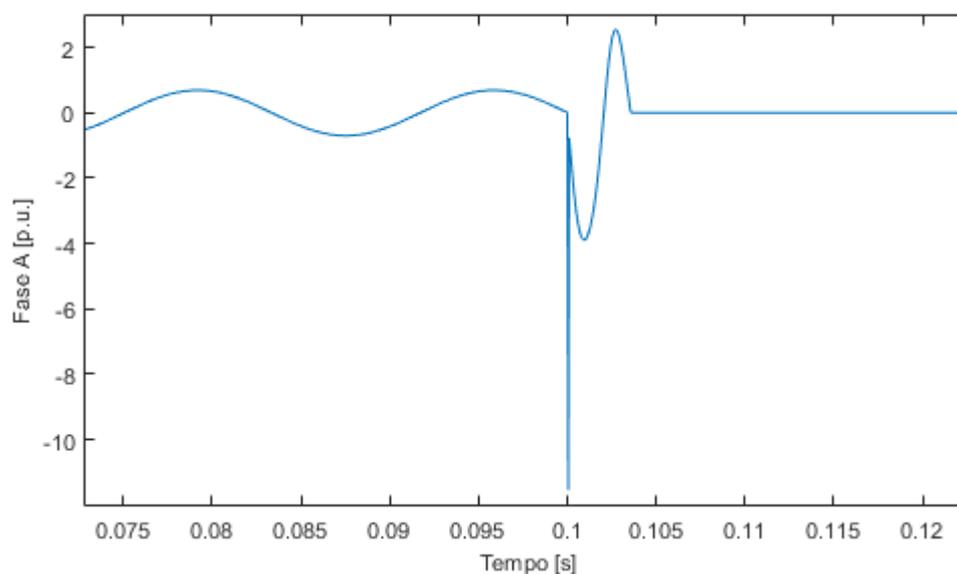


Figura 38 – Aproximação Corrente Fase A

Analisando a forma de onda da Figura 38, verifica-se que a corrente atinge o valor nulo no instante de tempo $t=0,1037$, a diferença entre o instante de tempo de envio do sinal do relé ($t=0,1024$ s) e o instante de tempo em que as correntes são nulas ($t=0,1037$ s) se dá devido ao tempo de atuação do disjuntor.

Assim como era esperado, observa-se a presença apenas da corrente de curto-circuito gerado pelo bloco de Falha Trifásica 2 na transmissão, pois no instante de tempo $t=0,15$ s (momento em que a falha é gerada pelo bloco Falha Trifásica), o sistema de proteção já atuou, interrompendo o fornecimento de energia no sistema e sendo assim seus efeitos não são notados.

4 *Conclusões*

Este trabalho objetivou analisar um SEP como um todo, realizando um estudo detalhado sobre os parâmetros de uma linha de transmissão, especificamente sobre modelos de linhas de transmissão e possíveis curtos ao longo da mesma. Realizado este estudo, foram realizadas simulações na Transmissão e Distribuição de um SEP, e objetivando-se analisar o comportamento da corrente de curto-circuito, bem como a atuação do Sistema de Proteção.

A partir disso, foram constatadas informações importantes acerca do assunto e assim, pode-se considerar que os objetivos gerais e específicos do Trabalho foram obtidos:

- A magnitude de correntes de curto circuito é realmente muito alta, podendo atingir picos de cerca de -12,0 p.u., daí a necessidade de um Sistema de Proteção capaz de interromper o circuito protegendo-o contra anormalidades.
- Por mais que o Sistema de Proteção esteja corretamente dimensionado, o sistema demora um tempo para realizar a interrupção do sistema, em virtude do tempo de atuação dos equipamentos. E, além disso, o tempo de atuação do relé (5 ou 6 ciclos) foi aproximadamente obtido nas simulações, sendo o erro obtido em virtude de possíveis diferenças entre parâmetros utilizados na simulação com a realidade. Além disso, o mal dimensionamento do relé pode provocar danos irreparáveis ao SEP, com a não atuação do disjuntor.
- Existe uma diferença em relação as correntes de curto-circuito entre fases, isso ocorre em virtude das impedâncias de cada sequência (positiva, negativa e zero) entre cada fase serem diferentes.
- Quando ocorrem faltas simultâneas em um SEP e não ocorre o rearme do disjuntor após a sua atuação, o Sistema de Proteção deve atuar sobre a primeira falta, sendo assim as faltas subsequentes não terão influência no SEP (visto que o mesmo já está interrompido). É importante salientar que após a atuação de um sistema de proteção, o mesmo só deve ser religado após a comprovação que a anormalidade que provocou a sua atuação foi resolvida.

Para futuros trabalhos é dada a sugestão de implementar na simulação, uma Linha de Transmissão paralela ao circuito. Sendo assim, o circuito possuiria mais do que apenas uma Linha de Transmissão e a ocorrência de uma falta nesse ponto, não significaria interrupção

total ao fornecimento de energia ao consumidor. Além disso, outra sugestão é realizar a análise do circuito simulado com outros tipos de faltas como trifásica, fase-fase, 2 fases-terra, que embora menos usuais que a falta analisada (fase-terra) também podem, eventualmente, ocorrer.

Referências Bibliográficas

- [1] Matias, J. V. C.(1994). Produção, Transporte e Distribuição de Energia Elétrica. Ed. Didáctica. 1994.
- [2] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso e H. W. Beaty.(2004). Electrical Power Systems Quality. 2004.
- [3] M. H. J. Bollen. (2000). “Understanding Power, Voltage Sags and Interruptions”.2000.
- [4] de Souza, F. A. (2008). Detecção de Falhas em Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Usando Dispositivos Programáveis. Trabalho de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UNESP.São Paulo, 2008.
- [5] D. J. Glover, S. S. Mulukutla e T. Overbye. (2008). “Power System Analysis and Design, Global Engineering”.2008.
- [6] Gomes, F.V. (2011). “Transmissão de Energia Elétrica”. Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF. Juiz de Fora. 2011.
- [7] Pinto, Milton de Oliveira. 2014. Energia Elétrica: Geração, Transmissão e Sistemas Interligados. Ed. LTC. 1ª Edição. 2014.
- [8] Nunes E. J., “Linhas de Transmissão de Energia Elétrica”. UNIFACS, Universidade Salvador. Salvador.
- [9]R.D. Fuchs. (1997). “Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas; teoria das Linhas em Regime Permanente”.Livros Técnicos e Científicos. Ed. S.A. Rio de Janeiro, RJ. 1977.
- [10] Leão, R. (2009). “Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica”. Universidade Federal do Ceará. Ceará,2009.
- [11] Andrade F.F. (2010). “Linhas de Transmissão de Energia - Cálculos de Parâmetros Elétricos”. UDESC. Joinville. 2010
- [12] de Oliveira, J.T. (1998) “Análise de Sistemas de Potência”, UFRN. Natal,1998.
- [13] Freitas, S., “Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica”. FEIT/UEMG, Ituiutaba
- [14] Arritt, R. F., Dugan, R.C. “Distributed generation interconnection transformer and grounding selection”. IEEE. 2008
- [15] Coury, D. V.(2012) .“Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência”. USP.São Carlos, 2012.
- [16]de Almeida M.A.D. (2000). “Proteção de Sistemas Elétricos”. UFRN.Natal, 2000
- [17] G. Kindermann. Curto-circuito. Ed. Sagra Luzzato, 2ª edição. 1997.
- [18] Merlin, V.L. (2015). “Curto Circuito e Sistemas de Proteção”. E.A. Engenheiros Associados.2015
- [19] C. Vijaya Tharani¹, M. Nandhini², R. Sundar³, Dr K. Nithiyanthan⁴ Karpagam .“MATLAB based Simulations model for three phases Power System Network”. College of Engineering, Coimbatore, Tamilnadu, India, 2016.
- [20] Página na internet acessada no dia 13 de outubro de 2017
<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>
- [21] Mamede, J. F., Mamede D. R. (2011). Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Ed. LTC. 2011