

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

ANDRÉ VIANA DOS SANTOS

**ANÁLISE DE FALTAS EM LINHAS DE SUBTRANSMISSÃO EM  
PARALELO**

VIÇOSA  
2018

ANDRÉ VIANA DOS SANTOS

**ANÁLISE DE FALTAS EM LINHAS DE SUBTRANSMISSÃO EM  
PARALELO**

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  
2018


ANDRÉ VIANA DOS SANTOS

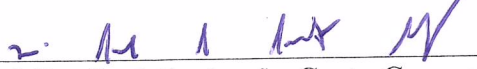
ANÁLISE DE FALTAS EM LINHAS DE SUBTRANSMISSÃO EM  
PARALELO

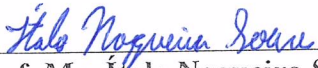
Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 27 de Junho de 2018.

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. Me. Ítalo Nogueira Soares - Membro  
Universidade Federal de Viçosa

## *Resumo*

Este trabalho tem como objetivo o estudo de diferentes tipos de faltas nas linhas de subtransmissão em paralelo no sistema elétrico de potência. Uma revisão teórica sobre a estrutura de um SEP, as linhas de transmissão, os tipos de faltas (ou curto-circuitos) e os sistemas de proteção foi realizada, contribuindo para a análise do comportamento das correntes de falta. Para a realização das simulações foi utilizado o ambiente de simulação do Simulink que é uma toolbox do software Matlab. Os parâmetros utilizados foram selecionados de modo a aproximar o circuito modelo simulado com realidade, permitindo analisar os fatores que afetam as correntes de falta e a consequência disso para o sistema.

## ***Abstract***

The aim of this thesis is study different types of faults in parallel subtransmission lines in the Electric Power System. A teoric study was made about the structure of a Power System, transmission lines, types of faults (or short circuits) and protection systems was carried out, contributing to the analysis of the behavior of fault currents. For the realization of the simulations was used the Simulink simulation environment which is a toolbox of the Matlab software. The parameters used were selected to approximate the model simulated circuit with reality, allowing to analyze the factors that affect the fault currents and the consequence for the system.

## *Sumário*

1	Introdução.....	11
1.1	Objetivos.....	12
1.2	Estrutura de um Sistema Elétrico de Potência.....	12
1.2.1	Transmissão.....	14
1.2.1.1	Características elétricas de linhas e cabos.....	15
1.3	Faltas trifásicas.....	15
1.4	Sistema de proteção.....	17
1.4.1	Relés.....	19
1.4.1.1	Relés de Sobrecorrente.....	19
1.4.1.2	Relés Diferenciais.....	20
1.4.1.3	Relés Eletromecânicos.....	21
1.4.1.4	Relés Digitais.....	21
1.4.2	Disjuntores.....	21
1.4.3	Parâmetros na proteção de sistemas.....	22
1.4.4	Características gerais dos equipamentos de proteção.....	24
2	Materiais e Métodos.....	27
2.1	Simulações.....	27
2.1.1	Introdução.....	27
2.1.2	Sistema de proteção.....	28
2.1.3	Mecanismo de controle das Linhas de Transmissão.....	29
2.1.4	Parâmetros do sistema.....	31
3	Resultados e Discussões.....	36
3.1	Falta Fase-Terra.....	36
3.2	Falta Fase-Fase.....	35
3.3	Falta 2 Fases-Terra.....	37
3.4	Falta Trifásica.....	39
3.5	Falta Trifásica-Terra.....	41
3.6	Comparação das Faltas.....	43
3.7	Resistência da Falta.....	45

3.8 Comprimento da Linha de Transmissão.....	47
3.9 Distância da Falta e Efeito da Capacitância Shunt.....	48
4 Conclusões.....	51
Referências Bibliográficas .....	52

## *Lista de Figuras*

Figura 1.1 - Estrutura Básica de um Sistema Elétrico.....	11
Figura 1.2 - Faixas de Tensão de Sistemas Elétricos. ....	11
Figura 1.3 - Linha de Transmissão.....	12
Figura 1.4 - Tipos de Falta.....	14
Figura 1.5 - Falta nos Terminais de um Gerador Síncrono.....	15
Figura 1.6 - Equipamentos de Proteção do SEP.....	16
Figura 1.7 - Características gerais de relé para tempo inverso.....	18
Figura 1.8 - Disjuntor Vmax da ABB.....	20
Figura 1.9 - Proteção de um sistema de elétrico em alta-tensão.....	22
Figura 1.10 - Conjunto relé-disjuntor.....	23
Figura 1.11 - Relacionamento da potência transmitida e velocidade do releamento.....	23
Figura 1.12 - Zoneamento de Proteção .....	24
Figura 2.1 – Linhas de Transmissão em Paralelo.....	25
Figura 2.2 – Sistema de Proteção.....	26
Figura 2.3 – Modelagem do relé.....	27
Figura 2.4 – Modelagem do Mecanismo de Proteção.....	28
Figura 2.5 – Diagrama Unifilar.....	29
Figura 2.6 – Linha de Transmissão Jaragua-Taquaril.....	30
Figura 2.7 – Representação da LT.....	31
Figura 2.8 – Parâmetros Bloco Linha de Transmissão.....	31
Figura 2.9 – Variação na distância da falta.....	32
Figura 2.10 – Parâmetro Carga.....	33
Figura 2.11 – Parâmetro Falta.....	33
Figura 3.1 – Corrente na LT Principal (falta Fase-Terra).....	34



Figura 3.2 – Corrente na LT Secundária (falta Fase-Terra).....	35
Figura 3.3 – Correntes na Distribuição (falta Fase-Terra).....	35
Figura 3.4 - Corrente na LT Principal (falta Fase-Fase).....	36
Figura 3.5 – Corrente na LT Secundária (falta Fase-Fase).....	36
Figura 3.6 – Correntes na Distribuição (falta Fase-Fase).....	37
Figura 3.7 - Corrente na LT Principal (falta 2 Fases-Terra).....	38
Figura 3.8 – Corrente na LT Secundária (falta 2 Fases-Terra).....	38
Figura 3.9 – Correntes na Distribuição (falta 2 Fases-Terra).....	39
Figura 3.10 - Correntes na LT Principal (falta Trifásica).....	40
Figura 3.11 – Correntes na LT Secundária (falta Trifásica).....	40
Figura 3.12 – Correntes na Distribuição (falta Trifásica).....	41
Figura 3.13 - Correntes na LT Principal (falta Trifásica-Terra).....	42
Figura 3.14 – Correntes na LT Secundária (falta Trifásica-Terra).....	42
Figura 3.15 – Correntes na Distribuição (falta Trifásica-Terra).....	43
Figura 3.16 – Corrente de falta.....	44
Figura 3.17 - Ristência da falta x Módulo da Falta.....	46
Figura 3.18 – Comprimento LT x Módulo da Falta.....	48
Figura 3.19 – Comprimento LT x Módulo da Falta (C=10.6e-9).....	49
Figura 3.20 – Comprimento LT x Módulo da Falta (C=10.6e-9).....	49
Figura 3.21 – Comprimento LT x Módulo da Falta (C=10.6e-9).....	50

## *Lista de Tabelas*

Tabela 1 - Característica dos cabos da LT.....	31
Tabela 2 - Característica do para-raios da LT.....	31
Tabela 3 - Valores de pico das correntes de curto-circuito para cada tipo de falha.....	43
Tabela 4 - Resistência da falta x Módulo da Falta.....	46

## 1 Introdução

Na história da sociedade, a energia elétrica, desde a sua descoberta, sempre ocupou lugar de destaque, tendo em vista a dependência da qualidade de vida, do progresso econômico, e dos serviços relacionados à energia elétrica, que por sua vez dependem de como as empresas de eletricidade projetam, operam e mantêm os sistemas elétricos de potência. A energia elétrica proporciona à sociedade trabalho, produtividade e desenvolvimento, e aos seus cidadãos conforto, comodidade, bem-estar e praticidade, o que torna a sociedade moderna cada vez mais dependente de seu fornecimento e mais suscetível às falhas do sistema elétrico. Em contrapartida esta dependência dos usuários vem se traduzindo em exigências por melhor qualidade de serviço e do produto.

A energia elétrica é uma das mais nobres formas de energia. A sua facilidade de geração, transporte, distribuição e utilização, com as consequentes transformações em outras formas de energia, atribuem à eletricidade uma característica de universalização, disseminando o seu uso pela humanidade [1].

No Brasil, dentre as fontes primárias e secundárias de energia, a fonte hidráulica é a que mais contribui para produção de energia elétrica, estando os locais produtores em regiões quase sempre distantes dos centros consumidores. Deste modo, são necessárias grandes extensões de linhas de transmissão e instalações para repartir e distribuir a energia nos centros de consumo.

A eletricidade apresenta uma combinação de atributos que a torna distinta de outros produtos, como:

- dificuldade de armazenamento em termos econômicos;
- variações em tempo real na demanda, e na produção em caso de fontes renováveis;
- falhas randômicas em tempo real na geração, transmissão e distribuição; e
- necessidade de atender as restrições físicas para operação confiável e segura da rede elétrica.

As condições de não armazenamento e de não violação das restrições operativas impõem à eletricidade sua produção no momento exato em que é requerida ou consumida fazendo com que o dimensionamento do sistema elétrico seja determinado pelo nível máximo de energia demandada, resultando em ociosidade dessas instalações durante o período de menor demanda. O atendimento dos aspectos de simultaneidade de produção e consumo,

exigindo instalações dimensionadas para a ponta de carga, e a longa distância entre os locais de geração e os centros consumidores pode ser traduzido pela necessária existência de um sistema de transmissão e de distribuição longos e complexos, apoiados por uma estrutura de instalações e equipamentos que, além de representar importantes investimentos, exigem ações permanentes de planejamento, operação e manutenção, e estão como qualquer produto tecnológico sujeito à falhas[1].

## **1.1 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo geral o estudo de diferentes tipos de faltas nas linhas de transmissão em paralelo no sistema elétrico de potência: fase-terra, fase-fase, 2 fases-terra, 3 fases e 3 fases-terra.

A partir do objetivo geral, tem-se como objetivos específicos:

- Acionar dispositivos de proteção para evitar danos ao SEP;
- Assegurar a continuidade da alimentação da carga ao acionar a linha em paralelo após a ocorrência da falha;
- Analisar a influência do valor da resistência de falta no valor da corrente de falta.
- Analisar o efeito da capacitância shunt na ocorrência de uma falha.

## **1.2. Estrutura de um Sistema Elétrico de Potência**

A estrutura do sistema elétrico de potência compreende os sistemas de geração, transmissão, distribuição e subestações de energia elétrica, como pode ser visto na Figura 1.1. Este sistema é geralmente baseado em grandes usinas de geração que transmitem energia através de sistemas de transmissão de alta tensão, que é então distribuída para sistemas de distribuição de média e baixa tensão; as faixas de tensões de cada sistema é representado na Figura 1.2.

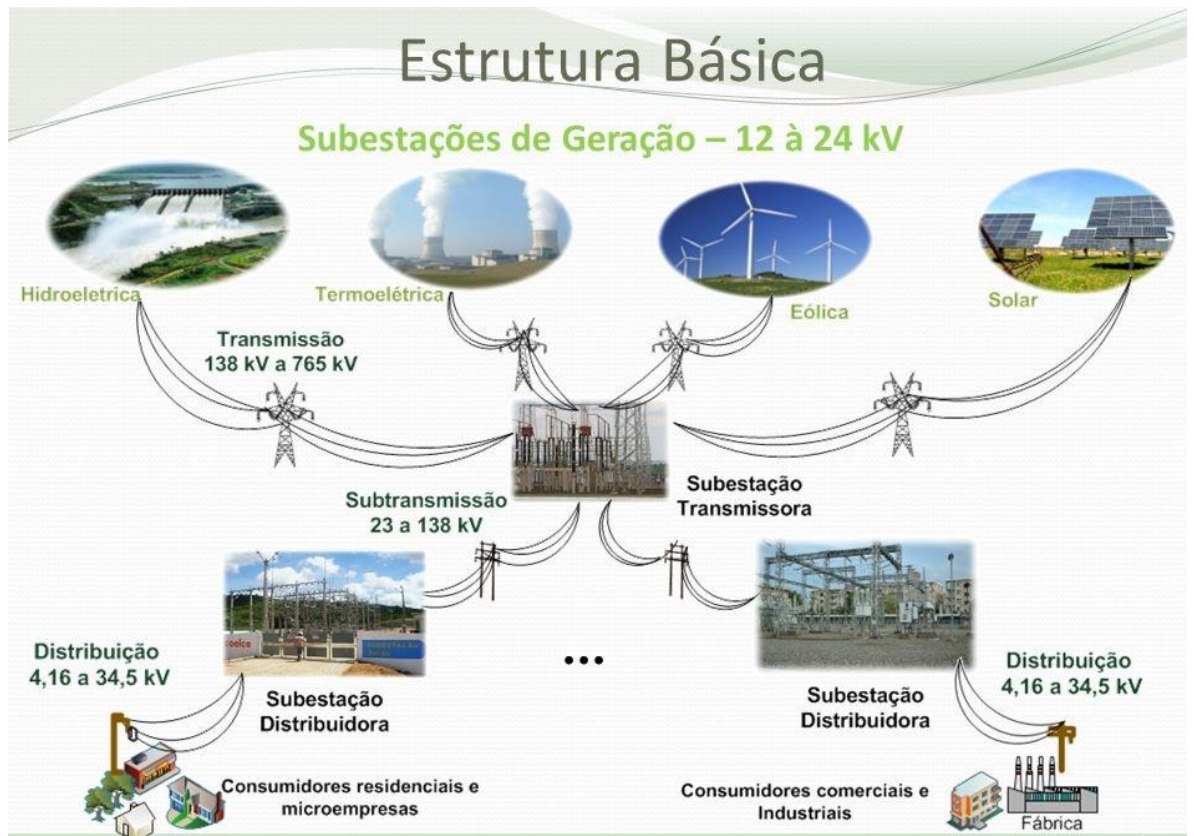


Figura 1.1- Estrutura básica de um sistema elétrico. [18]

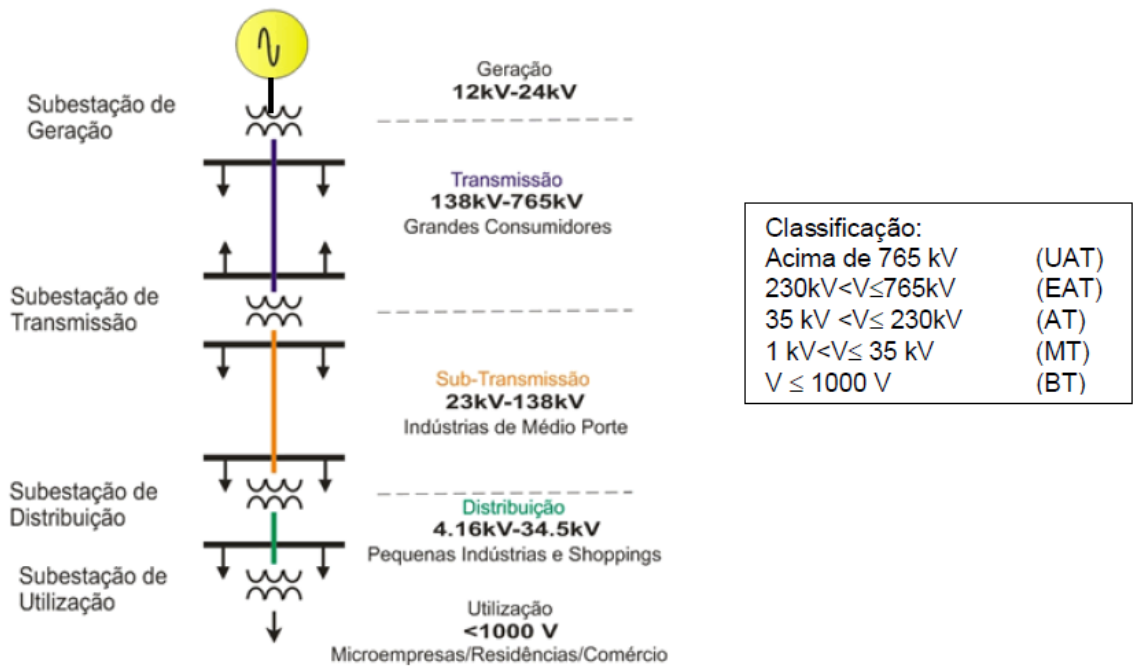


Figura 1.2- Faixas de tensão de sistemas elétricos. [1]

### 1.2.1 Transmissão

Como o foco do trabalho está nas linhas de transmissão, vamos detalhar a seguir os aspectos mais importantes das mesmas relacionadas ao objetivo proposto neste trabalho.

Sabemos que os sistemas de transmissão proporcionam o transporte da energia elétrica entre os centros produtores e os centros consumidores. Estas interligações podem ser designadas em função do nível a que pertencem:

- Linhas de Transmissão (LT): são linhas que operam com as tensões mais elevadas do sistema, tendo como função principal o transporte de energia entre os centros de produção e os centros de consumo;
- Linhas de subtransmissão: normalmente operam em tensões inferiores aquelas dos sistemas de transmissão. Sua função é a distribuição a granel da energia transportada pelas linhas de transmissão. Nascerem nos barramentos das subestações regionais e terminam em subestações abaixadoras locais.

As linhas de transmissão (Figura 1.3) e de subtransmissão apresentam propriedades diferentes que dependem de fatores como: frequência; nível de tensão; corrente alternada ou contínua; quantidade de potência a ser transmitida; modo de transmissão (aéreo ou subterrâneo); distância entre os terminais transmissor e receptor, etc.



Figura 1.3- Linha de Transmissão

### **1.2.1.1 Características elétricas de linhas e cabos**

Durante a etapa de projeto das linhas de transmissão algumas propriedades dos condutores são analisadas, pois terão influência direta nas condições futuras de funcionamento da linha de transmissão. As propriedades básicas são:

- resistência ( $R$  -  $\Omega/\text{km}$ ): consome energia. A perda de potência é por efeito Joule;
- indutância ( $L$  -  $\text{mH}/\text{km}$ ): armazena energia no campo magnético;
- capacitância ( $C$  -  $\text{nF}/\text{km}$ ): armazena energia no campo elétrico.

Em uma linha ou cabo, estas propriedades básicas são uniformemente distribuídas ao longo do condutor. Os efeitos da resistência e da indutância são distribuídos de uma extremidade a outra do condutor e diz-se que estão ligadas em série. Já o efeito da capacitância atua como o de um grande número de capacitores ligados em paralelo entre o condutor e a terra.

## **1.3 Faltas trifásicas**

Os curtos-circuitos são geralmente chamados “defeitos” ou “faltas” e ocorrem de maneira aleatória nos sistemas elétricos. A origem das faltas é diversa, podendo ocorrer por motivos como quedas de árvores, vendavais, descargas atmosféricas, vandalismo, falta de manutenção, entre outros.

Um curto-circuito consiste em um contato entre condutores sob potenciais diferentes. Tal contato pode ser direto (franco ou através de impedância) ou indireto (através de arco voltáico) [10]. Suas conseqüências podem ser extremamente danosas aos sistemas elétricos, se não forem prontamente eliminados pelos dispositivos de proteção, devido às elevadas correntes de curto-circuito, pois o fluxo de uma elevada potência com uma liberação localizada de uma considerável quantidade de energia pode provocar danos de grande escala nas instalações elétricas, particularmente nos enrolamentos dos geradores e transformadores.

O risco da ocorrência de uma falta considerando-se um componente isoladamente é pequeno; entretanto, globalmente pode ser bastante elevado, aumentando também a repercussão em uma área considerável do sistema, podendo causar o que comumente é conhecido como blecaute (ou apagão) [3].

O aumento da complexidade dos sistemas de transmissão de energia moderna tornou de grande importância o estudo da localização das faltas, pois detectar a posição das faltas trás

grandes benefícios, como a redução dos tempos de manutenção e restauração da transmissão [11].

As faltas (Figura 1.4) podem ser classificadas em:

- Simétricas: quando o curto-circuito afeta as três fases (FFFT e FFF)
- Assimétricas: quando o curto-circuito afeta somente uma fase ou duas das fases (FT, FF e FFT)

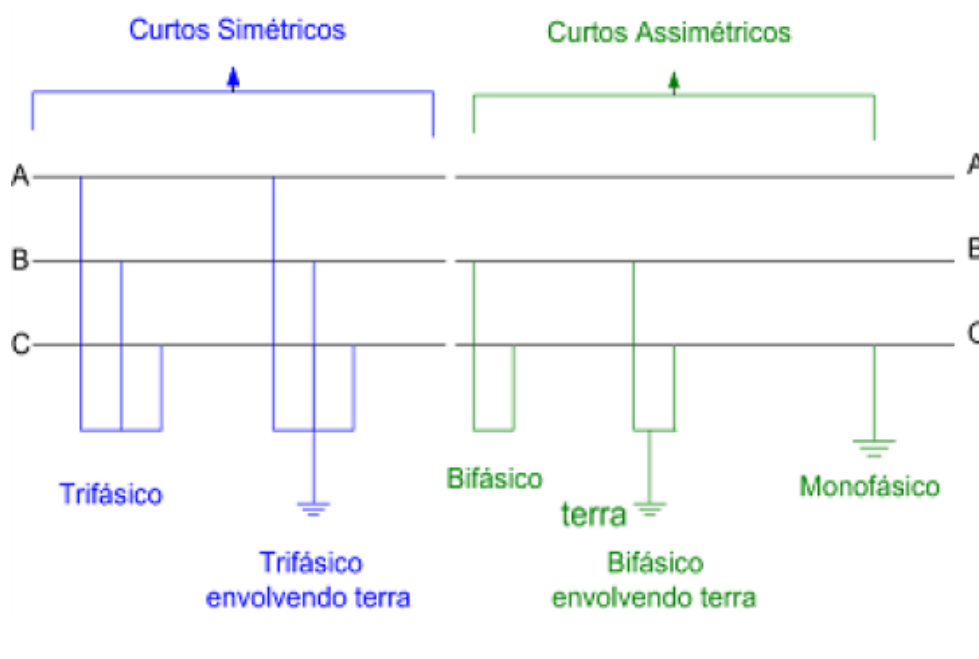


Figura 1.4 - Tipos de faltas [2].

Através de análise estatística dos dados sobre curtos-circuitos, foram constatados os seguintes valores médios para a ocorrência dos tipos de defeitos:

- Curtos-circuitos trifásicos: 5%;
- Curtos-circuitos bifásicos, sem contato de terra: 15%;
- Curtos-circuitos bifásicos, com contato de terra: 10%;
- Curtos-circuitos monofásicos: 70%.

Em sistemas elétricos de grande porte, de modo geral, a maior corrente de curto se verifica nos curtos-circuitos entre linhas (bifásico) ou entre linha e terra. Já em sistemas industriais a maior corrente normalmente se verifica em curtos trifásicos, e em termos de estabilidade transitória e dinâmica, o curto trifásico é o mais prejudicial à estabilidade e sincronismos dos geradores síncronos [2].

Para exemplificar, a Figura 1.5 mostra a ocorrência de uma falta em geradores síncronos. Note que a forma de onda da corrente depende do instante de aplicação da falta,



que é composta por uma componente CC transitória sobreposta de uma componente CA simétrica [16].

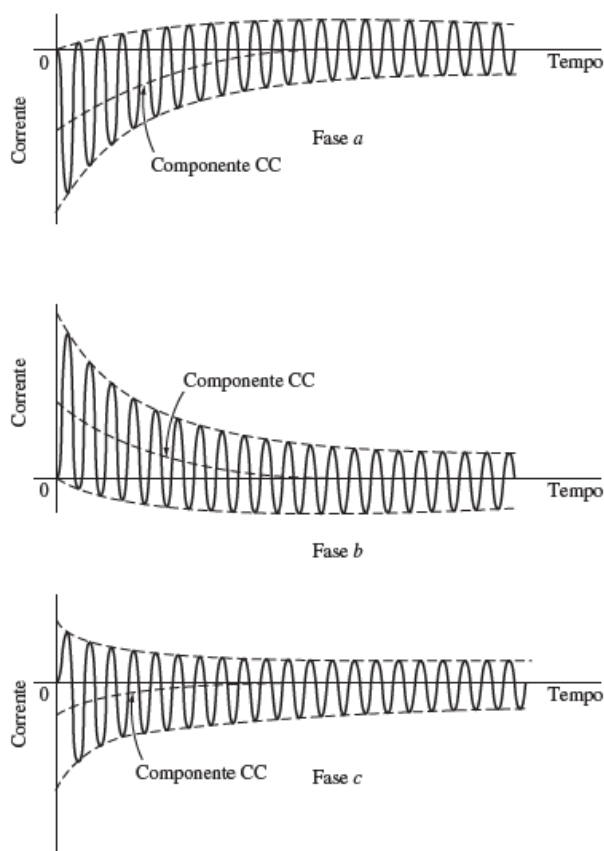


Figura 1.5 - Falta nos terminais de um gerador síncrono [16].

Na ocorrência de curtos-circuitos é necessário que a parte atingida seja isolada rapidamente do restante da rede elétrica para evitar danos materiais e restringir ao máximo possível sua propagação no sistema. Esta função é desempenhada pelo sistema de proteção.

#### 1.4 Sistema de proteção

Um diagrama unifilar simplificado de um sistema de proteção é mostrado na Figura 1.6 [3], que é composto essencialmente pelos seguintes componentes:

**Disjuntor:** A abertura da parte sob curto-circuito de um sistema de potência, interrompendo corrente várias vezes superior à da carga é executada pelo disjuntor, na faixa de 2 a 5 ciclos (na base de 60Hz)

**Redutores de medidas:** Os redutores de medidas são transformadores especiais, de corrente e de tensão, que têm a função de isolar os circuitos secundários da alta tensão.

Relé de proteção: A função do relé de proteção é, baseando-se nos valores das medidas elétricas do sistema fornecido pelos redutores de medida, comandar a abertura dos disjuntores, na faixa de 17 a 100 ms (1 a 6 ciclos na base de 60Hz) [2].

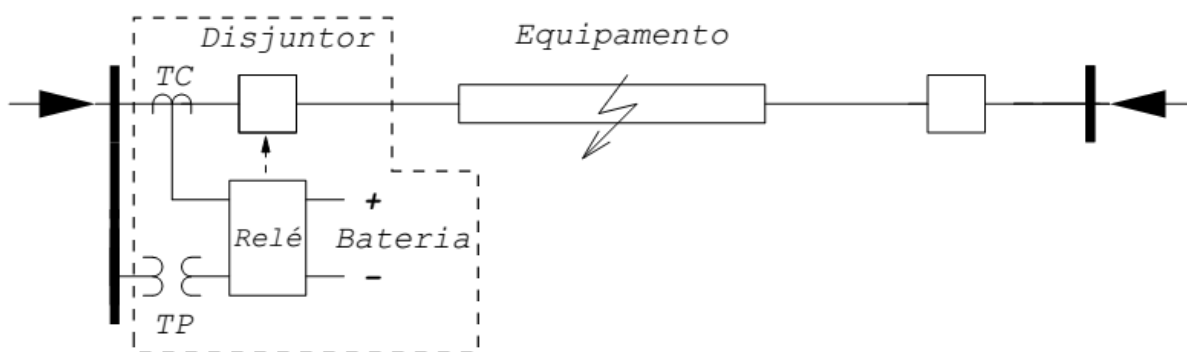


Figura 1.6- Equipamentos de proteção do SEP [3].

De acordo com Fujito Sato, para o consumidor, em geral, o sistema elétrico parece comportar-se sempre em estado permanente, imperturbável e com capacidade inesgotável; entretanto, por ele ser altamente interligado, composto por uma variedade imensa de equipamentos e a sua rede de transmissão abranger uma vasta área geográfica, ele está sujeito a constantes perturbações causadas por: fenômenos naturais, condições ambientais adversas, falhas de equipamentos ou ações humanas inapropriadas. Essas perturbações, na grande maioria das vezes, provocam curtos-circuitos, que impõem mudanças bruscas e violentas nas grandezas elétricas, causando impactos negativos na operação normal. O fluxo de uma elevada corrente com a liberação localizada de considerável quantidade de energia pode provocar danos de grandes proporções nas instalações elétricas, sobretudo nos enrolamentos dos geradores e dos transformadores. A proteção atua com dois grandes objetivos [4], sendo eles:

- evitar que falhas no sistema, como o curto-circuito, possam danificar equipamentos e materiais deste sistema;
- promover o rápido restabelecimento de energia, evitando danos aos consumidores e proporcionando uma qualidade no fornecimento da energia aos usuários.

### **1.4.1 Relés**

De acordo com [3], os relés de proteção são dispositivos automáticos que, junto com outros equipamentos convenientemente interligados ao sistema, têm a função de detectar as condições intoleráveis ou indesejáveis dentro de uma zona preestabelecida e isolar rapidamente a parte afetada, impedindo que o problema se propague a outros elementos do sistema.

Tanto para dimensionar corretamente os equipamentos como para especificar e calibrar adequadamente os relés de proteção, é imprescindível o conhecimento prévio dos valores das correntes de curto-circuito. Estes valores são obtidos através de simulações, utilizando-se de dados do sistema elétrico convenientemente modelados e métodos adequados.

Os relés podem ser classificados de acordo com a grandeza com a qual atuam, como por exemplo: tensão, corrente ou frequência. Podem-se classificar os relés também quanto ao princípio de atuação: eletromecânicos, estáticos ou digitais. A seguir, é apresentado um resumo das características de operação e funcionamento dos principais tipos de relés [4].

#### **1.4.1.1 Relés de Sobrecorrente**

Esses relés atuam quando o nível de corrente ajustado é ultrapassado, e podem ser instantâneos ou temporizados. Os primeiros podem operar com característica de tempo definido, onde o tempo de atuação é fixo desde que ultrapassado o valor da corrente de operação; e com característica inversa (Figura 1.7), isto é, quanto maior o nível de corrente, menor o tempo de operação dos mesmos [4].

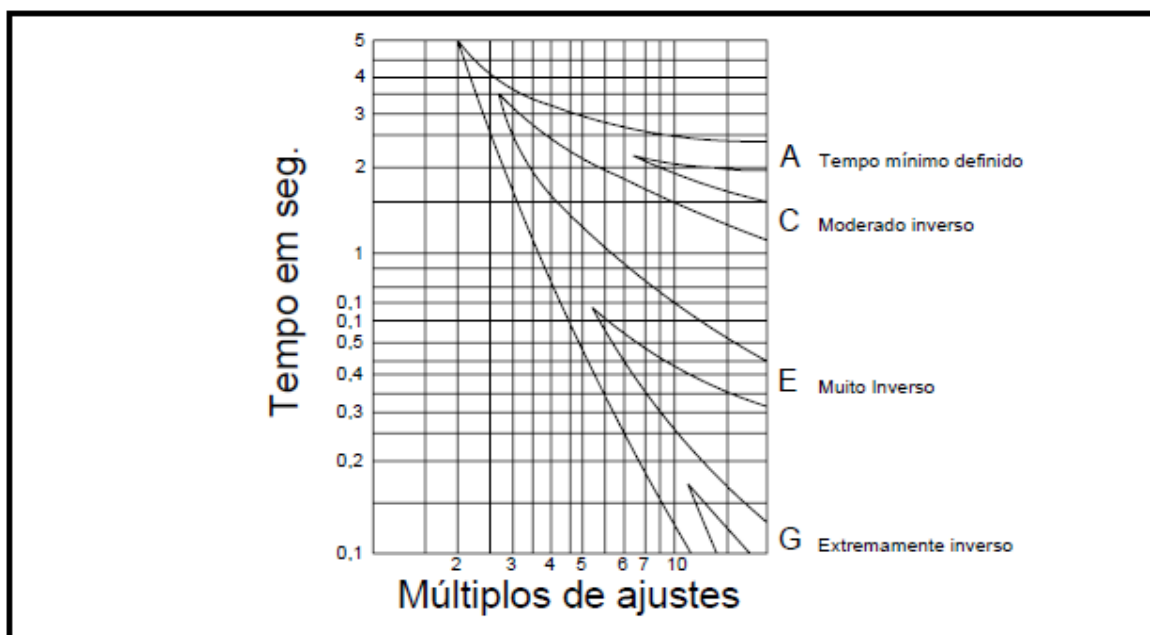


Figura 1.7- Características gerais de relé para tempo inverso [6].

No eixo vertical, tem-se o tempo de atuação, em segundos, enquanto no eixo horizontal tem-se o múltiplo do ajuste do relé, que é a relação entre a corrente de curto-circuito e o valor de ajuste do relé. Esta característica dos relés de sobrecorrente só deve ser aplicada, quando existe variação entre valores mínimos e máximos de corrente de curto-circuito no sistema.

A operação do relé deve ser preferencialmente escolhida na região mais inversa da curva, de forma que haja variação do tempo em relação aos valores de corrente. Na região mais plana da curva praticamente não há variação do tempo de operação do relé [4].

#### 1.4.1.2 Relés Diferenciais

São relés projetados para atuar, quando a diferença entre a entrada e saída da grandeza associada ao elemento (equipamento ou circuito) de proteção excede o valor previamente estabelecido. Normalmente esses relés de proteção operam a partir da comparação entre a corrente que entra e a corrente que sai no elemento protegido [4].

### **1.4.1.3 Relés Eletromecânicos**

Esses foram o primeiro tipo de relés e têm sido usados por muitos anos. Os relés eletromecânicos são ditos como sendo instantâneos, ou rápidos, pois não possuem retardo de atuação proposital. A corrente que circula nos pólos cria um fluxo que, por sua vez, cria uma corrente induzida no disco. Esta corrente interage com o fluxo produzindo o torque que leva o disco a girar [4].

### **1.4.1.4 Relés Digitais**

Os relés digitais utilizam como base os microprocessadores. A primeira geração dos relés digitais utilizava os transistores, enquanto a segunda geração fez uso dos circuitos integrados e amplificadores operacionais.

Devido à grande flexibilidade dos microprocessadores, um mesmo relé pode exercer várias funções, tais como: controle, gravação dos dados amostrados, informação de eventos e diferentes funções de proteção. Os dados são armazenados no hardware e diferentes programas podem ser executados simultaneamente ou não neste mesmo hardware. Estes dados armazenados podem ser periodicamente retirados da memória (devido ao limite da capacidade de dados armazenados) para que novos dados possam ser gravados sem perda de informação. Como os dados estão armazenados, e não oscilografados e impressos podem ser tratados (através de processamentos matemáticos dos sinais e/ou filtragem) para ser obter diversos resultados que facilitem a análise dos operadores do sistema e engenheiros de proteção [4].

## **1.4.2 Disjuntores**

Os disjuntores são equipamentos eletromecânicos de seccionamento de circuitos dos sistemas elétricos, atuando automaticamente na ocorrência de sobrecargas (proteção magnética) e de curtos circuitos (proteção termomagnética), podendo ser operados várias vezes sem a necessidade de reparos. 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 [4].



Figura 1.8- Disjuntor de Alta Tensão Siemens SF6.

### 1.4.3 Parâmetros na proteção de sistemas

A seguir são apresentados alguns parâmetros importantes associados à proteção de sistemas, segundo por [6].

- Confiabilidade da proteção – É definida como a probabilidade do sistema de proteção funcionar corretamente quando houver a necessidade de sua atuação. Para isto a proteção deve atuar adequadamente para uma falta dentro de sua zona de proteção e não deve atuar para uma falta fora de sua zona de proteção.

- Segurança na proteção – É uma expressão usada para identificar a habilidade de um sistema ou equipamento de deixar de operar desnecessariamente. Porém, assim como confiabilidade da proteção, o termo muitas vezes é usado para indicar que um sistema está operando corretamente.

- Sensibilidade na proteção – É a habilidade que um sistema tem de identificar uma situação de funcionamento anormal em que exceda o nível normal ou detectar o limiar em que

a proteção deve atuar. Um sistema de proteção deve responder às anormalidades com menor margem possível de tolerância entre a operação e não operação dos seus equipamentos.

- Seletividade na proteção – É uma expressão associada ao arranjo dos dispositivos de proteção de forma que somente o elemento em falta seja retirado do sistema. Isto é, os demais elementos devem permanecer conectados ao sistema. A característica de seletividade restringe a interrupção somente dos componentes, do sistema, que estão em falta.

- Zona de proteção – São as regiões de sensibilidade.

- Coordenação dos dispositivos de proteção – Determina os ajustes com o objetivo de conseguir a sensibilidade de coordenação entre os dispositivos de proteção, de forma que as proteções adjacentes só atuem no caso de falha das proteções responsáveis por prover proteção à zona específica.

- Falso desligamento – Este fato ocorre, quando o relé opera provocando o desligamento desnecessário em decorrência de uma falta fora da zona de proteção ou quando não há a ocorrência de falta.

De modo geral, a atuação de um sistema de proteção se dá em três níveis que são conhecidos como principal, de retaguarda (socorro) e auxiliar [7].

- Proteção principal: Em caso de falta dentro da zona protegida, é quem deverá atuar primeiro.
- Proteção de retaguarda: é aquela que só deverá atuar quando ocorrer falha da proteção principal.
- Proteção auxiliar: é constituída por funções auxiliares das proteções principal e de retaguarda, cujos os objetivos são sinalização, alarme, temporização, intertravamento, etc.

Na Figura 1.9 pode-se observar os diversos níveis da proteção de um sistema elétrico (geração, transmissão e distribuição). As zonas de proteção (retângulos tracejados) que se interceptam funcionam como proteção principal ou de retaguarda, a depender da localização da falta.

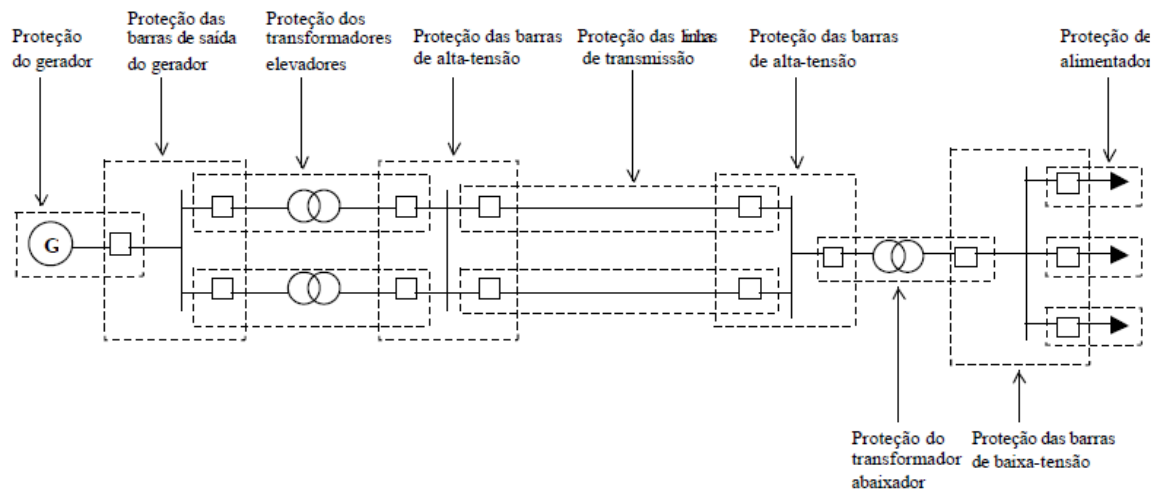


Figura 1.9- Proteção de um sistema de elétrico em alta-tensão [8]

#### 1.4.4 Características gerais dos equipamentos de proteção

Segundo [5], há dois princípios gerais a serem obedecidos, em sequência:

1. Em nenhum caso a proteção deve dar ordens, se não existe defeito na sua zona de controle (desligamentos intempestivos podem ser piores que a falha de atuação);
2. Se existe defeito nessa zona, as ordens devem corresponder exatamente àquilo que se espera, considerada que seja a forma, intensidade e localização do defeito.

Disso resulta que a proteção por meio de relés tem duas funções:

- a) Função principal – que é a de promover uma rápida retirada de serviço de um elemento do sistema, quando esse sofre um curto-circuito, ou quando ele começa a operar de modo anormal que possa causar danos ou de outro modo, interferir com a correta operação do resto do sistema. Nesta função um relé (elemento detetor-comparador e analisador) é auxiliado pelo disjuntor (interruptor), ou então um fusível engloba as duas funções, conforme ilustra a Figura 1.10.



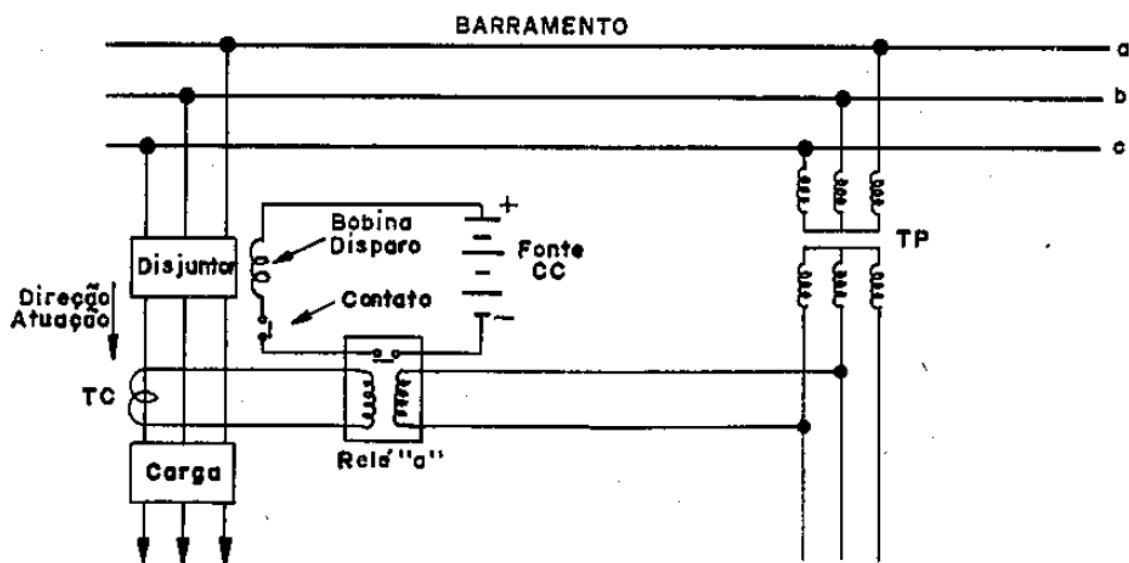


Figura 1.10 - Conjunto relé-disjuntor [5].

Evidentemente, relés rápidos devem ser associados a disjuntores rápidos, de modo a dar tempo de operação total pequeno. De fato, com o aumento da velocidade do releamento, mais carga pode ser transportada sobre um sistema, do que resulta economia global aumentada (Figura 1.11).

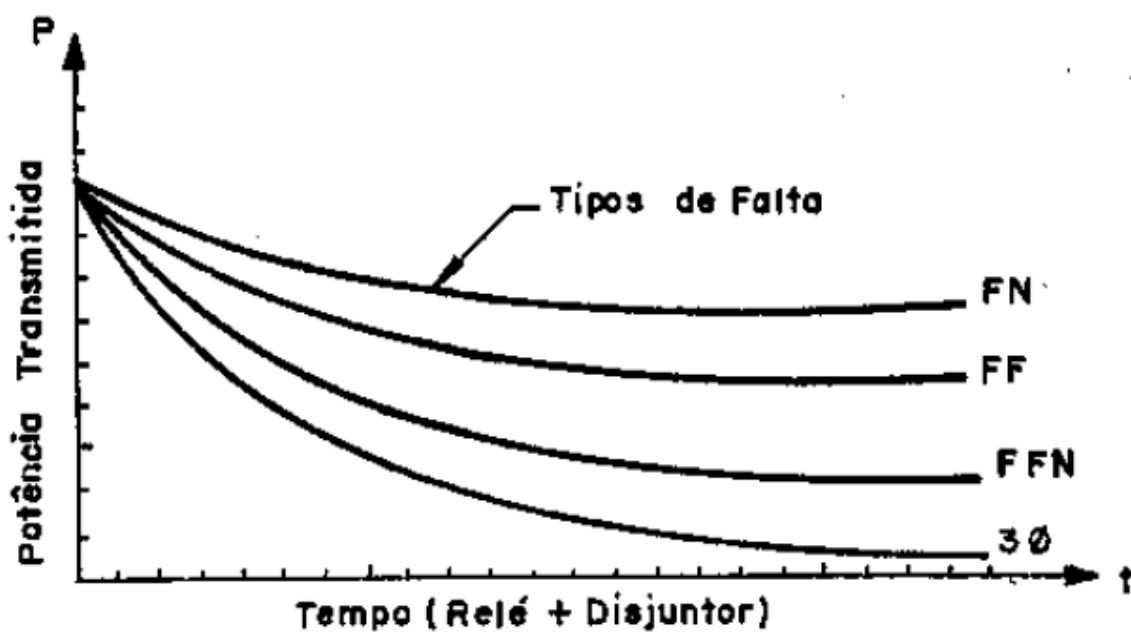


Figura 1.11- Relacionamento da potência transmitida e velocidade do releamento [5].

- b) Função secundária – promover a indicação da localização e do tipo de defeito, visando mais rápida reparação e análise da eficiência e características de mitigação da proteção adotada.

Dentro dessa idéia geral, os chamados princípios fundamentais de releamento compreendem (Figura 1.12):

-Releamento primário ou de primeira linha: é aquele em que uma zona de proteção separada é estabelecida ao redor de cada elemento do sistema, com vistas à seletividade, pelo que disjuntores são colocados na conexão de cada dois elementos.

-Releamento de retaguarda ou de socorro: sua finalidade é de atuar na manutenção do releamento primário ou falha deste.

-Releamento auxiliar: tem função como multiplicador de contatos, sinalização ou temporizador [5].

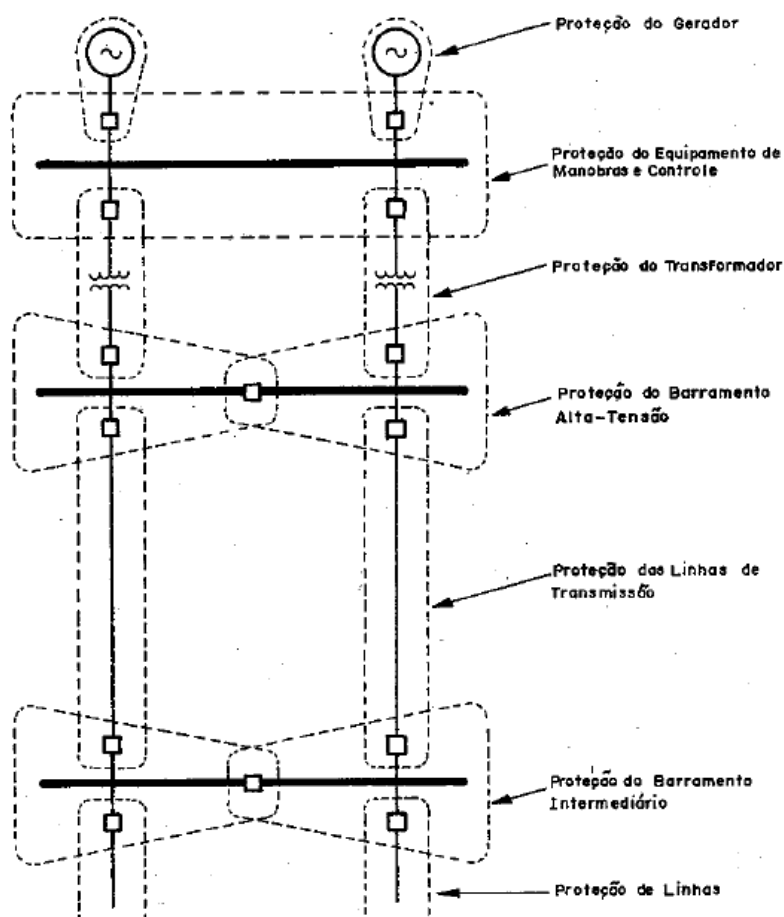


Figura 1.12- Zoneamento de Proteção [5].

## 2 *Materiais e Métodos*

### 2.1 *Simulações*

#### 2.1.1 *Introdução*

Para a análise de faltas em um sistema elétrico de potência em paralelo, realizou-se simulações no software Simulink, desenvolvido pela companhia MathWorks, que é uma ferramenta para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos.

O circuito simulado foi baseado no artigo do IEEE [12], com alterações nos parâmetros e no mecanismo de proteção para que se adequasse ao objetivo proposto. O SEP em paralelo foi modelado conforme a Figura 2.1.

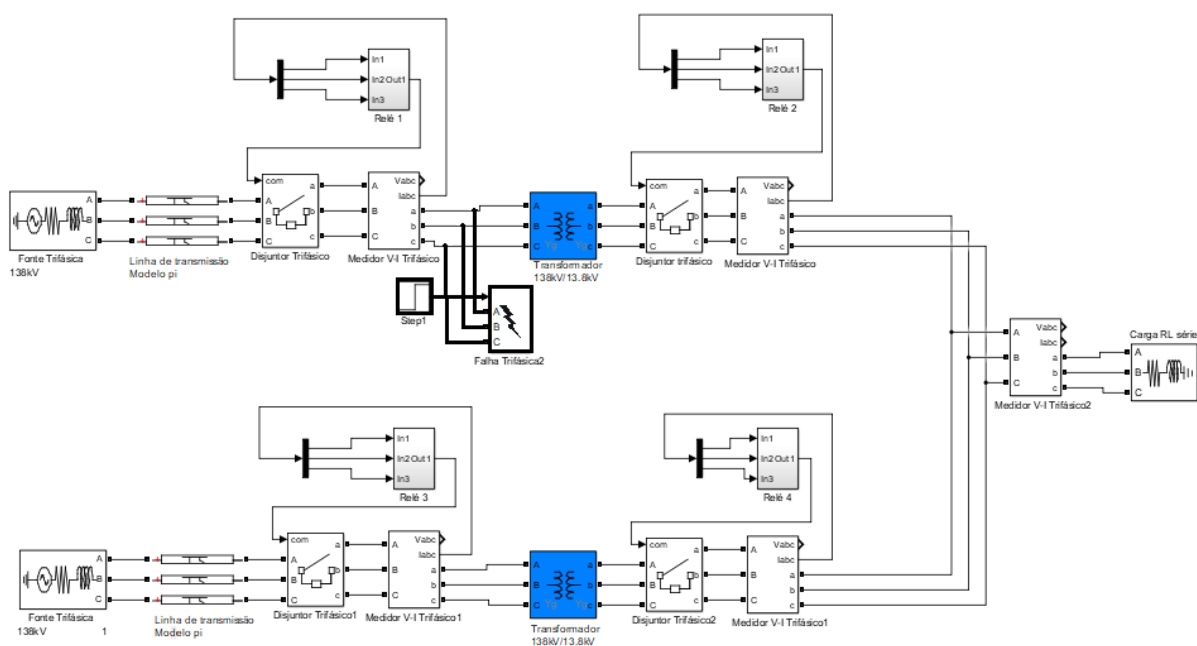


Figura 2.1 – Linhas de transmissão em paralelo.

As linhas de transmissão possuem parâmetros idênticos, sendo que a linha superior é a principal, a qual fornece energia à carga em condições normais. Portanto, para analisar o sistema, as faltas são aplicadas nessa linha. Já a linha de transmissão inferior é a secundária, que proverá energia à carga em caso de falha na principal.

A falta foi conectada na linha principal através de um bloco no Matlab que permite selecionar o tipo de falta desejada, em que sua ocorrência é controlada pelo bloco de degrau Step1.

Nota-se no circuito representado pela Figura 2.1 que as linhas de transmissão são representadas pelo modelo  $\pi$ , sendo alimentadas por fontes de tensão trifásicas de 138kV. Os transformadores (138kV/13,8kV) representam a divisão entre a transmissão e a distribuição. Assim, após esses transformadores abaixadores tem-se o Sistema de Distribuição, alimentando uma carga predominantemente indutiva, modelada por um elemento RL série.

Tanto no sistema de transmissão quanto no de distribuição, há a presença do sistema de proteção, representados na Figura 2.1 pelos relés de 1 a 4 e pelos disjuntores, os quais evitam que uma eventual falha se propague pelo SEP e cause danos nos demais equipamentos.

### 2.1.2 Sistema de proteção.

O sistema de proteção projetado é composto por um Disjuntor Trifásico controlado por um relé de sobrecorrente, como é mostrado na Figura 2.2.

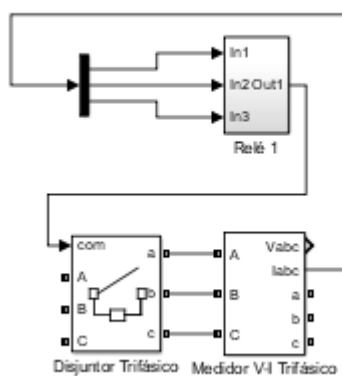


Figura 2.2 – Sistema de proteção.

O princípio de funcionamento deste sistema é o seguinte: o medidor trifásico mede a corrente que passa em cada uma das fases e leva estes dados para o relé. Caso o valor da corrente seja superior ao nominal do relé, este irá atuar no disjuntor, abrindo o circuito e interrompendo o fluxo de corrente no mesmo.

O relé foi modelado conforme a Figura 2.3, e seus parâmetros e posição no circuito foram escolhidas segundo [15].

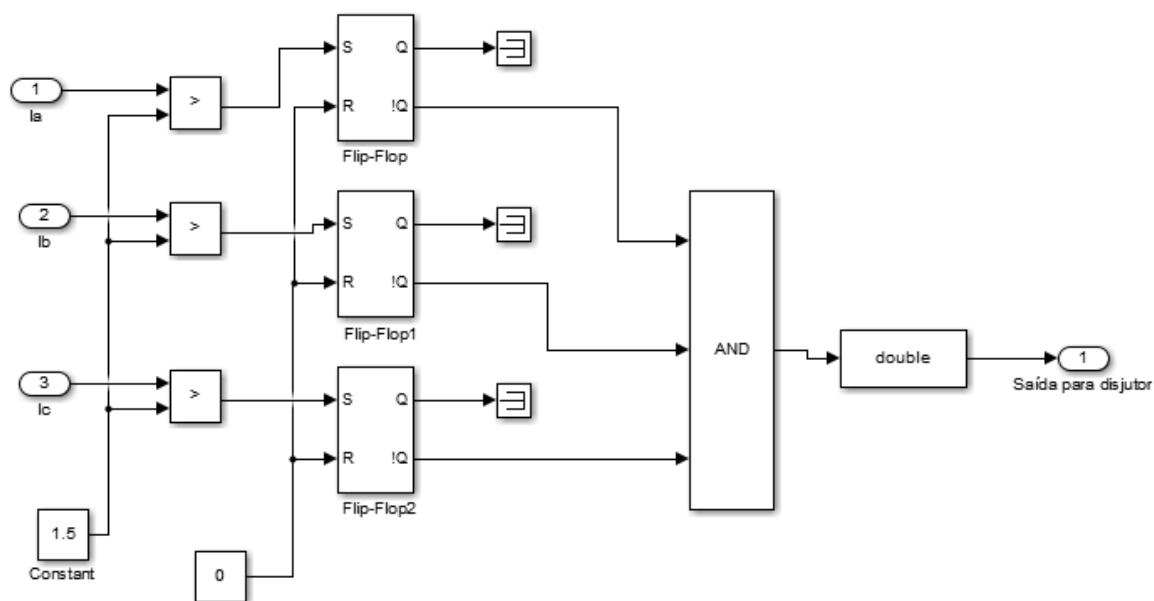


Figura 2.3 – Modelagem do relé [14].

De acordo com o modelo da Figura 2.3, quando a corrente de alguma das fases da linha de transmissão superior (indicados pelas entradas Ia, Ib e Ic) for maior do que 1,5 p.u. o relé irá emitir um sinal na saída, que está ligada ao disjuntor, desarmando-o em seguida e protegendo o sistema. O valor 1,5 p.u. foi escolhido pelo fato de o valor máximo da corrente suportada pelo sistema ser de 1,0 p.u e a corrente de falta em regime permanente ser de 3,0 p.u. Sendo assim, como explicado ao longo deste trabalho, a máxima corrente que poderá suportar deve estar compreendida nesse intervalo e pode ser definida como sendo de cerca de 1,5 vez o valor máximo da corrente suportada pelo sistema, portanto cerca de 1,5 p.u [14].

### 2.1.3 Mecanismo de controle das Linhas de Transmissão

Para que haja um controle das linhas de transmissão em paralelo, faz-se necessário um mecanismo que, ao ocorrer uma falha na linha principal, a linha secundária seja ligada. Do mesmo modo, o mecanismo deve manter a linha secundária desativada em condições normais, para que ela só forneça energia à carga quando a linha principal falhar. Para tanto, o mecanismo foi desenvolvido utilizando os equipamentos de proteção e o barramento de transferência conforme a Figura 2.4.

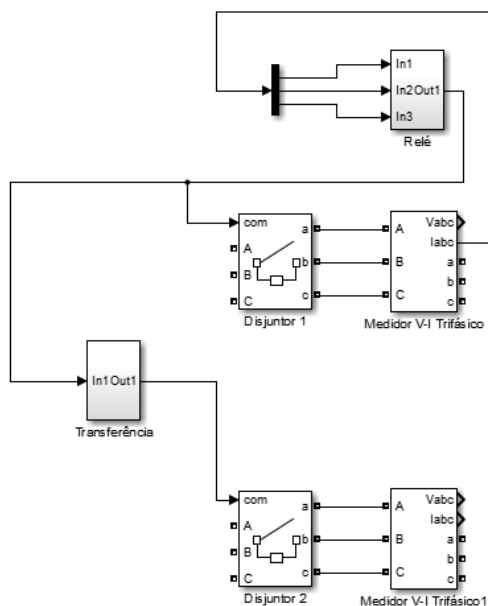


Figura 2.4 – Modelagem do Mecanismo de Proteção.

O disjuntor 1 é referente à linha de transmissão principal e o disjuntor 2 à linha secundária, entre esses dois dispositivos há o Bloco Transferência, que representa o barramento de transferência composto por disjuntores, os quais desativam a linha superior e colocam em funcionamento a inferior. Para a modelagem do Bloco Transferência foi utilizada a lógica inversora através de uma única porta lógica NOT. Assim, quando a saída do Relé atua, mudando de nível lógico, o disjuntor 1 é desarmado, e como o disjuntor 2 está sempre com o sinal invertido do primeiro devido ao barramento de transferência, este passará a operar.

Este mecanismo possibilitou a análise das linhas de transmissão em paralelo, aproximando a um sistema real, no qual uma companhia de energia apresenta mais de uma linha de transmissão, e em caso de uma falha em uma destas, a carga é dividida para as demais linhas de transmissão. Sendo assim, o circuito final analisado neste trabalho, é representado pelo diagrama unifilar do Sistema Elétrico de Potência ilustrado na Figura 2.5.

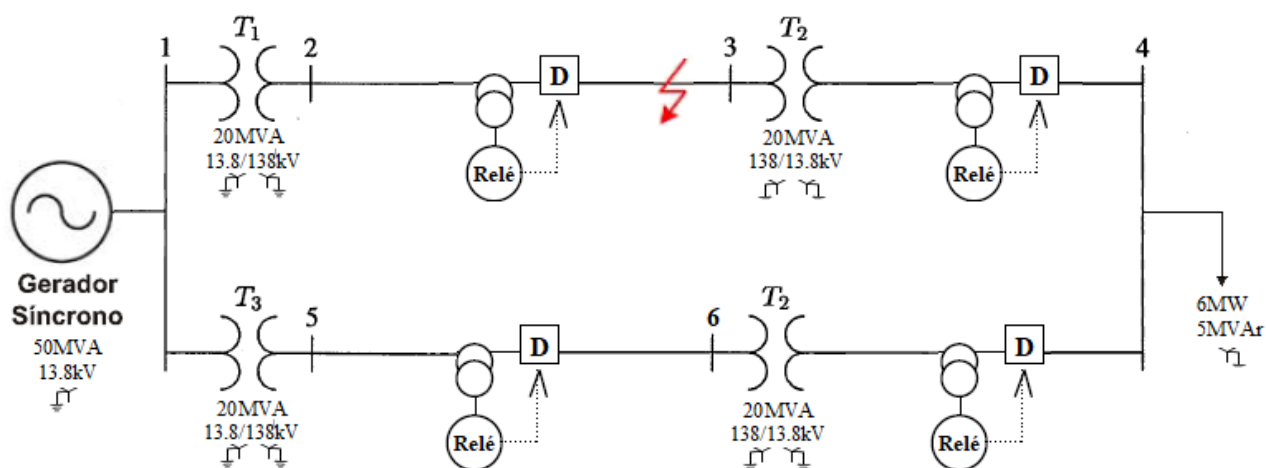


Figura 2.5 – Diagrama Unifilar.

### 2.1.4 Parâmetros do sistema

O correto dimensionamento dos parâmetros de cada bloco é fundamental para garantir que a simulação tenha o resultado mais próximo do real possível.

As Fontes Trifásicas 138kV representam a tensão das linhas de transmissão do sistema, em que o valor de 138kV é escolhido por se tratar de uma tensão usual nas linhas de transmissão no Brasil, como foi visto na Introdução e pode ser visualizado na Figura 1.2 [14].

Para representar as linhas de transmissão, o modelo  $\pi$  nominal é utilizado, pois na simulação é representada duas linhas de tamanho médio (200km), sendo, portanto, o modelo mais aconselhável.

O esquema da linha de transmissão utilizada é baseado na linha de transmissão real: Jaguara – Taquaril, pertencente ao sistema Furnas, no estado de Minas Gerais, cujo esquema é apresentado na Figura 2.6 e 2.7.

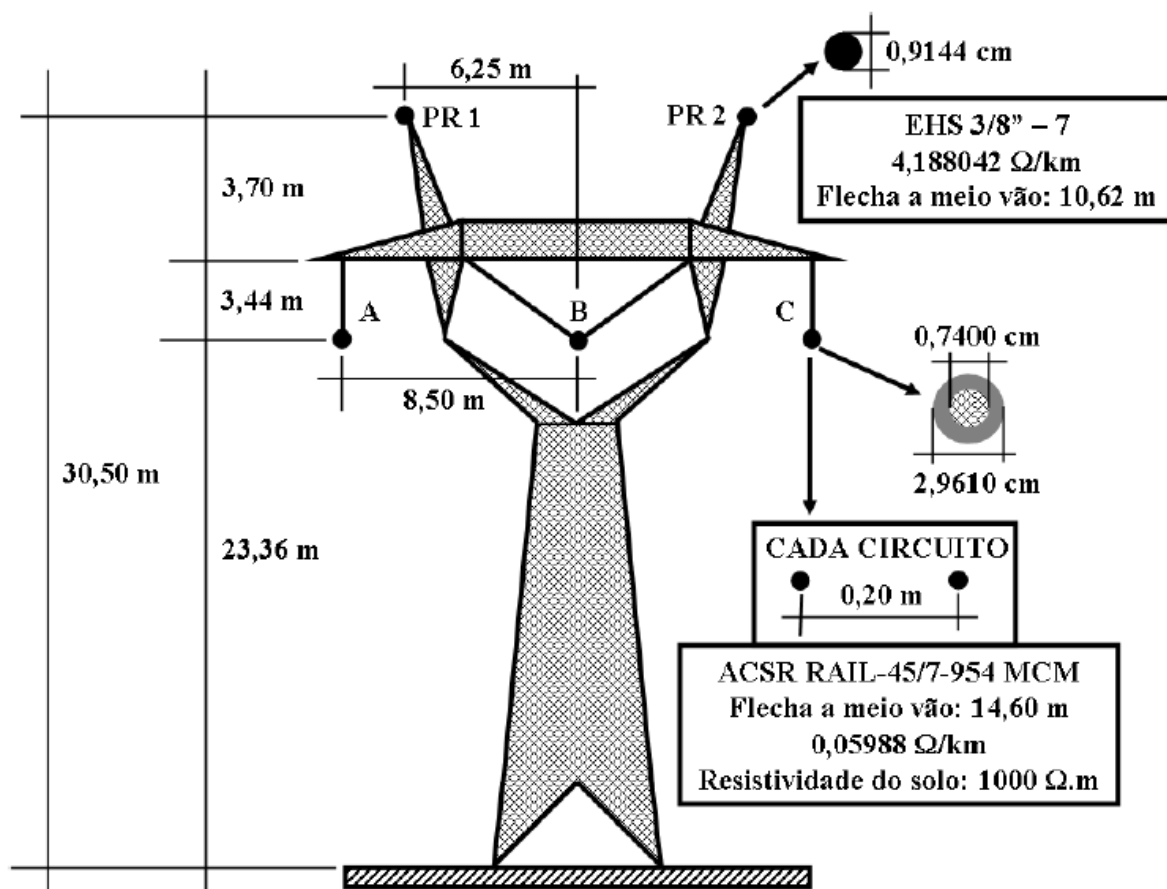


Figura 2.6 – Linha de transmissão Jaragua-Taquaril [17].

Assim, podemos representar a linha de transmissão conforme a Figura 2.7.

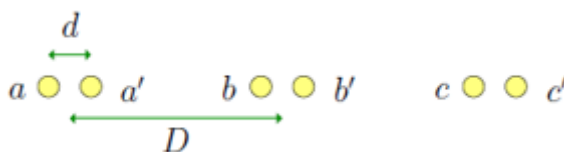


Figura 2.7 – Representação da LT

Sendo  $d$  a distância entre os condutores da mesma fase e  $D$  a distância entre as fases.

De acordo com o condutor ACSR Rail, temos que:

$$D_e = 29,61 \text{ mm} \Rightarrow r_e = 14,80 \text{ mm} = 0,0148 \text{ m} \quad (1)$$

Em que  $D_e$  é o diâmetro externo do condutor e  $r_e$  o raio externo. Assim, encontramos os valores do Raio Médio Geométrico  $D_s^b$  e do Espaçamento equilateral  $D_{eq}$ , possibilitando encontrar os valores da capacitância  $C$  e indutância  $L$  por unidade de comprimento.



$$D_S^b = \sqrt{0,0148 * 0.20} = 0,0544 \quad (2)$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{8,5 * 8,5 * 17} = 10,71 \quad (3)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{10,71}{0,0544}} = 10,6 * 10^{-12} \frac{F}{m} \quad (4)$$

$$L = 2 * 10^{-7} * \ln \frac{10,71}{0,0544} = 1,056 \frac{H}{m} \quad (5)$$

Na Tabela 1 e 2 observa-se as características dos cabos da LT e na Figura 2.8 os parâmetros das linhas de transmissão conforme os cálculos anteriores.

Tabela 1 – Característica ds cabos da LT.

Dados dos cabos da linha de 138KV	
Condutores de fase tipo: Rail	
Nº de condutores em feixe	2
Distância dos feixes em (m)	0.2
Diâmetro do condutor externo (m)	0.0281432
Diâmetro do condutor interno (m)	0.00739
Resistência a 60 Hz em ( $\Omega$ /km)	0.0800497
Temperatura °C	45
Permeabilidade magnética relativa	1
Permissividade relativa	1
Flecha a meio vão (m)	14.6

Tabela 2 – Característica do para-raios da LT.

Cabo para-raios EHS 3/8'' (sólido)	
Resistência a 60 Hz ( $\Omega$ /km)	4.188
Temperatura °C	45
Diâmetro do condutor	0,009144
Permeabilidade magnética relativa	70
Permissividade magnética	1
Flecha a meio vão (m)	10.62

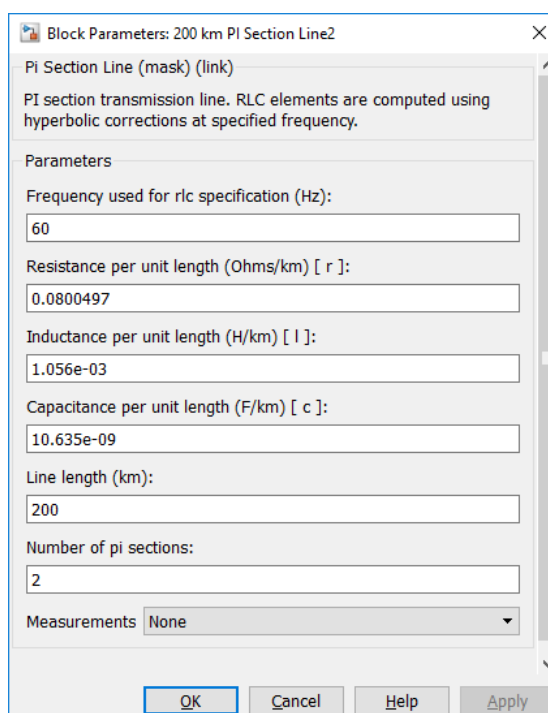


Figura 2.8 – Parâmetros bloco linha de transmissão

Para a análise da localização da falta e do efeito shunt, as impedâncias da LT foram divididas em duas partes com parâmetros idênticos, e variou-se o comprimento de ambas de modo que o total fosse sempre mantido em 200 km (Figura 2.8). Em seguida, a capacitância da linha foi alterada, tendo sido o valor da capacitância da Figura 2.7 aumentado em 10x e diminuído em 10x para efeitos de comparação.

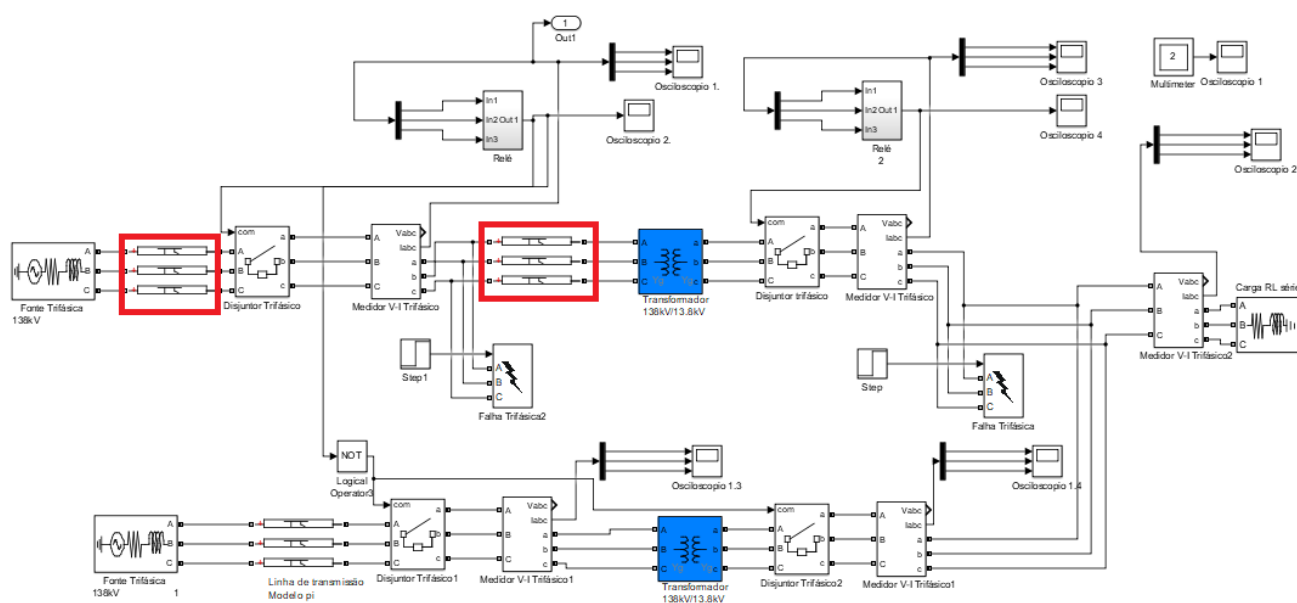


Figura 2.9 – Variação na distância da falta

Os valores nominais dos transformadores foram escolhidos com base na subestação Andradina, localizada na Região Sudeste, por esta operar com os mesmos valores nominais de tensão do circuito proposto. Sendo assim, os transformadores abaixadores foram dimensionados com tensão 138/13,8kV e potência de 20MVA.

A carga RL foi dimensionada conforme a Figura 2.8, de modo que as correntes de fase ficassem em um valor inferior à máxima suportada pelo circuito, de 1 p.u.

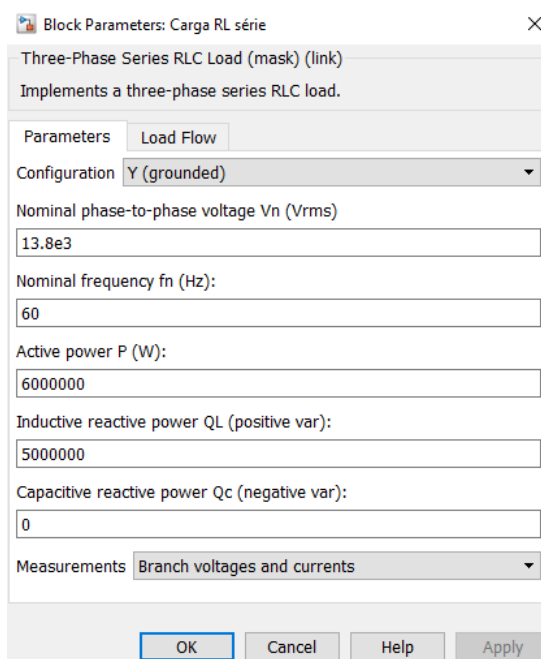


Figura 2.10 – Parâmetro carga

O controle das faltas ocorre através de um bloco de degrau, o qual foi ajustado para proporcionar um pulso em  $t = 0,1s$ , ocorrendo a falta, portanto, neste instante. Os parâmetros da falta são representados na Figura 2.9.

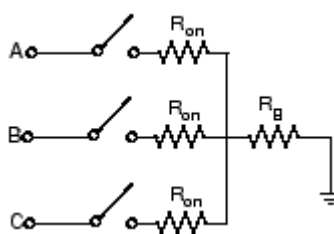


Figura 2.11 – Parâmetro Falta

$R_{on}$  é a resistência interna em ohms( $\Omega$ ) e  $R_g$  é a resistência do terra, tendo sido configurados com valores  $0.0001 \Omega$  e  $0.01 \Omega$ , respectivamente.

### 3 Resultados e Discussões

#### 3.1 Falta Fase-Terra

A primeira simulação realizada foi com uma falta ocorrendo em apenas uma das fases e o Terra. Escolheu-se apenas uma das fases (Fase A) pois o resultado para as outras fases seria semelhante.

A falha foi programada para ser aplicada no instante de tempo  $t = 0,1s$  (programada pelo degrau). A corrente das fases na linha de transmissão principal pode ser vista na Figura 3.1.

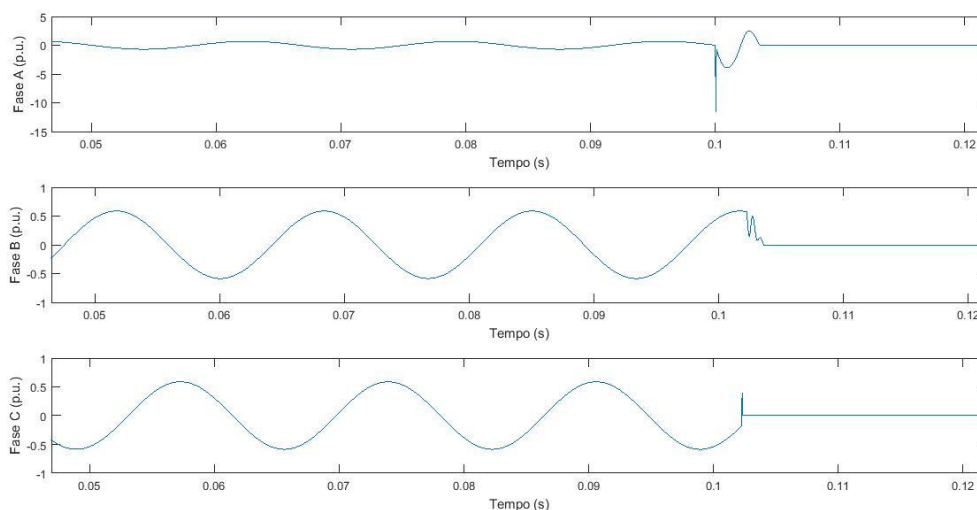


Figura 3.1 – Corrente na LT principal (falta fase-terra).

Nota-se que os equipamentos de proteção funcionaram, sendo a LT principal aberta em suas três fases, com destaque para a fase A, que teve a corrente de falta da ordem de 3p.u. e o valor de pico da corrente subtransitória da falta da ordem de 11,5p.u. Além disso, é possível concluir que o maior valor da corrente de curto-circuito acontece no momento da falha, em  $t = 0,1s$ .

Como era esperado, a linha secundária foi ligada, como pode ser visto na Figura 3.2.

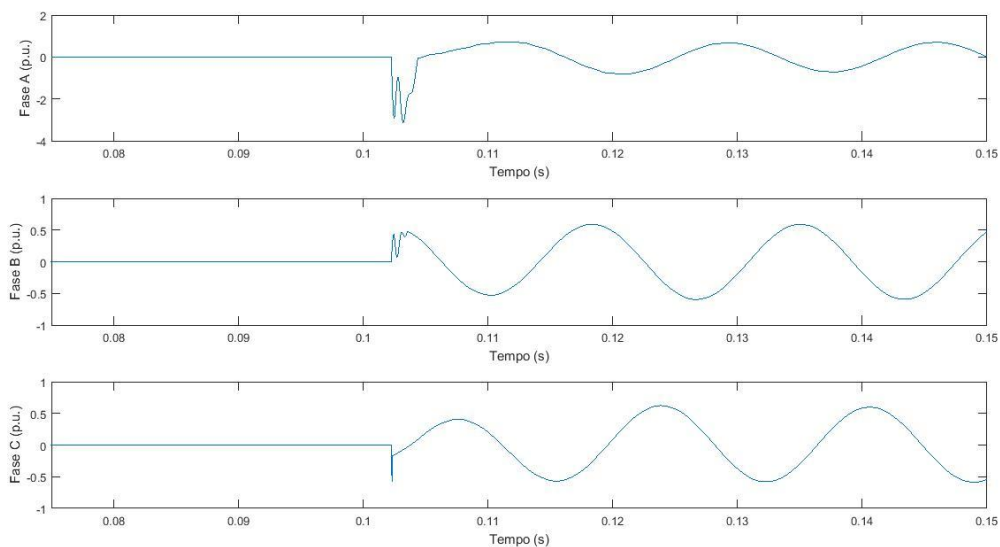


Figura 3.2 – Corrente na LT secundária (falta fase-terra).

Como resultado do interrompimento do fornecimento da LT principal, e operação da LT secundária, obteve-se, na distribuição, as formas de ondas apresentadas pela Figura 3.3.

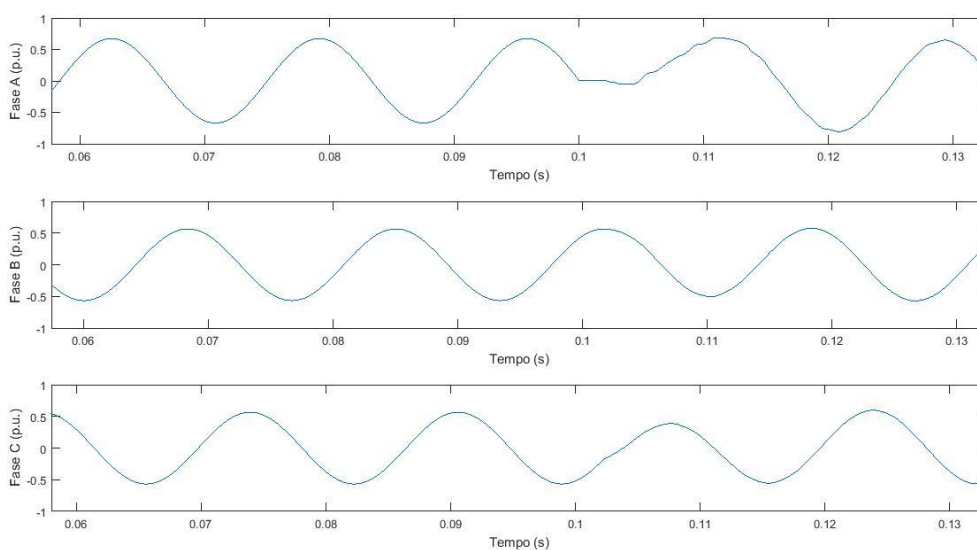


Figura 3.3 – Correntes na distribuição (falta fase-terra).

Percebe-se que não houve interrupção do fornecimento de energia ou alteração do valor de pico das correntes, porém, houve interferência da falta nas formas de ondas por cerca de 12ms, com destaque para a fase A, onde ocorreu a falta.

### 3.2 Falta Fase-Fase

Para realizar o curto bifásico sem a presença do Terra, foram escolhidas as fases A e B para sofrerem a falta.

Os resultados obtidos foram correntes da ordem de 14,5p.u. para a fase A e 14,9p.u. para a fase B, valores superiores aos 11,5 p.u. do curto fase-terra, como pode ser visto na Figura 3.4.

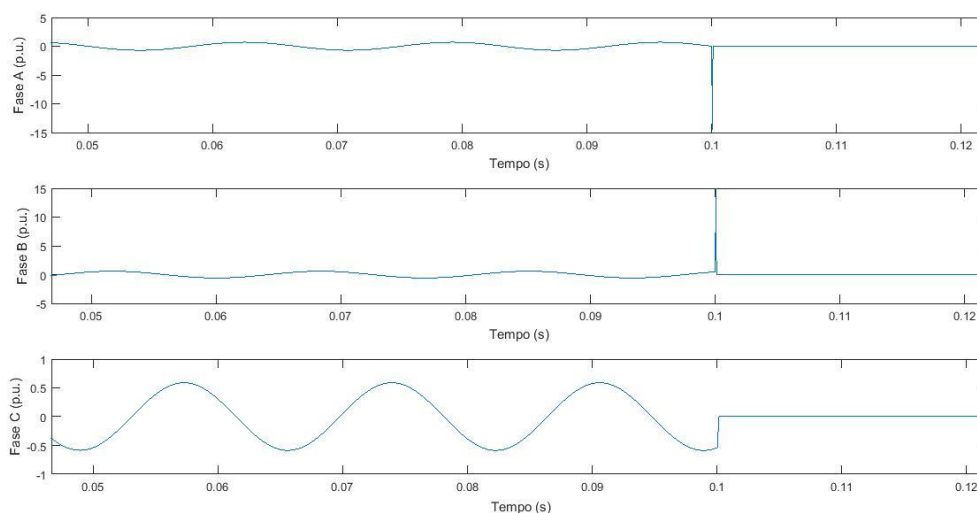


Figura 3.4 – Correntes na LT principal (falta fase-fase).

O mecanismo do sistema funcionou corretamente, fazendo a linha secundária entrar em operação após a falha na LT principal, conforme Figura 3.5.

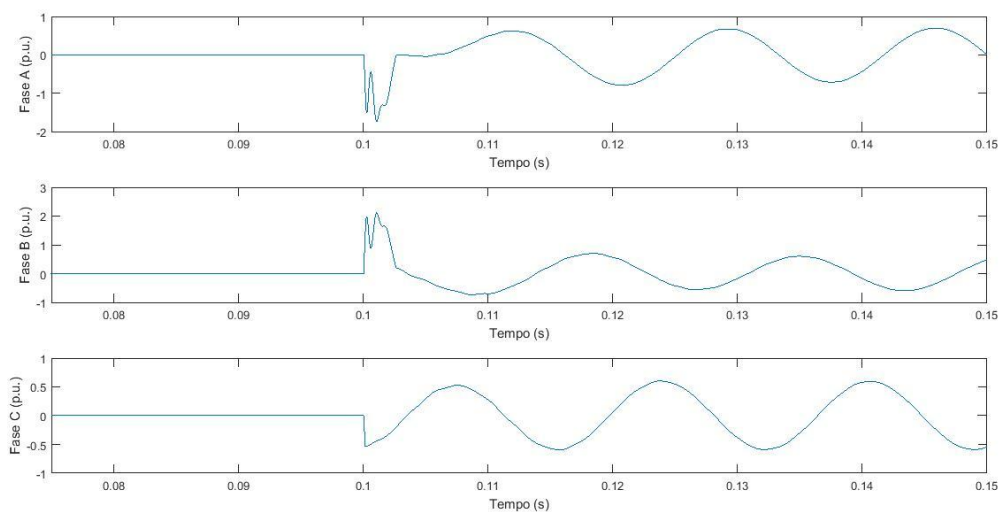


Figura 3.5 – Correntes na LT secundária (falta fase-fase).

Isso proporcionou que a distribuição não tivesse a energia interrompida, conforme ilustra a Figura 3.6. No entanto, observa-se que houve interferência da falha na qualidade da energia após  $t = 0,1s$ , sendo as fases A e B as mais perturbadas, e com duração de 12ms, assim como no curto monofásico anterior.

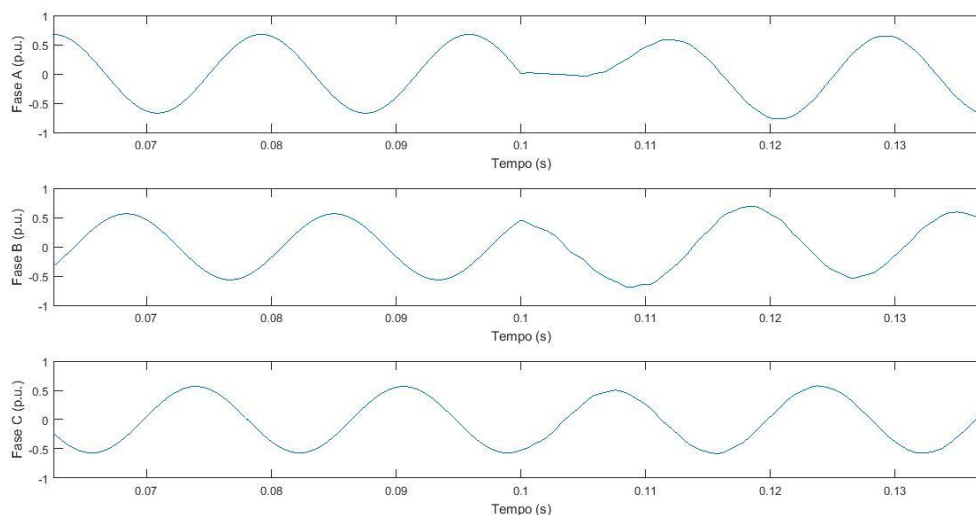


Figura 3.6 – Correntes na distribuição (falta fase-fase).

### 3.3 Falta Fase-Fase-Terra

Para este curto, foram escolhidas as fases A e B, além do Terra. Os resultados obtidos (Figura 3.7) foram um valor de curto de cerca de -11,5p.u. para a fase A e 18,4p.u. para a fase B, sendo aquele igual ao valor encontrado no caso anterior, e este superior.

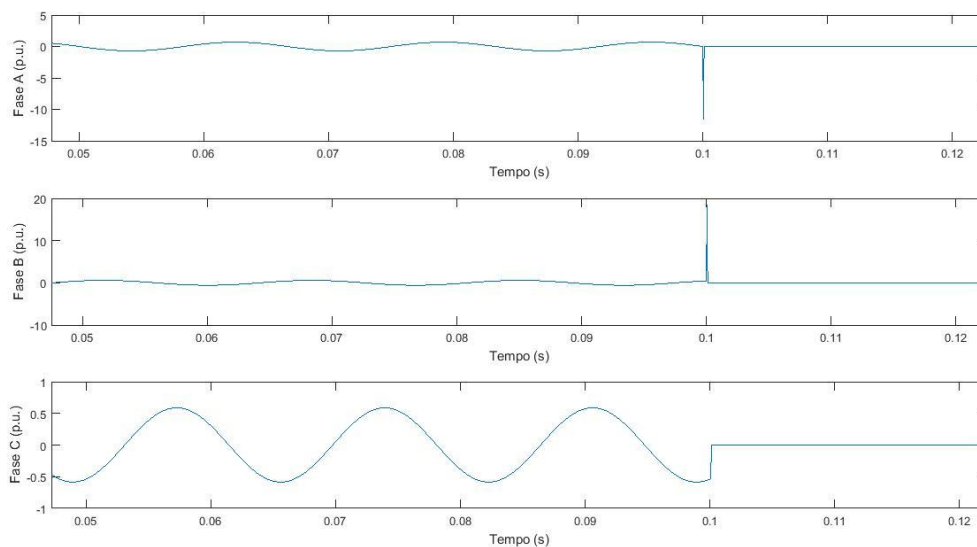


Figura 3.7 – Correntes na LT principal (curto 2 fases terra).

Nota-se que a linha secundária entrou em operação (Figura 3.8), proporcionando a continuidade no fornecimento à distribuição (Figura 3.9).

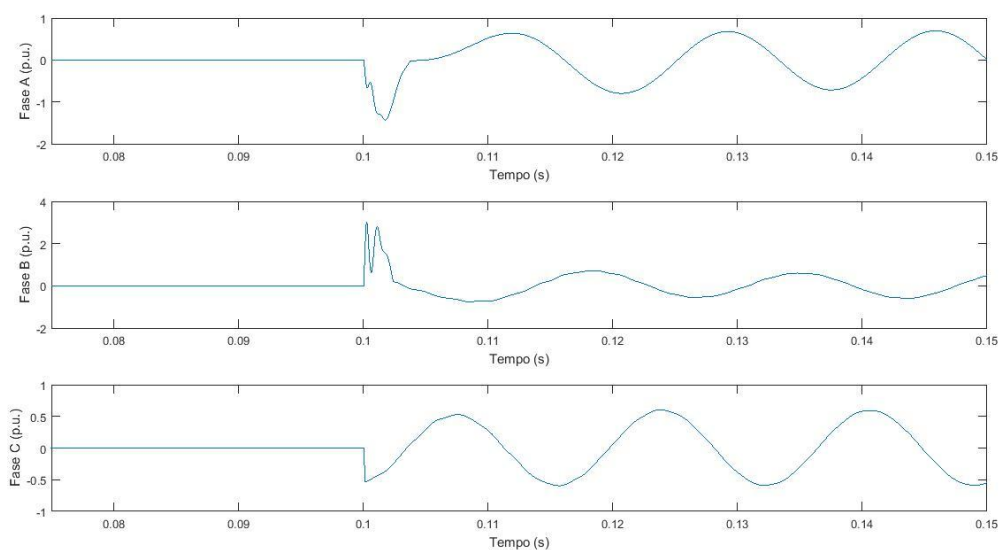


Figura 3.8 – Correntes na LT secundária (curto 2 fases-terra).



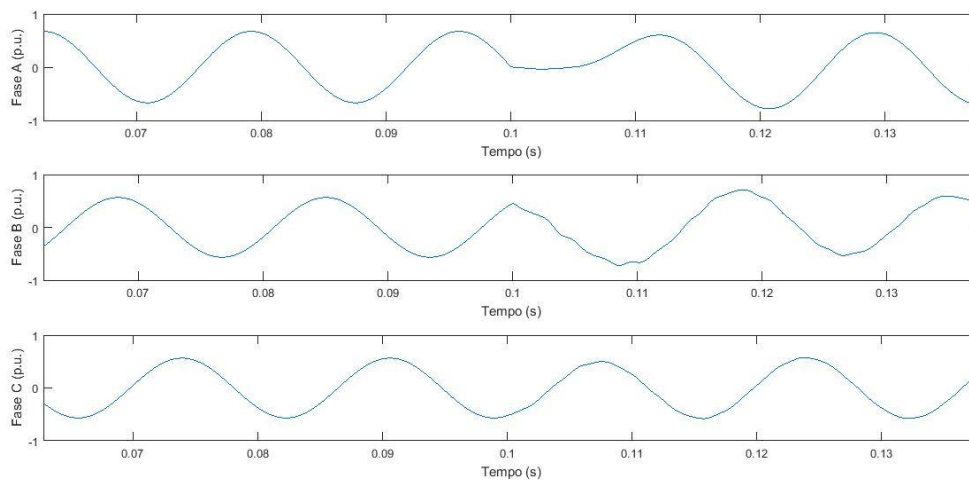


Figura 3.9 – Correntes na distribuição (curto 2 fases-terra).

Percebe-se que as fases A e B foram as mais perturbadas, assim como ocorreu no curto bifásico sem a terra, por terem sido as fases onde ocorreu o curto. Além disso, a fase B da transmissão teve uma perturbação de 23ms, superior às perturbações na fase A (cerca de 8ms) e nos outros curtos anteriores (cerca de 12ms).

### 3.4 Falta trifásica

Primeiramente foi realizada a simulação trifásica sem a presença do Terra. Os resultados foram valores da ordem de -11p.u. para a fase A, 19p.u. para a fase B e -8,1p.u. para a fase C.

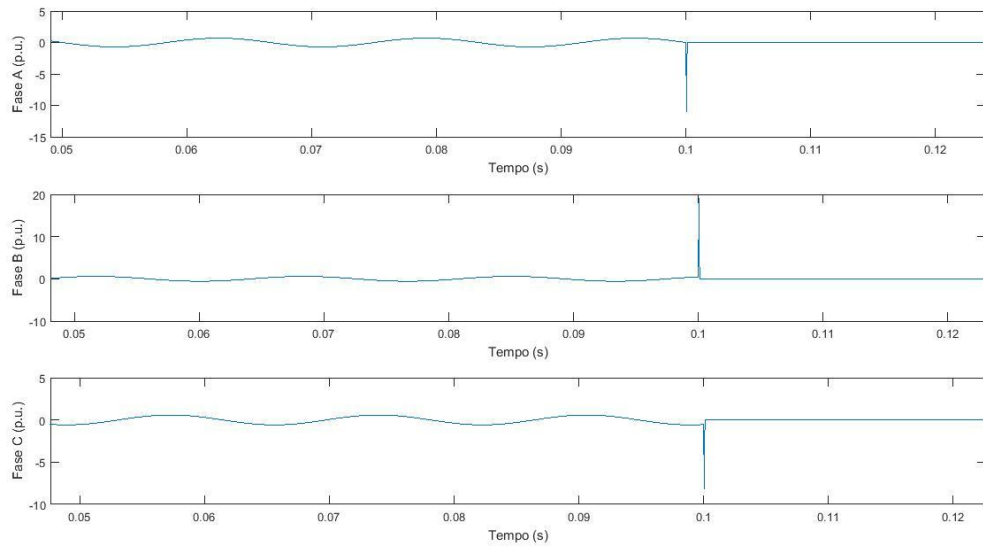


Figura 3.10 – Correntes na LT principal (falta trifásica).

Pode-se observar que o mecanismo de seleção da LT secundária também funcionou para faltas trifásicas (Figura 3.11), produzindo as formas de onda da Figura 3.12 na distribuição.

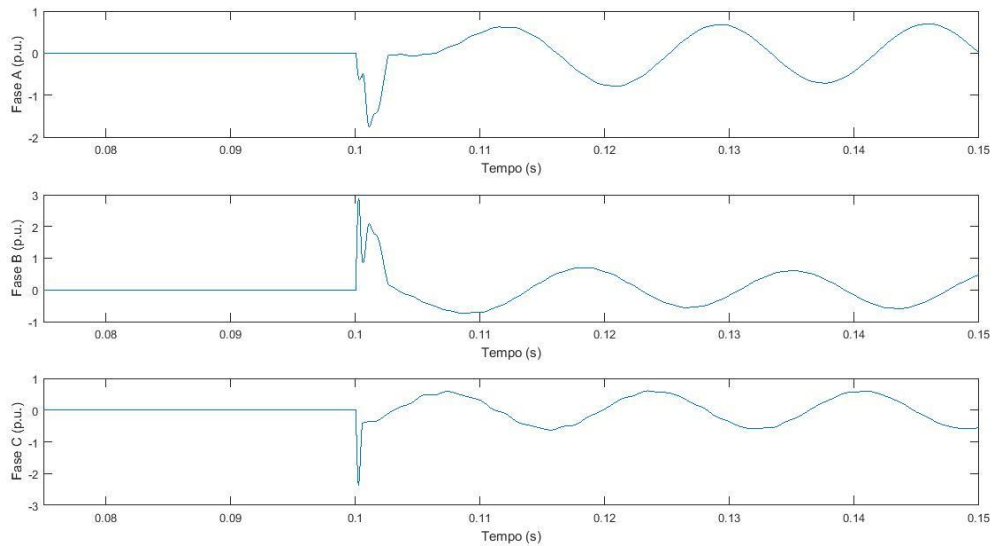


Figura 3.11 – Correntes na LT secundária (curto trifásico).

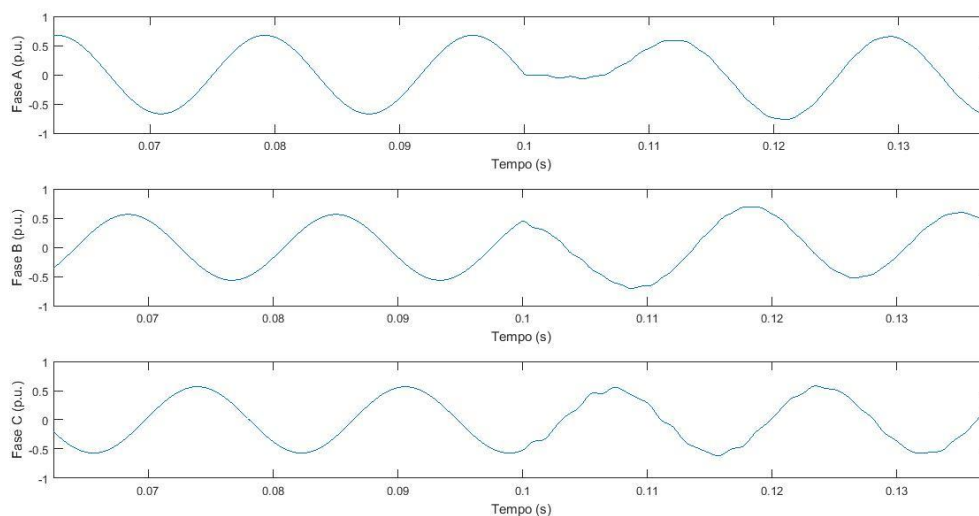


Figura 3.12 - Correntes na distribuição (curto trifásico).

Devido ao curto ser nas 3 fases, observou-se distorções mais perceptíveis em todas as fases, com destaque para a fase C, que teve um distúrbio por cerca de 41ms, o maior em relação aos outros curtos.

### ***3.5 Falta trifásica-terra***

O último tipo de falta a ser simulado foi o trifásico com a presença do Terra. Os resultados obtidos foram valores da ordem de -11,5p.u. para a fases A, 18,4p.u. para a fase B e -8,8p.u. para a fase C (Figura 3.13). Sendo assim, percebe-se que os valores para as fases A e B foram iguais aos casos anteriores em que a falta possui o terra, e no caso da fase C houve uma pequena diferença em relação ao caso anterior.

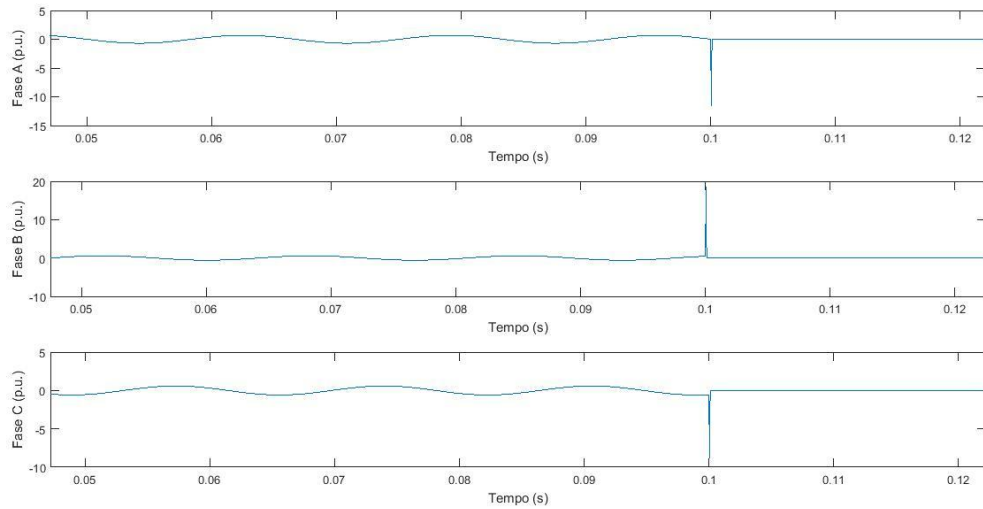


Figura 3.13 – Correntes na LT principal (curto trifásico-terra).

Posteriormente a  $t = 0,1$  s houve a interrupção da LT principal e a LT secundária passou a operar como mostrado na Figura 3.14.

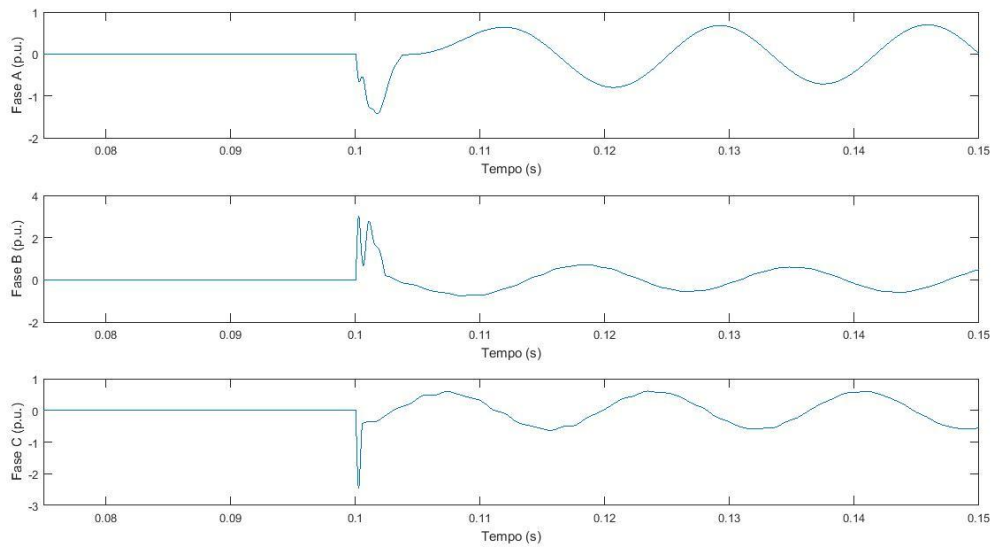


Figura 3.14 – Correntes na LT secundária (curto trifásico-terra).

As formas de onda na distribuição são dadas conforme a Figura 3.20. Nota-se uma perceptível perturbação nas três fases da distribuição e a presença de um distúrbio de 41 ms na fase C, mesmo resultado do curto trifásico sem o Terra.

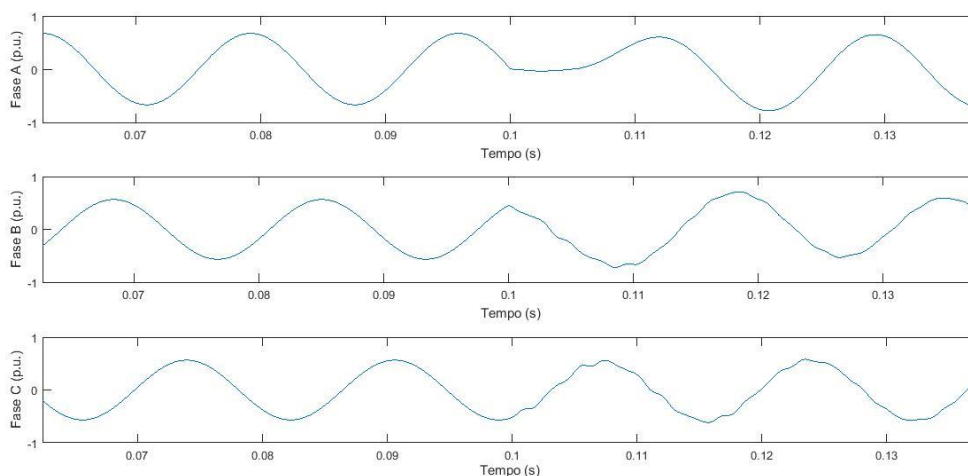


Figura 3.15 – Correntes na distribuição (curto trifásico-terra)

Analisando os resultados obtidos para todas as faltas, nota-se que a perturbação causada pelas falhas se propagou pelo circuito por alguns milissegundos, devido ao tempo de atuação do sistema de proteção, e que os distúrbios nas formas de onda da distribuição, e consequentemente da carga, tiveram valores diferentes para cada tipo de falha. As faltas trifásicas obtiveram um maior tempo de perturbação na distribuição (41ms), sendo quase o dobro do tempo em relação à falta com a presença de 2 Fases e o Terra, e quase 4 vezes maior que o tempo das faltas Fase-Terra e Fase-Fase. Ainda assim, esses valores foram inferiores a 3 ciclos, estando, portanto, dentro dos limites teóricos.

### 3.6 Comparação das Faltas

Antes de mostrar os dados comparativos das faltas aplicadas anteriormente, foi realizado o ensaio na ausência do circuito de proteção, para verificar o comportamento das correntes de fase na ocorrência de uma falha. O resultado obtido encontra-se na Figura 3.16.

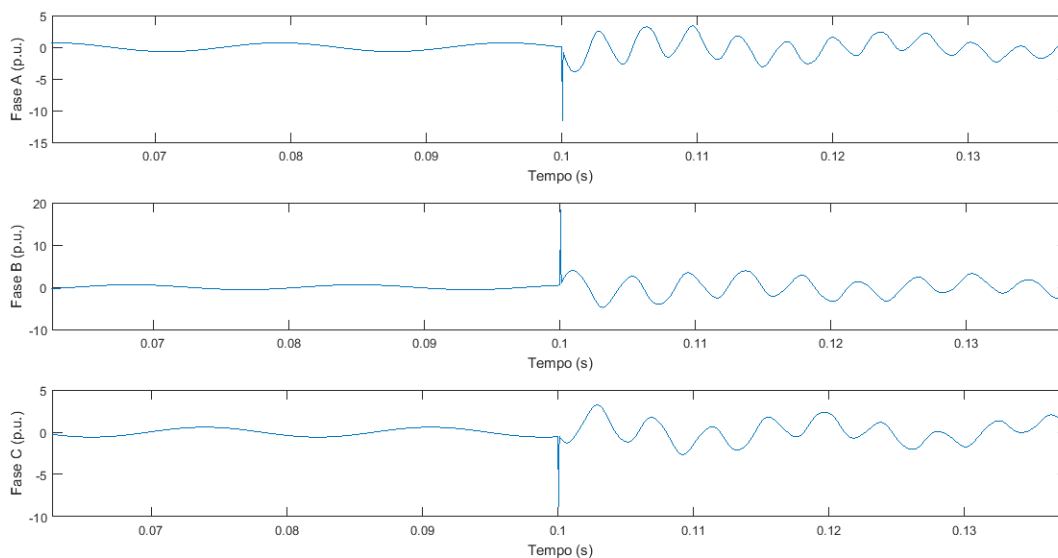


Figura 3.16 – Corrente de falta.

Os valores de pico da corrente subtransitória da falta foram da ordem de -11,5p.u. para a fase A, 18,4 p.u. para a fase B e -8,8 p.u. para a fase C, quando as faltas foram realizadas com a presença do terra, havendo uma pequena variação nesses valores nas faltas sem a presença do terra. Já em regime permanentes, esses valores foram da ordem de 3p.u., o que é cerca de 5 vezes superior a corrente em regime nominal.

Observa-se que as formas de onda então em conformidade com a Figura 1.5, que apresentou as correntes de falta sendo compostas por uma componente CC subtransitória e uma componente CA permanente.

Sendo assim, ao final das simulações, obteve-se os seguintes resultados dos valores de pico das correntes de curto-circuito para cada tipo de falta:

Tabela 3 – Valores de pico das correntes de curto-circuito para cada tipo de falha.

	Fase A	Fase B	Fase C
Fase – Terra	-11,5 p.u.	-	-
Fase – Fase	-14,5 p.u.	+14,9 p.u.	-
2 Fases - Terra	-11,5 p.u.	+18,4 p.u.	-
3 Fases	-11,0 p.u.	+19,0 p.u.	-8,1 p.u.
3 Fases – Terra	-11,5 p.u.	+18,4 p.u.	- 8,8 p.u.

Nota-se que quando as faltas ocorreram com a presença do terra, os valores da correntes de curto-circuito em cada fase não se alteram, sendo de -11,5p.u. para a fase A, +18,4p.u. para a fase B e -8.8p.u. para a fase C, independente da presença ou não do sistema de proteção. Nos casos das faltas na ausência do terra, os valores tiveram uma variação de 3,5p.u. para a falta A e 4,1p.u. para a fase B, devido à diferença das componentes simétricas em relação ao curto-circuito na presença do terra, sendo que no caso na ausência do terra não há a presença da sequência zero, apenas a sequência positiva e negativa.

A assimetria entre as ondas de curto-circuito das fases, assim como a variação do valor de pico encontrado para cada fase, deve-se ao fato de que o valor da tensão para cada fase quando ocorre o curto-circuito é diferente, devido à defasagem existente entre as fases. Portanto, é necessário salientar que para uma falta aplicada em outros instantes de tempo, os valores de pico da corrente de falta em cada fase são diferentes.

Por fim, nota-se que a magnitude das correntes de curto circuito é realmente muito alta, podendo atingir picos de cerca de 19,0 p.u. Daí a necessidade de um Sistema de Proteção capaz de interromper o circuito, protegendo-o contra anormalidades.

### ***3.7 Resistência da Falta***

Para complementar as análises das faltas, fez-se também uma análise da influência da resistência de falta sobre o valor da corrente. Para isso, variou-se o valor de  $R_{on}$  de  $0,0001\Omega$  a  $300\Omega$ , especificamente na Falta Fase-Terra, por este tipo de falta ser o mais recorrente.

O resultado da relação entre esses valores da resistência de falta  $R_{on}$  e o módulo da corrente de falta na fase A é mostrado na Figura 3.17.

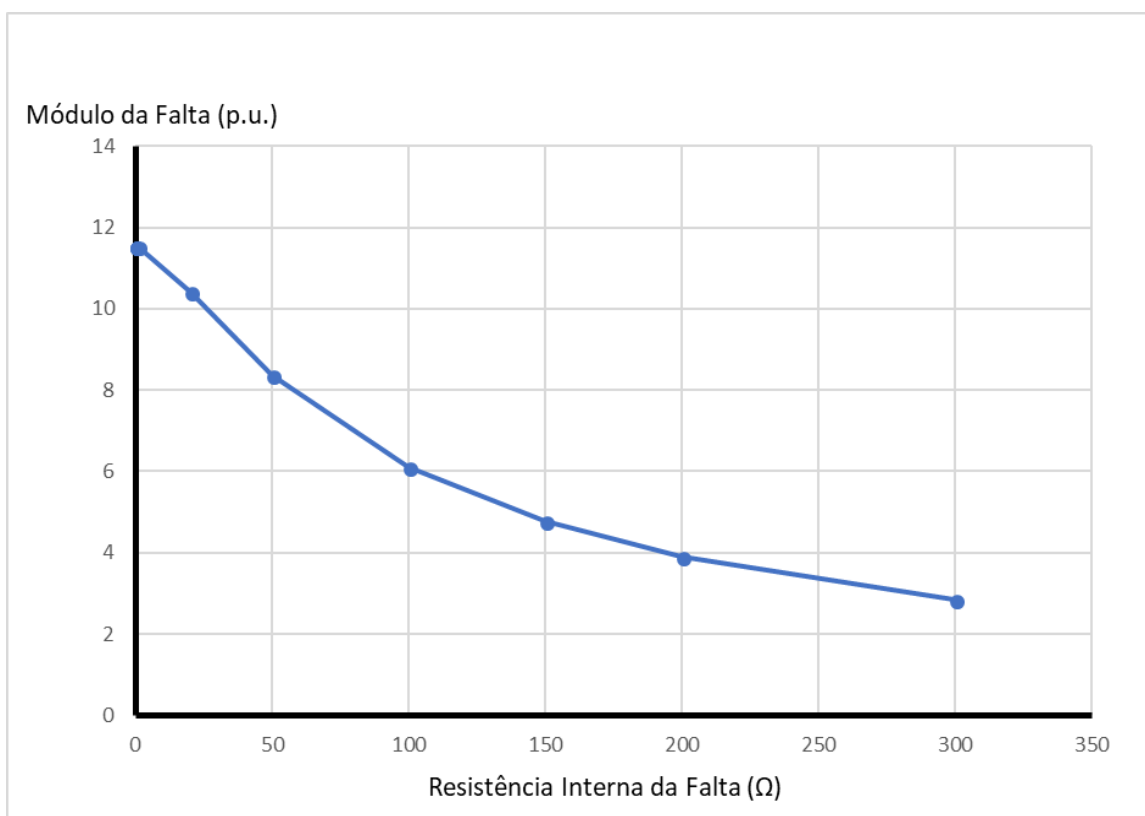


Figura 3.17 - Resistência da falta x Módulo da Falta.

Observou-se que para valores até  $1\Omega$ , a corrente de falta não sofreu alteração significativa. Porém, para valores acima de  $1\Omega$ , foi nítida a influência da resistência de falta para o valor da corrente de falta, apresentando uma queda em seu valor à medida que a resistência se eleva. Isso pode ser explicado pela Equação 1, que expressa a relação da corrente de falta e as componentes das impedâncias do circuito.

$$I_f = \frac{3E_1}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \quad (1)$$

Sendo assim, para valores muito pequenos de  $Z_f$ , não há uma alteração significativa de  $I_f$ , entretanto, para valores significativos obtém-se grandes alterações conforme observa-se no gráfico anterior. Desta forma, percebe-se que o estudo da resistência da falta é fundamental para analisar o valor da corrente de falta, e conseqüentemente para o correto dimensionamento dos sistemas de proteção.



### 3.8 Comprimento da Linha de Transmissão

Outro fator importante na análise de faltas é verificar a influência do comprimento da LT sobre o valor da corrente, utilizou-se a Falta Fase-Terra e variou-se o valor do comprimento da linha, observando em cada caso o módulo da falta na fase A, conforme mostrado pela Tabela 5, e através desta plotou-se o gráfico da Figura 3.18.

Tabela 4 - Resistência da falta x Módulo da Falta.

Tamanho LT (km)	Módulo da Falta (p.u.)
150	15.563
200	11.544
250	8.846
300	7.13
350	5.948
400	5.118
450	4.493
500	4.001

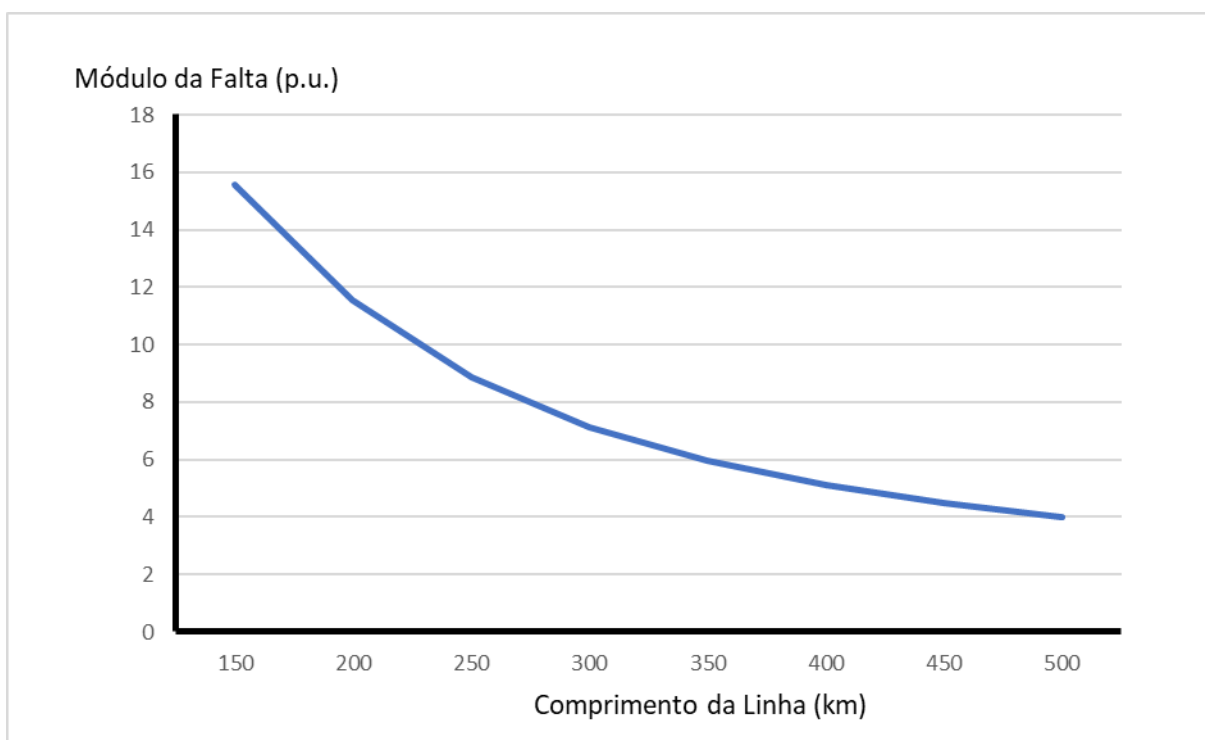


Figura 3.18 – Comprimento LT x Módulo da Falta.

Conforme o gráfico, percebe-se que o aumento do comprimento da linha de transmissão, gera uma diminuição do módulo da falta, devido ao aumento da impedância da linha.

### ***3.9 Distância da Falta e Efeito da Capacitância Shunt***

Além dos fatores já estudados, a análise de onde ocorrem as faltas e o efeito da capacitância shunt nas linhas de transmissão são relevantes para se determinar o módulo da corrente de curto-circuito, e conseqüentemente para o correto dimensionamento do sistema de proteção.

Mantendo os parâmetros inalterados da capacitância shunt, com valor igual a  $10.6e-9$  F/km, plotou-se o primeiro gráfico relativo a mudança da corrente da falta, variando a distância a cada 25 km de comprimento, e mostrando o valor da corrente de falta (Figura 3.20).

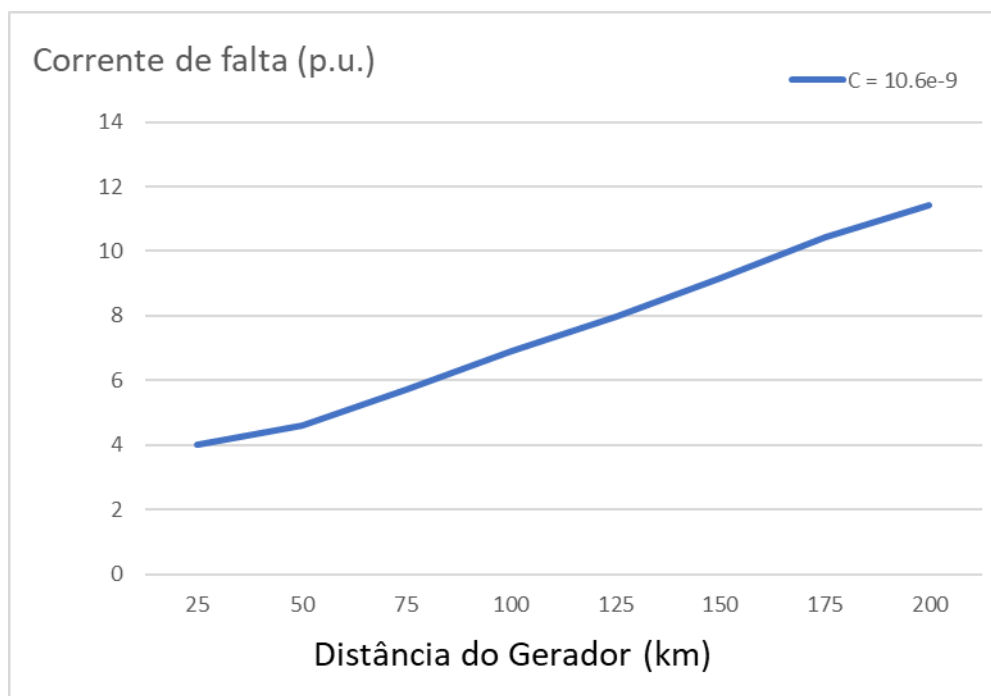


Figura 3.19 – Comprimento LT x Módulo da Falta ( $C=10.6e-9$ ).

Em seguida, variou-se os valores da capacitância shunt, diminuído em 10x (Figura 3.21) e aumentado em 10x (Figura 3.22).

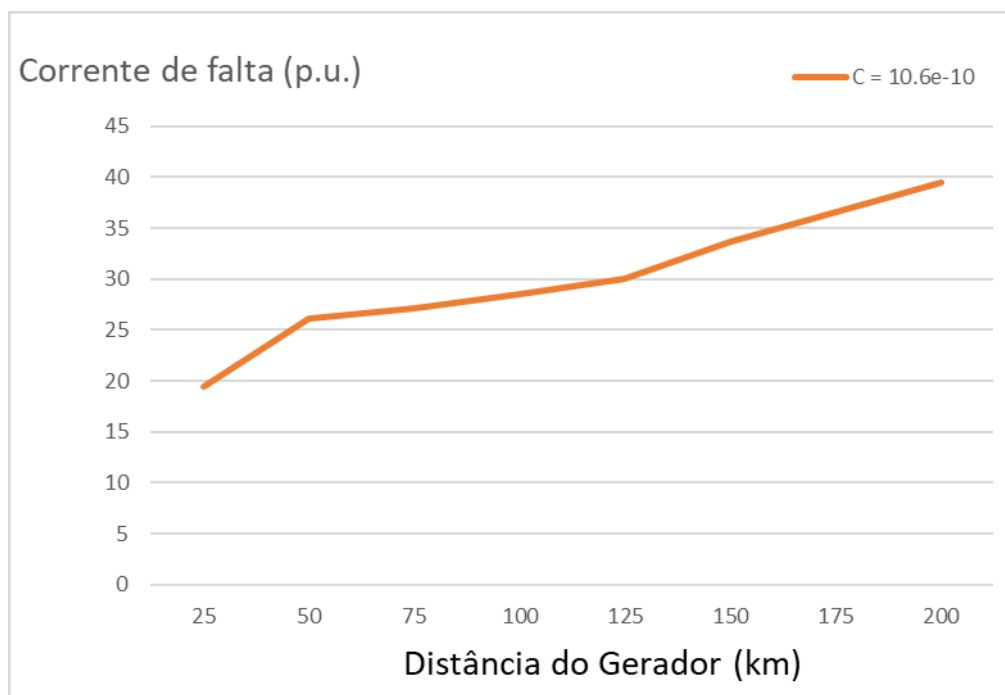


Figura 3.20 – Comprimento LT x Módulo da Falta ( $C=10.6e-10$ ).

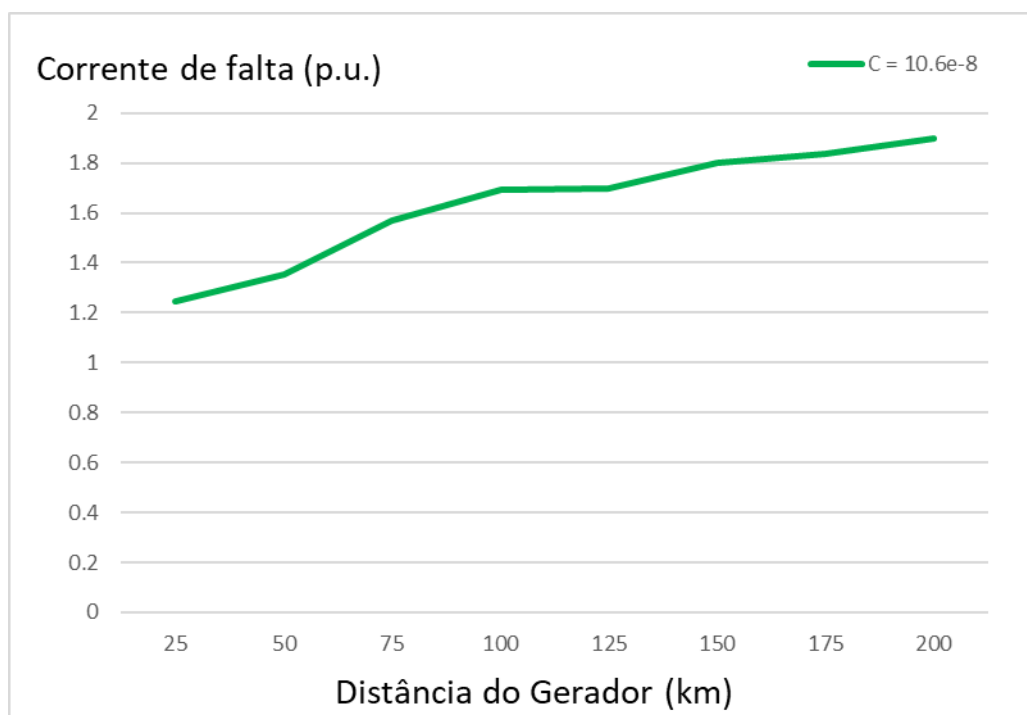


Figura 3.21 – Comprimento LT x Módulo da Falta ( $C=10.6e-8$ ).

Observou-se para os três casos, que o comportamento das curvas tende a ser linear, com um aumento do valor da corrente de falta à medida que a ocorrência da falta se distancia dos terminais do gerador. Além disso, nota-se que o aumento da capacitância shunt provocou uma diminuição dos valores da corrente de falta.

## 4 Conclusões

Este trabalho objetivou analisar os diferentes tipos de faltas em linhas de transmissão de um SEP, assegurando a continuidade do fornecimento de energia para a carga através do acionamento de dispositivos de proteção.

Foram realizadas simulações com intuito de analisar o comportamento das correntes de curto-circuito na linha de transmissão principal, das correntes na linha secundária, que passou a atuar após a falha, e o efeito disso para a distribuição e carga. Foram realizadas simulações para os cinco diferentes tipos de falhas: Fase-Terra, Fase-Fase, 2 Fases-Terra, Trifásico e Trifásico-Terra. De acordo com as simulações, evidenciou-se que com duas linhas de transmissão operando em paralelo, não houve a interrupção do fornecimento de energia elétrica para a carga. Daí a importância de o sistema de transmissão ser interligado, em que uma linha de transmissão pode suprir temporariamente a demanda de uma carga, enquanto é feito o reparo na linha de transmissão que falhou. Vale ressaltar que, caso uma linha de transmissão esteja operando em condições normais e tenha que suprir mais uma carga devido à falha de outra linha de transmissão, isto poderia sobrecarregá-la. Assim, deve ser feita uma análise da distribuição da carga da linha de transmissão que falhou para as demais linhas, de modo que não sobrecarregue nenhuma, evitando mais problemas no SEP.

Ademais, o presente estudo destacou a influência do comprimento da linha de transmissão, da resistência de falta, do efeito da capacitância shunt e do local onde ocorre a falta, para os valores de curto-circuito, sendo fundamental a sua análise para o dimensionamento do sistema de proteção e conseqüentemente para o correto funcionamento do SEP.

## Referências Bibliográficas

- [1] LEÃO, R. Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica. Apostila. Universidade Federal do Ceará. Ceará, 2009. 38p.
- [2] SAADAT, Hadi. Power system Analysis. 3. ed. New York: McGraw-hill, 2010. 772 p.
- [3] SATO, Fujito; FREITAS, Walmir. Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica: Fundamentos e Prática. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2015. 472 p.
- [4] COTOSCK, Kelly Regina. Proteção de Sistemas Elétricos: Uma Abordagem Técnico-Pedagógica. 109 p. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica – Cpdee, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- [5] CAMINHA, Amadeu C. Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 2004. 211 p.
- [6] ANDERSON, P. M., Power System Protection. IEEE Press Series on Power Engineering, 1999.
- [7] DE ALMEIDA, Marcos A. Dias. Proteção de Sistemas Elétricos. Apostila. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2000. 133p.
- [8] COURY, D. V. Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência. USP. São Carlos, 2012.
- [9] MAMEDE FILHO, João; MAMEDE, Daniel Ribeiro. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. São Paulo: Ltc, 2011. 620 p.
- [10] ZANETTA JUNIOR, Luiz Cera. Fundamentos de sistemas elétricos de potencia. 1. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.
- [11] Tamer Kawady, Student Member, IEEE, and Jürgen Stenzel, Member, IEEE, “A Practical Fault Location Approach for Double Circuit Transmission Lines Using Single End Data” IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 18, No. 4, October 2003, pp.1-8.
- [12] ElRefaie, Hesham and Negm, Emtethal, “Developed Model and Simulation of Primary and Secondary Arc Fault on Transmission Lines Using MATLAB”, 2017 IEEE Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Menoufia University, Egypt, 19-21 December 2017, pp.1-6.
- [13] Majid Sanaye-Pasand, Senior Member, IEEE, and Peyman Jafarian, Student Member, IEEE, “Adaptive Protection of Parallel Transmission Lines Using Combined Cross-Differential and Impedance-Based Techniques”, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 26, No. 3, July 2011, pp.1-12.
- [14] CAUX, Leandro Silva de. Estudo De Falta Fase-Terra Em Um Sep E Comportamento Do Sistema De Proteção. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.
- [15] M. I. Gilany O.P. and Malik G.S. Hope, “A Digital Protection Technique For Parallel Transmission Lines Using A Single Relay At Each End”, IEEE Transactions on Power Delivery, The Universit of Calgary, Alberta, Canada, Vol. 7 No.1, January 1992, pp.1-8.
- [16] CHAPMAN, Stephen J.. Electric Machinery Fundamentals. 5. ed. New York: McGraw-hill, 2012. 704 p.
- [17] DA FONSECA, T. C. (2010). Estudo da Energização, curto e de situações de carga que ocorrem na linha de transmissão Jaguara-Taquaril. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departameno de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2010.
- [18] FERNANDES, Natalia; LOPES, Yona. Smart Grid para o Sistema Elétrico – Motivação, Implantação e Desafios em TI, Redes e Telecomunicações. Bahia: Ieee Smart Grid Workshop, 2013.