



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE DE ARQUITETURA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

VINICIO CEZAR ZORSI

MODELAGEM DE RELÉS DE PROTEÇÃO EM DIGSILENT POWERFACTORY

CUIABÁ – MT
DEZEMBRO, 2022

VINICIO CEZAR ZORSI

MODELAGEM DE RELÉS DE PROTEÇÃO EM DIGSILENT POWERFACTORY

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador:
Prof. Dr. Carlos Enrique Portugal Poma

CUIABÁ – MT
DEZEMBRO, 2022

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

Z88m Zorsi, Vinicio Cezar.
Modelagem de relés de proteção em digisilent power factory [recurso eletrônico] / Vinicio Cezar Zorsi. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 45 f., il. color., pdf). -- 2022.

Orientador: Carlos Enrique Portugal Poma.
TCC (graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso,
Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2022.
Modo de acesso: World Wide Web: <https://bdm.ufmt.br>.
Inclui bibliografia.

1. Estudo de Proteção; Relé de Proteção; DIGSILENT PowerFactory; Sobrecorrente;
Diferencial; Modelagem. I. Poma, Carlos Enrique Portugal, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO**DESPACHO**

Processo nº 23108.105407/2022-43

Interessado: VINICIO CEZAR ZORSI

FOLHA DE APROVAÇÃO**TÍTULO DA MONOGRAFIA: MODELAGEM DE RELÉS DE PROTEÇÃO EM DIGISILENT POWERFACTORY**

ALUNO: VINICIO CEZAR ZORSI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 22 de dezembro de 2022.

Nota final: 8,86 (**oito e oitenta e seis centésimos**)**ASSINATURAS:**

Banca:

Prof. Dr. Nicolás Eusebio Cortez Ledesma

Prof. Dr. Rogerio Lucio Lima

Prof. Dr. Carlos Enrique Portugal Poma



Documento assinado eletronicamente por **CARLOS ENRIQUE PORTUGAL POMA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 22/12/2022, às 17:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

Documento assinado eletronicamente por **NICOLAS EUSEBIO CORTEZ LEDESMA, Docente da**



Universidade Federal de Mato Grosso, em 23/12/2022, às 09:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5388226** e o código CRC **1BEBCA90**.

Referência: Processo nº 23108.105407/2022-43

SEI nº 5388226

RESUMO

O sistema elétrico de potência também conhecido como SEP, durante a sua operação sofre frequentemente por falhas em suas proteções, que muitas vezes resultam em desligamento no fornecimento de energia elétrica. O relé é um dispositivo usado nas proteções, que caso não for ajustado corretamente poderá causar o desligamento inesperado do SEP. Para mitigar esses erros causados por falhas no sistema de proteção, uma das maneiras utilizadas é modelar o sistema real em usando *software* por meio de simulações a fim de testar as proteções que foram dimensionadas para o sistema. Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho é apresentar o *software* DIgSILENT PowerFactory onde será feita a modelagem de um SEP e dimensionado um sistema de proteção através de relés digitais, e com o auxílio de algumas funções existentes no *software* serão feitos testes a fim de validar a parametrização dos relés e comparar os tempos de atuação dos relés obtidos por meio dos cálculos teóricos com os resultados obtidos nas simulações realizadas no *software*.

Palavras-chave: Estudo de Proteção; Relé de Proteção; DIgSILENT PowerFactory; Sobrecorrente; Diferencial; Modelagem;

ABSTRACT

The power electrical system, also known as SEP, during its operation often suffers from failures in its protections, which often result in disconnection of the electric power supply. The relay is a device used in the protections, which if not adjusted correctly can cause the unexpected shutdown of the SEP. To mitigate these errors caused by failures in the protection system, one of the ways used is to model the real system using software through simulations in order to test the protections that were designed for the system. In this sense, the objective of this work is to present the software DIgSILENT PowerFactory, where the modeling of a SEP will be done and a protection system will be dimensioned through digital relays, and with the help of some functions in the software, tests will be performed in order to validate the parameterization of the relays and to compare the relays actuation times obtained through theoretical calculations with the results obtained in the simulations performed in the software.

Keywords: Protection Study; Protection Relay; DIgSILENT PowerFactory; Overcurrent; Differential; Modeling;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura. 1. Sistema de potência elétrico.....	19
Figura. 2. Fluxograma Etapa 2.	19
Figura. 3. Local do Curto-Circuito – 1º Teste.	20
Figura. 4. Local do Curto-Circuito – 2º Teste.....	20
Figura. 5. Local do Curto-Circuito – 3º Teste.....	20
Figura. 6. Oscilograma do relé R1.....	21
Figura. 7. Tempo de atuação do relé R1.....	21
Figura. 8. Oscilograma do relé R2.....	21
Figura. 9. Tempo de atuação do relé R2.....	21
Figura. 10. Oscilograma do relé R3.....	21
Figura. 11. Tempo de atuação do relé R3.....	21
Figura. 12. Tempo de operação relés.....	21
Figura. 13. Seletividade entre os relés R1 e R2.....	22
Figura. 14. Seletividade entre os relés R3 e R2.....	22
Figura. 15. Tempo de operação do relé diferencial.	22
Figura. 16. Tempo de atuação do relé diferencial.	22
Figura. 17. Oscilograma do relé diferencial.	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tempos de operação da proteção (50).....	20
Tabela 2 – Tempos de operação da proteção (51).....	21
Tabela 3 – Tempos de operação da proteção do relé 2 como relé de backup	21
Tabela 4 – Tempo de operação da proteção (87).....	22

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANSI	American National Standards Institute
IEC	International Electrotechnical Commission
NBR	Norma Técnica
RTC	Relação de Transformação do Transformador de Corrente
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TC	Transformador de Corrente

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO	15
II. PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE E SOBRECORRENTE DIFERENCIAL	16
A. Dimensionamento dos TCs.....	16
B. Ajuste da corrente de atuação para a função 51 temporizada de Fase.....	17
C. Ajuste da corrente de atuação para a função 51 temporizada de neutro.....	17
D. Ajuste da corrente de atuação para a função 50 instantânea de fase.....	18
E. Ajuste da função 87 diferenciais de sobrecorrente.....	18
III. METODOLOGIA PROPOSTA	19
A. Software utilizado	19
B. Parametrização e simulações	19
C. Simulações	20
IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES	20
A. Comparação dos tempos de operação dos relés para a função de sobrecorrente instantânea.....	20
B. Comparação dos tempos de operação dos relés para a função de sobrecorrente temporizada.....	21
C. Comparação do tempo de operação do relé para a função de sobrecorrente diferencial.....	22
V. CONCLUSÕES	22
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23
APÊNDICE	24
ANEXO	25

MODELAGEM DE RELÉS DE PROTEÇÃO EM DIGSILENT POWER FACTORY

Vinício Cezar Zorsi
 Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT)
 Cuiabá, Mato Grosso, Brasil
 E-mail: vini.zorsi@gmail.com

Resumo - O sistema elétrico de potência também conhecido como SEP, durante a sua operação sofre frequentemente por falhas em suas proteções, que muitas vezes resultam em desligamento no fornecimento de energia elétrica. O relé é um dispositivo usado nas proteções, que caso não for ajustado corretamente poderá causar o desligamento inesperado do SEP. Para mitigar esses erros causados por falhas no sistema de proteção, uma das maneiras utilizadas é modelar o sistema real em usando *software* por meio de simulações a fim de testar as proteções que foram dimensionadas para o sistema. Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho é apresentar o *software* DIGSILENT PowerFactory onde será feita a modelagem de um SEP e dimensionado um sistema de proteção através de relés digitais, e com o auxílio de algumas funções existentes no *software* serão feitos testes a fim de validar a parametrização dos relés e comparar os tempos de atuação dos relés obtidos por meio dos cálculos teóricos com os resultados obtidos nas simulações realizadas no *software*.

Palavras-Chave – Estudo de Proteção; Relé de Proteção; Digsilent PowerFactory; Sobrecorrente; Diferencial; Modelagem.

MODELING OF PROTECTION RELAYS IN DIGSILENT POWER FACTORY

Abstract - The power electrical system, also known as SEP, during its operation often suffers from failures in its protections, which often result in disconnection of the electric power supply. The relay is a device used in the protections, which if not adjusted correctly can cause the unexpected shutdown of the SEP. To mitigate these errors caused by failures in the protection system, one of the ways used is to model the real system using software through simulations in order to test the protections that were designed for the system. In this sense, the objective of this work is to present the software DIGSILENT PowerFactory, where the modeling of a SEP will be done and a protection system will be dimensioned through digital relays, and with the help of some functions in the software, tests will be performed in order to validate the parameterization of the relays and to compare the relays actuation times obtained through theoretical calculations with the results obtained in the simulations performed in the software.

Keywords – Protection Study; Protection Relay; Digsilent PowerFactory; Overcurrent; Differential; Modelling.

NOMENCLATURA

ANSI	American National Standards Institute.
IEC	International Electrotechnical Commission.
NBR	Norma Técnica.
RTC	Relação de Transformação do TC.
SEP	Sistema Elétrico de Potência.
TC	Transformador de Corrente.

I. INTRODUÇÃO

A proteção dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) é feita por mecanismos de proteção que, por sua vez, são basicamente comandados por relés. A função primordial desses relés é identificar os defeitos, localizá-los da maneira mais exata possível e alertar a quem opera o sistema, promovendo o disparo de alarmes, sinalização e também promovendo a abertura de disjuntores de modo a isolar o defeito, mantendo o restante do sistema em operação normal, evitando que esses defeitos prejudiquem sua normalidade.

Portanto, os relés são os elementos mais importantes do sistema de proteção. Eles são os sensores que vigiam diuturnamente as condições de operação do Sistema Elétrico. Havendo alguma anomalia, por exemplo, um curto circuito, a corrente de curto circuito sensibiliza o relé, que opera enviando um sinal para a abertura de um disjuntor. Com a abertura do disjuntor, o trecho defeituoso é desconectado do sistema. Neste caso o sistema continua a operar com a mesma configuração anterior, apenas desfalcado do trecho defeituoso.

[1] Atualmente são aplicados os relés digitais multifuncionais para proteger os componentes do Sistema Elétrico de Potência, é uma prática comumente utilizada levando em consideração o valor agregado a esses componentes. Os relés fornecem não apenas uma função de proteção, mas uma gama de funções, essas funções são numeradas segundo a ANSI/IEC: Sobrecorrente Instantânea (50), Sobrecorrente Temporizada (51), Proteção Diferencial (87), etc.

Devido à complexidade da lógica de proteção é preciso ser feito um estudo do sistema no qual o relé será inserido, sendo necessário um engenheiro para realizar o comissionamento correto de cada função.

Para o presente trabalho é usado o *software* DIGSILENT, o qual ao longo dos últimos anos, tem sido muito procurado por empresas e pessoas de todo o mundo, pelo fato de fornecer

uma ferramenta de análise do sistema elétrico altamente flexível e aplicável a praticamente todas as áreas de produção, transmissão, distribuição e indústria de energia elétrica.

O Presente trabalho tem como objetivo de aplicar a teoria da proteção de sobrecorrente e proteção diferencial em alguns elementos do sistema-teste, onde serão realizados os cálculos teóricos, para dimensionar os TCs que serão utilizados, encontrar a corrente de atuação e o tempo dos relés utilizados no sistema teste.

Assim o *software* em questão é usado para auxiliar no estudo de proteção, aonde são inseridos os dados de parametrização dos relés e simulado os eventos de curto circuito afim de testar a funcionalidade do sistema de proteção dimensionado no sistema teste.

II. PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE E SOBRECORRENTE DIFERENCIAL

Como o transformador de potência é o elemento de maior responsabilidade dentre os demais empregados numa subestação, sendo de fundamental importância um estudo pormenorizado sobre as proteções que devem ser utilizadas para manter a sua integridade e permanência em operação. As proteções que precisam ser aplicadas num transformador dependem da sua capacidade nominal e da importância da carga que ele alimenta. [3]

Na maioria dos casos é implementado a proteção de sobrecorrente, não só para proteção de transformadores mais para a proteção do sistema como um todo. A proteção de sobrecorrente não é o suficiente para a proteção de um transformador, pois como sabemos, os transformadores podem sofrer problemas internos, como por exemplo um curto-circuito em seus enrolamentos.

Assim, para que a proteção do transformador seja feita de maneira correta e eficaz são usadas as proteções de sobrecorrente e sobrecorrente diferencial, onde a proteção de sobrecorrente irá proteger o transformador de um curto-circuito oriundo do sistema onde ele se encontra e a proteção de sobrecorrente diferencial protegerá o transformador de um curto-circuito existente dentro da sua zona de proteção.

Quando ocorre um curto-circuito no sistema e a corrente de curto-circuito atinge um valor igual ou superior a corrente de ajuste de sobrecorrente (50/51), o relé atua e envia um sinal para a abertura do disjuntor, isolando a seção em falta do sistema de potência.

Para um curto-circuito dentro da zona de proteção da função 87, por exemplo, um curto-circuito nas bobinas do transformador, a função de sobrecorrente diferencial (87) é responsável por enviar o sinal para a abertura do disjuntor, desligando o transformador do sistema para reduzir os danos causados pela corrente de curto-circuito.

Outro equipamento que é utilizado no Sistema Elétrico de Potência é o banco de capacitor, que é composto por diversos capacitores, que são equipamentos que injetam potência reativa capacitiva nos Sistemas Elétricos onde são instalados, reduzindo perdas, elevando o nível de tensão e evitando, no caso de instalações comerciais e industriais, que os consumidores sejam penalizados com o pagamento de adicionais por excesso de potência e consumo de energia reativa. [3]

A proteção de maior confiabilidade para banco de capacitores é realizada por relés de sobrecorrente digitais. Podem ser utilizados em vários esquemas, dependendo do tipo de proteção que se deseja.

Em geral, as falhas que ocorrem no barramento do banco de capacitores têm origem no movimento de pequenos animais sobre partes vivas do sistema. Pássaros também podem provocar falhas no barramento. Para essas condições, normalmente utiliza-se a função de sobrecorrente temporizada (51) nas curvas de temporização normalmente inversa ou muito inversa. [3]

Devido à possibilidade de saída intempestiva do banco de capacitores por causa de suas correntes subtransitórias de energização, não é aconselhada a utilização da função de sobrecorrente instantânea (50). [3]

A atuação do relé deve ser coordenada de maneira a evitar disparos indevidos, disparos esses que podem ser causados pela corrente de magnetização dos transformadores, correntes subtransitórias dos bancos de capacitores, corrente de partida de motores e entre outros. As equações utilizadas para os cálculos de ajustes das funções (50), (51) e (87) dos relés, assim como os critérios para dimensionamento dos transformadores de corrente (TCs) e os estudos de coordenação serão demonstrados a seguir.

A. Dimensionamento dos TCs

Como os níveis de corrente em um sistema elétrico de potência são elevados, é necessário o uso de um transformador de corrente (TC) o qual reproduzirá suas correntes do primário (SEP) em seu circuito secundário onde será feita a ligação do relé.

Existem duas convenções para a corrente no circuito secundário do TC, o padrão Europeu que a corrente secundária é normalizada em 1A e o padrão Americano o qual é utilizado no Brasil onde a corrente secundária é normalizada em 5A.

Os transformadores de corrente devem ser especificados de acordo com a carga que será ligado no seu secundário, dessa forma a NBR 6856 [4] estabelece as correntes primárias admissíveis nos transformadores de corrente.

Para dimensionar o TC, que será usado no sistema deve-se encontrar a corrente em regime permanente e a máxima corrente que poderá circular por seus enrolamentos, essa corrente máxima, será a corrente de curto-circuito do sistema, encontrando essas duas correntes conseguimos definir qual será o modelo do TC a ser utilizado no sistema.

Para encontrar a corrente nominal do sistema utilizamos a equação (1):

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} * V} \quad (1)$$

Onde:

S – Potência Aparente.

V – Tensão Nominal.

Para encontrar a corrente de curto-circuito primária do transformador de corrente utilizamos a equação (2):

$$I_{tc} = \frac{I_{cc}}{FS} \quad (2)$$

Onde:

I_{CC} – Corrente de Curto-Circuito.

FS – Fator de Sobrecarga do TC, o valor adotado foi de 20, conforme a norma IEC.

Deve ser feito o cálculo levando em consideração a maior corrente de curto-circuito, sendo a corrente de curto-circuito trifásica ou monofásica.

Descobrimos o valor das duas correntes consegue-se definir qual modelo de transformador de corrente devemos utilizar. Conhecendo a corrente do secundário do TC e estimando a corrente que vai circular no primário do TC, consegue-se encontrar a relação de transformação (RTC) através da equação (3), a qual será muito importante para fazer os cálculos de pick-up da função (51) do relé.

$$RTC = \frac{I_P}{5} \quad (3)$$

Onde:

RTC – Relação de Transformação do Transformador de Corrente.

B. Ajuste da corrente de atuação para a função 51 temporizada de Fase.

Segundo [3] os ajustes da unidade de sobrecorrente temporizada devem satisfazer as seguintes condições:

1. O relé não deve operar para a condição de carga máxima admitida.

Na condição de operação, todo equipamento, em geral, pode ser carregado acima de sua capacidade nominal por alguns instantes, dependendo da sua condição inicial antes da sobrecarga.

A partir da condição requerida, seleciona-se a corrente de tape de acordo com a equação (4).

$$I_{utf} = \frac{K_f * I_c}{RTC} \quad (4)$$

Onde:

K_f – Valor da Sobrecarga Admissível, cujo Valor Deve Variar Entre 1,2 a 1,5, o valor adotado foi de 1,2.

I_c – Corrente Nominal do Equipamento ou Corrente do Circuito a Ser Protegido.

2. O relé deve operar de acordo com a curva de temporização para o múltiplo da corrente ajustada.

A determinação do tempo de ajuste do relé é função do plano de coordenação previsto.

No entanto, deve-se manter uma diferença mínima de 0,4s entre os tempos de operação de dois relés funcionando em cascata. Esse tempo é resultado das seguintes premissas:

- Tempo próprio de operação do disjuntor: $\cong 0,13s$.
- Tolerância do fabricante do disjuntor: $\cong 0,10s$.
- Tempo de Segurança do Projeto: $\cong 0,17s$.

A escolha da curva de atuação do relé é feita com base no múltiplo da corrente de acionamento, de acordo com a equação (5) e no tempo requerido para o disparo do disjuntor.

$$M = \frac{I_m}{RTC + I_{utf}} \quad (5)$$

Onde:

I_m – Corrente Máxima Admitida no Circuito, que pode ser uma corrente de sobrecarga ou de curto-circuito.

3. A corrente de acionamento deve ser, no máximo, igual à corrente térmica do transformador.
4. O relé deve operar para a menor corrente de curto-circuito do trecho protegido pelo disjuntor.

De forma geral, a unidade de sobrecorrente de um relé de fase opera de acordo com o valor eficaz da corrente que chega aos seus terminais de entrada, ocorrendo a partida ou arranque quando o valor da corrente medida supera 1,05 vez o valor da corrente ajustado e voltando ao estado normal a 1 vez o seu valor. Sendo ativado a partida do relé, ocorrendo a habilitação da função de temporização por meio de um contador de tempo, que realiza a integração dos valores medidos, determinando o tempo de atuação da proteção.

Se durante o período da contagem da temporização o valor eficaz da corrente se reduzir a um valor inferior ao valor definido no ajuste da partida, o relé retorna a sua posição inicial.

A temporização da unidade pode ser obtida através das curvas características tempo x corrente e também pode ser obtida pelas equações características de cada curva, aonde temos os seguintes tipos de curvas: normalmente inversa, muito inversa, extremamente inversa, inversa longa, inversa curta, I x T e I² x T. [3]

Neste trabalho usaremos a curva muito inversa, a temporização será calculada usando a equação (6).

$$T = \frac{13,5}{\left(\frac{I_{ma}}{I_s}\right) - 1} * T_{ms} \quad (6)$$

Onde:

I_{ma} – Sobrecorrente Máxima Admitida.

I_s – Corrente de Acionamento.

T_{ms} – Multiplicador de Tempo, conhecido também como dial de tempo.

C. Ajuste da corrente de atuação para a função 51 temporizada de neutro.

De acordo com [1] e [3] o relé de sobrecorrente de neutro monitora toda a corrente do sistema elétrico que escoou pela terra. Portanto, o relé de neutro só é sensível às correntes de sequência zero.

No sistema de distribuição, por exemplo, os curtos-circuitos monofásicos a terra são, em uma grande maioria, de pequenas intensidades, e a utilização do relé de sequência zero nos religadores, produz uma grande melhoria na qualidade desta proteção.

Na operação normal dos sistemas elétricos aterrados as cargas estão equilibradas ou levemente desequilibrada, portanto, não passa corrente ou apenas uma leve corrente atravessa o relé de neutro. Deste modo, a corrente de ajuste do relé de neutro é obtida através da equação (7).

$$I_{utn} = \frac{K_n * I_c}{RTC} \quad (7)$$

Onde:

K_n – Valor da Corrente de Desequilíbrio do Sistema, cujo valor deve variar entre 0,1 e 0,3, representa a taxa de desequilíbrio máximo admitida nos condutores de fase.

D. Ajuste da corrente de atuação para a função 50 instantânea de fase.

O relé instantâneo como o próprio nome já diz, atua instantaneamente para qualquer corrente maior que a sua corrente de ajuste.

Os relés instantâneos na verdade não têm a sua atuação instantânea, como sabemos mesmo os relés digitais precisam de um tempo para fazer o processamento de seus algoritmos e também existe o tempo de atuação do disjuntor.

Em geral, a unidade instantânea de fase opera a partir de dois diferentes critérios:

- Valor eficaz da corrente
O relé atua quando o valor eficaz da corrente é superior a 5% do valor da corrente ajustada.
- Valor da corrente de pico

O relé atua quando a diferença entre os valores medidos é superior a 2,1 vezes o valor de pico correspondente ao valor eficaz ajustado. [3]

Além disso o tempo de atuação também vai depender do projeto, tipo e fabricação do relé.

Sabendo disso, para que não haja sobreposição de zona de atuação, deve-se realizar o critério de uso da unidade 50 satisfazendo a inequação (8) e para que não haja disparos indevidos referente à corrente de *Inrush* do transformador, deve-se satisfazer a inequação (9).

$$I_{cc} > I_{Ajuste\ do\ Relé} \quad (8)$$

$$I_{Ajuste\ do\ Relé} > 8 * I_n \quad (9)$$

E. Ajuste da função 87 diferenciais de sobrecorrente.

A proteção diferencial de um transformador de potência deve estar associada a uma proteção de sobrecorrente alimentada, de preferência, por transformadores de corrente independentes. No presente trabalho vão ser dimensionados dois TCs, um para o lado de alta tensão e um para o lado de baixa tensão, assim delimitando a zona de proteção diferencial.

A proteção diferencial no transformador trifásico efetua-se fase a fase. Pode-se adotar qualquer ligação Triângulo ou Estrela nos secundários dos TCs da proteção diferencial.

Entretanto, o mais utilizado é a ligação em Estrela quando os transformadores de potência não produzem rotação angular nas suas correntes de entrada e saída. [3]

Cuidados devem ser tomados quando se tem transformadores conectados em Delta – Estrela, que será a conexão usada nos transformadores do presente trabalho, deve-se ter cuidado porque às correntes de linha do lado da ligação em delta estão adiantadas ou atrasadas de 30°, 60°, 120°, 150° e 180° em relação às correntes de linhas no lado da ligação em estrela.

As correntes estão adiantadas ou atrasadas dependendo da forma de ligação dos enrolamentos do lado ligado em delta do transformador de potência.

Para mitigar os erros causados com as defasagens da corrente, os TCs deveram ser dimensionados e conectados de modo que suas ligações no secundário compensem as relações de transformações diferentes e os deslocamentos angulares, de modo que no relé cheguem correntes elétricas em fase. [3]

Para atender estas condições, segue-se a regra:

- Os secundários dos TCs deverão estar conectados em Estrela no lado Delta do transformador de potência.
- Os secundários dos TCs deverão estar conectados em Delta no lado Estrela do transformador de potência.

Para dimensionar o TC do lado de alta e baixa devemos levar em consideração os mesmos parâmetros usados no dimensionamento da função (50/51) de sobrecorrente, onde devemos encontrar a corrente nominal do sistema e a maior corrente de curto-circuito que circulará no sistema. A corrente que circulará pelo TC que será conectado no lado Delta do transformador deve ser corrigida conforme a equação (10).

$$I_{Delta} = \sqrt{3} * I_{ns} \quad (10)$$

Onde:

I_{Delta} – Nova corrente do lado delta do transformador.

I_{ns} – Corrente do lado delta do transformador.

Feito essa correção da corrente consegue-se encontrar a relação de transformação dos dois TCs que serão utilizados. Após encontrar os RTC deve-se calcular a corrente que circulará no secundário dos transformadores de corrente, para encontrar essa corrente é usada a equação (11).

$$I_s = \frac{I_{tc}}{RTC} \quad (11)$$

Onde:

I_{tc} – Corrente que circulará no primário do TC.

Encontrando a corrente que circulará no secundário do TC do lado de baixa e de alta tensão, deve-se calcular o erro percentual na relação de transformação, conforme a equação (12).

$$\Delta I = \frac{I_s - I_p}{I_p} * 100 \quad (12)$$

Onde:

I_s – Corrente que circula no secundário do TC do lado de baixa tensão.

I_p – Corrente que circula no secundário do TC do lado de alta tensão.

Para calcular o ajuste da declividade percentual precisa-se encontrar o valor médio da corrente que circula pela bobina de retenção do rele e o valor da corrente diferencial, calcula-se a corrente media usando a equação (13).

$$I_m = \frac{I_p + I_s}{2} \quad (13)$$

Onde:

I_p – Corrente que circula no secundário do transformador de corrente ligado no lado primário do transformador de potência.

I_s – Corrente que circula no secundário do transformador de corrente ligado no lado secundário do transformador de potência.

Para encontrar o valor da corrente diferencial usa-se a equação (14).

$$I_d = I_s - I_p$$

Com os valores da corrente média e a corrente diferencial, será obtido o valor do ajuste da declividade percentual, usando a equação (15).

$$A_d = \frac{\Delta I_d}{I_m} * 100$$

Com isso foi possível apontar todos os elementos para parametrizar o relé de sobrecorrente diferencial.

III. METODOLOGIA UTILIZADA

A metodologia utilizada neste trabalho foi dividida em três etapas. Inicialmente deve ser realizada a coleta dos dados necessários no *software* para que seja possível realizar os cálculos teóricos. A próxima etapa deve-se realizar os cálculos teóricos para dimensionamento dos transformadores de correntes e o ajuste dos relés utilizados no sistema de potência. Posteriormente o mesmo sistema é analisado no *software*.

O sistema de potência elétrico que será analisado é uma parte de um sistema composto por diversas barras e pode ser visto na Figura 1. No sistema são inseridos os relés que serão utilizados e os transformadores de corrente. Com o resultado dos cálculos teóricos são definidos os tapes dos TCs e feito a parametrização das funções dos relés. Após isso, é realizado a simulação das faltas.

Os resultados obtidos com os cálculos teóricos e a simulação são comparados para validar os tempos de atuação dos relés.

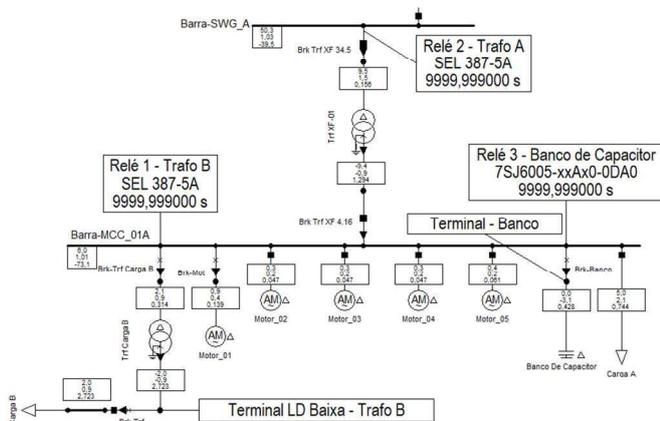


Fig. 1. Sistema de potência elétrico.

A. Software utilizado

DigSILENT PowerFactory é um *software* utilizado na análise de Sistemas Elétricos de Potência e sistemas industriais. Ele possui uma interface computacional gráfica que permite a

construção de sistemas elétricos em diagramas unifilares, um de seus diferenciais são as simulações em transitórios eletromagnéticos que permite fazer a análise da funcionalidade dos relés. Para o presente trabalho, foram utilizadas as ferramentas de curto-circuito, ferramentas para estudos de proteção e simulações estática. [5]

B. Parametrização e simulações

Na 1ª etapa, tem-se a realização dos cálculos teóricos que serão utilizados para dimensionar os TCs e os ajustes dos relés.

Primeiramente, são coletadas as correntes de curto-circuito do sistema teste com o auxílio da ferramenta de curto-circuito do *software*. Após, são dimensionados os TCs, com base nas equações (1), (2) e (11). Posteriormente, as correntes de ajuste dos relés de sobrecorrente são calculadas utilizando as equações (3), (4), (5), (6), (8) e (9), e os parâmetros de ajuste do relé diferencial são calculadas usando as equações (10), (11), (12) e (13).

Após os cálculos teóricos, foi realizado a Etapa 2 aonde utilizamos o *DigSILENT* para simulação do sistema-teste. A Figura 2 apresenta um fluxograma com o procedimento realizado no programa.

Inicialmente, foi definido um sistema para realizar os testes no *software*. Após isso, foram parametrizados os TCs e o relés.

Posteriormente, foi realizado o teste em cada um dos relés, para verificar a existência de erros nos cálculos de ajuste dos relés. Com os testes realizados e todos os relés funcionando da devida maneira, foi analisados as curvas dos relés para observar a seletividade entre eles. A seguir foram realizadas as simulações, simulando faltas em pontos diferentes do sistema-teste para observar a funcionalidade de cada um dos relés e a seletividade entre eles.



Fig. 2. Fluxograma Etapa 2.

C. Simulações

A fim de conferir a metodologia utilizada foram simulados eventos de curto-circuito em três pontos do sistema-teste, o primeiro ponto foi inserido para testar a funcionalidade do relé 1, que é responsável pela proteção de sobrecorrente e diferencial. Na Figura 3 é mostrado o local do curto-circuito e a zona da proteção diferencial.

O segundo ponto foi inserido para testar a funcionalidade do relé 3 o qual é responsável pela proteção de sobrecorrente do banco de capacitores, onde pode ser observado pela Figura 4. O terceiro ponto foi para testar a funcionalidade do relé 2 o qual é responsável pela proteção de sobrecorrente, mostrado na Figura 5, e será um relé de backup responsável por proteger o sistema caso os relés 1 e 3 venham a apresentar alguma falha.

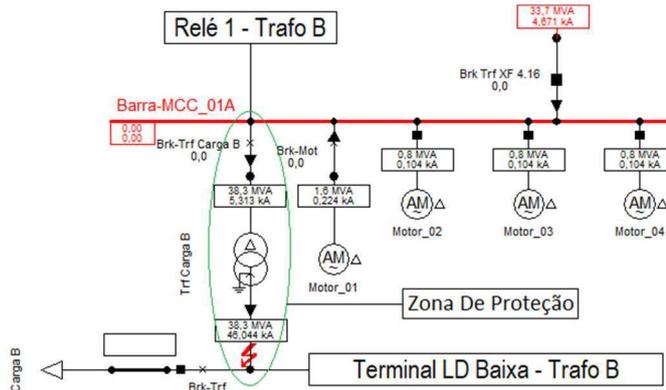


Fig. 3. Local do Curto-Circuito – 1º Teste.

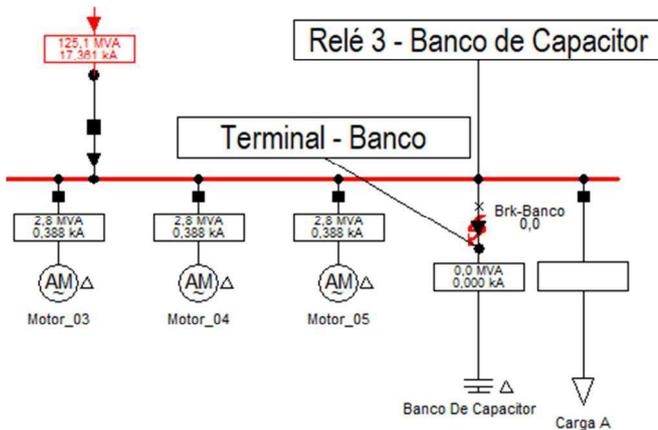


Fig. 4. Local do Curto-Circuito – 2º Teste.

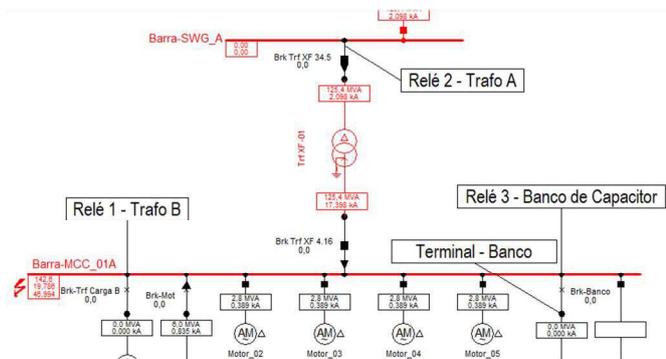


Fig. 5. Local do Curto-Circuito – 3º Teste.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 1 foi apresentado o sistema de potência utilizado nos testes comparativos, esse sistema que foi utilizado para análise e uma pequena parte de um sistema composto por inúmeras barras. A parte escolhida do sistema é composta por três barras (SWG_A, MCC_01A e CARGA B), seis terminais (Banco, LD Alta – Trafo B, LD Baixa – Trafo B, LD Alta – Trafo A, LD Baixa – Trafo A, Motor 01), dois transformadores (Trf XF-01 e Trf Carga B), duas cargas (A e B), cinco motores de indução (01-05) e um banco de capacitor. Os dados nominais do sistema são apresentados no Apêndice A.

Para a validação da metodologia utilizada no presente trabalho (teoria e simulação) as comparações se referem no tempo de operação de cada um dos relés sendo para a função de sobrecorrente; para a função diferencial será comparado o tempo de operação escolhido no relé com o tempo de operação na simulação.

Para demonstrar os tempos de atuação de cada um dos relés na simulação, será demonstrado os oscilogramas que podem ser gerados pelo *software*, uma das principais ferramentas pelo qual o *software* foi escolhido para ser usado no presente trabalho.

A. Comparação dos tempos de operação dos relés para a função de sobrecorrente instantânea.

Na tabela I são apresentados os tempos de operação dos relés de sobrecorrente instantânea onde tem-se o tempo definido (T Definido) e o tempo de operação na simulação instantânea no DIGSILENT (T Simulação), para as faltas trifásicas demonstradas nas Figuras 3, 4 e 5.

TABELA I. TEMPOS DE OPERAÇÃO DA PROTEÇÃO (50)

Falta	Relé	T Definido (S)	T Simulado (S)
Terminal LD Baixa	R1	0,05	0,063845
Barra MCC	R2	0,08	0,094705
Terminal Banco	R3	0,02	0,020647

Observando o tempo definido e o tempo simulado é possível notar uma diferença, essa diferença existe devido a cada relé possuir seu próprio algoritmo para o tempo de operação da função 50. Como não temos acesso a esses algoritmos não é possível saber qual o tempo correto de cada um dos relés.

Nas Figuras 6, 8 e 10 são demonstrados os oscilogramas gerados pelo *software* onde está sendo monitorada a corrente secundária dos TCs que são usados pelos relés. Os oscilogramas são de extrema importância pois com eles o engenheiro consegue descobrir qual o tipo de distúrbio que afeta a operação do sistema, tais como um curto-circuito, corrente de *inrush*, qual o tipo de curto-circuito se é trifásico, bifásico ou monofásico.

As Figuras 7, 9 e 11 demonstram os dados que são gerados no console do *software* onde podemos ver o tempo de atuação dos relés e onde eles estão conectados.

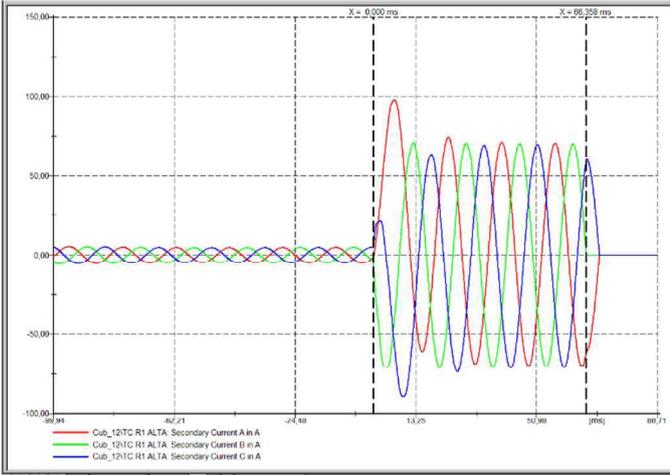


Fig. 6. Oscilograma do relé R1.

```
DigSI/info - (t=-100:000 ms) Initial conditions calculated.
DigSI/pcl - (t=000:000 ms) -----
DigSI/pcl - (t=000:000 ms) 'Mina - Planta/Terminal LD Baixa - Trafo B.ElmTerm':
DigSI/pcl - (t=000:000 ms) 3-Phase Short-Circuit.
DigSI/pcl - (t=000:000 ms) with Fault Impedance Rf = 0,000000 Ohm Xf = 0,000000 Ohm
DigSI/pcl - (t=063:845 ms) -----
DigSI/pcl - (t=063:845 ms) 'Mina - Planta/Barra-MCC_01A/Cub_12/Relé 1 - Trafo B.ElmRelay':
DigSI/pcl - (t=063:845 ms) Relay is tripping. 'Open' signal is sent to the connected breaker(s).
DigSI/pcl - (t=063:845 ms) -----
DigSI/pcl - (t=063:845 ms) 'Mina - Planta/Barra-MCC_01A/Cub_9/Relé 3 - Banco de Capacitor.ElmRelay':
DigSI/pcl - (t=020:647 ms) Relay is tripping. 'Open' signal is sent to the connected breaker(s).
DigSI/pcl - (t=020:647 ms) -----
DigSI/pcl - (t=020:647 ms) 'Mina - Planta/Brk-Banco.ElmCoup':
DigSI/pcl - (t=020:647 ms) Circuit-Breaker Action: 'Open' - 'All Phases'.
DigSI/info - (t=063:847 ms) Element '@ CH-01' is local reference in separated area of 'CH_13.2kV'
DigSI/wrng - (t=063:847 ms) 1 area(s) are unsupplied.
DigSI/info - (t=063:847 ms) Grid split into 2 isolated areas
DigSI/info - (t=063:847 ms) Element '@ CH-01' is reference in 60,0 Hz-system
DigSI/info - (t=066:499 ms) Element '@ CH-01' is local reference in separated area of 'CH_13.2kV'
```

Fig. 7. Tempo de atuação do relé R1.

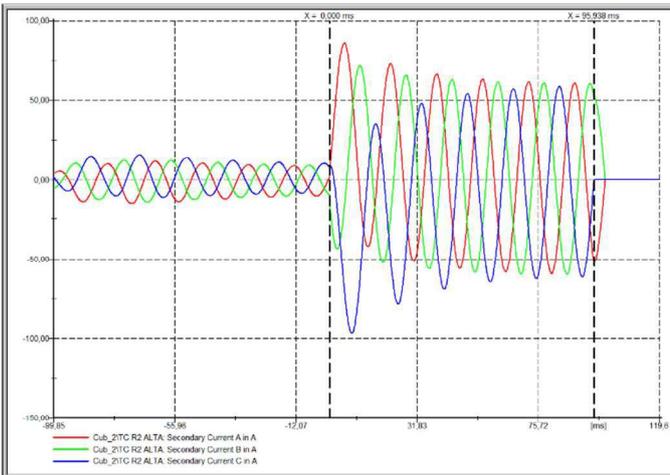


Fig. 8. Oscilograma do relé R2.

```
DigSI/info - (t=-100:000 ms) Initial conditions calculated.
DigSI/pcl - (t=000:000 ms) -----
DigSI/pcl - (t=000:000 ms) 'Mina - Planta/Barra-MCC_01A.ElmTerm':
DigSI/pcl - (t=000:000 ms) 3-Phase Short-Circuit.
DigSI/pcl - (t=000:000 ms) with Fault Impedance Rf = 0,000000 Ohm Xf = 0,000000 Ohm
DigSI/pcl - (t=094:705 ms) -----
DigSI/pcl - (t=094:705 ms) 'Mina - Planta/Barra-SWG_A/Cub_2/Relé 2 - Trafo A.ElmRelay':
DigSI/pcl - (t=094:705 ms) Relay is tripping. 'Open' signal is sent to the connected breaker(s).
DigSI/pcl - (t=094:705 ms) -----
DigSI/pcl - (t=094:705 ms) 'Mina - Planta/Brk Trf XF 34.5.ElmCoup':
DigSI/pcl - (t=094:705 ms) Circuit-Breaker Action: 'Open' - 'All Phases'.
DigSI/info - (t=095:938 ms) Element '@ CH-01' is local reference in separated area of 'CH_13.2kV'
DigSI/info - (t=095:938 ms) Element '@ CH-01' is reference in 60,0 Hz-system
```

Fig. 9. Tempo de atuação do relé R2.

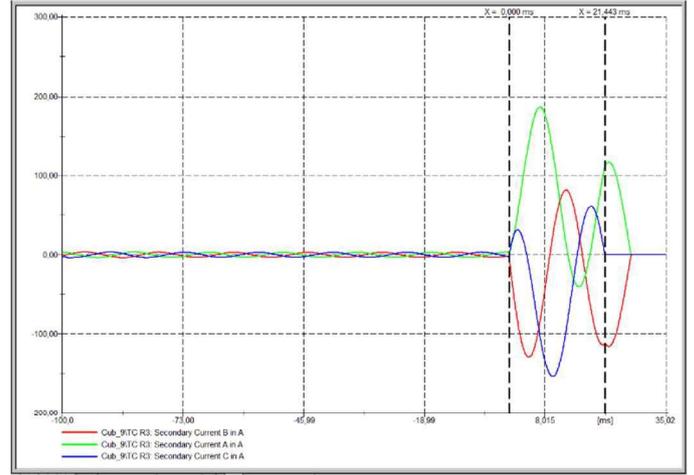


Fig. 10. Oscilograma do relé R3.

```
DigSI/info - (t=-100:000 ms) Initial conditions calculated.
DigSI/pcl - (t=000:000 ms) -----
DigSI/pcl - (t=000:000 ms) 'Mina - Planta/Terminal - Banco.ElmTerm':
DigSI/pcl - (t=000:000 ms) 3-Phase Short-Circuit.
DigSI/pcl - (t=000:000 ms) with Fault Impedance Rf = 0,000000 Ohm Xf = 0,000000 Ohm
DigSI/pcl - (t=020:647 ms) -----
DigSI/pcl - (t=020:647 ms) 'Mina - Planta/Barra-MCC_01A/Cub_9/Relé 3 - Banco de Capacitor.ElmRelay':
DigSI/pcl - (t=020:647 ms) Relay is tripping. 'Open' signal is sent to the connected breaker(s).
DigSI/pcl - (t=020:647 ms) -----
DigSI/pcl - (t=020:647 ms) 'Mina - Planta/Brk-Banco.ElmCoup':
DigSI/pcl - (t=020:647 ms) Circuit-Breaker Action: 'Open' - 'All Phases'.
DigSI/info - (t=021:443 ms) Element '@ CH-01' is local reference in separated area of 'CH_13.2kV'
```

Fig. 11. Tempo de atuação do relé R3.

Para obter os oscilogramas utilizados no presente trabalho observar o Anexo A.

B. Comparação dos tempos de operação dos relés para a função de sobrecorrente temporizada.

Na tabela II são apresentados os tempos de operação dos relés de sobrecorrente temporizada onde tem-se o tempo calculado (T Calculado) e o tempo de operação na simulação instantânea no DigSILENT (T Simulado) para as faltas já mencionadas.

TABELA II. TEMPOS DE OPERAÇÃO DA PROTEÇÃO (51)

Falta	Relé	T Calculado (S)	T Simulado (S)
Terminal LD Baixa	R1	0,056802	0,081335
Barra MCC	R2	0,114330	0,148036
Terminal Banco	R3	0,014540	0,041317

Assim como na função 50, na função 51 também apresenta-se uma diferença de tempo de operação, mais nesse caso consegue-se provar que o tempo calculado está correto, já que o próprio software, fornece esse tempo de operação em uma de suas ferramentas. Na Figura 12 é demonstrado o tempo de operação do relé onde esse tempo é calculado pelo próprio software

Relays Tripping Times		DigSILENT PowerFactory 15.1.7	Project: 14/11/2022
Short-Circuit Calculation / Method : IEC 60909		3-Phase Short-Circuit / Max. Short-Circuit Currents	
Asynchronous Motors Always Considered	Grid Identification Automatic	Short-Circuit Duration Break Time	0,10 s
Decaying Aperiodic Component (Icd) Icing Method	Conductor Temperature Ican Defined	Fault Clearing Time (Ith)	1,00 s
		c-Voltage Factor Ican Defined	N/A
Grid: Mina - Planta System Stage: Mina - Planta Study Case: Study Case Annex: / 1			
Relay	Branch	Terminal / Station	Type
Relé 1 - Trafo B		Barra-MCC_01A/	SEL 387-SA
			0,056 s
Relé 3 - Banco de Ca (IEC: Ixt ANSI: S1)		Barra-MCC_01A/	7516005-xxA0-0DA0
			Currents: 0,000 sec.A
			0,00 pri.A 9999,999 s
Relé 2 - Trafo A		Barra-SWG_A /	SEL 387-SA
			0,598 s

Fig. 12. Tempo de operação relés.

Na Tabela III são apresentados os tempos de atuação do relé 2, inserido e usado como um relé de backup, caso o relé R1 ou R3 venha a falhar o relé R2 fica responsável por proteger o sistema.

TABELA III. TEMPOS DE OPERAÇÃO DO RELÉ 2 COMO RELÉ DE BACKUP

Falta	Relé	T Calculado (S)	T Simulado (S)
Terminal LD Baixa	R2	0,598822	0,549143
Terminal Banco	R2	0,114620	0,094687

Na Figura 12 pode ser observado o tempo de operação do relé R2 para a falta no Terminal LD Baixa, o tempo de operação coincide com o tempo que foi calculado.

As Figuras 13 e 14 demonstra a seletividade entre os relés. O relé R2 é responsável por proteger o sistema caso os relés R1 e R3 venham a falhar em algum momento.

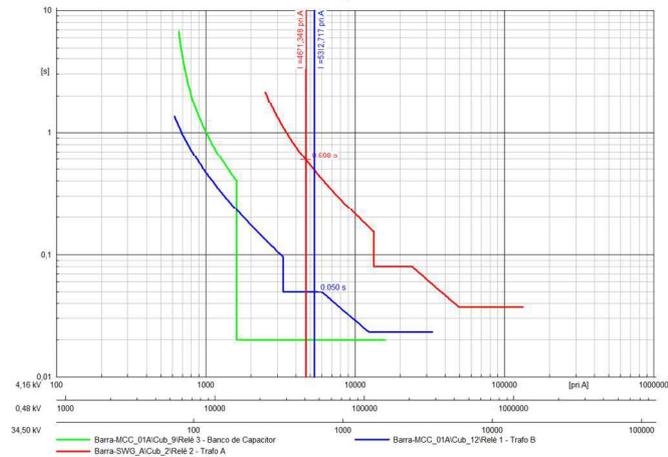


Fig. 13. Seletividade entre os relés R1 e R2.

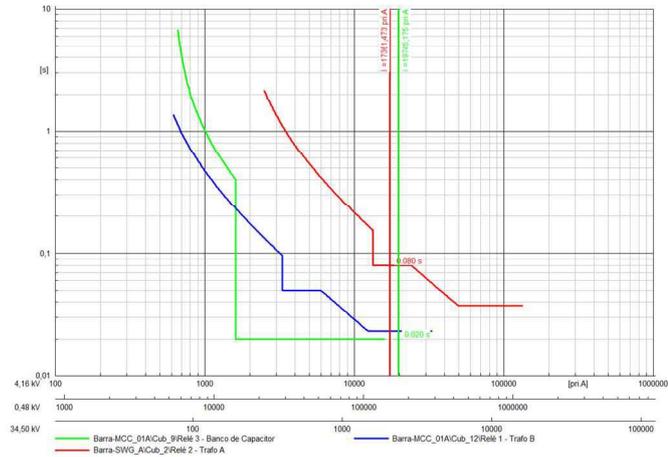


Fig. 14. Seletividade entre os relés R3 e R2.

C. Comparação do tempo de operação do relé para a função de sobrecorrente diferencial.

A Tabela IV demonstra o tempo de operação do relé de sobrecorrente diferencial onde tem-se o tempo definido (T Definido) e o tempo simulado (T Simulado).

TABELA IV. TEMPO DE OPERAÇÃO DA PROTEÇÃO (87)

Falta	Relé	T Definido (S)	T Simulado (S)
Terminal LD Baixa	R1	0,015	0,014735

Assim como na função 50 o tempo de operação do relé diferencial é definido nas parametrizações do relé, ou seja, não é possível fazer um cálculo para encontrar esse tempo, o tempo definido foi o mínimo permitido pelo relé, como pode ser observado na tabela o tempo de atuação do relé na simulação foi um pouco menor do que o tempo definido. Na Figura 15 é demonstrado o tempo de operação definido no relé, a Figura 16 mostra o tempo de atuação do relé durante a simulação, e a Figura 16 demonstra a corrente que está sendo analisada pelo relé onde também é possível observar o tempo de atuação o relé.

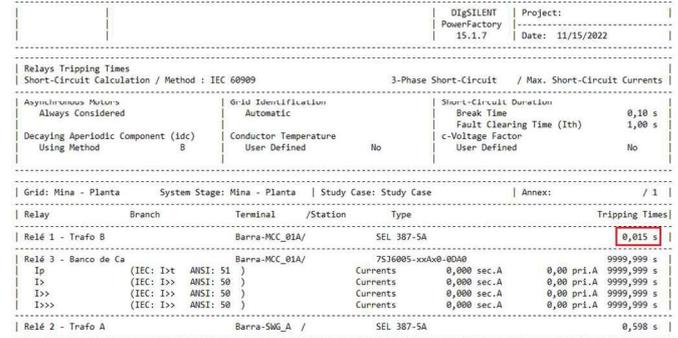


Fig. 15. Tempo de operação do relé diferencial.

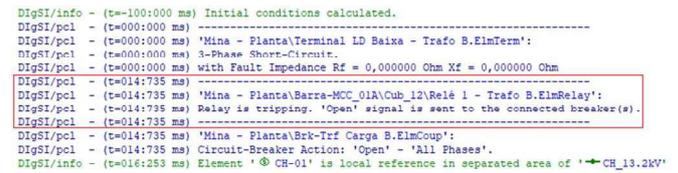


Fig. 16. Tempo de atuação do relé diferencial.

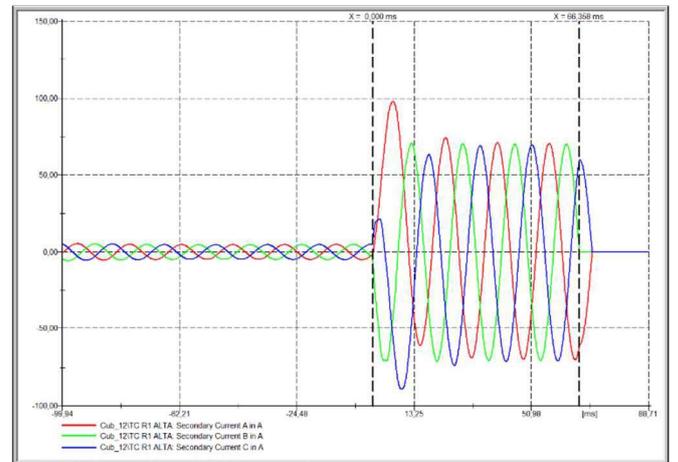


Fig. 17. Oscilograma do relé diferencial.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado a metodologia utilizada para o ajuste e coordenação do sistema de proteção de um SEP e para o comissionamento de relés digitais. A partir de um sistema teste onde foi implementado os relés digitais e ajustados conforme a teoria mencionada no trabalho. Foram realizadas simulações para testar as proteções no DigSILENT, a fim de validar os resultados teóricos oriundos das equações de ajustes dos relés.

Para a validação dos dados foram apresentados oscilogramas e dados obtidos por meio do console do software para demonstrar o tempo de operação dos relés.

O *software* também disponibiliza um gráfico onde são demonstradas as curvas dos relés do sistema para demonstrar a seletividade entre eles, onde podemos comprovar a seletividade entre os relés do sistema observando as Figuras 13 e 14.

Ao desenvolver o presente trabalho foi possível ter uma noção da capacidade do DIgSILENT PowerFactory, onde foi possível demonstrar a importância do *software* para auxiliar em estudos de proteção de sistema elétricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Kindermann, Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, 3ª ed., vol. 1, Florianópolis: Editora UFSC, 2012.
- [2] G. Kindermann, Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, 2ª ed., vol. 2, Florianópolis: Editora UFSC, 2005.
- [3] J. Mamede Filho e D. Ribeiro Mamede, Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- [4] ABNT NBR 6856, Transformador de corrente – Especificação e ensaios, 2ª ed., 2015.
- [5] DIgSILENT PowerFactory Version 15.0 BETA, User Manual, 1st Ed, Gomaringen/Germany: DIgSILENT GmbH, November, 2012.
- [6] American National Standards Institute ANSI C 57.13, “Guide for Field Testing of Relaying Current Transformers”, 1993.
- [7] L. Cristina Fenalte, Procedimentos Para Comissionamento de Relés de Sobrecorrente. 2018. 153 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, 2018.
- [8] International Electrotechnical Commission IEC 60255-151 Ed. 1.0, “Measuring relays and protection equipment”, 2009.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Dados nominais do sistema-teste da figura 1.

Os Transformadores possuem ligação delta-estrela aterrado:

- Trf XF-01 = 34,5/4,16 kV; 10MVA; $X_0 = X_1 = X_2 = 0,5\text{pu}$;
- Trf Carga B = 4,16/0,48kV; 2,5MVA; $X_0 = X_1 = X_2 = 0,5\text{pu}$;

Os Motores utilizados possuem ligação em delta e possui as seguintes características:

- Motor 01 = 1200HP; 4,16kV; Fator de Potência = 0,91; Rendimento = 0,97.
- Motor 02 = 600HP; 4,16kV; Fator de Potência = 0,84; Rendimento = 0,97.
- Motor 03 = 600HP; 4,16kV; Fator de Potência = 0,84; Rendimento = 0,97.
- Motor 04 = 600HP; 4,16kV; Fator de Potência = 0,84; Rendimento = 0,97.
- Motor 05 = 600HP; 4,16kV; Fator de Potência = 0,84; Rendimento = 0,97.

As Cargas:

- Carga A = 5MVA; Fator de Potência = 0,92 indutivo.
- Carga B = 2MVA; Fator de Potência = 0,92 indutivo.

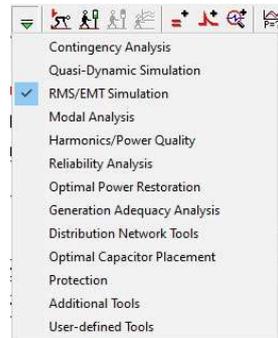
O Banco de capacitor possui ligação em delta: 4,16kV; 3Mvar.

ANEXO

ANEXO A – Como fazer simulações no sistema de transitórios eletromagnéticos (EMT) no DigSILENT PowerFactory.

1. Passo

Na barra de ferramentas procurar pelo seguinte ícone  nomeado de “Change Toolbox”. Após clicar no “Change Toolbox” irá aparecer as seguintes opções:

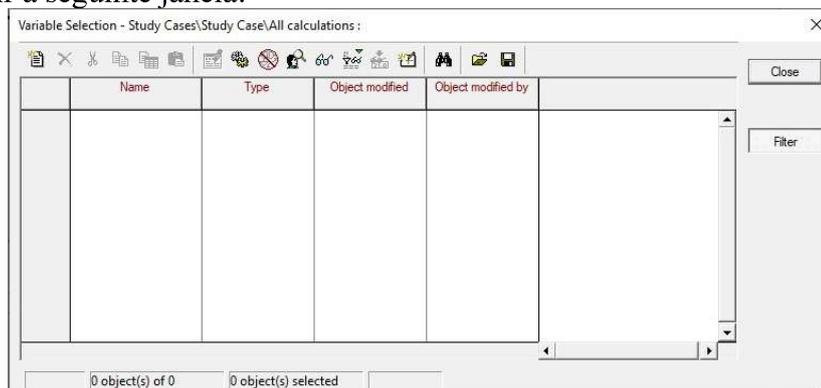


Selecionar a opção de RMS/EMT Simulation.

2. Passo

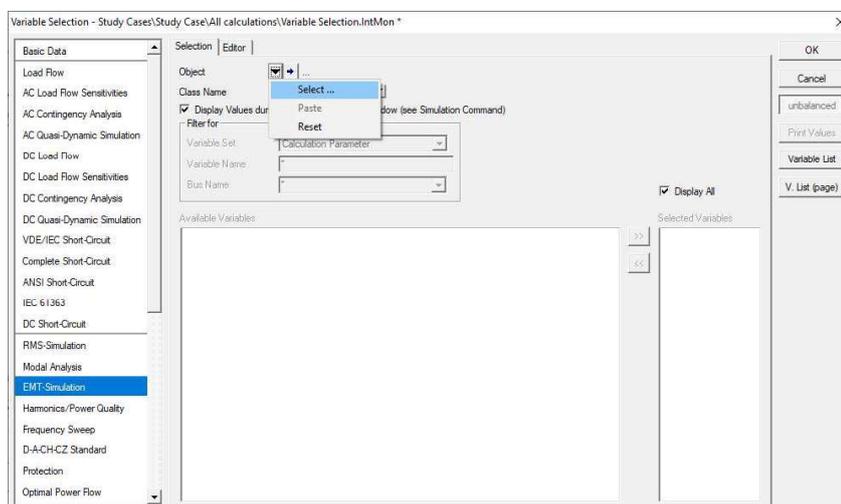
O Próximo passo agora é selecionar o objeto aonde deseja fazer o monitoramento.

Para isso vamos procurar pelo ícone  nomeado de “Edit Result Variables”, clicando nele irá abrir a seguinte janela:

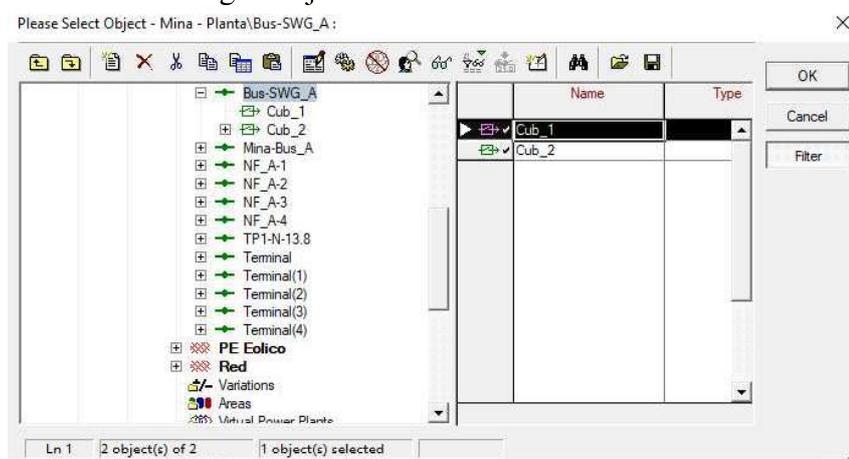


3. Passo

Clicando no ícone  nomeado de “New Object” irá abri a seguinte janela:



Em “Basic Data” deve selecionar a opção “EMT-Simulation”, após selecionada ir em “Object” e clicar na Seta ▼ aonde abrirá uma janela conforme mostrada na imagem, clicar na opção “Select...” irá abrir a seguinte janela:

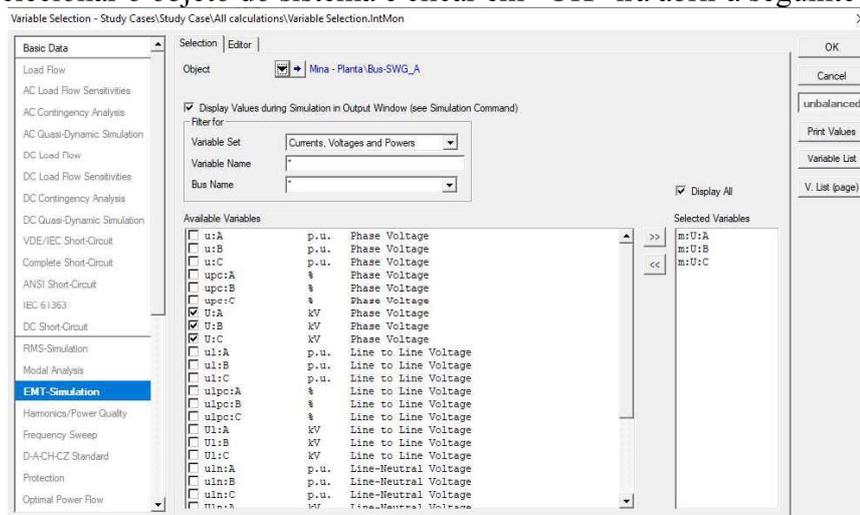


Nessa janela deve selecionar qual o objeto do seu sistema você quer monitorar.

Observação: da forma que está na imagem o objeto selecionado será o elemento Barra-SWG_A (Bus-SWG_A).

4. Passo

Após selecionar o objeto do sistema e clicar em “OK” irá abrir a seguinte janela:

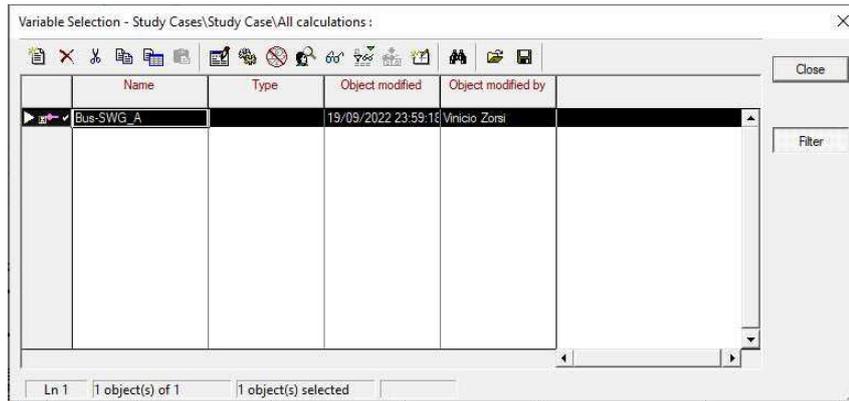


Em “Variable Set” escolhe-se quais variáveis vão ser monitorada.

Em “Bus Name” seleciona as fases do sistema, como pode ser observado na imagem, quando estiver selecionado “*” vão aparecer as variáveis das 3 fases do sistema.

Observando as variáveis que estão sendo mostrada na parte de “Available Variables” nota-se que estão presentes as variáveis de Tensão, Corrente e Potencia das três fases, fase A, fase B e fase C.

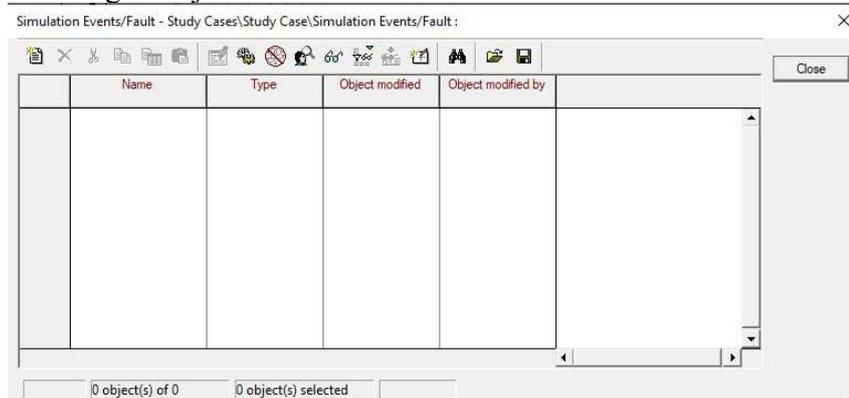
Após escolher as variáveis desejadas em “Available Variables” eles deverem aparecer em “Selected Variables”, feito isso é só clicar em “OK” e irá aparecer a seguinte tela:



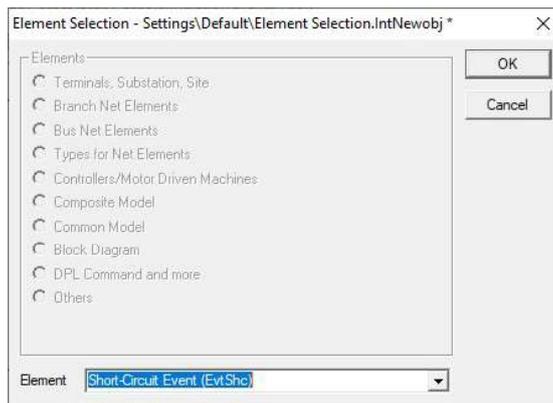
5. Passo

O Próximo passo agora é criar um evento no sistema, como exemplo irei criar um evento de curto circuito.

Na barra de ferramentas procure o ícone  nomeado de “Edit Simulation Events” ao clicar nele abrirá a seguinte janela:

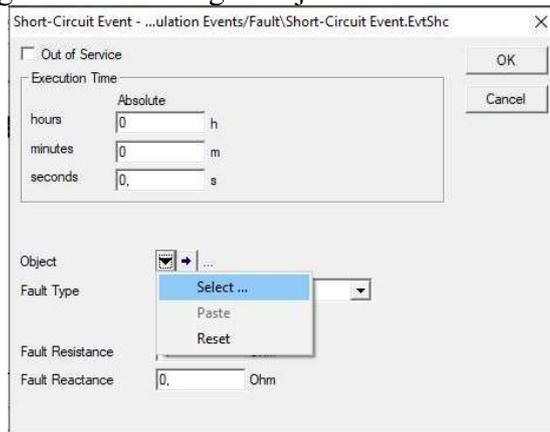


Clicando no ícone  nomeado de “New Object” irá abri a seguinte janela:



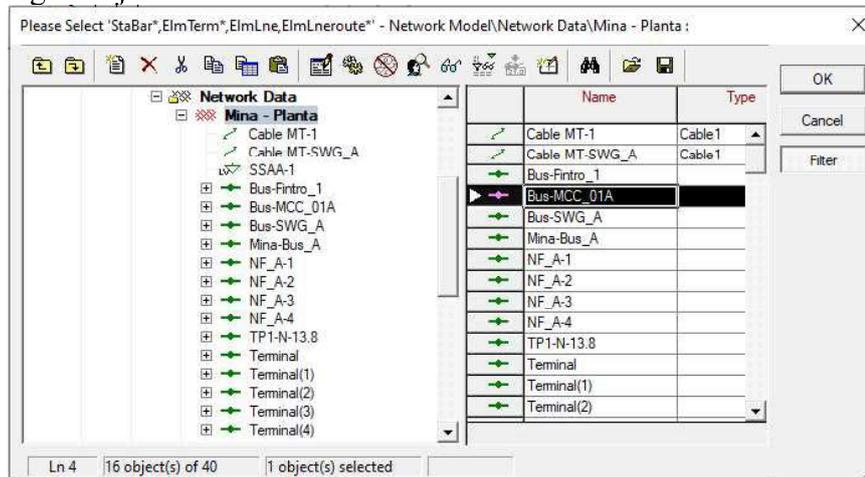
Em “Element” deve escolher o evento desejado para a simulação, nesse exemplo vamos escolher o evento de curto circuito “Short-Circuit Events (EvtShc), feito a escolha do evento e só clicar em “OK”.

Em Seguida abrirá a seguinte janela:

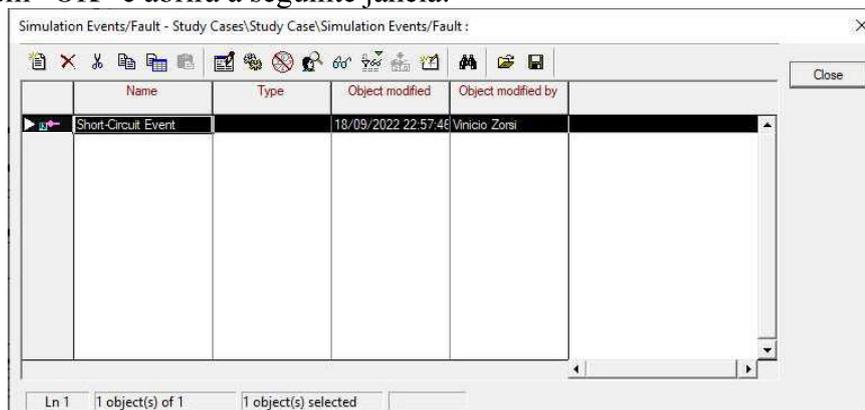


Em “Execution Time” deve-se definir o tempo em que ocorrerá o evento definido.

Para definir o local do evento você deve ir em “Object” e clicar na seta ▼ aonde irá abrir a seguinte opção “Select...” como pode ser observado na imagem, clicando na opção “Select” irá abrir a seguinte janela:



Aonde você deverá escolher o local do evento no seu sistema, após a escolha do evento deverá clicar em “OK” e abrirá a seguinte janela:

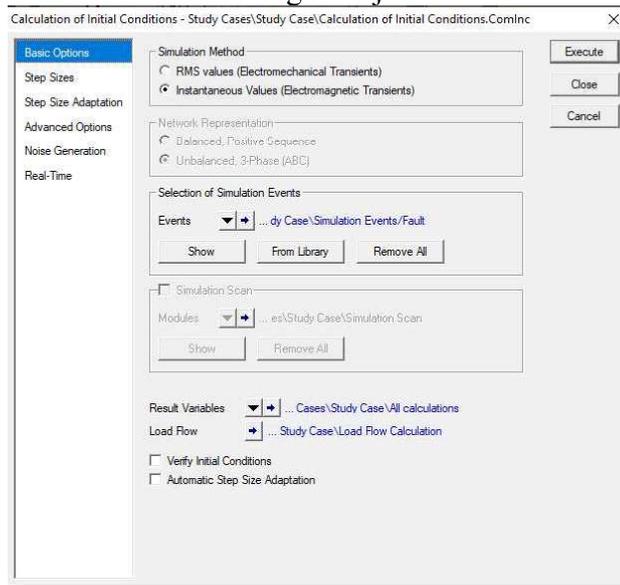


Aonde demonstrará os eventos criado no seu sistema.

6. Passo

Na barra de ferramentas procurar pelo ícone  nomeado de “Calculate Initial Conditions”.

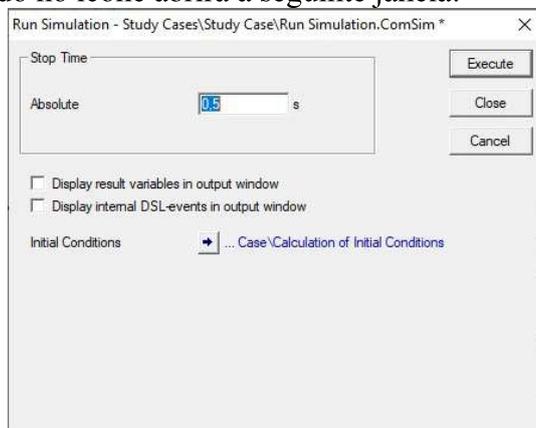
Clicando no ícone abrirá a seguinte janela:



Como pode ser observado na imagem em “Simulation Method” deve ser marcada a segunda opção “Instantaneous Values (Electromagnetic Transients)”. Feito isso e só clicar em “Execute”.

7. Passo

Na barra de ferramentas procurar pelo ícone  nomeado de “Start Simulation”. Clicando no ícone abrirá a seguinte janela:

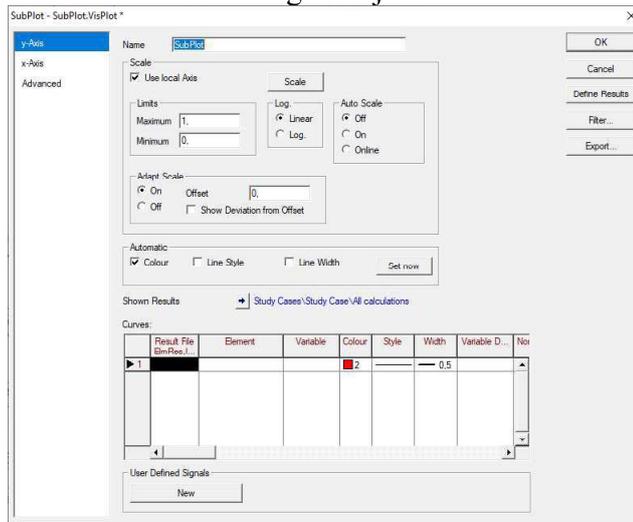


Aonde deverá ser definido o tempo da simulação, após colocar o tempo desejado e só clicar em “Execute” para iniciar a simulação.

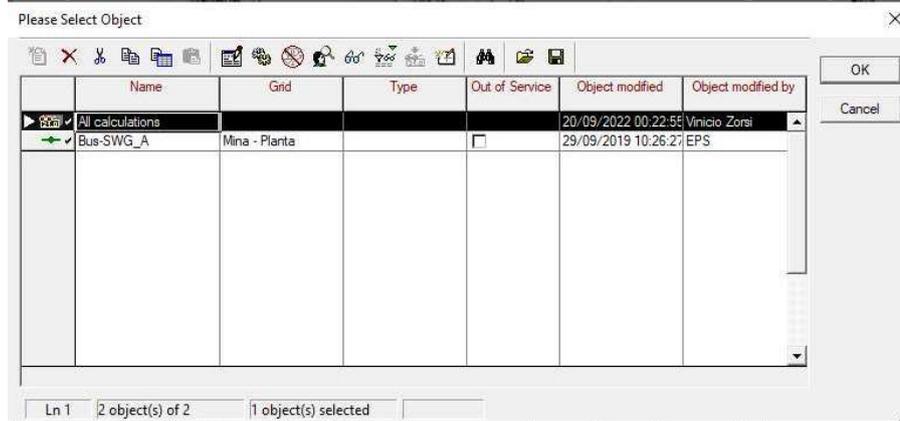
8. Passo

Após o termino da simulação para fazer a plotagem do gráfico deverá procurar na barra de ferramentas pelo ícone  nomeado de “Create Simulation Plot”.

Clicando no ícone abrirá a seguinte janela:



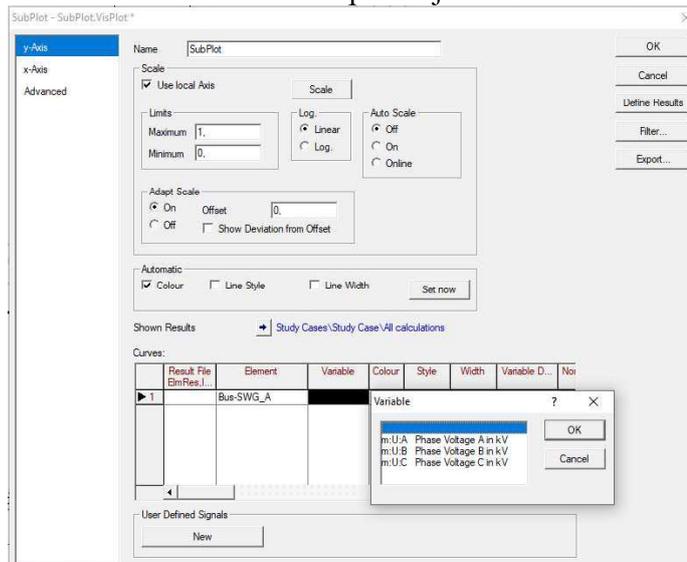
Nessa nova janela deverá clicar em “Element”, aonde abrirá a seguinte janela:



Agora deverá selecionar o objeto que foi escolhido para a análise.

Nesse exemplo estamos analisando a Barra-SWG_A.

Após clicar em “OK” voltaremos para a janela anterior:



Como pode ser observado o Elemento Bus-SWG_A está selecionado.

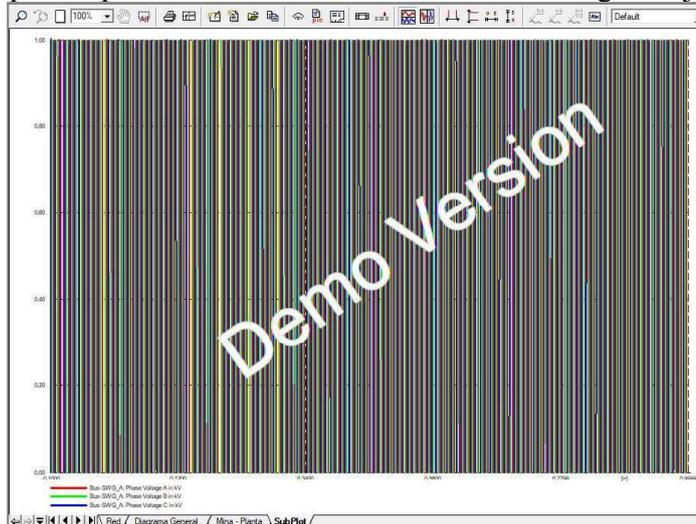
Clicando em “Variable” irá abrir a janela como mostrado na imagem, aonde mostra as variáveis que foram escolhidas para a análise.

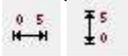
Pode ser selecionado somente uma variável por vez ou pode selecionar todas de uma só vez.

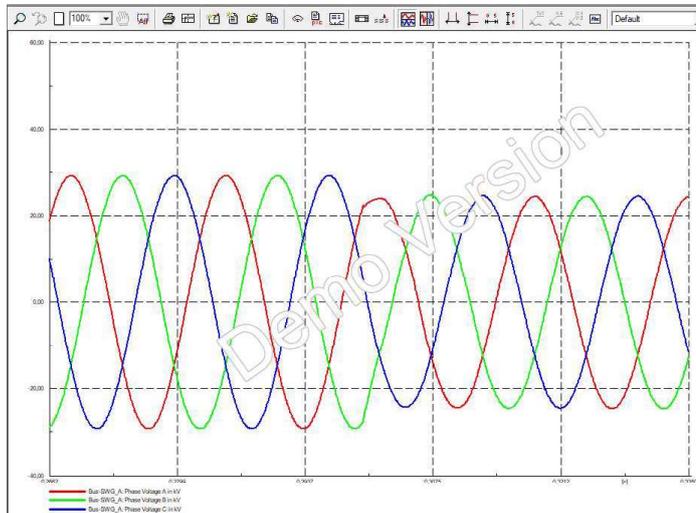
Para selecionar mais de uma variável em uma única vez, basta segurar apertada a tecla “Shift” e apertar a setinha do teclado para baixo, assim selecionando duas ou mais variáveis. Após selecionadas as variáveis desejadas, clicar em “OK”, e na janela principal “OK” novamente.

9. Passo

Assim que for pressionado a tecla “OK” irá abrir a seguinte janela:



Para fazer com que as ondas senoidais possam ser vistas visivelmente deve-se clicar nos seguintes ícones , após esse comando o gráfico ficará da seguinte forma:



Nesse gráfico temos a plotagem das três ondas senoidais referente a tensão na barra que estava sendo analisada.

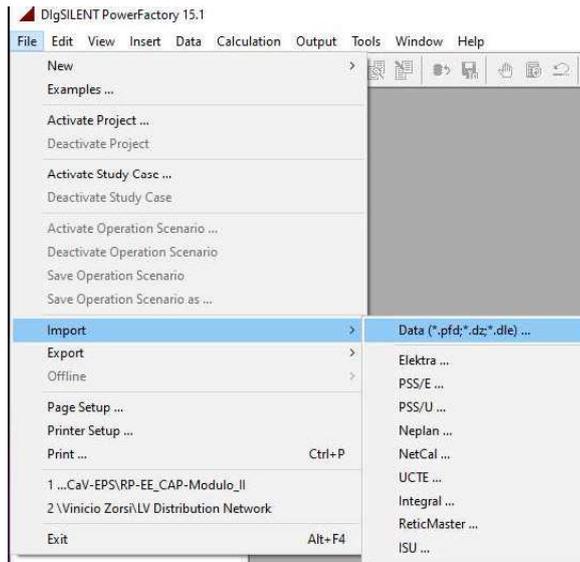
ANEXO B – Como fazer a importação de relés para o DIgSILENT PowerFactory.

Para que a importação possa ser feita não poderá ter projeto ativo no programa, caso tenha algum projeto ativo basta desativa-lo ou abrir o programa novamente.

Feito isso podemos dar início na importação.

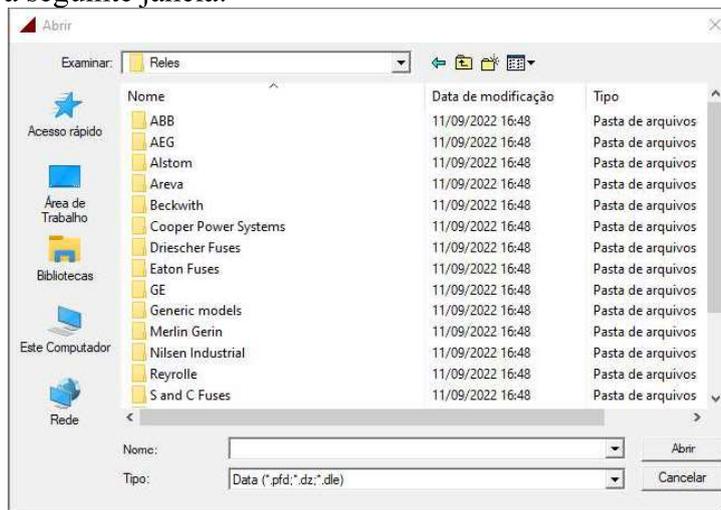
1. Passo

Na Barra de ferramentas do programa vamos ir em “File” e procurar por “Import” e depois ir em “Data” e dar um clique.

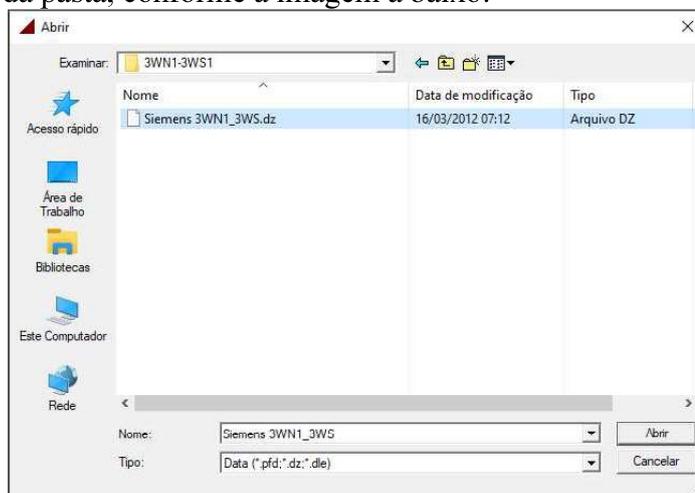


2. Passo

Abrirá a seguinte janela:



Você deve localizar aonde estão os arquivos da biblioteca de relés, localizando a pasta você deve escolher a marca e o modelo do relé escolhido, feito isso devese selecionar o arquivo dentro da pasta, conforme a imagem a baixo:



Selecionado o arquivo, vamos clicar em “Abrir”.

3. Passo

Em seguida abrirá a seguinte janela:



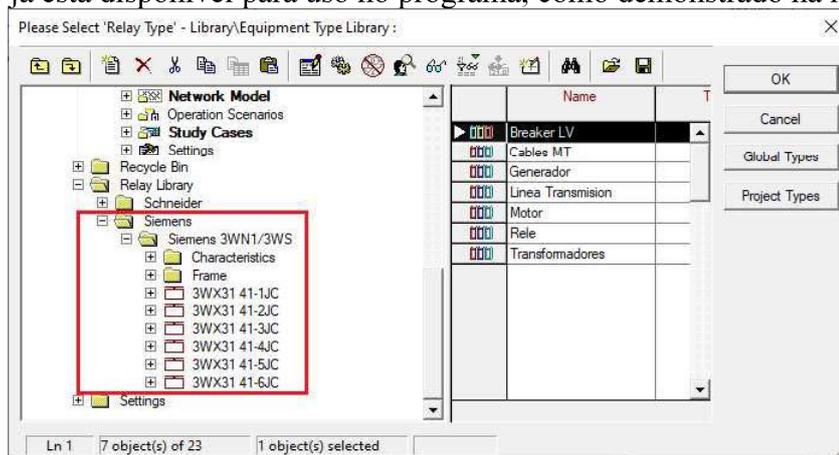
Agora vamos dar “OK”, e em seguida aparecer a seguinte mensagem no console do programa:

```
DlgSI/info - The import file contains references to the following objects, which are not found in DB and not stored in this file:
'\Inicio Zorsi\Relay Library\Siemens'
DlgSI/info - The following top-level folders have been imported:
. \Inicio Zorsi\Relay Library\Siemens\Siemens 3WN1/3WS
```

4. Passo

Pronto!

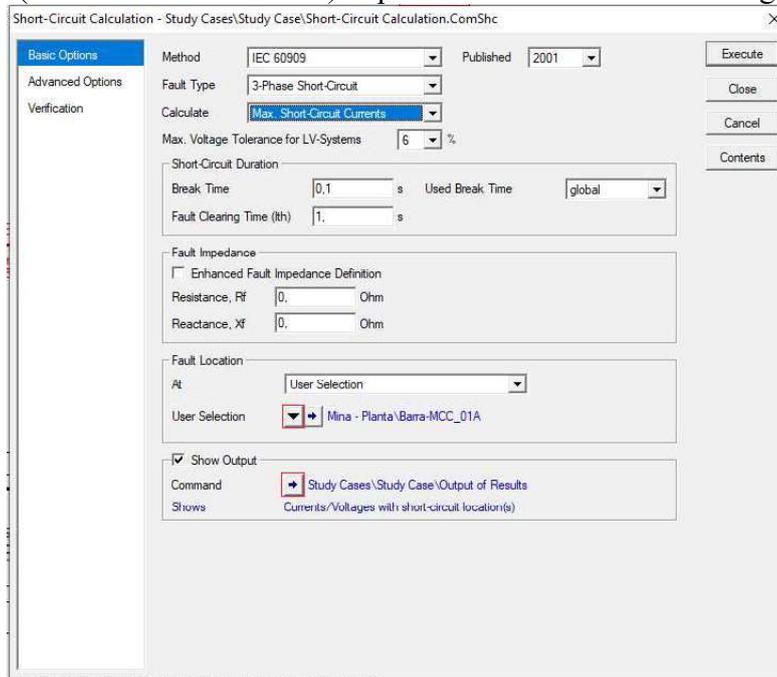
O Relé já está disponível para uso no programa, como demonstrado na imagem.



ANEXO C – Como calcular a corrente de curto-circuito no DIgSILENT PowerFactory.

1. Passo

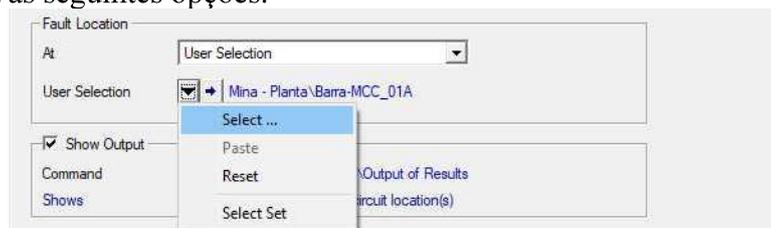
Procurar na barra de ferramentas do programa pelo ícone  nomeado de cálculo de curto-circuito (Calculate Short-Circuit). Após clicar no ícone abrirá a seguinte janela.



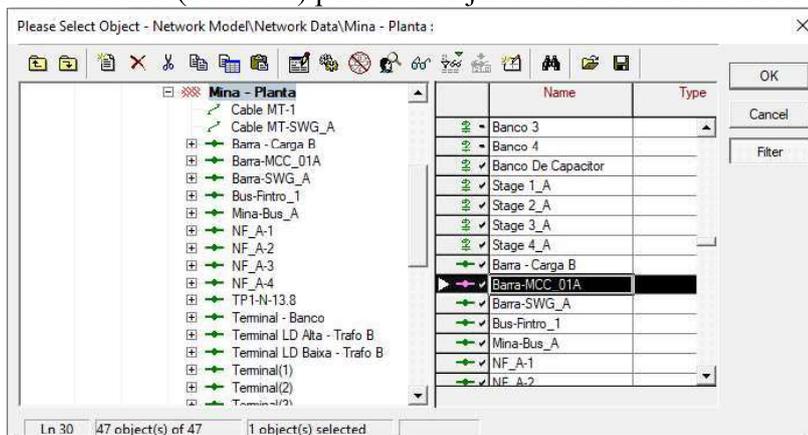
Nessa janela você pode definir o método (Method) do cálculo da corrente de curto-circuito, tipo da falta (Fault Type), cálculo de máxima ou mínima corrente de curto-circuito (Calculate), duração do curto-circuito (Short-Circuit Duration) e impedância de falta (Fault Impedance).

2. Passo

Após definir as parametrizações desejadas você deve indicar o local da falta, ou seja, o local do curto-circuito. Em Local da Falta (Fault Location) você deve clicar no ícone destacado aonde surgira as seguintes opções.



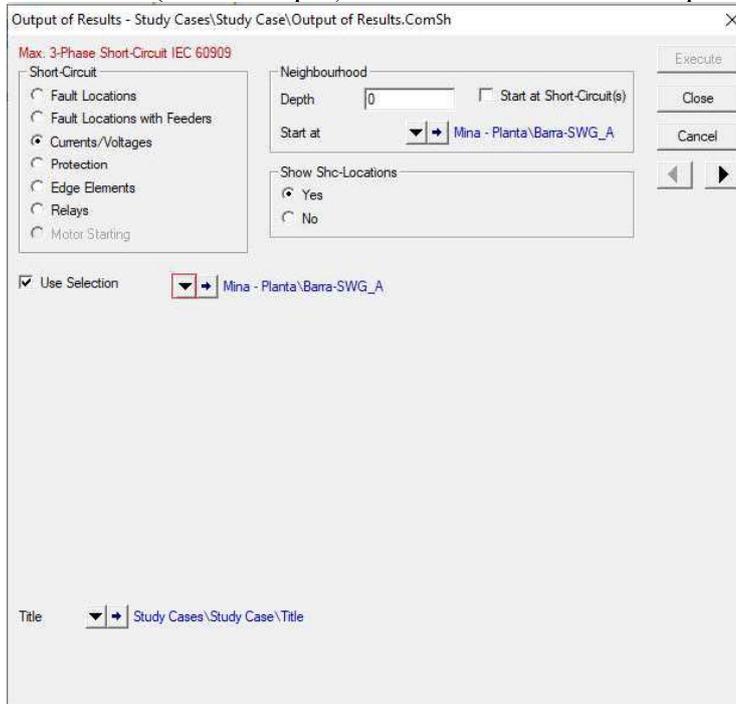
Clicar em Seleccione (Select ...) para abrir a janela aonde mostra todos os elementos do sistema.



No lado direito da janela temos a lista dos elementos do sistema aonde deve ser feito a escolha do local do curto-circuito, após selecionar o local desejado como demonstra na imagem e só clicar em OK.

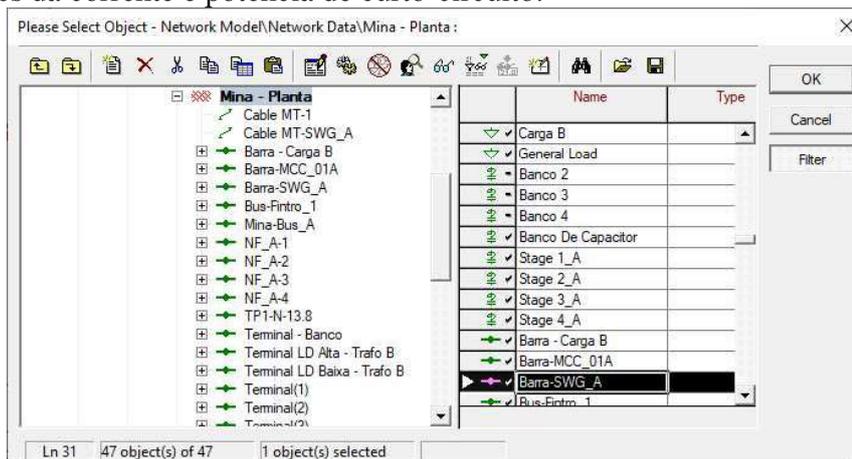
3. Passo

Em Mostrar Saida (Show Output) clicar no ícone destacado para abrir a seguinte janela.



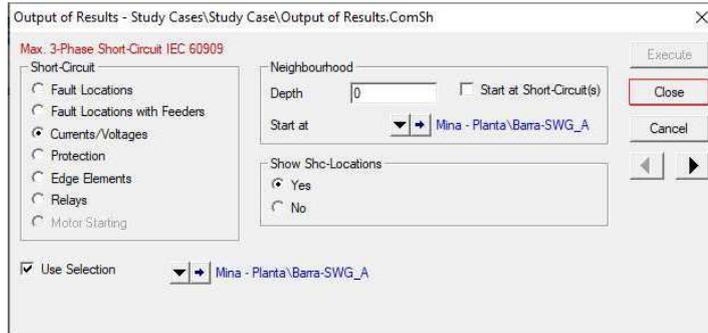
Em Curto-Circuito (Short-Circuit) deve-se selecionar alguma das opções, como exemplo usaremos a opção de corrente/voltagens (Currents/Voltages) aonde o sistema irá fornecer a corrente e a potência de curto-circuito.

Em seguida você deve clicar no ícone destacado para selecionar o local aonde deseja obter os valores da corrente e potência de curto-circuito.



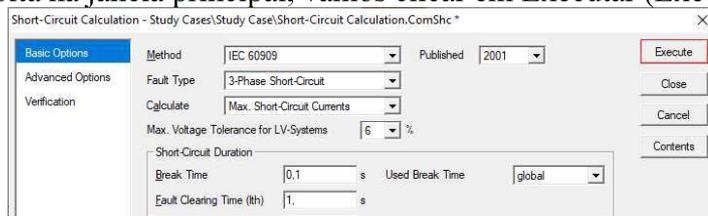
Da mesma maneira que foi feito para selecionar o local do curto-circuito, deve ser feito para definir o local aonde deseja obter os dados. Como exemplo vamos usar a Barra-SWG_A, após selecionar clicar em OK.

Feito as definições é só clicar em Close.



4. Passo

De volta na janela principal, vamos clicar em Executar (Execute).



Em seguida a corrente e a potência de curto-circuito e demonstrada no console do programa.

```

D:\DigSI\info - Short-circuit calculated at Terminal Mina - Planta\Barra-MCC_01A
D:\DigSI\info - Short-circuit calculation successfully executed!
-----
|                                     | DigSILENT | Project: | |
|                                     | PowerFactory | 15.1.7 | Date: 11/29/2022 |
|                                     |-----|-----|
| Currents/Voltages with short-circuit location(s) |
| Short-Circuit Calculation / Method : IEC 60909 | 3-Phase Short-Circuit / Max. Short-Circuit Currents | | |
|---|---|---|---|
| Asynchronous Motors | Grid Identification | Short-Circuit Duration |
| Always Considered | Automatic | Break Time | 0,10 s |
| Decaying Aperiodic Component (idc) | Conductor Temperature | Fault Clearing Time (Ith) | 1,00 s |
| Using Method B | User Defined No | c-Voltage Factor | No |
|-----|-----|-----|
| Short Circuit Location | Voltages [kV] [deg] | Sk** [MVA] | Ikes [kA] [deg] |
|-----|-----|-----|
| Barra-MCC_01A | 0,00 0,00 | 142,567 | 19,786 -82,44 |
|-----|-----|-----|
| Grid: Mina - Planta | System Stage: Mina - Planta | Annex: / 2 |
|-----|-----|-----|
| rtd.V. | Voltages | Sk** | Currents |
| [kV] [kV] [deg] [MVA] [kA] [deg] |
|-----|-----|-----|
| Values at Observation Location |
|-----|-----|-----|
| Barra-SWG_A | 34,50 | 17,92 | 30,42 |
| Cub_1 /Lne | Cable MT-SWG_A | Terminal j | 125,356 | 2,098 | 127,82 |
| Cub_2 /Coup | Brk Trf XF 34.5 | Terminal j | 125,356 | 2,098 | -52,18 |
|-----|-----|-----|

```

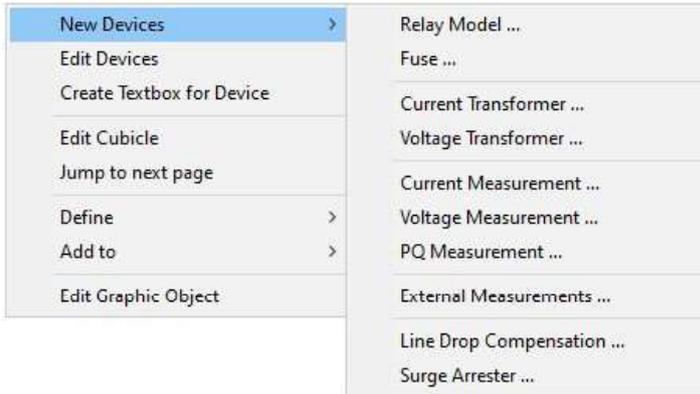
ANEXO D – Como inserir um transformador de corrente, transformador de potência, relé, etc. no DIGSILENT PowerFactory.

Para inserir um relé, fusível, medidor de tensão, corrente e potência considera até o passo 3.

O Passo 4 é utilizado somente para mudar as configurações dos transformadores de corrente e potência.

1. Passo

Deve-se escolher o local aonde deseja inserir o dispositivo, clicar com o botão esquerdo do mouse e selecionar a opção de novos dispositivos (New Devices).



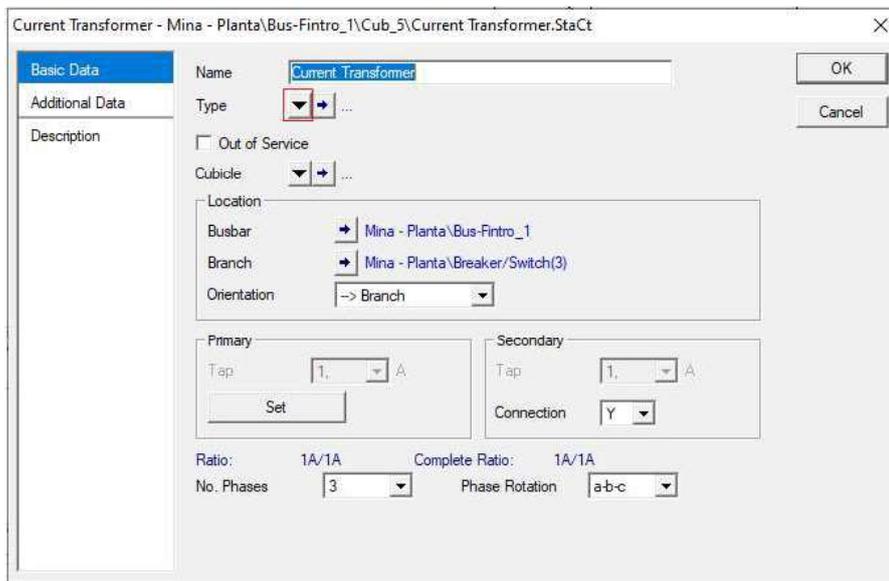
Em seguida selecionar qual o dispositivo deseja inserir no sistema.

2. Passo

O dispositivo utilizado para o exemplo será um transformador de corrente, para os dispositivos diferente seguir a mesma lógica do exemplo.

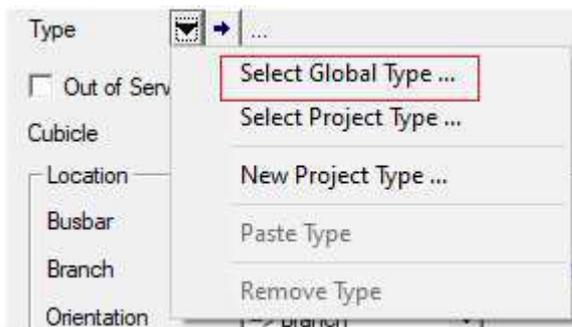
Após selecionar a opção de transformador de corrente (Current Transformer...).

Abrirá a seguinte janela



Nessa janela você deve inserir o nome do dispositivo (Name), e escolher qual o Tipo (Type) dispositivo.

Para definir o tipo do dispositivo deve-se clicar no ícone destacado, após o clique aparecerá as seguintes opções.



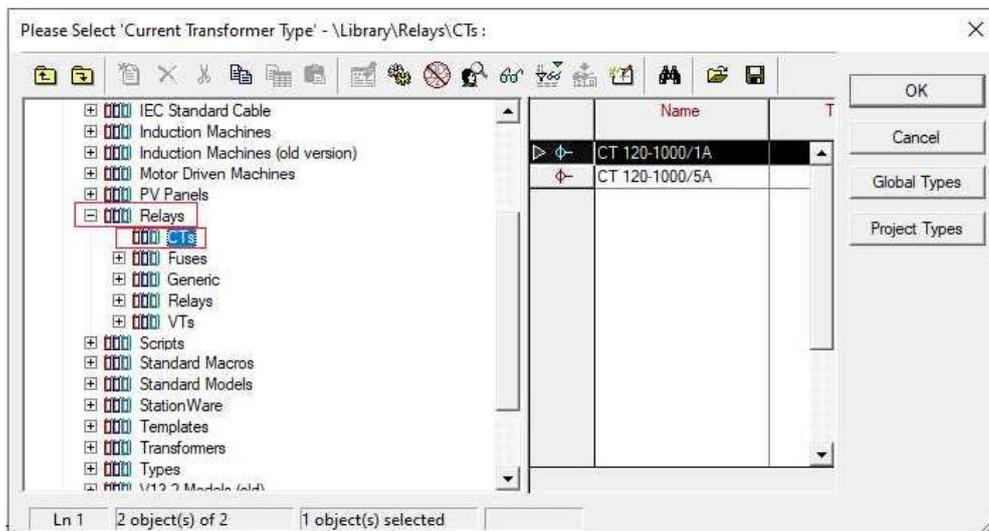
Em (Select Global Type ...) aparecera tipos do dispositivo fornecido pelo programa, ou seja, dispositivo que já vem incluso na biblioteca do próprio programa.

Em (Select Project Type ...) aparecera tipos do dispositivo que foram criados por você ou dispositivos importados no programa o qual é o caso de relés ou fusíveis aonde as fabricantes fornecem modelos de seus dispositivos feito no programa.

Em (Nem Project Type ...) você deve criar o seu próprio dispositivo.

Nesse exemplo usaremos um transformador de corrente disponível na biblioteca do programa, então selecionamos a primeira opção.

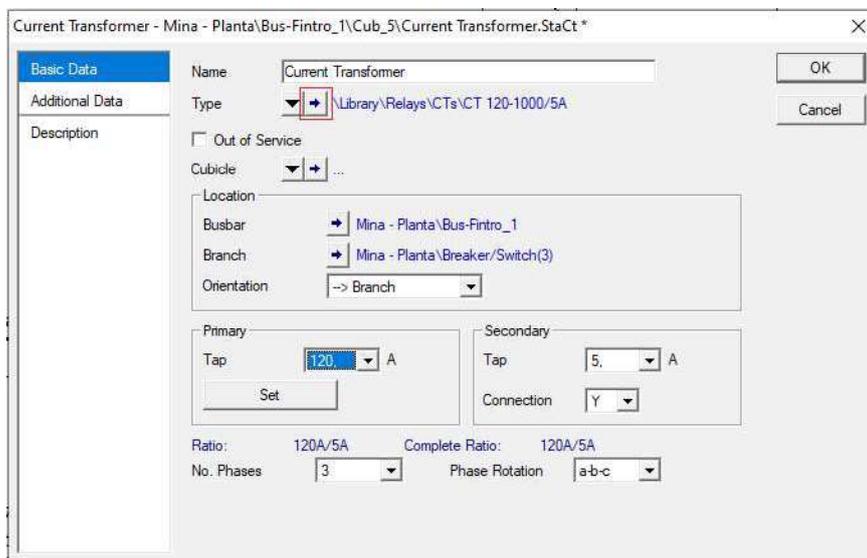
Após selecionar a opção destacada na imagem, abrirá a seguinte janela.



Procurar na lista de objetos a aba de relés (Relay), clicar nela e selecionar a opção de TCs (CTs), como pode ser observado existem dois tipos de TCs disponível na biblioteca do programa, para outros dispositivos devesse encontrar o qual deseja usar, selecionar o dispositivo e clicar em “OK”.

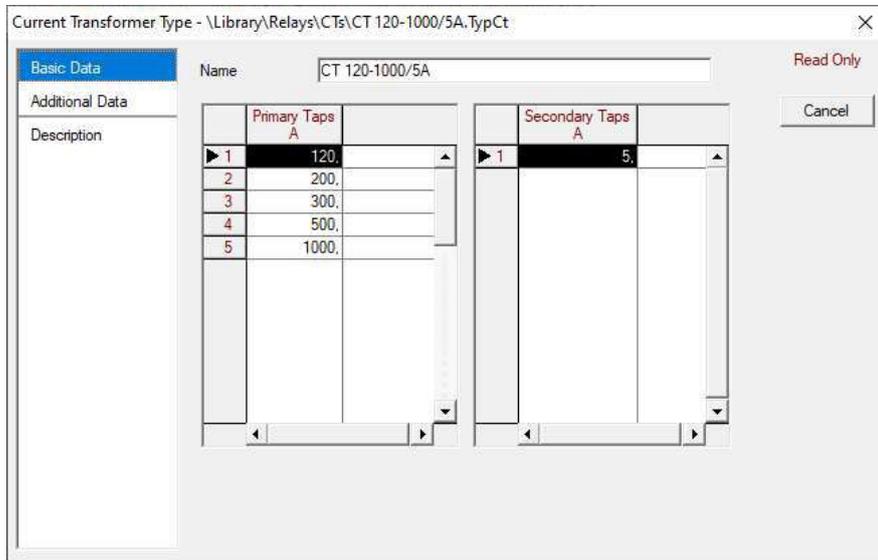
3. Passo

Após dar “OK” você voltara para seguinte janela.

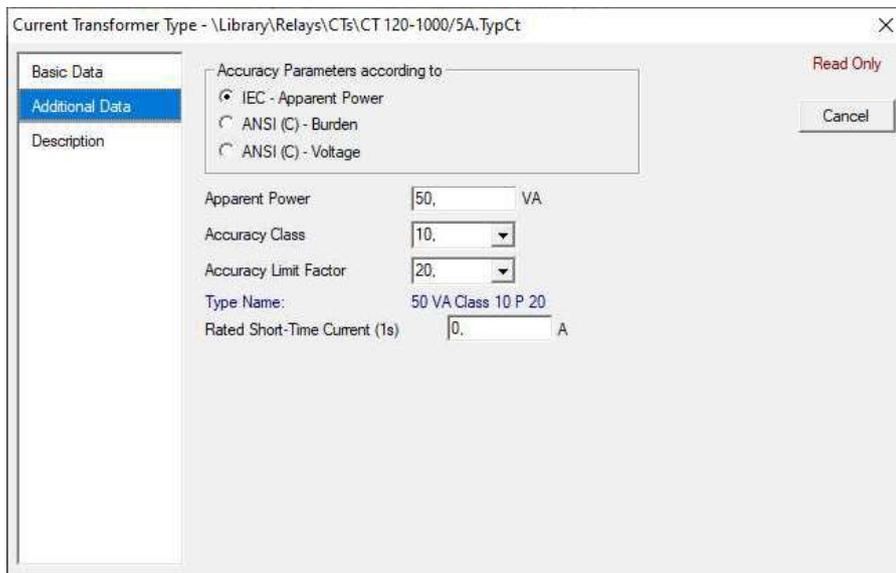


Como pode ver agora temos o tipo do dispositivo, tape primário (Primary), tape secundário (Secondary).

Para olhar quais são as configurações do dispositivo, deve-se clicar no ícone destacado na figura, em seguida abrirá a seguinte janela.



Em Dados Básicos (Basic Data) temos os tapes primário e secundário, Em Dados Adicionais (Additional Data) temos os dados demonstrado na imagem abaixo.

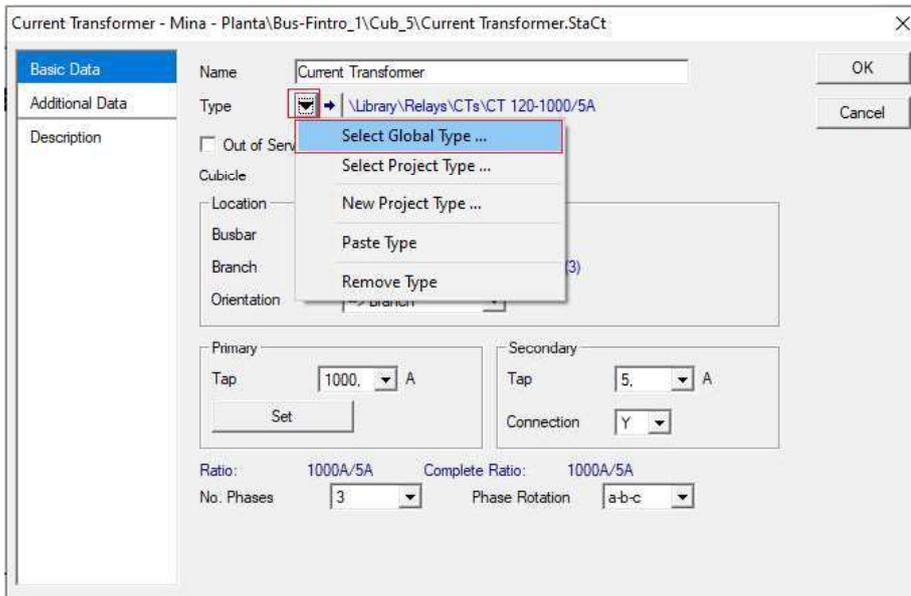


4. Passo

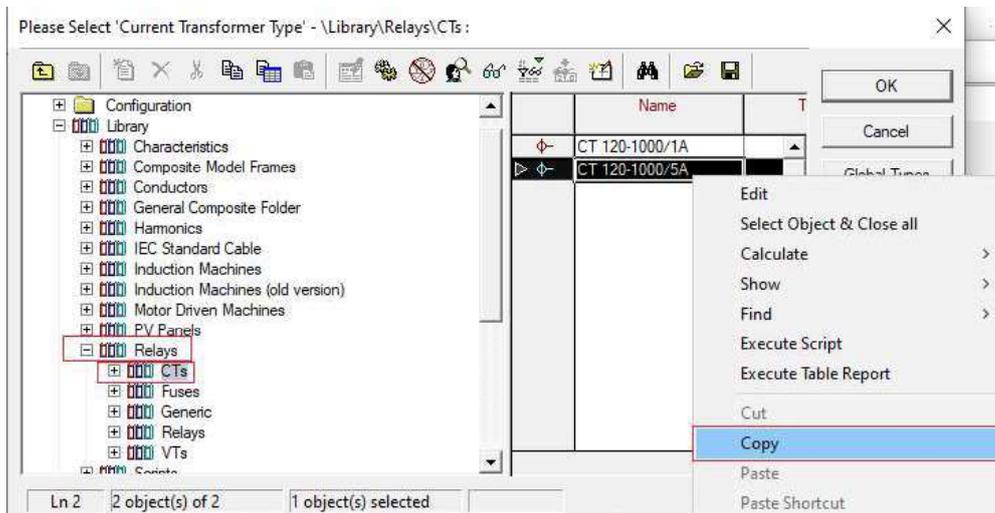
Como esse dispositivo é um modelo disponível na biblioteca do software não é possível ser feito algumas alterações em sua configuração, como exemplo esse Tc utilizado não permite a alteração no valor do seus tape, para efetuar essa alteração precisamos fazer uma cópia desse dispositivo para a biblioteca de dispositivos do projeto qual você está trabalhando.

Para fazer esse procedimento deve-se seguir os seguintes passo.

4.1. Na janela demonstrada na figura a baixo, você deve clicar no ícone destacado e em seguida clicar na primeira opção (Select Global Type ...).

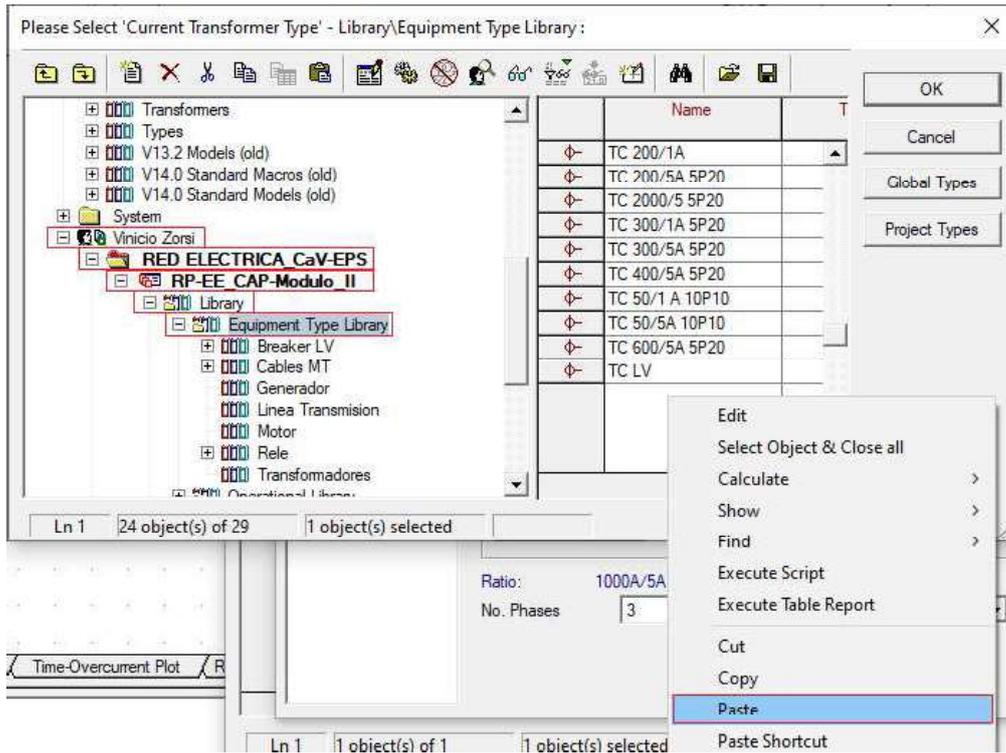


4.2. Em seguida abrirá a seguinte janela.

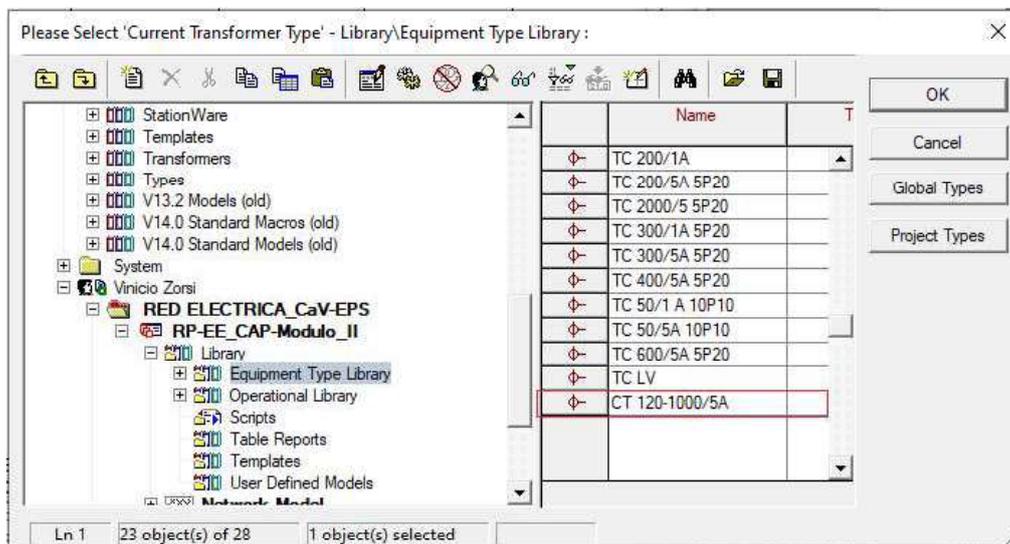


Deve-se procurar pela aba de relés (Relays) e depois a aba de TCs (CTs), vai aparecer os dois modelos de TCs que tem disponíveis na biblioteca do programa, escolher o modelo desejado e clicar com o botão direito do mouse, depois clicar em copiar (Copy).

4.3. Agora deve-se procurar a biblioteca de dispositivos do projeto, para isso você deve procurar a aba com o nome do projeto na janela do lado esquerdo.



Encontrando a aba com o nome do seu projeto, deve-se clicar no (+) para ela se expandir, em seguida clicar no (+) da aba biblioteca (Library) depois clicar em biblioteca de tipos de equipamento (Equipment Type Library) aonde aparecerá todos os equipamentos usados em seu projeto, na janela do lado esquerdo você deve clicar com o botão do lado direito do mouse e escolher a opção colar (Paste), feito isso o dispositivo está disponível na sua biblioteca.



Agora basta você escolher esse dispositivo da mesma maneira que foi feito a escolha no passo 2.

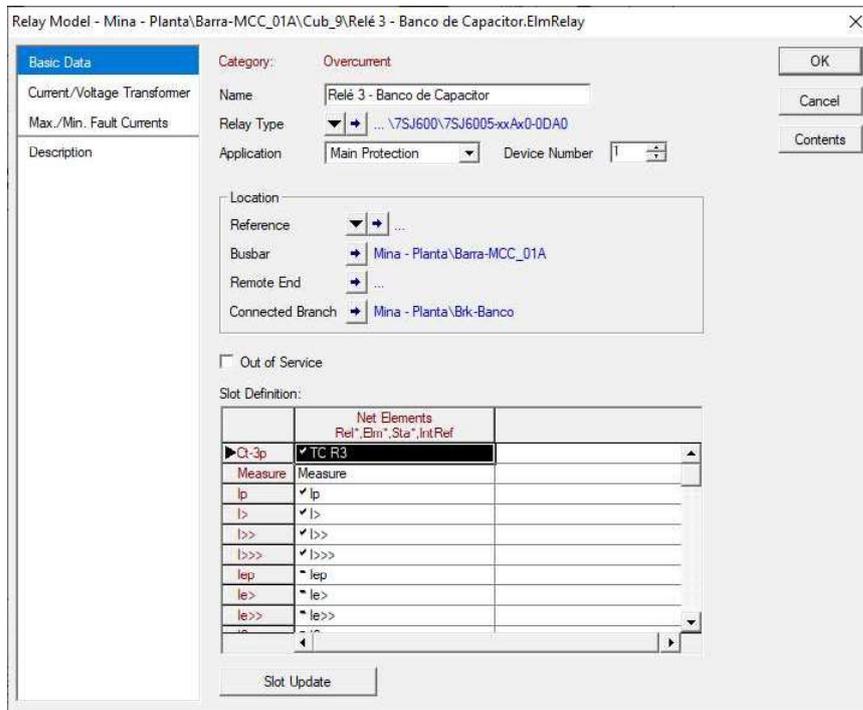
Esse dispositivo pode ser alterado os valores de tape já existente ou poderá adicionar outros tape.

ANEXO E – Como parametrizar um relé de sobrecorrente no DlgSILENT PowerFactory.

O relé utilizado é da fabricante Siemens modelo 7SJ6005.

1. Passo

Vamos abrir as configurações do relé e vamos checar se o TC já foi reconhecido.



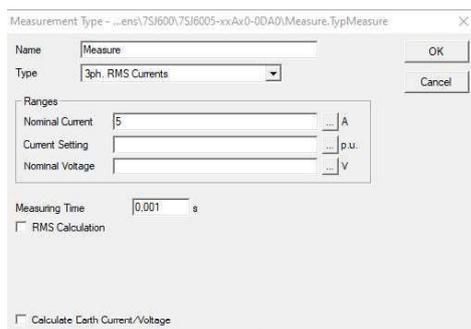
Como demonstrado na imagem o TC já foi reconhecido pelo relé.

2. Passo

Vamos dar dois cliques em Medidas (Measure), para abrir a seguinte janela.



Agora vamos clicar no ícone destacado para abrir as configurações das Medidas (Measures).



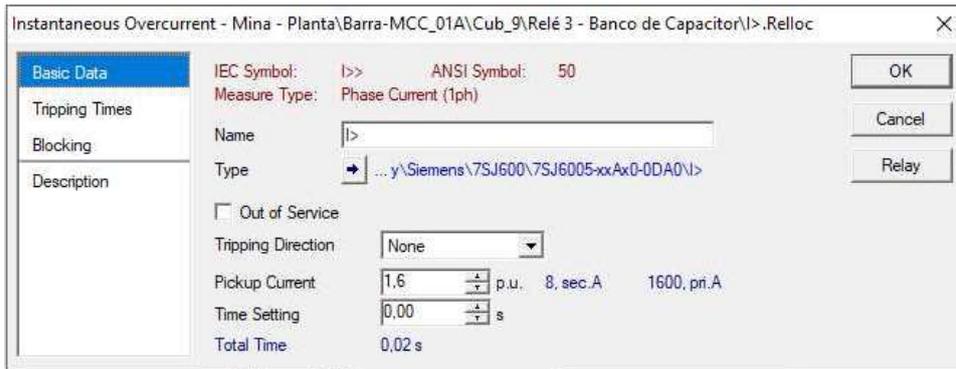
Em alguns casos quando você adiciona um modelo de relé essa opção de Cálculos RMS (RMS Calculation) vem marcada, para que o relé opere corretamente essa opção deve ser desmarcada, assim como demonstra a imagem.

3. Passo

Parametrizando a função de sobrecorrente instantânea (50), na janela principal das configurações do relé vamos clicar em I>.



Em seguida abrirá a seguinte janela.



Em captura de corrente (Pickup Current) você deve definir a corrente de acionamento do relé. Essa corrente é a corrente que foi calculado para o acionamento da função 50 do relé quando ocorrer um curto-circuito no sistema.

Como pode ser observado ele já vem com um tempo de 0,02 segundos pré-definido para o seu acionamento, caso você queira aumentar esse tempo de acionamento é só pôr o tempo desejado em configuração de tempo (Time Setting).

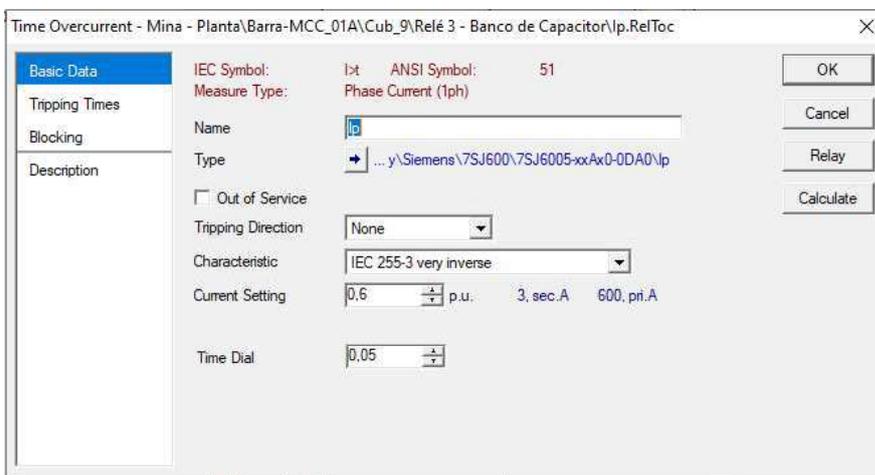
Esse relé vem com a parametrização da função 50 para ser feita em cada uma das fases, existem outros modelos que seguem a mesma lógica então deve ser feito a parametrização para cada uma das fases.

4. Passo

Parametrizando a função de sobrecorrente instantânea (51), na janela principal das configurações do relé vamos clicar em Ip.



Em seguida abrirá a seguinte janela.



Em característica (Characteristic) selecionamos o tipo da curva característica que deseja utilizar.

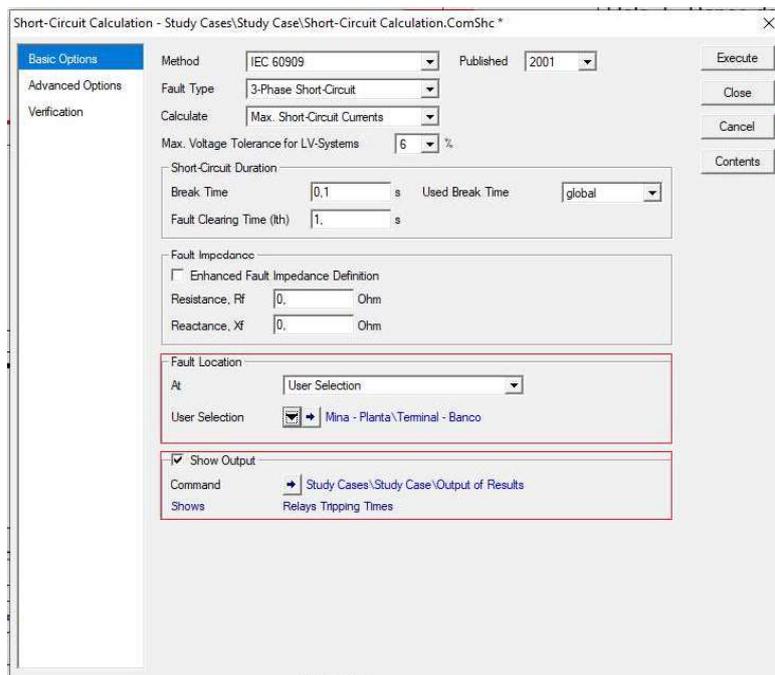
Em configuração atual (Current Setting) você deve definir a corrente de acionamento do relé. Essa corrente é a corrente que você calculou para o acionamento da função 51 do relé.

Em mostrador de tempo (Time Dial) você define o dial de tempo escolhido para seu projeto.

5. Passo

Para conferir a parametrização do seu relé você deve utilizar a ferramenta de cálculo de corrente de curto-circuito do programa e definir um curto-circuito dentro da zona de proteção do relé.

Outro passo importante é definir a saída de dados como tempos de disparo dos relés. Assim como demonstrado na imagem a baixo.



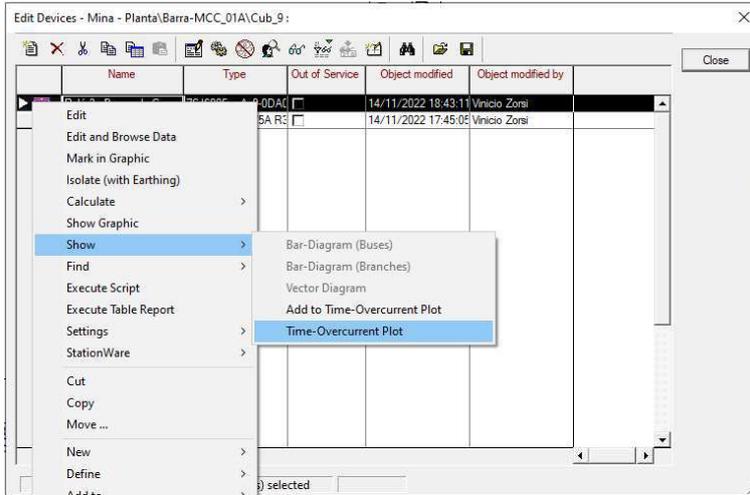
Após executar o cálculo é gerado no seu console o tempo de disparo do relé, assim como o demonstrado na imagem a baixo.

Relé	Função	ANSI	Corrente (A)	Tempo (s)	Tempo (s)
Relé 3 - Banco de Ca					
	(IEC: I>t	ANSI: 51	98,726 sec.A	19745,17 pri.A	0,020 s
	(IEC: I>>	ANSI: 50	98,726 sec.A	19745,17 pri.A	0,020 s
	(IEC: I>>	ANSI: 50	98,726 sec.A	19745,17 pri.A	0,020 s
	(IEC: I>>>	ANSI: 50	98,726 sec.A	19745,17 pri.A	0,020 s

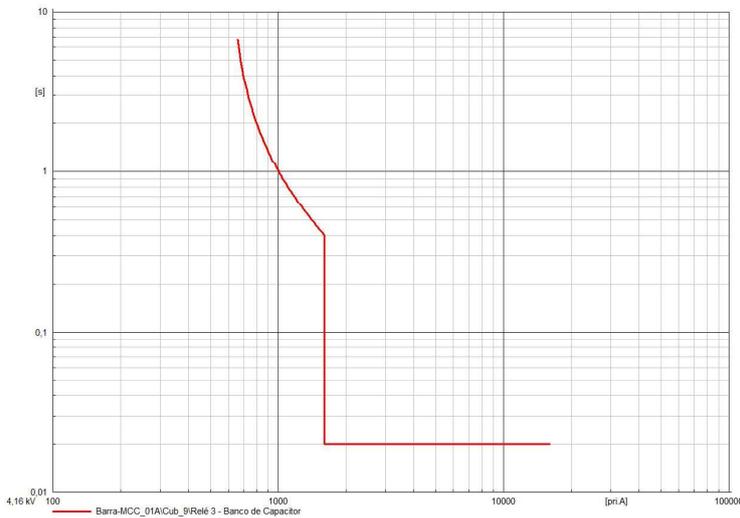
Aonde é possível ver o tempo de atuação das duas funções que estão parametrizadas no relé. Além do tempo de atuação, também temos os dados da corrente de curto-circuito que passa pelo transformador de corrente do relé.

Existe outro método disponível no programa, que consiste em demonstrar a curva característica do relé e o tempo de atuação para o curto-circuito calculado.

Para plotar a curva característica do relé você deve clicar com o botão direito do mouse no relé, ir até a opção mostrar (Show) em seguida ir em gráfico de sobrecorrente de tempo (Time-Overcurrent Plot) e clicar na opção.



Em seguida a curva característica será plotada.



Após gerar um evento de curto circuito o tempo de atuação do relé será demonstrado nesse mesmo plot, conforme a imagem a baixo.



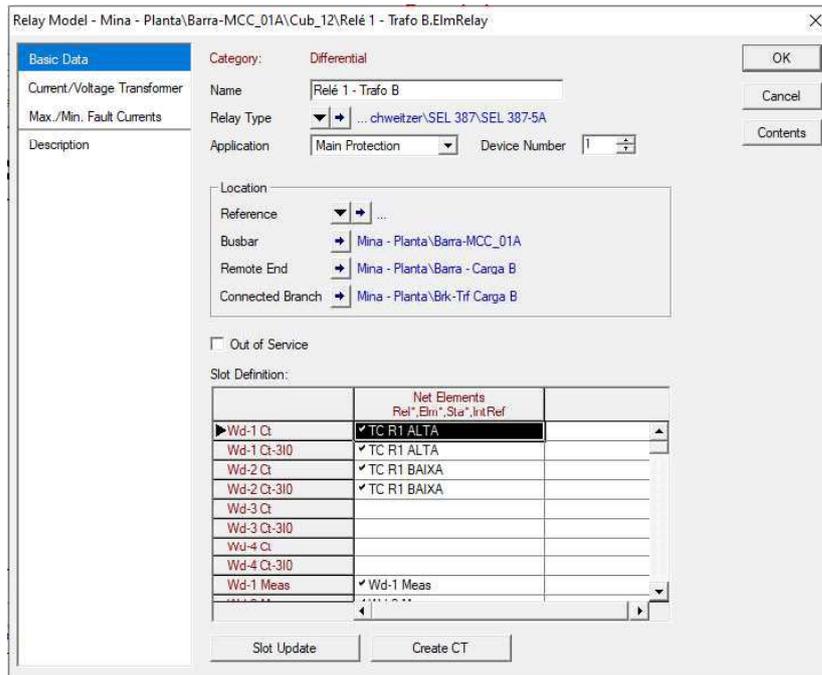
Nesse método será possível ver somente o tempo de atuação da função por onde a corrente de curto-circuito corta a curva característica, neste caso o tempo de atuação demonstrado é da função de sobrecorrente instantânea (50).

ANEXO F – Como parametrizar um relé diferencial no DIgSILENT PowerFactory.

O relé utilizado como exemplo é da fabricante Schweitzer modelo SEL-387 5A.

1. Passo

O relé diferencial necessita de dois transformadores de corrente, os quais irão determinar a sua zona de proteção. Após inserir o modelo do relé desejado você deve conferir os TCs que estão sendo usado pelo relé.

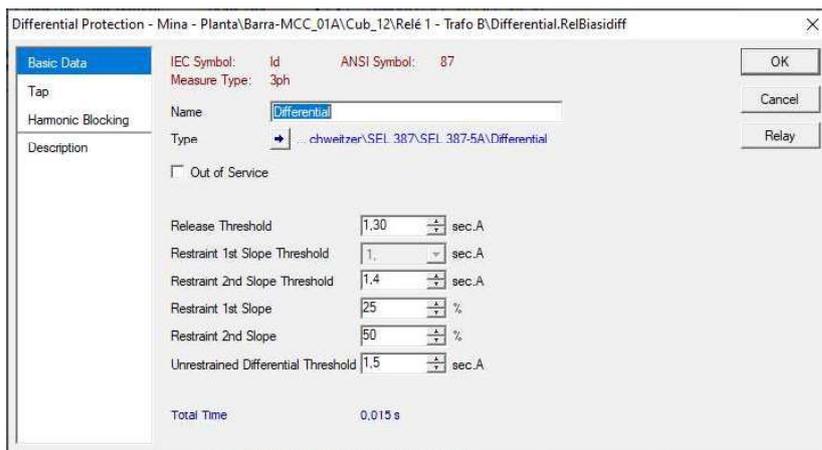


Nesse modelo de relé é possível usar até quatro TCs diferente. Para o seguinte exemplo foi utilizado apenas dois, aonde o TC R1 ALTA está localizado no primário de um transformador e o TC R1 BAIXA está localizado no secundário desse transformador.

Assim como no relé de sobrecorrente em alguns casos, para esse relé funcionar corretamente durante as simulações é preciso desativar a sua função RMS. Nesse exemplo não foi preciso desativar a função para que ele funcionasse corretamente.

2. Passo

Parametrizando a função diferencial (87), nas definições do relé você vai encontrar a função diferencial (Differential)  após seleciona-la é só dar dois cliques com o mouse, e abrirá a seguinte janela.



Em limiar de liberação (Release Threshold) você irá inserir o valor da corrente de sensibilidade que foi calculado.

O primeiro limite de inclinação (Restraint 1st Slope Threshold) já vem definido no relé.

O segundo limite de inclinação (Restraint 2nd Slope Threshold) você coloca um valor um pouco maior do que o valor da sensibilidade.

Em restrição de primeira inclinação (Restraint 1st Slope) foi inserido o valor indicado nos livros que é de 25%.

Em restrição de segunda inclinação (Restraint 2nd Slope) foi inserido um valor de 50% o qual é o dobro do valor de primeira inclinação.

O tempo de atuação do relé já vem pré-definido.

3. Passo

Para conferir a parametrização do relé você deve utilizar a ferramenta de cálculo de corrente de curto-circuito do programa e definir um curto-circuito dentro da zona de proteção do relé. Outro passo importante é definir a saída de dados como tempos de disparo dos relés. Assim como demonstrado na imagem.

Short-Circuit Calculation - Study Cases\Study Case\Short-Circuit Calculation.ComShc

Basic Options

Method: IEC 60909 Published: 2001

Advanced Options

Fault Type: 3-Phase Short-Circuit

Calculate: Max. Short-Circuit Currents

Max. Voltage Tolerance for LV-Systems: 6 %

Short-Circuit Duration

Break Time: 0,1 s Used Break Time: global

Fault Clearing Time (t_{th}): 1, s

Fault Impedance

Enhanced Fault Impedance Definition

Resistance, R_f: 0, Ohm

Reactance, X_f: 0, Ohm

Fault Location

At: User Selection

User Selection: Mina - Planta\Terminal LD Baixa - Trafo B

Show Output

Command: Study Cases\Study Case\Output of Results

Shows: Relays Tripping Times

Execute

Close

Cancel

Contents

Após executar o cálculo é gerado no console o tempo de disparo do relé, assim como demonstrado na imagem a baixo.

Relay	Branch	Terminal /Station	Type	Tripping Times
Relé 1 - Trafo B		Barra-MCC_01A/	SEL 387-5A	0,015 s

Para conferir esse tempo de atuação é só simular um curto circuito no mesmo local do cálculo.