



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MELISSA DO NASCIMENTO REBOUÇAS VIANA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DE UM
ALIMENTADOR DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO UTILIZANDO PS SIMUL**

FORTALEZA

2019

MELISSA DO NASCIMENTO REBOUÇAS VIANA

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DE UM ALIMENTADOR
DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO UTILIZANDO PS SIMUL

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

V668m Viana, Melissa do Nascimento Rebouças.
Modelagem e simulação do sistema de proteção de um alimentador de distribuição de média tensão utilizando PS SIMUL / Melissa do Nascimento Rebouças Viana. – 2019.
50 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio.

1. Modelagem. 2. PS SIMUL. 3. Relés de proteção. 4. Alimentador. I. Título.

CDD 621.3

MELISSA DO NASCIMENTO REBOUÇAS VIANA

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DE UM ALIMENTADOR
DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO UTILIZANDO PS SIMUL

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: ___ / ___ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. M.Sc. Carlos Gustavo Castelo Branco
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Ms.S Fellipe Souto Soares
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Ronaldo e Soraya.

Aos meus irmãos, Gabriela, Matheus e Sarah.

Aos meus amigos e professores.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por guiar-me em todas as conquistas alcançadas até hoje e por me dar forças de seguir em frente em meio as dificuldades enfrentadas.

Aos meus pais, Ronaldo e Soraya, por me apoiarem em todas as minhas decisões sempre com palavras de amor.

Aos meus irmãos, Gabriela, Sarah e Matheus por servirem como exemplos de pessoas e profissionais que desejo ser.

À minha família, desde os mais novos até os mais velhos por sempre trazerem a felicidade para o meu cotidiano.

Aos meus amigos, porque juntos conseguimos ir mais longe e sem eles nada disso seria possível.

Ao meu orientador Raimundo Furtado pelo empenho dedicado na elaboração deste trabalho e pelos valorosos aconselhamentos profissionais.

Aos membros da banca, Prof. M.Sc. Carlos Gustavo Castelo Branco e Prof. Ms.S Fellipe Souto Soares.

À empresa CONPROVE pela parceria e apoio nos esclarecimentos das dúvidas durante a elaboração deste trabalho.

Aos professores do curso, que foram fundamentais e me iniciaram no mundo maravilhoso que é a Engenharia Elétrica.

RESUMO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) está sempre sujeito a condições anormais em seus componentes durante sua operação. Essas condições indesejadas afetam o fornecimento de energia e proporcionam muitos transtornos aos consumidores. Para mitigar as consequências das faltas elétricas, o SEP deve dispor de sistemas de proteção ao longo dos subsistemas de geração, transformação, transmissão e distribuição de energia. A principal função do sistema de proteção é garantir a integridade dos equipamentos, a segurança às pessoas e melhorar a confiabilidade e a qualidade do fornecimento de energia, além de fornecer as informações necessárias facilitar a identificação e correção do problema. Historicamente programas computacionais são utilizados para modelagens e simulações de sistemas de elétricos de potência (SEP) com o objetivo de analisar o comportamento do SEP com relação a aspectos de qualidade de energia, transitórios eletromagnéticos, curto-circuito, fluxo de carga e atuação das proteções. Os programas mais conhecidos são PSCAD/EMTDC, PSS NETOMAC, MATLAB e ATPdraw. Para muitas das simulações é necessário utilizar linguagens de alto nível para ajudar na modelagem. A maior parte dessas ferramentas são pagas, o que dificulta o seu uso no ensino de engenharia elétrica. O ATPdraw, por ser um software livre e com muitos recursos, vem sendo proposto e utilizado na pesquisa e ensino de proteção de sistemas elétricos nas universidades brasileiras e pelas empresas do setor elétrico. Apesar desses fatores motivantes, a falta de uma interface amigável tem sido citada como justificativa para o não uso em larga escala ATPdraw. Dentro deste contexto, esse trabalho de final de curso tem como principal objetivo apresentar a modelagem e simulação do sistema de proteção de um alimentador de distribuição em média tensão utilizando o software PS SIMUL.

Palavras-chave: Modelagem. PS SIMUL. Relés de proteção. Alimentador.

ABSTRACT

The Electric Power System (SEP) is always subject to abnormal conditions in its components during its operation. These unwanted conditions affect the power supply and cause many inconveniences to consumers. To mitigate the consequences of power outages, the SEP must have protection systems along the power generation, transformation, transmission and distribution subsystems. The primary function of the protection system is to ensure equipment integrity, safety to people, and improve the reliability and quality of the power supply and provide the necessary information to facilitate problem identification and correction. Historically, computer programs are used to model and simulate electrical power systems (SEP) in order to analyze the behavior of SEP regarding the power quality, electromagnetic transients, short circuit, charge flow and protection actuation aspects. The most popular programs are PSCAD / EMTDC, PSS NETOMAC, MATLAB and ATPdraw. For many of the simulations it is necessary to use high level languages to aid in modeling. Most of these softwares are paid for, which makes their use in teaching electrical engineering difficult. ATPdraw, being a free and resourceful software, has been proposed and used in research and teaching of protection of electrical systems in Brazilian universities and companies in the electric sector. Despite these motivating factors, the lack of a user-friendly interface has been cited as a reason for not using ATPdraw on a large scale. Within this context, this article aims to present the modeling and simulation of the protection system of a medium voltage distribution feeder using PS SIMUL software.

Keywords: Modeling. PS SIMUL. Protection relays. Network Feeder.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Zonas de proteção	17
Figura 2. 2 - Componentes simétricas.....	19
Figura 2. 3 - Curto-circuito trifásico	20
Figura 2. 4 - Curva de tempo definido.....	21
Figura 2. 5 - Curva de tempo inverso	21
Figura 2. 6 - Tipos de curva de tempo inverso.....	22
Figura 3. 1 – Tela Principal do PS SIMUL.....	25
Figura 3. 2 – Tela de “Runtime” do PS SIMUL	26
Figura 3. 3 – Tela de exemplos do PS SIMUL	26
Figura 3. 4 – Biblioteca de Medição: Elementos de medição RMS	27
Figura 3. 5 - Circuito Função 46(I2).....	33
Figura 3. 6 - Gráfico de atuação do Circuito Função 46(I2)	34
Figura 3. 7 - Circuito Função 46(I2/I1)	35
Figura 3. 8 - Gráfico de atuação do Circuito Função 46(I2/I1)	35
Figura 3. 9 - Circuito Função 79.....	37
Figura 3. 10 - Gráficos de atuação do Circuito Função 79	38
Figura 4. 1 - Diagrama unifilar Rede de distribuição Aquiraz.....	40
Figura 4. 2 - Modelagem da Rede de distribuição Aquiraz	43
Figura 4. 3 - Configurações da fonte trifásica.....	44
Figura 4. 4 - Configurações da impedância reduzida das barras	45
Figura 4. 5 - Configurações das cargas	45
Figura 4. 6 - Configurações do curto trifásico	46
Figura 4. 7 - Configurações do TC	47
Figura 4. 8 - Configurações do Disjuntor	47
Figura 4. 9 - Atuação de RS1	48
Figura 4. 10 - Atuação de 21I7.....	49
Figura 4. 11 - Corrente na fase A.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 – Tipos de curva padronizadas pela norma IEC	23
Tabela 3. 1 – Parâmetros da função de proteção 51	28
Tabela 3. 2 - Parâmetros da função de proteção 50	28
Tabela 3. 3 - Parâmetros da função de proteção 46	32
Tabela 4. 1 - Dados do sistema	41
Tabela 4. 2 - Dados de corrente de curto-circuito do sistema.....	42
Tabela 4. 3 - Dados de ajuste das proteções.....	42
Tabela 4. 4 - Dados da fonte trifásica	43
Tabela 4. 5 - Dados da impedância reduzida das barras	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ATP	Alternative Transients Program
EMTP	Electro-Magnetic Transients Program
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
COMTRADE	Common Format for Transient Data Exchange
SDMT	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica em Média Tensão
UFC	Universidade Federal do Ceará
IEC	International Electric Committee
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
RMS	Root Mean Square
IES	Instituição de Ensino Superior
SEP	Sistema Elétrico de Potência

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa	14
1.2 Objetivos	15
1.3 Estrutura do trabalho	15
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 Objetivo do capítulo.....	16
2.2 Sistema de proteção.....	16
2.3 Estudos das proteções	18
2.4 Considerações finais.....	24
CAPÍTULO 3 – INTRODUÇÃO AO PS SIMUL E SIMULAÇÃO DAS FUNÇÕES DE PROTEÇÃO.....	25
3.1 Introdução	25
3.2 PS SIMUL.....	25
3.3 Modelagem da função de proteção de sobrecorrente de fase no software PS SIMUL ..	27
3.4 Modelagem da função de proteção de sobrecorrente de sequência negativa no software PS SIMUL	32
3.5 Modelagem da função de proteção de sobrecorrente de sequência negativa (critério I2/I1) no software PS SIMUL	34
3.6 Modelagem da função de proteção de religamento no software PS SIMUL	36
3.7 Conclusão.....	38
CAPÍTULO 4 – MODELAGEM DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DO ALIMENTADOR E COMPARAÇÃO COM O SOFTWARE ATP-DRAW.....	39
4.1 Introdução	39
4.2 Rede de distribuição de Energia de Aquiraz	39
4.3 Modelagem do alimentador.....	41
4.4 Motivação.....	47
4.5 Simulação.....	47
4.6 Conclusão.....	49
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO.....	50

BIBLIOGRAFIA.....	51
-------------------	----

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

O Sistema Elétrico de Potência (SEP), durante sua operação, está sempre sujeito a condições anormais em seus componentes. Essas condições indesejadas afetam o fornecimento de energia e conseqüentemente trazem muitos transtornos aos consumidores de energia. Por essa razão, o SEP deve dispor de sistemas de proteção ao longo dos subsistemas de geração, transformação, transmissão e distribuição de energia, de forma a garantir a integridade dos equipamentos, a confiabilidade, a disponibilidade, a segurança e a qualidade do fornecimento de energia (MAMEDE, 2011).

Historicamente programas computacionais são utilizados para modelagem, simulações e análise do comportamento do SEP, com relação a aspectos de qualidade de energia, transitórios eletromagnéticos, curto-circuito, fluxo de carga e estudos das proteções, durante as fases de planejamento, projeto e operação. Entre os programas mais conhecidos estão: PSCAD/EMTDC, PSS NETOMAC, Digsilent, MATLAB, ATPdraw e OpenDSS (CONCEIÇÃO, 2012). Nos últimos anos as bibliotecas desses softwares vêm sendo atualizadas para acompanhar as evoluções tecnológicas ocorridas nos últimos anos com a expansão dos recursos energéticos renováveis (fontes de geração fotovoltaica e eólica e sistemas de armazenamento de energia) conectados às redes elétricas.

Entre essas ferramentas, ATPdraw, por ser um software livre e com muitos recursos, vem sendo proposto e utilizado na pesquisa e ensino de proteção de sistemas elétricos nas universidades brasileiras (ALVES, 2014). Apesar desses fatores motivantes, a falta de uma interface amigável tem sido citada como justificativa para o não uso do ATPdraw em larga escala (LOURENÇO, 2018).

Em LOURENÇO (2018) foi apresentado o desenvolvimento da modelagem e simulação de relés digitais de proteção e transformadores de corrente do sistema de proteção de um alimentador de distribuição em média tensão da rede de distribuição de Aquiraz, pertencente a concessionária Enel, utilizando a linguagem Models do ATP. Dentro desse contexto, esse trabalho final de curso apresenta a modelagem e simulação do sistema de proteção do alimentador de

distribuição da rede de distribuição de Aquiraz desenvolvida no software PS SIMUL.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Principal

O presente trabalho tem como objetivo principal a modelagem e simulação do sistema de proteção de um alimentador de distribuição utilizando o software PS SIMUL.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos pode-se citar:

1. Modelar um alimentador de distribuição de uma rede real no PS SIMUL;
2. Modelar as funções de proteções de sobrecorrente de fase instantânea (Código ANSI 50) e temporizada (Código ANSI 51), sequência negativa (Código ANSI 46) e religamento automático (Código ANSI 79) de um relé de sobrecorrente multifunção no software PS SIMUL;
3. Simular faltas e apresentar os resultados da atuação das funções de proteção no PS SIMUL;
4. Comparar os resultados da modelagem e simulações no PS SIMUL com os resultados obtidos no ATP-Draw publicado em outro trabalho;

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos.

O Capítulo 1 traz uma pequena introdução e apresenta os objetivos, justificativa e estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma breve introdução teórica dos conteúdos abordados ao decorrer do trabalho, são eles: Sistema Elétrico de Potência, Curto-circuito e Relés de proteção.

O Capítulo 3 traz uma introdução ao software apresentado no trabalho, PS SIMUL, e os resultados e análises das primeiras modelagens e simulações realizadas no mesmo.

O Capítulo 4 aborda a modelagem do sistema de um alimentador da Rede Aquiraz no PS SIMUL e apresenta a análise comparativa entre os softwares PS Simul e o ATPdraw.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e as propostas de trabalhos futuros relacionados ao tema.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Objetivo do capítulo

Neste capítulo é apresentado uma fundamentação teórica sobre os temas tratados no decorrer deste trabalho, tais como os fundamentos de um sistema de proteção, funções de proteção dos relés e curtos-circuitos. Para aprofundar o conhecimento para que as simulações tivessem uma boa fundamentação teórica e os dados pudessem ser analisados corretamente, foi necessário realizar a revisão dos conceitos fundamentais de sistemas de proteção do SEP.

2.2 Sistema de proteção

Um sistema de proteção tem como função detectar, localizar e eliminar uma falha ou anormalidade no Sistema Elétrico de Potência (SEP), com o objetivo de manter a integridade dos equipamentos, garantir a segurança do pessoal, assegurar a continuidade do serviço, melhorar a confiabilidade e a qualidade do fornecimento de energia.

Um sistema de proteção de uma rede elétrica de distribuição de energia é composto de diversos tipos de equipamentos e dispositivos de proteção. Os equipamentos de proteção mais comuns no SEP são: relés, religadores, disjuntores, seccionadores, chaves fusíveis e para-raios.

A proteção pode ser definida como a ação automática realizada por dispositivos sensíveis a determinadas condições anormais no sistema elétrico (falhas, faltas, defeitos ou perturbações) que ocorrem num circuito, no sentido de evitar ou limitar danos a um sistema ou equipamento elétrico (ABNT - NBR 8769, 1985).

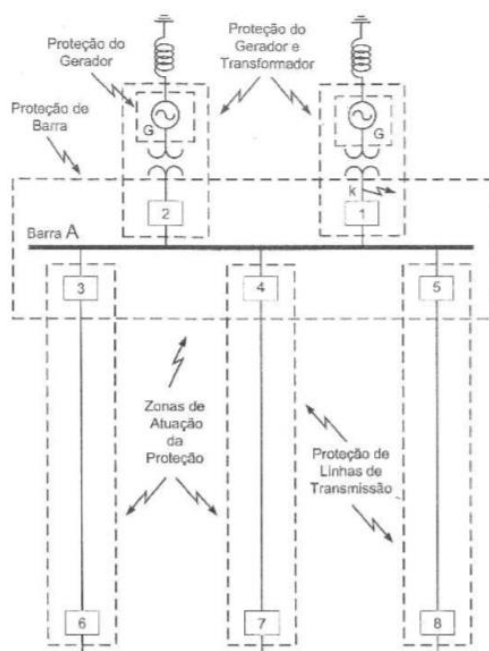
Essas anomalias no sistema, razão pela qual são necessários os estudos elétricos, podem ser ocasionadas por fatores de origem externa, como por exemplo descargas atmosféricas ou por fatores de origem interna, como por exemplo isolamento comprometida. Além disso, essas anomalias podem ser temporárias, também chamadas de transitórias, ou permanentes (DECANINI, 2008).

As principais causas para ocorrências dessas anomalias são descargas atmosféricas, animais que danificam as estruturas, contatos momentâneos entre os condutores, sobretensões de

manobras, aberturas de arcos-elétricos e até mesmo atos de vandalismo, visto que são jogados objetos sobre os condutores. Assim, pode-se observar que essas ocorrências podem se dar por diversos motivos e é de fundamental importância que o SEP disponha de um sistema de proteção confiável (LEÃO, 2018).

Para garantir a integridade do SEP deve-se utilizar sistemas de proteção distribuídos ao longo dos vãos (bays) de geração, de saída de linha, de barramento, de transformação, de banco de capacitor, de entrada de linha e de saída de alimentador (CAMINHA, 1977). Na Figura 2.1 é apresentado o diagrama unifilar de um SEP subdividido em zonas de proteção principais, representadas por retângulos tracejados, as quais estão sobrepostas, indicado que ao ocorrer falha da proteção responsável pela proteção de uma determinada zona, a proteção de retaguarda pode atuar interrompendo a falta (KINDERMANN, 2012).

Figura 2.1 - Zonas de proteção



Fonte: Kindermann, 2012

O sistema de proteção deve ser projetado e concebido com base nos conceitos de seletividade, estabilidade, sensibilidade, velocidade e confiabilidade (segurança e disponibilidade) (RUSH, 2011).

O conceito de seletividade está relacionado com a propriedade do esquema de proteção de

selecionar somente o disjuntor necessário para atuar, garantindo o isolamento da anomalia, quando na ocorrência de uma falta. Esta propriedade tem como característica a coordenação no tempo do sistema de proteção, em que somente os equipamentos pertencentes à zona de falta atuarão para combatê-la, enquanto o restante estará configurado para operar em tempos coordenados conforme sequência (RUSH, 2011).

O conceito de estabilidade é referente a capacidade do SEP de não ser afetado pelas anomalias que ocorrem fora da zona de proteção, se mantendo estável em sua atuação (RUSH, 2011).

A definição de sensibilidade está relacionada com os parâmetros de configuração dos relés do sistema. Ou seja, os relés são considerados sensíveis se seus parâmetros operacionais forem baixos (RUSH, 2011).

A velocidade é a rapidez com que a falta é eliminada do sistema, pois assim é possível garantir uma melhor vida útil dos equipamentos e uma menor possibilidade de danos permanentes no sistema (RUSH, 2011).

Por fim, a confiabilidade do sistema é o quanto ele está disponível para os consumidores sem a ocorrências de faltas permanentes, visto que tal tipo de anomalia causaria grandes colapsos na rotina da sociedade moderna (RUSH, 2011).

2.3 Estudos das proteções

O estudo das proteções de uma subestação ou alimentador de distribuição abrange as seguintes etapas:

- Levantamento dos dados dos equipamentos e do sistema elétrico;
- Elaboração do diagrama unifilar de proteção;
- Especificação dos equipamentos, relés e funções de proteção;
- Estudo de curto-circuito e fluxo de carga;
- Dimensionamento dos transformadores de corrente;
- Definição de critérios e cálculo dos ajustes das proteções;
- Elaboração da ordem de ajuste das proteções, coordenograma e diagrama de tempo.

2.3.1 Curto-circuito

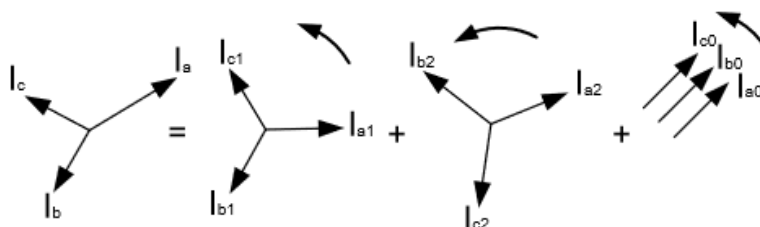
Os curtos-circuitos são classificados em trifásico, trifásico a terra, bifásico, bifásico a terra,

e fase-terra, também denominado de curto-circuito monofásico. Os curtos-circuitos trifásicos, caracterizados pelo contato entre os três condutores ou entre os três condutores do sistema e a terra, mantém as correntes elétricas simétricas e balanceadas nas três fases. Os demais tipos de curto-circuito são desequilibrados. Normalmente para o estudo de curto-circuito são utilizados o método de componentes simétricas (STEVENSON, 1986).

As componentes de fase são definidas como um sistema de três fasores de módulos iguais variando somente a defasagem do ângulo e a sequência de fase do sistema original. Para a sequência positiva, por exemplo, a defasagem é de 120° entre os fasores e segue a mesma sequência de fase do sistema original. Para a negativa, a defasagem também é de 120° entre os fasores, porém segue a sequência de fase contrária à do sistema original. Por fim, a componente de sequência zero possui módulos e angulações iguais entre os fasores e segue a sequência de fase original do sistema.

Na Figura 2.2 é apresentada a decomposição dos fasores das fases a, b e c do sistema desequilibrado nos três subsistemas equilibrados de sequência (positiva, negativa e zero).

Figura 2. 2 - Componentes simétricas



Fonte: Rodrigues, 2015

Essa representatividade por fasores é útil para que seja possível obter um equacionamento de uma forma simples da corrente de curto. Para o caso da corrente de curto trifásico, o seu equacionamento pode ser dado por (RODRIGUES, 2015):

$$I_{cc_{3f}} = \frac{V}{|Z_1|} \quad [\text{Equação 2.1}]$$

Onde:

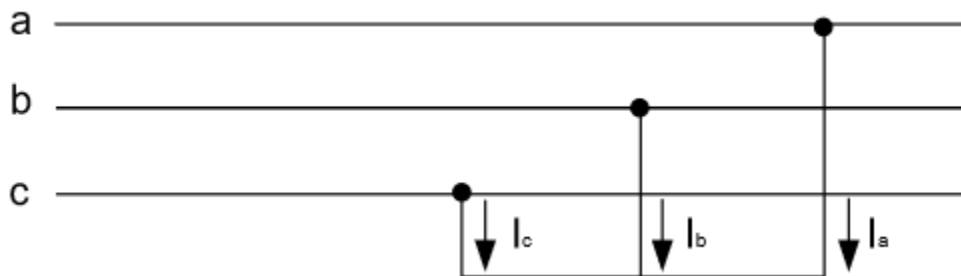
V – Tensão do sistema em pu;

[Z1] – Impedância de sequência positiva, vista do ponto em curto;

$I_{cc_{3f}}$ – Corrente de curto-circuito trifásica, em pu.

A Figura 2.3 a seguir é uma representação do curto trifásico.

Figura 2. 3 - Curto-circuito trifásico



Fonte: Eletrobrás, 1982

2.3.2 Especificação das proteções

Os equipamentos e dispositivos de proteção e controle de um sistema elétrico são especificados de acordo com as características de cada elemento protegido (ENEL, 2017). Os relés de sobrecorrente multifunção utilizados nos alimentadores de distribuição de média tensão em 13,8 kV da Enel deve dispor das seguintes funções de proteção (ENEL, 2017):

- 50/51 – Sobrecorrente de fase instantânea e temporizada;
- 50/51N – Sobrecorrente de neutro instantânea e temporizada;
- 46 – Sobrecorrente de sequência negativa;
- 50BF – Falha de disjuntor;
- 79 – Religamento automático.

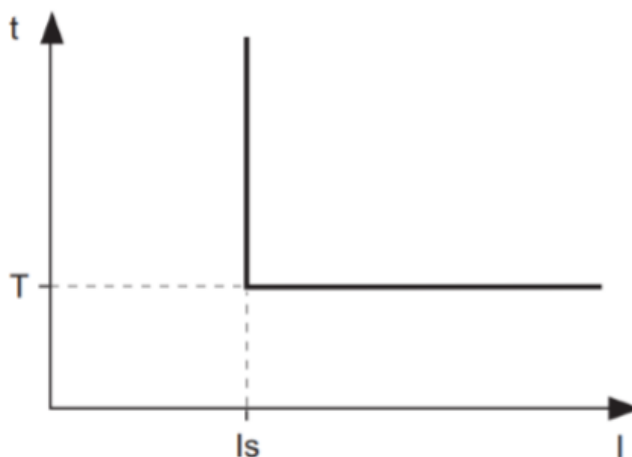
As funções de proteção de sobrecorrente servem para detectar os altos níveis de corrente geralmente causadas por curtos-circuitos entre as fases ou entre as fases e a terra. O funcionamento da proteção de sobrecorrente pode variar conforme a curva de atuação definida para ela (SILVA, 2008).

As curvas de atuação de relés de sobrecorrente podem ser de dois tipos, são elas: curvas de atuação instantânea e as curvas de atuação temporizada com tempo definido ou tempo inverso. Pode-se também analisar a curva de atuação instantânea como aquela com tempo definido igual a zero.

Segundo SCHNEIDER (2008) a curva de tempo definido é aquela em que se define um tempo e um valor mínimo de corrente para o qual o relé deve atuar caso ultrapasse esse limite.

Para exemplificar esse comportamento, observe a Figura 2.4.

Figura 2. 4 - Curva de tempo definido

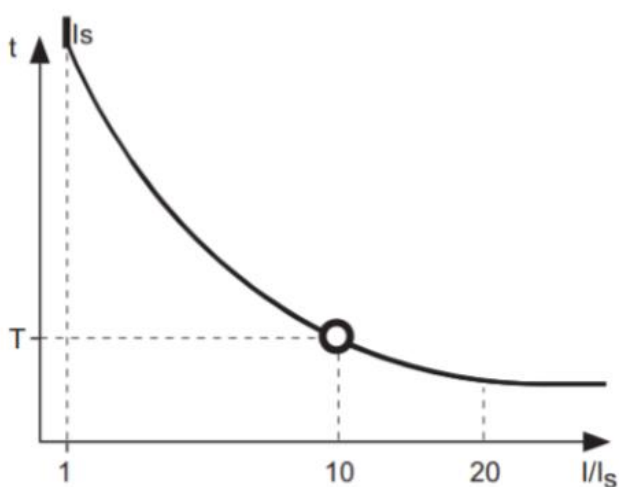


Fonte: Lourenço, 2018

Conforme pode ser observado na Figura 2.4, para qualquer valor acima de I_s o relé atua após um tempo definido igual a T . Essa é a curva característica da função de proteção de sobrecorrente instantânea (50).

Para as curvas de tempo inverso que possuem uma inclinação variável e inversamente proporcional ao valor da corrente. A lógica de funcionamento da curva de tempo inverso é quanto maior o valor da corrente, após ultrapassar o valor da corrente mínima de atuação, mais rápido o relé opera conforme pode ser observado na Figura 2.5.

Figura 2. 5 - Curva de tempo inverso



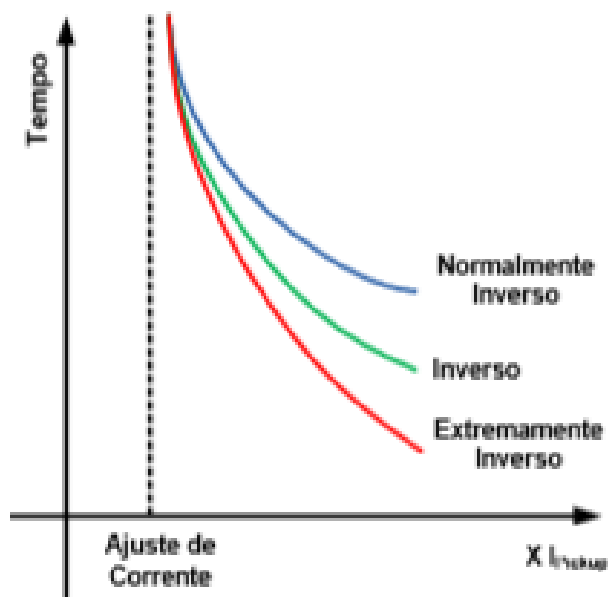
Fonte: Lourenço, 2018

Para cada tipo de curva, a inclinação é padronizada pelas normas IEC e IEEE/ANSI

conforme RODRIGUES (2015). Os tipos de curva especificados pela IEC são: Normalmente Inverso (NI), Muito Inverso (MI), Extremamente Inverso (EI) e ainda Inversa Longa (IL).

Conforme pode ser observado na Figura 2.6, cada curva da função de sobrecorrente (51) tem uma inclinação específica, a qual é definida pelas constantes α e β apresentadas na Tabela 2.1.

Figura 2. 6 - Tipos de curva de tempo inverso



Fonte: Lourenço, 2018

O equacionamento de obtenção dessas curvas é mostrado a seguir:

$$t = DIAL \times \frac{\beta}{M^{\alpha-1}} \quad [\text{Equação 2.2}]$$

Onde:

t – Tempo de atuação do relé;

β – Coeficiente da curva;

M – Múltiplo da corrente de atuação (Divisão entre corrente do sistema e corrente de pick-up);

α – Coeficiente da curva;

DIAL – Dial de tempo.

Na Tabela 2.1 são apresentadas as constantes α e β para cada tipo de curva.

Tabela 2. 1 – Tipos de curva padronizadas pela norma IEC

Tipo de curva	β	α
NI	0,14	0,02
MI	13,5	1
EI	80	2

O comportamento para as funções de sobrecorrente de sequência negativa é levado em conta o fasor de sequência negativa da corrente que passa no circuito para os devidos cálculos (LOURENÇO, 2018).

Já a definição da função de proteção de religamento está relacionada com os conceitos de falta temporizada e permanente, já definidos anteriormente. Para a melhor performance do SEP é ideal que algumas faltas temporizadas sejam eliminadas com velocidade. Em casos em que a falta é causada por um rápido contato entre as fases, por exemplo, não é necessário a atuação de um operador para que o sistema volte a funcionar (LOURENÇO, 2018).

Nesses casos, a atuação da função de religamento é de suma importância, pois, dessa forma, após a atuação da função de proteção de sobrecorrente, por exemplo, o sistema é religado automaticamente após um tempo pré-definido, o “tempo-morto”.

2.3.3 Estudos das proteções

Para o desenvolvimento desse trabalho é necessário um conhecimento prévio dos equacionamentos das funções de proteção.

A modelagem da função de proteção de sobrecorrente temporizada de fase (função 51) depende da corrente de ajuste ($I_{ajuste51}$), da corrente de pick-up ($I_{pick-up51}$), do múltiplo (M_{51}), da curva IEC e do tempo de operação da função (T_{op51}).

Para determinar a corrente de ajuste utiliza-se da fórmula:

$$I_{ajuste51} = \frac{FS \times I_{m\acute{a}x}}{RTC} \quad \text{[Equação 2.3]}$$

Este valor é definido, conforme as especificações do Transformador de Corrente (TC) e dos condutores selecionados para o sistema.

Já para a corrente de pick-up utiliza-se da fórmula:

$$I_{pick-up51} = I_{ajuste51} \times RTC \quad \text{[Equação 2.4]}$$

O valor RMS da corrente é multiplicado pelo RTC para encontrar o valor da variável I_{real}

na fórmula de obtenção do múltiplo:

$$M_{51} = \frac{I_{real}}{I_{pick-up51}} \quad [\text{Equação 2.5}]$$

Por fim, o tempo de operação da função 51 é definido por:

$$T_{op51} = \frac{DTx\beta}{M_{51}^{\alpha-1}} \quad [\text{Equação 2.6}]$$

Em que α e β são definidos pela escolha da curva conforme Tabela 2.1.

Já para a modelagem da função de proteção de sobrecorrente instantânea de fase (função 50) as variáveis necessárias são a corrente de ajuste ($I_{ajuste50}$), a corrente de pick-up ($I_{pick-up50}$) e o tempo de operação da função (T_{op50}).

Para determinar a corrente de ajuste, pode-se utilizar o critério da corrente de ajuste igual a 5 a 10 vezes a corrente de pick-up da função 51:

$$I_{ajuste50} = 5 \times I_{pick-up51} \quad [\text{Equação 2.7}]$$

Novamente, para a corrente de pick-up utiliza-se da fórmula:

$$I_{pick-up50} = I_{ajuste50} \times RTC \quad [\text{Equação 2.8}]$$

Por fim, o tempo de operação da função 50 é já definido como entrada de $T_{op50} = 0,06$ s.

Para as funções de proteção de sobrecorrente de sequência negativa (46(I2) e 46(I2/I1)) as variáveis necessárias são os tempos de operação e as correntes de ajuste que são definidas previamente.

Para a função de proteção de religamento (79) as variáveis necessárias são o tempo-morto e a quantidade de religamentos automática que são definidas previamente.

2.4 Considerações finais

A revisão bibliográfica apresentada nesse capítulo serve de embasamento teórico para o desenvolvimento da modelagem e simulação das funções 50/51, 50/51N, 46 e 79 do relé digital do sistema de proteção do alimentador da rede Aquiraz apresentado no Capítulo 4.

CAPÍTULO 3 – INTRODUÇÃO AO PS SIMUL E SIMULAÇÃO DAS FUNÇÕES DE PROTEÇÃO

3.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada uma pequena introdução ao software utilizado neste trabalho e as modelagens e resultados das simulações das funções de proteção básicas do Sistema Elétrico de Potência.

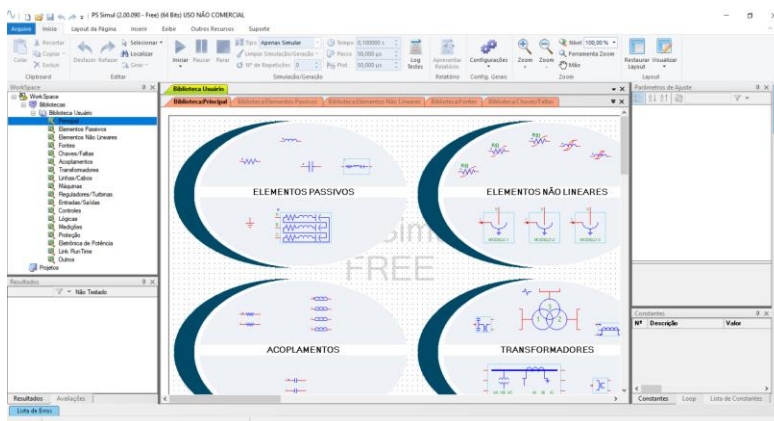
3.2 PS SIMUL

PS SIMUL é um software, desenvolvido pela empresa brasileira CONPROVE para modelagem, simulação e análise de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência. Entre as principais características do PS Simul estão (JUNIOR, 2019):

- Dispõe de um ambiente de simulação intuitivo e amigável que permite modelar e simular componentes e sistemas complexos de forma fácil e simples;
- Dispõe de uma biblioteca com mais de 400 blocos de elementos para simulação e análise de transitórios eletromagnéticos, eletromecânicos e sistemas de controle e proteção;
- Possui um manual de utilização que permite fácil domínio do software;
- Disponibiliza exemplos de modelagens de sistemas elétricos que contribui para o aprendizado das funcionalidades das janelas do software (Draft e Runtime) e fazer análise dos resultados de simulação.

Na Figura 3.1 é apresentada a tela inicial do programa PS SIMUL.

Figura 3. 1 – Tela Principal do PS SIMUL

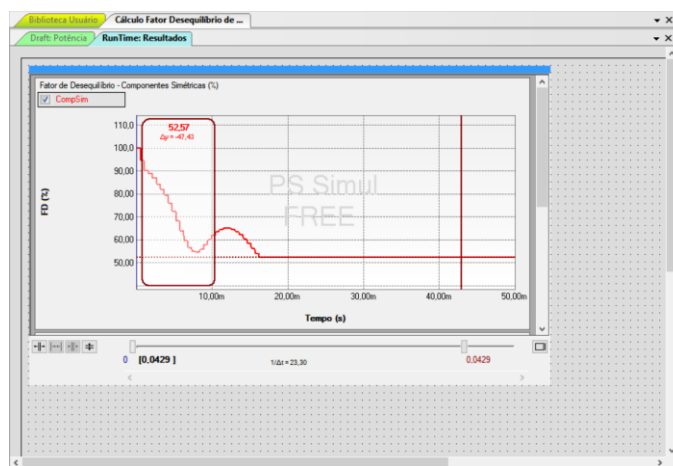


Fonte: Próprio autor.

O PS Simul possui dois ambientes diferentes, a janela determinada “Draft” e a janela determinada “Runtime”. Na janela “Draft” pode-se fazer a modelagem de sistema usando os elementos disponíveis da biblioteca, enquanto na janela de “Runtime” o usuário realiza simulações e gera gráficos para análise dos resultados.

Na Figura 3.2 é apresentado um exemplo de um resultado de simulação na janela de “Runtime” do PS SIMUL.

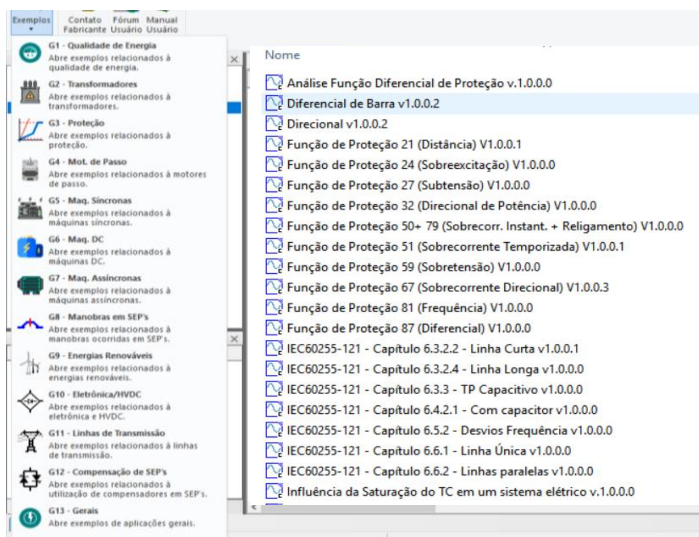
Figura 3. 2 – Tela de “Runtime” do PS SIMUL



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 3.3 são apresentados diversos exemplos de modelagens que são de fundamental importância para o aprendizado dos usuários.

Figura 3. 3 – Tela de exemplos do PS SIMUL



Fonte: Próprio autor.

3.3 Modelagem da função de proteção de sobrecorrente de fase no software PS SIMUL

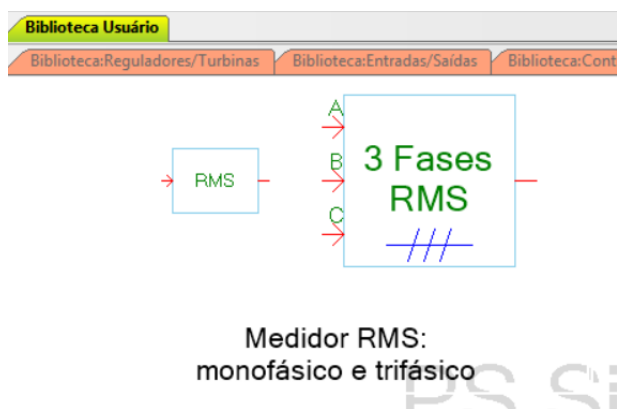
3.3.1 Aquisição de sinais

Para a modelagem das funções de sobrecorrente (50 e 51) e das funções de sequência negativa (46(I2) e 46(I2/I1)) são necessárias a obtenção de dois sinais, são eles: o valor de RMS da corrente que passa no Transformador de corrente e o valor das componentes de sequência, respectivamente.

Para isso, não é necessária nenhuma implementação de código, pois o software PS SIMUL dispõe de componentes nativos em sua biblioteca capazes de realizar essas medições.

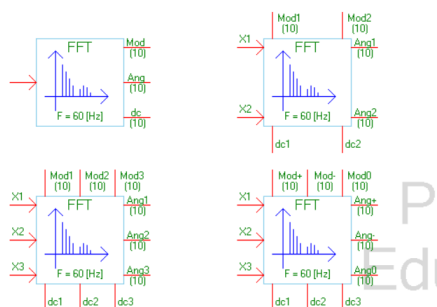
Nas Figuras 3.4 e 3.5, a seguir, são apresentados exemplos de componentes da biblioteca do PS SIMUL.

Figura 3. 4 – Biblioteca de Medição: Elementos de medição RMS



Fonte: Próprio autor.

Figura 3. 5 – Biblioteca de Medição: Elementos de Transformada de Fourier



Transformada de Fourier:

- A saída é o módulo e ângulo da decomposição harmônica até a ordem 'N'.

Fonte: Próprio autor.

3.3.2 Modelagem da função de proteção 51 no PS SIMUL

Neste trabalho foram utilizados os parâmetros de entrada para modelagem da função 51 apresentados no trabalho realizado por Lourenço (2018).

Na Tabela 3.1 são apresentados os parâmetros de entrada pré-definidos e as variáveis calculadas em Lourenço (2018).

Tabela 3. 1 – Parâmetros da função de proteção 51

Variável	Resultado	Condição
$I_{ajuste51}$	450A	Pré-definido
Tipo de curva de tempo inverso	MI	Pré-definido
Dial de tempo	0,18	Pré-definido
M_{51}	1,52	Calculado
T_{op51}	0,790s	Calculado

3.3.3 Modelagem da função de proteção 50 no PS SIMUL

Da mesma forma, obteve-se os parâmetros de entrada pré-definidos e os parâmetros calculados conforme os resultados obtidos em Lourenço (2018) e nas equações apresentadas no capítulo 2.

Na tabela 3.2 são apresentados os resultados dessas variáveis.

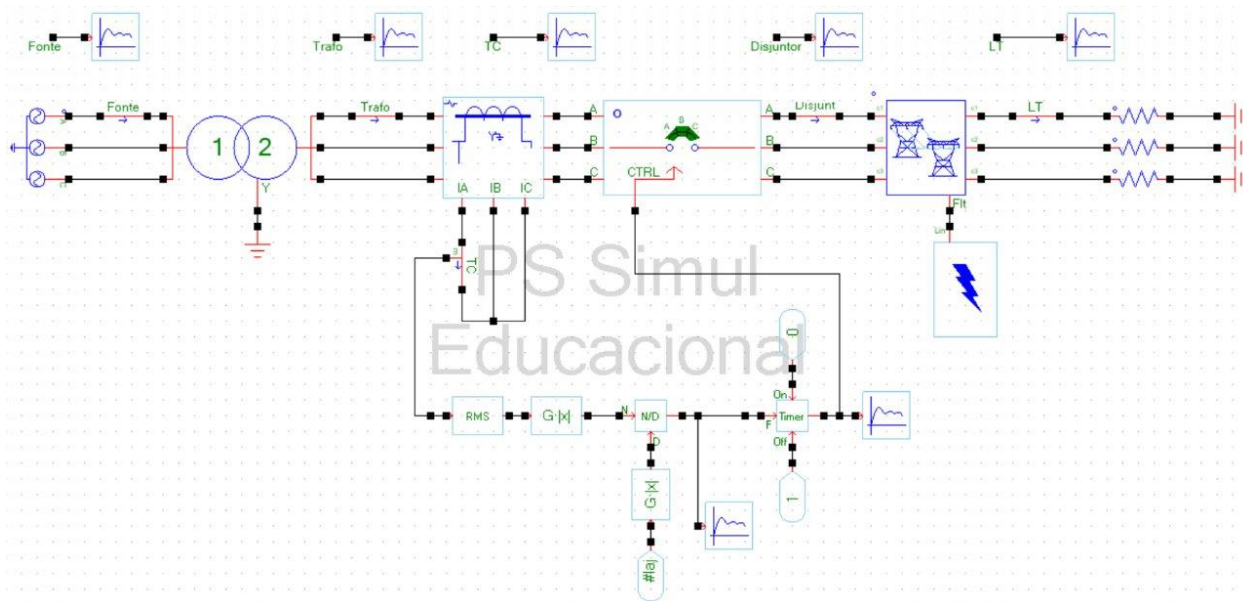
Tabela 3. 2 - Parâmetros da função de proteção 50

Variável	Resultado	Condição
$I_{ajuste50}$	2,25kA	Calculado
T_{op50}	0,06s	Pré-definido
RTC	1	Pré-definido
M_{50}	1,1	Calculado

3.3.4 Simulação da função de proteção de sobrecorrente 51 no PS SIMUL

Na Figura 3.6 é apresentado a modelagem do transformador da subestação Aquiraz, do alimentador e do sistema de proteção da função 51.

Figura 3. 6 – Modelagem da rede elétrica e da função 51



Fonte: Próprio autor.

O modelo da subestação e do alimentador de distribuição em média tensão é composto por uma fonte senoidal trifásica de 13,8 kV alimentando um transformador (delta-estrela aterrado), seguido de um transformador de corrente e um disjuntor que se encontra naturalmente fechado, com uma linha de transmissão de 10 km de extensão que leva até as cargas compostas por resistências simples.

A lógica de acionamento do modelo da função 51 do relé está relacionada com o Múltiplo da função 51 (M_{51}) e com o tempo de operação (Top_{51}). Pode-se observar na Figura 3.6 que o TC está conectado a um bloco do software denominado “Medição de RMS”.

Toda a parte da modelagem matemática é feita dentro do próprio ambiente de “Draft” através dos blocos de operações matemáticas da biblioteca de Controle. Portanto, esse valor de RMS da corrente é multiplicado pelo RTC dentro do bloco “Ganho”, mostrado no circuito da Figura 3.6 como $G \cdot |X|$. Esse resultado é dividido pelo valor da corrente de pick-up da função 51 ($I_{pick-up51}$) através do bloco de divisões N/D mostrado na Figura 3.6. Vale lembrar que a corrente de pick-up da função 51 foi definida, previamente, como a multiplicação da corrente de ajuste da função 51 ($I_{ajuste51}$) pelo RTC, sendo necessário, então, definir essas duas constantes dentro do ambiente de “Draft”. Ao final dessas operações, obtém-se o resultado do Múltiplo da função 51.

Para o acionamento do disjuntor utilizou-se do bloco “Timer” que funciona da seguinte

maneira:

1. Possui 3 parâmetros de entrada (F, ON, OFF) e uma saída;
2. Possui 3 valores de ajuste interno (Valor de Controle, Atraso de Tempo Sinal ON, Duração Sinal ON);
3. Valor de saída igual ao valor definido em OFF enquanto a entrada for menor que o valor definido em Valor de Controle;
4. A saída igual ao valor definido em ON, durante o tempo definido em Duração Sinal ON, após a entrada ser maior que o valor definido em Valor de Controle e após o tempo definido em Atraso de Tempo Sinal ON.

Portando, os ajustes feitos nesse bloco foram:

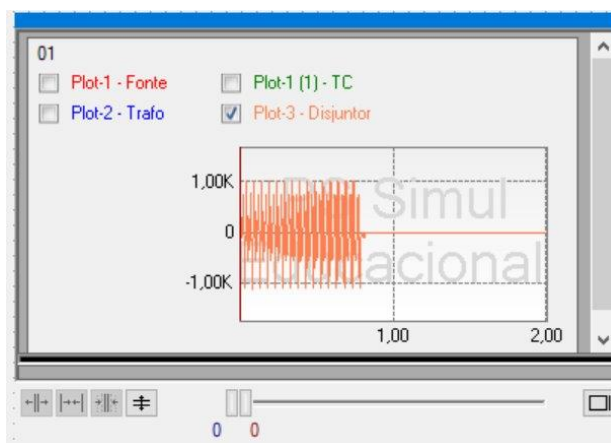
1. Entrada F = Múltiplo função 51 (M_{51});
2. Sinal ON = Constante definida como zero (0);
3. Sinal OFF = Constante definida como um (1);
4. Valor de Controle = 1;
5. Atraso de Tempo Sinal ON = Top_{51} ;
6. Duração Sinal ON = 10 s (para efeitos de simulação).

Seguindo a lógica do bloco, então, quando o múltiplo é menor que 1 o disjuntor está recebendo sinal 1 (continua fechado) e sempre que o múltiplo é maior que 1 o disjuntor irá receber sinal 0 (irá abrir) após o tempo de operação da função 51 (Top_{51}) e continua aberto por 10 s (tempo definido para efeitos somente de simulação).

Por fim, a biblioteca do sistema possui o bloco de simulação de falta (curto-circuito) da linha. Uma falta foi simulada na fase do circuito trifásico nos 100 m de uma Linha de Transmissão com 10 km de extensão.

Na Figura 3.7 é apresentado o gráfico ilustrando os resultados da simulação da falta e atuação da função 51 no ambiente “Runtime”.

Figura 3. 7 – Gráfico de atuação do Circuito Função 51



Fonte: Próprio autor.

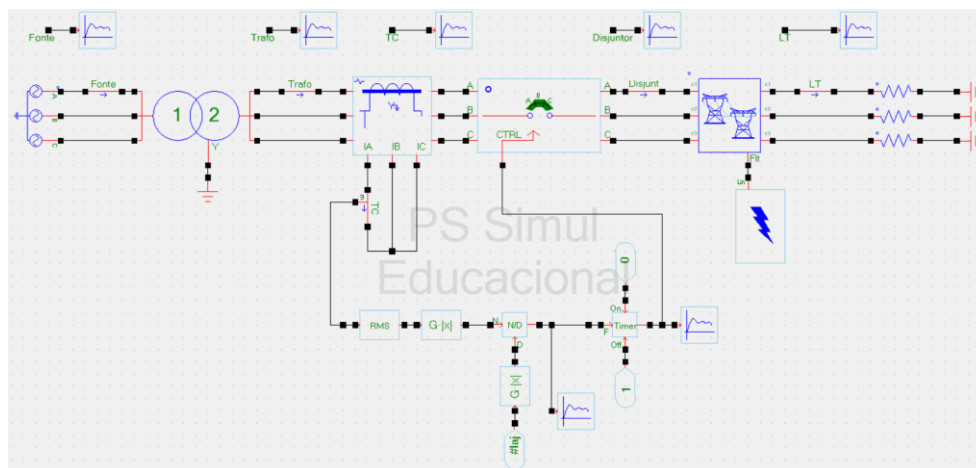
Na Figura 3.7 é apresentado o comportamento da corrente na saída do disjuntor. Ou seja, depois de ocorrer a falta, o disjuntor atuou corretamente abrindo o sistema e impedindo que continuasse a circular corrente pelo circuito.

3.3.5 Simulação da função de proteção de sobrecorrente 50 no PS SIMUL

A função de sobrecorrente instantânea de fase (função 50) também foi modelada no software PS SIMUL. Os dados de entrada do sistema são a corrente de ajuste e o tempo de operação da função 50 apresentados na Tabela 3.2.

Na Figura 3.8 é apresentada a modelagem da rede elétrica e da função 50.

Figura 3. 8 – Modelagem da rede elétrica e da função 50



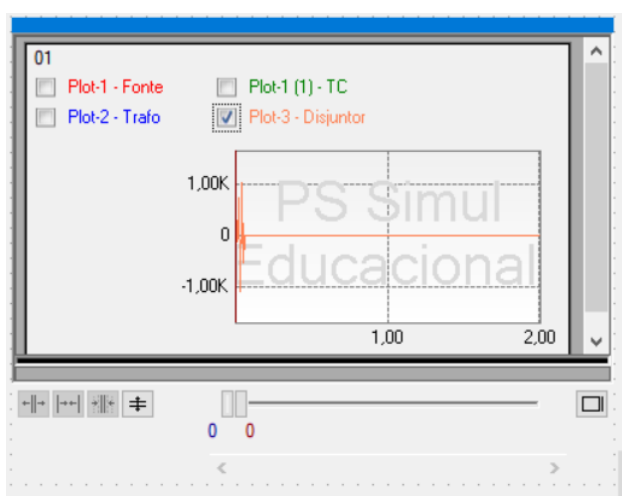
Fonte: Próprio autor.

O software permite utilizar o mesmo modelo para as funções de proteção de sobrecorrente

50 e 51.

A lógica de funcionamento do circuito, assim como a de atuação do disjuntor não se alterou. Na Figura 3.9 é apresentado o gráfico ilustrando os resultados da simulação da falta de interrupção da corrente pelo disjuntor a partir da atuação da função 50.

Figura 3. 9 - Gráfico de atuação do Circuito Função 50



Fonte: Próprio autor.

No gráfico apresentado no ambiente de “Runtime” da Figura 3.9 é apresentada a atuação instantânea da proteção de sobrecorrente após a ocorrência da falta no sistema.

3.4 Modelagem da função de proteção de sobrecorrente de sequência negativa no software PS SIMUL

Para a modelagem da função de proteção de sobrecorrente negativa (função 46) a abordagem é bastante semelhante à simulação da função 50 (proteção instantânea).

Obteve-se os parâmetros de entrada com base no trabalho realizado por LOURENÇO (2018). A Tabela 3.3 a seguir, apresenta os resultados obtidos.

Tabela 3. 3 - Parâmetros da função de proteção 46

Variável	Resultado	Condição
$I_{ajuste46(I2)}$	80 A	Pré-definido
$I_{ajuste46(I2/I1)}$	24 A	Pré-definido
$T_{op46(I2)}$	1s	Pré-definido
$T_{op46(I2/I1)}$	2s	Pré-definido

Em seguida, foi preciso obter o fasor da corrente de sequência negativa do circuito. Para isso utilizou-se Transformada Rápida de Fourier (FFT) por ser mais rápida e prática segundo Lourenço (2018). O software PS SIMUL dispõe de um bloco pronto para obtenção desse tipo de resultado na sua biblioteca de Medição, como mostrado na Figura 3.5.

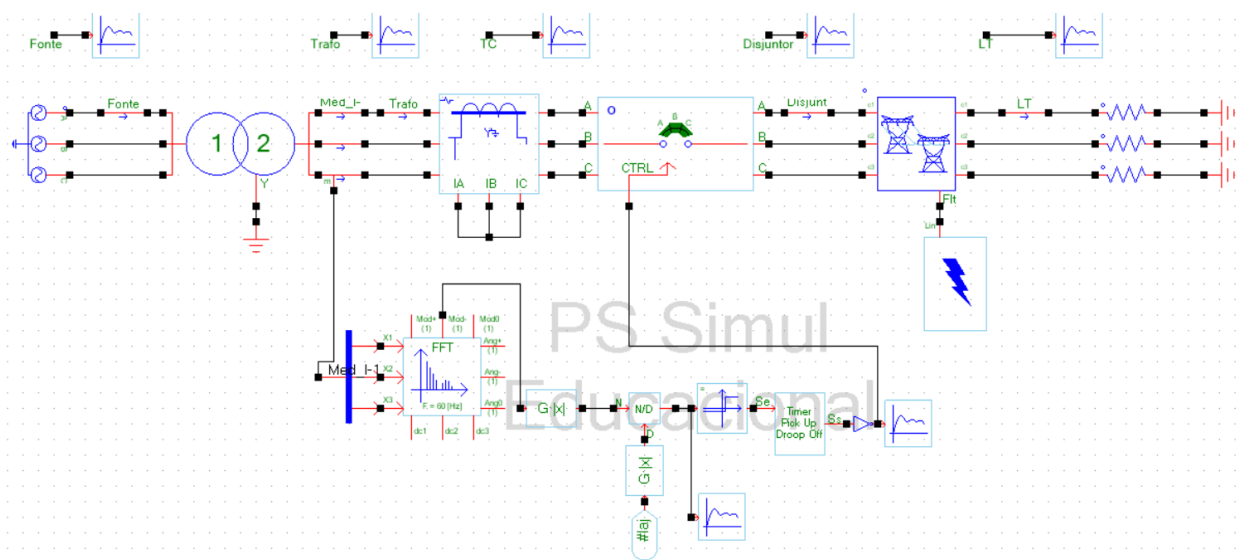
O bloco também já vem preparado para mostrar o resultado em valor RMS (se essa for a opção do usuário final). Desta forma, nesse circuito não foi necessário utilizar o bloco RMS como nas outras simulações.

A lógica para obtenção do múltiplo foi a mesma utilizada anteriormente para a função 50.

Na modelagem do acionamento do disjuntor utilizou-se um bloco diferente dos usados anteriormente, mas com a mesma funcionalidade. O disjuntor atua se a corrente for maior que a corrente de pick-up (múltiplo maior que 1) e o tempo for maior que o tempo de operação previamente definido.

A Figura 3.10 é apresentado o modelo da função 46.

Figura 3. 10 – Modelagem da rede elétrica e da função 46(I2)

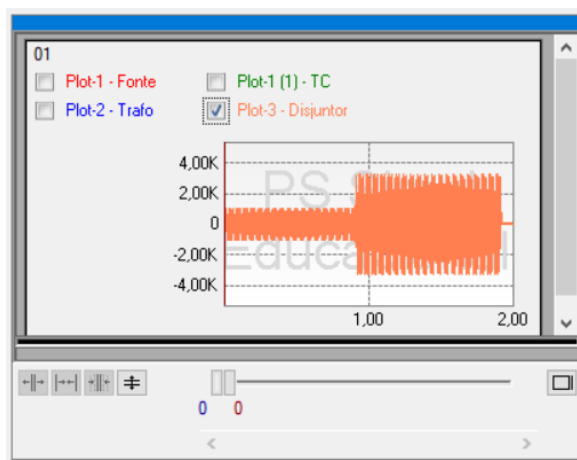


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 3.10 pode-se observar que a saída do bloco FFT (sequência negativa) está sendo conectada nos blocos de operações matemáticas para obtenção do resultado de lógica de acionamento do disjuntor.

Os resultados obtidos são mostrados no gráfico apresentado na Figura 3.11.

Figura 3. 11 - Gráfico de atuação do Circuito Função 46(I2)



Fonte: Próprio autor.

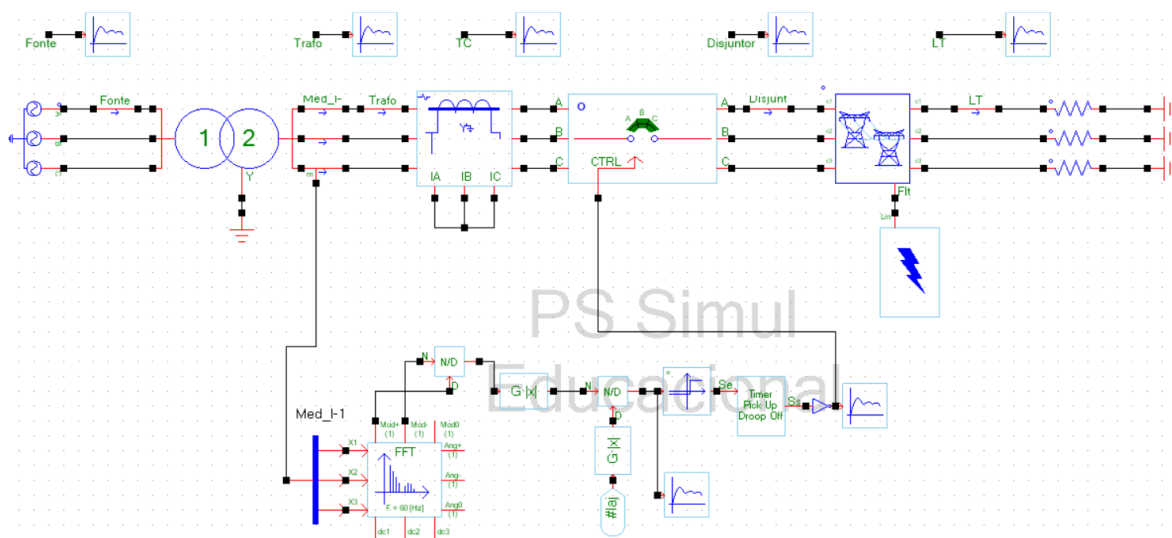
Na Figura 3.11, pode-se observar na corrente medida logo após o disjuntor que há um comportamento normal de corrente no circuito até o momento da falta, que ocorre por volta de 0,9s. Após esse momento, percebe-se um aumento drástico na corrente, o que significa que o disjuntor deve atuar. Esta ação do disjuntor é percebida logo após passar o tempo de operação da função 46(I2), definido previamente como duração de 1 s. Estando o circuito, assim, protegido no final.

3.5 Modelagem da função de proteção de sobrecorrente de sequência negativa (critério I2/I1) no software PS SIMUL

Para esse segundo critério de simulação da proteção de sobrecorrente de sequência negativa, foram feitos apenas alguns ajustes no circuito anterior.

Na Figura 3.12 é apresentada a modelagem da rede elétrica e da função 46(I2/I1).

Figura 3. 12 – Modelagem da rede elétrica e da função 46(I2/I1)

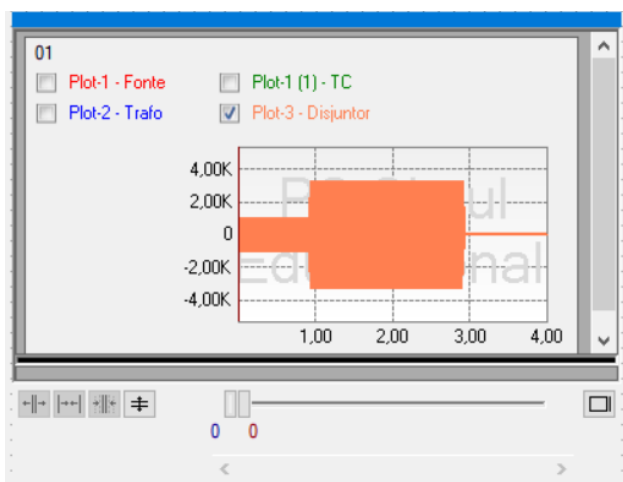


Fonte: Próprio autor.

A diferença entre os dois circuitos das Figuras 3.10 e 3.12 está na adição do bloco de operação matemática “N/D”. Com ele é possível obter a relação $I2/I1$. Além disso ajustou-se os valores das constantes da corrente de ajuste e tempo de operação.

Na Figura 3.13 é apresentado o gráfico ilustrando os resultados da simulação da falta de interrupção da corrente pelo disjuntor a partir da atuação da função 46($I2/I1$).

Figura 3. 13 - Gráfico de atuação do Circuito Função 46($I2/I1$)



Fonte: Próprio autor.

Como se pode observar, o disjuntor atuou corretamente após a falta ocorrer e respeitando o tempo de operação da função de proteção, definido previamente como 2s.

3.6 Modelagem da função de proteção de religamento no software PS SIMUL

Para a simulação da função de religamento (função 79) é necessário a modelagem de um circuito que atue em conjunto com alguma outra função de proteção. Para isso, escolheu-se a função de proteção de sobrecorrente instantânea (função 50).

Assim, o princípio de funcionamento da função 50 é o mesmo descrito anteriormente, ou seja, caso a corrente do circuito ultrapasse a corrente limite estabelecida, será enviado um sinal de TRIP para atuação do disjuntor impedido a passagem de corrente no circuito. Agora, com a função de religamento também implementada, aumenta-se uma variável no circuito, denominada “Tempo morto”.

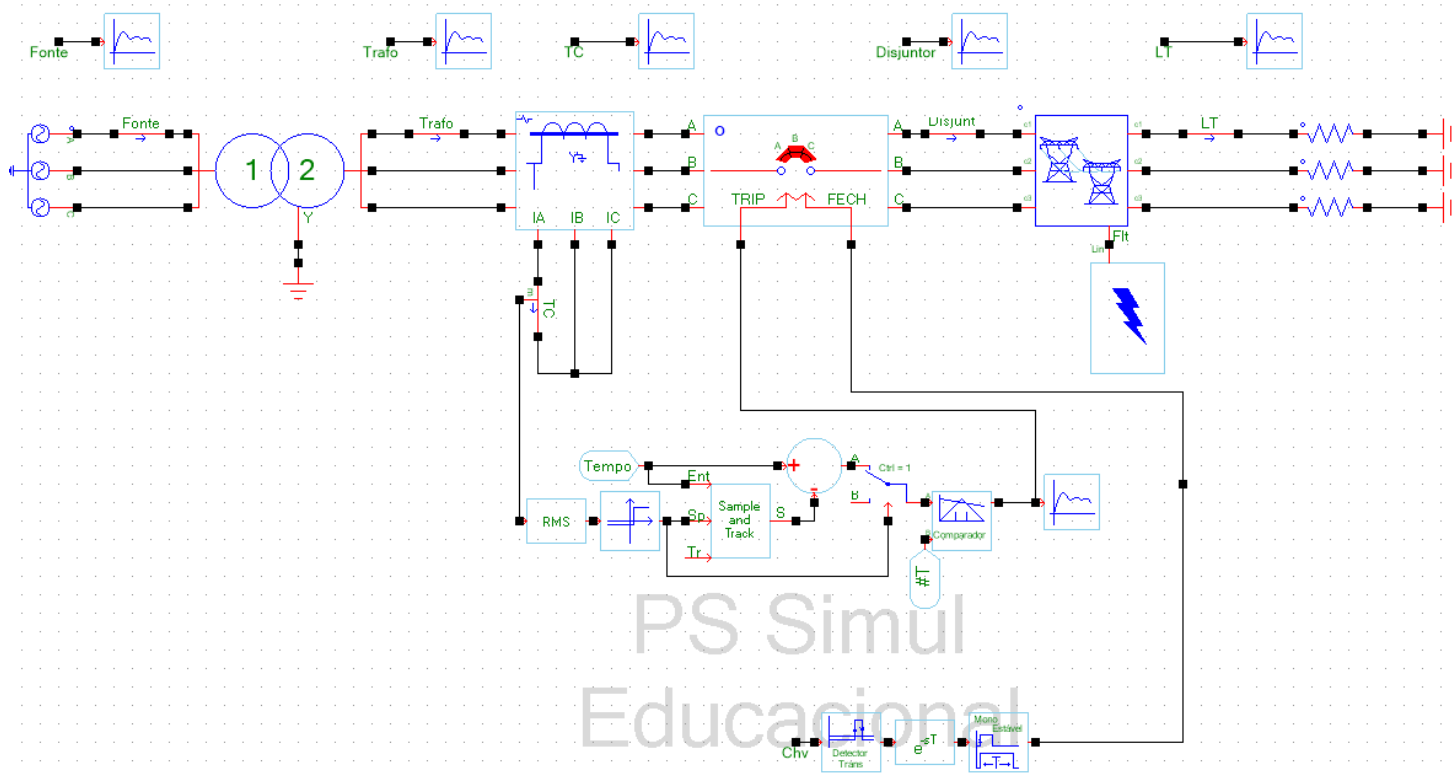
A função de religamento irá atuar enviando um sinal para o disjuntor para que ele permita novamente a passagem de corrente no circuito. O “Tempo morto”, que é definido como uma das variáveis de entrada, será o tempo que a função deve esperar até enviar o sinal para o disjuntor.

Como já explicado no Capítulo 2, Introdução teórica, a função de religamento é de bastante utilidade para os casos de faltas passageiras, pois caso o circuito se estabilize novamente, sem a necessidade da saída da zona do sistema, a corrente que irá passar não será maior que a mínima estabelecida na função 50, portanto o circuito voltará a agir normalmente sem a necessidade de intervenção humana.

Algumas alterações foram feitas nos circuitos anteriores para a simulação correta da função de religamento (79). O circuito base para a modelagem deste a seguir pode ser encontrado nos exemplos oferecidos dentro da própria plataforma PS SIMUL.

A Figura 3.14 apresenta o circuito final da simulação da função 79.

Figura 3.14 - Circuito Função 79



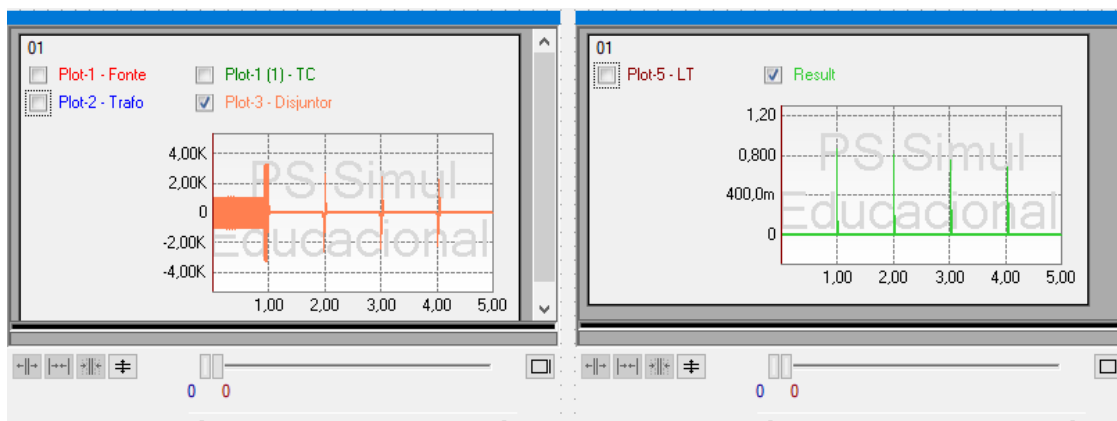
Fonte: Próprio autor.

A parte da operação da função 50 é a mesma mostrada anteriormente, porém montada com novos blocos da biblioteca de elementos.

A parte da modelagem da função 79 encontra-se nos blocos da parte inferior do circuito. Apresenta uma chave conectada diretamente ao disjuntor, que foi habilitado para permitir medições internas e para receber sinal de fechamento. Possui também um bloco de detector de nível de transição e outro para esperar o tempo morto (pré-definido como 1 s). Por fim, possui um bloco de função de pulso para enviar o sinal para o fechamento do disjuntor.

Na Figura 3.15 é apresentado dois cenários de simulação: no gráfico (a) a corrente no disjuntor e no gráfico (b) o sinal para acionamento do disjuntor.

Figura 3. 15 - Gráficos de atuação do Circuito Função 79



(a)

(b)

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 3.15 (a) é observado o comportamento das funções que atuaram corretamente após a falta no sistema. Pelo fato de ser uma falta permanente a atuação da função 50 foi correta ao enviar novamente para o disjuntor o sinal de TRIP impedindo a passagem de corrente. Na Figura 3.15 (b) é observado o sinal enviado para o disjuntor para religamento.

3.7 Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas as principais características do PS SIMUL, além de ter sido mostrado os resultados das simulações básicas das funções de proteção. Com isso, pôde-se explicar sobre os princípios de funcionamento das proteções aplicadas com os blocos do software.

CAPÍTULO 4 – MODELAGEM DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DO ALIMENTADOR E COMPARAÇÃO COM O SOFTWARE ATP-DRAW

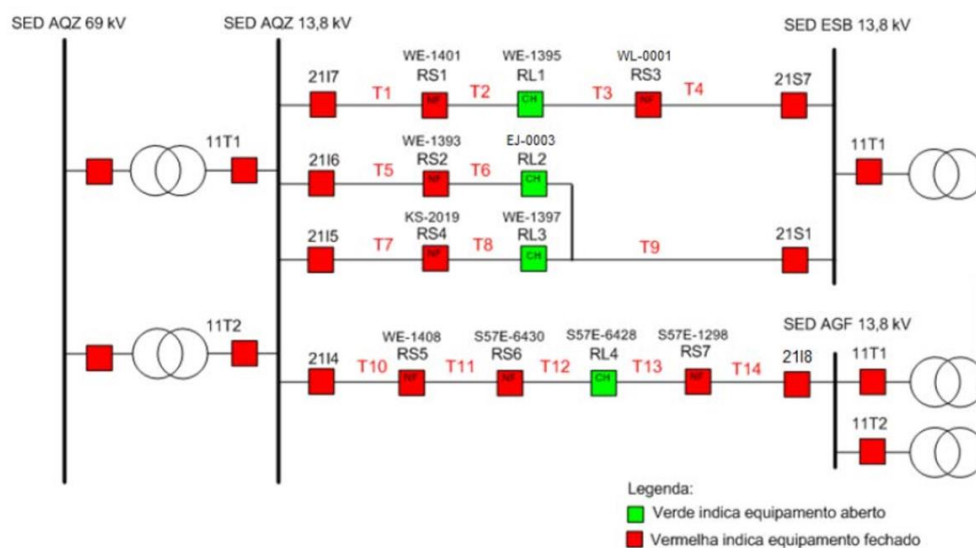
4.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada a rede de distribuição de energia utilizada no estudo e a modelagem de um dos alimentadores dessa rede e do seu sistema de proteção utilizando o software PS SIMUL. A simulação do sistema de proteção de um alimentador da rede Aquiraz conforme as mesmas condições e especificações do estudo realizado por (LOURENÇO, 2018). A simulação desse sistema no trabalho de (LOURENÇO, 2018) foi feita utilizando o software ATP-Draw. A simulação, realizada neste trabalho, foi feita utilizando o software PS SIMUL. Portanto, o objetivo deste capítulo é comparar a utilização dos dois softwares.

4.2 Rede de distribuição de Energia de Aquiraz

Na Figura 4.1 é mostrado o diagrama unifilar da rede de distribuição de energia de Aquiraz, cidade do interior do Ceará, localizada a 50 km da capital Fortaleza utilizada nesse estudo. Conforme pode ser observado na Figura 4.1, a rede de distribuição de Aquiraz possui topologia radial com recurso.

Figura 4. 1 - Diagrama unifilar Rede de distribuição Aquiraz



Fonte: Rodrigues, 2015.

Na Tabela 4.1 é apresentado o resumo dos dados dos trechos T1 e T2 do alimentador AQZ0117 da SED AQZ e dos trechos T3 e T4 do alimentador ESB01S7 da SED ESB.

Tabela 4. 1 - Dados dos alimentadores AQZ0117 e ESB01S7 da rede Aquiraz

DADO	DETALHE	RESULTADO
Comprimento da linha (km)	-	8,9
Corrente (A)	Trecho T1	23
Corrente (A)	Trecho T2	57
Corrente (A)	Trecho T3	75
Corrente (A)	Trecho T4	105
Sequência positiva do condutor CAA 266,8 MCM - R (Ω/km)	Trecho T1, T2, T3 e início de T4	0,2391
Sequência positiva do condutor CAA 266,8 MCM - X (Ω/km)	Trecho T1, T2, T3 e início de T4	0,38
Sequência zero do condutor CAA 266,8 MCM - R (Ω/km)	Trecho T1, T2, T3 e início de T4	0,416
Sequência zero do condutor CAA 266,8 MCM - X (Ω/km)	Trecho T1, T2, T3 e início de T4	1,56
Sequência positiva do condutor Spacer 240 mm ² - R (Ω/km)	Trecho T4	0,125
Sequência positiva do condutor Spacer 240 mm ² - X (Ω/km)	Trecho T4	0,2409
Sequência zero do condutor Spacer 240 mm ² - R (Ω/km)	Trecho T4	0,302
Sequência zero do condutor Spacer 240 mm ² - X (Ω/km)	Trecho T4	2,158
Impedância equivalente na barra de 13,8 kV – sequência positiva – R (pu)	Subestação Aquiraz	0,0138
Impedância equivalente na barra de 13,8 kV – sequência positiva – X (pu)	Subestação Aquiraz	0,4439
Impedância equivalente na barra de 13,8 kV – sequência positiva – R (pu)	Subestação Eusébio	0,0389
Impedância equivalente na barra de 13,8 kV – sequência positiva – X (pu)	Subestação Eusébio	0,5105
Impedância equivalente na barra de 13,8 kV – sequência zero – R (pu)	Subestação Aquiraz	0
Impedância equivalente na barra de 13,8 kV – sequência zero – X (pu)	Subestação Aquiraz	0,3453
Impedância equivalente na barra de 13,8 kV – sequência zero – R (pu)	Subestação Eusébio	0
Impedância equivalente na barra de 13,8 kV – sequência zero – X (pu)	Subestação Eusébio	0,6335

Com esses dados iniciais, foi possível obter as correntes de curto-circuito. Novamente, como o objetivo do capítulo é a comparação entre os dois softwares de simulação, obteve-se os

dados conforme os resultados apresentados em (LOURENÇO, 2018) e (VIEIRA, 2015).

Na Tabela 4.2 são apresentados os dados de corrente de curto.

Tabela 4. 2 - Dados de corrente de curto-circuito do sistema

Detalhe	Corrente de curto Trifásico (A)	Corrente de curto Bifásico (A)	Corrente de curto Monofásico (A)	Corrente de curto Fase-Terra mínimo (A)
Alimentador AQZ0117 - T1	2719,9	2355,5	1678,6	78,4
Alimentador AQZ0117 - T2	2210,5	1914,3	1327,5	78,1
Alimentador ESB01S7 - T3	4000	3464,2	2715,2	79
Alimentador ESB01S7 - T4	5989,8	5187,3	4762,1	79,4

Conforme a teoria apresentada nos capítulos anteriores, foi possível obter os dados de entrada para as proteções do sistema.

Na Tabela 4.3 é apresentado um resumo dos valores obtidos por Lourenço (2018).

Tabela 4. 3 - Dados de ajuste das proteções

Elemento	RTC	Proteção	Tape 51/51N	Corrente de pickup	Dial	Tipo de curva	Tape 50/50N	Instantâneo
2117	100	Fase	5	500	0,26	MI	50	5000
		Neutro	0,26	26	0,64	MI	15	1500
RS1	200	Fase	2,25	450	0,18	MI	11,5	2300
		Neutro	0,12	24	0,22	MI	2,4	480
21S7	120	Fase	4,17	500	0,125	MI	51,67	6200
		Neutro	0,2	24	0,425	MI	12,5	1500
RS3	200	Fase	2,25	450	0,09	MI	25	5000
		Neutro	0,12	24	0,22	MI	1,65	330

4.3 Modelagem do alimentador

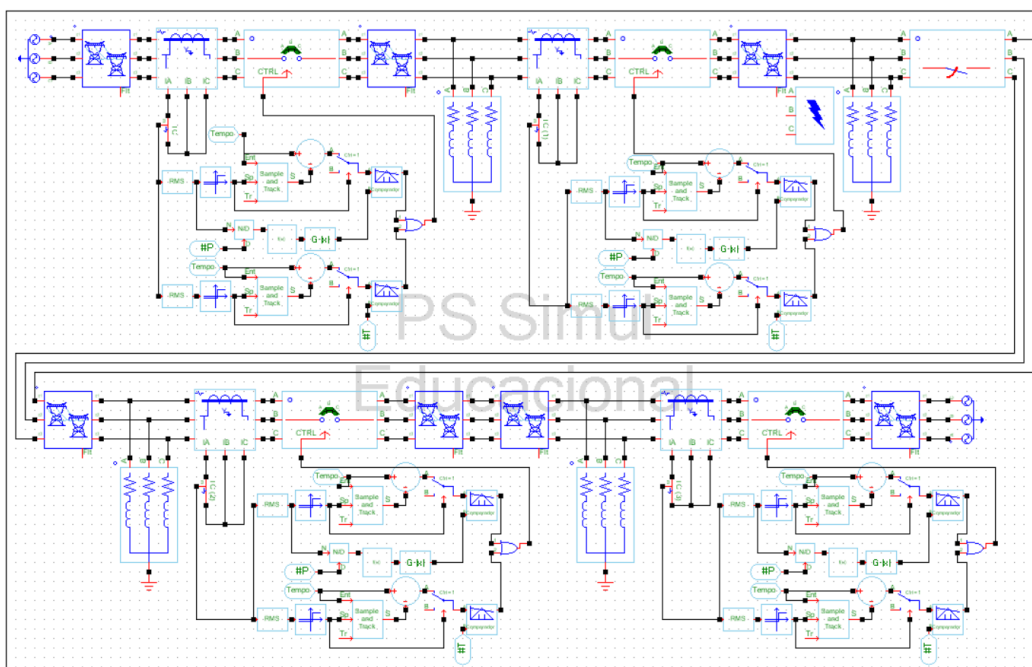
Para fins de simulação, optou-se por simular a situação de curto-circuito monofásico com a falta sendo na fase A e localizada no final do trecho T2. Como já mencionado anteriormente, o software PS SIMUL possui seu próprio bloco de falta, sendo necessário apenas ajustar seus parâmetros conforme queira adicioná-lo no circuito. Os parâmetros ajustados na falta monofásica são os mesmos mostrados na Figura 4.6 alterando somente os seguintes campos: “Nº Fases” = 1 e “Falta para Linha” = SIM.

A modelagem da rede apresentada na Figura 4.1 foi baseada tanto nos circuitos de estudo prévio demonstrados no capítulo 3 quanto nos estudos realizados nos trabalhos de (LOURENÇO,

2018) e (VIEIRA, 2015).

Na Figura 4.2 é apresentado o resultado da modelagem dos alimentadores de distribuição e do seu sistema de proteção.

Figura 4. 2 - Modelagem da Rede de distribuição Aquiraz



Fonte: Próprio Autor.

Novamente, para efeito de comparação entre os softwares, utilizou-se o mesmo modelo de simulação apresentado por (LOURENÇO, 2018).

Os dados da fonte trifásica, que representa a subestação, encontram-se na Tabela 4.4.

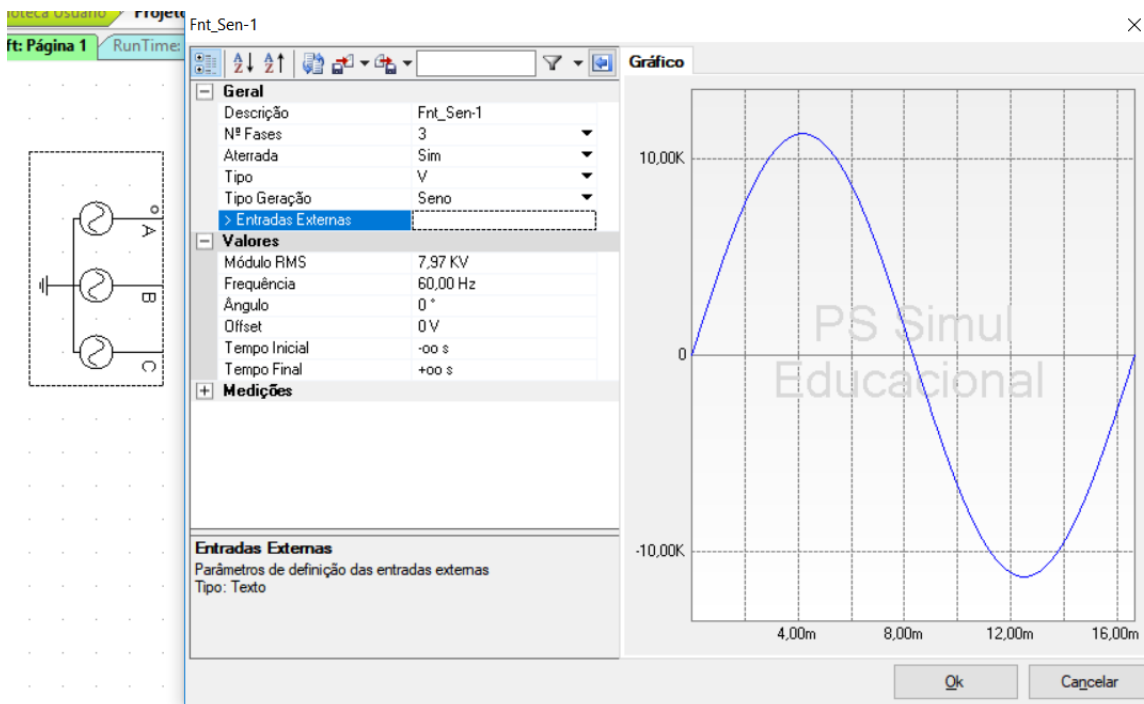
Tabela 4. 4 - Dados da fonte trifásica

Dado	Resultado
Nº de fases	3
Aterrada	sim
Tipo	V (tensão)
Tipo Geração	Seno
Módulo RMS	7,97 kV
Frequência	60Hz
Ângulo	0

Na Figura 4.3 são apresentadas as configurações que devem ser feitas no software PS

Simul.

Figura 4. 3 - Configurações da fonte trifásica



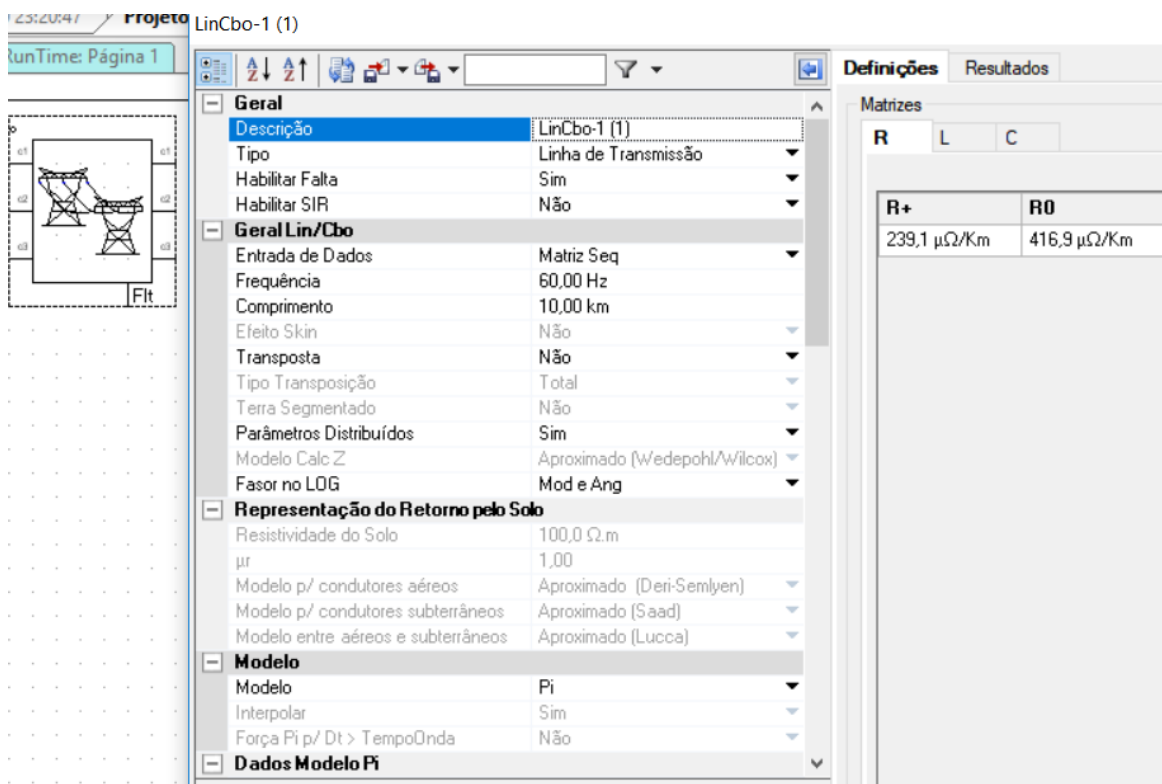
Fonte: Próprio Autor.

Os dados da impedância reduzida das barras e de todas as linhas do sistema, assim como as configurações que devem ser feitas no software, encontram-se na Tabela 4.5 e estão representados na Figura 4.4, respectivamente.

Tabela 4. 5 - Dados da impedância reduzida das barras

Dado	Resultado
R0	0,4169 Ω /Km
R+	0,2391 Ω /Km
L0	1,559 Ω /Km
L+	0,380 Ω /Km
C0	0 Ω /Km
C+	0 Ω /Km
Comprimento	Variável

Figura 4. 4 - Configurações da impedância reduzida das barras

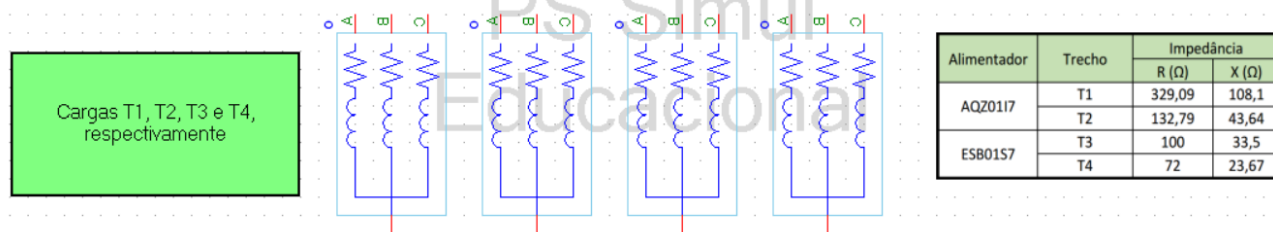


Fonte: Próprio Autor.

A modelagem das cargas foi feita com base com base nos dados fornecidos pela equipe de suporte da empresa Conprove.

As configurações das cargas estão representadas na Figura 4.5.

Figura 4. 5 - Configurações das cargas

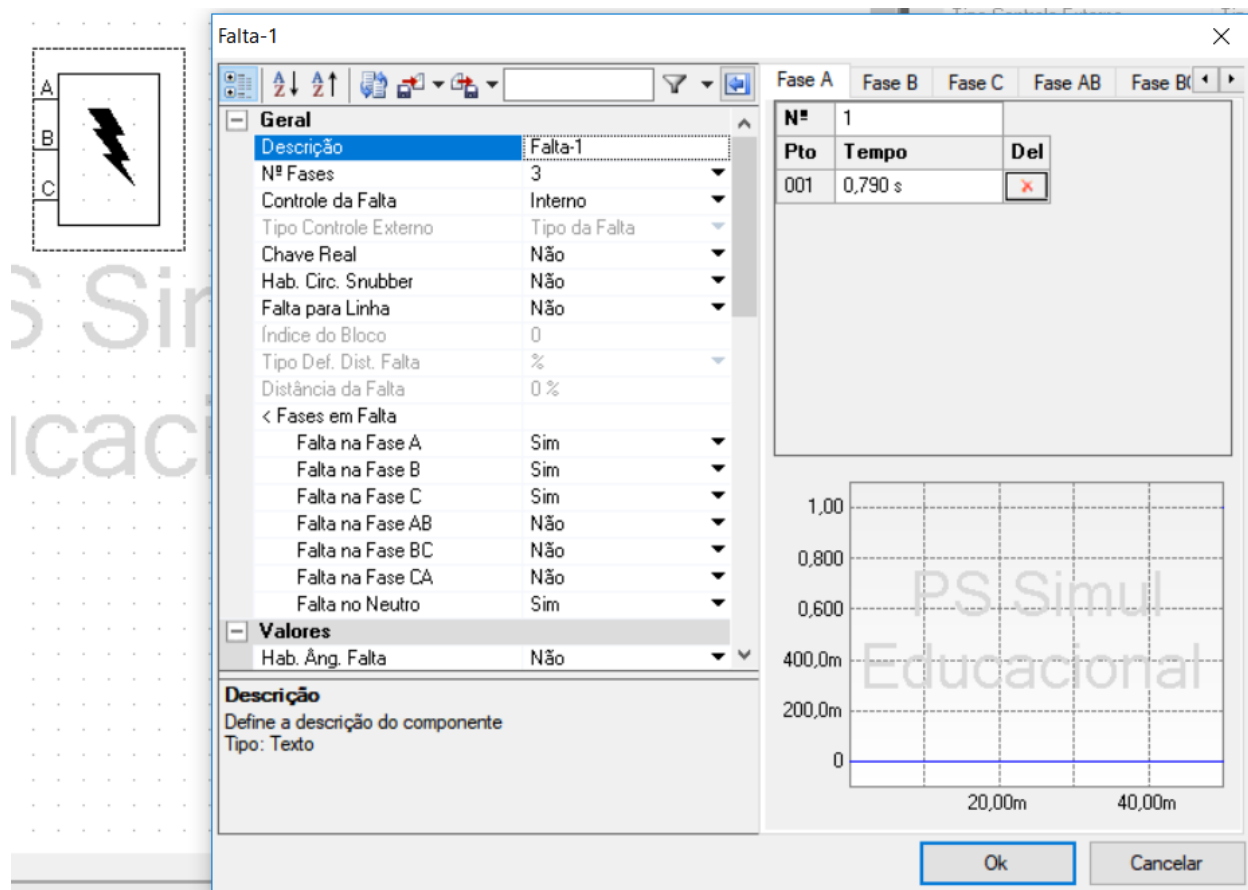


Fonte: Próprio Autor.

A modelagem do curto-circuito pode ser feita para todos os tipos de curto: Trifásico, Bifásico, Monofásico e Monofásico Mínimo. Este elemento é nativo da biblioteca de componentes do PS SIMUL, diferente do observado no software ATP-Draw.

Na Figura 4.6 são apresentadas as configurações do curto trifásico.

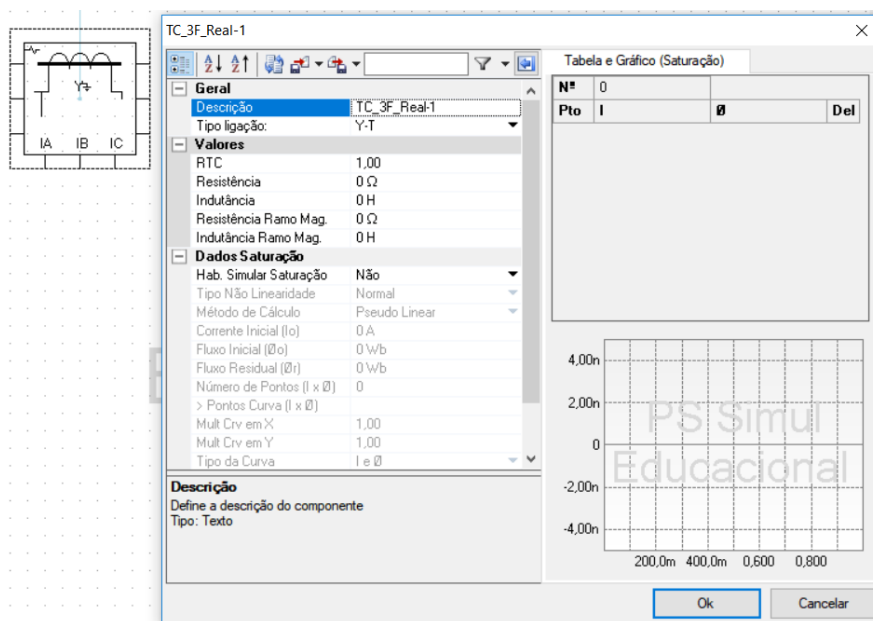
Figura 4. 6 - Configurações do curto trifásico



Fonte: Próprio Autor.

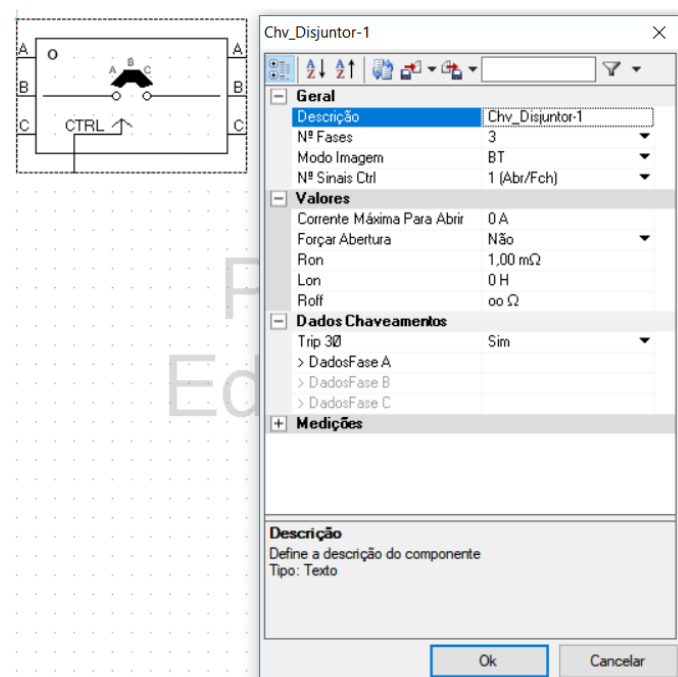
Os elementos Transformador de Corrente e disjuntor serão os mesmos apresentados no Capítulo 3. As Figuras 4.7 e 4.8 representam as configurações desses dois blocos, respectivamente, no software PS SIMUL.

Figura 4. 7 - Configurações do TC



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4. 8 - Configurações do Disjuntor



Fonte: Próprio Autor.

4.4 Motivação

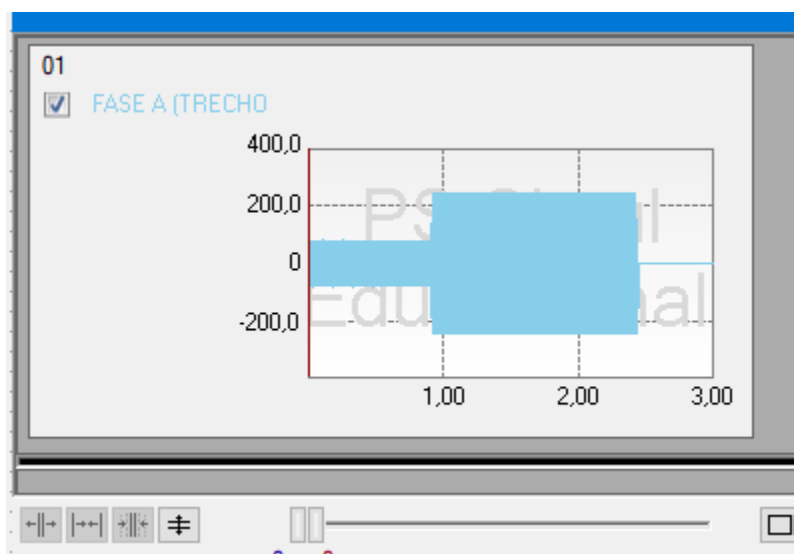
Dado o fato que o objetivo do trabalho é a validação do software de simulação PS SIMUL através da comparação com o estudo realizado no software ATP-Draw, não será dado enfoque nas aquisições dos dados, mas somente nos resultados da modelagem em si e no modo de como a modelagem foi montada no software. Todos os dados do sistema foram obtidos nos trabalhos realizados por (LOURENÇO, 2018) e (VIEIRA, 2015).

4.5 Simulação

Nesse momento, realizou-se a simulação sem a presença do religador. Pôde-se constatar a correta atuação do relé RS1 e a manutenção da corrente no trecho 1 do circuito.

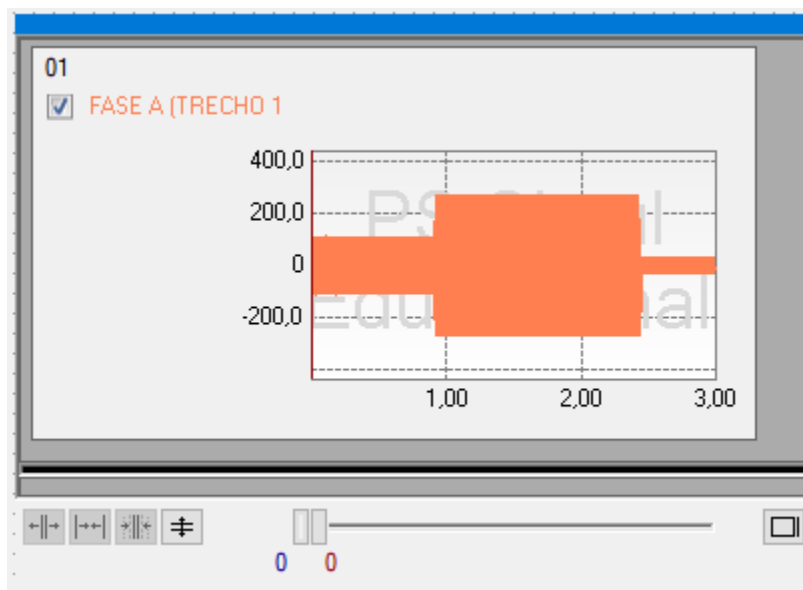
Observe os resultados nas Figuras 4.9 e 4.10.

Figura 4. 9 - Atuação de RS1



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4. 10 - Atuação de 21I7



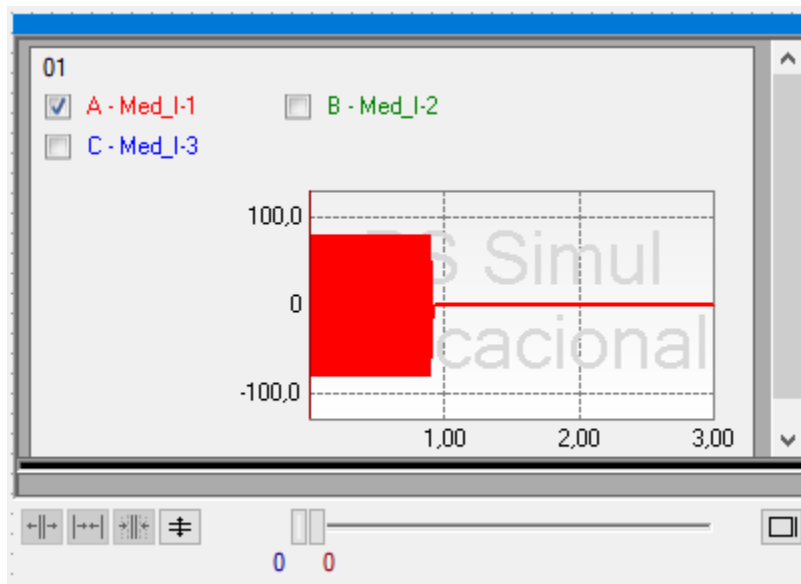
Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 4.9 observa-se a correta atuação de RS1 pois a partir do momento do curto-circuito monofásico, que foi setado para ocorrer em 0,790s, observa-se um aumento da corrente no sistema, que ultrapassa o mínimo necessário para atuação do relé e este, por sua vez, atua com a função de sobrecorrente temporizada (função 51). Ou seja, ele atua mandando uma mensagem de TRIP para o disjuntor, após seu tempo de operação definido conforme os parâmetros estabelecidos anteriormente, fazendo com que o mesmo impeça a passagem de corrente no restante do circuito. Em outras palavras, após o sinal do relé a proteção atuou isolando aquela zona do sistema.

Na Figura 4.10 observa-se a correta atuação de 21I7, pois após a atuação do relé a jusante, ou seja, relé RS1, ele se manteve estável não enviando a mensagem de TRIP para o disjuntor e permitindo a passagem de corrente naquele trecho do circuito. Caso os dois relés não estivessem coordenados entre si, os dois provavelmente teriam feito sua zona de proteção sair do sistema, o que é bastante prejudicial para a rede.

Para fins de estudo, a Figura 4.11 representa a corrente na fase A após a falta no final do trecho 2.

Figura 4. 11 - Corrente na fase A



Fonte: Próprio Autor.

4.6 Conclusão

Assim, pode-se comprovar que a utilização do software PS SIMUL é de mais fácil utilização que o software ATP-Draw. Para a simulação do mesmo circuito, sob os mesmos parâmetros, obteve-se os mesmos resultados daqueles apresentados em (LOURENÇO, 2018), porém com um esforço bem menor por parte do estudante na utilização do software.

Pode-se observar em Lourenço (2018) que para modelagem das funções de proteção dos relés foi necessária uma programação em Models no ATP, enquanto no software PS SIMUL todas as modelagens foram feitas utilizando somente os blocos disponibilizados na plataforma.

Da mesma forma para a modelagem de acionamento do disjuntor foram necessários utilização de chaves e comandos vindos do Models, o que dificulta bastante o aprendizado dos estudantes que queiram realizar modelagens simples como aquelas apresentadas no capítulo 3.

Por fim, a falta de blocos nativos fazendo-se necessário um conhecimento prévio em programação e a interface não intuitiva comprovam que o software PS SIMUL se torna mais adequado para utilização em disciplinas de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência nas IES brasileiras.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um estudo para comparação de dois softwares de simulação de transitórios eletromagnéticos, eletromecânicos e sistemas de controle, o ATP-Draw e o PS SIMUL. A comparação foi feita através da simulação da proteção de um alimentador da rede Aquiraz nas mesmas condições de trabalhos anteriores realizados na Universidade Federal do Ceará. O objetivo final era de analisar o funcionamento do software PS SIMUL visto que o ATP-Draw possui limitação de utilização maior por necessitar de programação.

Através das simulações realizadas no software PS SIMUL e do estudo realizado no software ATP-Draw, pôde-se perceber que o primeiro possui uma interface mais amigável para o usuário final e é um pouco mais intuitivo no quesito facilidade de simulação, ponto bastante importante quando se trata de utilização do software em disciplinas de proteção de sistemas elétricos de potência.

Observou-se, no estudo, que o software ATP-Draw necessita de um tempo inicial muito maior que no PS SIMUL, além de não possuir elementos de simulação nativos da plataforma que facilitam e melhoram as modelagens e simulações de sistemas. Dentre essas, outras vantagens foram devidamente pontuadas nos capítulos 3 e 4 que são, respectivamente, uma introdução ao software PS SIMUL e a simulação do alimentador e comparação com o ATP-Draw.

Como continuação desse trabalho, propõe-se:

- Estudo com a validação prática da inclusão do software PS SIMUL na disciplina de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência da UFC.

BIBLIOGRAFIA

ALVES, H. N.; JÚNIOR, A. P. A.; TORRES, L. M. M.; SOUSA, R. S. O uso do ATPDRAW e a linguagem Models na simulação de sistemas de proteção elétrica aplicados em redes de distribuição. Juiz de Fora, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8769: informação e documentação: citações em documentos. Rio de Janeiro. 1985.

CAMINHA, Amadeu Casal. Introdução à Proteções dos Sistemas Elétricos. 1.Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 112 p.

CONPROVE ENGENHARIA. Disponível em: <<http://www.conprove.com.br/pub/>> Acessado em: 14/09/2019.

CONCEIÇÃO, E. N. DA. Modelagem e Simulação da Proteção de Alimentadores de Distribuição Utilizando Softwares Tipo EMTP. [s.l.] Universidade de Brasília, 2012.

DECANINI, J. G. M. S. Detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica usando lógica nebulosa. 2008.

DEE/UFC. Disponível em: < <http://www.dee.ufc.br/graduacao/ementas/>> Acessado em: 03/10/2019.

ELETROBRÁS. Proteção de sistemas aéreos de distribuição Rio de Janeiro Campus, 1982.

ENEL DISTRIBUIÇÃO CE. Critério de Projeto: Subestações de Distribuição Aérea e Semi-Abrigada de 72,5-15 kV (CP-011 R-01). Fortaleza: Enel Distribuição CE, 2017.

JUNIOR, P. S. P.; SALGE, G. S.; DAVI, M. J. B. B.; MARTINS, C. M.; PEREIRA, P.S.; LOURENÇO, G. E. Estudos operacionais de usinas de geração eólica e solar através de uma plataforma computacional inovadora. Foz do Iguaçu, 2019.

JUNIOR, P. S. P.; SALGE, G. S.; DAVI, M. J. B. B.; MARTINS, C. M.; PEREIRA, P.S.; LOURENÇO, G. E. Análise operacional comparativa dos modelos de para-raios no estudo de mitigação de sobretensões transitórias em linhas de transmissão de alta tensão. Foz do Iguaçu, 2018.

JUNIOR, P. S. P.; SALGE, G. S.; DAVI, M. J. B. B.; PEREIRA, P.S.; LOURENÇO, G. E. Desenvolvimento de uma ferramenta para estudos de transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos em sistemas de potência com a presença de fontes renováveis de energia elétrica.

Curitiba, 2017.

KINDERMANN, G. Curto-circuito. 5. ed. Florianópolis: LabPlan, 2010.

KINDERMANN, G. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. 3rd. ed. SC: Edição do autor, 2012.

LEÃO, Ruth P. S. GTD – Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica. Fortaleza, 2018.

LOURENÇO, João Murilo Albuquerque. Modelagem e simulação de relés de proteção de alimentadores de distribuição utilizando o ATPDraw com estudo de caso de um alimentador da Rede Aquiraz. [s.l.] Universidade Federal do Ceará, 2018.

MAMEDE FILHO, João; RIBEIRO MAMEDE, João. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. 1 Ed. São Paulo: LTC, 2011. 620 p.

Norma Nacional Americana ANSI C37.60 - IEEE Standard Requirements for Overhead, Pad Mounted, Dry Vault, and Submersible Automatic Circuit Re-closers and Fault Interrupters for AC Systems, 1981.

Norma Nacional Americana ANSI C37.111 - IEEE/IEC Measuring relays and protection equipment, 2013.

RODRIGUES, M. S. DE L. Teste e Validação das Funções de Proteção baseadas na Norma IEC 61850 Propostas Para Implantação no Projeto Piloto da Rede de Distribuição Inteligente de Aquiraz. [s.l.] Universidade Federal do Ceará, 2015.

RUSH, P. Proteção e automação de redes. 1. ed. 2011.

SCHNEIDER. Parametrizando a função de sobrecorrente de fase nos relés SEPAM, 2008.

SILVA. R. A. Comportamento da função de sobrecorrente instantânea frente a distorções harmônicas nos relés de proteção numéricos. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2008.

STEVENSON, W. D. Elementos de análise de sistemas de potência. 2. ed. 1986.

VIEIRA, R. B. Estudo Das Proteções Para Implantação Do Projeto Piloto De Redes Inteligentes Da Companhia Energética Do Ceará Em Aquiraz. [s.l.] Universidade Federal do Ceará, 2015.