



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PEDRO VICTOR DA SILVA PONTES

**MODELAGEM DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO ATRAVÉS DA LINGUAGEM  
MODELS NO *SOFTWARE* ATPDRAW**

Recife  
2025

PEDRO VICTOR DA SILVA PONTES

**MODELAGEM DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO ATRAVÉS DA LINGUAGEM  
MODELS NO SOFTWARE *ATPDRAW***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador(a): Prof. Dr. Augusto Cesar Cavalcanti de Oliveira

Recife  
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Pontes, Pedro Victor da Silva.

Modelagem de dispositivos de proteção através da linguagem MODELS no software ATPDraw / Pedro Victor da Silva Pontes. - Recife, 2025.

63 p. : il., tab.

Orientador(a): Augusto Cesar Cavalcanti de Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica - Bacharelado, 2025.

8.

Inclui referências, anexos.

1. ATPDraw. 2. MODELS. 3. TACS. 4. Modelagem. 5. Transitórios. 6. TACS. I. Oliveira, Augusto Cesar Cavalcanti de. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

PEDRO VICTOR DA SILVA PONTES

**MODELAGEM DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO ATRAVÉS DA LINGUAGEM  
MODELS NO SOFTWARE ATPDRAW**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em: 20/08/2025

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Augusto Cesar Cavalcanti de Oliveira (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Vicente Ribeiro Simoni (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Eng. M.Sc. William Chaves Lima (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

Este trabalho é dedicado a todos que, de alguma forma, contribuíram para sua elaboração, bem como para a conclusão da minha graduação. Muito obrigado.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar quero agradecer a Deus e a Nossa Senhora por me concederem saúde, força e sabedoria para concluir mais essa importante etapa da minha vida.

Agradeço profundamente à minha família, que contribuíram em toda a minha graduação. Em especial, à minha mãe, minha maior incentivadora, por todo apoio, carinho e por nunca ter medido esforços para que eu pudesse chegar até aqui. Muito obrigado, mãe!

À minha noiva e futura esposa, Rayanne Araújo, minha gratidão por todo o amor, companheirismo, paciência e compreensão ao longo desses anos de graduação e durante a elaboração deste trabalho. Sua presença me torna uma pessoa melhor todos os dias. Te amo.

Estendo meus agradecimentos a todos os professores, técnicos e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE). Em especial, ao meu orientador, Prof. Dr. Augusto Oliveira, por aceitar me acompanhar neste trabalho e pelos ensinamentos transmitidos. Agradeço também aos membros da banca examinadora: Prof. Dr. Vicente Ribeiro, pelo vasto conhecimento e pelas valiosas experiências compartilhadas durante a graduação, destacando-se as aulas da disciplina de Transitórios Eletromagnéticos, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho; e ao Eng. M.Sc. William Lima, pela disponibilidade.

Sou igualmente grato pelos amigos e pelas parcerias construídas durante a jornada acadêmica. Em especial a Guilherme Araújo, José Alexandre, Luiz Henrique, Marcelo Correia e Pedro Albuquerque. As discussões antes das provas, grupos de estudo e noites em claro foram fundamentais – vocês fazem parte dessa conquista.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram com minha formação profissional durante minhas experiências na Neoenergia Pernambuco e na Eletrobras – Chesf. Os aprendizados adquiridos e os momentos vividos foram essenciais para meu crescimento pessoal e profissional.

“O sonho de um homem nunca tem fim”. One Piece

“Somos maior, nos basta só sonhar e seguir”. Emicida

## RESUMO

Este trabalho apresenta a modelagem e simulação de dispositivos de proteção, especificamente um relé de sobrecorrente (Instantâneo e temporizado) e um disjuntor controlado por relé, utilizando a linguagem MODELS/TACS no ambiente do *software* ATPDraw. A partir da fundamentação teórica sobre curtos-circuitos e filosofia de proteção, foi desenvolvido um sistema baseado no circuito de 9 barras do IEEE, no qual foram implementados os dispositivos modelados. Também foram testados os dispositivos de proteção na energização de um transformador em paralelo. A simulação de um curto-circuito trifásico permitiu observar os comportamentos dos dispositivos frente a falhas no sistema, validando a atuação do relé e do disjuntor conforme os parâmetros configurados. Os resultados demonstraram a eficácia da modelagem proposta evidenciando a importância do uso de ferramentas computacionais como o ATPDraw para o estudo de transitórios eletromagnéticos e a análise de desempenho de sistemas de proteção. O trabalho também destaca a flexibilidade da linguagem MODELS na criação de componentes personalizados, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais robustas e adaptadas às necessidades do sistema elétrico.

**Palavras-chave:** ATPDraw; MODELS; relé de sobrecorrente; modelagem; transitórios; TACS; proteção.

## ABSTRACT

This work presents the modeling and simulation of protection devices, specifically an overcurrent relay (instantaneous and time-delayed) and a relay-controlled circuit breaker, using the MODELS/TACS language within the ATPDraw software environment. Based on the theoretical foundation of short-circuit analysis and protection philosophy, a system was developed using the IEEE 9-bus circuit, in which the modeled devices were implemented. Additionally, the protection devices were tested during the energization of a transformer operating in parallel. The simulation of a three-phase short-circuit allowed the observation of the devices' behavior under fault conditions, validating the operation of the relay and circuit breaker according to the configured parameters. The results demonstrated the effectiveness of the proposed modeling, highlighting the importance of computational tools such as ATPDraw for the study of electromagnetic transients and the performance analysis of protection systems. The work also emphasizes the flexibility of the MODELS language in creating customized components, contributing to the development of more robust and system-adapted solutions for power systems.

**Keywords:** ATPDraw; MODELS; overcurrent relay; modeling; transients; TACS; protection.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Modelo de Sequência em Curtos-Circuitos Trifásicos. ....       | 17 |
| Figura 2 - Modelos de Sequência em Curtos-Circuitos Bifásicos. ....       | 18 |
| Figura 3 - Modelos de Sequência em Curtos-Circuitos Bifásicos-terra. .... | 19 |
| Figura 4 - Modelos de Sequência em Curtos-Circuitos Monofásicos. ....     | 19 |
| Figura 5 - Diagrama Unifilar Ilustrando Zonas de Proteção. ....           | 21 |
| Figura 6 - Exemplo Arquivo .atp. ....                                     | 24 |
| Figura 7 - Exemplo Arquivo .lis. ....                                     | 25 |
| Figura 8 - Componentes ATPDraw. ....                                      | 26 |
| Figura 9 - Componente <i>Default</i> ATPDraw. ....                        | 28 |
| Figura 10 - Aba <i>Data</i> da criação do arquivo .sup. ....              | 29 |
| Figura 11 - Aba <i>Nodes</i> da criação do arquivo .sup. ....             | 29 |
| Figura 12 - Página do arquivo .mod do ATPDraw. ....                       | 31 |
| Figura 13 - Componentes <i>TACS</i> . ....                                | 32 |
| Figura 14 - Circuito 9 barras IEEE. ....                                  | 33 |
| Figura 15 - Tela de parametrização das fontes <i>ATPDraw</i> . ....       | 34 |
| Figura 16 - Modelo Híbrido de Transformador. ....                         | 35 |
| Figura 17 - Tela de Dados do Transformador no ATPDraw. ....               | 35 |
| Figura 18 - Tela de Dados LINE3. ....                                     | 36 |
| Figura 19 - Menu de componentes ATPDraw. ....                             | 37 |
| Figura 20 - Janela de dados das barras de carga. ....                     | 38 |
| Figura 21 - Circuito da Segunda Simulação. ....                           | 39 |
| Figura 22 - Tela de Configuração LCC. ....                                | 40 |
| Figura 23 - Curva de Saturação do Indutor não Linear. ....                | 41 |
| Figura 24 - Fluxograma de operação do relé. ....                          | 42 |
| Figura 25 - Dados do Relé. ....   | 42 |
| Figura 26 - Dados do disjuntor. ....                                      | 43 |
| Figura 27 - Simulação dos curtos-circuitos. ....                          | 44 |
| Figura 28 - Curtos-circuitos simulados. ....                              | 44 |
| Figura 29 - Componentes Modelados. ....                                   | 45 |
| Figura 30 - Circuito Completo da Simulação. ....                          | 45 |
| Figura 31 - Circuito Referente a Segunda Simulação. ....                  | 46 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 32 - Corrente Trifásica do Sistema.....                                    | 47 |
| Figura 33 – Corrente de Curto-circuito Trifásico.....                             | 47 |
| Figura 34 - Tensão Próximo ao Local do Curto-Circuito Trifásico.....              | 48 |
| Figura 35 - Parametrização do Relé 50 para o Curto-Circuito Trifásico.....        | 48 |
| Figura 36 - Atuação do Relé Instantâneo. ....                                     | 49 |
| Figura 37 - Atuação do Relé Temporizado. ....                                     | 49 |
| Figura 38 - Curto-Circuito Bifásico-Terra. ....                                   | 50 |
| Figura 39 - Tensão Próximo ao local do Curto-Circuito Bifásico-Terra.....         | 50 |
| Figura 40 - Atuação do Relé Instantâneo para o Curto-Circuito Bifásico-Terra..... | 51 |
| Figura 41 - Atuação do Relé Temporizado para o Curto-Circuito Bifásico-Terra..... | 51 |
| Figura 42 - Ativação do TRIP no Curto-Circuito Monofásico.....                    | 52 |
| Figura 43 - TRIP do Relé Temporizado .....  | 52 |
| Figura 44 - Tensão Próximo ao local do Curto-Circuito Monofásico.....             | 52 |
| Figura 45 - Resistências de Contato do Disjuntor. ....                            | 53 |
| Figura 46 - Controle de Amostragem.....   | 54 |
| Figura 47 - Correntes de Fase.....  | 54 |
| Figura 48 - Valor Eficaz das Correntes de Fase.....                               | 54 |
| Figura 49 - Valor Eficaz da Componente Fundamental de Corrente. ....              | 55 |
| Figura 50 - Corrente de Neutro, Residual e Valor Eficaz. ....                     | 55 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Frequência dos Curtos-Circuitos Permanente e Temporários ..... | 16 |
| Tabela 2 - Frequência dos Curtos-Circuitos .....                          | 17 |
| Tabela 3 - Classificação das Funções dos Relés .....                      | 22 |
| Tabela 4 - Valores das fontes de tensão .....                             | 34 |
| Tabela 5 - Dimensionamento dos Transformadores .....                      | 35 |
| Tabela 6 - Valores das LTs. ....  | 36 |
| Tabela 7 - Dados Barras de Carga .....                                    | 38 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|      |   |
|------|---|
| ANSI | <i>American National Standards Institute</i>        |
| ATP  | <i>Alternative Transient Program</i>                |
| EMTP | <i>Eletromagnetic Transients Program</i>            |
| Freq | Frequência do Sistema                               |
| IEEE | Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos |
| LCC  | <i>Line/Cable Constants</i>                         |
| Np   | Passo de amostragem                                 |
| Per  | Período do Sistema                                  |
| SIN  | Sistema Interligado Nacional                        |
| TACS | <i>Transient Analysis of Control System</i>         |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|           |   |
|-----------|---|
| $\Phi$    | Fase do Sistema                               |
| $I_{a_1}$ | Corrente de Sequência Positiva                |
| $I_{a_2}$ | Corrente de Sequência Negativa                |
| $I_{a_0}$ | Corrente de Sequência Zero                    |
| $E_a$     | Tensão de Circuito                            |
| $Z_n$     | Impedância de Aterramento                     |
| $X_1$     | Reatância de Sequência Positiva               |
| $X_2$     | Reatância de Sequência Negativa               |
| $X_0$     | Reatância de Sequência Zero                   |
| $V_1$     | Tensão de Sequência Positiva                  |
| $V_2$     | Tensão de Sequência Negativa                  |
| $V_0$     | Tensão de Sequência Zero                      |
| 50        | Proteção de Sobrecorrente Instantânea de Fase |
| 51        | Proteção de Sobrecorrente Temporizada de Fase |

## SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                             | <b>14</b> |
| 1.1      | OBJETIVOS .....                                     | 15        |
| 1.1.1    | Geral.....  | 15        |
| 1.2      | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....                        | 15        |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                   | <b>16</b> |
| 2.1      | CURTO-CIRCUITO .....                                | 16        |
| 2.1.1    | Curto-circuito trifásico.....                       | 17        |
| 2.1.2    | Curto-circuito bifásico.....                        | 18        |
| 2.1.3    | Curto-circuito bifásico-terra .....                 | 18        |
| 2.1.4    | Curto-circuito monofásico.....                      | 19        |
| 2.2      | FILOSOFIA DE PROTEÇÃO .....                         | 20        |
| 2.2.1    | Relé de sobrecorrente (50/51) .....                 | 21        |
| 2.2.2    | Disjuntor .....                                     | 23        |
| <b>3</b> | <b>DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....</b>            | <b>23</b> |
| 3.1      | ATPDRAW.....  | 23        |
| 3.2      | MODELS .....  | 26        |
| 3.2.1    | Arquivo .sup.....                                   | 28        |
| 3.2.2    | Arquivo .mod .....                                  | 30        |
| 3.3      | TACS.....   | 31        |
| 3.4      | SIMULAÇÕES REALIZADAS .....                         | 32        |
| 3.4.1    | PRIMEIRA SIMULAÇÃO.....                             | 32        |
| 3.4.1.1  | Unidades Geradores .....                            | 33        |
| 3.4.1.2  | Transformadores .....                               | 34        |
| 3.4.1.3  | Linhas de Transmissão .....                         | 36        |
| 3.4.1.4  | Barramentos .....                                   | 37        |
| 3.4.2    | Segunda Simulação .....                             | 38        |
| 3.4.2.1  | Elemento LCC .....                                  | 39        |
| 3.4.2.2  | Elemento NLIN98_1 .....                             | 40        |
| 3.4.3    | Modelagem dos componentes de proteção.....          | 41        |
| 3.4.4    | SIMULAÇÕES .....                                    | 43        |
| 3.4.4.1  | PRIMEIRA SIMULAÇÃO.....                             | 43        |
| 3.4.4.2  | SEGUNDA SIMULAÇÃO .....                             | 46        |
| 3.5      | RESULTADOS OBTIDOS.....                             | 46        |
| 3.5.1    | RESULTADOS DA PRIMEIRA SIMULAÇÃO .....              | 46        |
| 3.5.2    | RESULTADOS DA SEGUNDA SIMULAÇÃO.....                | 53        |
| <b>4</b> | <b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE .....</b> | <b>56</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é o sistema elétrico que forma toda a malha de geração e transmissão do Brasil. Em maio de 2022 o Sistema Elétrico Brasileiro atingiu 183.082 km de linhas de transmissão e uma capacidade de mais 216 GW de geração, sendo responsável por atender cerca de 99,9% do mercado brasileiro de energia elétrica [1].

Com o passar dos anos, a energia elétrica se tornou um suprimento essencial na vida da população, cada caso de mal funcionamento de algum equipamento, falha de operação ou uma contingência pode causar ocorrências que afetam casas, hospitais e escolas. O Brasil tem um histórico de apagões que afetaram grande parte do país, como o apagão que ocorreu em 15 agosto de 2023 que causou uma interrupção de cerca de 19 GW, do total de 73 GW que estavam sendo atendidos no momento, representando aproximadamente 27% da carga total, afetando as cinco regiões do país [2].

Com a expansão do sistema e a crescente demanda por maior eficiência operacional e estabilidade da rede, tem-se visto a necessidade da melhoria dos estudos e análise dos dispositivos de proteção que contribuem para a mitigação de variações de energia e aumento da confiabilidade do sistema. Neste cenário, os dispositivos de proteção como relés e disjuntores assumem papel fundamental, não apenas na atuação diante de falhas, mas também na coordenação e seletividade das ações de controle.

Com o avanço da tecnologia os relés deixaram de ser eletromecânicos e passaram a ser digitais graças aos microcontroladores. Relés digitais oferecem uma grande flexibilidade na sua parametrização, exigindo um conhecimento técnico aprofundado de sistemas elétricos. Além de emular os relés tradicionais, os relés digitais permitem a implementação de funções matemáticas complexas e o registro de dados antes, durante e após a falta possibilitando uma análise mais precisa sobre os eventos. Dessa forma, a modelagem dos relés em formato digital é importante não só para testar algoritmos existentes, mas também para propor novos algoritmos que permitem detectar de forma mais segura e rápida a ocorrência de faltas [3].

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Geral

Este trabalho tem como objetivo fazer uma análise do funcionamento de dispositivos de proteção e apresentar a modelagem de um relé de sobrecorrente instantâneo e temporizado e de um disjuntor controlado por um relé no programa computacional ATPDraw. O trabalho realiza duas simulações, no primeiro caso o sistema utilizado nos testes foi o IEEE9, com 9 barras, o segundo caso se trata da manobra de energização de dois transformadores em paralelo operando em regime permanente.

## 1.2 Organização do Trabalho

No Capítulo 2 é apresentada a parte teórica necessária para entendimento do trabalho, desde a teoria de curto-circuito, apresentando suas componentes de sequência, bem como a abordagem teórica da filosofia de proteção e os dispositivos de proteção e seus funcionamentos.

No Capítulo 3 é feita uma apresentação do *software* ATPDraw focando nas linguagens de programação MODELS e TACS (*Transient Analysis of Control System*), mostrando toda a versatilidade, utilidade e importância do *software*.

No Capítulo 4 após compreender o funcionamento do *software* e as teorias por trás das aplicações no circuito, é apresentado o funcionamento do dispositivo simulado e comentado as suas importâncias.

No Capítulo 5 é feita a conclusão do trabalho desenvolvido, bem como a proposta de continuidade.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 CURTO-CIRCUITO

O sistema elétrico sofre diversas perturbações, uma das principais é o curto-circuito [4]. O curto-circuito é definido como uma falha que resulta em um caminho de baixa impedância para a corrente elétrica, desviando-a do seu trajeto normal [4]. Este tipo de falha pode ser classificado pelo número de fases envolvidas no curto-circuito, pelo seu tipo (série ou *shunt*) ou sua duração entre outros. A depender do tipo pode ser definida como uma falta *shunt* ou uma falta série, falta *shunt* trata-se de um desequilíbrio entre as fases ou entre as fases e neutro ou terra, já a falta série trata-se de um desequilíbrio nas impedâncias da linha e não envolve o neutro, o terra, nem qualquer das conexões entre as fases [4].

Considerando a duração, o curto pode ser classificado em dois tipos, permanente e temporário como visto na Tabela 1. O curto-circuito permanente trata-se de uma falha irreversível, ou seja, quando ocorre permanecerá em curto-circuito até que uma ação corretiva da manutenção seja realizada, já o curto-circuito temporário ocorre devido a uma perturbação momentânea na rede, que se extingue sem a necessidade de intervenção corretiva. Após a atuação da proteção, o sistema pode ser restabelecido sem problemas [5].

Tabela 1 - Frequência dos Curtos-Circuitos Permanente e Temporários

| Curtos-Circuitos<br>1 $\Phi$ -terra | Ocorrências em % |
|-------------------------------------|------------------|
| Permanente                          | 4                |
| Temporários                         | 96               |

Fonte: Do autor adaptado de [5]

A depender do número de fases pode ser considerado o curto-circuito trifásico, bifásico, bifásico-terra e monofásico como visto na Tabela 2. Entre esses, os curtos-circuitos mais frequentes são os monofásicos. Neste trabalho serão consideradas para simulação as faltas trifásicas, bifásicas-terra e monofásicas.

Tabela 2 - Frequência dos Curtos-Circuitos

| Tipos de Curtos-Circuitos | Ocorrências em % |
|---------------------------|------------------|
| 3 $\Phi$                  | 6                |
| 2 $\Phi$                  | 15               |
| 2 $\Phi$ -terra           | 16               |
| 1 $\Phi$ -terra           | 63               |

Fonte: Do autor adaptado de [5]

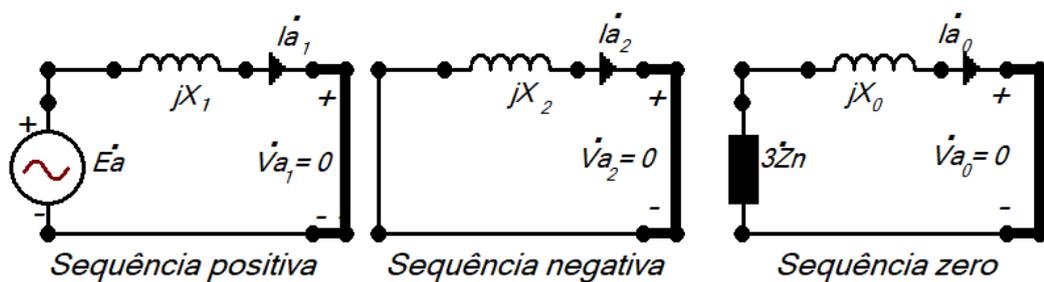
### 2.1.1 Curto-circuito trifásico

O curto-circuito trifásico é um tipo de falha em que as três fases do sistema entram em contato direto, é uma falta equilibrada que pode ser representada apenas pela seqüência positiva.

Como visto na Figura 1, as tensões na seqüência negativa e na seqüência zero são nulas, portanto para calcular a componentes da corrente de curto-circuito trifásica nesse sistema temos que:

$$\dot{I}_{a_1} = \frac{\dot{E}_a}{jX_1} \quad (2.1)$$

Figura 1 - Modelo de Seqüência em Curtos-Circuitos Trifásicos.



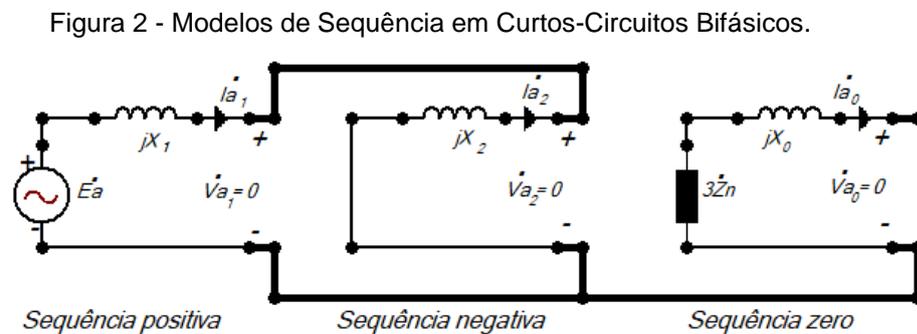
Fonte: Do autor adaptado de [5]

### 2.1.2 Curto-circuito bifásico

O curto-circuito bifásico acontece quando duas fases entram em contato direto. É uma falta desequilibrada que afeta apenas a sequência positiva e negativa devido ao curto não envolver o terra.

Como visto na Figura 2, a tensão de sequência negativa é nula e o modelo de sequência positiva e negativa são ligadas em paralelo. As componentes da corrente de curto-circuito nesse caso é:

$$\dot{I}_{a_1} = -\dot{I}_{a_2} = \frac{\dot{E}_a}{j*(X_1+X_2)} \quad (2.2)$$



Fonte: Do autor adaptado de [5]

### 2.1.3 Curto-circuito bifásico-terra

O curto-circuito bifásico-terra é um tipo de falha que ocorre quando duas das fases do sistema entram em contato simultaneamente com o terra. Os modelos de sequência positiva e negativa são conectados em paralelo, como tem o contato com o terra esse tipo de falta tem o modelo de sequência zero.

Como visto na Figura 3, para esse tipo de falta tem a contribuição das impedâncias do modelo de sequência zero, os modelos de sequência são conectados em paralelo.

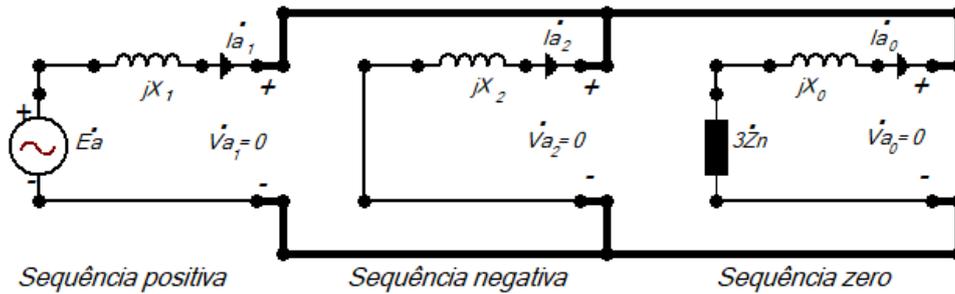
- Fazendo a associação das impedâncias dos modelos de componentes zero e negativa temos que:

$$X_{eq} = \frac{(3Z_n + X_0) + X_2}{(3Z_n * X_0) * X_2} \quad (2.3)$$

- Assim podemos calcular as componentes da corrente de curto do sistema:

$$i_{a_1} = \frac{\dot{E}_a}{j(X_1 + X_{eq})} = -i_{a_2} \quad (2.4)$$

Figura 3 - Modelos de Sequência em Curtos-Circuitos Bifásicos-terra.

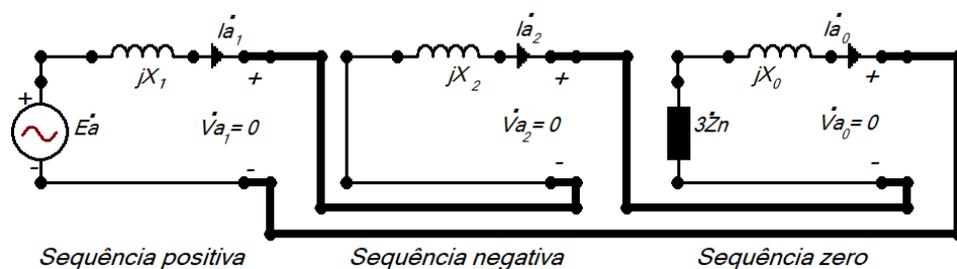


Fonte: Do autor adaptado de [5]

#### 2.1.4 Curto-circuito monofásico

O curto-circuito monofásico é um tipo de falha em que uma única fase do sistema entra em contato com o solo ou com um condutor de retorno do neutro. Esse é o tipo de curto-circuito mais comum nos sistemas. É uma falta desequilibrada que afeta a sequência positiva, negativa e zero do sistema.

Figura 4 - Modelos de Sequência em Curtos-Circuitos Monofásicos.



Fonte: Do autor adaptado de [5]

Como visto na Figura 4, o curto-circuito monofásico tem característica de ligação em série entre as sequências positivas, negativas e zero, portanto a corrente

que passa nas três é a mesma, podemos então calcular as componentes da corrente de curto-circuito no sistema.

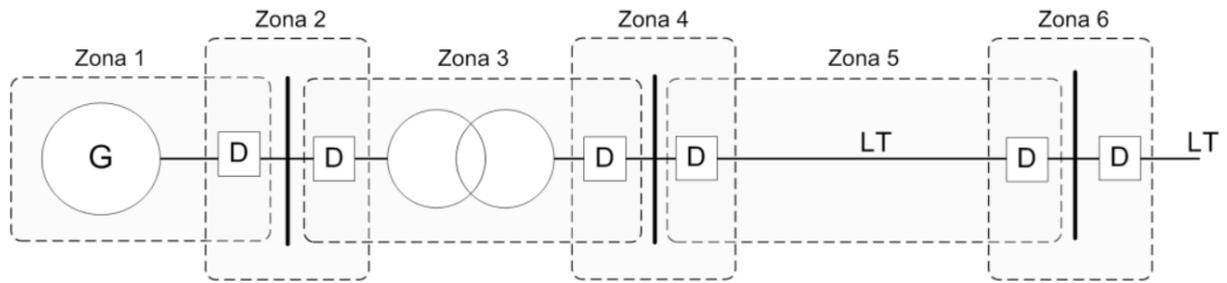
$$\dot{I}_{a_1} = \dot{I}_{a_2} = \dot{I}_{a_0} = \frac{\dot{E}_a}{j(X_1 + X_2 + X_0 + 3 * \dot{Z}_N)} \quad (2.5)$$

## 2.2 FILOSOFIA DE PROTEÇÃO

Os dispositivos de proteção são utilizados para garantir uma maior segurança a um sistema ou circuito, seja atuando em momento de falhas e contingências seja atuando em manobras de transferência de carga, manobras para manutenção ou alguma reconfiguração da rede. Para garantir o funcionamento pleno, deve-se seguir alguns requisitos básicos. Segundo [6], para um bom desempenho de um projeto de proteção devem ser atendidos os seguintes requisitos:

- **Seletividade:** técnica utilizada para o estudo de proteção e coordenação, no qual, somente o elemento de proteção mais próximo deve atuar;
- **Zonas de atuação:** durante um defeito, o elemento deve ser capaz de definir se aquela ocorrência é interna ou externa à área protegida, se a ocorrência está nos limites da zona protegida, o elemento de proteção deve atuar no intervalo de tempo definido;
- **Velocidade:** depois de definido um tempo mínimo de operação do elemento de proteção, a velocidade de atuação deve ser a maior possível, trazendo assim o menor dano ao equipamento e ao sistema;
- **Sensibilidade:** consiste na capacidade do elemento de proteção reconhecer com precisão a faixa e os valores indicados para a sua proteção e operação;
- **Confiabilidade:** é a propriedade do elemento de proteção cumprir com segurança a exatidão as funções que lhe foram confiadas;
- **Automação:** consiste na propriedade de o elemento de proteção operar automaticamente quando for solicitado pelas grandezas elétricas que o sensibilizam e retornam sem auxílio humano, se isso for conveniente, à posição de operação depois de cessada a ocorrência.

Figura 5 - Diagrama Unifilar Ilustrando Zonas de Proteção.



Fonte: FRAZÃO, [7]

Dessa maneira, é ideal que o sistema seja suficientemente sensível para detectar faltas, no menor nível de curto-circuito possível, assumindo uma condição real de operação. Adicionalmente, o sistema deve ser capaz de identificar e atuar apenas nos estados operacionais nos quais sua atuação é tecnicamente viável, assegurando a seletividade. Além disso é fundamental que sua resposta ocorra com a rapidez exigida pelas características do sistema [7].

A confiabilidade do sistema de proteção é um requisito básico. Quando a proteção não executa propriamente a sua finalidade, as características de mitigação das faltas são, em grande parte, ineficientes. Portanto é primordial que o sistema de proteção seja confiável, e que sua aplicação, instalação, comissionamento e manutenção garantam a realização da sua capacidade [7].

### 2.2.1 Relé de sobrecorrente (50/51)

Os sistemas de proteção são constituídos por diversos equipamentos que formam arranjos a fim de assegurar os requisitos básicos para o funcionamento do sistema. Entre esses dispositivos os relés são fundamentais atuando como interruptores sem a necessidade do contato físico, mas sim enviando uma informação aos outros equipamentos [6].

Cada relé de proteção possui uma ou mais características dentro dos limites exigidos pelos esquemas de proteção e coordenação para cada sistema elétrico em particular. Uma das funções mais utilizadas é a função de sobrecorrente instantânea (ANSI 50) e temporizada (ANSI 51) esse tipo de relé além de econômico é de grande versatilidade, podendo ser usado para proteção de linhas de transmissão, transformadores, geradores e outros segmentos do sistema.

Tabela 3 - Classificação das Funções dos Relés

| Nº da Função | Descritivo   |
|--------------|--|
| 2            | Relé de partida ou fechamento temporizado                  |
| 21           | Relé de Distância  |
| 25           | Relé de Verificação de Sincronismo                         |
| 27           | Relé de Subtensão  |
| 49           | Relé de Temperatura  |
| 50           | Relé de Sobrecorrente Instantâneo                          |
| 51           | Relé de Sobrecorrente Temporizado                          |
| 59           | Relé de Sobretensão  |
| 63           | Relé de Pressão de nível ou de fluxo, de líquido ou de gás |
| 67           | Relé direcional de Sobrecorrente                           |
| 68           | Relé de Bloqueio de Oscilação de Potência                  |
| 78           | Relé de Sincronismo  |
| 81           | Relé de Frequência   |
| 86           | Relé de Bloqueio   |
| 87           | Relé Diferencial   |

Fonte: Do autor adaptado de [8]

De maneira semelhante a outros relés, o relé de sobrecorrente teve mudanças com o passar dos anos e avanço da tecnologia. Segundo [6] os relés têm evoluído progressivamente desde que surgiu o primeiro dispositivo eletromecânico em 1901 que consistia em um relé de proteção de sobrecorrente do tipo indução, na década de 1930 surgiram os primeiros relés de proteção com tecnologia à base de componentes eletrônicos, utilizando semicondutores. Em 1980, com o desenvolvimento acelerado da microeletrônica, surgiram as primeiras unidades de proteção utilizando a tecnologia digital.

O relé de sobrecorrente instantâneo é de fácil compreensão e operação. Esse dispositivo atua como um sensor de corrente, monitorando continuamente o nível de corrente no sistema elétrico. Quando é detectado um valor de corrente acima do limite previamente estabelecido, o relé aciona de forma imediata o mecanismo de abertura do disjuntor, com o objetivo de eliminar a falha. Diferente do relé instantâneo, o relé temporizado incorpora um tempo de retardo, previamente ajustado pelo operador do sistema. Assim, ao identificar uma condição de sobrecorrente, o relé inicia a contagem do tempo programado e, somente após esse intervalo, envia o comando para a abertura do disjuntor. Essa característica permite maior seletividade e coordenação

entre os dispositivos, evitando desligamentos desnecessários em casos de distúrbios transitórios.

### **2.2.2 Disjuntor**

O disjuntor é um dispositivo eletromecânico essencial nos sistemas elétricos, cuja principal função é a de interromper o circuito de forma segura e automática em caso de falhas, como sobrecargas ou curtos-circuitos. Existem diversas classificações e tipos de disjuntores, cada um projetado para atender a requisitos específicos de proteção e operação.

Dentre eles, destaca-se o disjuntor resistente a arco elétrico, desenvolvido para detectar e extinguir arcos elétricos que possam surgir no interior de painéis elétricos, evitando danos aos equipamentos e riscos à segurança dos operadores. Esse tipo de disjuntor é especialmente utilizado em instalações onde há maior probabilidade de formação de arcos, como em centro de distribuição de energia e ambientes industriais.

O disjuntor controlado por relé não atua de forma autônoma, mas sim mediante o comando de um relé de proteção, que monitora continuamente o sistema elétrico. Ao identificar uma anomalia, como uma corrente acima dos limites estabelecidos, o relé envia um sinal de atuação do disjuntor, que então realiza a abertura do circuito.

## **3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO**

### **3.1 ATPDraw**

O ATPDraw é um pré-processador gráfico para a versão ATP (*Alternative Transients Program*) do EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) na plataforma *MS-Windows*. No ATPDraw, o usuário pode construir um circuito elétrico usando apenas o mouse, em seguida gera o arquivo de entrada ATP no formato apropriado. O programa de simulação e os programas de plotagem já estão integrados ao ATPDraw [9].

Quando uma simulação é compilada no ATPDraw o *software* gera três arquivos de simulação com extensões diferentes. O arquivo .acp contém a parte de processamento gráfico da simulação que é executada pelo ATPDraw.

O arquivo .atp é o cartão da simulação que contém todos os dados do circuito com edição em modo coluna que pode ser lido por editores de texto como o EditCepel.

Figura 6 - Exemplo Arquivo .atp.

```

01 BEGIN NEW DATA CASE
02 C
03 C Generated by ATPDraw junho, 13, 2025
04 C from project Noname.acp
05 C ATPDraw developed by H. K. Høidalen at NTNU - NORWAY 1999-2020
06 C
07 C dT >> Tmax >> Xopt >> Copt >> Epsiln>
08 1.E-6 .001 60. 60.
09 500 1 1 1 1 0 0 1 0
10 C 1 2 3 4 5 6 7 8
11 C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
12 /BRANCH
13 C < n1 >> n2 >>ref1>>ref2>> R >> L >> C >
14 C < n1 >> n2 >>ref1>>ref2>> R >> A >> B >>Leng>>>0
15 XX0002 1. 17. 0
16 /SWITCH
17 C < n 1>> n 2>> Tclose >>Top/Tde >> Ie >>Vf/CLOP >> type >
18 XX0001XX0002 .1665 1.E3 0
19 /SOURCE
20 C < n 1>>> Ampl. >> Freq. >>Phase/T0>> A1 >> T1 >> TSTART >> TSTOP >
21 14XX0001 187794.214 60. -1. 100.
22 /OUTPUT
23 BLANK BRANCH
24 BLANK SWITCH
25 BLANK SOURCE
26 BLANK OUTPUT
27 BLANK PLOT
28 BEGIN NEW DATA CASE
29 BLANK

```

Fonte: Do autor.

O arquivo .lis serve como interpretação do ATP é um arquivo de registro que mostra tudo o que foi lido no arquivo .atp como cartão miscelâneo, e os componentes da simulação. Após o final da interpretação do arquivo .atp, toda a leitura de dados permite ao usuário saber se a simulação contém algum erro para assim começar a fase de processamento de dados, e também mostra a matriz adjacência do circuito, uma solução em regime permanente simplificada entre outras informações.

Figura 7 - Exemplo Arquivo .lis.

```

EditCEPEL - [NH2 - D:\2025.1\Transitórios Eletromagnéticos\Simulacoes\Aula\EnergRL\EnergRL.lis]
Arquivo Editar Exibir Ferramentas Janela Ajuda
EnergRL.lis
0001 | ---- 17 cards of disk file read into card cache cells 1 onward.
0002 | <=> Done with */*-card sorting by data class. Remember that the source file appears different from interpreted input data.
0003 | Alternative Transients Program (ATP), F77 GNU Linux or DOS. All rights reserved by Can/Am user group of Portland, Oregon, USA.
0004 | Date (dd-mth-yy) and time of day (hh.mm.ss) = 11-Nov-18 11.00.00 Name of disk plot file, if any, is
0005 | Consult the 860-page ATP Rule Book of the Can/Am EMTF User Group in Portland, Oregon, USA. Source code date is
0006 | Total size of LABCOM tables = 27951813 INTEGER words. 31 VARDIM List Sizes follow: 6002 10K 192K 900 420K 1200 15K
0007 | 990K 2250 3800 720 2K 999K 510 800K 800 90 254 800K 100K 3K 15K 192K 120 45K 260K 90K 999K 1100 19 500K
0008 | -----
0009 | Descriptive interpretation of input data cards. | Input data card images are shown below, all 80 columns, character by character
0010 | 0 1 2 3 4 5 6 7 8
0011 | 01234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
0012 | -----
0013 | Comment card. KOMPAN > 0. |C data:EnergRL.atp
0014 | Marker card preceding new EMTF data case. |BEGIN NEW DATA CASE
0015 | Misc. data. 1.000E-06 5.000E-01 6.000E+01 | 1.E-6 .5 60. 60.
0016 | Misc. data. 500 1 1 1 1 0 0 1 0 0 | 500 1 1 1 1 0 0 1 0
0017 | Series R-L-C. 1.000E+00 4.509E-02 0.000E+00 | XX0002 1. 17. 0
0018 | Blank card ending branches. IBR, NTOT = 1 2 |BLANK BRANCH
0019 | Switch. 1.67E-01 1.00E+03 0.00E+00 0.00E+00 | XX0001XX0002 .1665 1.E3 1
0020 | Blank card ending switches. KSWTCH = 1. |BLANK SWITCH
0021 | Source. 1.88E+05 6.00E+01 0.00E+00 -1.00E+00 |14XX0001 187794.214 60. -1. 100.
0022 | Blank card ends electric sources. KCONST = 1 |BLANK SOURCE
0023 | -----
0024 | List of input elements that are connected to each node. Only the physical connections of multi-phase lines are shown (capacitive
0025 | and inductive coupling are ignored). Repeated entries indicate parallel connections. Switches are included, although sources
0026 | (including rotating machinery) are omitted -- except that U.M. usage produces extra, internally-defined nodes "UMXXXX".
0027 | -----
0028 | From bus name | Names of all adjacent busses.
0029 | -----
0030 | XX0002 |TERRA *XX0001*
0031 | XX0001 |XX0002*
0032 | TERRA |XX0002*
0033 | -----
0034 | -----
0035 | Sinusoidal steady-state phasor solution, branch by branch. All flows are away from a bus, and the real part, magnitude, or "P"
0036 | is printed above the imaginary part, the angle, or "Q". The first solution frequency = 6.00000000E+01 Hertz.
0037 | Bus K Phasor node voltage Phasor branch current Power flow Power loss
0038 | Bus M Rectangular Polar Rectangular Polar P and Q P and Q
0039 | -----
0040 | Total network loss P-loss by summing injections = 0.000000000000E+00

```

Fonte: Do autor.

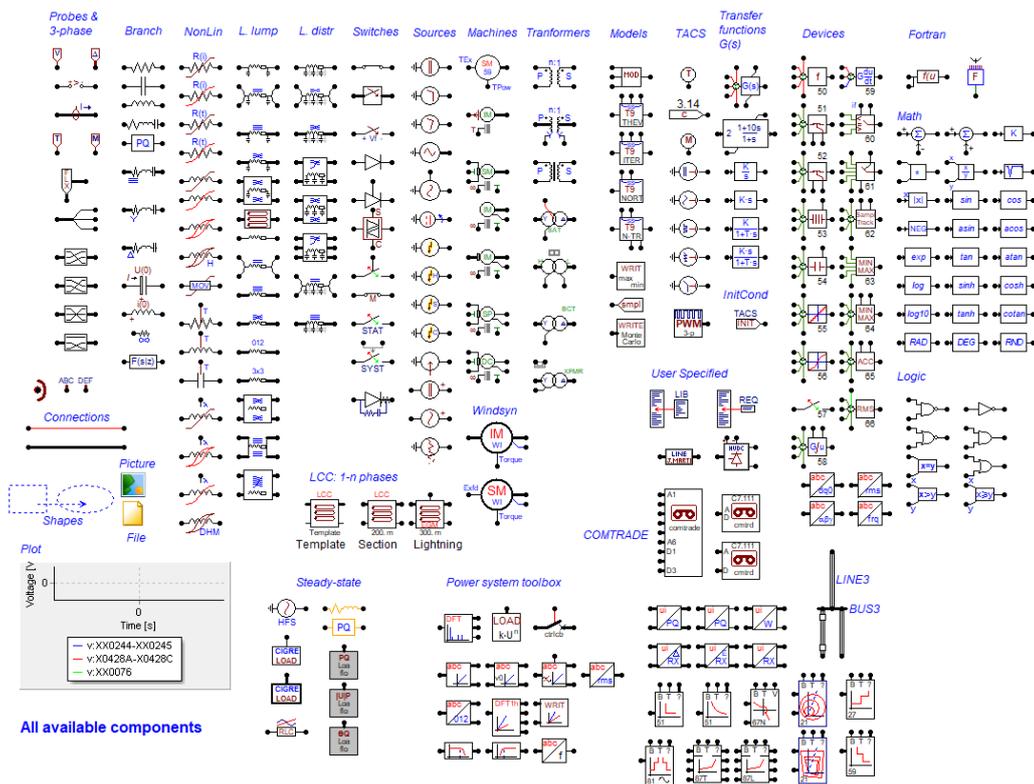
O ATPDraw é amplamente utilizado em âmbito internacional e exigido por alguns órgãos como ferramenta de simulação de transitórios eletromagnéticos. Os estudos devem ser realizados com os programas usualmente utilizados no SIN: ANAREDE (fluxo de potência), ANATEM (estabilidade eletromecânica), PSCAD e/ou ATP (transitórios eletromagnéticos) [10]. Além de poder ser usado para outros tipos de estudos, como ensaio em regime permanente, coordenação de isolamento entre outros, é uma ferramenta muito versátil contendo mais de 100 componentes de simulação prontos para uso como visto na Figura 8. Uma grande vantagem da utilização do *software* é a possibilidade de modelagem de novos componentes como linhas de transmissão, dispositivos de proteção, unidades geradoras entre outros, usando a linguagem MODELS e TACS (*Transient Analysis of Control System*), possibilitando cada vez mais adaptar e entender casos de dispositivos reais.

Uma importante parte no ATPDraw são os dados miscelâneos que ajusta a configuração da simulação, segundo [9]:

- Delta T: passo de tempo da simulação em segundos;
- Tmax: tempo final da simulação em segundos;
- Xopt: indutâncias em [mH] se o valor for igual a zero; caso contrário indutâncias em [Ohm] com Xopt como frequência;

- Copt: capacitâncias em  $[\mu\text{F}]$  se se o valor for igual a zero; caso contrário capacitâncias em  $[\text{ohm}]$  com Copt como frequência;
- Epsilon: controla como o ATP relata problemas de singularidade da matriz do sistema. Se zero, o valor padrão EPSILN do arquivo STARTUP do ATP é usado;
- Frequência: marcar este botão permite que a frequência do sistema seja digitada e gravada no cartão associado que solicita a frequência do sistema. A especificação da frequência é necessária para simulações de varredura de frequência harmônica.

Figura 8 - Componentes ATPDraw.



Fonte: Do autor.

## 3.2 MODELS

A linguagem MODELS é uma ferramenta de programação incorporada ao software ATP, amplamente utilizada para a criação de novos componentes além dos

já previamente definidos. Por meio dela, é possível descrever a estrutura e o comportamento de elementos específicos do sistema elétrico de potência, permitindo a modelagem detalhada de fenômenos transitórios eletromagnéticos, especialmente em dispositivos de medição, proteção e controle.

Uma das principais funcionalidades da MODELS é o suporte à simulação em malha fechada, na qual variáveis como tensões nos nós, correntes nos ramos e estados das chaves do sistema modelado no ATP podem ser monitoradas e manipuladas em tempo real. Essas variáveis são repassadas à MODELS, que, por sua vez, gera sinais de saída capazes de modificar dinamicamente o estado de operação do sistema no ATP, como a comutação de chaves ou alteração de parâmetro de fontes e impedâncias[14].

Além disso, a MODELS permite a integração com rotinas desenvolvidas em outras linguagens de programação, como C, C++ e Fortran, por meio dos chamados *compiled foreign models*. Essa interface expande significativamente a capacidade da linguagem, superando limitações relacionadas ao número de variáveis, linhas de código e uso de estrutura como matrizes[14].

No ambiente gráfico do ATPDraw, é possível implementar esses modelos por meio de arquivos específicos, utilizando uma sintaxe semelhante à da linguagem Fortran, porém com recursos adicionais voltados à manipulação de sinais no domínio do tempo, equações diferenciais, atrasos laplacianos, aplicação de limites, entre outros. Esse ambiente oferece um arquivo padrão que pode ser editado pelo usuário conforme os requisitos do componente a ser desenvolvido.

Figura 9 - Componente *Default* ATPDraw.

MODEL: DEFAULT

Attributes

| DATA | UNIT | VALUE |
|------|------|-------|
| d1   |      | 1     |
| d2   |      | 1     |

| NODE | PHASE | NAME |
|------|-------|------|
| i1   | 1     |      |
| i2   | 1     |      |
| o1   | 1     |      |
| o2   | 1     |      |

Copy Paste Reset Order: 0 Label: [ ]

Comment: [ ]

Models Library

Model: DEFAULT Edit Use As: DEFAULT Record

Hide [ ]

Protect [ ]

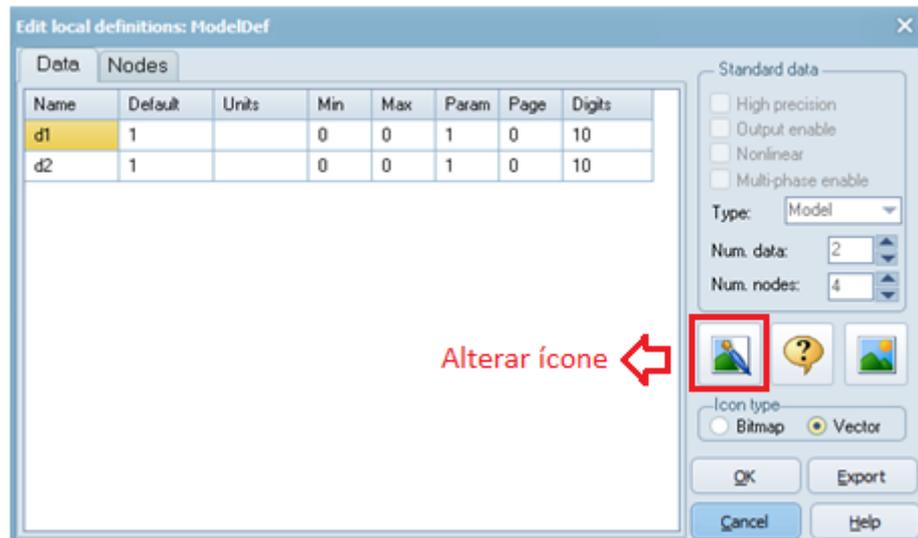
Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: Do autor.

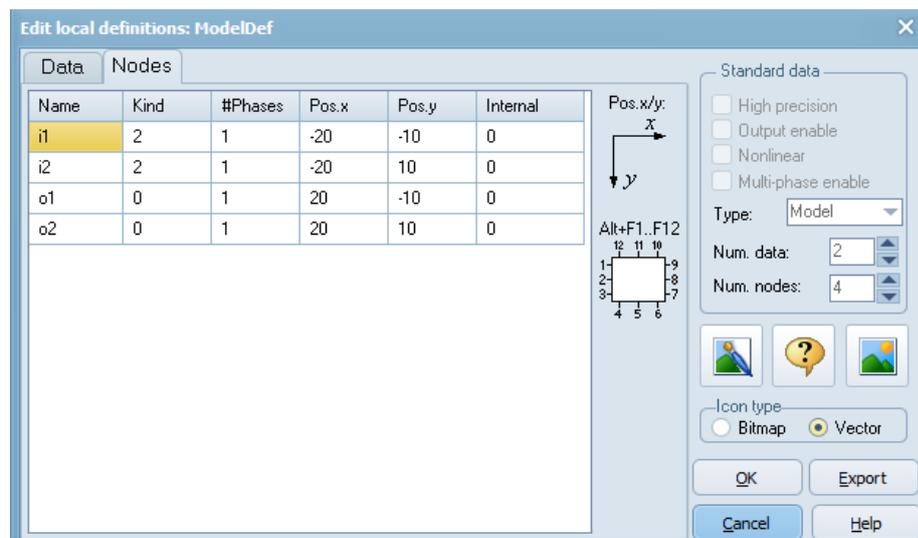
Durante a criação de um componente no módulo MODELS do ATPDraw, o software gera automaticamente dois arquivos com as extensões .sup e .mod. Esses arquivos são produzidos antes da execução da simulação propriamente dita e contêm as instruções e estruturas necessárias para a compilação e o funcionamento coerente do bloco MODELS no ambiente do ATP.

### 3.2.1 Arquivo .sup

O arquivo .sup permite alterar o ícone dos componentes, o intervalo de valor máximo e mínimo de cada variável que o usuário quer definir na aba *Data*, a posição dos seus terminais e o número de fases das entradas e saídas do componente na aba *Nodes*.

Figura 10 - Aba *Data* da criação do arquivo .sup.

Fonte: Do autor.

Figura 11 - Aba *Nodes* da criação do arquivo .sup.

Fonte: Do autor.

Também na aba *Nodes* é possível definir no item *Kind* qual vai ser o tipo de entrada/saída *default* dos terminais dos componentes o ATPDraw define umas opções pré-estabelecidas, segundo [9].

- 0: terminal de saída;
- 1: terminal de entrada de corrente (i);
- 2: terminal de entrada de Tensão (v);
- 3: terminal de entrada do status do *switch*;

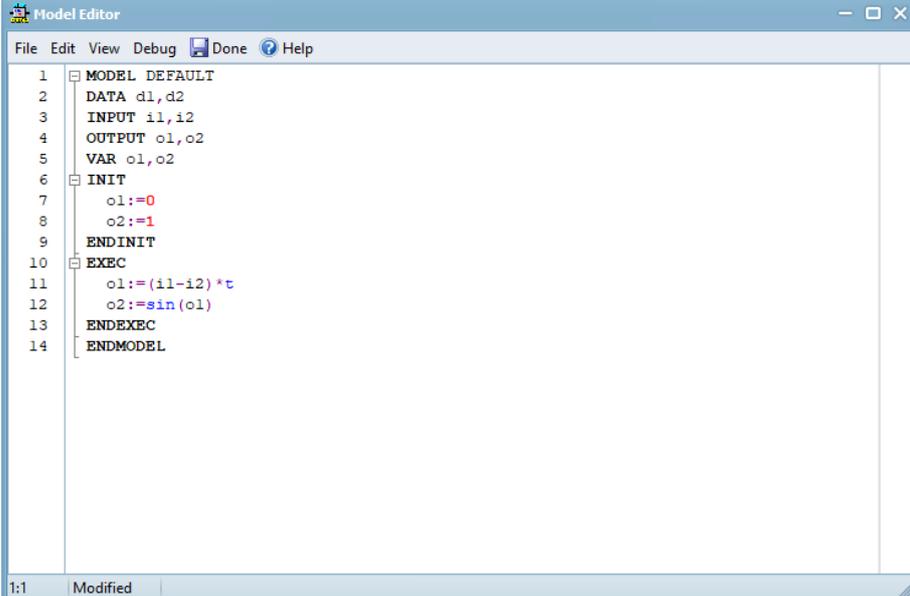
- 4: terminal de entrada de variável de máquina;
- 5: variável TACS;
- 6: parte imaginária da tensão do nó em estado estacionário;
- 7: parte imaginária da corrente do nó em estado estacionário;
- 8: saída de outro modelo;
- 9: entrada de uma variável global do ATP.

### **3.2.2 Arquivo .mod**

Já o arquivo .mod é onde o usuário descreve toda a lógica computacional do componente desejado. Assim como em outras linguagens de programação a linguagem MODELS tem palavras chaves estabelecidas com suas respectivas funções como descrito a seguir:

- MODEL: define que o código começou, deve vir acompanhado do nome do componente;
- INPUT: variáveis que são definidas como entrada no modelo;
- DATA: dados que podem ser alterados pelo usuário;
- OUTPUT: variáveis que são definidas como saídas do modelo;
- VAR: define variáveis do modelo sem valor pré-estabelecido;
- INIT: define o valor inicial das variáveis do componente;
- EXEC: módulo de execução do componente;
- ENDEXEC: define onde termina a parte executável da lógica;
- ENDMODEL: delimita onde termina o código.

Figura 12 - Página do arquivo .mod do ATPDraw.



```

1  MODEL DEFAULT
2  DATA d1, d2
3  INPUT i1, i2
4  OUTPUT o1, o2
5  VAR o1, o2
6  INIT
7     o1:=0
8     o2:=1
9  ENDINIT
10 EXEC
11     o1:=(i1-i2)*t
12     o2:=sin(o1)
13 ENDEXEC
14 ENDMODEL

```

Fonte: Do autor.

### 3.3 TACS

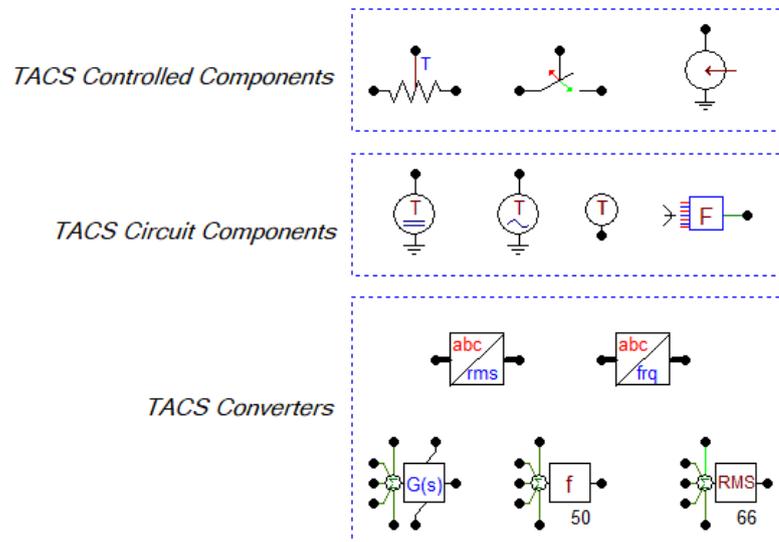
No ATPDraw, o TACS desempenha um papel fundamental na modelagem e simulação de sistemas de controle acoplados e a sistemas elétricos de potência. O TACS foi originalmente escrito para a simulação de controles de conversores HVDC, mas logo ficou evidente as suas diversas aplicações como sistemas de excitação de máquina síncrona, limitadores de corrente em para-raios e arcos em disjuntores [13].

Os sistemas de controle são geralmente representados por diagramas de bloco que mostram as interconexões entre vários elementos do sistema de controle, como blocos de função de transferência, limitadores, etc. Uma representação em diagrama de blocos também é usada no TACS porque torna a especificação de dados pelo usuário simples. Utilizando os nomes corretos para os sinais de entrada e saída dos blocos, qualquer conexão arbitrária entre blocos pode ser realizada [13].

Os sistemas de controle, dispositivos e fenômenos modelados no TACS e na rede elétrica são resolvidos separadamente neste momento. As quantidades de saída da solução da rede podem ser usadas como quantidades de entrada no TACS durante o mesmo passo de tempo, enquanto as quantidades de saída do TACS só podem se tornar quantidades de entrada na solução da rede no próximo passo de tempo. O

TACS aceita como entrada tensões e correntes da rede, tensões dos nós, correntes das chaves, estados dos interruptores e certas variáveis internas (por exemplo, ângulos do rotor de máquinas síncronas). A solução da rede aceita sinais de saída do TACS como fontes de tensão ou corrente (se as fontes forem declaradas como controladas pelo TACS), e como comandos para abrir ou fechar interruptores (se o interruptor for um tiristor ou um interruptor controlado pelo TACS) [13].

Figura 13 - Componentes TACS.



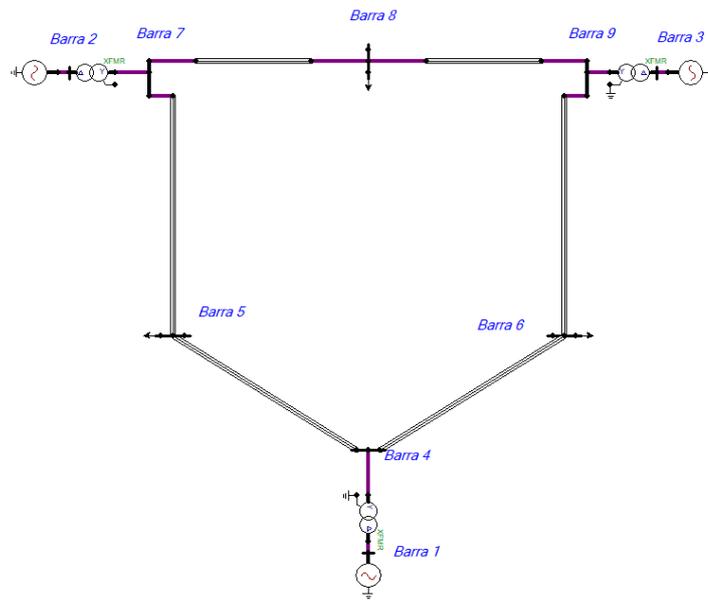
Fonte: Do autor.

## 3.4 Simulações Realizadas

### 3.4.1 Primeira Simulação

O sistema de 9 barras do IEEE é um sistema composto por unidades geradoras, transformadores, linhas de transmissão e barras de carga constante, onde será simulado um curto-circuito trifásico para testar a funcionalidade dos dispositivos de proteção. Os valores dos componentes foram coletados segundo [12].

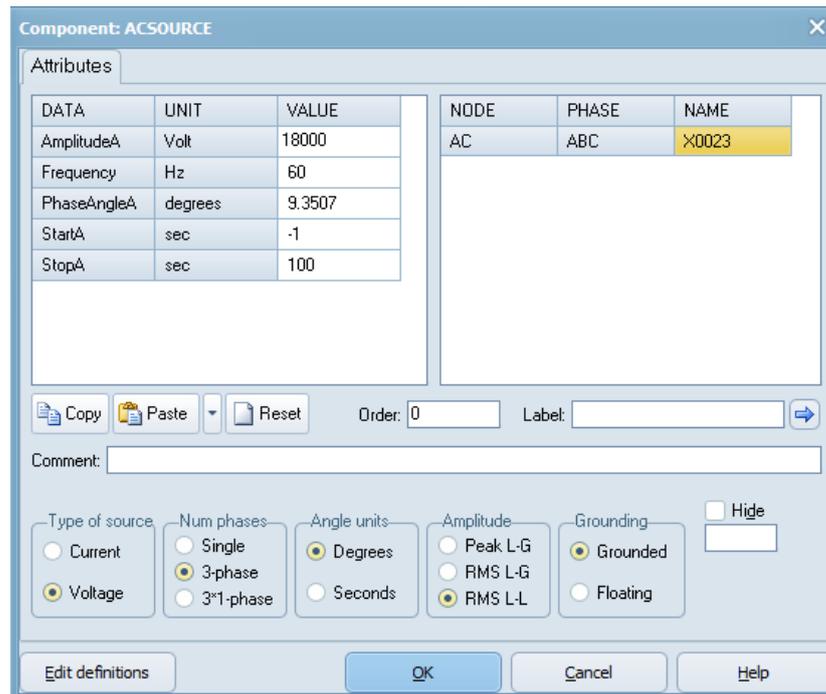
Figura 14 - Circuito 9 barras IEEE.



Fonte: Do autor.

#### 3.4.1.1 Unidades Geradores

Dentre diversas fontes contidas no ATPDraw foi usada a fonte ACSOURCE, uma fonte de tensão alternada que permite alterar parâmetros como amplitude, frequência e defasagem. Além das variáveis da fonte, o *software* permite alterar características construtivas da fonte, como alternar entre fonte de corrente e tensão, número de fases, unidade de medida do ângulo, se a fonte está aterrada ou não e também alterar o valor da amplitude entre o valor de pico fase-terra, eficaz fase-terra e valor eficaz fase-fase.

Figura 15 - Tela de parametrização das fontes *ATPDraw*.

Fonte: Do autor.

Tabela 4 - Valores das fontes de tensão

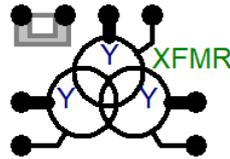
| Fontes | Amplitude da tensão (kV) | Ângulo de fase ( $\Phi$ ) |
|--------|--------------------------|---------------------------|
| 1      | 17,16                    | 0                         |
| 2      | 18                       | 9,3507                    |
| 3      | 14,145                   | 5,142                     |

Fonte: Do autor adaptado de [12].

### 3.4.1.2 Transformadores

No circuito analisado, os transformadores desempenham um papel fundamental na elevação da tensão gerada para os níveis adequados da transmissão. O *software ATPDraw* disponibiliza uma variedade de modelos de transformadores, como modelo ideal, saturado, monofásico, trifásico, entre outros. Na simulação desenvolvida, foi utilizado o modelo híbrido, que combina características dos modelos físico e do ideal, permitindo uma representação mais realista do componente do transformador em condições operacionais diversas.

Figura 16 - Modelo Híbrido de Transformador.



Fonte: Do autor.

O modelo híbrido possibilita ao usuário modificar diversas variáveis do componente, desde a sua forma estrutural como número de fases, número de enrolamentos, as suas conexões e dados de sequência positiva do transformador.

Figura 17 - Tela de Dados do Transformador no ATPDraw.

Hybrid transformer:

Structure

- Number of phases: 3
- Number of windings: 2
- Type of core: 3-leg stacked
- Test frequency [Hz]: 60

Data based on: Ind. Res. Cap. Core

Design param. Test report Typical values

Ratings & connections

|                  | Prim. | Sec.  |
|------------------|-------|-------|
| L-L voltage [kV] | 18    | 230   |
| Power [MVA]      | 100   | 100   |
| Connections      | D     | Y     |
| Phase shifts     | 0     | 330   |
| Node names       | X0002 | X0008 |

Winding sequence: core-inner-outer (P S) Ext. neutral connections:  Hide core nodes:

Data

Inductance Resistance Capacitance Core

Edit reactances Typical values

Cooling: Unknown

Comment: Order: Label:  Hide

0

OK Cancel Import Export Edit defin. Help

Fonte: Do autor.

Tabela 5 - Dimensionamento dos Transformadores

| Transformador |      | Tensão Primária (kV) | Tensão Secundária (kV) | Potência (MVA) |
|---------------|------|----------------------|------------------------|----------------|
| De            | Para |                      |                        |                |
| 1             | 4    | 17,16                | 230                    | 100            |
| 2             | 7    | 18                   | 230                    | 100            |
| 3             | 9    | 14,145               | 230                    | 100            |

Fonte: Do autor adaptado de [12].

### 3.4.1.3 Linhas de Transmissão

O ATPDraw possibilita ao usuário fazer a modelagem de linhas de transmissão através da ferramenta *Line constants* e também disponibiliza uma vasta biblioteca de componentes. A linha de transmissão usada na simulação foi a LINE3 é um componente composto por uma combinação trifásica de linha simétrica, disjuntor, transformador de corrente e a opção de simular alguma falta na linha.

Figura 18 - Tela de Dados LINE3.

Fonte: Do autor.

Tabela 6 - Valores das LTs.

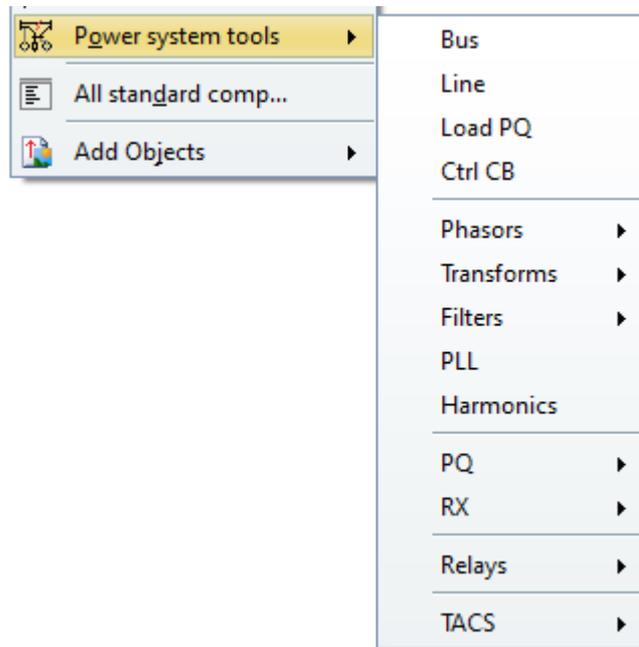
| Linhas | R0<br>(ohm/km) | L0<br>(mH/km) | C0<br>(µF/km) | R1<br>(ohm/km) | L1<br>(mH/km) | C1<br>(µF/km) | Comprimento<br>(km) |
|--------|----------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------------|
| LT4-5  | 0,588          | 3,98          | 0,00589       | 0,0588         | 1,33          | 0,00981       | 89,93               |
| LT5-7  | 0,994          | 3,98          | 0,00541       | 0,0994         | 1,33          | 0,00901       | 170,338             |
| LT4-6  | 0,924          | 3,98          | 0,00541       | 0,0924         | 1,33          | 0,00901       | 97,336              |
| LT7-8  | 0,59           | 3,98          | 0,00589       | 0,059          | 1,33          | 0,00981       | 76,176              |
| LT8-9  | 0,59           | 3,98          | 0,0059        | 0,059          | 1,33          | 0,00983       | 106,646             |
| LT6-9  | 1,15           | 3,98          | 0,00599       | 0,115          | 1,33          | 0,00998       | 179,86              |

Fonte: Do autor adaptado de [12].

### 3.4.1.4 Barramentos

O circuito de 9 barras do IEEE contém três barras de carga constante, o ATPDraw contém uma aba de componentes *Power System Tools* com alguns modelos de simulação como barramentos, filtros, transformadores, relés de proteção e exemplos de TACS.

Figura 19 - Menu de componentes ATPDraw.



Fonte: Do autor.

O modelo de barra usada é ligado a dois barramentos, identificada como barras *slacks* que são conectadas entre os transformadores e as fontes geradoras, as barras *slacks* tem seus valores de tensão referentes aos enrolamentos do transformador que estão conectadas. Na simulação as barras de carga são barras que contém uma carga constante conectada a ela que solicita potência ativa e potência reativa.

Figura 20 - Janela de dados das barras de carga.

| DATA     | UNIT     | VALUE |
|----------|----------|-------|
| Num Bays | 1-13     | 1     |
| Voltage  | kV       | 300   |
| P load   | MW out   | 0     |
| Q load   | MVar out | 0     |
| VT n     | 0 no VT  | 0     |
| MOV Vref | 0 no MOV | 0     |

| NODE | PHASE | NAME |
|------|-------|------|
| BUS  | 3     |      |
| VT   | 3     |      |

Fonte: Do autor.

Tabela 7 - Dados Barras de Carga

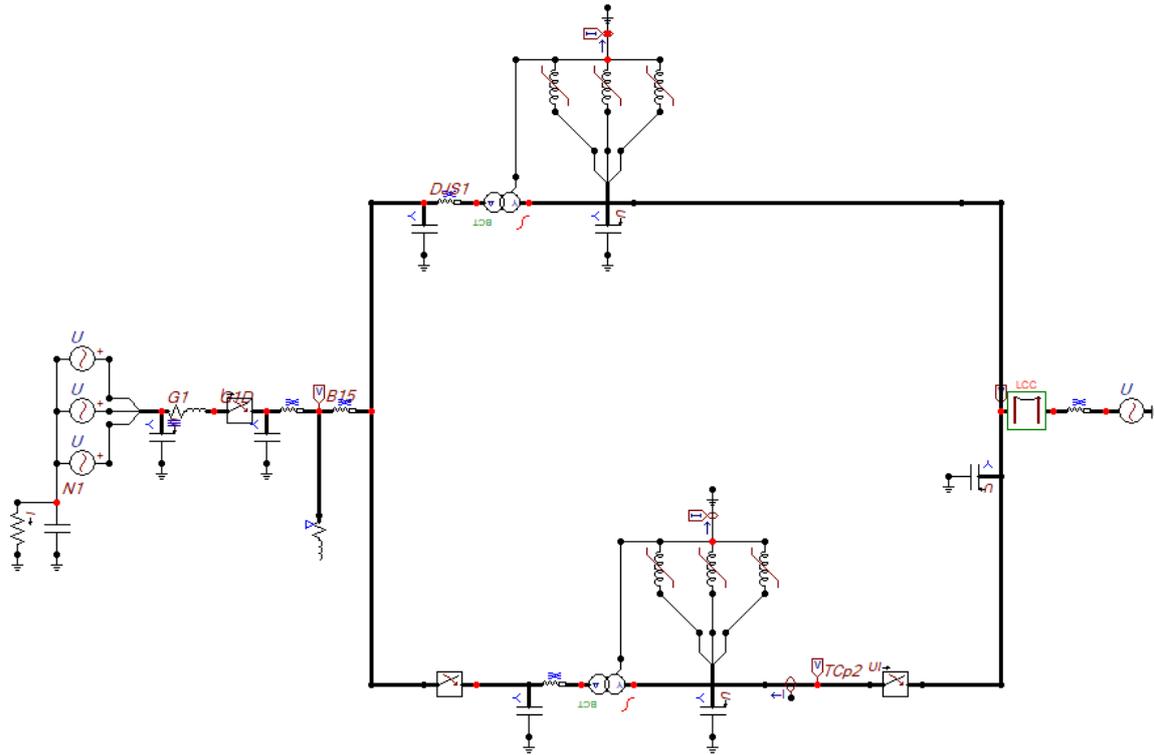
| Barras | Tensão (kV) | Potência Ativa (MW) | Potência Reativa (Mvar) |
|--------|-------------|---------------------|-------------------------|
| 5      | 132,7905    | 41,6666             | 16,6666                 |
| 6      | 132,7905    | 30                  | 10                      |
| 8      | 132,7905    | 33,3333             | 11,6666                 |

Fonte: Do autor adaptado de [12].

### 3.4.2 Segunda Simulação

A segunda simulação se trata da análise do comportamento do sistema durante a energização do transformador TF-2. Inicialmente, o transformador TF-1 encontra-se conectado e operando em regime permanente. No instante  $t = 0,5$  s, o transformador TF-2 é energizado pelo lado de 69 kV, e durante esse processo é realizada a medição da corrente no primário do transformador TF-1, por meio do relé ali instalado. A partir dessa condição de operação, avalia-se a atuação do relé localizado no lado de 69 kV do transformador TF-1, com foco na verificação do funcionamento das funções 50N e 51N, correspondentes à proteção de sobrecorrente no neutro [3].

Figura 21 - Circuito da Segunda Simulação



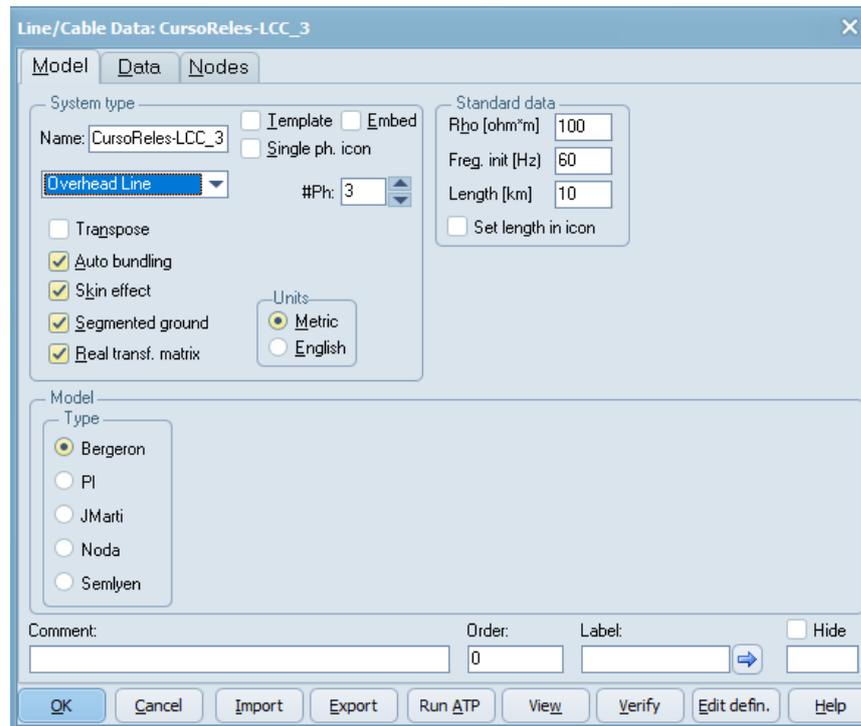
Fonte: Do autor.

Como visto na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** o circuito é composto por componentes já apresentados neste trabalho, além desses elementos o circuito contém elementos *LCC* e o elemento *NLIN98\_1*.

### 3.4.2.1 Elemento *LCC*

O componente *LCC* (Line/Cable Constants) do ATPDraw foi utilizado na segunda simulação para modelagem de linhas de transmissão e cabos subterrâneos, considerando seus parâmetros elétricos distribuídos. Este módulo permite ao usuário definir os dados físicos e elétricos de linhas ou cabos, como geometria dos condutores, espaçamento, resistividade do solo e características do dielétrico, a fim de gerar os parâmetros de sequência positiva, negativa e zero necessários para as simulações.

Figura 22 - Tela de Configuração LCC.

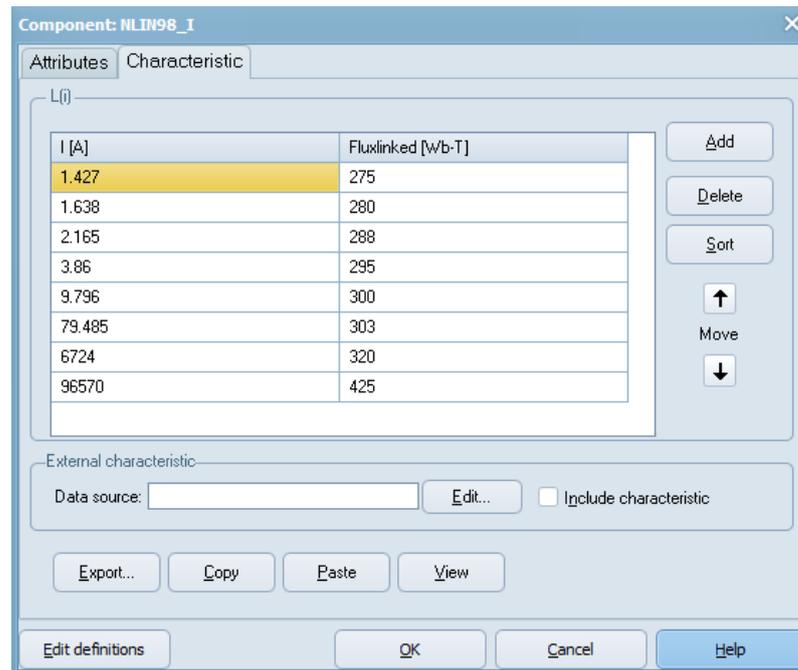


Fonte: Do autor.

### 3.4.2.2 Elemento NLIN98\_1

O componente NLIN98\_1 do ATPDraw é utilizado para modelar indutores não lineares dependentes da corrente, permitindo representar com precisão o comportamento de materiais magnéticos que apresentam saturação. Ele é especialmente útil em simulações onde o fluxo magnético varia de forma não linear em função da corrente elétrica. Além disso, o modelo possibilita a definição de um fluxo inicial e sua evolução ao longo do tempo, por meio da integração de módulos TACS, sendo ideal para estudos que envolvem transitórios, como a energização de transformadores com núcleo de ferro.

Figura 23 - Curva de Saturação do Indutor não Linear.

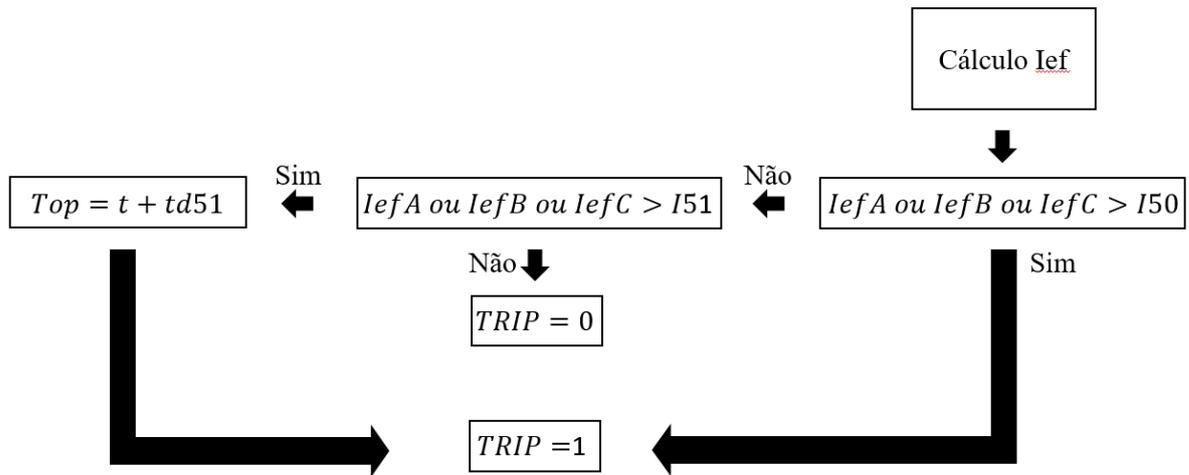


Fonte: Do autor.

### 3.4.3 Modelagem dos componentes de proteção

Para este trabalho foram utilizado dois componentes que foram modelados através da linguagem *MODELS*, um relé de sobrecorrente e um disjuntor controlado pelo relé. A modelagem do relé funciona de maneira paralela, a prioridade do relé é a função instantânea, se o relé não atuar com a função instantânea ele analisa a corrente da função temporizada, como mostra o fluxograma abaixo.

Figura 24 - Fluxograma de operação do relé.



Fonte: Do autor.

Figura 25 - Dados do Relé.

| DATA | UNIT | VALUE | NODE | PHASE | NAME  |
|------|------|-------|------|-------|-------|
| freq | Hz   | 60    | Cor  | ABC   | X0024 |
| I50  | A    | 10    | TRIP | 1     | X0002 |
| I51  | A    | 10    |      |       |       |
| td51 | s    | 0.1   |      |       |       |

Fonte: Do autor.

O disjuntor controlado por relé foi modelado em [3], o disjuntor identifica o momento que o relé muda o TRIP (sinal recebido pelo disjuntor para indicar a abertura do dispositivo) para 1, enquanto o TRIP do disjuntor é igual a 0 o disjuntor mantém a resistência de contato no valor de  $10^{-4}\Omega$ , no momento que o relé aciona o TRIP o disjuntor muda a resistência de contato para  $10^7\Omega$ .

- RetFech: indica a duração necessária para aceitar o sinal de fechar;
- RetAbr: indica a duração necessária para aceitar o sinal de abrir;
- Estado: indica o estado inicial do disjuntor 0 (aberto) e 1 (fechado).

Figura 26 - Dados do disjuntor.

The screenshot shows a software interface window titled 'MODEL: DisjCom'. It contains two main tables and several control elements.

**Attributes Table:**

| DATA   | UNIT | VALUE |
|--------|------|-------|
| RetFec | s    | 0.005 |
| RetAbr | s    | 0.005 |
| Estado | -    | 1     |

**Node Data Table:**

| NODE   | PHASE | NAME   |
|--------|-------|--------|
| Vx     | ABC   | DJT1   |
| Vy     | ABC   | DJS1   |
| Abrir  | 1     | trp1   |
| Fechar | 1     | ××0006 |
| RA     | 1     | ××0003 |
| RB     | 1     | ××0004 |
| RC     | 1     | ××0005 |

Below the tables, there are buttons for 'Copy', 'Paste', and 'Reset'. To the right, there are input fields for 'Order: 0' and 'Label:'. A 'Comment:' field is also present. At the bottom, there are 'Model: DisjCom' and 'Use As: DisjCom' fields with 'Edit' and 'Record' buttons. On the far right, there are checkboxes for 'Hide' and 'Protect'. At the very bottom, there are 'Edit definitions', 'OK', 'Cancel', and 'Help' buttons.

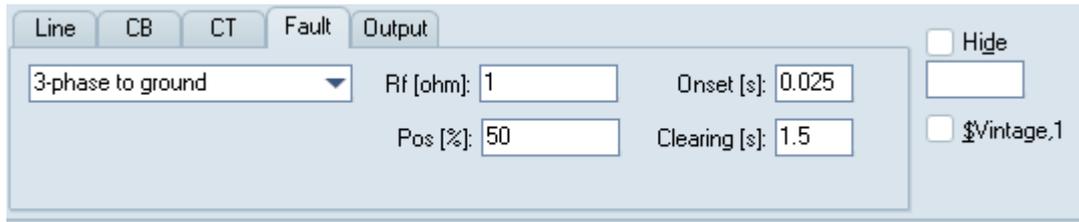
Fonte: Do autor.

### 3.4.4 Simulações

#### 3.4.4.1 Primeira Simulação

A primeira simulação consiste em simular um curto-circuito no sistema apresentado e analisar a atuação do relé de proteção modelado, fazendo o disjuntor acionar e cortando a corrente do sistema. A simulação do curto-circuito foi feita através do componente LINE3 usado no circuito o curto simulado foram os curtos-circuitos monofásico, bifásico-terra e trifásico, todos a 50% de distância do curto-circuito para a extremidade da linha de transmissão.

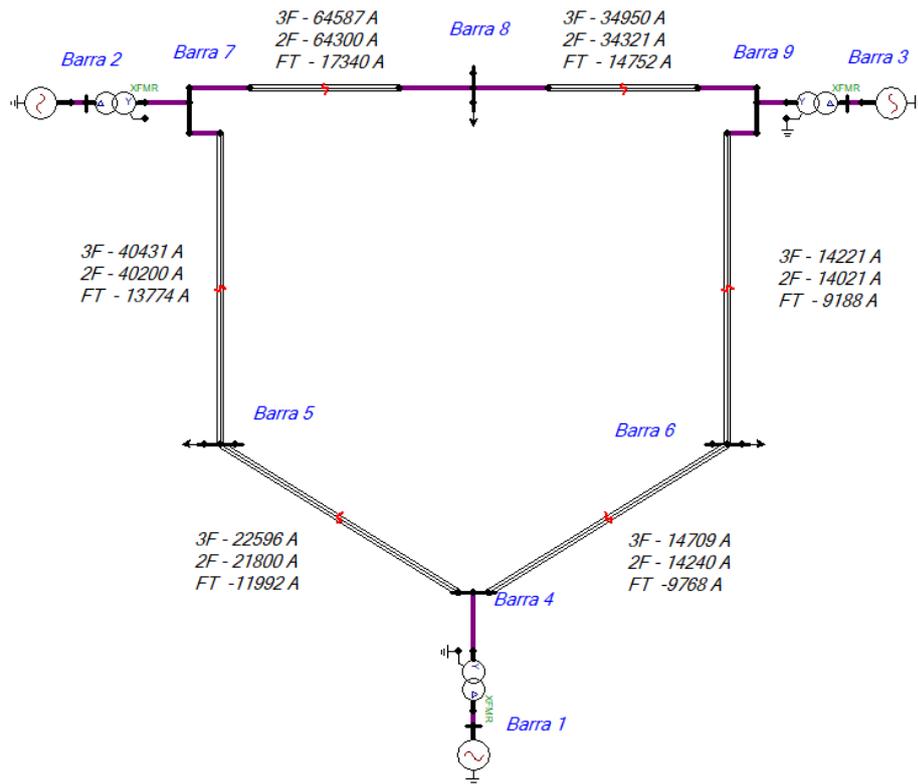
Figura 27 - Simulação dos curtos-circuitos.



Fonte: Do autor.

Para a parametrização dos relés, foi realizada a simulação dos curtos-circuitos em diversas linhas e ajustado o valor de *pick-up* para o pior caso simulado como visto na Figura 28.

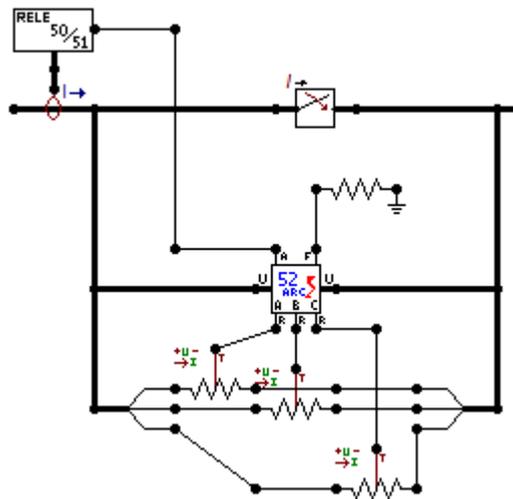
Figura 28 - Curtos-circuitos simulados.



Fonte: Do autor.

Os componentes modelados foram utilizados como a proteção de uma das fontes geradoras.

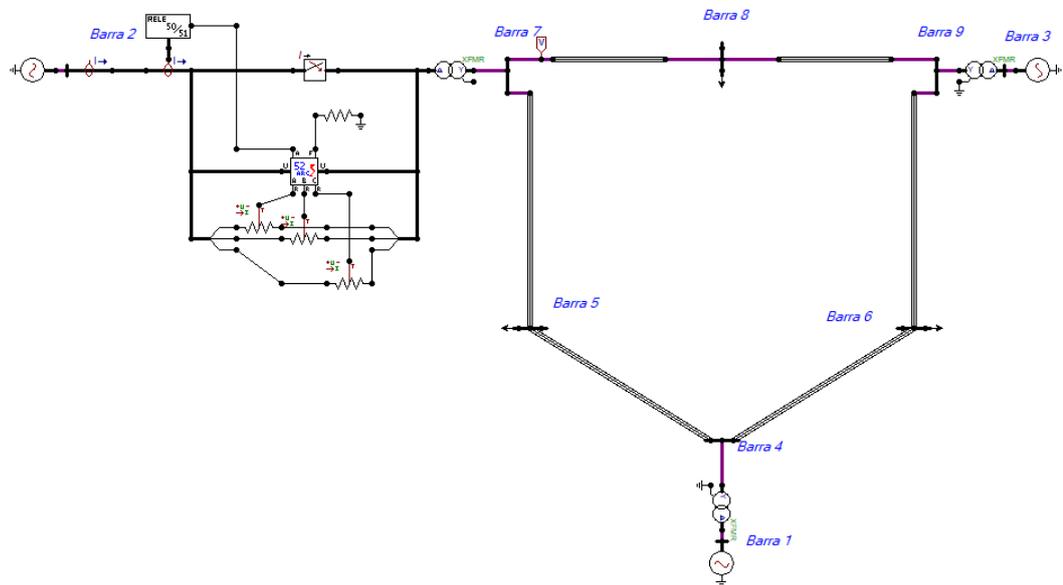
Figura 29 - Componentes Modelados.



Fonte: Do autor.

Juntando todos os elementos do circuito, e com os componentes modelados temos o circuito completo da simulação.

Figura 30 - Circuito Completo da Simulação.

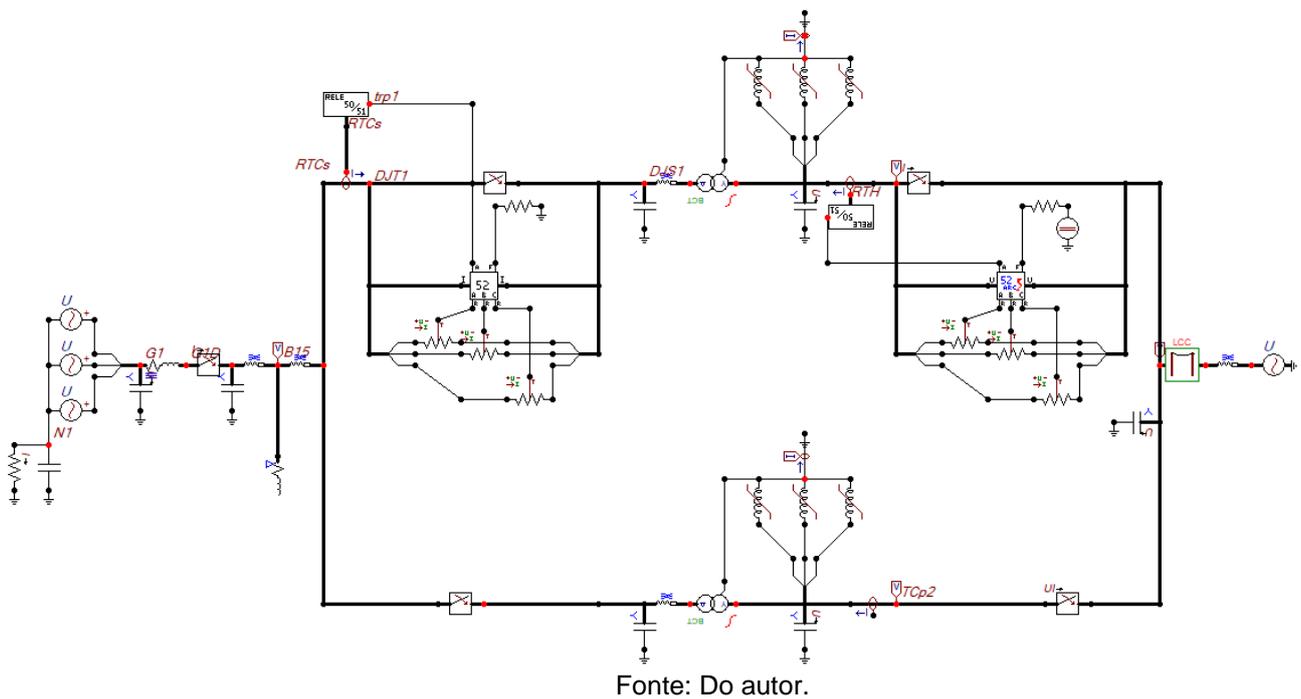


Fonte: Do autor.

### 3.4.4.2 Segunda Simulação

A simulação da energização dos transformadores em paralelo é acionada no momento de 0,5 s em que a chave próxima ao TF-2 fecha o sistema possibilitando observar os efeitos nos componentes modelados.

Figura 31 - Circuito Referente a Segunda Simulação.



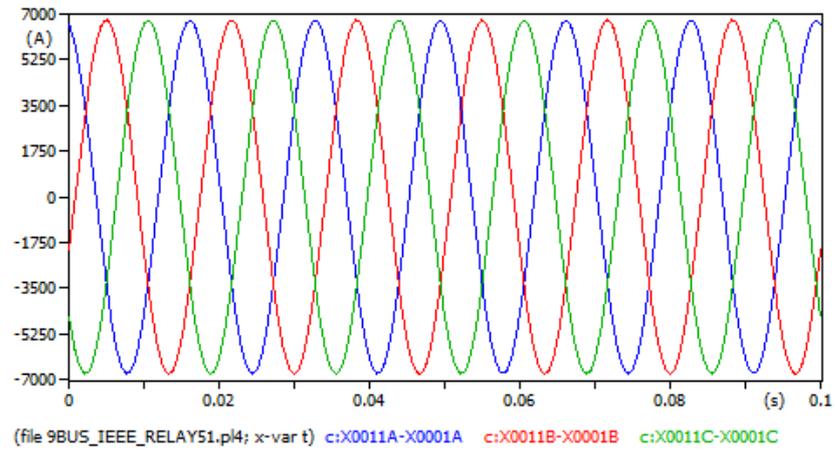
## 3.5 Resultados Obtidos

### 3.5.1 Resultados da Primeira Simulação

A simulação foi configurada com tempo máximo de simulação de 0,1 s, sendo todos os valores de corrente monitorados por um medidor na barra 2, localizada junto a um dos geradores do circuito. As tensões, por sua vez, estão sendo medidas na barra 7, próximo ao curto-circuito. Inicialmente, é possível observar a forma de onda do sistema operando em regime permanente, sem faltas na Figura 32. O curto-circuito está programado para ocorrer no instante 0,25 s, porém, nesta etapa da simulação, o

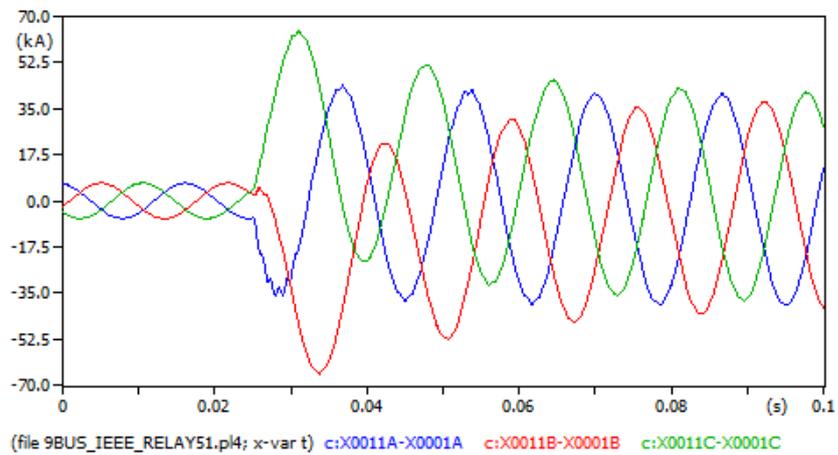
relé está configurado para não atuar, permitindo a análise do comportamento do sistema sem a intervenção da proteção.

Figura 32 - Corrente Trifásica do Sistema.



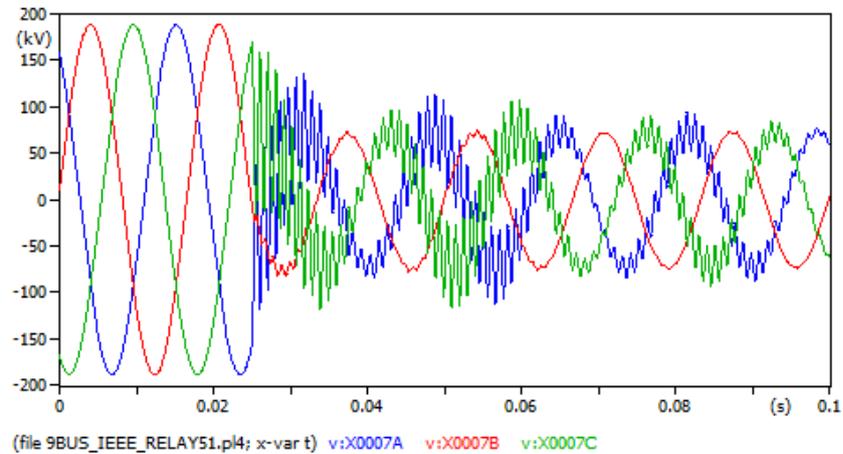
Fonte: Do autor.

Figura 33 – Corrente de Curto-circuito Trifásico.



Fonte: Do autor.

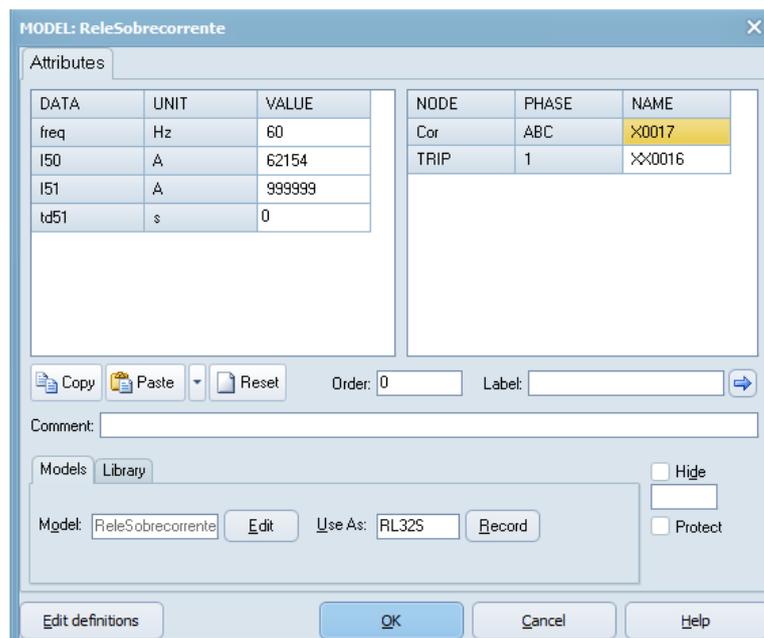
Figura 34 - Tensão Próximo ao Local do Curto-Circuito Trifásico.



Fonte: Do autor.

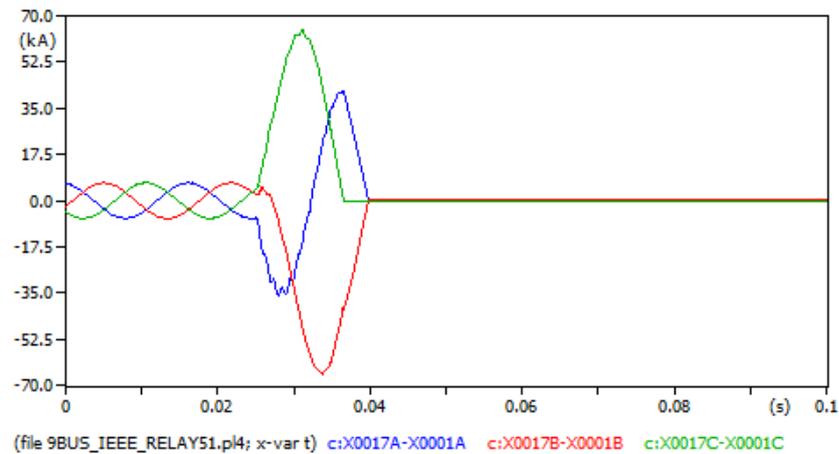
Conforme observado na Figura 33, a corrente de curto-circuito trifásico atingiu uma corrente de pico de 67587 A. Para assegurar a atuação adequada do sistema de proteção, é necessário parametrizar o relé de sobrecorrente com um valor superior à corrente de operação normal do sistema, porém inferior à corrente de curto-circuito simulada. Na Figura 35, observa-se que, com o objetivo de evitar a atuação do relé de sobrecorrente temporizado durante esta etapa da simulação, foi adotado um valor fixo de 999999 A como corrente de *pick-up*, garantindo a não operação desta função do relé.

Figura 35 - Parametrização do Relé 50 para o Curto-Circuito Trifásico.



Fonte: Do autor.

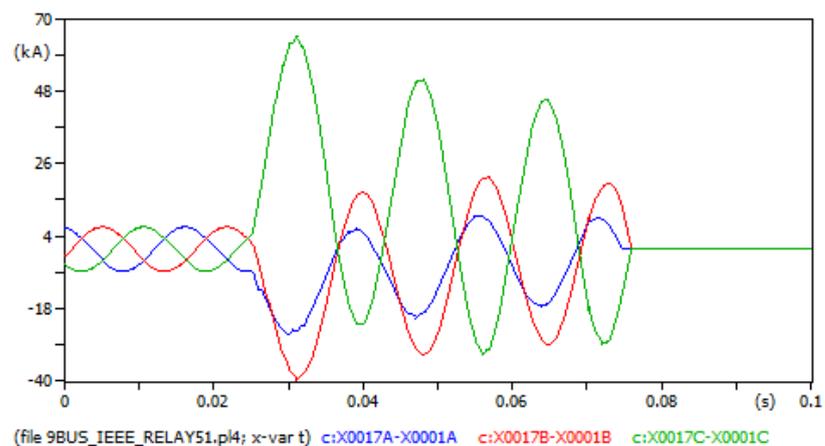
Figura 36 - Atuação do Relé Instantâneo.



Fonte: Do autor.

De maneira semelhante ara a atuação do relé de sobrecorrente temporizado foi selecionado a mesma corrente de *pick-up* com um tempo de *delay* de 0,04 s.

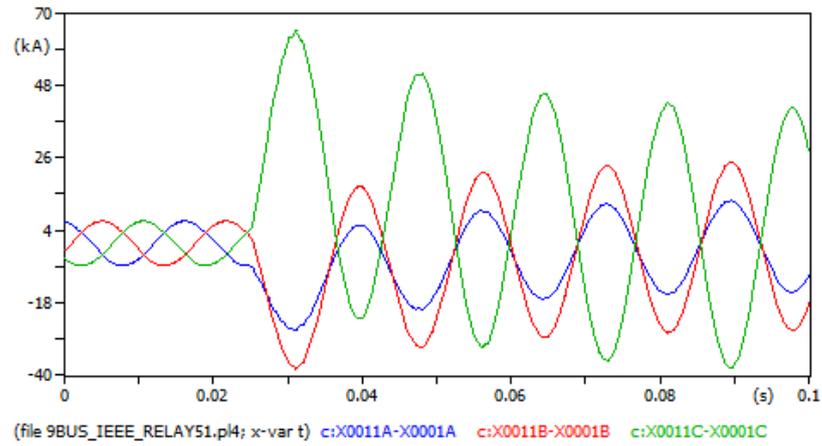
Figura 37 - Atuação do Relé Temporizado.



Fonte: Do autor.

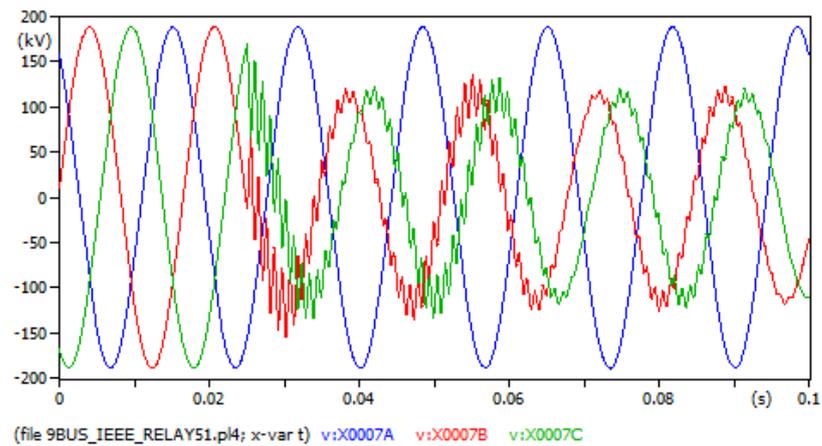
Para o curto-circuito bifásico-terra entre as fases b-c, pode-se observar a forma de onda da corrente sem a atuação do relé na Figura 38. Para esse tipo de falha foi encontrada uma corrente de pico de 64300 A. Também é possível observar a forma de onda da tensão no momento do curto-circuito na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Como esperado, nas fases que ocorreu o curto-circuito ocorre uma subtensão.

Figura 38 - Curto-Circuito Bifásico-Terra.



Fonte: Do autor.

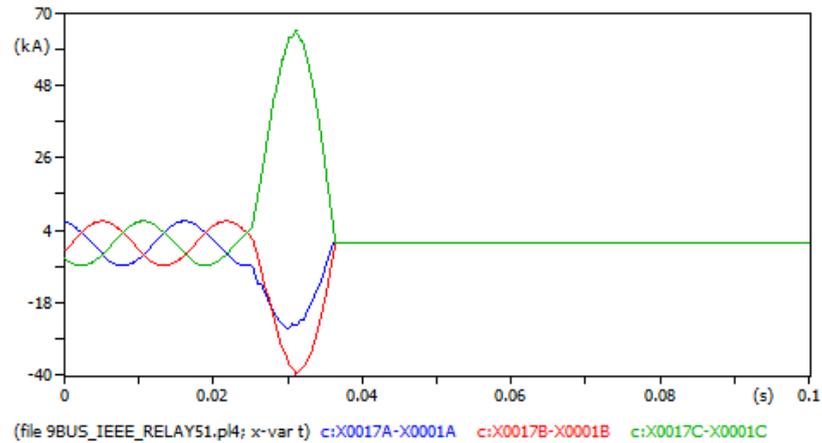
Figura 39 - Tensão Próximo ao local do Curto-Circuito Bifásico-Terra



Fonte: Do autor.

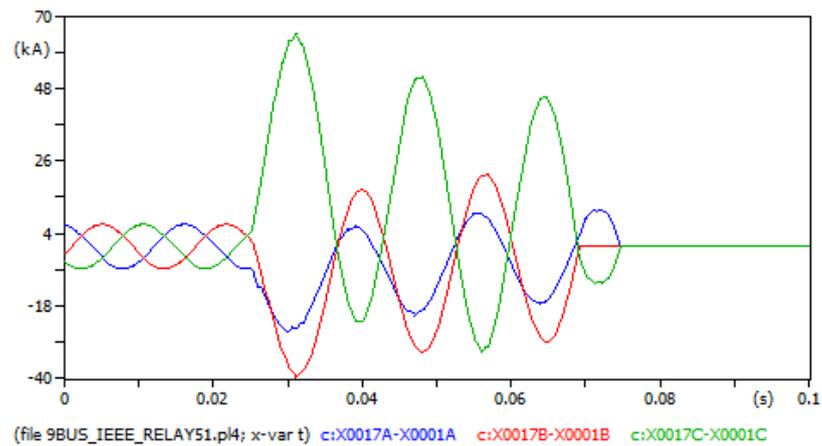
De maneira análoga ao curto-circuito trifásico, para a parametrização do relé de proteção modelado seguindo a lógica apresentada na Figura 24 a corrente de *pick-up* do dispositivo deve estar entre o valor da corrente antes da falta e a corrente de pico do curto-circuito, para este tipo de falta foi selecionada uma corrente de 62154 A, tanto para o relé instantâneo (50) quanto para o temporizado (51), para a função 51 foi escolhido o mesmo tempo de *delay* de 0,04 s.

Figura 40 - Atuação do Relé Instantâneo para o Curto-Circuito Bifásico-Terra.



Fonte: Do autor.

Figura 41 - Atuação do Relé Temporizado para o Curto-Circuito Bifásico-Terra.

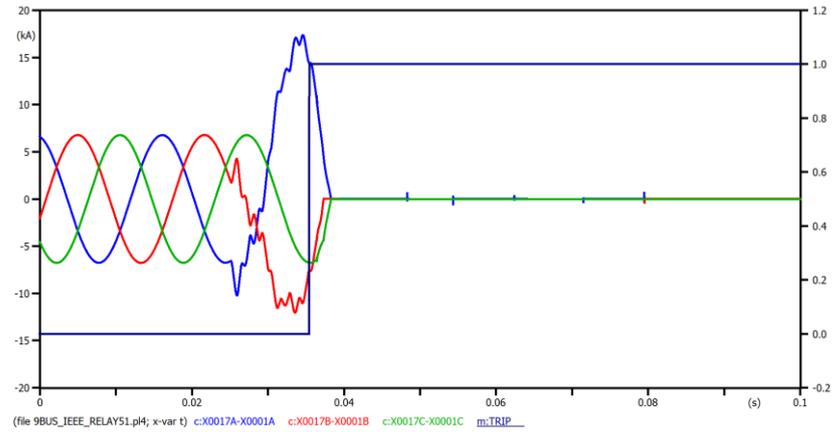


Fonte: Do autor.

Além de observar as formas de onda de corrente tensão, o relé modelado possibilita observar o comportamento do sinal de TRIP do relé, como esperado no relé instantâneo no momento que o relé identifica alguma sobrecorrente o dispositivo envia um sinal de TRIP para o disjuntor, já no relé temporizado o sinal é enviado após a contagem do *delay* pré-determinado.

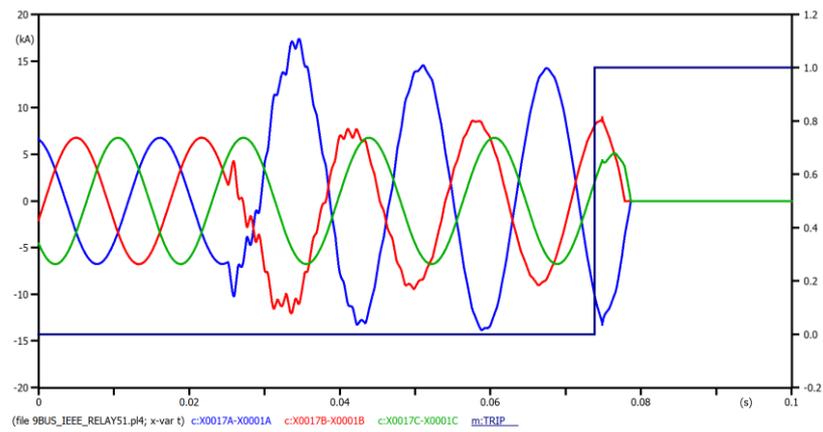
O curto-circuito monofásico simulado na fase a do sistema atingiu 17340 A de corrente de pico, já na forma de onda da tensão nas duas fases não atingidas pelo curto-circuito surgiu uma sobretensão e a fase curto-circuitada sofreu uma subtensão como visto na Figura 44.

Figura 42 - Ativação do TRIP no Curto-Circuito Monofásico.



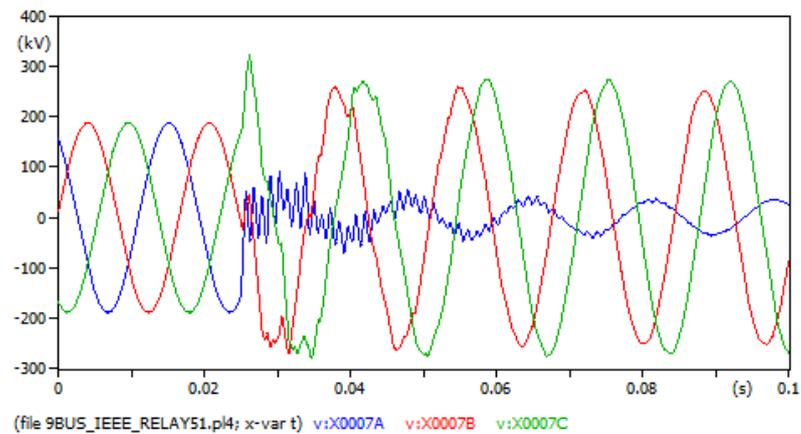
Fonte: Do autor.

Figura 43 - TRIP do Relé Temporizado



Fonte: Do autor.

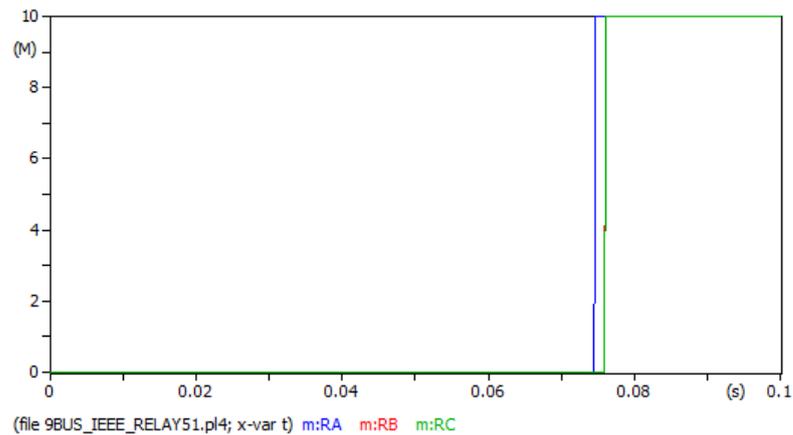
Figura 44 - Tensão Próximo ao local do Curto-Circuito Monofásico.



Fonte: Do autor.

No disjuntor é possível ver a análise da mudança das resistências de contato no momento em que o dispositivo recebe o sinal de TRIP do relé, nesse caso foi escolhido o momento da ativação do relé temporizado no curto-circuito monofásico.

Figura 45 - Resistências de Contato do Disjuntor.

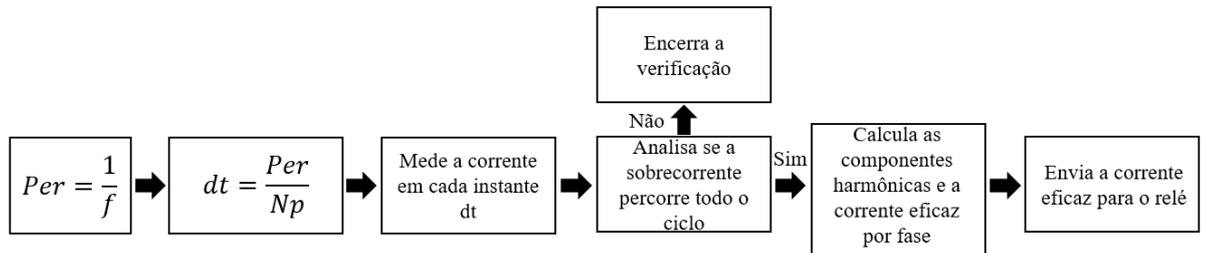


Fonte: Do autor.

### 3.5.2 Resultados da Segunda Simulação

Nesta simulação, o transformador TF-1 encontra-se operando em regime permanente até o instante 0,5 s, momento em que ocorre a energização do transformador TF-2. Essa energização provoca uma significativa perturbação no sistema, resultando em uma elevação nas correntes de fase e de neutro do transformador TF-1, mesmo este estando em operação estável anteriormente. A Figura 47 apresenta variação temporal das correntes de fase, enquanto a Figura 48 mostra a evolução do valor eficaz dessas correntes. Já a Figura 49 ilustra a variação do valor eficaz da componente fundamental das correntes de fase ao longo do tempo.

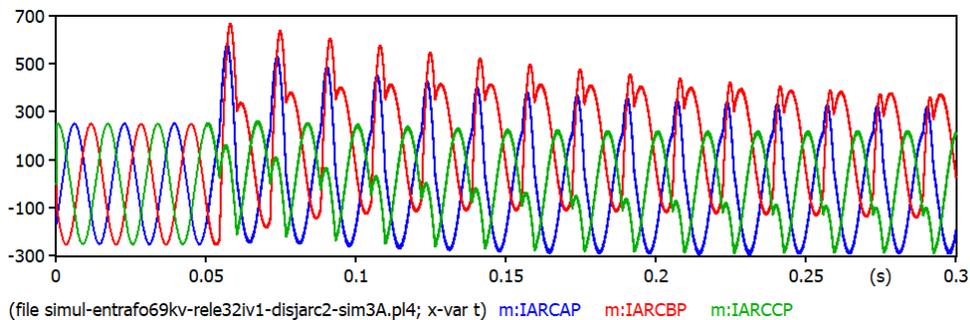
Figura 46 - Controle de Amostragem



Fonte: Do autor.

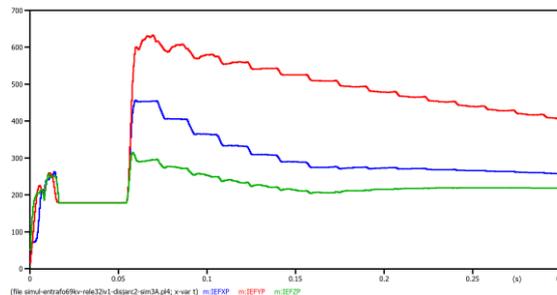
Para essa simulação foi determinada uma corrente de 500 A para a corrente de ajuste do relé instantâneo e 200 A para a corrente de ajuste do relé temporizado. Considerando que o transitório não será defeituoso para o transformador TF-1, o cenário ideal dessa simulação é o relé não atuar. A atuação do relé não acontece devido ao controle de amostragem do relé que impede a atuação do dispositivo que identifica que a sobrecorrente não completa um ciclo entendendo que é uma sobrecorrente transitória que não irá afetar o circuito como visto na Figura 46.

Figura 47 - Correntes de Fase.



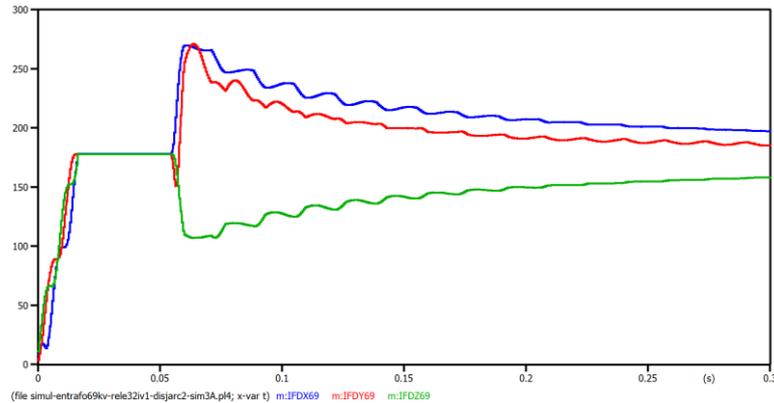
Fonte: Do autor.

Figura 48 - Valor Eficaz das Correntes de Fase.



Fonte: Do autor.

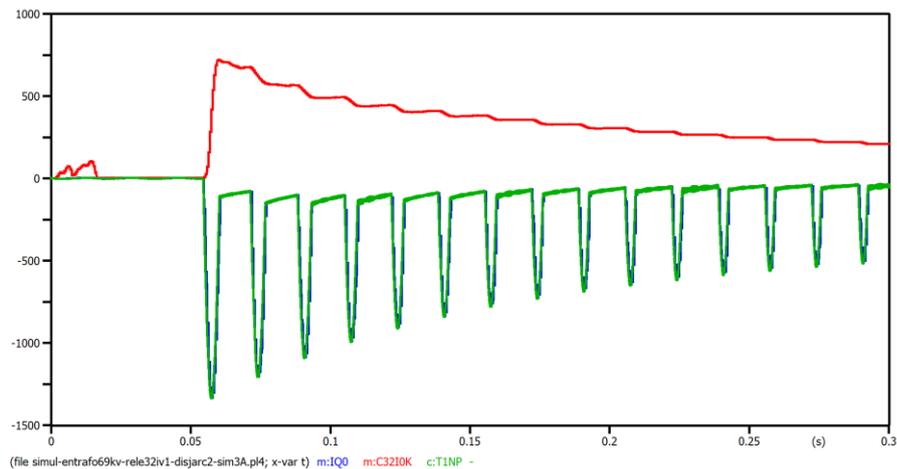
Figura 49 - Valor Eficaz da Componente Fundamental de Corrente.



Fonte: Do autor.

Observa-se que, apesar do aumento nas correntes de fase durante a energização do transformador TF-2, as funções de proteção contra sobrecorrente ANSI 50 e 51 não são acionadas. A Figura 50 apresenta a corrente de neutro do transformador TF-1, juntamente com a corrente residual medida pelo relé e o respectivo valor eficaz. Nota-se que os valores da corrente de neutro e da corrente residual registrada pelo relé são praticamente idênticos, evidenciando a correspondência entre as medições.

Figura 50 - Corrente de Neutro, Residual e Valor Eficaz.



Fonte: Do autor.

## 4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Este trabalho teve como objetivo principal a modelagem e simulação de dispositivos de proteção, especificamente um relé de sobrecorrente (instantâneo e temporizado) e um disjuntor controlado por relé, utilizando a linguagem MODELS no ambiente do *software* ATPDraw. Através da construção de um sistema baseado no circuito de 9 barras do IEEE e da análise de um circuito com transformadores em paralelo foi possível aplicar conceitos teóricos de proteção de sistemas elétricos e verificar, na prática, o comportamento dos dispositivos modelados diante de uma situação de diversos tipos de curto-circuito e frente a condições transitórias.

A fundamentação teórica abordou os principais tipos de curtos-circuitos e os fundamentos da filosofia de proteção, destacando a importância da seletividade, sensibilidade, confiabilidade e velocidade de atuação dos dispositivos. A modelagem dos componentes do APTDraw demonstrou a versatilidade da linguagem MODELS e a capacidade do *software* em representar com fidelidade o comportamento dinâmico de sistemas elétricos complexos.

Os resultados obtidos na primeira simulação comprovam a eficácia dos dispositivos modelados. Foi possível observar a atuação correta do relé de sobrecorrente instantâneo ao detectar correntes acima do valor parametrizado, bem como a atuação do relé temporizado após o tempo de retardo configurado. O disjuntor, por sua vez, respondeu adequadamente ao sinal de TRIP enviado pelo relé, interrompendo o fluxo de corrente conforme esperado.

A segunda simulação, envolvendo a energização de transformadores em paralelo, mostrou que os dispositivos modelados são capazes de operar de forma segura mesmo em condições transitórias, sem acionar indevidamente as proteções. Isso reforça a importância do uso de ferramentas computacionais como o ATPDraw para o estudo de transitórios eletromagnéticos e análise de desempenho de sistemas de proteção.

Com proposta de continuidade, surge-se a ampliação do estudo para incluir outros tipos de relés, como os diferenciais e direcionais, além da implementação de lógicas de coordenação entre múltiplos dispositivos de proteção. Também seria interessante explorar a integração do ATPDraw com outras ferramentas de análise,

como o PSCAD ou MATLAB/Simulink, visando um aprendizado mais abrangente e multidisciplinar.

Dessa forma, este trabalho contribui para o aprofundamento do conhecimento na área de proteção de sistemas elétricos, reforçando a importância da simulação computacional como ferramenta de apoio ao projeto, análise e validação de soluções técnicas no setor elétrico.

## REFERÊNCIAS

- [1]. **SETOR DE TRANSMISSÃO**. Disponível em: <<https://ri.taesa.com.br/sobre-a-taesa/setor-de-transmissao/>> Acesso em: 20 de maio de 2025
- [2]. **ONS PUBLICA DOCUMENTO TÉCNICO QUE CONSOLIDA INFORMAÇÕES INICIAIS DA OCORRÊNCIA NO SIM EM 15 DE AGOSTO DE 2023**. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/noticias/details.aspx?i=9482>> Acesso em: 02 de janeiro de 2025
- [3]. **MIGUEL, Pablo Mourente**. Introdução à simulação de relés de proteção usando a linguagem "MODELS" do ATP. 2011.
- [4]. **Anderson, P. M.** *Analysis of Faulted Power Systems*. IEEE Press, 1995.
- [5]. **KINDERMANN, G. Curto-Circuito**. 2 ed. Florianópolis-SC: UFSC, 1992 v. 1.
- [6]. **FILHO, JOÃO MAMEDE; MAMEDE, DANIEL**. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. 2011
- [7]. **FRAZÃO, RODRIGO JOSÉ ALBUQUERQUE**. Proteção do Sistema Elétrico de Potência. 2016
- [8]. **DUARTE, ANTÔNIO CARLOS DA ROCHA**. Equipamentos de geração e transmissão: conceitos e critérios. 1ed. São Paulo, 2018 1 ed.
- [9]. **ATPDraw**. Disponível em: <<https://www.atpdraw.net/index.php>> Acesso em: 07 de junho de 2025
- [10]. **ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO**. Procedimentos de Rede – Submódulo 2.3: Premissas e critérios e metodologia para estudos elétricos, 2022. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-oons/procedimentos-de-rede/vigentes>>. Acesso em: 07 de junho de 2025
- [11]. **MODELS**. Disponível em: [https://www.atpdraw.net/help7/html\\_model\\_overview.html](https://www.atpdraw.net/help7/html_model_overview.html). Acesso em: 08 de junho de 2025
- [12]. **IEEE 09 Bus System**. Disponível em: [https://www.pscad.com/uploads/knowledge\\_base/ieee\\_9\\_bus\\_technical\\_note.pdf](https://www.pscad.com/uploads/knowledge_base/ieee_9_bus_technical_note.pdf). Acesso em: 10 de junho de 2025
- [13] **Alternative Transients Program (ATP) Rule Book**. CANADIAN/AMERICAN EMTP USER GROUP. Oregon: EEUG, 2016
- [14] **VIANNA, PRISCILA DE LIMA**. Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Baixa Impedância de Barramentos no Software ATP [Distrito Federal]. 2013

## ANEXOS

### ANEXO A – Código do Disjuntor Controlado por Relé

Fonte: Adaptado de [3]

```

MODEL DisjCom
-----
-- modelo de disjuntor controlado por rele
-----

Input
  Vx[1..3] -- entrada de tensão [V]
  Vy[1..3]
  Abrir    -- sinal para abrir
  Fechar   -- sinal para fechar

Output
  RA -- valor da resistência entre contatos [Ohms]
  RB
  RC

Data
  RetFec -- indica a duração necessária para aceitar o sinal de fechar
  RetAbr  -- indica a duração necessária para aceitar o sinal de abrir
  Estado  -- estado atual do disjuntor
           -- 0 aberto
           -- 1 fechado

var
  VA, VB, VC, VR, VS, VT -- corrente contato principal
  RcA, RcB, RcC, Rfcd, Rabt -- Res contato principal
  Cmdo -- 0-disp 1-aguardando abertura 2--aguardando fechamento
  IniCom -- duração do Cmdo
  RA, RB, RC
  CorA, CorB, CorC -- corrente nos contatos principais [A]
  CorVA, CorVB, CorVC -- corrente na iteração anterior

init
  Rfcd:=100E-6
  Rabt:=10E6
  if Estado=0 then
    RcA:=Rabt
    RcB:=Rabt
    RcC:=Rabt
  else
    RcA:=Rfcd
    RcB:=Rfcd
    RcC:=Rfcd
  endif
  RA:=RcA
  RB:=RcB
  RC:=RcC
  Cmdo:=0
  VA:=Vx[1]
  VB:=Vx[2]
  VC:=Vx[3]
  VR:=Vy[1]
  VS:=Vy[2]
  VT:=Vy[3]
  CorA:=(VA-VR)/RcA

```

```

CorB:=(VB-VS)/RcB
CorC:=(VC-VT)/RcC
CorVA:=0
CorVB:=0
CorVC:=0

endinit

exec
-- pega as tensões
VA:=Vx[1]
VB:=Vx[2]
VC:=Vx[3]
VR:=Vy[1]
VS:=Vy[2]
VT:=Vy[3]
-- determina as correntes
CorVA:=CorA
CorVB:=CorB
CorVC:=CorC

-- pega o Cmdo
if Cmdo=0 then
  if Fechar>0 then
    Inicom:=t
    Cmdo:=2 --passa a aguardar o fechamento, mas ainda aceita Cmdo
de abertura
  endif
endif
if (Cmdo=0) or (Cmdo=2) then
  if Abrir>0 then
    Inicom:=t
    Cmdo:=1 -- passa a aguardar a abertura e não aceita nenhum
outro Cmdo
  endif
endif
if Cmdo=2 then
  -- verifica duração do sinal de fechar
  if t-IniCom>RetFec then
    RcA:=Rfcd
    RcB:=Rfcd
    RcC:=Rfcd
    Cmdo:=0
  endif
endif
if Cmdo=1 then
  -- verifica duração do sinal de abrir
  if t-IniCom>RetAbr then
    -- fase A
    if (Abs(CorA)<0.001) or (CorA*CorVA<=0) then
      -- corrente passou por zero
      RcA:=Rabt -- abre o contato
    endif -- aguarda passagem pelo zero
    -- fase B
    if (Abs(CorB)<0.001) or (CorB*CorVB<=0) then
      -- corrente passou por zero
      RcB:=Rabt -- abre o contato
    endif -- aguarda passagem pelo zero
    -- fase C
    if (Abs(CorC)<0.001) or (CorC*CorVC<=0) then
      -- corrente passou por zero
      RcC:=Rabt -- abre o contato
    endif
  endif
endif

```

```
        endif -- aguarda passagem pelo zero
    endif
    if (RcA=Rabt) and (RcB=Rabt) and (RcC=Rabt) then
        Cmdo:=0 -- reseta o Cmdo
    endif
endif
endif
-----
CorA:=(VA-VR)/RcA
CorB:=(VB-VS)/RcB
CorC:=(VC-VT)/RcC
-----
RA:=RcA
RB:=RcB
RC:=RcC
-----
endexec
endmodel
```