

**JÁDER FERNANDO DIAS BREDÁ**

# **UM MODELO COMPUTACIONAL PARA O RELÉ DIGITAL DE SOBRECORRENTE EMPREGADO NA PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola de Engenharia de São Carlos, da  
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em  
Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Mário Oleskovicz

São Carlos  
2009



## AGRADECIMENTOS

Ao professor Mário Oleskovicz, pela ótima orientação, atenção dispensada, apoio e incentivo na elaboração deste trabalho.

Aos professores Denis Vinicius Coury e José Carlos de Melo Vieira, pelo auxílio concedido em suas respectivas áreas de pesquisa.

Aos companheiros de laboratório Luiz Henrique e Letícia, pela colaboração inicial na construção deste trabalho.

Aos amigos de graduação, Luís Paulo e Marcelo, pela verdadeira amizade e conselhos valiosos.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, que de algum modo colaboraram durante a minha graduação nesta universidade.

Ao próprio Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) – Universidade de São Paulo.

Ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica – LSEE, pela participação e fornecimento de todas as condições necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

A Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL, devido à parceria com o LSEE, pelo fornecimento dos dados que vieram a possibilitar e viabilizar esta pesquisa.

Ao casal João Paulo e Roseli e os demais integrantes da Loja Maçônica de Adamantina, por todo tipo de apoio e incentivo primordiais há vários anos.

A minha namorada Bruna, pelo seu amor, incentivo, companheirismo e paciência nos momentos de dificuldade.

Aos meus pais Carlos e Sueli, pela minha vida e pelo exemplo de trabalho e dedicação dispensados para minha formação.

A Deus, por toda minha família e amigos, além da minha felicidade de viver.



## RESUMO

BREDA, J. F. D. **Um Modelo Computacional para o Relé Digital de Sobrecorrente Empregado na Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009, 118p.

O relé digital de sobrecorrente é um dos componentes fundamentais em um sistema de proteção direcionado a sistemas de subtransmissão e/ou de distribuição. Sendo assim, o objetivo principal deste projeto se concentra na modelagem, caracterização e análise do relé digital de sobrecorrente aplicado a um determinado sistema elétrico de distribuição. Para tanto, o trabalho foi desenvolvido através do uso dos *softwares Alternative Transients Program (ATP)*, no tocante a modelagem do sistema de distribuição, e do ambiente *Simulink/Matlab*, para o desenvolvimento do relé digital propriamente dito. O modelo foi validado através de casos-testes e, posteriormente, avaliado perante a simulação de um sistema de distribuição real. Ressalta-se que para os casos-testes observados, os resultados encontrados foram condizentes com os valores calculados teoricamente. Já para a aplicação do modelo desenvolvido frente a um sistema de distribuição real, os resultados encontrados vieram a comprovar que o modelo desenvolvido é bastante preciso frente ao comportamento dos relés digitais de sobrecorrente disponíveis comercialmente junto ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE).

**Palavras-chaves:** Relé digital de sobrecorrente; sistema digital de proteção; modelo computacional; *Alternative Transients Program (ATP)*; *Simulink/Matlab*; sistemas elétricos de potência.



## ABSTRACT

BREDA, J. F. D. **A Computational Model for Overcurrent Digital Relay applied to Protection in Electrical Power Systems**. Course Conclusion Work – Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2009, 118p.

The overcurrent digital relay is one of the fundamental components in a protection system directed at subtransmission and/or distribution systems. In this manner, the main objective of this project consists on the modeling, characterization and analysis of the overcurrent digital relay applied in a specific electric distribution system. Therefore, the work was developed through the use of the Alternative Transients Program (ATP) software, regarding the modeling of the distribution system, and of the *Simulink*/Matlab environment, for the development of the digital relay itself. The model was validated by test cases and, subsequently, evaluated through the simulation of an actual distribution system. It is noteworthy that for the considered test cases, the results were consistent when compared with the calculated values. As for the application of the developed model to a simulated distribution system, the results show that the developed model is very accurate concerning the behavior of the overcurrent digital relays available commercially in the Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE).

**Keywords:** Overcurrent digital relay; digital protection system; computational model; Alternative Transients Program (ATP); *Simulink*/Matlab; electrical power systems.



## SUMÁRIO

|                                                                                                   |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| LISTA DE FIGURAS.....                                                                             | xi    |
| LISTA DE TABELAS.....                                                                             | xix   |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....                                                              | xxi   |
| LISTA DE SÍMBOLOS .....                                                                           | xxiii |
| 1. INTRODUÇÃO .....                                                                               | 1     |
| 2. O RELÉ DIGITAL DE SOBRECORRENTE.....                                                           | 3     |
| 2.1 – Apontamentos Iniciais.....                                                                  | 3     |
| 2.2 – O modelo do relé digital de sobrecorrente monofásico implementado .....                     | 9     |
| 2.3 – O modelo do relé digital de sobrecorrente trifásico implementado.....                       | 23    |
| 3. O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA (SEP) .....                                                     | 27    |
| 3.1 – A modelagem do SEP dispondo da interface gráfica do <i>software ATPDraw</i> .....           | 29    |
| 3.1.1 – Modelagem do equivalente do sistema .....                                                 | 29    |
| 3.1.2 – Modelagem do transformador da subestação.....                                             | 30    |
| 3.1.3 – Modelagem da chave da subestação .....                                                    | 31    |
| 3.1.4 – Modelagem do conjunto de transformadores de distribuição 1 e 2 .....                      | 32    |
| 3.1.5 – Modelagem do transformador particular 1 .....                                             | 33    |
| 3.1.6 – Modelagem do transformador de distribuição 3 .....                                        | 33    |
| 3.1.7 – Modelagem do banco de capacitores 1 e 2 .....                                             | 34    |
| 3.1.8 – Modelagem da linha de distribuição do trecho T1 e T2 – BC1 .....                          | 35    |
| 3.1.9 – Modelagem das chaves de medição.....                                                      | 36    |
| 3.2 – A operação do SEP em regime permanente e sob condições de defeito .....                     | 36    |
| 3.2.1 – O sistema em regime permanente.....                                                       | 36    |
| 3.2.2 – O sistema sob condição de defeito.....                                                    | 40    |
| 3.2.2.1 – Variação do Local de Aplicação da Falta.....                                            | 41    |
| 3.2.2.2 – Variação do Tipo de Falta Aplicada .....                                                | 58    |
| 3.3 – Conclusões parciais sobre as simulações realizadas.....                                     | 66    |
| 4. VALIDAÇÃO DOS MODELOS DESENVOLVIDOS .....                                                      | 67    |
| 4.1 – O modelo do relé digital de sobrecorrente monofásico.....                                   | 67    |
| 4.1.1 – Caso-teste 1: Corrente de Curto-circuito Simétrica.....                                   | 67    |
| 4.1.2 – Caso-teste 2: Corrente de Curto-circuito Assimétrica.....                                 | 73    |
| 4.1.3 – Caso-teste 3: Corrente de Curto-circuito com Saturação do Transformador de Corrente ..... | 77    |
| 4.2 – O modelo do relé digital de sobrecorrente trifásico .....                                   | 84    |
| 4.2.1 – Variação do Local de Aplicação da Falta.....                                              | 85    |
| 4.2.2 – Variação do Valor de Resistência da Falta .....                                           | 87    |
| 4.2.3 – Variação do Ângulo de Incidência da Falta.....                                            | 88    |
| 4.2.4 – Variação do Tempo de Duração da Falta .....                                               | 89    |

|                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.5 – Variação no Tipo de Falta Aplicada .....          | 90  |
| 5. CONCLUSÕES .....                                       | 93  |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                          | 95  |
| Apêndice A – Máscara gerada pelo <i>software</i> ATP..... | 97  |
| Apêndice B – Publicações.....                             | 103 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> – Descrição funcional do relé de sobrecorrente. ....                          | 4  |
| <b>Figura 2</b> – Curva típica de um relé de sobrecorrente comercial. ....                    | 5  |
| <b>Figura 3</b> – Curva característica de um relé de sobrecorrente de corrente definida. .... | 6  |
| <b>Figura 4</b> – Curva característica de um relé de sobrecorrente de tempo definido. ....    | 6  |
| <b>Figura 5</b> – Curva característica de um relé de sobrecorrente de tempo inverso. ....     | 7  |
| <b>Figura 6</b> – Margem de discriminação/segurança. ....                                     | 8  |
| <b>Figura 7</b> – Diagrama de blocos do relé digital de sobrecorrente monofásico. ....        | 10 |
| <b>Figura 8</b> – Parâmetros do bloco i. ....                                                 | 10 |
| <b>Figura 9</b> – Especificação do sinal de entrada. ....                                     | 11 |
| <b>Figura 10</b> – Parâmetros do bloco RTC. ....                                              | 11 |
| <b>Figura 11</b> – Parâmetros do bloco <i>Analog Filter Design</i> . ....                     | 12 |
| <b>Figura 12</b> – Parâmetros do bloco <i>Saturation</i> . ....                               | 13 |
| <b>Figura 13</b> – Parâmetros do bloco <i>Discrete Fourier</i> . ....                         | 13 |
| <b>Figura 14</b> – Parâmetros do bloco <i>Constant2</i> . ....                                | 14 |
| <b>Figura 15</b> – Parâmetros do bloco <i>Relational Operator</i> . ....                      | 14 |
| <b>Figura 16</b> – Parâmetros do bloco <i>Mux</i> . ....                                      | 15 |
| <b>Figura 17</b> – Parâmetros do bloco <i>Fcn</i> . ....                                      | 15 |
| <b>Figura 18</b> – Parâmetros do bloco <i>Saturation1</i> . ....                              | 16 |
| <b>Figura 19</b> – Parâmetros do bloco <i>Constant</i> . ....                                 | 16 |
| <b>Figura 20</b> – Parâmetros do bloco <i>Fcn1</i> . ....                                     | 17 |
| <b>Figura 21</b> – Parâmetros do bloco <i>Integrator</i> . ....                               | 17 |
| <b>Figura 22</b> – Parâmetros do bloco <i>Constant1</i> . ....                                | 18 |
| <b>Figura 23</b> – Parâmetros do bloco <i>Relational Operator1</i> . ....                     | 18 |
| <b>Figura 24</b> – Parâmetros do bloco <i>Relay</i> . ....                                    | 19 |

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 25</b> – Parâmetros do bloco <i>TRIP</i> . .....                                                                     | 20 |
| <b>Figura 26</b> – Máscara de ajustes do relé de sobrecorrente temporizado. ....                                               | 20 |
| <b>Figura 27</b> – Aba <i>Parameters</i> do editor de máscara. ....                                                            | 21 |
| <b>Figura 28</b> – Aba <i>Initialization</i> do editor de máscara. ....                                                        | 22 |
| <b>Figura 29</b> – Aba <i>Documentation</i> do editor de máscara. ....                                                         | 23 |
| <b>Figura 30</b> – Representação do relé de sobrecorrente trifásico. ....                                                      | 23 |
| <b>Figura 31</b> – Máscara de ajustes do relé de sobrecorrente trifásico. ....                                                 | 24 |
| <b>Figura 32</b> – Diagrama de blocos do relé digital de sobrecorrente trifásico. ....                                         | 24 |
| <b>Figura 33</b> – Diagrama de blocos do subsistema Fase A. ....                                                               | 25 |
| <b>Figura 34</b> – Sistema elétrico simulado dispondo do <i>software</i> ATP. ....                                             | 27 |
| <b>Figura 35</b> – Parâmetros da fonte equivalente do SEP em análise. ....                                                     | 30 |
| <b>Figura 36</b> – Parâmetros do transformador da subestação. ....                                                             | 30 |
| <b>Figura 37</b> – Valores da curva de saturação do transformador da subestação. ....                                          | 31 |
| <b>Figura 38</b> – Parâmetros da chave da subestação. ....                                                                     | 32 |
| <b>Figura 39</b> – Parâmetros do conjunto de trafos 1 e 2. ....                                                                | 32 |
| <b>Figura 40</b> – Parâmetros RL do trafo particular 1. ....                                                                   | 33 |
| <b>Figura 41</b> – Parâmetros de capacitância do trafo particular 1. ....                                                      | 33 |
| <b>Figura 42</b> – Parâmetros da carga no secundário do trafo 3. ....                                                          | 34 |
| <b>Figura 43</b> – Parâmetros do banco de capacitores 1. ....                                                                  | 34 |
| <b>Figura 44</b> – Parâmetros do banco de capacitores 2. ....                                                                  | 35 |
| <b>Figura 45</b> – Resistência infinita para terra. ....                                                                       | 35 |
| <b>Figura 46</b> – Parâmetros de impedância do trecho entre os trafos 1 e 2 e chave que comanda o banco de capacitores 1. .... | 36 |
| <b>Figura 47</b> – Janela da chave de medição de tensão. ....                                                                  | 36 |
| <b>Figura 48</b> – Tensões trifásicas no lado de alta da subestação. ....                                                      | 37 |

|                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 49</b> – Tensões trifásicas no lado de baixa do transformador da subestação. ....                                                                                                    | 38 |
| <b>Figura 50</b> – Correntes trifásicas no lado de baixa do transformador da subestação.....                                                                                                   | 38 |
| <b>Figura 51</b> – Tensões trifásicas no lado de alta do transformador T13. ....                                                                                                               | 39 |
| <b>Figura 52</b> – Tensões trifásicas no lado de baixa do transformador T13.....                                                                                                               | 40 |
| <b>Figura 53</b> – Componente <i>Splitter</i> empregado para caracterizar as condições de defeitos sobre o SEP em análise. ....                                                                | 40 |
| <b>Figura 54</b> – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada com um ângulo de incidência de $0^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001 \Omega$ .....          | 41 |
| <b>Figura 55</b> – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada com um ângulo de incidência de $0^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001 \Omega$ .....        | 42 |
| <b>Figura 56</b> – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada com um ângulo de incidência de $0^\circ$ e com uma resistência de falta de $100 \Omega$ .....            | 42 |
| <b>Figura 57</b> – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada com um ângulo de incidência de $0^\circ$ e com uma resistência de falta de $100 \Omega$ .....          | 43 |
| <b>Figura 58</b> – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada com um ângulo de incidência de $90^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001 \Omega$ .....         | 43 |
| <b>Figura 59</b> – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada com um ângulo de incidência de $90^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001 \Omega$ .....       | 44 |
| <b>Figura 60</b> – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada com um ângulo de incidência de $90^\circ$ e com uma resistência de falta de $100 \Omega$ .....           | 44 |
| <b>Figura 61</b> – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada com um ângulo de incidência de $90^\circ$ e com uma resistência de falta de $100 \Omega$ .....         | 45 |
| <b>Figura 62</b> – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $0^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001 \Omega$ .....   | 46 |
| <b>Figura 63</b> – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $0^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001 \Omega$ ..... | 46 |
| <b>Figura 64</b> – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $0^\circ$ e com uma resistência de falta de $100 \Omega$ .....     | 47 |
| <b>Figura 65</b> – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $0^\circ$ e com uma resistência de falta de $100 \Omega$ .....   | 47 |
| <b>Figura 66</b> – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $90^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001 \Omega$ .....  | 48 |

|                                                                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 67</b> – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $90^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001 \Omega$ ..... | 48 |
| <b>Figura 68</b> – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $90^\circ$ e com uma resistência de falta de $100 \Omega$ .....     | 49 |
| <b>Figura 69</b> – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $90^\circ$ e com uma resistência de falta de $100 \Omega$ .....   | 49 |
| <b>Figura 70</b> – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $0^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001 \Omega$ .....    | 50 |
| <b>Figura 71</b> – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $0^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001 \Omega$ .....  | 50 |
| <b>Figura 72</b> – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $0^\circ$ e com uma resistência de falta de $100 \Omega$ .....      | 51 |
| <b>Figura 73</b> – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $0^\circ$ e com uma resistência de falta de $100 \Omega$ .....    | 51 |
| <b>Figura 74</b> – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $90^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001 \Omega$ .....   | 52 |
| <b>Figura 75</b> – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $90^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001 \Omega$ ..... | 52 |
| <b>Figura 76</b> – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $90^\circ$ e com uma resistência de falta de $100 \Omega$ .....     | 53 |
| <b>Figura 77</b> – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $90^\circ$ e com uma resistência de falta de $100 \Omega$ .....   | 53 |
| <b>Figura 78</b> – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada com um ângulo de incidência de $0^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001 \Omega$ .....           | 54 |
| <b>Figura 79</b> – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada com um ângulo de incidência de $0^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001 \Omega$ .....         | 55 |
| <b>Figura 80</b> – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada com um ângulo de incidência de $0^\circ$ e com uma resistência de falta de $100 \Omega$ .....             | 55 |
| <b>Figura 81</b> – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada com um ângulo de incidência de $0^\circ$ e com uma resistência de falta de $100 \Omega$ .....           | 56 |
| <b>Figura 82</b> – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada com um ângulo de incidência de $90^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001 \Omega$ .....          | 56 |
| <b>Figura 83</b> – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada com um ângulo de incidência de $90^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001 \Omega$ .....        | 57 |

|                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 84</b> – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada com um ângulo de incidência de $90^\circ$ e com uma resistência de falta de $100\ \Omega$ .....                            | 57 |
| <b>Figura 85</b> – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada com um ângulo de incidência de $90^\circ$ e com uma resistência de falta de $100\ \Omega$ .....                          | 58 |
| <b>Figura 86</b> – Tensões trifásicas na entrada de BC3 resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $0^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001\ \Omega$ .....  | 59 |
| <b>Figura 87</b> – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $0^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001\ \Omega$ .....                  | 59 |
| <b>Figura 88</b> – Tensões trifásicas na entrada de BC3 resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $90^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001\ \Omega$ ..... | 60 |
| <b>Figura 89</b> – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $90^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001\ \Omega$ .....                 | 60 |
| <b>Figura 90</b> – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $0^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001\ \Omega$ .....                    | 61 |
| <b>Figura 91</b> – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $0^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001\ \Omega$ .....                  | 62 |
| <b>Figura 92</b> – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $90^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001\ \Omega$ .....                   | 62 |
| <b>Figura 93</b> – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de $90^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001\ \Omega$ .....                 | 63 |
| <b>Figura 94</b> – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito trifásico com um ângulo de incidência de $0^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001\ \Omega$ .....                   | 64 |
| <b>Figura 95</b> – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito trifásico aplicada com um ângulo de incidência de $0^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001\ \Omega$ .....        | 64 |
| <b>Figura 96</b> – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito trifásico aplicada com um ângulo de incidência de $90^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001\ \Omega$ .....         | 65 |
| <b>Figura 97</b> – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito trifásico aplicada com um ângulo de incidência de $90^\circ$ e com uma resistência de falta de $0,001\ \Omega$ ....        | 65 |
| <b>Figura 98</b> – Representação esquemática de um circuito puramente resistivo com um relé de sobrecorrente temporizado alocado. ....                                                                           | 67 |
| <b>Figura 99</b> – Forma de onda da corrente primária. ....                                                                                                                                                      | 68 |
| <b>Figura 100</b> – Forma de onda da corrente secundária.....                                                                                                                                                    | 69 |

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 101</b> – Forma de onda da corrente na saída do filtro de <i>Butterworth</i> .....                                                 | 69 |
| <b>Figura 102</b> – Forma de onda da magnitude da componente fundamental do fasor de corrente.<br>.....                                      | 70 |
| <b>Figura 103</b> – Múltiplo da corrente de operação.....                                                                                    | 70 |
| <b>Figura 104</b> – Cálculo do valor do integrando pelo bloco <i>Fcn1</i> .....                                                              | 71 |
| <b>Figura 105</b> – Forma de onda na saída do bloco <i>Integrator</i> . ....                                                                 | 71 |
| <b>Figura 106</b> – Saída do bloco <i>Relational Operator1</i> . ....                                                                        | 72 |
| <b>Figura 107</b> – Forma de onda da saída <i>TRIP</i> . ....                                                                                | 72 |
| <b>Figura 108</b> – Representação esquemática de um circuito com indutor no ramo série com o relé de sobrecorrente temporizado alocado. .... | 73 |
| <b>Figura 109</b> – Forma de onda da corrente primária. ....                                                                                 | 74 |
| <b>Figura 110</b> – Forma de onda da corrente na saída do filtro de <i>Butterworth</i> .....                                                 | 75 |
| <b>Figura 111</b> – Forma de onda da magnitude da componente fundamental do fasor de corrente.<br>.....                                      | 75 |
| <b>Figura 112</b> – Forma de onda na saída do bloco <i>Integrator</i> . ....                                                                 | 76 |
| <b>Figura 113</b> – Forma de onda da saída <i>TRIP</i> . ....                                                                                | 77 |
| <b>Figura 114</b> – Representação esquemática do relé de sobrecorrente temporizado ligado a um transformador de corrente.....                | 77 |
| <b>Figura 115</b> – Máscara de ajustes do relé digital de sobrecorrente temporizado.....                                                     | 78 |
| <b>Figura 116</b> – Parâmetros do TC na região de saturação. ....                                                                            | 79 |
| <b>Figura 117</b> – Forma de onda da corrente primária. ....                                                                                 | 79 |
| <b>Figura 118</b> – Forma de onda da corrente na saída do filtro de <i>Butterworth</i> .....                                                 | 80 |
| <b>Figura 119</b> – Forma de onda da magnitude da componente fundamental do fasor de corrente.<br>.....                                      | 81 |
| <b>Figura 120</b> – Estimação da magnitude do fasor com saturação do TC. ....                                                                | 81 |
| <b>Figura 121</b> – Forma de onda da saída <i>TRIP</i> . ....                                                                                | 82 |
| <b>Figura 122</b> – Parâmetros do TC com eliminação da saturação. ....                                                                       | 82 |

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 123</b> – Forma de onda da corrente primária. ....                                                        | 83 |
| <b>Figura 124</b> – Forma de onda da corrente na saída do filtro de <i>Butterworth</i> .....                        | 83 |
| <b>Figura 125</b> – Forma de onda da magnitude da componente fundamental do fasor de corrente.<br>.....             | 84 |
| <b>Figura 126</b> – Forma de onda da saída <i>TRIP</i> . ....                                                       | 84 |
| <b>Figura 127</b> – Saída de <i>TRIP</i> para a variação do local de aplicação da falta.....                        | 86 |
| <b>Figura 128</b> – Saída de <i>TRIP</i> para a variação do valor de resistência de falta.....                      | 88 |
| <b>Figura 129</b> – Saída de <i>TRIP</i> para a variação do ângulo de incidência na forma de onda da<br>falta. .... | 89 |
| <b>Figura 130</b> – Saída de <i>TRIP</i> para variação do tempo de duração da falta.....                            | 90 |
| <b>Figura 131</b> – Saída <i>TRIP</i> para variação do tipo de falta aplicada. ....                                 | 91 |



## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1</b> – Valores de $\alpha$ , $\beta$ e L para relé de sobrecorrente padrão.....                                                                                 | 9  |
| <b>Tabela 2</b> – Principais características dos transformadores simulados via <i>software</i> ATP.....                                                                    | 28 |
| <b>Tabela 3</b> – Características dos transformadores de distribuição.....                                                                                                 | 28 |
| <b>Tabela 4</b> – Comparação do tempo de atuação do relé desenvolvido com o valor teórico esperado para a variação do local de aplicação da falta. ....                    | 87 |
| <b>Tabela 5</b> – Comparação do tempo de atuação do relé desenvolvido com o valor teórico esperado para a variação do ângulo de incidência na forma de onda da falta. .... | 89 |
| <b>Tabela 6</b> – Comparação do tempo de atuação do relé desenvolvido com os valores teóricos para variação do tipo de falta aplicada. ....                                | 91 |



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ATP** – *Alternative Transients Program*
- SEP** – Sistema Elétrico de Potência
- CPFL** – Companhia Paulista de Força e Luz
- BC** – Banco de Capacitores
- LT** – Linha de Transmissão
- CC** – Corrente Contínua
- CA** – Corrente Alternada
- DT** – Dispositivo de Tempo
- BT** – Baixa Tensão
- AT** – Alta Tensão
- RTC** – Relação de Transformação de Corrente do transformador
- IEC** – *International Electrotechnical Commission*
- ANSI** – *American National Standards Institute*
- TC** – Transformador de Corrente
- IEEE** – *Institute of Electrical and Electronic Engineers*



## LISTA DE SÍMBOLOS

|                                                    |                                                                   |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| <b>R</b>                                           | – Resistência                                                     |
| <b>L</b>                                           | – Indutância                                                      |
| <b>I<sub>f</sub></b>                               | – Corrente de defeito (curto-circuito)                            |
| <b>I<sub>p</sub></b>                               | – Corrente de <i>pickup</i>                                       |
| <b>t</b>                                           | – Tempo                                                           |
| <b>D</b>                                           | – Dial ou ajuste multiplicador de tempo                           |
| <b><math>\alpha</math>, <math>\beta</math> e L</b> | – Coeficientes que determinam a inclinação característica do relé |
| <b>M</b>                                           | – Múltiplo do ajuste da corrente de operação                      |
| <b>T<sub>m</sub></b>                               | – Tempo de atuação do relé                                        |
| <b>v</b>                                           | – Tensão de entrada do circuito                                   |
| <b>R<sub>Branch</sub></b>                          | – Resistência do circuito                                         |
| <b>R<sub>Breaker</sub></b>                         | – Resistência do disjuntor                                        |
| <b>T1 e T2</b>                                     | – Conjunto de transformadores de distribuição 1 e 2               |
| <b>T3</b>                                          | – Transformador de distribuição 3                                 |
| <b>T4, T5, T6 e T7</b>                             | – Conjunto de transformadores de distribuição 4, 5, 6 e 7         |
| <b>T8, T9 e T10</b>                                | – Conjunto de transformadores de distribuição 8, 9 e 10           |
| <b>T11, T12 e T14</b>                              | – Conjunto de transformadores de distribuição 11, 12 e 14         |
| <b>T13</b>                                         | – Transformador de distribuição 13                                |
| <b>Tp1</b>                                         | – Transformador particular 1                                      |
| <b>Tp2</b>                                         | – Transformador particular 2                                      |
| <b>Tp3</b>                                         | – Transformador particular 3                                      |
| <b>BC1</b>                                         | – Banco de capacitores 1                                          |
| <b>BC2</b>                                         | – Banco de capacitores 2                                          |
| <b>BC3</b>                                         | – Banco de capacitores 3                                          |



## 1. INTRODUÇÃO

Como proposta de trabalho, este projeto procura viabilizar a modelagem, caracterização e análise de um relé de sobrecorrente temporizado, usualmente utilizado na proteção de sistemas de subtransmissão e de distribuição. Pretende-se validar tais modelagens através da comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os valores calculados teoricamente de acordo com seu equacionamento correspondente.

Vislumbrando um cenário de aplicação para esta proposta, tem-se que os sistemas de distribuição de energia elétrica estão sujeitos a perturbações das mais diversas origens, tais como sobretensões relacionadas às manobras de cargas e de bancos de capacitores, descargas atmosféricas, problemas mecânicos e de natureza térmica na rede, atos de vandalismo e de situações de defeitos (curtos-circuitos), entre outros.

Contudo, pela prática e dos apontamentos registrados em campo, sabe-se que as situações de curtos-circuitos acarretam maiores prejuízos para o sistema elétrico como um todo [1]. Sendo assim, é de grande importância o desenvolvimento de equipamentos contra correntes de curtos-circuitos eficientes e seguros.

Por definição e aplicação, os dispositivos empregados para proporcionar uma devida e esperada proteção aos sistemas de distribuição frente às situações indesejáveis são os relés. Estes são dispositivos que podem supervisionar constantemente as grandezas de um sistema elétrico, ou seja, correntes, frequências, potências, bem como grandezas inerentes aos próprios componentes, como temperaturas, etc., [2]. Cabe colocar que atualmente as concessionárias de distribuição de energia estão constantemente investindo em seus sistemas de proteção com o uso de novos relés digitais que melhoram seu rendimento e reduzem os custos operacionais e de manutenção, além de possibilitar que a aquisição de dados e os ajustes pertinentes ao sistema sejam realizados remotamente, através de canais de comunicação [1].

Como foco principal desta pesquisa, aponta-se então o relé de sobrecorrente que pode ser definido de forma mais específica como um dispositivo com característica de tempo definido ou inverso e que vem a atuar, apontar uma eventual anomalia sobre o sistema protegido, quando a corrente em um circuito de corrente alternada exceder a um valor pré-fixado (ajustado) [3].

Para a modelagem, caracterização e análise do relé digital de sobrecorrente temporizado propriamente dito, principal objetivo deste trabalho, foi utilizado o *software* Matlab® [4], dispondo-se do seu ambiente *Simulink* [5], que é de domínio do laboratório há vários anos devido às inúmeras aplicações já realizadas. Um maior detalhamento de todas as considerações tomadas será apresentado no capítulo 2 que segue.

Já para se alcançar tal objetivo, cabe adiantar que houve a necessidade da caracterização de um sistema elétrico de distribuição propício para o desenvolvimento, implementação e aplicação do

relé digital de sobrecorrente em foco, onde foi utilizado para tal, o *software* ATP (*Alternative Transients Program*) [6], dispondo da interface gráfica *ATPDraw* [7]. Cabe ressaltar que tais aplicativos são de domínio junto aos pesquisadores associados ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE), local onde esta pesquisa foi desenvolvida, devido tanto à confiabilidade como ao reconhecimento existente pela comunidade acadêmica em relação a estes. Os apontamentos referentes a esta simulação serão devidamente expostos no capítulo 3 deste documento.

Para finalizar, coloca-se que a validação dos modelos desenvolvidos será amplamente exposta e discutida no capítulo 4, restando para o capítulo 5, as conclusões e considerações finais sobre o trabalho realizado.

Vale ressaltar que além do ganho acadêmico advindo da execução deste trabalho de conclusão de curso, as modelagens desenvolvidas podem ser de grande interesse para fins didáticos e de treinamento técnico, visto que, por estas, um melhor entendimento de um sistema de proteção, do relé digital de sobrecorrente e das condições operacionais de um determinado sistema elétrico podem ser alcançados.

## 2. O RELÉ DIGITAL DE SOBRECORRENTE

### 2.1 – Apontamentos Iniciais

Filosoficamente, o relé é um dispositivo sensor que comanda a abertura do disjuntor [8] no sistema elétrico protegido quando surgem condições anormais de funcionamento.

Os relés de um modo geral atuam respeitando quatro etapas:

- Etapa 1: O relé encontra-se permanentemente recebendo informações da situação de operação elétrica do sistema protegido através das formas de ondas da corrente, tensão, frequência e/ou uma combinação dessas grandezas (potência, impedância, ângulo de fase, etc.).
- Etapa 2: Se, em um dado momento, surgirem condições anormais de funcionamento do sistema protegido, tais que estas venham a sensibilizar o relé, este deve atuar da maneira filosófica que lhe foi atribuída.
- Etapa 3: A atuação do relé é caracterizada pelo envio de um sinal que resultará em uma ação de sinalização (alarme), bloqueio ou abertura de um disjuntor (ou nas três ao mesmo tempo).
- Etapa 4: A abertura ou disparo do disjuntor, comandada pelo relé irá isolar a parte defeituosa do sistema.

O relé de sobrecorrente como o próprio nome sugere, tem como grandeza de atuação a corrente elétrica do sistema. Este pode ser aplicado para proteger qualquer elemento de um sistema de energia, como, por exemplo, linhas de transmissão, transformadores, geradores ou motores, entre outros dispositivos, equipamentos e sistemas [9].

Os relés de sobrecorrente podem ser eletromecânicos, eletrônicos (estado sólido) ou digitais [9]. Contudo, atualmente, os relés eletromecânicos e eletrônicos estão sendo substituídos em larga escala pelos relés digitais. As concessionárias têm preferido a tecnologia digital, em razão da grande quantidade de informações que os relés digitais conseguem armazenar e do elevado potencial de integração com outros dispositivos.

Para exemplificar a aplicação de um relé de sobrecorrente, assume-se um sistema com uma fonte somente no seu lado esquerdo (sistema radial). Pode-se afirmar que, se a mínima corrente de falta dentro da zona de proteção for maior do que a máxima corrente possível de carga tem-se então o princípio de operação do relé de sobrecorrente como representado na Figura 1.

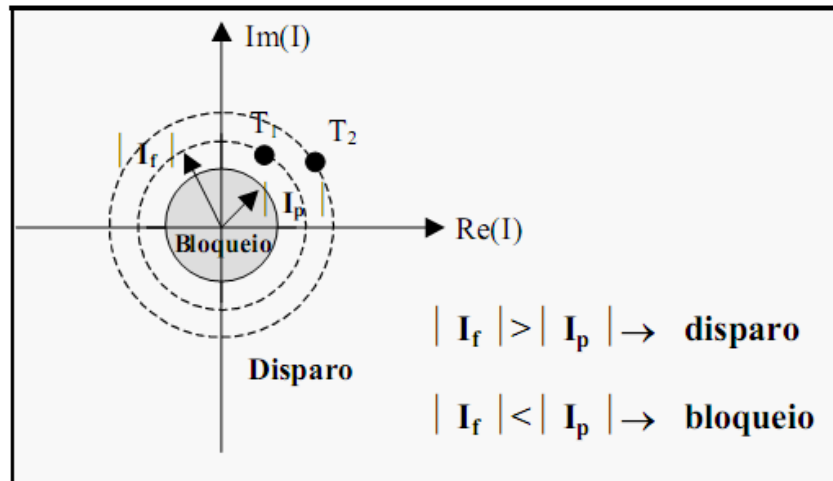


Figura 1 – Descrição funcional do relé de sobrecorrente [10].

Onde  $I_f$  é a corrente de defeito observada na posição do relé e  $I_p$  é a corrente do secundário do TC previamente definida (corrente de *pickup*). Dessa forma, quando [11]:

$$|I_f| \geq I_p, \quad (1)$$

indica-se uma situação de defeito ocorrendo na zona de proteção, necessitando então da uma abertura do disjuntor associado ao sistema de proteção.

Agora, quando:

$$|I_f| < I_p, \quad (2)$$

acusa-se a ausência de uma situação de defeito na zona de proteção, a qual garante a não abertura do disjuntor.

É importante ressaltar que a magnitude da corrente deve ser derivada de uma fonte de corrente alternada, a qual pode incluir um componente de decaimento CC, cuja magnitude depende do instante de ocorrência da falta.

Os relés eletromecânicos, da maneira como são projetados, normalmente, estes podem ter dois tipos de ajustes [10]:

- *Ajuste de Corrente*: dá-se pelo ajuste de tapes, pelo posicionamento do entreferro, tensionamento da mola de restrição, pesos, tapes de variação da bobina, etc.
- *Ajuste de Tempo*: dá-se pelo ajuste do dispositivo de tempo (DT), por meio de diversos dispositivos de temporização. A Figura 2 representa uma curva típica característica de um relé de sobrecorrente disponível comercialmente [12].

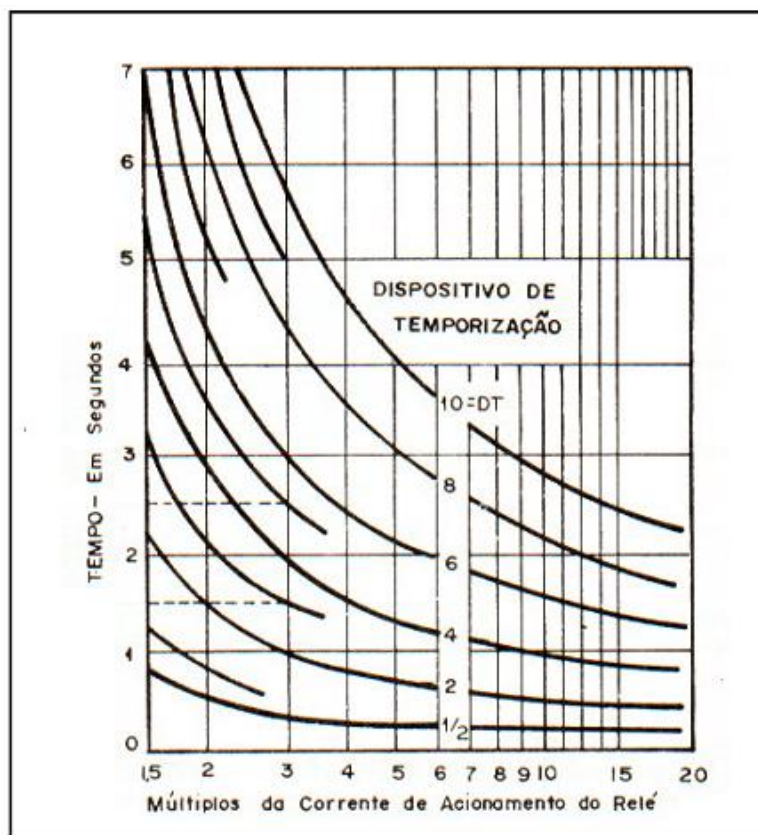


Figura 2 – Curva típica de um relé de sobrecorrente comercial [10].

Embora esses ajustes possam ser feitos de forma independente, a interdependência é mostrada nas curvas tempo-corrente no catálogo do fabricante.

Para os relés digitais, encontrados comercialmente, estes dois tipos de ajustes são normalmente realizados via *software* específico de cada equipamento, podendo ser inseridos os valores desejáveis para cada função de proteção através de uma interface disponibilizada pelo programa do fabricante do relé. Alguns relés digitais permitem também configuração de certas funções através do próprio teclado e *display* em seu painel.

Como fato, tem-se que em Sistemas Elétricos de Potência (SEPs), normalmente, correntes elevadas são causadas por curto-circuitos ocorridos sobre o circuito. Para atenuar as consequências destes curtos, utiliza-se um determinado tipo de proteção.

Os tipos mais comuns de proteção que existem são:

- Chaves termomagnéticas: que apresentam arranjos mais simples e são utilizadas para baixa tensão.
- Fusíveis: usados na proteção de linhas de baixa tensão (BT) e transformadores de distribuição.

- Relés de sobrecorrente: são os mais comuns para se lidar com correntes elevadas e atuam em situação de sobrecorrente e sobrecarga do sistema.

Existem os seguintes tipos de relés de sobrecorrente segundo a norma IEC 255-3[13]:

a) Relés de Corrente definida: tem sua curva de operação como a representada na Figura 3.

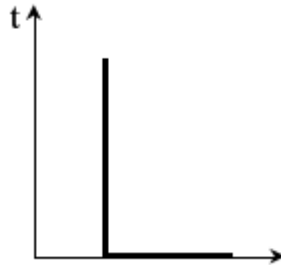


Figura 3 – Curva característica de um relé de sobrecorrente de corrente definida.

Este tipo de relé opera instantaneamente quando a corrente atinge um valor predeterminado. O ajuste ocorre de maneira que para a subestação mais distante da fonte, o relé venha a operar com valor baixo de corrente e vice-versa. O relé com ajuste mais baixo então opera primeiro e desconecta a carga no ponto mais próximo ao defeito. Contudo, esse relé apresenta baixa seletividade em altos valores de corrente de curto-circuito e dificuldade em distinguir corrente de falta entre dois pontos quando a impedância entre eles é pequena se comparada à da fonte [10]. Dessa forma, não são usados como única proteção de sobrecorrente, mas como unidade instantânea, onde outros tipos de proteção são também empregados.

b) Relés de Tempo Definido: a curva característica de operação é como a mostrada na Figura 4.

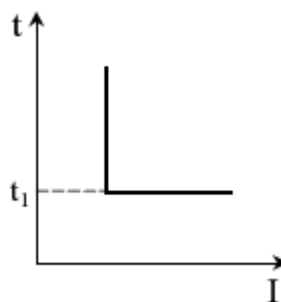


Figura 4 – Curva característica de um relé de sobrecorrente de tempo definido.

O ajuste desse tipo de relé é variado, pois trata com diferentes níveis de corrente, usando diferentes tempos de operação. Nesse caso, o disjuntor mais próximo ao defeito é acionado no tempo mais curto, sendo os disjuntores restantes acionados sucessivamente, com atrasos maiores em direção à fonte (ou seja, ocorrendo diferença entre os tempos de acionamento para mesma corrente). O ajuste de atraso nesse caso é independente do valor de sobrecorrente requerido para operação do relé. Uma

desvantagem desse tipo de relé é que faltas próximas à fonte, as quais apresentam correntes maiores, são isoladas em tempos relativamente longos. São bastante usados quando a impedância da fonte é alta se comparada àquela do elemento a ser protegido [10].

c) Relés de Tempo Inverso: a curva característica de operação é como a mostrada na Figura 5.

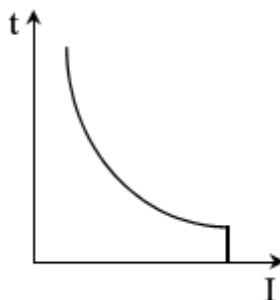


Figura 5 – Curva característica de um relé de sobrecorrente de tempo inverso.

Este tipo de relé, como o próprio nome define, opera em tempo inversamente proporcional à corrente de falta. Isso é uma de suas vantagens, já que tem tempos de acionamentos menores mesmo com correntes muito elevadas e sem risco de perda de seletividade. São classificados de acordo com sua curva característica, que indica a velocidade de operação, como:

- Inversa
- Muito Inversa
- Extremamente Inversa

Os ajustes de relés de sobrecorrente normalmente possuem um elemento instantâneo (função 50) e um elemento de tempo (função 51) na mesma unidade. Esse ajuste envolve seleção de parâmetros que definem a característica tempo-corrente requerida.

O ajuste nas unidades instantâneas é mais eficaz quando as impedâncias dos elementos protegidos são maiores que a da fonte. Com isso, têm-se as vantagens de reduzir o tempo de operação para faltas severas no sistema e evitar a perda de seletividade quando há relés com características diferentes (nesse caso, ajusta-se a unidade instantânea para operar antes de cortar a curva característica). O critério de ajuste vai depender do elemento a ser protegido [10], considerando-se:

- Linhas entre subestações: deve-se considerar 125% da corrente simétrica para nível de falta máxima na próxima subestação.
- Linha de distribuição: deve-se considerar 50% da corrente máxima de curto-circuito no ponto do relé ou entre 6 e 10 vezes o valor máximo.
- Transformadores: a unidade instantânea no primário do transformador deve ser ajustada entre 125 e 150% da corrente de curto-circuito no barramento de baixa tensão referida ao lado de alta. Esse valor elevado se deve ao fato de se evitar a perda de coordenação com outros dispositivos de proteção, devido às altas correntes de *inrush* (energização).

No ajuste das unidades de tempo nos relés de sobrecorrente, o tempo de operação pode ser atrasado para garantir que, na presença de uma falta, o relé não atuará antes de outro dispositivo mais próximo ao defeito. Sendo assim, o mesmo requer uma margem de discriminação/segurança, como pode ser observado na Figura 6 [10].

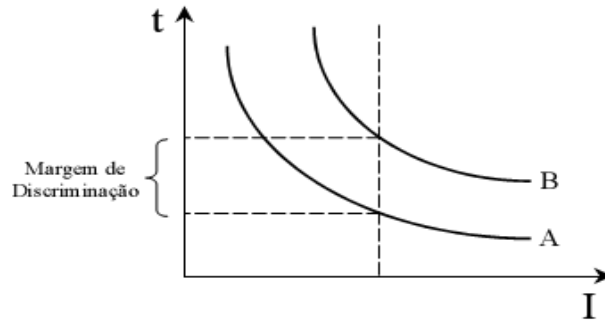


Figura 6 – Margem de discriminação/segurança.

No ajuste dos parâmetros, o dial representa o atraso de tempo que ocorre antes do relé operar. Quanto menor o dial, menor será também o tempo de *trip* (disparo). O *tap* define a corrente de *pickup* (sensibilização) do relé, permitindo uma margem de sobrecarga sobre a corrente nominal dada pela equação que segue [10].

$$TAP \geq \frac{1,5 \cdot I_{nom}}{RTC} \quad (3)$$

Onde o fator 1,5 pode variar 2,0 dependendo da aplicação e RTC representa a relação de transformação de corrente do transformador.

Um método analítico para a obtenção das curvas de tempo inverso é utilizar a seguinte equação [10]:

$$t = \frac{\beta \cdot D}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^\alpha - 1} + L \cdot D \quad (4)$$

Onde:

t: tempo de operação do relé (s)

D: dial ou ajuste multiplicador de tempo

I: corrente de falta (A)

$I_p$ : TAP ou corrente de *pickup* selecionada

$\alpha$ ,  $\beta$  e L: coeficientes que determinam a inclinação característica do relé (vide Tabela 1).

Para os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  dos relés de sobrecorrente padrão, apresenta-se a Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de  $\alpha$ ,  $\beta$  e L para relé de sobrecorrente padrão [13],[16].

| Tipo de Curva               | Norma     | $\beta$ | $\alpha$ | L      |
|-----------------------------|-----------|---------|----------|--------|
| Normal Inversa              | IEC 255-3 | 0,14    | 0,02     | 0      |
| Muito Inversa               |           | 13,5    | 1        | 0      |
| Extremamente Inversa        |           | 80      | 2        | 0      |
| Inversamente de Tempo Longo |           | 120     | 1        | 0      |
| Moderadamente Inversa       | ANSI      | 0,0104  | 0,02     | 0,0226 |
| Inversa                     |           | 5,95    | 2        | 0,180  |
| Muito Inversa               |           | 3,88    | 2        | 0,0963 |
| Extremamente Inversa        |           | 5,67    | 2        | 0,0352 |

Vale lembrar que os relés digitais de sobrecorrente são projetados para ter uma resposta dinâmica tal qual definida na norma IEEE C37.112-1996 [14]. Este requisito de desempenho dinâmico, na realidade, consiste da integração da corrente para, essencialmente, reproduzir o comportamento dos relés eletromecânicos [15].

Em relés digitais de sobrecorrente com característica de tempo inverso, definidos pelas normas IEC (*International Electrotechnical Commission*) [13] ou ANSI (*American National Standards Institute*) [16], o tempo de atuação ( $T_m$ ) pode ser obtido através da integração da equação normalizada (5). A integração se dá em intervalos finitos de tempo ( $m$ ), com duração  $\Delta t$ . Portanto, lembrando-se que  $I = I(t)$  e  $I/I_p = M(t)$ , têm-se:

$$\int_0^{T_m} \left[ \frac{\beta \cdot D}{M(t)^\alpha - 1} + L \cdot D \right]^{-1} dt > 1 \quad (5)$$

Onde  $I$  é a magnitude do fasor da corrente calculado a cada ciclo de aplicação do algoritmo discreto de *Fourier* [17] e  $M(t)$  é o múltiplo do ajuste da corrente de operação ( $I_p$ ) do relé. A integração continua até que a equação (5) seja satisfeita. Neste momento, sabendo-se qual é o tamanho do passo de integração ( $\Delta t$ ), bem como o número de passos gastos ( $m$ ), o tempo de atuação ( $T_m$ ) é determinado.

## 2.2 – O modelo do relé digital de sobrecorrente monofásico implementado

O diagrama de blocos implementado para representar o relé digital de sobrecorrente monofásico modelado via ambiente *Simulink* do Matlab® é mostrado na Figura 7.

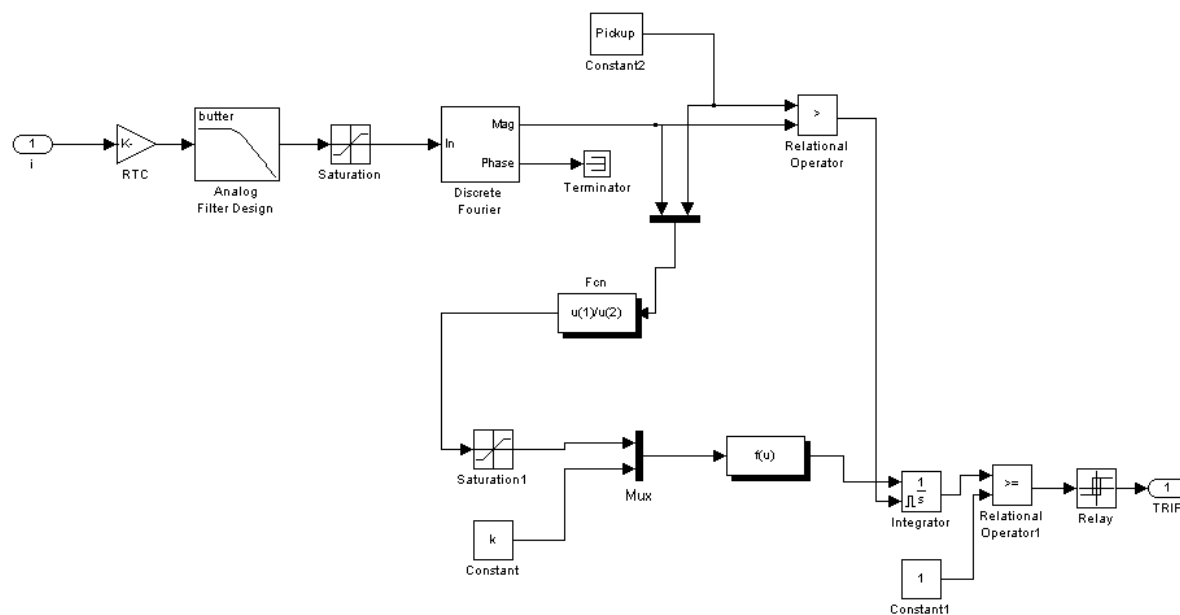


Figura 7 – Diagrama de blocos do relé digital de sobrecorrente monofásico.

A seguir, será apresentado o modo como cada elemento do diagrama de blocos foi modelado dispondo do ambiente *Simulink* do Matlab®.

O bloco *i* representa uma porta de entrada para a corrente do circuito primário a ser analisada. Os parâmetros utilizados podem ser vistos na Figura 8.

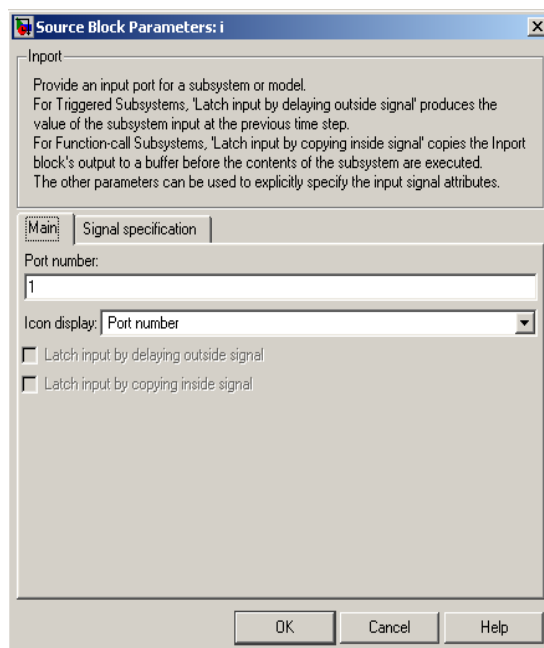


Figura 8 – Parâmetros do bloco i.

Na Figura 9 têm-se os parâmetros para a especificação do sinal de entrada.

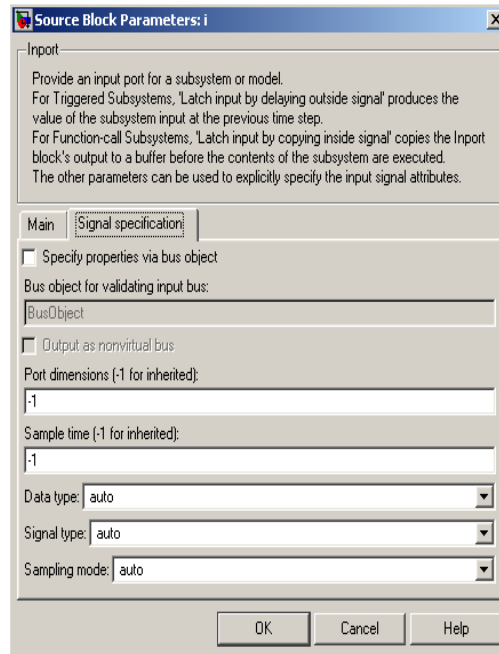


Figura 9 – Especificação do sinal de entrada.

Tanto sua dimensão como a taxa de amostragem recebem o valor -1, ou seja, ficando por conta do *software* identificar a dimensão e valores desses parâmetros. O mesmo ocorre quando se escolhe a opção “auto” para o tipo de dados, tipo de sinal e modo de amostragem.

Em seguida, no bloco de ganho *RTC*, a corrente do circuito primário é referida ao valor secundário, compatível com a corrente nominal do relé. Os seus parâmetros podem ser observados na Figura 10.

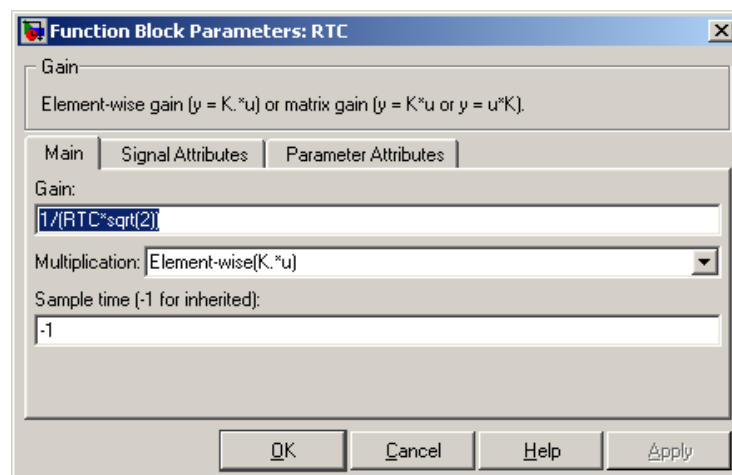


Figura 10 – Parâmetros do bloco RTC.

O valor do ganho do bloco é dado pelo produto de  $RTC$  por  $\sqrt{2}$ . A introdução da constante  $\sqrt{2}$  visa escalonar para o valor eficaz a magnitude do fasor da corrente, pois o bloco *Discrete Fourier* expressa a magnitude do fasor em valor de pico. A multiplicação é feita de forma que cada

elemento da matriz de entrada seja multiplicado pela constante de ganho. Os tipos de dados da saída do bloco serão iguais aos de entrada. O arredondamento necessário será o mais próximo possível do valor real.

Logo depois, a corrente escalonada passa pelo bloco *Analog Filter Design*. Este é um filtro *anti-aliasing* que rejeita as altas frequências espúrias e limita o espectro de frequências do sinal de corrente. Os parâmetros deste filtro são mostrados na Figura 11.

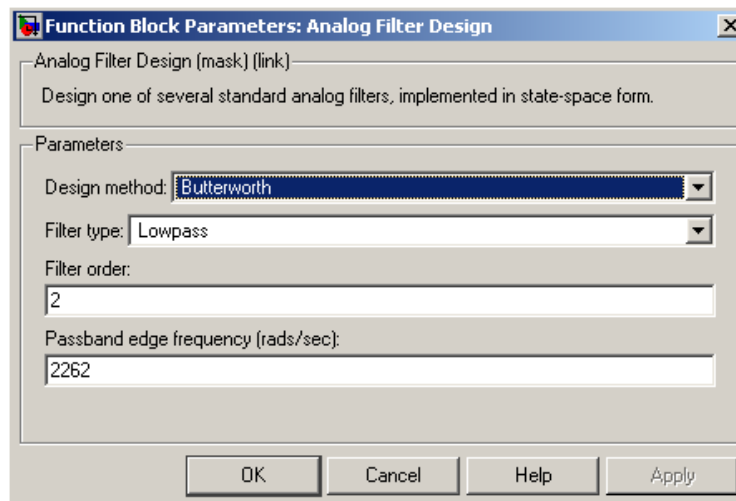


Figura 11 – Parâmetros do bloco *Analog Filter Design*.

Este filtro como pode ser visto é do tipo *Butterworth*, passa-baixas de 2ª ordem, com frequência de corte em 360 Hz. Esta escolha deve-se ao fato de que na prática, usualmente, são empregados filtros com frequência superior a um terço da frequência de amostragem para remover as altas frequências indesejadas da forma de onda a ser amostrada, limitando a faixa do espectro de frequência a fim de atender o teorema de amostragem de Nyquist [17].

O bloco *Saturation* representa o efeito da limitação de corrente associada à saturação combinada do circuito de entrada de corrente, do filtro *anti-aliasing* e do conversor analógico-digital. Os seus parâmetros são descritos na Figura 12.

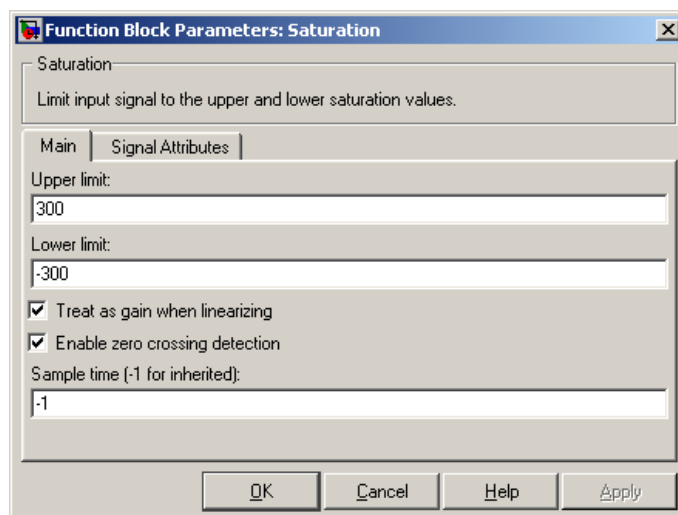


Figura 12 – Parâmetros do bloco *Saturation*.

Dessa forma, quando o sinal de entrada está fora dos limites superior e inferior definido, o sinal é “cortado”, permanecendo o seu valor máximo ou de mínimo dependendo do valor vinculado.

Quando da passagem pelo bloco *Discrete Fourier*, a forma de onda em análise passa a ser amostrada. Determina-se então, para esta aplicação, a magnitude e o ângulo de fase do fasor do componente fundamental do sinal de corrente. Os parâmetros utilizados nesse bloco são mostrados na Figura 13.

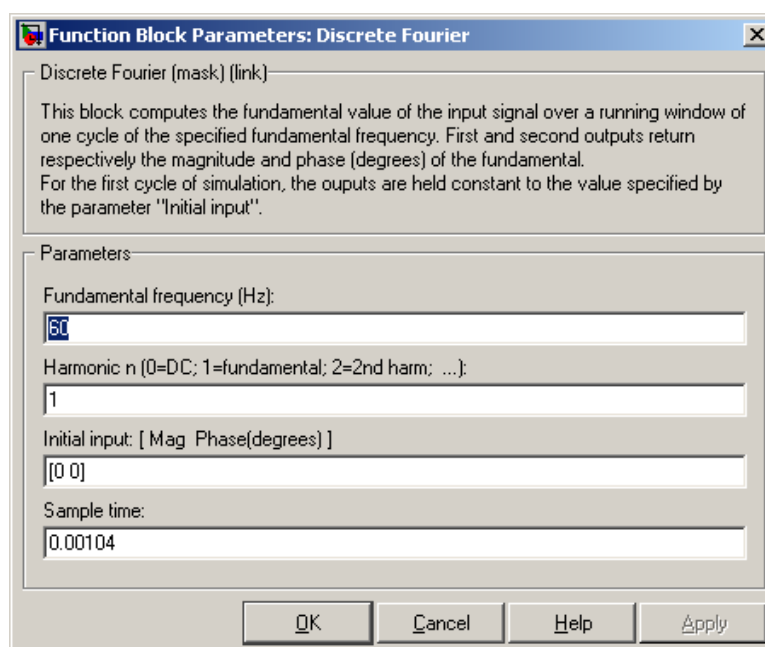


Figura 13 – Parâmetros do bloco *Discrete Fourier*.

As condições iniciais de magnitude e fase são dadas como zero. A forma de onda da corrente é amostrada com 16 amostras por ciclo.

Como a fase do fasor não entrará no cálculo do tempo de atuação do relé de sobrecorrente, o bloco *Terminator* é utilizado para evitar mensagens de erro durante a execução da simulação.

O bloco *Constant2* define o ajuste da corrente de operação, chamada de corrente de *pickup*. Os parâmetros utilizados nesse bloco são definidos na Figura 14. Sendo o valor da constante considerado como o valor da corrente de *pickup*.

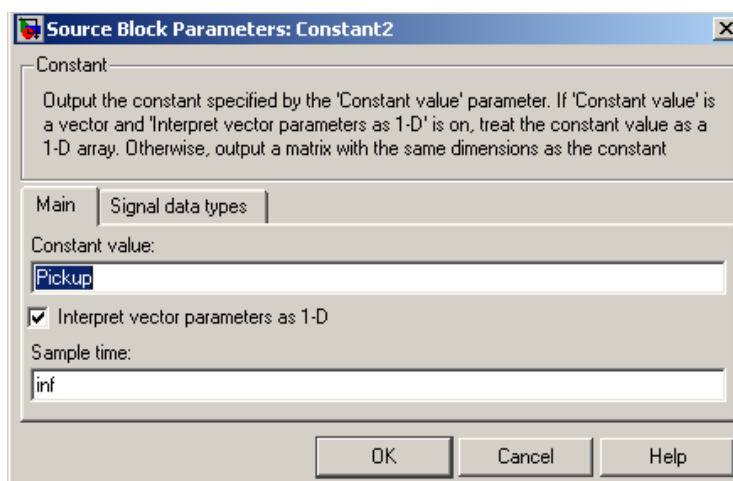


Figura 14 – Parâmetros do bloco *Constant2*.

No bloco *Relational Operator*, a magnitude do fasor da corrente é comparada ao ajuste da corrente de operação. Os parâmetros definidos para esse bloco são descritos na Figura 15.

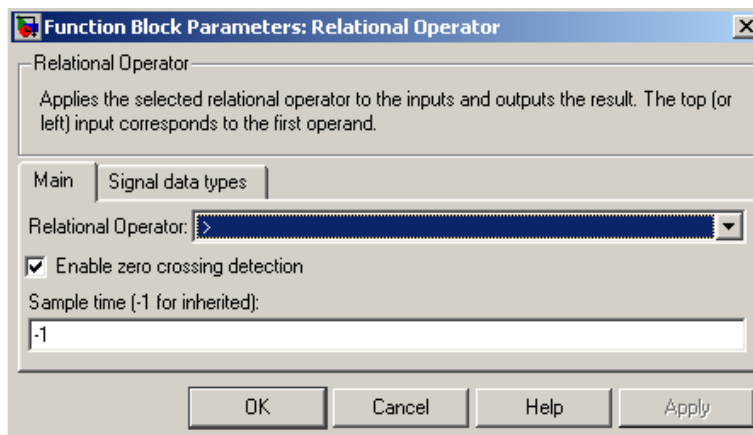


Figura 15 – Parâmetros do bloco *Relational Operator*.

Neste caso foi escolhido um sinal de comparação maior, pois se a magnitude do fasor for maior que a corrente de operação, terá início a integração do fasor de corrente de operação. No entanto, se a magnitude do fasor for menor que a corrente de operação, ocorrerá o *reset* do bloco *Integrator*.

Utilizou-se um bloco *Mux* de duas entradas para retornar como única saída um vetor de dois elementos. O primeiro sendo o fasor da corrente e o segundo a corrente de operação, chamadas respectivamente de  $u(1)$  e  $u(2)$ . A parametrização desse bloco pode ser observada na Figura 16.

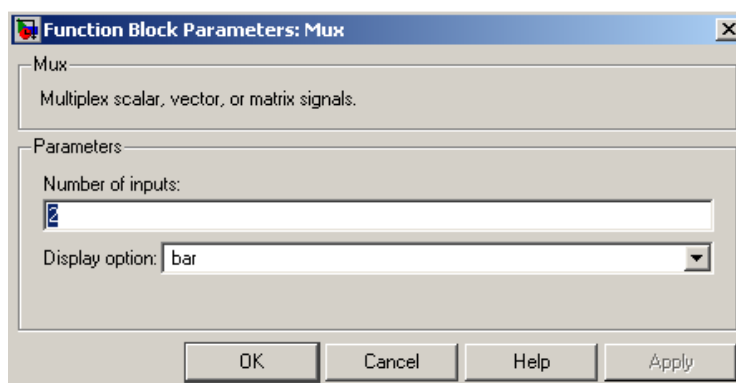


Figura 16 – Parâmetros do bloco *Mux*.

O bloco *Fcn* é utilizado para calcular o múltiplo da corrente  $M(t)$ . Tal parâmetro está ilustrado na Figura 17.

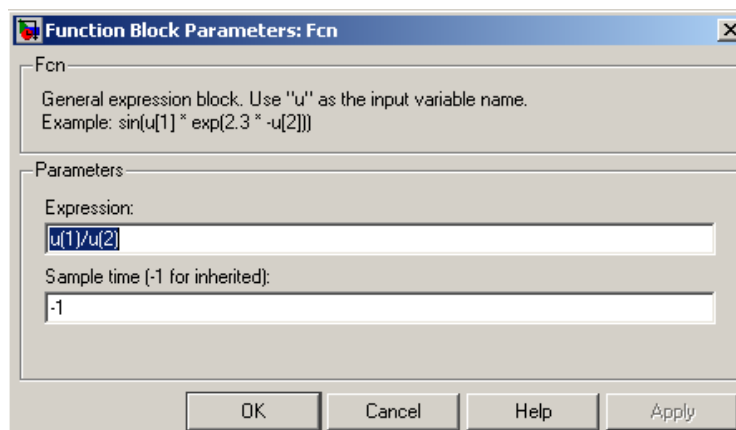


Figura 17 – Parâmetros do bloco *Fcn*.

Nesta última figura, observa-se também a expressão utilizada para o cálculo, que é a divisão do fasor da corrente pela corrente de operação (*pickup*).

O bloco *Saturation1* limita o múltiplo da corrente de operação. Os valores escolhidos nesse caso são mostrados na Figura 18.

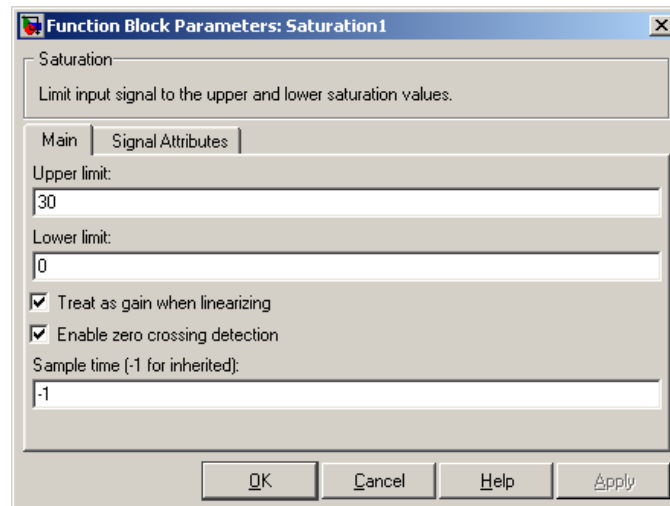


Figura 18 – Parâmetros do bloco *Saturation1*.

O limite superior foi escolhido como 30, pois a partir desse valor, a característica da curva de tempo inverso passa a se comportar como de tempo definido.

Na modelagem foi introduzido o bloco *Constant* com a variável  $k$  que depende da curva que será eleita pelo usuário na máscara de entrada. Os parâmetros desse bloco são exibidos na Figura 19.

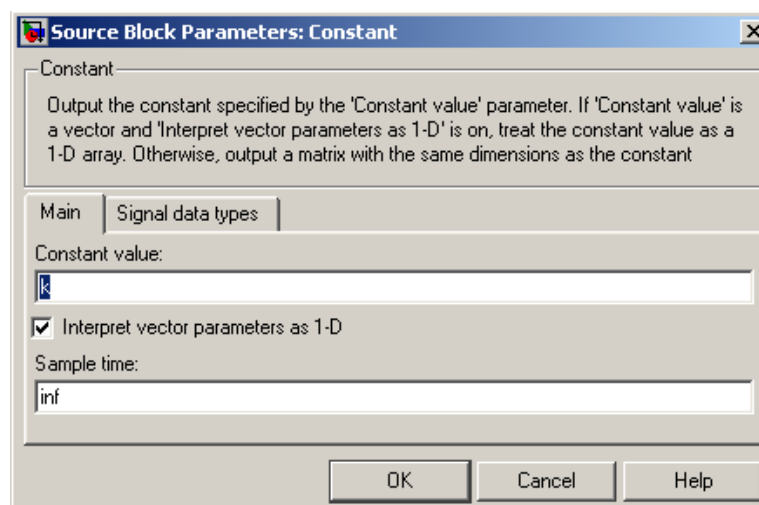


Figura 19 – Parâmetros do bloco *Constant*.

Como anteriormente apresentado, o bloco *Mux* é utilizado na mesma configuração com duas entradas e uma saída, sendo esta agora um vetor de 7 elementos de  $u(1)$  a  $u(7)$ , já que a variável  $k$  apresenta 6 elementos.

O bloco *Fcn1* utiliza como expressão o integrando da equação (5), como pode ser visto na Figura 20.

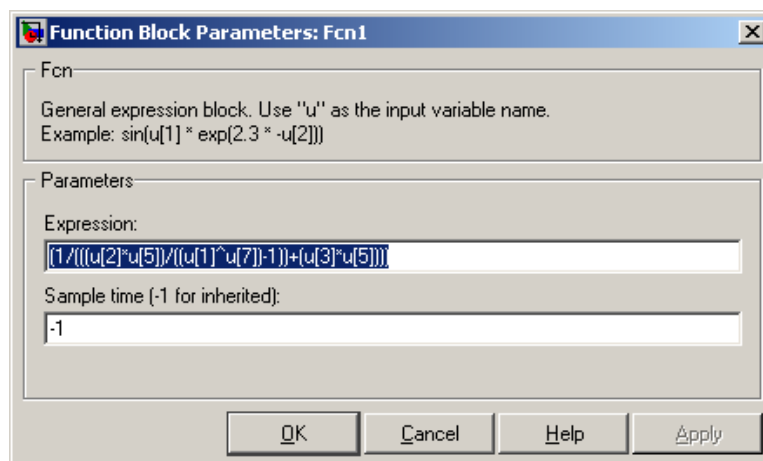


Figura 20 – Parâmetros do bloco *Fcn1*.

Lembrando que  $u(1)$  é o múltiplo da corrente e os valores de  $u(2)$  a  $u(7)$  são as constantes da Tabela 1.

Em seguida, o bloco *Integrator* é acionado quando a magnitude do fasor da corrente for maior que a corrente de operação. A Figura 21 mostra como esse bloco foi parametrizado. O *reset* externo será dado por nível, mas a fonte de condição inicial é interna e vale zero.

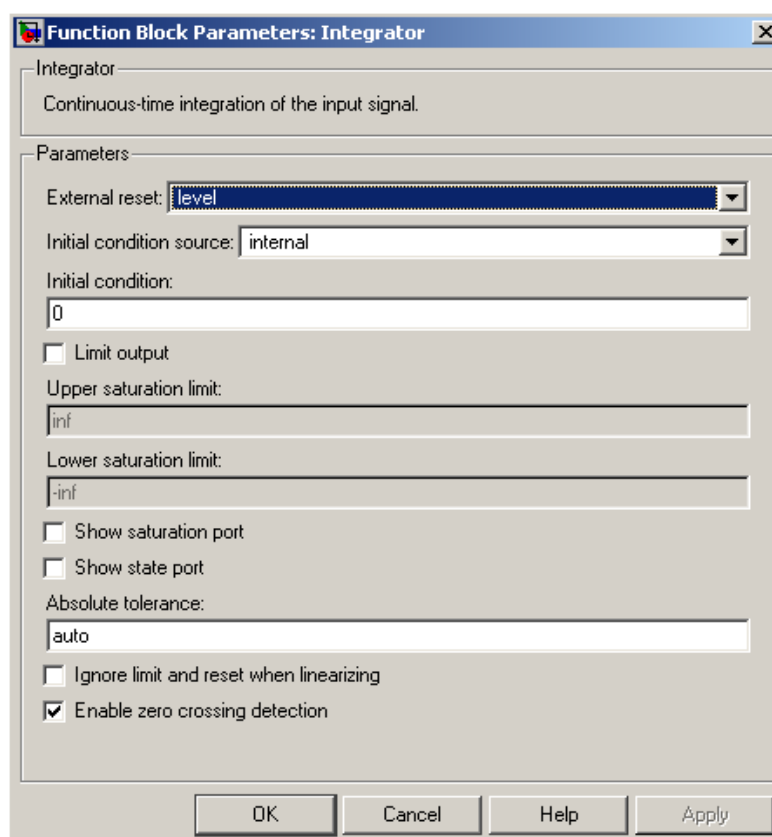


Figura 21 – Parâmetros do bloco *Integrator*.

Também foi introduzido o bloco *Constant1* que leva valor 1 e é considerado como um vetor de  $N$  linhas como pode ser observado na Figura 22.

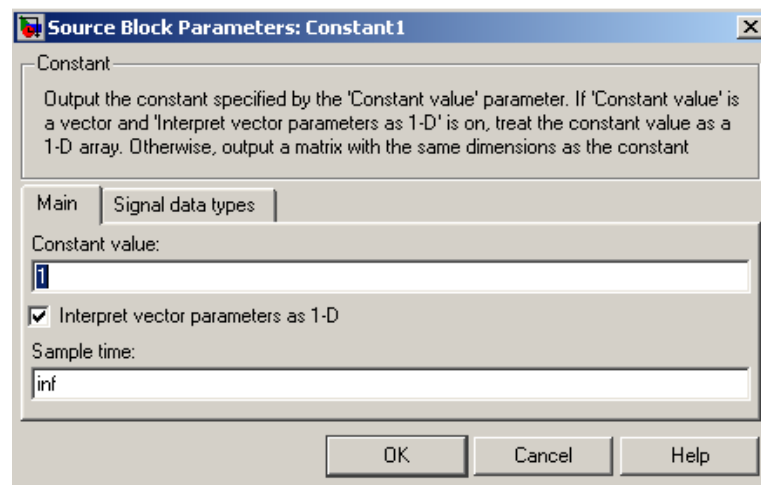


Figura 22 – Parâmetros do bloco *Constant1*.

Cabe comentar que essa constante foi adicionada simplesmente para uma futura comparação com a saída do bloco *Integrator*.

O bloco *Relational Operator1* verifica se a equação foi satisfeita, ou seja, se o valor da integração atingiu um valor maior ou igual a 1, de acordo com os parâmetros mostrados na Figura 23.

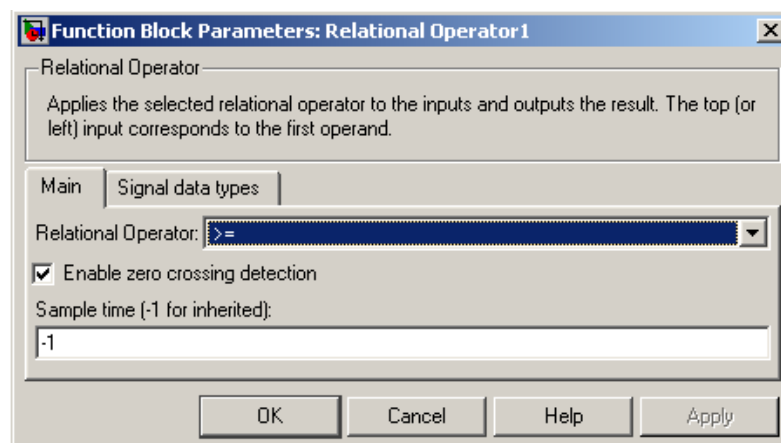


Figura 23 – Parâmetros do bloco *Relational Operator1*.

O bloco *Relay* mantém sua saída em nível lógico alto até a saída do bloco *Relational Operator1* decair abaixo do valor do parâmetro *Switch off point*, que pode ser observado na Figura 24 junto com os outros parâmetros (*Switch on point*, *Output when on* e *Output when off*) que definem o estado do relé (ligado ou desligado).

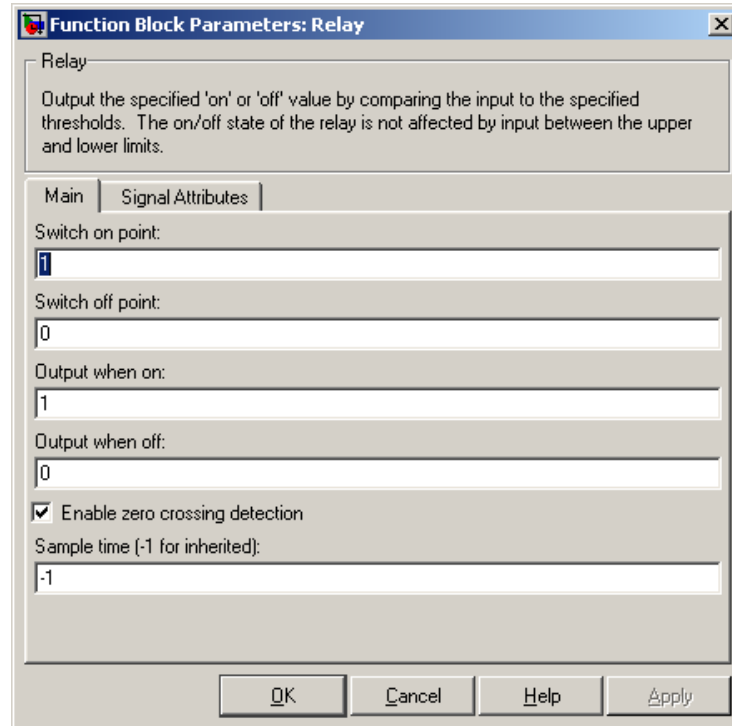


Figura 24 – Parâmetros do bloco *Relay*.

Desta forma, esse bloco funciona como um circuito anti-eco (*anti-bouncing*), ou seja, evita transientes na comutação [17].

Por final, tem-se a porta de saída de *TRIP* que recebe os valores gerados pelo bloco *Relay*. A porta de saída número 1 também terá como saída o mesmo tipo de sinal e dados de sua entrada (Figura 25).

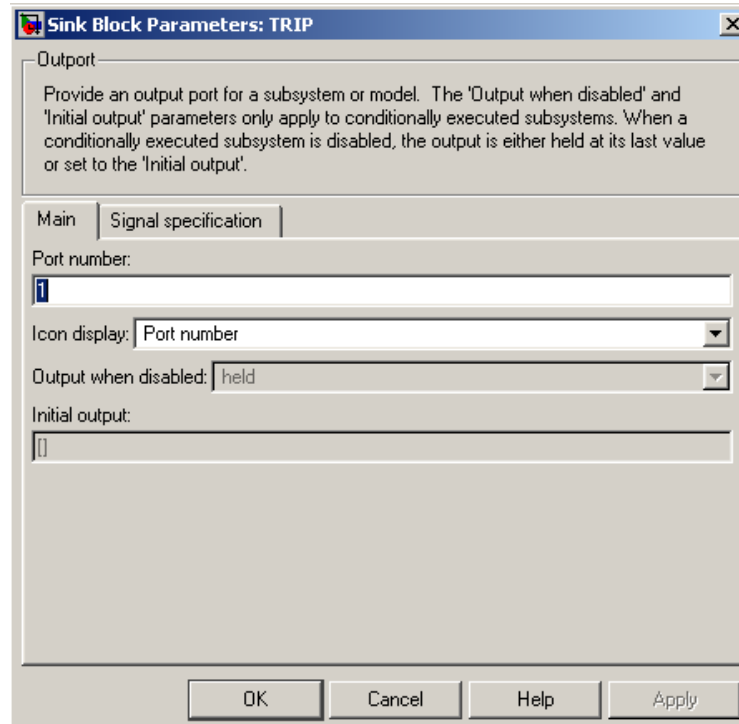


Figura 25 – Parâmetros do bloco *TRIP*.

Com o intuito de facilitar a manipulação por parte do usuário na mudança dos ajustes do relé conforme apresentado, foi implementada uma máscara que permite a escolha de alguns dos parâmetros do dispositivo. Os parâmetros escolhidos foram o tipo de curva entre os padrões IEC e ANSI (U.S.), além de uma curva de tempo definido. Pode-se definir o dial de tempo, a RTC e o ajuste da corrente de operação (*pickup*). Na Figura 26 encontra-se a interface gráfica que o usuário terá a disposição com todos os parâmetros de ajustes para o relé de sobrecorrente temporizado.

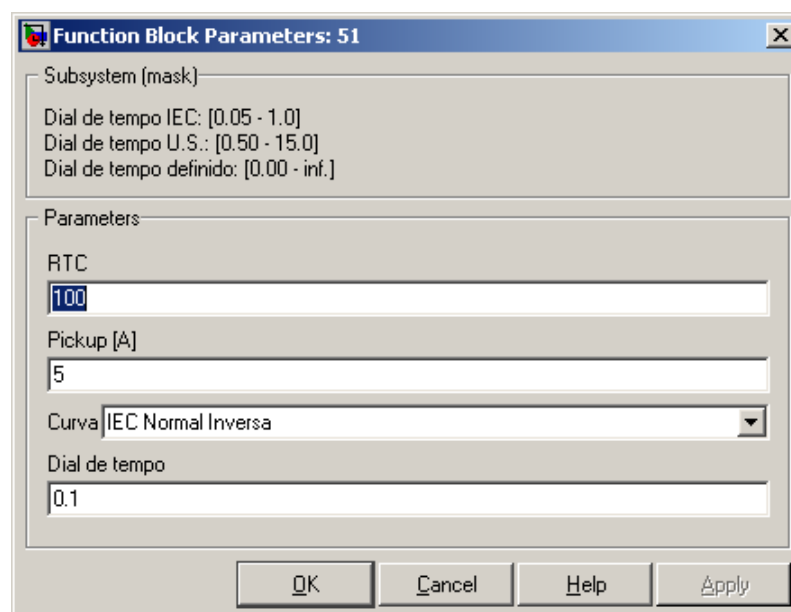


Figura 26 – Máscara de ajustes do relé de sobrecorrente temporizado.

Utilizou-se de um editor de máscara para a confecção desta interface gráfica. Como poder ser visto na Figura 27, na aba *Parameters*, definiram-se os parâmetros que estariam disponíveis ao usuário assim como as variáveis relacionadas. Também foi definido o tipo da variável. No caso da variável “curva”, o tipo *popup* foi escolhido porque se trata de uma escolha entre várias opções já pré-definidas. No restante foi escolhido o tipo *edit* em que o usuário pode entrar com o valor numérico que lhe seja adequado.

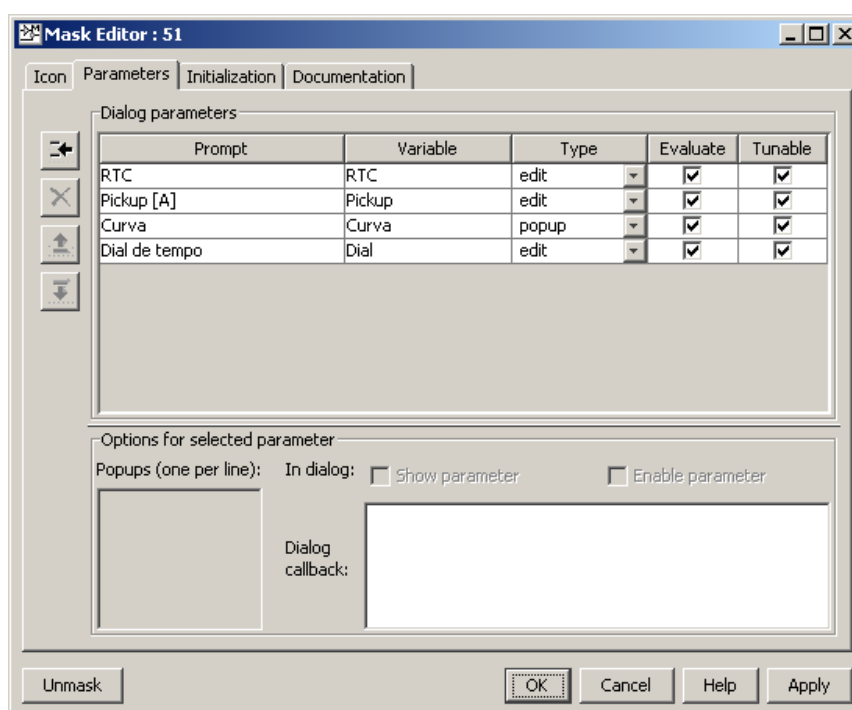


Figura 27 – Aba *Parameters* do editor de máscara.

A Figura 28 corresponde à aba *Initialization* que apresenta os comandos de inicialização para o sistema. Nesta aba estão contidas as expressões e variáveis utilizadas no equacionamento das curvas de tempo do relé. A variável “Tabela” é uma matriz cujas linhas são as constantes de tempo da equação (5). Relembra-se que a variável  $k$  do bloco *Constant* é quem passa para o modelo a linha da matriz “Tabela”, que corresponde ao tipo de curva escolhida na máscara de ajuste do relé.

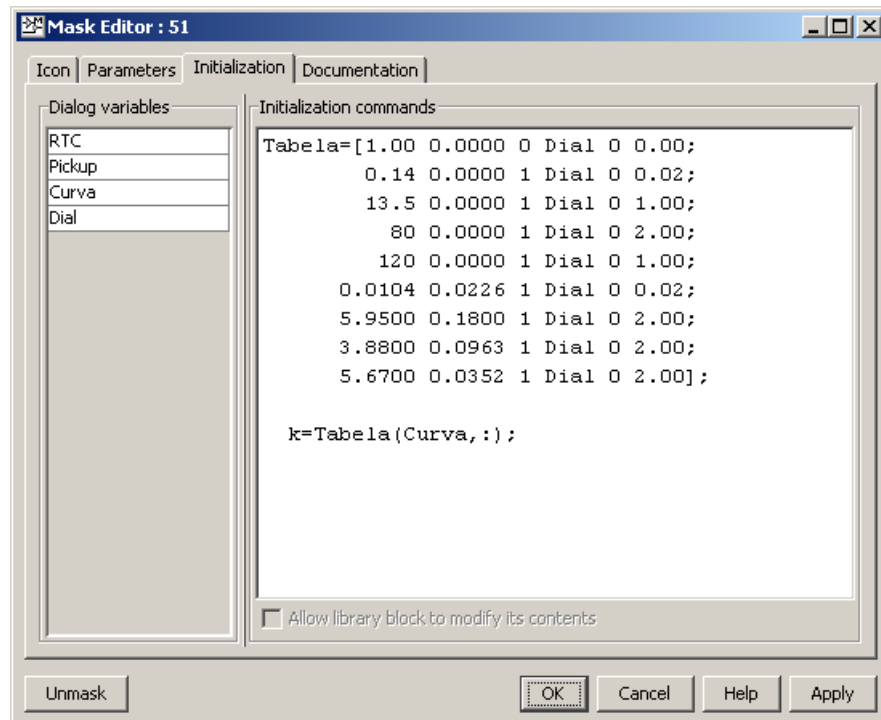


Figura 28 – Aba *Initialization* do editor de máscara.

Na Figura 29 tem-se a aba *Documentation* do editor de máscara. Nela pode-se definir o tipo da máscara, nesse caso chamado de RELE 51. É possível também fazer uma descrição sobre a máscara que será lida pelo usuário quando esta for aberta, além de conter a opção de se criar um menu de ajuda para auxiliar o entendimento da máscara.

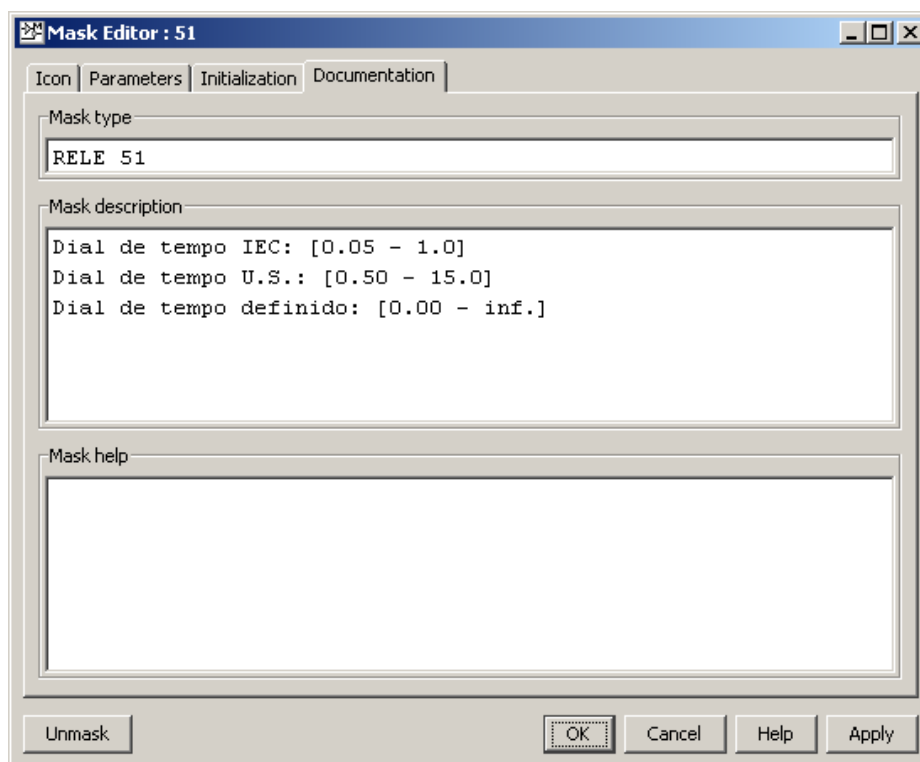


Figura 29 – Aba *Documentation* do editor de máscara.

### 2.3 – O modelo do relé digital de sobrecorrente trifásico implementado

Com o intuito de proteger todas as fases de um sistema trifásico, independente da fase que sofrera o defeito, faz-se necessário a aplicação de um relé digital de sobrecorrente trifásico, cuja representação é mostrada na Figura 30.



Figura 30 – Representação do relé de sobrecorrente trifásico.

Para a versão trifásica do relé de sobrecorrente pode ser observado na Figura 30 à adição de uma entrada de corrente trifásica e uma saída de disparo instantâneo, referente à função 50 de proteção, que possui um tempo definido ajustável.

Do mesmo modo que para a versão monofásica, foi criada uma máscara com os parâmetros de ajustes do relé, já caracterizando as novas funções em relação à versão anterior, como pode ser visto na Figura 31.

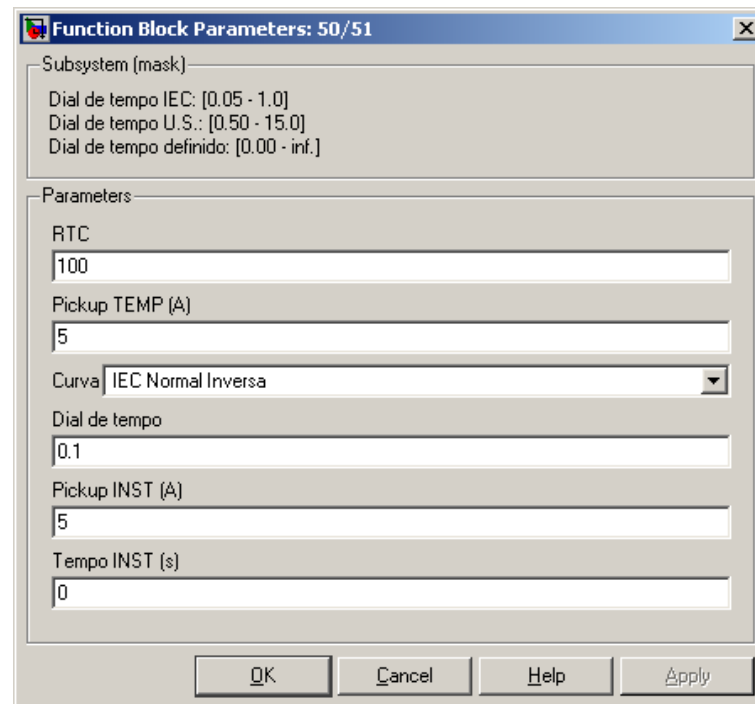


Figura 31 – Máscara de ajustes do relé de sobrecorrente trifásico.

A interconexão dos relés monofásicos das fases A, B e C, que em conjunto formam o diagrama de blocos do relé de sobrecorrente trifásico, é apresentada na Figura 32. Neste caso, como anteriormente comentado, a entrada é um sinal de corrente trifásica que é escalonado pelo bloco funcional RTC da mesma forma que foi realizado para o caso monofásico.

Após ser escalonado, o sinal é separado para cada fase correspondente através do bloco *Demux* e, em seguida, é filtrado por um filtro passa-baixas *Butterworth* de 2ª ordem com frequência de 360 Hz. Finalmente, o sinal de corrente é enviado ao subsistema de detecção de sobrecorrente de cada fase.

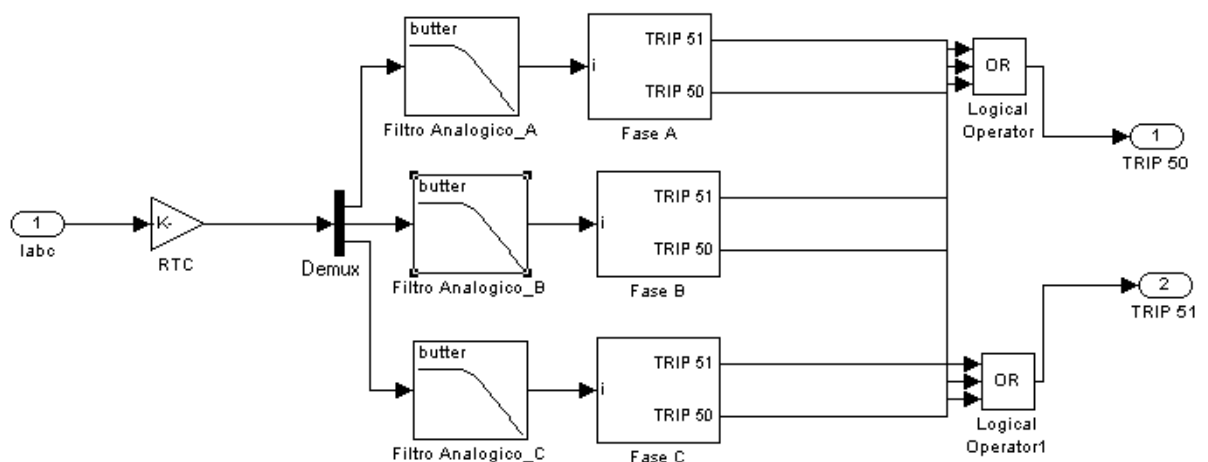


Figura 32 – Diagrama de blocos do relé digital de sobrecorrente trifásico.

Com relação aos blocos Fase “A”, “B” e “C” que aparecem na Figura 32, estes são os circuitos de detecção de sobrecorrente associados a cada fase. O diagrama de blocos relativos a estes detectores é esquematizado na Figura 33 para a fase “A”, mas que corresponde ao mesmo esquema utilizado nas fases “B” e “C”, respectivamente. Este esquema se assemelha muito ao modelo adotado para o relé de sobrecorrente monofásico, diferenciando-se apenas pela ausência da função de escalonamento e do filtro analógico, com adição de um novo ramo para função instantânea.

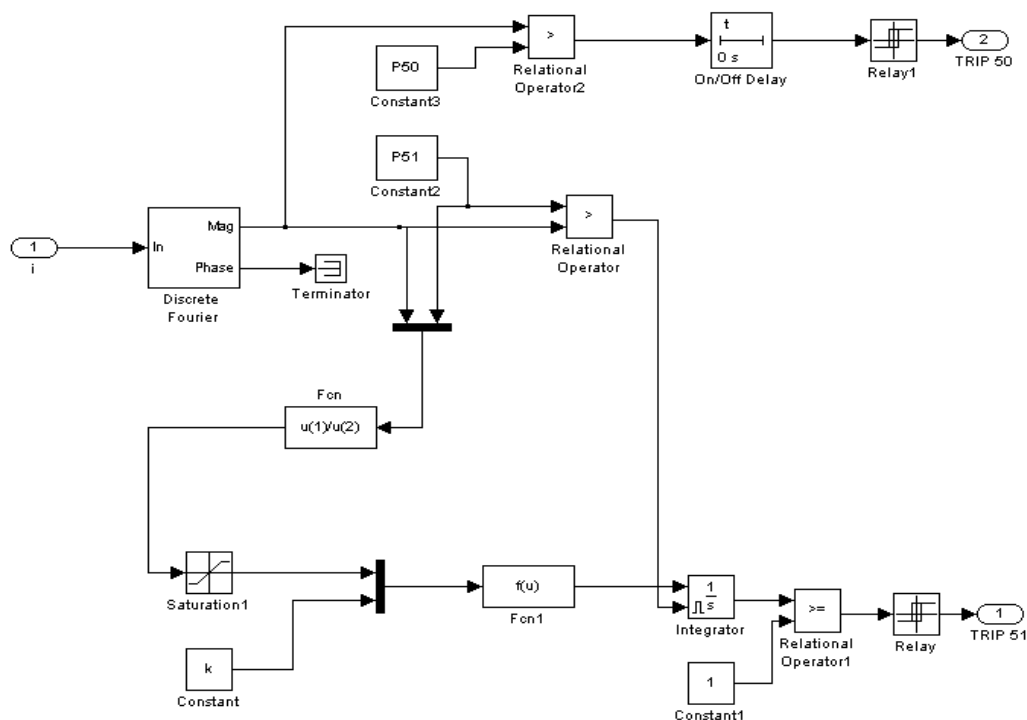


Figura 33 – Diagrama de blocos do subsistema Fase A.

Ressaltando algumas diferenças em relação ao modelo monofásico, a constante *P51* está vinculada à corrente de operação da função 51 através do ajuste *Pickup TEMP*, mostrado na máscara de ajustes do relé (Figura 31). Já a constante *P50* está vinculada à corrente de operação da função 50 através do ajuste *Pickup INST*, também contido na máscara de ajustes do relé (Figura 31). Ainda em relação aos parâmetros de ajuste, a temporização da função 50, com tempo definido, é definida através do ajuste *Tempo INST*. Por fim, as saídas de disparo instantâneo de cada fase são agrupadas em uma porta *OR*, para formar uma saída de disparo instantâneo comum (*TRIP 50*), o que também é realizado com as saídas de disparo temporizado (*TRIP 51*).

Portanto, nesse capítulo foram desenvolvidos os modelos de relés de sobrecorrente monofásico e trifásico. Vale comentar que, para o modelo trifásico tanto a função instantânea (ANSI 50) quanto a função temporizada (ANSI 51) está presente. Assim, como também, foi elaborada uma máscara de interface para que o usuário possa inserir os parâmetros de operação do relé de sobrecorrente.



### 3. O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA (SEP)

Cabe colocar que, além do objetivo de gerar um banco de dados a ser utilizado no processo de validação deste trabalho, este capítulo é de fundamental importância para a formação de um senso crítico sobre as eventuais situações de defeitos que um sistema elétrico possa vir a enfrentar. Sendo assim, apesar destas simulações não serem o foco do trabalho, dedicou-se um tempo considerável às mesmas para melhor entender o processo lógico do sistema de proteção como um todo.

O sistema de distribuição avaliado e simulado através do *software* ATP, que será citado adiante, é mostrado na Figura 34.

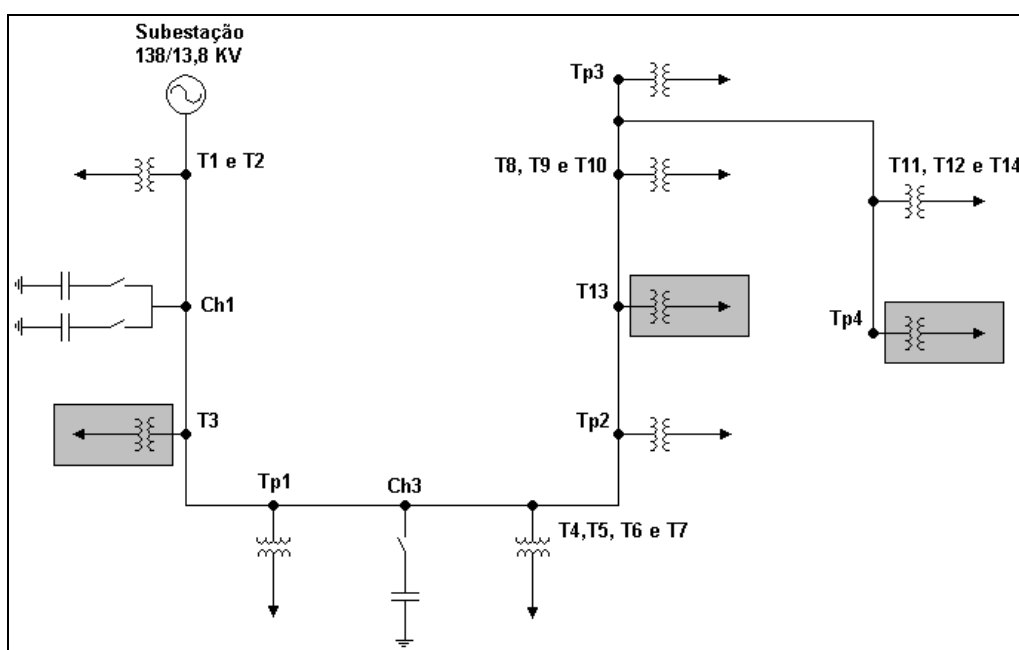


Figura 34 – Sistema elétrico simulado dispoendo do *software* ATP.

Esta topologia é uma representação real de um sistema de distribuição de uma concessionária de energia elétrica regional, que foi implementado com o intuito de realizar simulações próximas às situações possíveis ou reais encontradas em campo. Algumas das características do sistema de distribuição serão detalhadas a seguir.

Conforme pode ser observado na Figura 34, o transformador da subestação recebe tensão a 138 kV de um sistema de transmissão, abaixando-o para o nível de distribuição de 13,8 kV. Cabe afirmar que os transformadores de distribuição 3 e 13 e o transformador particular 4 demarcados na Figura 34, foram modelados levando em consideração as suas curvas de saturação. Já os transformadores particulares 1, 2 e 3 foram modelados sem considerar as respectivas curvas de saturação. Com isso, as cargas foram referidas ao primário como uma parcela RL em paralelo com um banco de capacitores, para a devida correção do fator de potência. Para dimensionar o banco de capacitores, as cargas foram consideradas com fator de potência original de 0,75 para a posterior

correção até os desejados 0,92. As características destes transformadores particulares são mostradas na Tabela 2 que segue.

Os demais transformadores de distribuição apresentam seus fatores de potência gerais considerados como 0,9538 para se definir a carga RL em seus secundários. Em alguns casos, certos transformadores foram agrupados e representados por apenas um bloco. Desta forma, representam-se cargas equivalentes desses transformadores, cujo ponto de conexão pode ser visto no diagrama do sistema de distribuição. Vale comentar que todos os transformadores de distribuição apresentam ligações do tipo delta-estrela aterrado, com resistência de aterramento de zero ohm e *tap* ajustado em 13200/220 V. A Tabela 3 apresenta as características destes transformadores de distribuição.

Tabela 2 – Principais características dos transformadores simulados via *software* ATP.

| <b>Transformadores Particulares</b> | <b>Carga Nominal</b> | <b>Carga Incidente</b> |
|-------------------------------------|----------------------|------------------------|
| Tp1                                 | 2250 kVA (3 trafos)  | 2500 kVA               |
| Tp2                                 | 3000 kVA (4 trafos)  | 1600 kVA               |
| Tp3                                 | 450 kVA (2 trafos)   | 456 kVA                |
| Tp4                                 | 300 kVA (1 trafo)    | 280 kVA                |

Tabela 3 – Características dos transformadores de distribuição.

| <b>Transformadores de Distribuição</b> | <b>Carga Nominal</b> | <b>Carga Incidente</b> |
|----------------------------------------|----------------------|------------------------|
| T1                                     | 75 kVA               | 40 kVA                 |
| T2                                     | 75 kVA               | 31 kVA                 |
| T3                                     | 45 kVA               | 32 kVA                 |
| T4                                     | 45 kVA               | 22 kVA                 |
| T5                                     | 112,5 kVA            | 19 kVA                 |
| T6                                     | 225 kVA              | 89 kVA                 |
| T7                                     | 150 kVA              | 27 kVA                 |
| T8                                     | 150 kVA              | 29 kVA                 |
| T9                                     | 45 kVA               | 9 kVA                  |
| T10                                    | 225 kVA              | 19 kVA                 |
| T11                                    | 30 kVA               | 26 kVA                 |
| T12                                    | 150 kVA              | 86 kVA                 |
| T13                                    | 75 kVA               | 19 kVA                 |
| T14                                    | 75 kVA               | 7 kVA                  |

Ainda sobre este sistema, três bancos de capacitores estão instalados e podem ser observados nos pontos Ch1 e Ch3. O primeiro banco de capacitores (BC1) é fixo, representando 1.200 kvar instalados a 476 metros da subestação no ponto Ch1. Os outros dois bancos, BC2 e BC3, são de 600 kvar cada, distanciados de 476 e 1.176 metros da subestação e situados nos pontos Ch1 e Ch3, respectivamente. Estes dois últimos bancos foram alocados em função de estudos transitórios decorrentes do chaveamento automático dos mesmos sobre o sistema apresentado [18].

O alimentador principal é constituído por um cabo nu, modelo CA-477 MCM, em estrutura aérea convencional com comprimento total de 1.576 metros. Seus vários trechos de interesse são representados por elementos RL mutuamente acoplados. O sistema também possui um alimentador secundário onde estão localizados os transformadores de distribuição 11, 12 e 14 e também o transformador particular 4. Neste alimentador secundário o tipo de cabo é 1/0 AWG, com um comprimento de 233 metros.

### **3.1 – A modelagem do SEP dispondo da interface gráfica do *software* ATPDraw**

A seguir, como exemplo, apresentam-se alguns apontamentos de como cada elemento do sistema de distribuição foi modelado dispondo da interface ATPDraw. A máscara completa gerada pelo *software* ATP encontra-se no Apêndice A deste relatório.

#### **3.1.1 – Modelagem do equivalente do sistema**

O equivalente do sistema que representa uma alimentação trifásica na subestação, como pode ser visto na Figura 35, foi modelado por uma tensão aproximada a 112,6 kV de amplitude, pois como trata-se de um esquema em estrela, o valor de linha (138 kV) deve ser convertido para valor de fase e encontrado seu valor eficaz, ou seja:

$$V_{ef}^f = \frac{138}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \approx 112,6kV \quad (6)$$

A frequência fundamental para este sistema é de 60 Hz, com deslocamento de fase 0° (A1 = 0), com um tempo início de operação em -1 segundo (menos um segundo) e final de 2 segundos. O tempo inicial garante a situação de regime permanente sobre o SEP em análise e o final, o tempo total de simulação.

Component: Ac3ph.sup

Attributes

| DATA      | UNIT    | VALUE     |
|-----------|---------|-----------|
| Amplitude | Volt    | 112676.53 |
| f         | Hz      | 60        |
| pha       | Deg/Rad | 0         |
| A1        |         | 0         |
| Tstart    | s       | -1        |
| Tstop     | s       | 2         |

| NODE | PHASE | NAME |
|------|-------|------|
| AC3  | ABC   | FONT |

Copy Paste entire data grid Order: 8 Label: U

Comment: FONTE EQUIVALENTE DO SISTEMA

Type of source  
☐ Current  
☒ Voltage

☐ Hide ☐ Lock

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 35 – Parâmetros da fonte equivalente do SEP em análise.

### 3.1.2 – Modelagem do transformador da subestação

O transformador da subestação, assim como os transformadores de distribuição 3 e 13 e o transformador particular 4, foram modelados como na Figura 36, diferenciando-se apenas pelos valores específicos a cada um. No primário, tem-se uma tensão de linha de 138 kV e elementos resistivo de 1,7462  $\Omega$  e indutivo de 151,37 mH. No secundário, uma tensão de fase aproximada a 7,9 kV, elementos resistivo de 0,0175  $\Omega$  e indutivo de 1,5137 mH. O mesmo apresenta conexão do tipo delta-estrela aterrado com deslocamento de fase de 30°, com 3,0193 A de corrente de magnetização e 26,899 Wb de fluxo magnético em regime permanente. Além de uma resistência de 63 k $\Omega$ , representando o seu núcleo magnético.

Component: SATTRAFO.sup

Attributes

|            | Prim.  | Sec.   |
|------------|--------|--------|
| U [V]      | 138    | 7.9961 |
| R [ohm]    | 1.7462 | 0.0175 |
| L [mH,ohm] | 151.37 | 1.5137 |

Coupling: D Y  
 Phase shift: 30  
 I(0)= 3.0193 Rm= 63000  
 F(0)= 26.899

☐ 3-leg core  
☐ RMS  
☐ 3-winding

| NODE      | PHASE | NAME  |
|-----------|-------|-------|
| Primary   | ABC   | AT    |
| Secondary | ABC   | BT    |
| Starpoint | ABC   | SUB1  |
| Sec-N     | 1     | NEUT4 |

Order: 6 Label:

Comment: TRANSFORMADOR DA SE - 138/13.8 KV - 25 MVA

Output  

☐ Hide ☐ Lock

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 36 – Parâmetros do transformador da subestação.

Vale destacar que na aba de características do transformador é possível atribuir os valores da curva de saturação referenciados ao seu primário. Em função desta situação, verifica-se certa limitação no uso do ATPDraw, já que em muitas das situações, tem-se somente os valores da curva de saturação referenciada ao secundário. Para se sobrepor a esta situação, atribui-se os valores ao primário e depois de gerada a máscara representativa do SEP via ATPDraw, altera-se manualmente para o sistema estar de acordo com o real. Nesse campo coloca-se, para cada corrente, o seu correspondente valor de fluxo, como pode ser visto pela Figura 37.

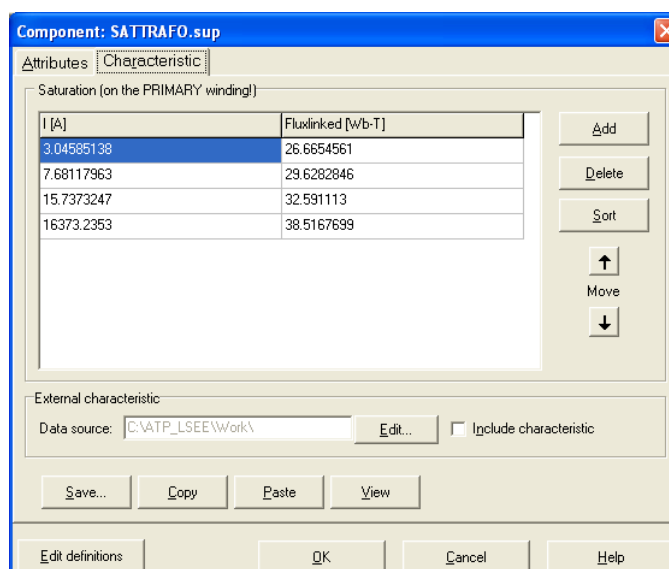


Figura 37 – Valores da curva de saturação do transformador da subestação.

### 3.1.3 – Modelagem da chave da subestação

Cabe comentar que todas as chaves acopladas ao sistema são trifásicas e assim, modeladas fase-a-fase. No caso da chave da subestação, esta tem os mesmos valores para todas as fases, tanto para fechamento em -1 segundo, como abertura em 10 segundos (este foi o tempo total de simulação considerado), conforme pode ser constatado na Figura 38.

Component: SWIT\_3XT.SUP

Attributes

| DATA   | UNIT | VALUE |
|--------|------|-------|
| T-cl_1 | s    | 1     |
| T-op_1 | s    | 10    |
| T-cl_2 | s    | -1    |
| T-op_2 | s    | 10    |
| T-cl_3 | s    | -1    |
| T-op_3 | s    | 10    |
| Imar   | Amps | 0     |

| NODE | PHASE | NAME |
|------|-------|------|
| IN1  | ABC   | BT2  |
| OUT1 | ABC   | SE   |

Copy Paste entire data grid Order: 7 Label:

Comment: CHAVE (DISJUNTORES) DO ALIMENTADOR

Output: 1 - Current

Hide Lock

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 38 – Parâmetros da chave da subestação.

### 3.1.4 – Modelagem do conjunto de transformadores de distribuição 1 e 2

Como descrito anteriormente, os transformadores de distribuição não modelados pela curva de saturação foram considerados simplesmente como cargas RL, e dessa forma, como exemplo, tem-se o conjunto de transformadores 1 e 2 que apresentam parcelas resistiva de 2514  $\Omega$  e indutiva de 2100  $\Omega$  nas três fases (Figura 39). O mesmo acontece para o conjunto de transformadores 4, 5, 6, 8, 9, 11, 12 e 14.

Component: Rlc3.sup

Attributes

| DATA | UNIT | VALUE |
|------|------|-------|
| R_1  | Ohms | 2514  |
| L_1  | Ohm  | 2100  |
| C_1  | uS   | 0     |
| R_2  | Ohms | 2514  |
| L_2  | Ohm  | 2100  |
| C_2  | uS   | 0     |
| R_3  | Ohms | 2514  |
| L_3  | Ohm  | 2100  |

| NODE | PHASE | NAME |
|------|-------|------|
| IN1  | ABC   | T12  |
| OUT1 | ABC   |      |

Copy Paste entire data grid Order: 4 Label:

Comment: CONJUNTO DE TRAFOS 1 E 2

Output: 0 - No

Hide Lock \$Vintage.1

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 39 – Parâmetros do conjunto de trafos 1 e 2.

### 3.1.5 – Modelagem do transformador particular 1

Os transformadores particulares 1, 2 e 3 foram modelados com cargas RL (Figura 40) em paralelo com uma carga capacitiva (Figura 41). Por exemplo, o transformador particular 1 tem como valores de resistência nas fases 45,81  $\Omega$  e indutância 107,2 mH e em paralelo uma carga capacitiva de 15  $\mu$ F.

| DATA | UNIT    | VALUE |
|------|---------|-------|
| R_1  | Ohms    | 45.81 |
| L_1  | Ohm     | 107.2 |
| C_1  | $\mu$ S | 0     |
| R_2  | Ohms    | 45.81 |
| L_2  | Ohm     | 107.2 |
| C_2  | $\mu$ S | 0     |
| R_3  | Ohms    | 45.81 |
| L_3  | Ohm     | 107.2 |

| NODE | PHASE | NAME |
|------|-------|------|
| IN1  | ABC   | TP1  |
| OUT1 | ABC   |      |

Copy Paste entire data grid Order: 5 Label:

Comment:

Output:  ☐ Hide ☐ Lock ☐ \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 40 – Parâmetros RL do trafo particular 1.

| DATA | UNIT    | VALUE |
|------|---------|-------|
| R_1  | Ohms    | 0     |
| L_1  | Ohm     | 0     |
| C_1  | $\mu$ S | 15    |
| R_2  | Ohms    | 0     |
| L_2  | Ohm     | 0     |
| C_2  | $\mu$ S | 15    |
| R_3  | Ohms    | 0     |
| L_3  | Ohm     | 0     |

| NODE | PHASE | NAME |
|------|-------|------|
| IN1  | ABC   | TP1  |
| OUT1 | ABC   |      |

Copy Paste entire data grid Order: 5 Label:

Comment: TRAFO PARTICULAR 1 (3 TRAFOS)

Output:  ☐ Hide ☐ Lock ☐ \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 41 – Parâmetros de capacitância do trafo particular 1.

### 3.1.6 – Modelagem do transformador de distribuição 3

Os demais transformadores modelados também apresentam cargas no secundário. Como por exemplo, no caso do transformador 3, essa carga com parâmetros RL, diz respeito a uma resistência de 1,4426  $\Omega$  e uma indutância de 1,205 mH, como pode ser visto na Figura 42.

Component: Rlc3.sup

Attributes

| DATA | UNIT | VALUE  |
|------|------|--------|
| R_1  | Ohms | 1.4426 |
| L_1  | Ohm  | 1.205  |
| C_1  | uS   | 0      |
| R_2  | Ohms | 1.4426 |
| L_2  | Ohm  | 1.205  |
| C_2  | uS   | 0      |
| R_3  | Ohms | 1.4426 |
| L_3  | Ohm  | 1.205  |

| NODE | PHASE | NAME |
|------|-------|------|
| IN1  | ABC   | T32  |
| OUT1 | ABC   |      |

Copy Paste entire data grid Order: 6 Label:

Comment: CARGA NO SECUNDÁRIO DO TRAFÓ T3

Output: 0 - No

Hide Lock \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 42 – Parâmetros da carga no secundário do trafo 3.

### 3.1.7 – Modelagem do banco de capacitores 1 e 2

Como anteriormente comentado, existem dois bancos de capacitores em estrela chaveados no sistema. O BC1 apresenta dois capacitores em paralelo. No primeiro (Figura 43) a capacitância é de 16,71  $\mu\text{F}$  e no segundo (Figura 44) 8,36  $\mu\text{F}$ . Ambos com resistência infinita de 10  $\text{M}\Omega$  para o terra – Figura 45.

Component: RLCY3.SUP

Attributes

| DATA | UNIT | VALUE |
|------|------|-------|
| R_1  | Ohm  | 0     |
| L_1  | mH   | 0     |
| C_1  | uF   | 16.71 |
| R_2  | Ohm  | 0     |
| L_2  | mH   | 0     |
| C_2  | uF   | 16.71 |
| R_3  | Ohm  | 0     |
| L_3  | mH   | 0     |

| NODE | PHASE | NAME  |
|------|-------|-------|
| IN   | ABC   | BC1   |
| OUT  | 1     | NEUT1 |

Copy Paste entire data grid Order: 2 Label:

Comment: BANCO DE CAPACITOR 1 - BC1

Output: 0 - No

Hide Lock \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 43 – Parâmetros do banco de capacitores 1.

Component: RLCY3.SUP

Attributes

| DATA | UNIT | VALUE | NODE | PHASE | NAME  |
|------|------|-------|------|-------|-------|
| R_1  | Ohm  | 0     | IN   | ABC   | BC2   |
| L_1  | mH   | 0     | OUT  | 1     | NEUT2 |
| C_1  | uF   | 8.36  |      |       |       |
| R_2  | Ohm  | 0     |      |       |       |
| L_2  | mH   | 0     |      |       |       |
| C_2  | uF   | 8.36  |      |       |       |
| R_3  | Ohm  | 0     |      |       |       |
| L_3  | mH   | 0     |      |       |       |

Copy Paste entire data grid Order: 2 Label:

Comment: BANCO DE CAPACITOR 2 - BC2

Output: 0 - No ☐ Hide ☐ Lock ☐ \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 44 – Parâmetros do banco de capacitores 2.

Component: RESISTOR.SUP

Attributes

| DATA | UNIT | VALUE   | NODE | PHASE | NAME  |
|------|------|---------|------|-------|-------|
| RES  | Ohm  | 1000000 | From | 1     | NEUT1 |
|      |      |         | To   | 1     |       |

Copy Paste entire data grid Order: 3 Label:

Comment: RESISTÊNCIAS INFINITAS PARA TERRA

Output: 0 - No ☐ Hide ☐ Lock ☐ \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 45 – Resistência infinita para terra.

### 3.1.8 – Modelagem da linha de distribuição do trecho T1 e T2 – BC1

As linhas de distribuição foram modeladas considerando-se as impedâncias de seqüência zero e positiva, pois estes foram os parâmetros das linhas repassados pela concessionária de energia elétrica, como pode ser visto no trecho de linha entre os transformadores 1 e 2 e a chave que comanda o banco de capacitores 1. Sua impedância de seqüência zero é formada por uma parte resistiva de  $0,0747 \Omega/\text{m}$  e indutiva de  $0,538 \text{ mH}/\text{m}$ , com uma impedância de seqüência positiva com valores para a parte resistiva de  $0,018 \Omega/\text{m}$  e indutiva de  $0,143 \text{ mH}/\text{m}$  – Figura 46.

Component: Linesy\_3.sup

Attributes

| DATA | UNIT  | VALUE  |
|------|-------|--------|
| R0   | Ohm/m | 0.0747 |
| Lo   | Ohm/m | 0.538  |
| R+   | Ohm/m | 0.018  |
| L+   | Ohm/m | 0.143  |

| NODE | PHASE | NAME |
|------|-------|------|
| IN1  | ABC   | T12  |
| OUT1 | ABC   | CH1  |

Copy Paste entire data grid Order: 1 Label:

Comment: IMPEDÂNCIA DO TRECHO ENTRE A SE E OS TRAFOS T12 E TRECHO CH1

Lines Length: 1 [m]

Hide Lock

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 46 – Parâmetros de impedância do trecho entre os trafos 1 e 2 e chave que comanda o banco de capacitores 1.

### 3.1.9 – Modelagem das chaves de medição

Além de todos esses componentes, também foram colocadas chaves especiais para medição da tensão e corrente em alguns locais de interesse sobre o sistema - Figura 47.

Open Probe

#Phases: 3

Monitor:

- ☒ A-1
- ☒ B-2
- ☒ C-3
- ☐ D-4
- ☐ E-5

Steady-state

☐ Voltage

Hide

OK Help

Figura 47 – Janela da chave de medição de tensão.

## 3.2 – A operação do SEP em regime permanente e sob condições de defeito

### 3.2.1 – O sistema em regime permanente

O objetivo deste tópico é de caracterizar as formas de ondas trifásicas da tensão e da corrente em alguns pontos do circuito operando em regime permanente para verificar se estão de acordo com os valores encontrados em campo e repassados pela concessionária de energia elétrica ao LSEE.

Como primeira situação, tem-se as formas de ondas das tensões trifásicas A, B e C no lado de alta da subestação, com tensão de fase de pico aproximada a 112,7 kV, representadas na Figura 48.

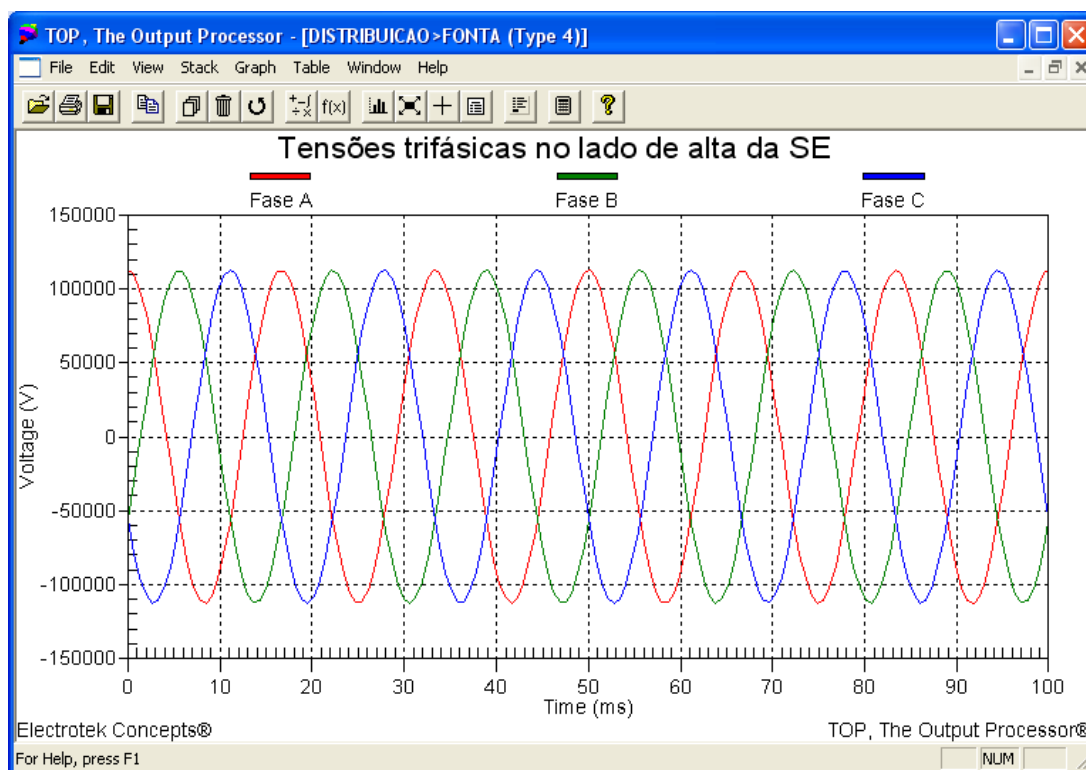


Figura 48 – Tensões trifásicas no lado de alta da subestação.

Estas formas de onda (Figuras 47 e 48) acabam sendo as mesmas formas de onda na entrada do transformador da subestação. Já as formas de ondas da tensão de fase no secundário do transformador apresentam amplitudes aproximadas a 11 kV, representadas na Figura 49.

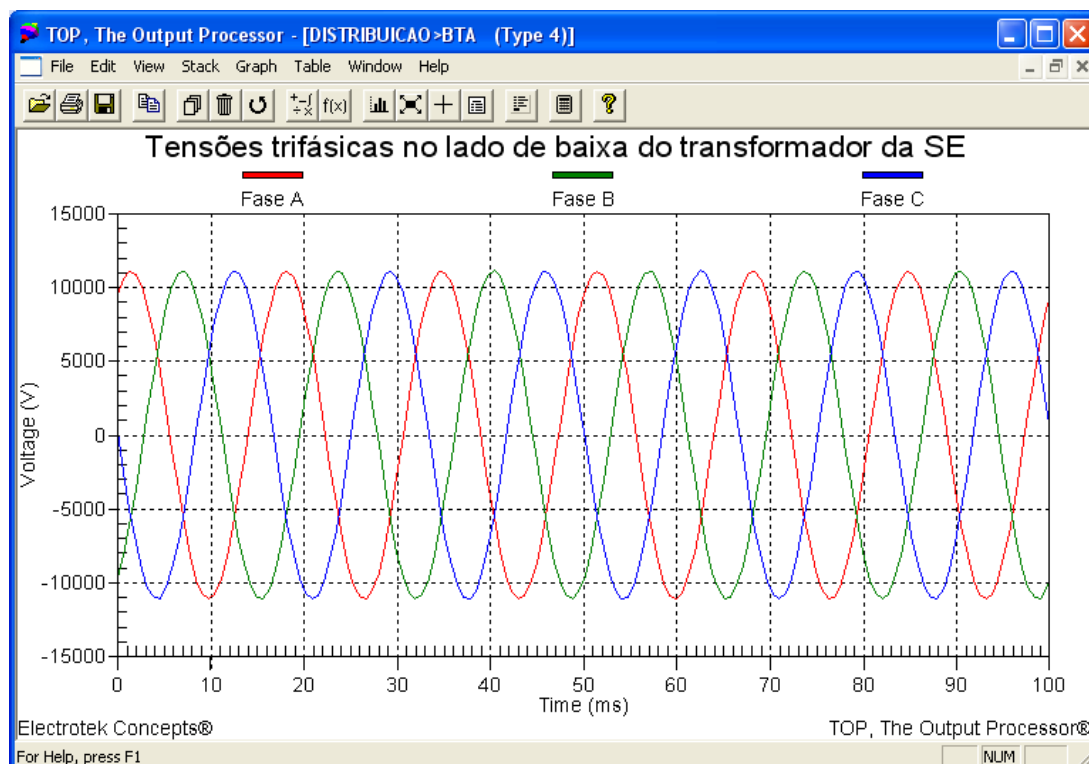


Figura 49 – Tensões trifásicas no lado de baixa do transformador da subestação.

As formas de ondas das correntes nesse caso também foram registradas, com amplitudes aproximadas a 287 A (Figura 50).

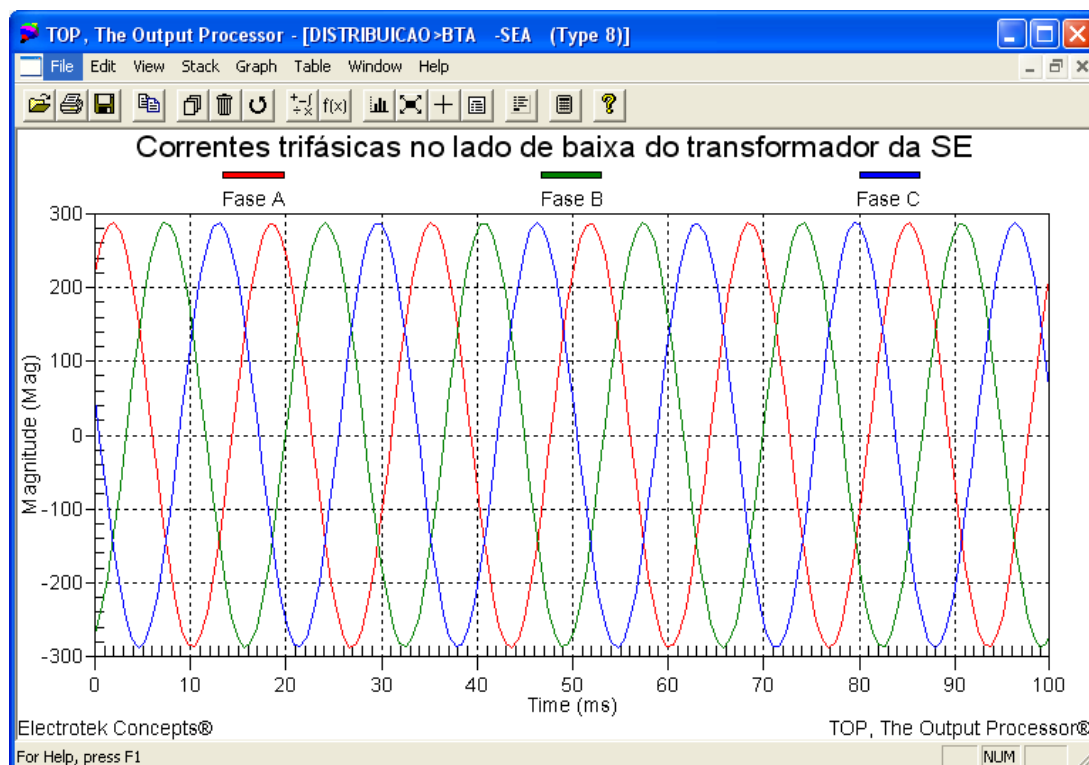


Figura 50 – Correntes trifásicas no lado de baixa do transformador da subestação.

As formas de ondas das tensões, a menos das quedas proporcionadas pelos elementos resistivos e indutivos da linha de distribuição, continuam praticamente iguais para as entradas dos outros transformadores ou banco de capacitores. Um exemplo é a entrada do transformador de distribuição 13 – Figura 51.

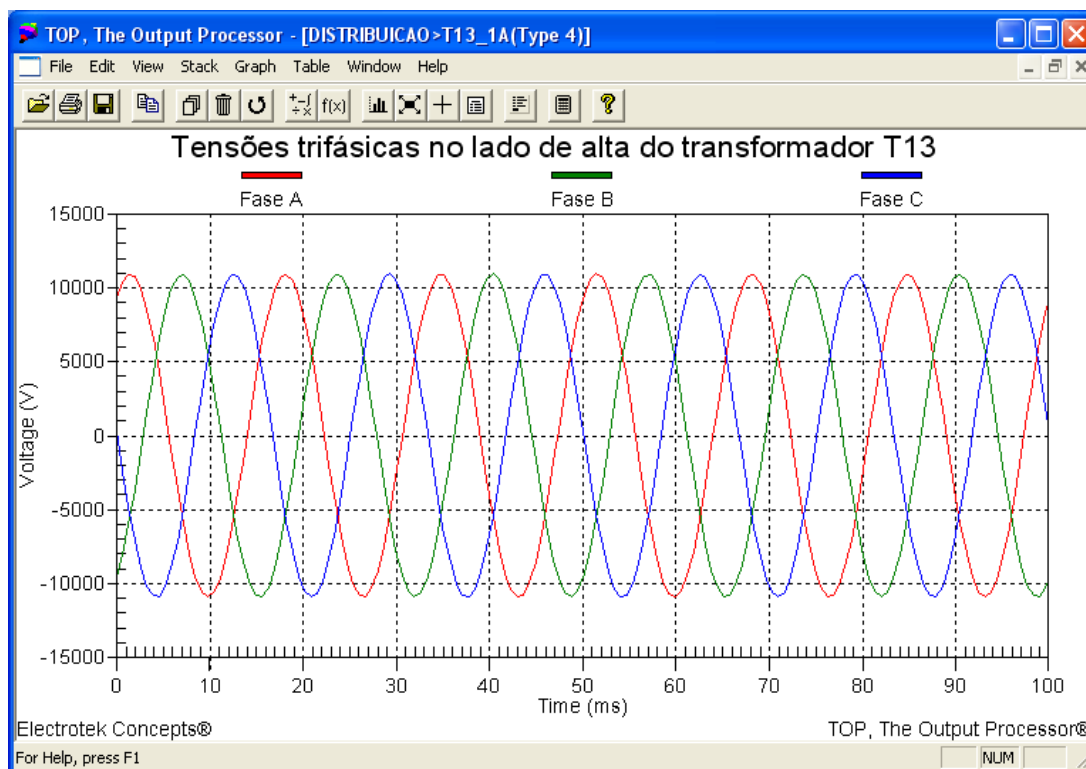


Figura 51 – Tensões trifásicas no lado de alta do transformador T13.

Outras formas de ondas interessantes seriam a da carga no secundário do mesmo transformador, que apresentam amplitudes aproximadas de 180 V, que podem ser observadas na Figura 52.

Portanto, após a caracterização de todas estas formas de ondas trifásicas da tensão e da corrente em alguns pontos do circuito operando em regime permanente verificou-se que os valores encontrados estão de acordo com os valores encontrados em campo e repassados pela concessionária de energia elétrica ao LSEE. A seguir, será estudado o sistema sob condições de defeito e os resultados obtidos serão avaliados.

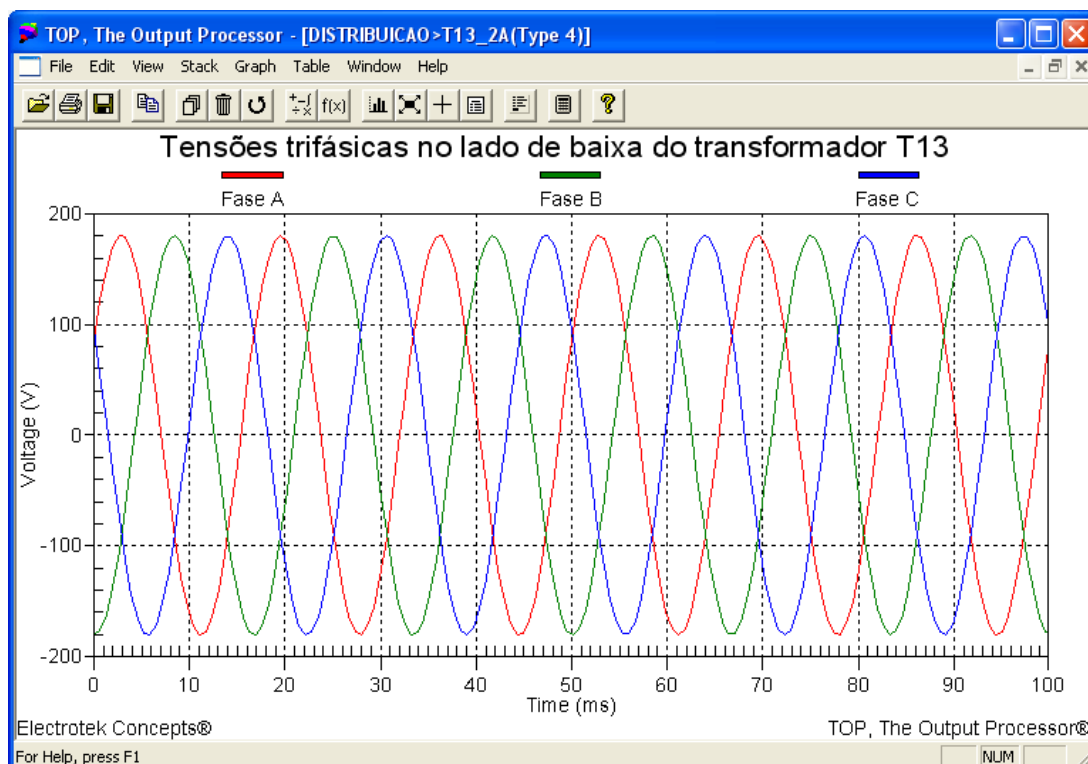


Figura 52 – Tensões trifásicas no lado de baixa do transformador T13.

### 3.2.2 – O sistema sob condição de defeito

As situações de defeitos (curto-circuitos) foram aplicadas primeiramente envolvendo a fase “A” do circuito com conexão a terra, através de um *splitter*, componente pelo qual se permite separar as fases do diagrama unifilar, em destaque na Figura 53 a seguir.

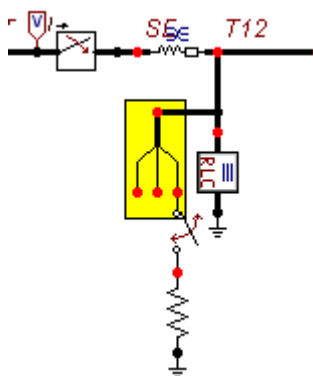


Figura 53 – Componente *Splitter* empregado para caracterizar as condições de defeitos sobre o SEP em análise.

Para melhor caracterizar as situações de defeitos, foram consideradas resistências de falta com valores de  $0,001 \, \Omega$  e  $100 \, \Omega$ , em conjunto com ângulos de incidência da falta de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . Analisando-se em regime permanente a forma de onda da tensão da fase envolvida, observou-se que o sinal da fase

“A” passa por um dos zeros em 497,274 ms, o qual foi associado à incidência de  $0^\circ$ . Deste apontamento a 501,27 ms, tem-se a forma de onda a  $90^\circ$ .

### 3.2.2.1 – Variação do Local de Aplicação da Falta

A seguir, apresentam-se algumas das formas de onda das tensões e correntes trifásicas medidas na subestação depois da aplicação de situações de defeitos envolvendo a fase “A” com conexão a terra junto à mesma (Figuras 54 a 61).

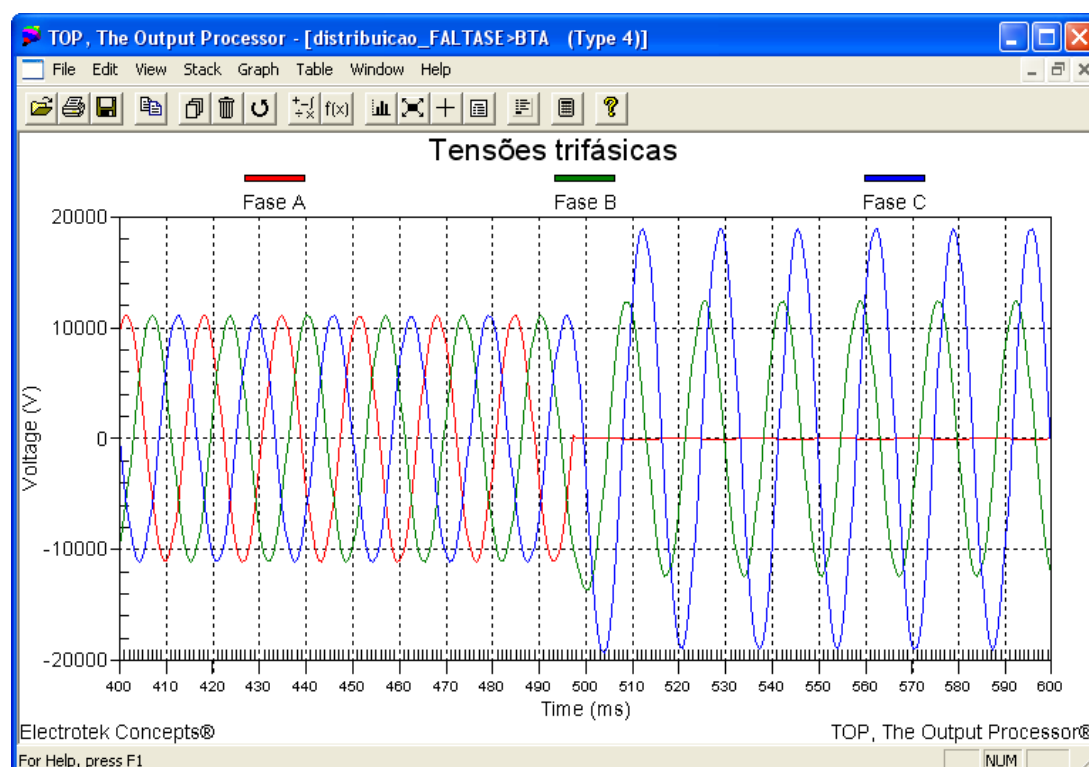


Figura 54 – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada na subestação com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

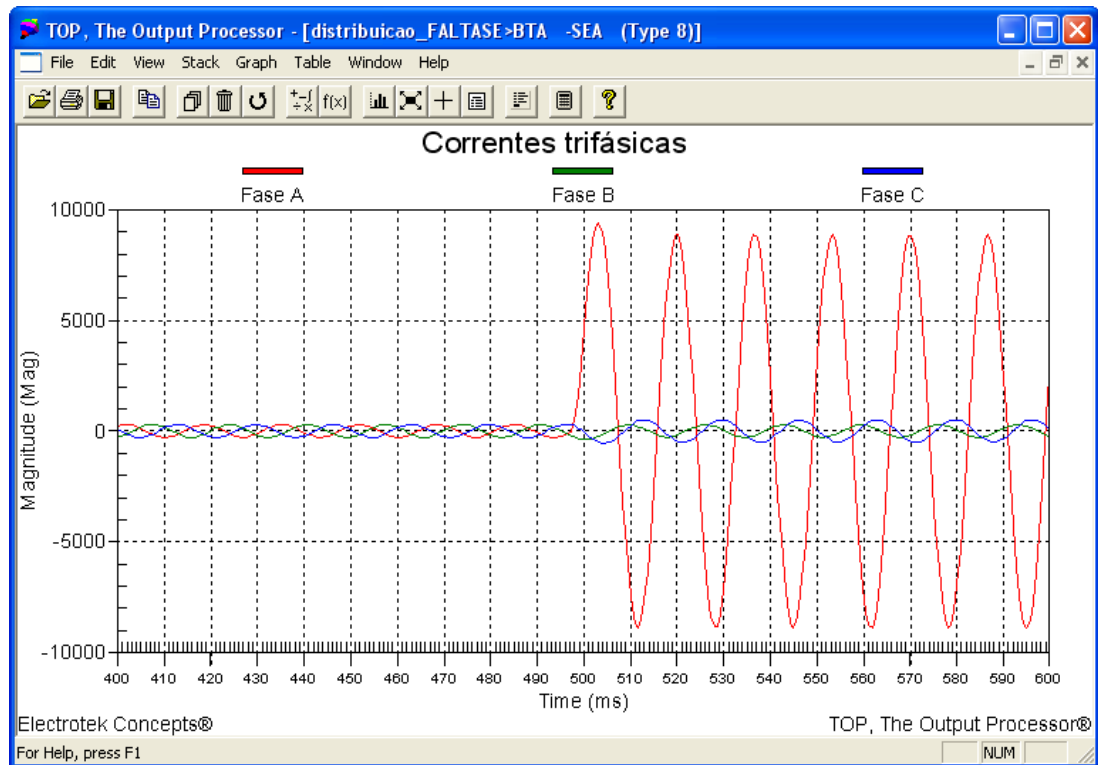


Figura 55 – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada na subestação com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

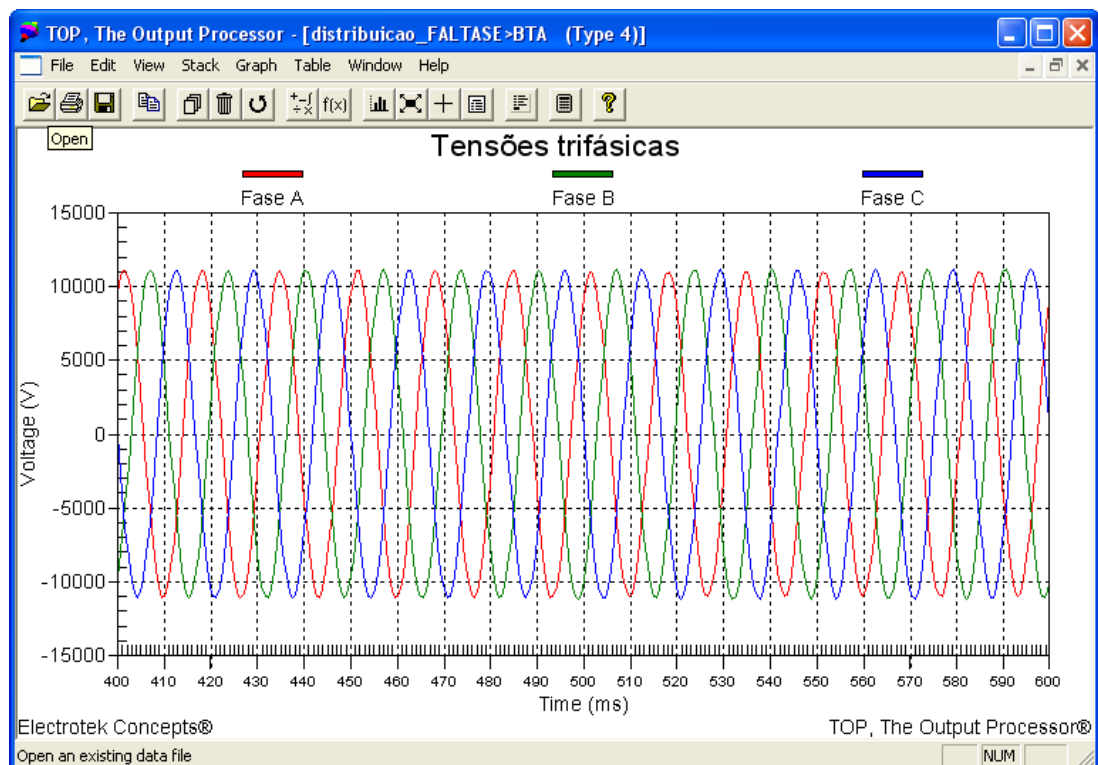


Figura 56 – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada na subestação com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  e com uma resistência de falta de  $100 \Omega$ .

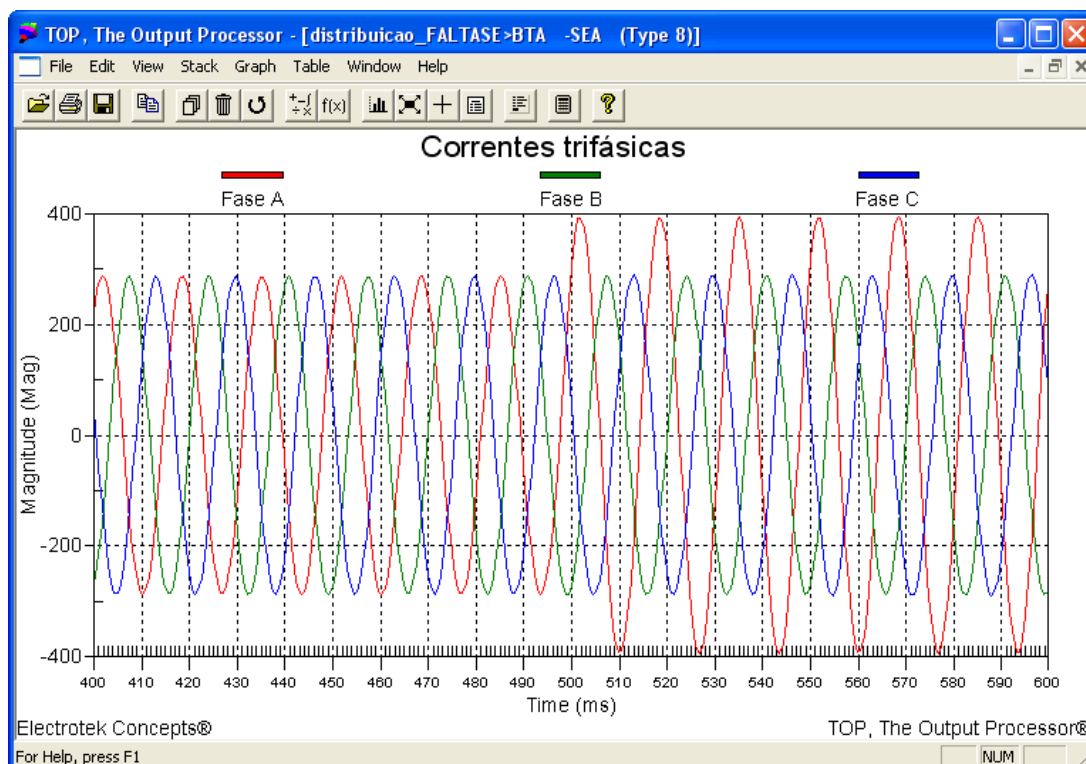


Figura 57 – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada na subestação com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  e com uma resistência de falta de  $100 \Omega$ .

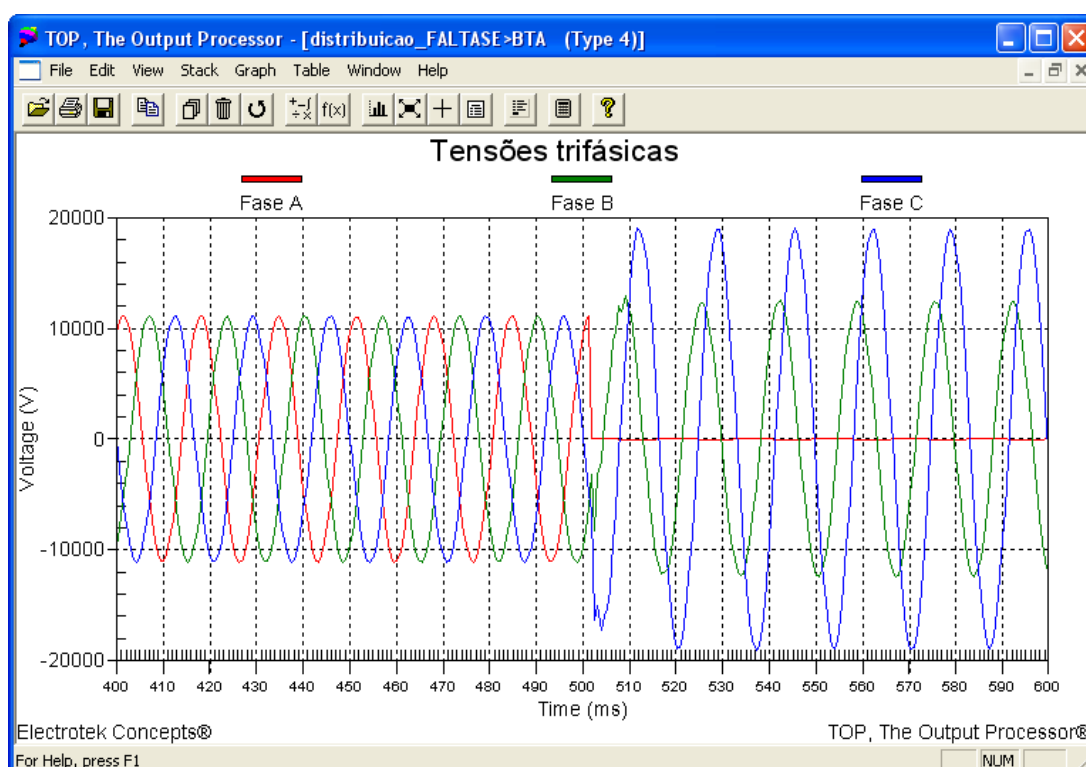


Figura 58 – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada na subestação com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

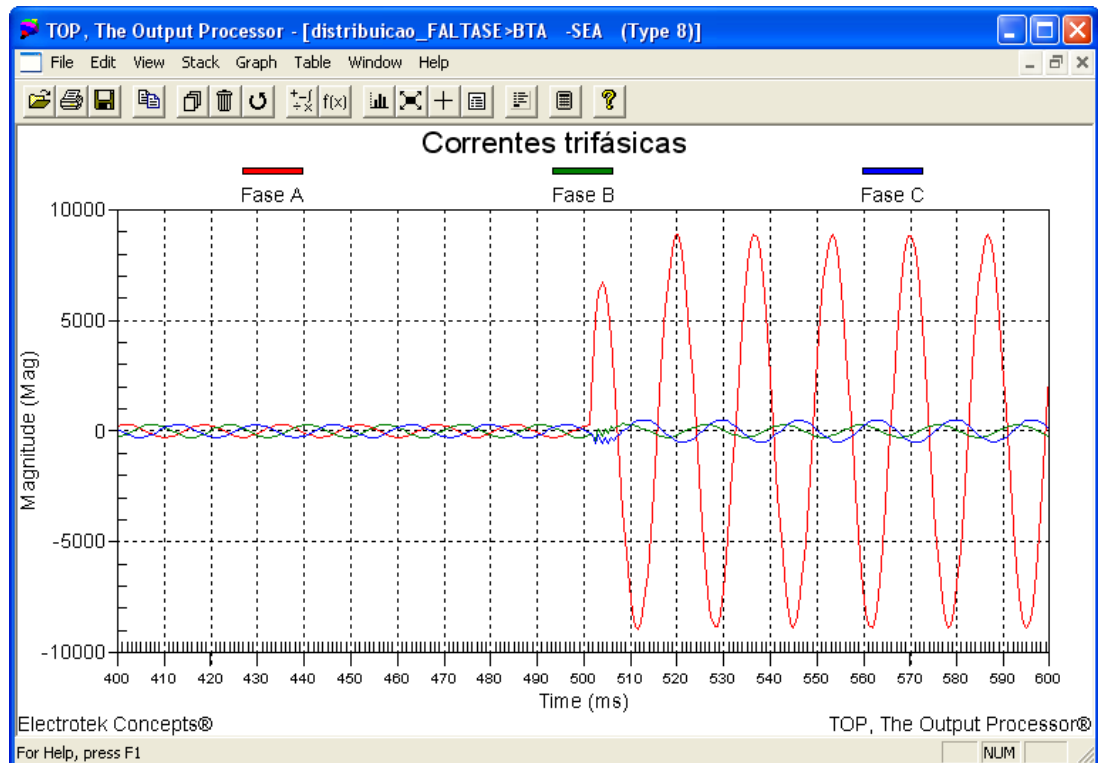


Figura 59 – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada na subestação com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

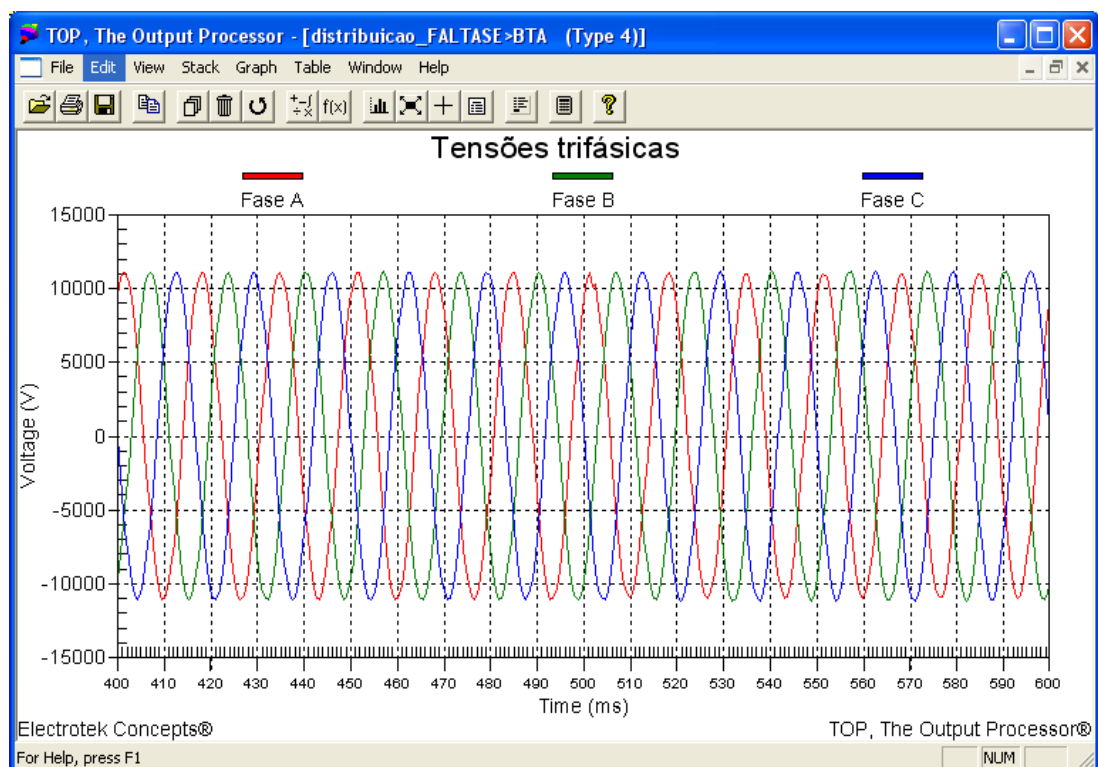


Figura 60 – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada na subestação com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  e com uma resistência de falta de  $100 \Omega$ .

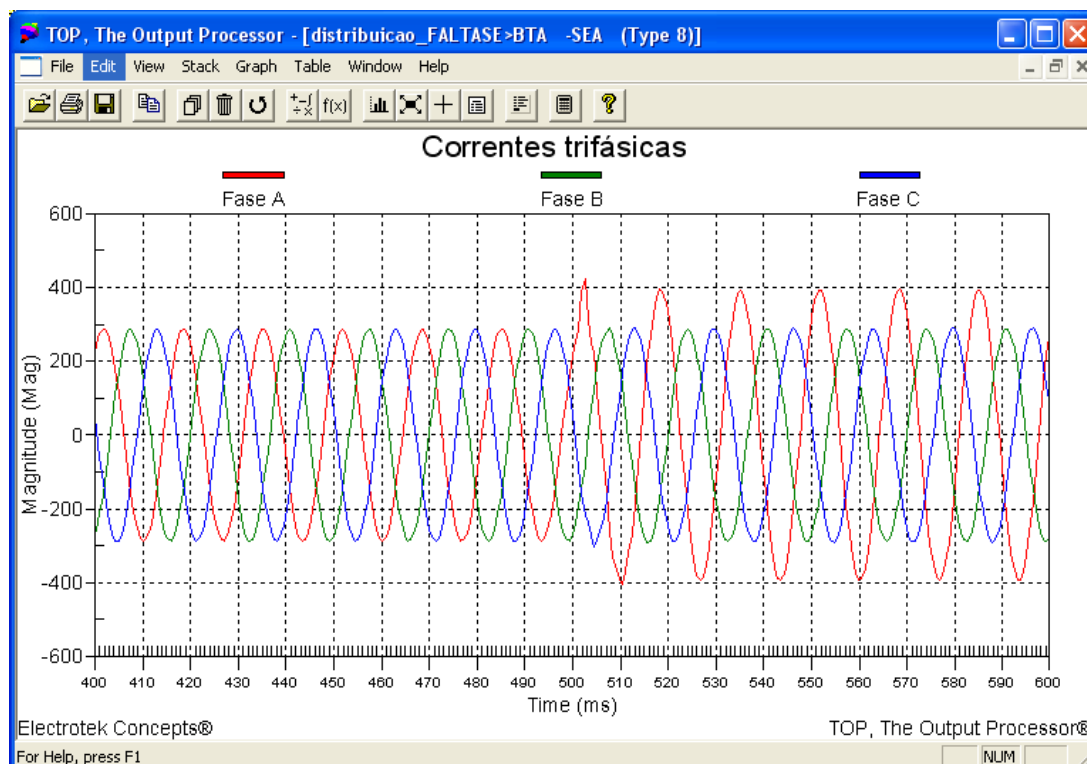


Figura 61 – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada na subestação com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  e com uma resistência de falta de  $100 \Omega$ .

A seguir são apresentadas as formas de onda das tensões e correntes trifásicas medidas na subestação, quando certas situações de curto-circuitos envolvendo a fase “A” com conexão a terra foram aplicadas no lado primário dos transformadores T1 e T2 (Figura 62 a 69).

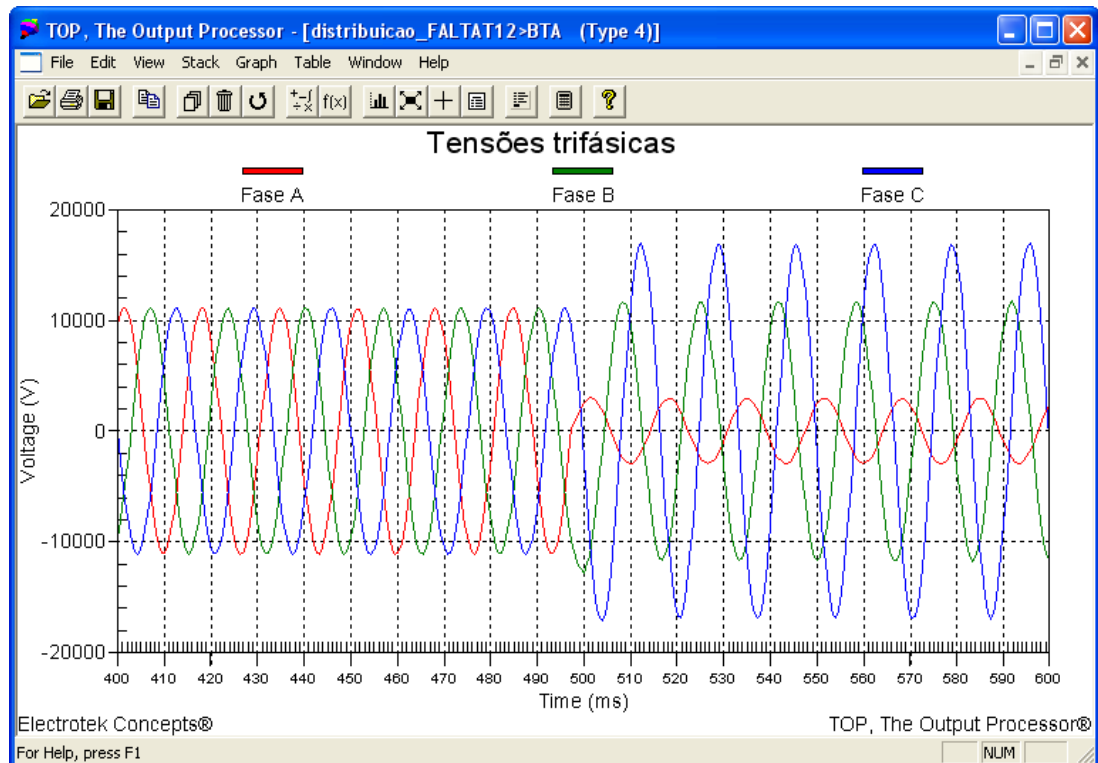


Figura 62 – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada no conjunto de transformadores 1 e 2 com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

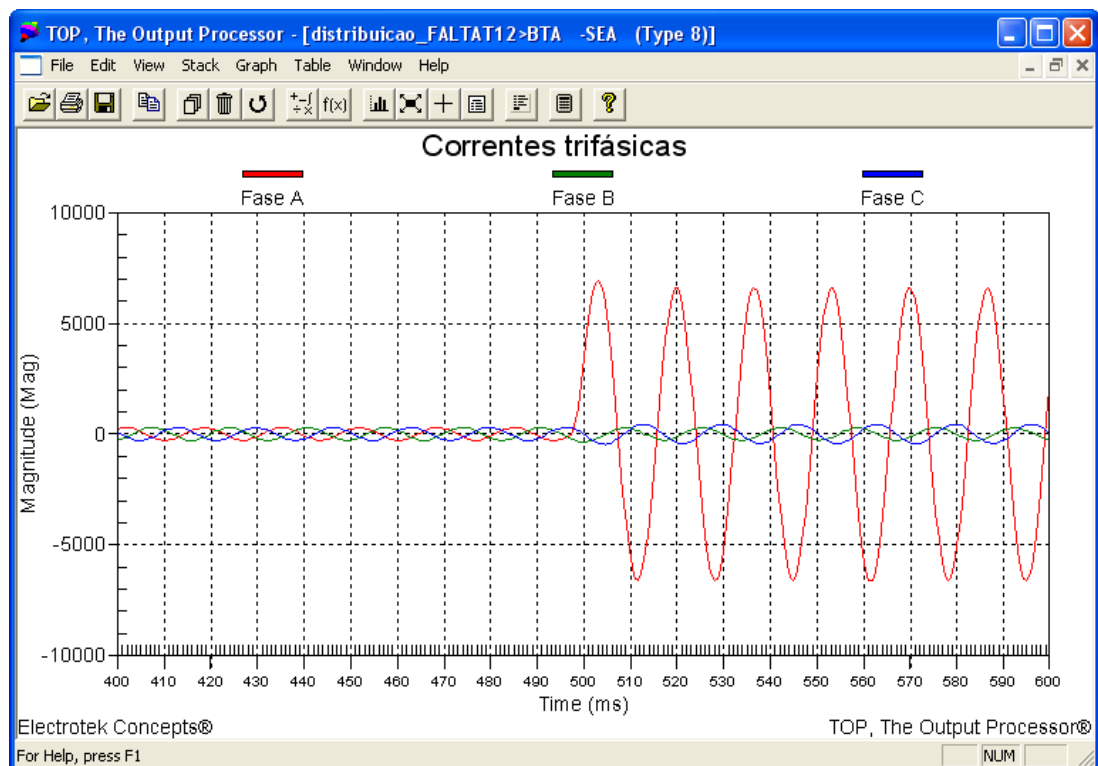


Figura 63 – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada no conjunto de transformadores 1 e 2 com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

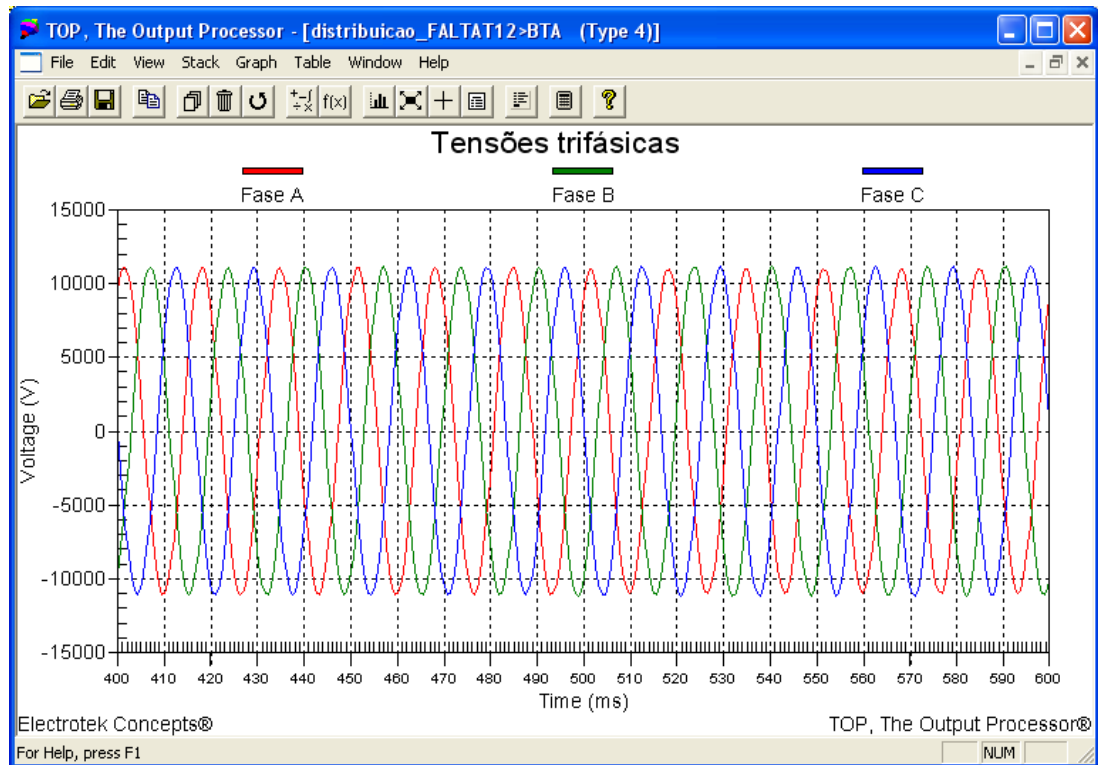


Figura 64 – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada no conjunto de transformadores 1 e 2 com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  e com uma resistência de falta de  $100 \Omega$ .

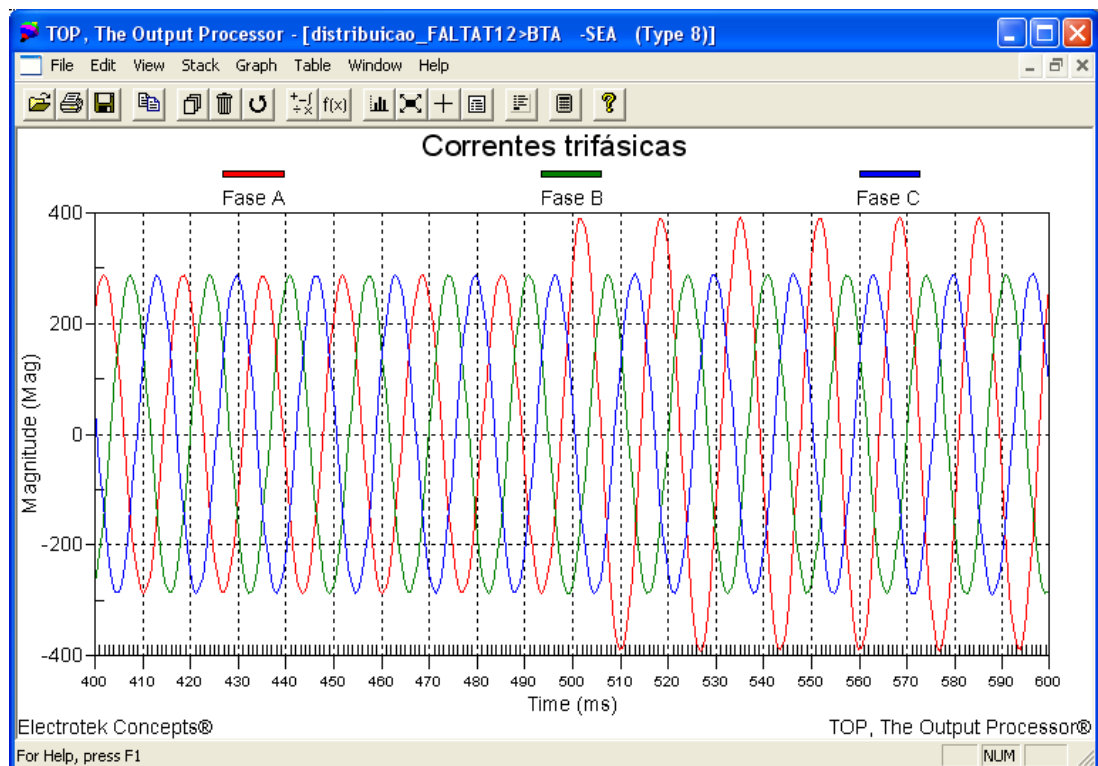


Figura 65 – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada no conjunto de transformadores 1 e 2 com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  e com uma resistência de falta de  $100 \Omega$ .

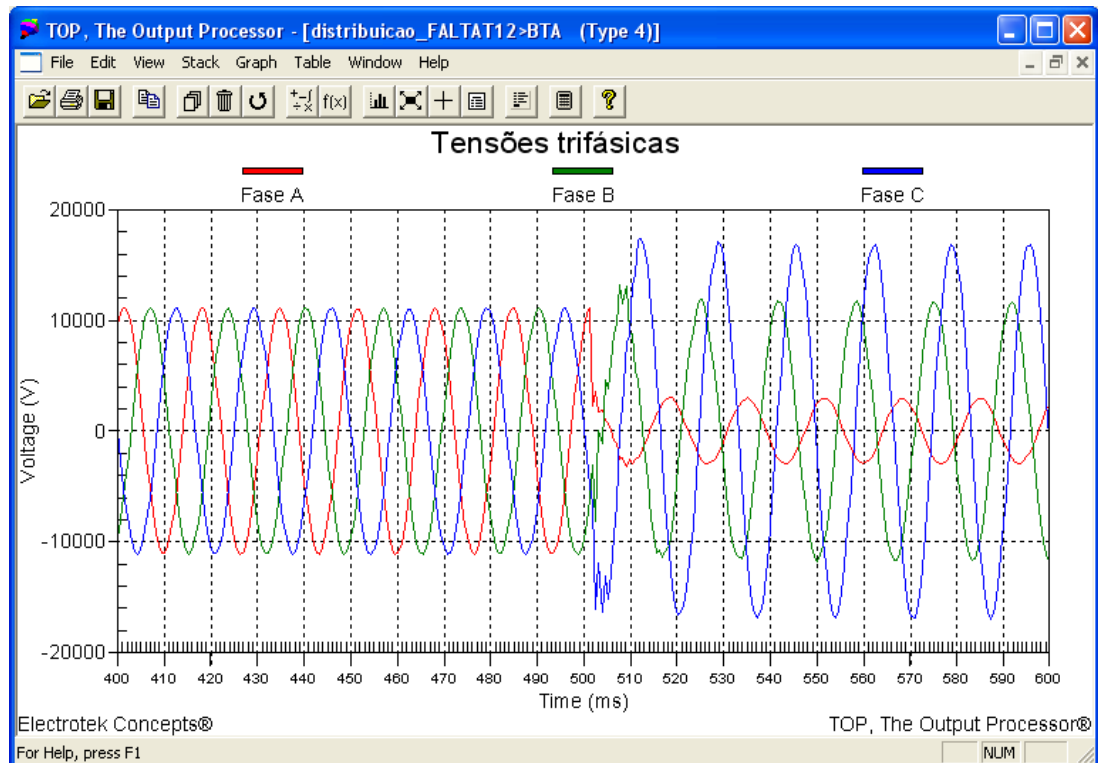


Figura 66 – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada no conjunto de transformadores 1 e 2 com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

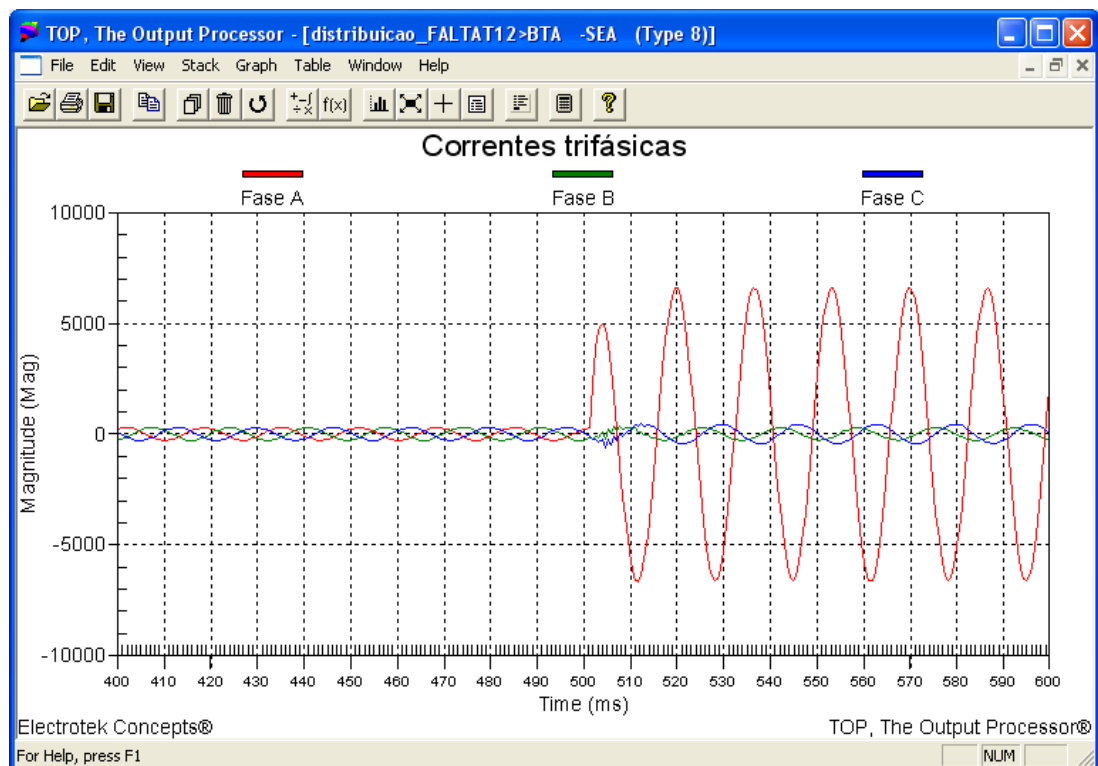


Figura 67 – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada no conjunto de transformadores 1 e 2 com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

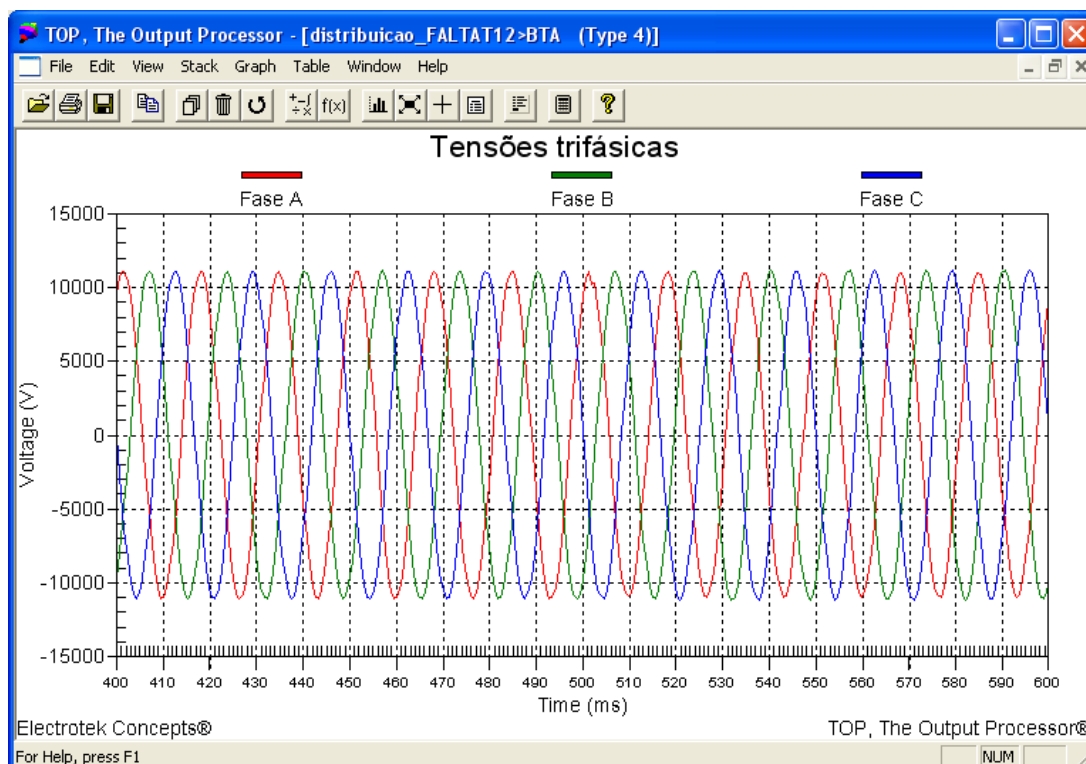


Figura 68 – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada no conjunto de transformadores 1 e 2 com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  e com uma resistência de falta de  $100 \Omega$ .

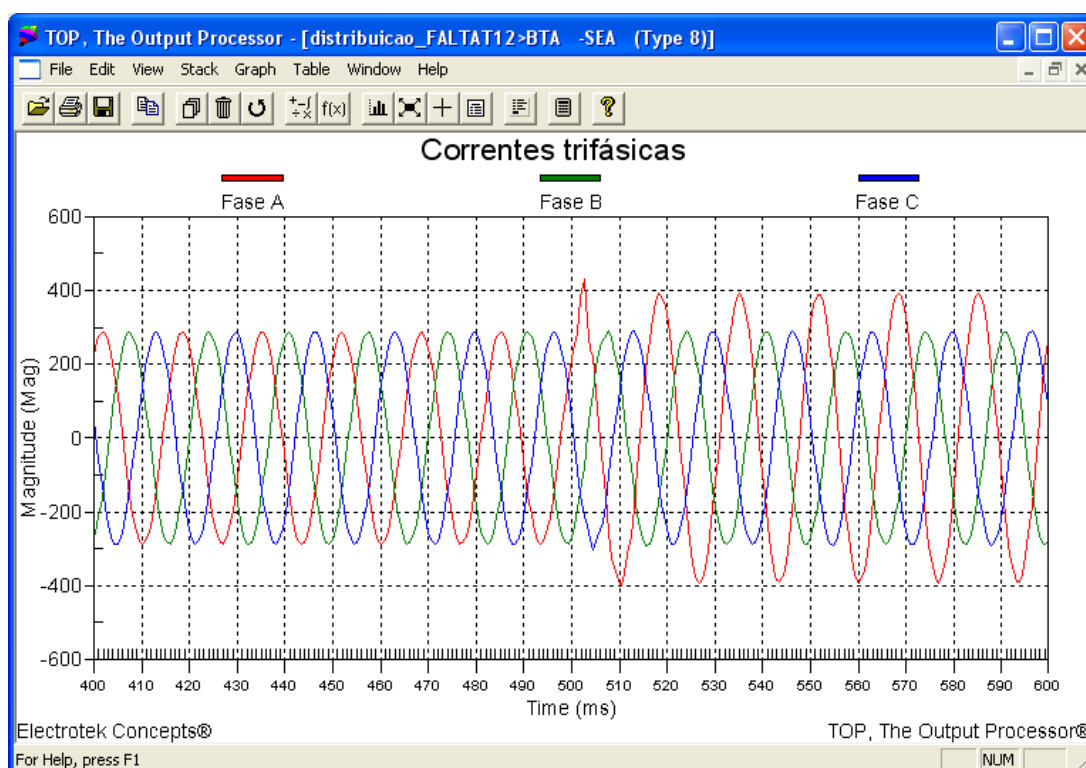


Figura 69 – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada no conjunto de transformadores 1 e 2 com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  e com uma resistência de falta de  $100 \Omega$ .

A seguir são apresentadas as formas de ondas das tensões e correntes trifásicas medidas na subestação quando situações de curto-circuitos foram aplicadas junto ao banco de capacitores 3 (Figuras 70 a 77).

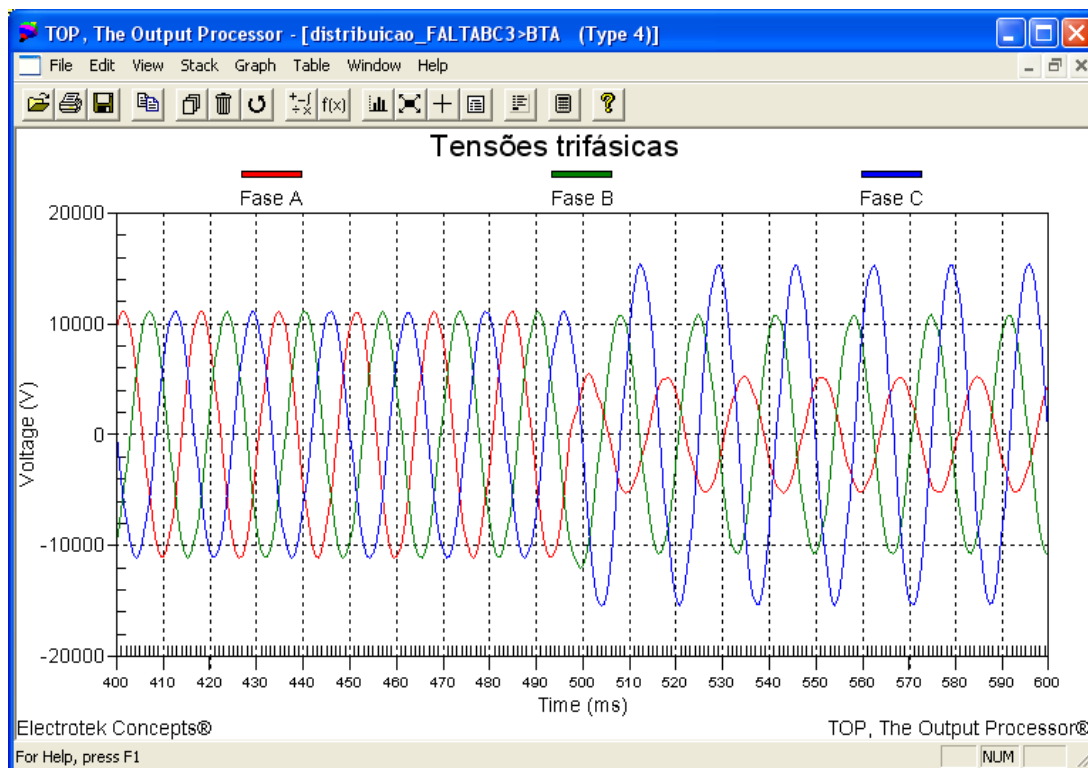


Figura 70 – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada no banco de capacitores 3 com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

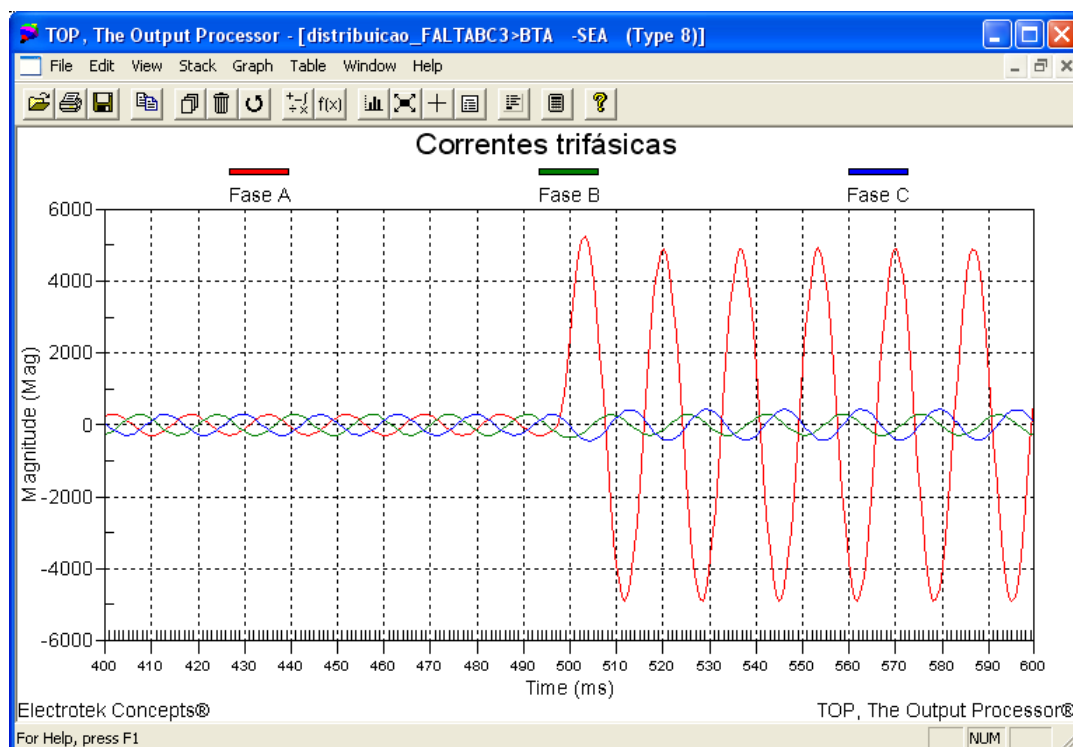


Figura 71 – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada no banco de capacitores 3 com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

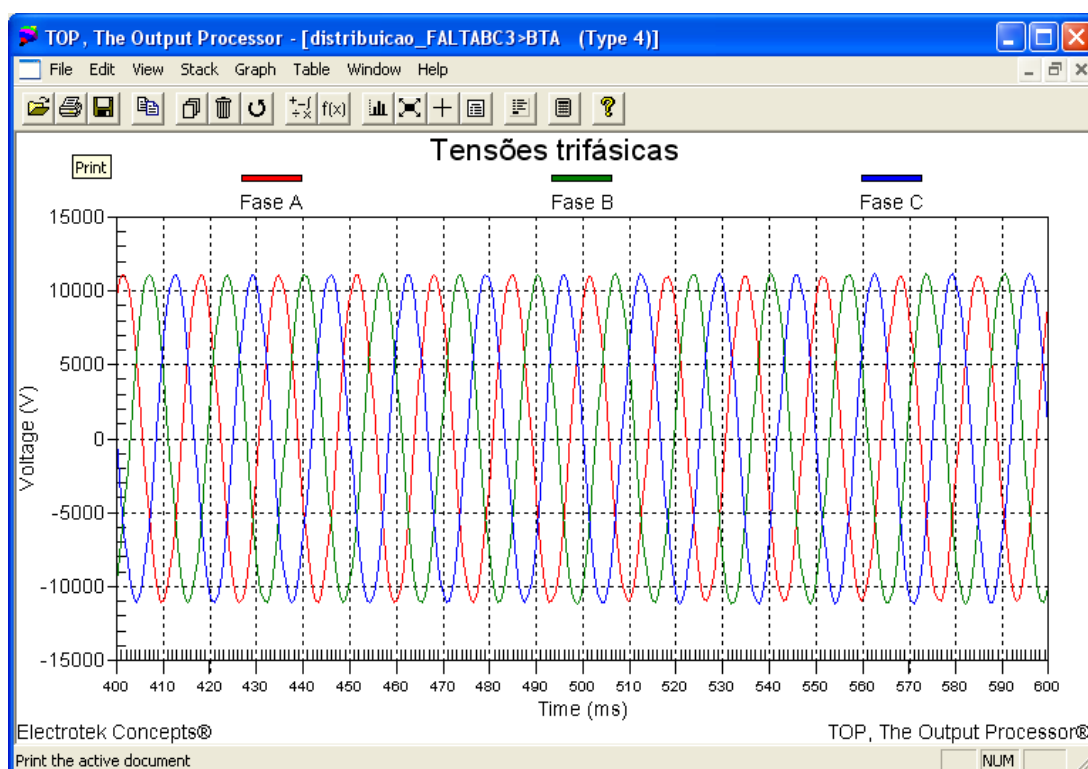


Figura 72 – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada no banco de capacitores 3 com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  e com uma resistência de falta de  $100 \Omega$ .

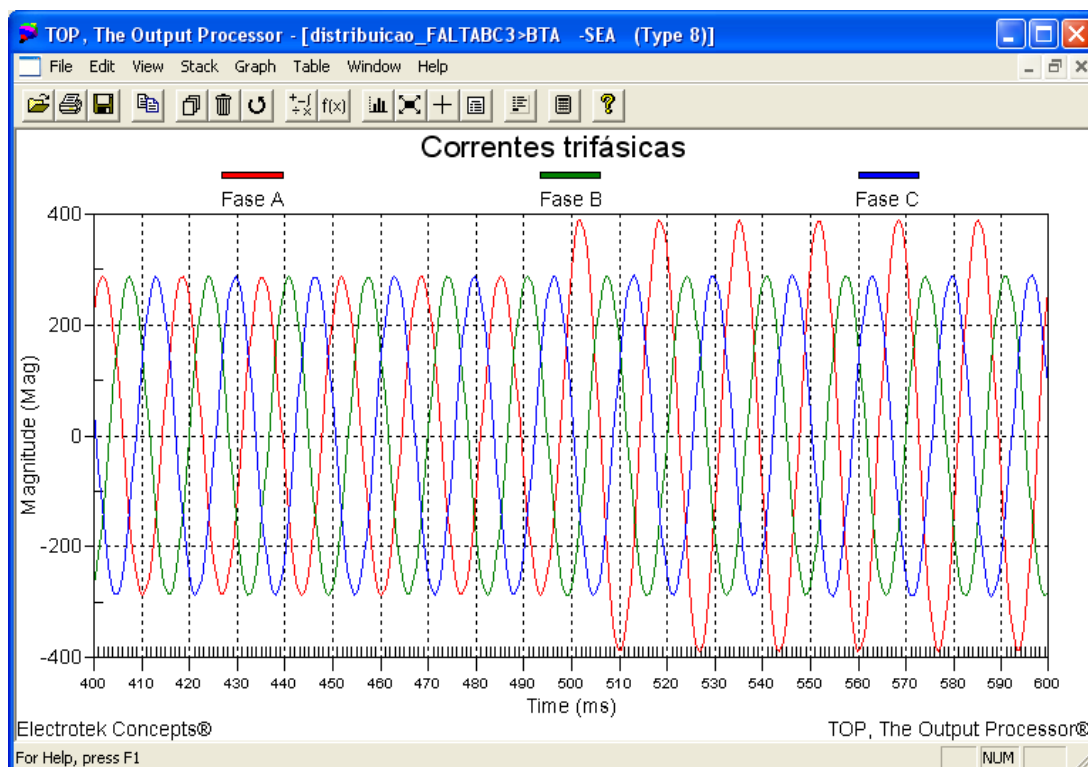


Figura 73 – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada no banco de capacitores 3 com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  e com uma resistência de falta de  $100 \Omega$ .

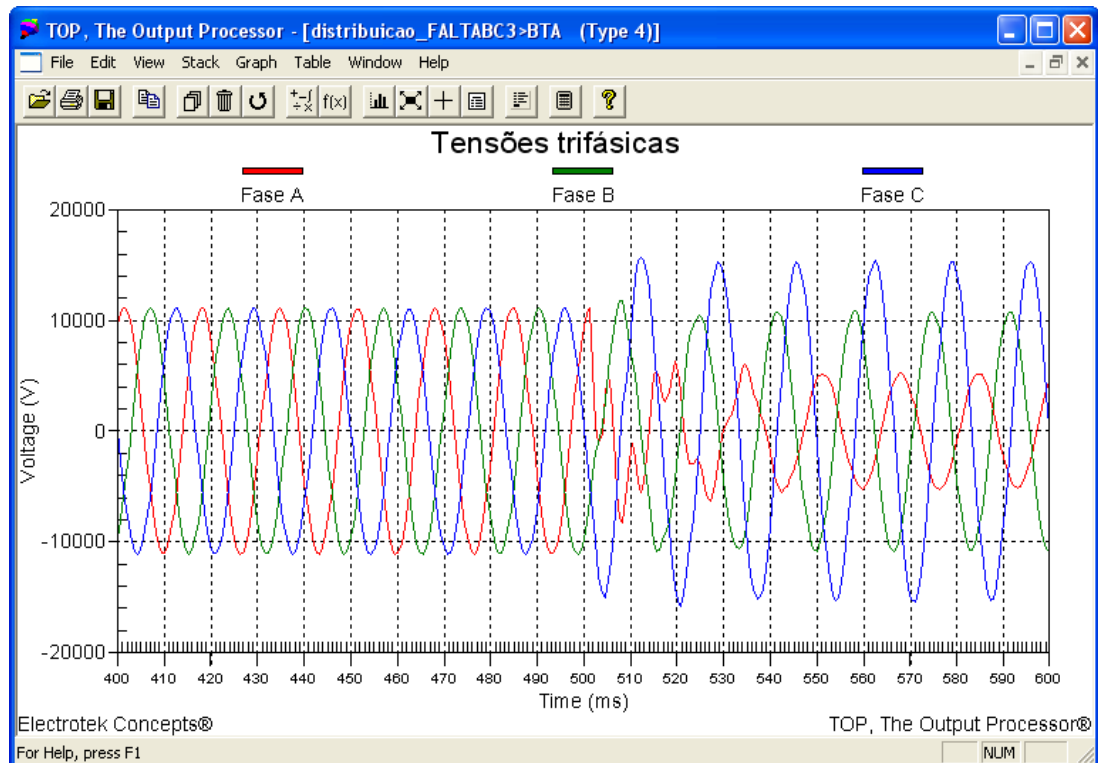


Figura 74 – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada no banco de capacitores 3 com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

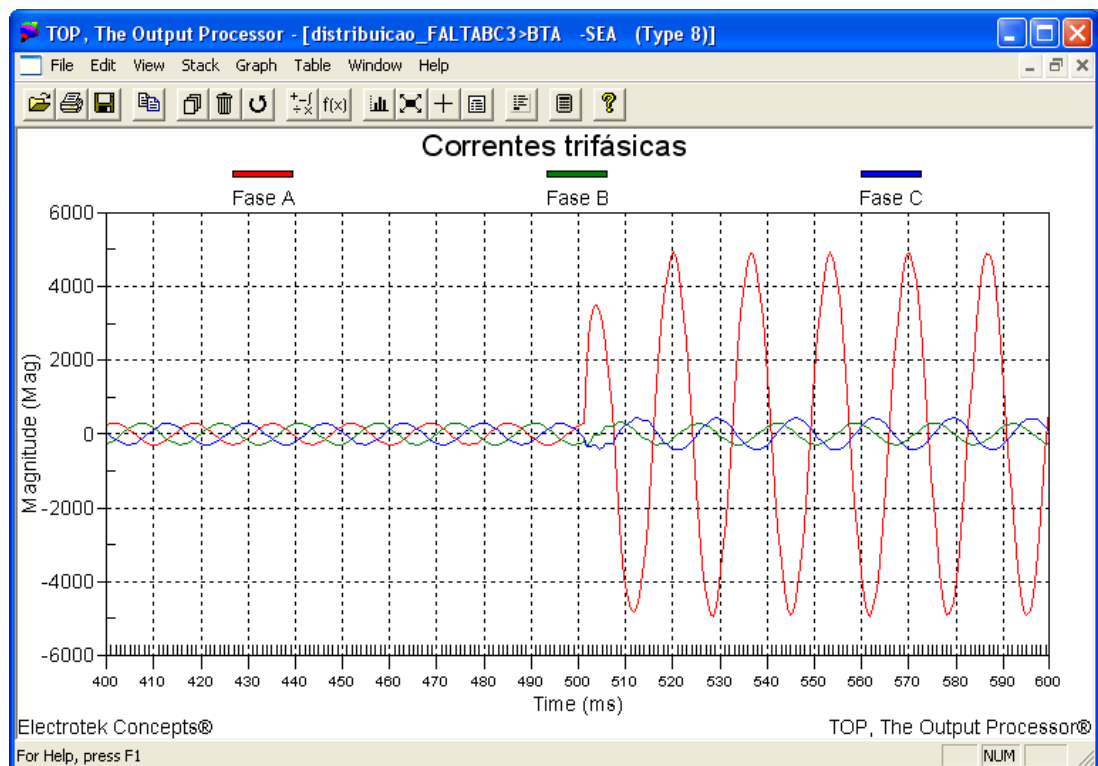


Figura 75 – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada no banco de capacitores 3 com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

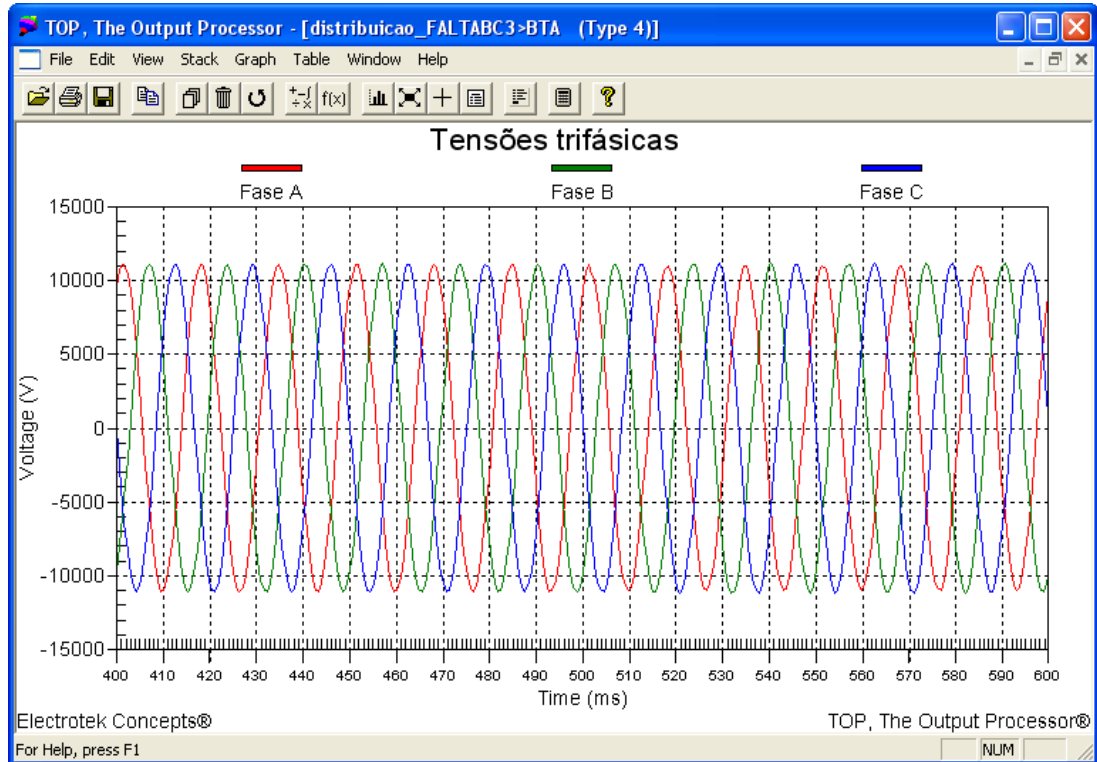


Figura 76 – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada no banco de capacitores 3 com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  e com uma resistência de falta de  $100 \Omega$ .

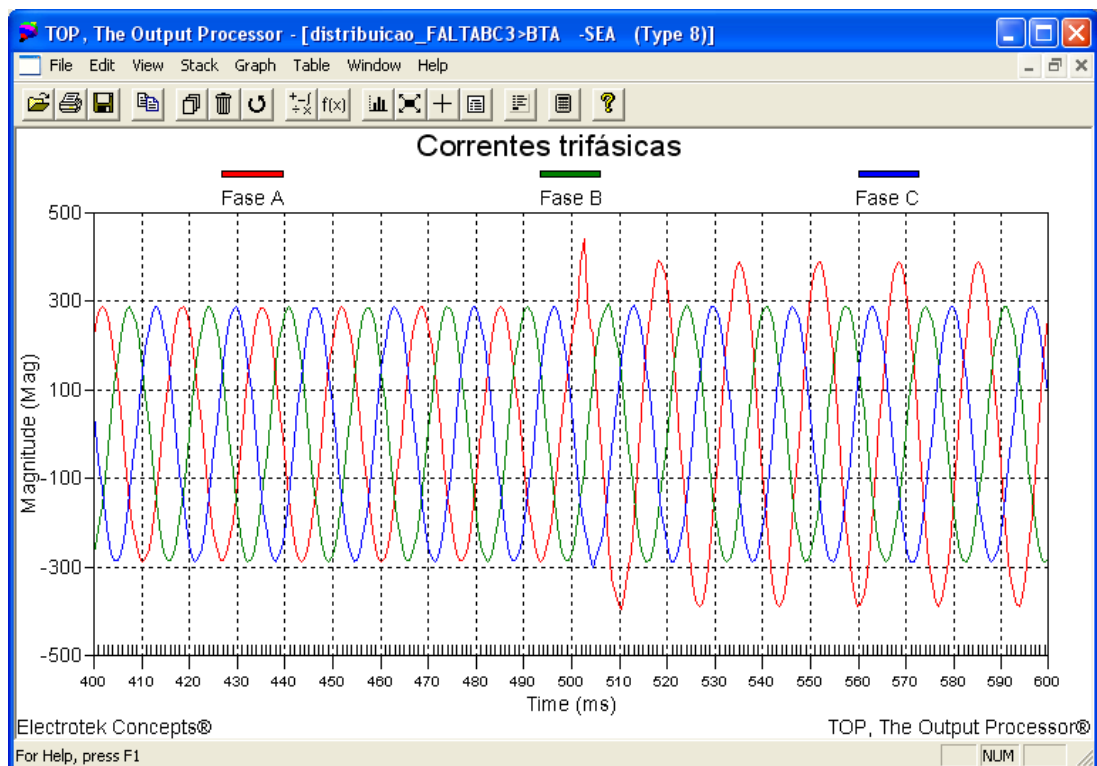


Figura 77 – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada no banco de capacitores 3 com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  e com uma resistência de falta de  $100 \Omega$ .

Por fim, são ilustradas as formas de onda das tensões e correntes trifásicas no transformador particular 4, representadas nas Figuras 78 a 85. Como nos casos anteriores, as formas de onda foram tomadas na subestação.

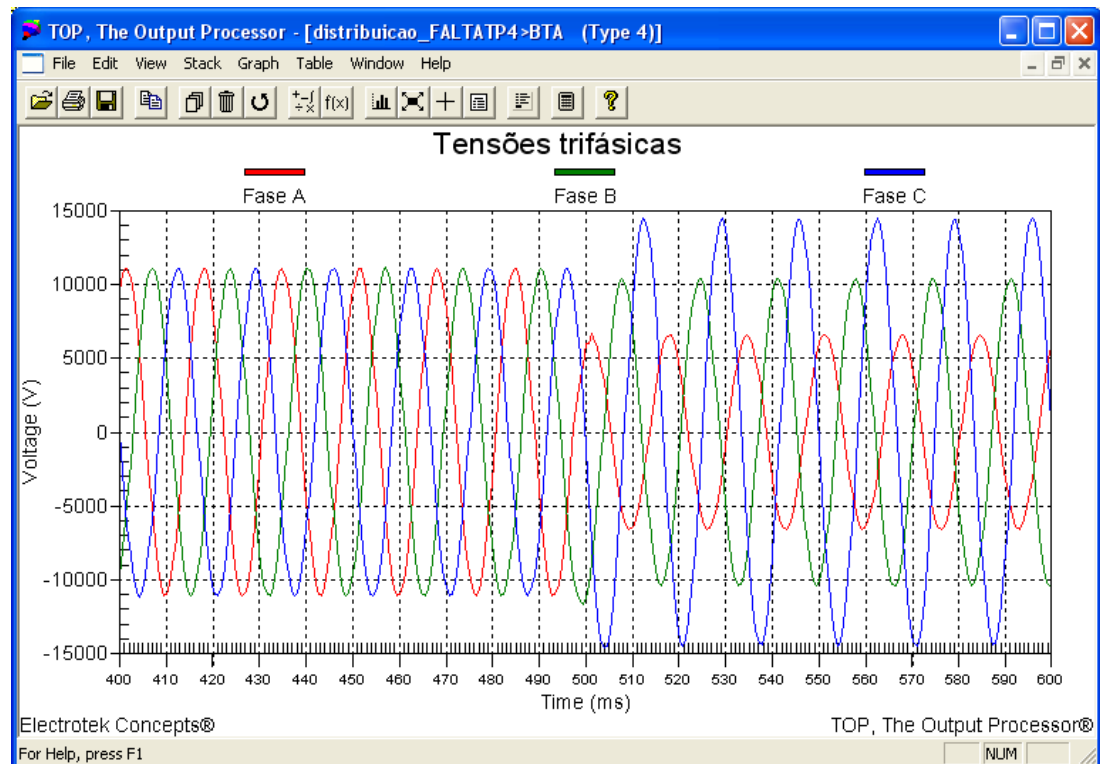


Figura 78 – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada no transformador particular 4 com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

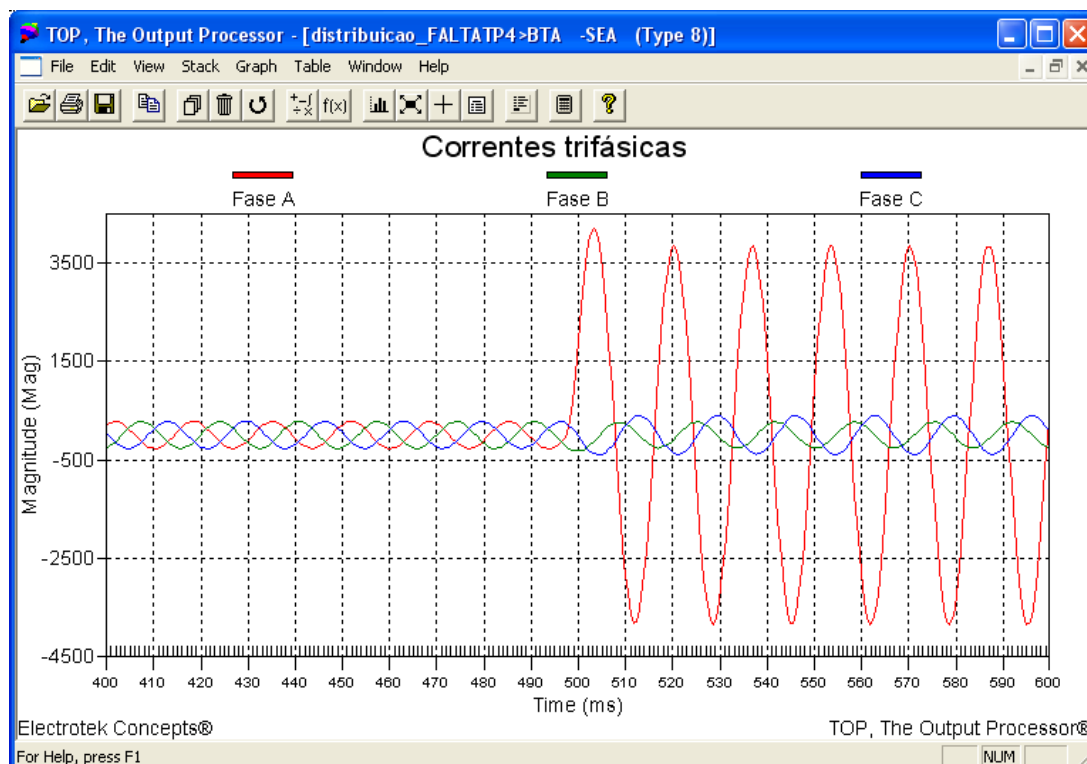


Figura 79 – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada no transformador particular 4 com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

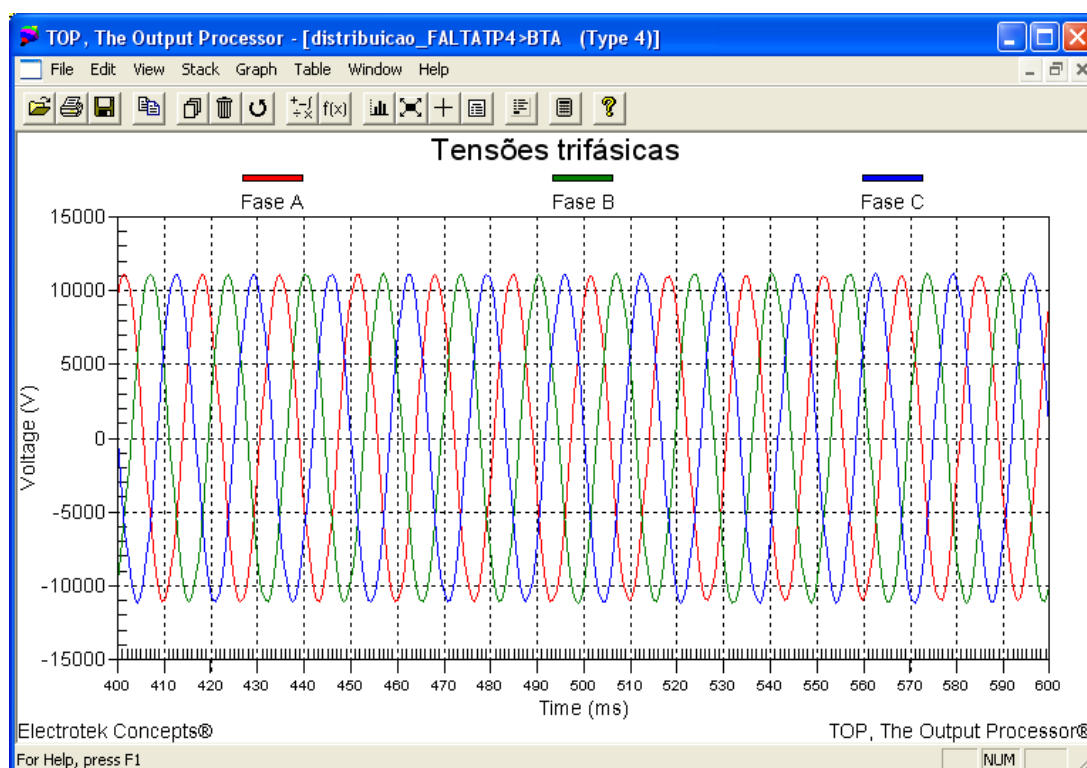


Figura 80 – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada no transformador particular 4 com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  e com uma resistência de falta de  $100 \Omega$ .

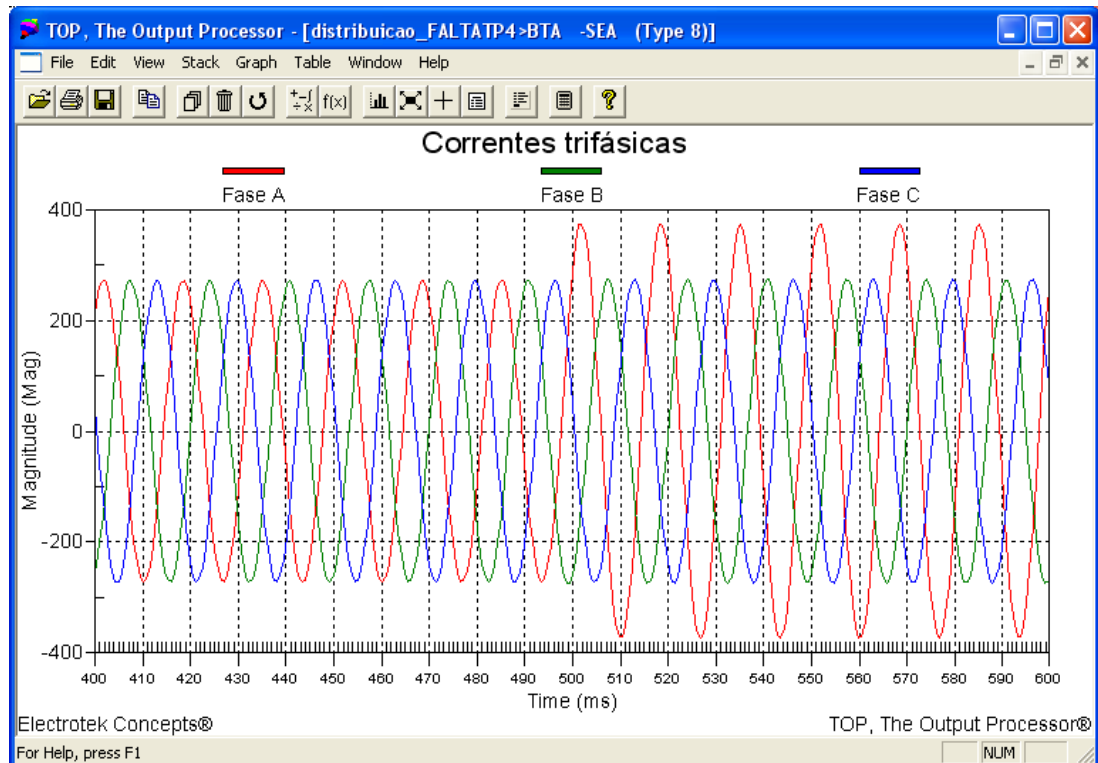


Figura 81 – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada no transformador particular 4 com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  e com uma resistência de falta de  $100 \Omega$ .

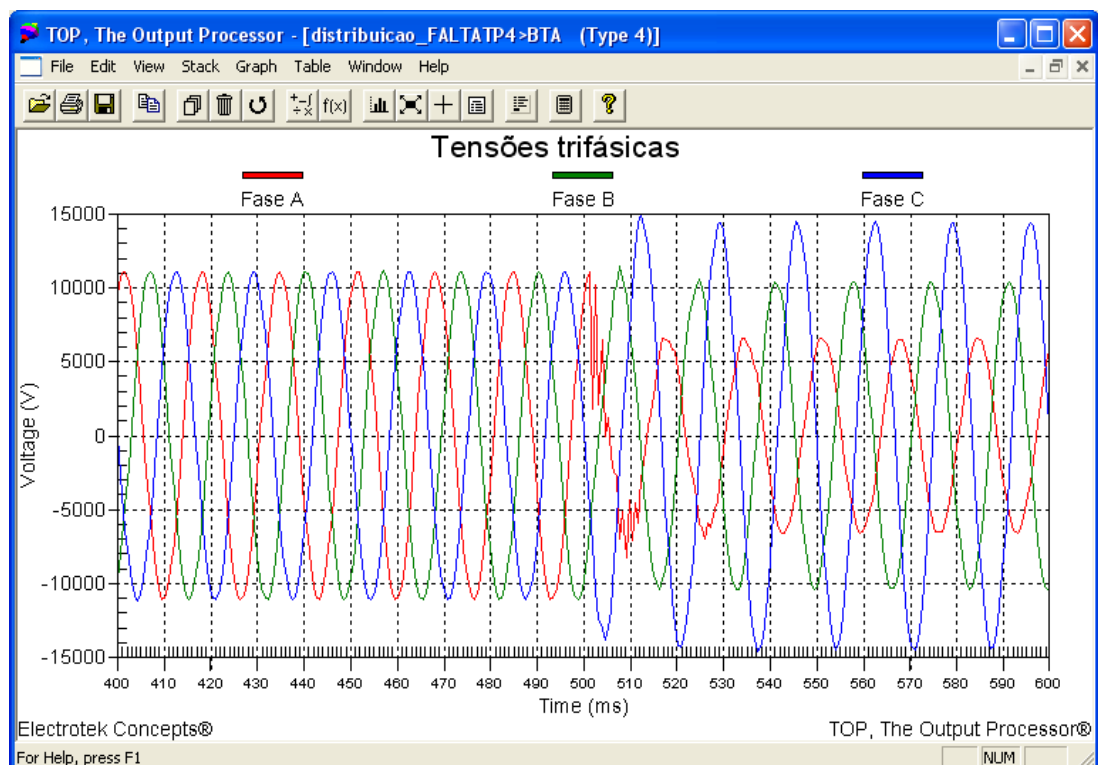


Figura 82 – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada no transformador particular 4 com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

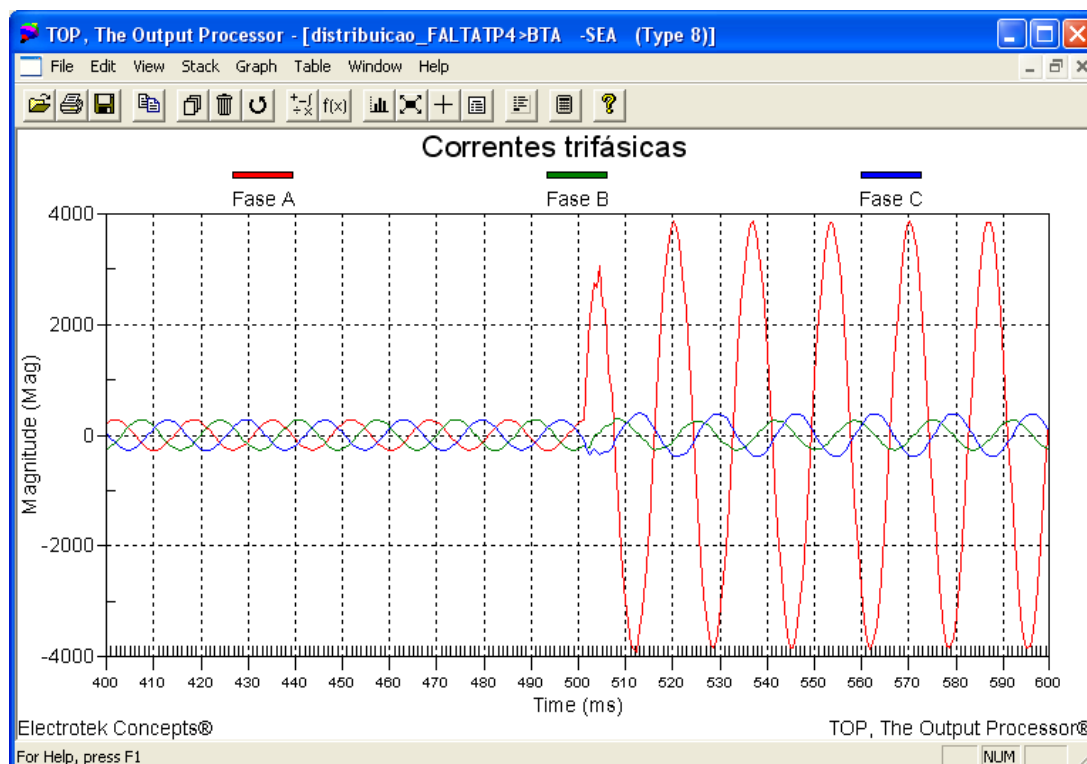


Figura 83 – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada no transformador particular 4 com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

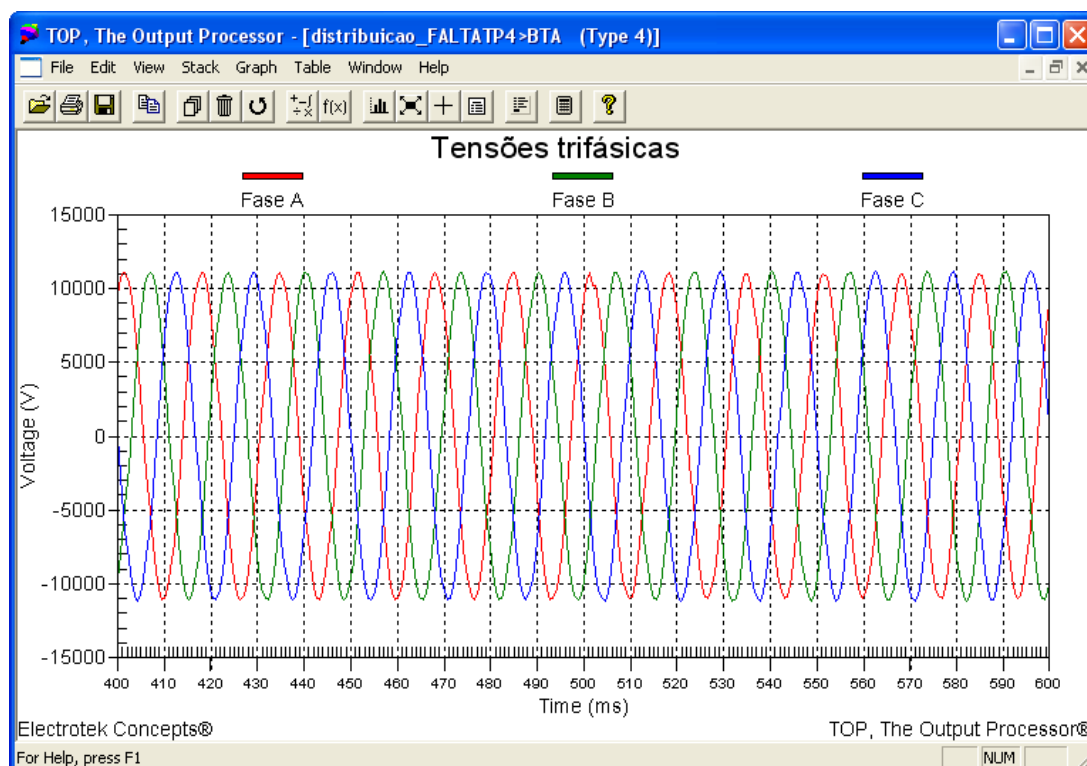


Figura 84 – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada no transformador particular 4 com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  e com uma resistência de falta de  $100 \Omega$ .

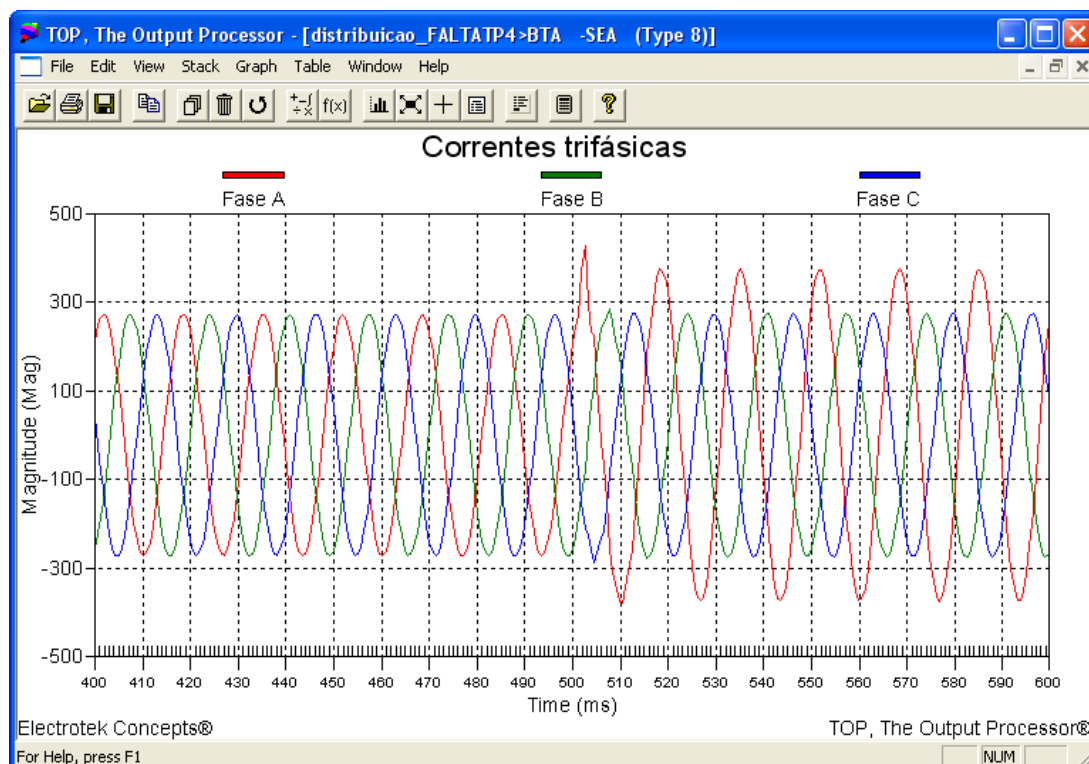


Figura 85 – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de defeito aplicada no transformador particular 4 com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  e com uma resistência de falta de  $100 \Omega$ .

### 3.2.2.2 – Variação do Tipo de Falta Aplicada

Como passo seguinte, escolheu-se um determinado ponto do sistema, no caso o banco de capacitores 3, para realizar a simulação de diferentes tipos de curto-circuitos.

No primeiro caso foi aplicada uma falta do tipo fase-fase, envolvendo as fases “A” e “B” do circuito, com uma resistência de falta de valor desprezível, variando-se o ângulo de incidência entre  $0$  e  $90^\circ$ . As formas de ondas obtidas na subestação são mostradas a seguir pelas Figuras de 86 a 89.

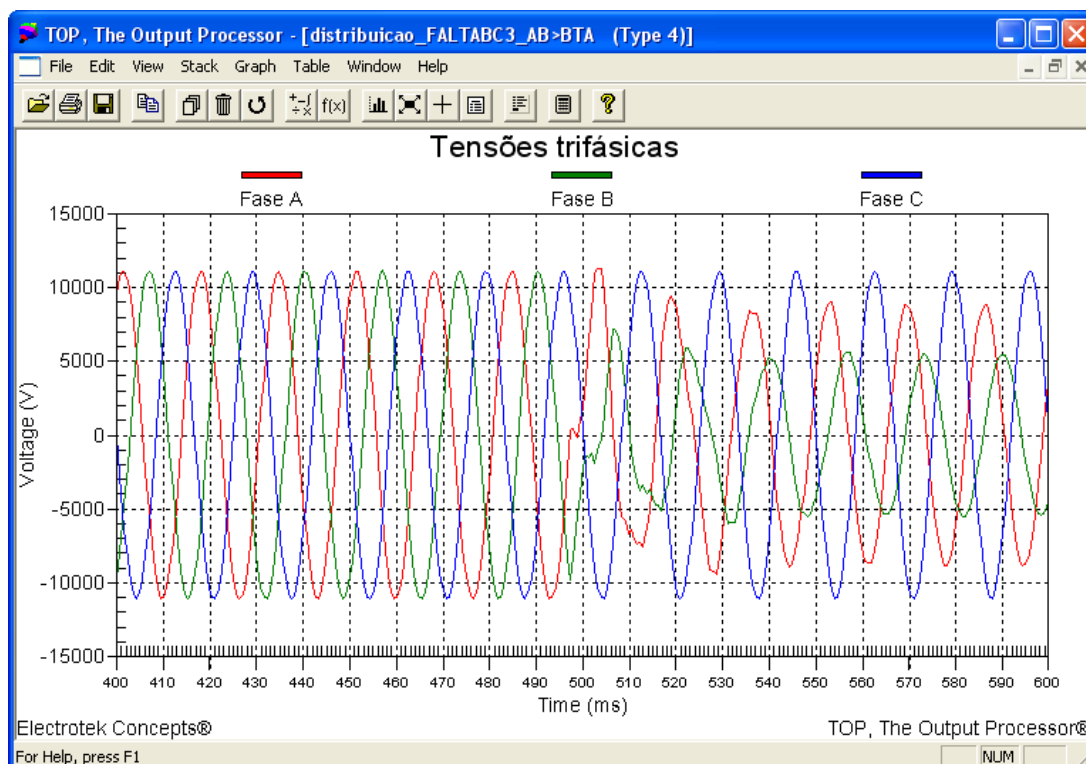


Figura 86 – Tensões trifásicas na entrada de BC3 resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

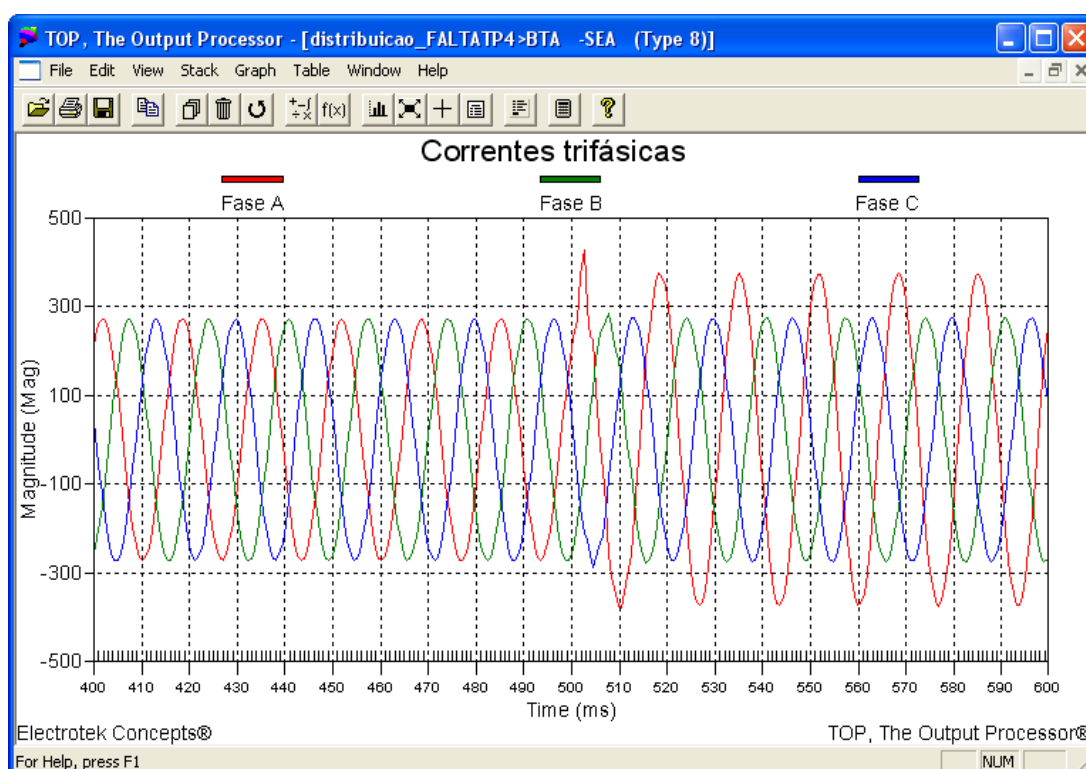


Figura 87 – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

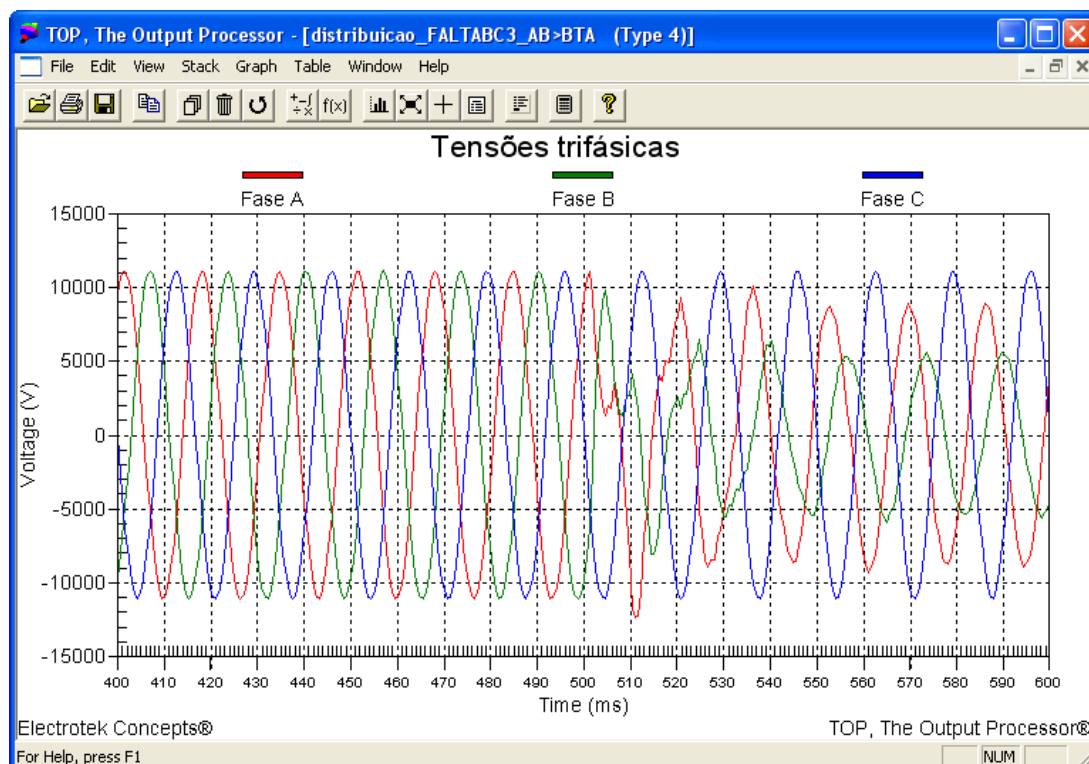


Figura 88 – Tensões trifásicas na entrada de BC3 resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

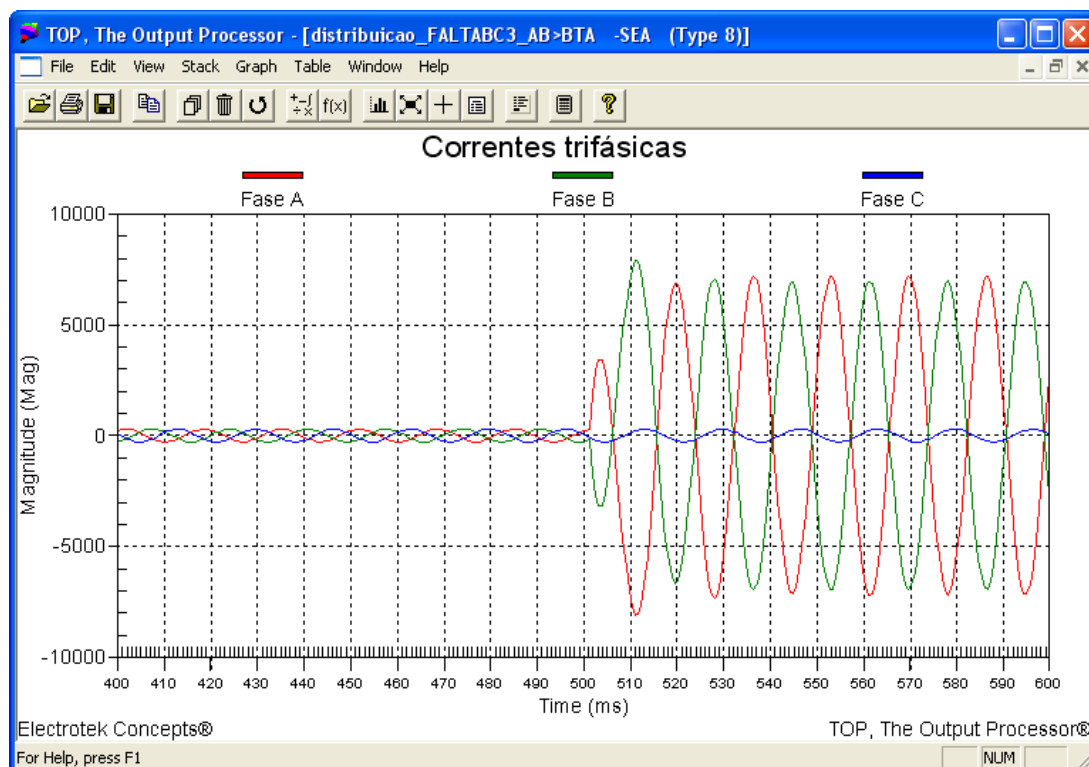


Figura 89 – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

Outro tipo de falta simulado foi entre fase-fase com envolvimento do terra, ou seja, entre as fases “A” e “B” e o terra. A resistência utilizada entre as fases foi de aproximadamente zero ohm e entre uma das fases e a terra de 50  $\Omega$ . Os ângulos de incidência escolhidos foram de 0 e 90°. As formas de onda das tensões e correntes trifásicas sentidas na subestação são apresentadas no seguimento deste documento pelas Figuras de 90 a 93.

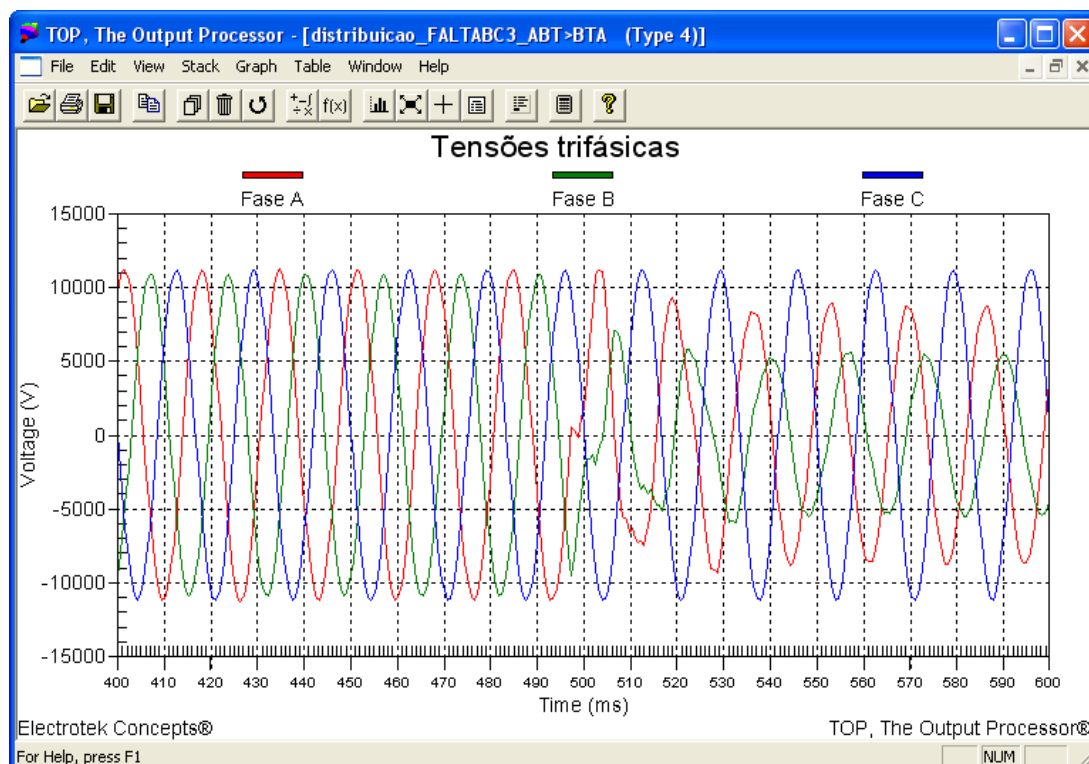


Figura 90 – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de 0° e com uma resistência de falta de 0,001  $\Omega$ .

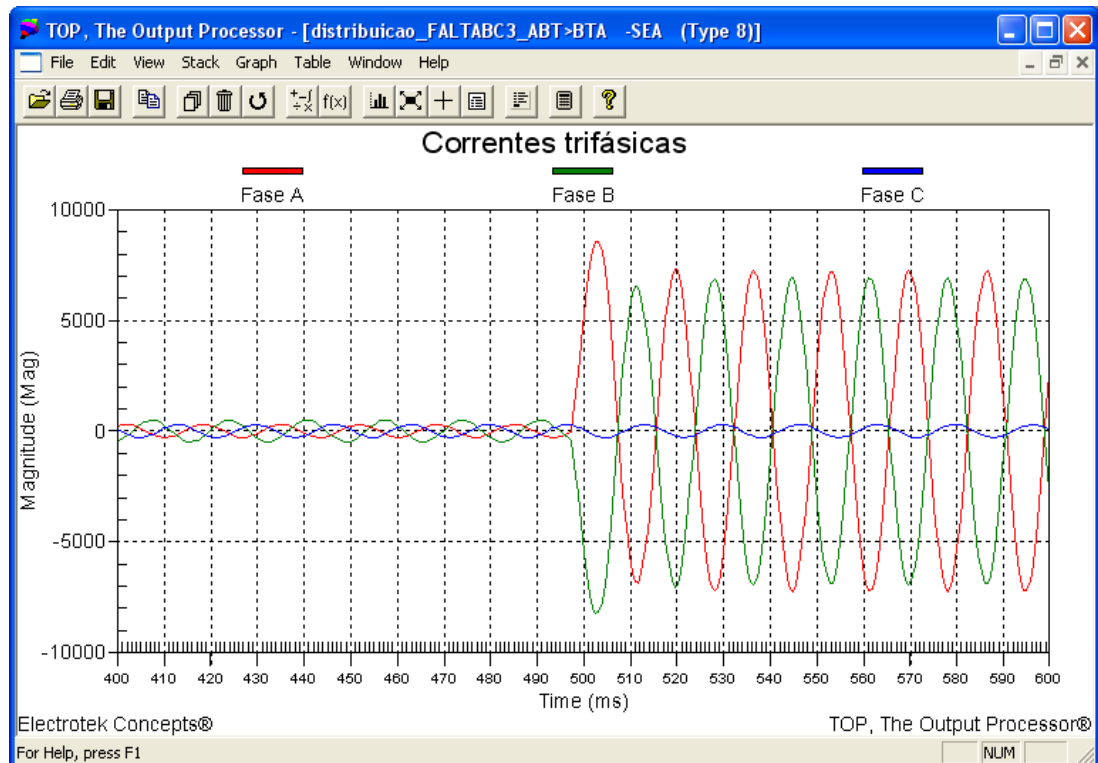


Figura 91 – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

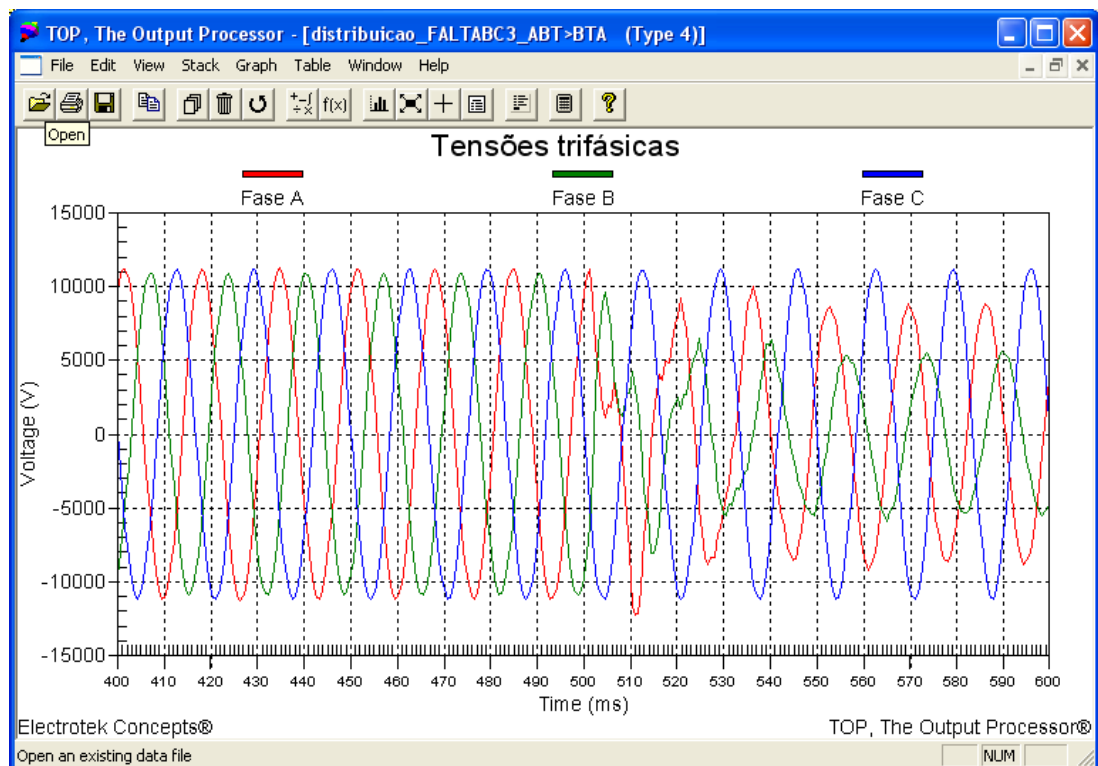


Figura 92 – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

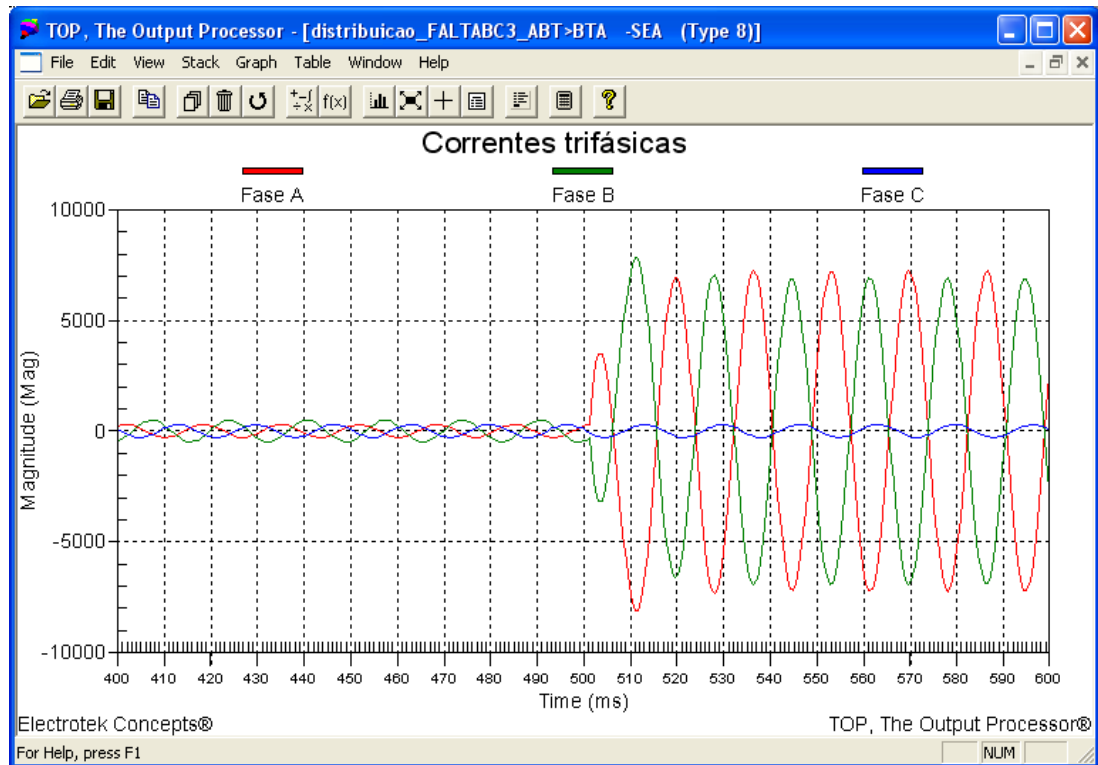


Figura 93 – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito aplicada com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

Por último, aplicou-se um curto-circuito trifásico (ABC), com resistências entre as fases praticamente nulas. Os ângulos de incidências como nos casos anteriores foram de  $0$  e  $90^\circ$ . As formas de onda da tensão e corrente obtidas na subestação são como as apresentadas nas Figuras 94 a 97.

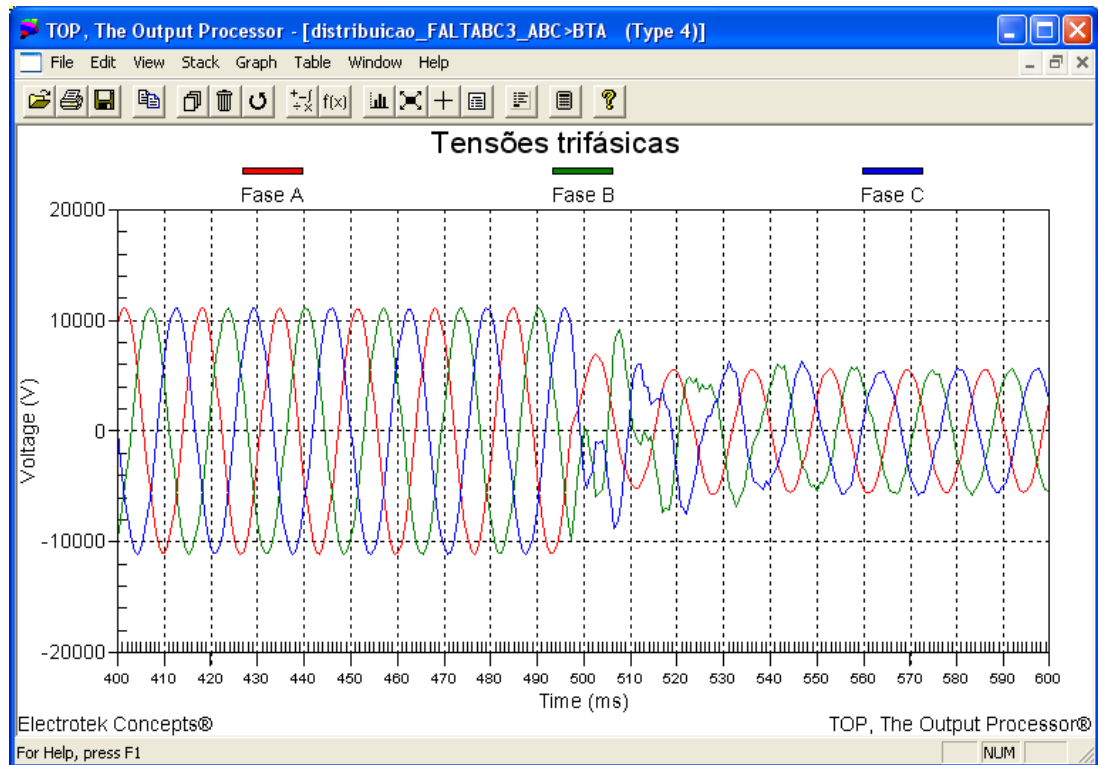


Figura 94 – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito trifásico com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

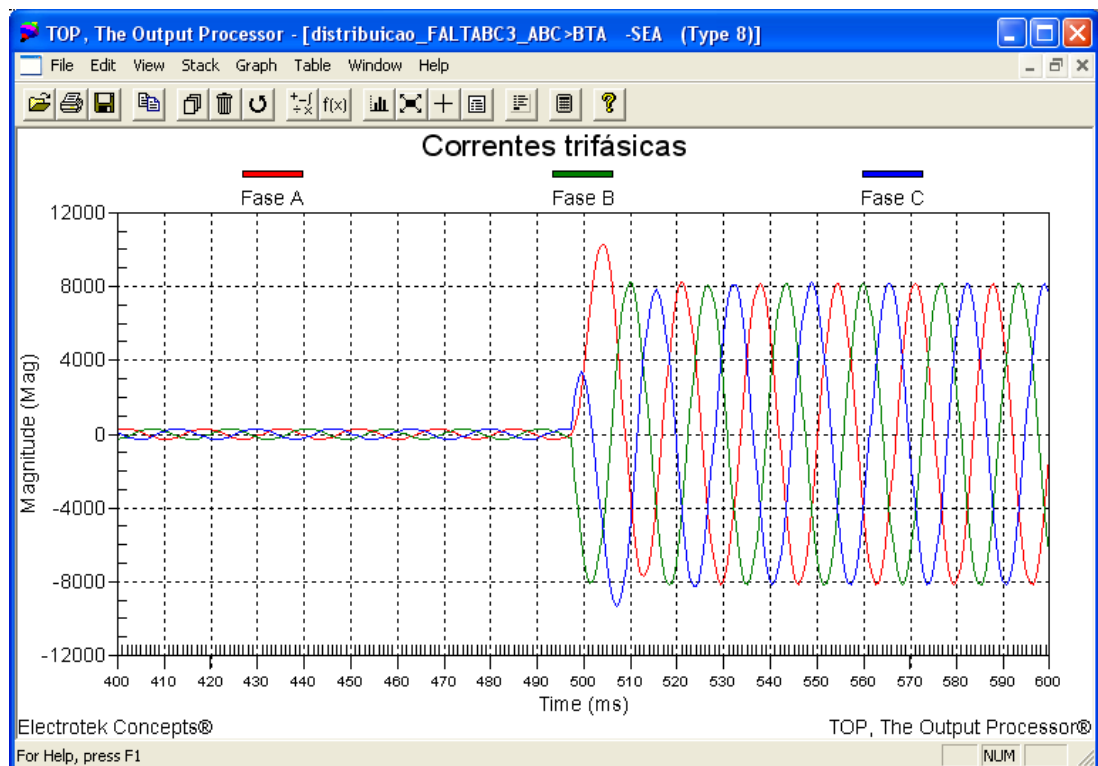


Figura 95 – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito trifásico aplicada com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

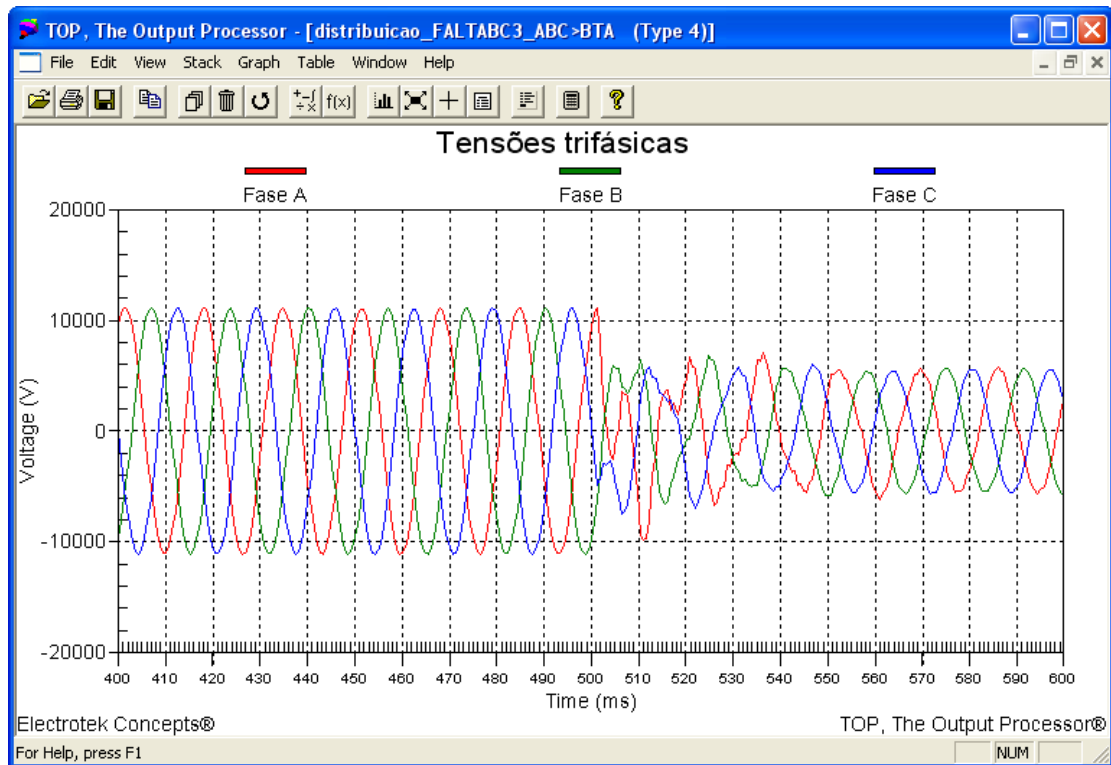


Figura 96 – Tensões trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito trifásico aplicada com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

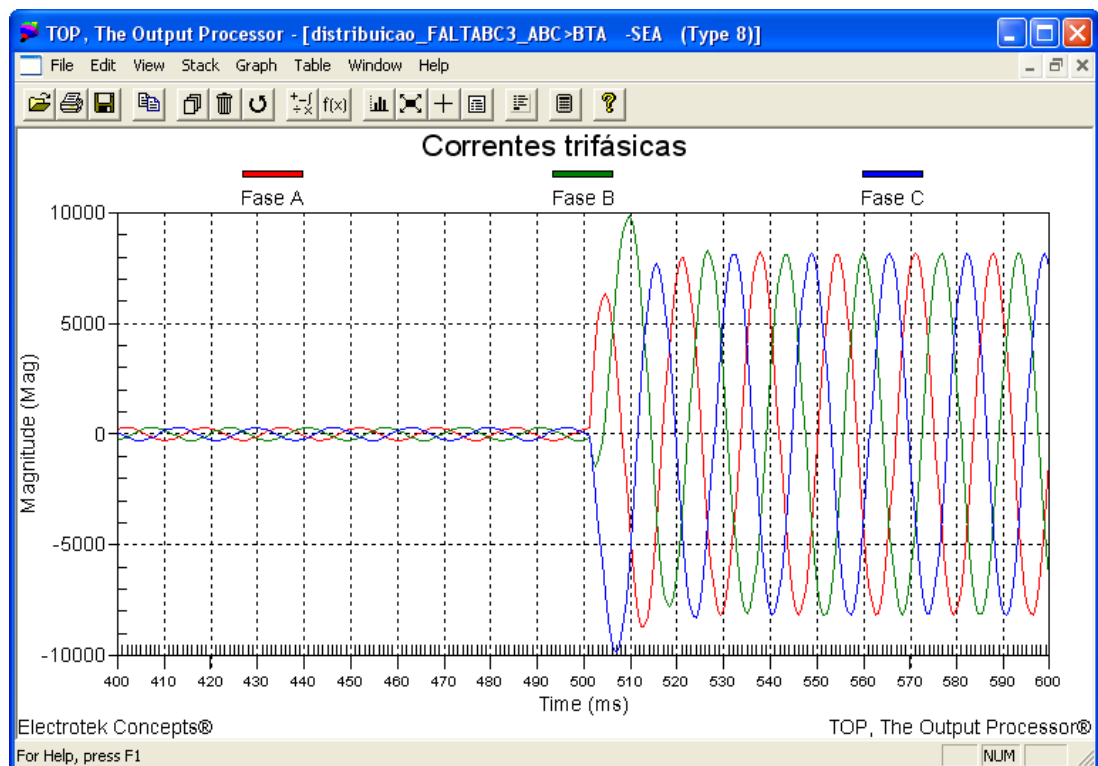


Figura 97 – Correntes trifásicas resultantes de uma situação de curto-circuito trifásico aplicada com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  e com uma resistência de falta de  $0,001 \Omega$ .

### 3.3 – Conclusões parciais sobre as simulações realizadas

Como as situações de defeitos sobre o sistema podem ser distintamente caracterizadas, fez-se necessário abordar cada caso individualmente. Ou seja, quanto ao tipo de falta (fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra e/ou trifásica), ao valor do ângulo de incidência, valor da resistência de falta e em relação à distância do ponto de medição da situação aplicada.

Pode ser observado nas formas de onda anteriormente apresentadas, que as fases que mais sofrem alteração em sua assinatura são aquelas envolvidas na falta. Assim, uma falta AB acarreta principalmente perturbações nas fases A e B do sistema. Contudo, respeitando-se as devidas proporções, isso nem sempre é verdade, visto que nas faltas fase-terra, todas as formas de onda sofrem algum tipo de alteração no seu comportamento.

Quando a falta é aplicada em uma das fases com um ângulo de incidência de  $90^\circ$  as formas de ondas da tensão e/ou corrente resultantes acabam sofrendo mais distorções do que quando o ângulo é de  $0^\circ$ . Isso se deve ao fato da situação transitória gerada, quando da acomodação das formas de ondas frente às situações apresentadas. É lógico observar que, por exemplo, mediante a uma situação de falta fase-terra com incidência a  $90^\circ$  e com baixa resistência de falta, a amplitude da fase envolvida passa de um valor de máximo a um valor próximo de zero, não sendo, contudo, de imediato esta passagem. Em função desta mudança abrupta da tensão e das características intrínsecas do sistema, tem-se então, o transitório mencionado.

Em relação ao valor da resistência de falta aplicada, quanto maior o valor da resistência menos o sistema vai sentir a falta. Isso pode ser muito bem observado pelos valores escolhidos no caso de  $0,001\ \Omega$  e  $100\ \Omega$ , em que a forma de onda não sofre alterações consideráveis quando é utilizado um valor muito alto de resistência.

Ao se aplicar uma falta muito longe do ponto de medição, pouco se sentirá essa falta. Dessa forma, a onda da tensão resultante é pouco atenuada e a corrente praticamente não tem seu módulo muito elevado.

É importante enfatizar que a escolha das situações de defeitos apresentadas, bem como as representações gráficas utilizadas, foram de extrema importância para a formação de um senso crítico com relação ao sistema em análise. Apesar destas situações caracterizadas já serem amplamente divulgadas e de conhecimento técnico/científico, enquanto aluno do curso de graduação, as mesmas foram elucidativas e didáticas para uma melhor compreensão do problema em análise.

## 4. VALIDAÇÃO DOS MODELOS DESENVOLVIDOS

### 4.1 – O modelo do relé digital de sobrecorrente monofásico

No que segue, para validar o modelo do relé digital de sobrecorrente apresentado, serão simulados e avaliados alguns casos testes. Por estes testes, tem-se o objetivo de registrar o tempo de atuação do modelo desenvolvido frente às diferentes situações simuladas comparando-o ao valor teórico esperado para as mesmas.

#### 4.1.1 – Caso-teste 1: Corrente de Curto-circuito Simétrica

Na Figura 98 está representado esquematicamente um circuito monofásico puramente resistivo, modelado dispondo da biblioteca *SimPowerSystems* do *Simulink* [17]. O circuito é alimentado por uma fonte de tensão alternada com frequência de 60 Hz. Para estabelecer a situação de curto-circuito, uma impedância série foi conectada ao terra através de um disjuntor. Os parâmetros do circuito foram cuidadosamente escolhidos para que haja uma corrente de curto-circuito simétrica, sem componente aperiódica, com o intuito de fazer o relé operar, e desta forma, medir o seu tempo de atuação. Espera-se assim, encontrar valores bem próximos aos calculados pela equação (5).

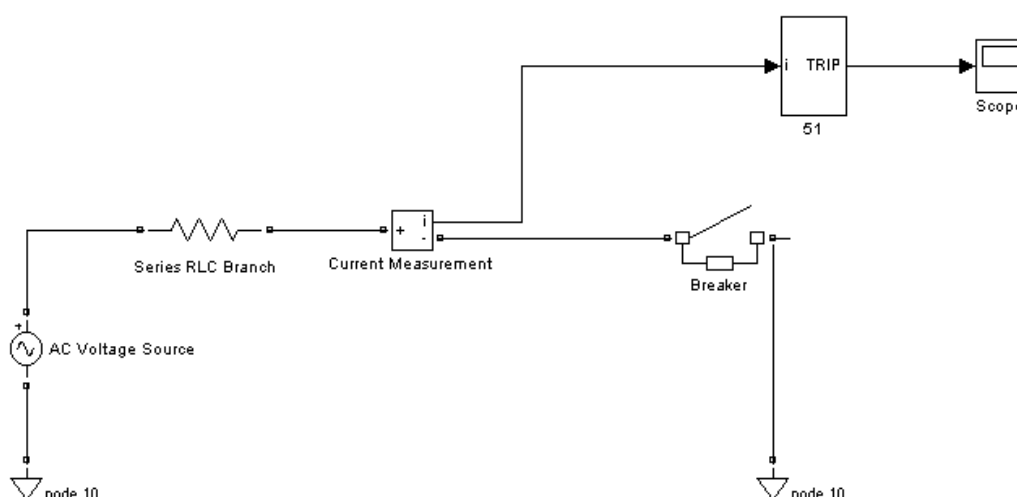


Figura 98 – Representação esquemática de um circuito puramente resistivo com um relé de sobrecorrente temporizado alocado.

Os parâmetros do circuito da Figura 98 e do relé de sobrecorrente são os seguintes:

- $v(t) = \frac{13800}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \sin(377t) \text{ V};$
- $R_{\text{Branch}} = 5\Omega;$
- $R_{\text{Breaker}} = 0,01\Omega;$
- $I_p = 5\text{ A}$
- Curva IEC Normal Inversa;
- Dial de tempo = 0,10.

Com os parâmetros do circuito e os ajustes do relé definidos, o disjuntor foi fechado em  $t = 0 \text{ s}$  a fim de estabelecer uma corrente de curto-circuito simétrica, sem componente aperiódica. A Figura 99 mostra o gráfico  $I_p \text{ (A)}$ , que representa a corrente primária do circuito com valor de pico de 2.249 A.

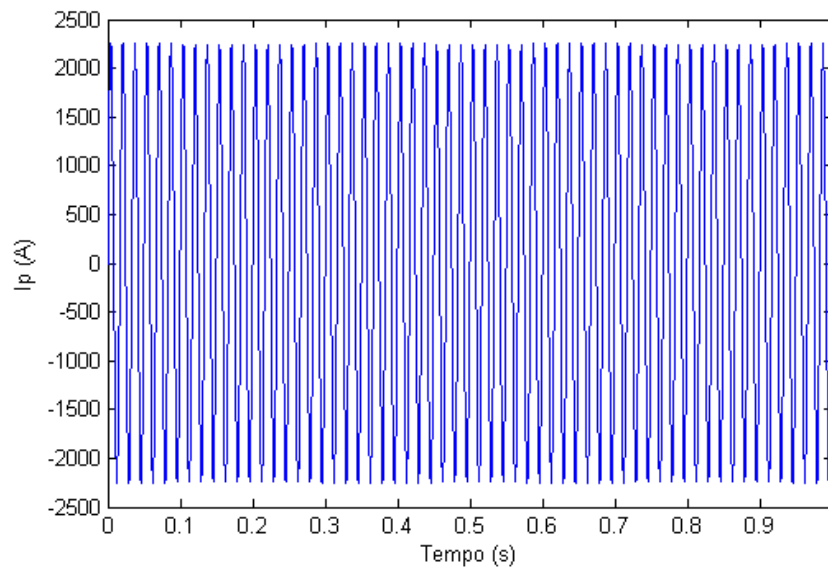


Figura 99 – Forma de onda da corrente primária.

Essa corrente primária é, então, reduzida ao valor secundário, compatível com a corrente de valor nominal do relé pelo bloco *RTC*. A forma de onda amostrada, com um valor de pico de 15,9 A, está ilustrada na Figura 100.

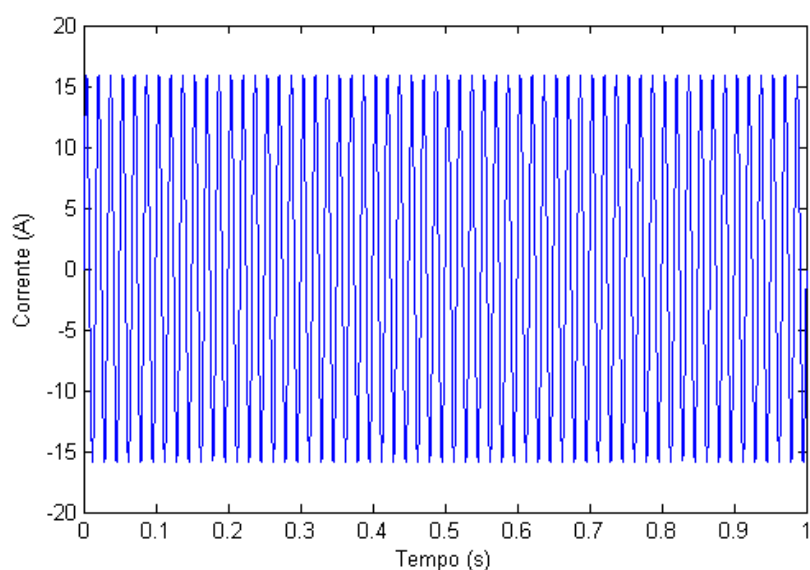


Figura 100 – Forma de onda da corrente secundária.

Após a corrente ser escalonada a um valor eficaz, esta passa pelo filtro *Butterworth* que rejeita as altas frequências espúrias e limita o espectro de frequências do sinal de corrente. Como este caso trata apenas de um circuito puramente resistivo, a forma de onda anterior não sofrerá alterações e será como a mostrada na Figura 101, com um valor de pico de 15,9 A.

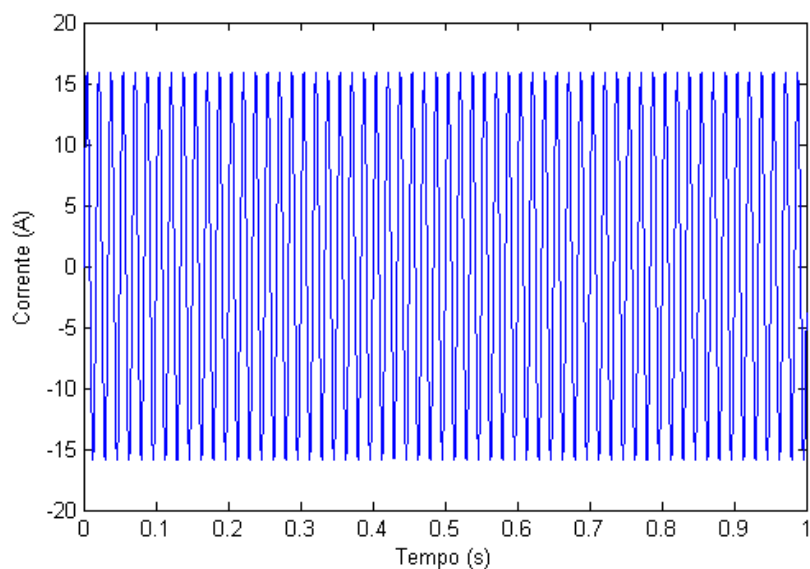


Figura 101 – Forma de onda da corrente na saída do filtro de *Butterworth*.

Ao passar pelo bloco *Discrete Fourier* a forma de onda é amostrada em torno da sua frequência fundamental. Dessa maneira, obtém-se a magnitude e a fase do fasor da componente fundamental da corrente. A Figura 102 mostra a magnitude do fasor da componente de frequência fundamental da corrente com um valor de pico de 15,9 A. Cabe notar que o valor inicial apresentado

para a tensão é zero devido ao filtro discreto de *Fourier* consumir um ciclo completo (1/60s) para estimar o fasor inicialmente associado a este período.

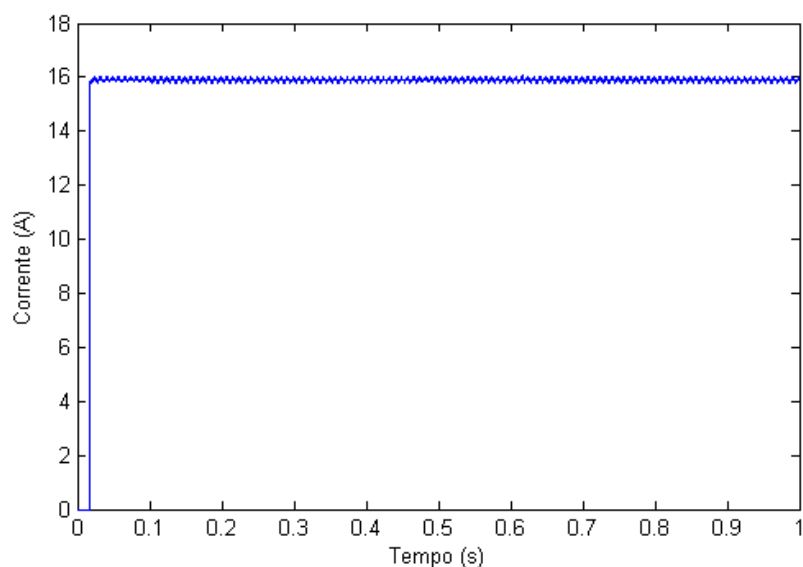


Figura 102 – Forma de onda da magnitude da componente fundamental do fasor de corrente.

Depois da comparação feita entre a magnitude do fasor e a corrente de operação do relé, é calculado o valor do múltiplo da corrente  $M(t)$ . Como pode ser observada na Figura 103, a magnitude do fasor é aproximadamente 3,15 vezes maior que a corrente de *pickup* do relé.

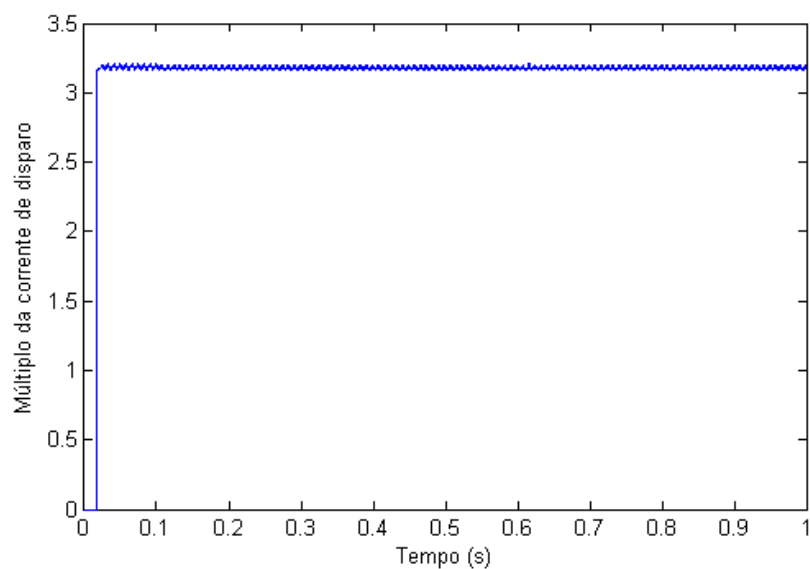


Figura 103 – Múltiplo da corrente de operação.

Neste caso, o múltiplo da corrente de operação não sofre alteração em função do bloco *Saturation1*, pois não apresenta valor maior do que 30. Assim calcula-se o valor do integrando da equação (5) no bloco *Fcn1*. Nota-se que o valor inicial é -71,4, mas após um ciclo completo esse valor passa a 1,66 como é exibido na Figura 104.

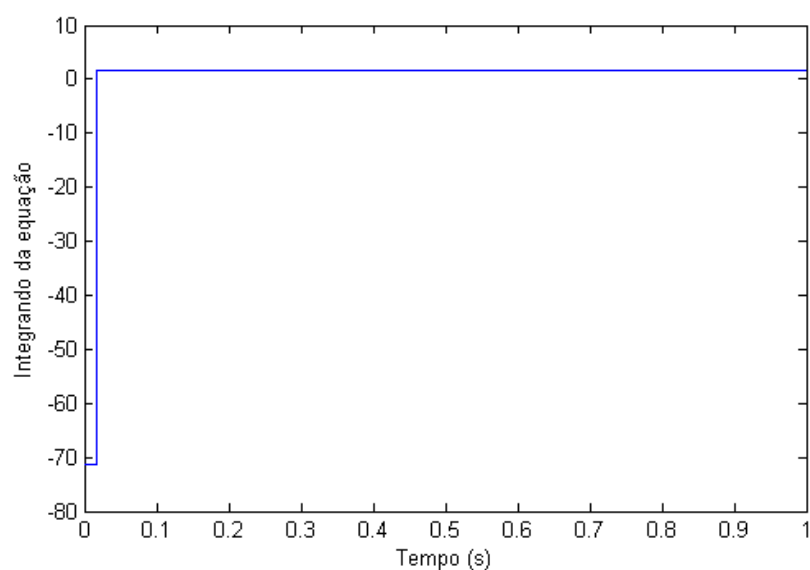


Figura 104 – Cálculo do valor do integrando pelo bloco *Fcn1*.

Essa forma de onda é então integrada com o objetivo de ser comparada ao valor 1 para se saber quando terá início a operação do relé de sobrecorrente. Nota-se pela Figura 105 que a saída do bloco *Integrator* passa a ter um valor maior que 1 a partir de 0,615 s.

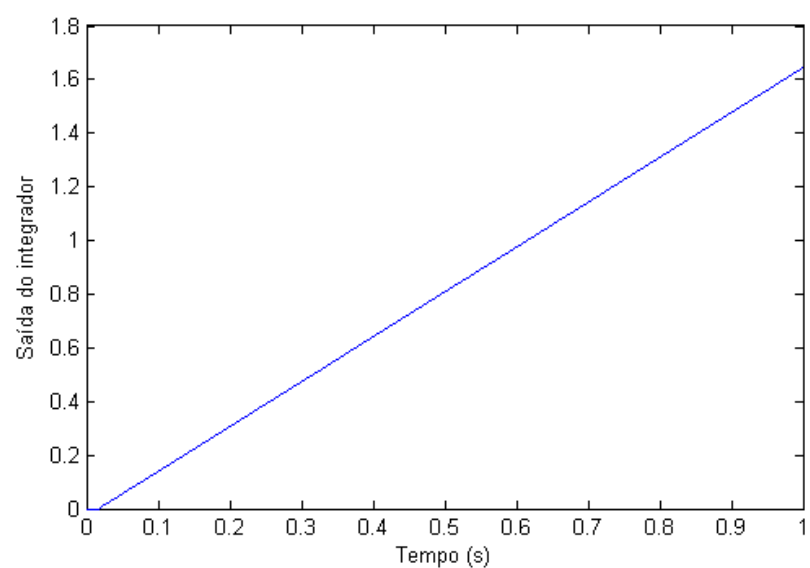


Figura 105 – Forma de onda na saída do bloco *Integrator*.

Com isso a saída do *Relational Operator1* passa a ser 1 a partir do instante em que a comparação seja verdadeira, ou seja, quando o valor de saída do bloco *Integrator* for maior do que 1, como mostra a Figura 106.

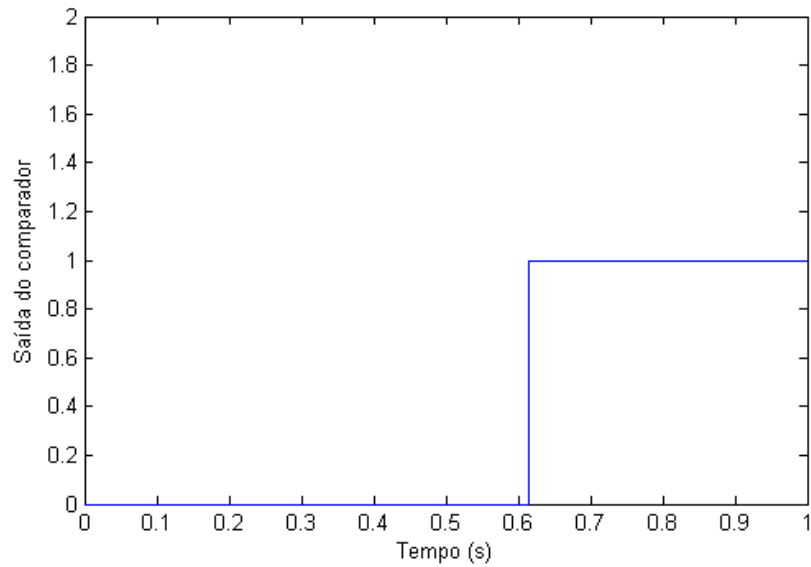


Figura 106 – Saída do bloco *Relational Operator1*.

Finalmente, cabe apontar que o bloco *Relay* manterá a saída *TRIP* em nível lógico alto até a saída do bloco *Relational Operator1* decair abaixo do parâmetro *Switch off point* do bloco *Relay*. Portanto a forma de onda acaba sendo a mesma da saída do bloco anterior como mostra a Figura 107.

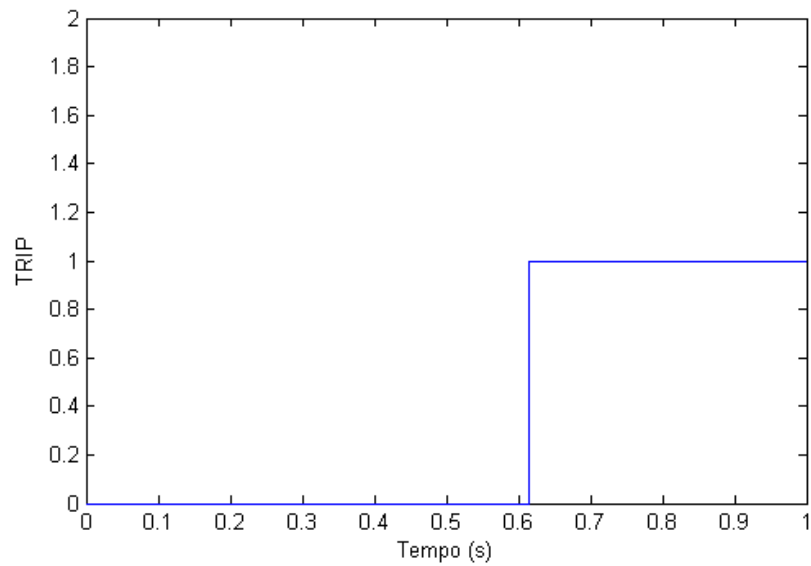


Figura 107 – Forma de onda da saída *TRIP*.

Utilizando a equação (5), calcula-se que o tempo de atuação do relé foi de 0,598 s. Contudo, observando a forma de onda da saída de *TRIP* da Figura 107, tem-se que o tempo de atuação do relé foi de 0,615. Desta maneira, verifica-se que a diferença entre os tempos de atuação, do calculado e do simulado, é de 16,9 ms. O qual é aproximadamente o período de um ciclo completo da forma de onda de 60 Hz (16,6 ms), gasto pelo filtro discreto de *Fourier* para inicialmente estimar o fasor da corrente. Portanto, a precisão do modelo implementado neste caso-teste, pode ser considerada satisfatória.

#### 4.1.2 – Caso-teste 2: Corrente de Curto-circuito Assimétrica

Com o intuito de se obter uma corrente de curto-circuito assimétrica, o circuito da Figura 98 foi modificado com a inclusão de um indutor em série a resistência considerada. Os parâmetros de entrada para a máscara do relé (RTC, *Pickup*, Curva e Dial de tempo) foram mantidos os mesmos para ser realizada a comparação entre os modelos. Foram apenas alterados os parâmetros do circuito como mostra a Figura 108.

- $v(t) = \frac{13800}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \sin(377t) V;$
- $R_{Branch} = 0,1 \Omega;$
- $L_{Branch} = 13,26 mH;$
- $R_{Breaker} = 0,01 \Omega$

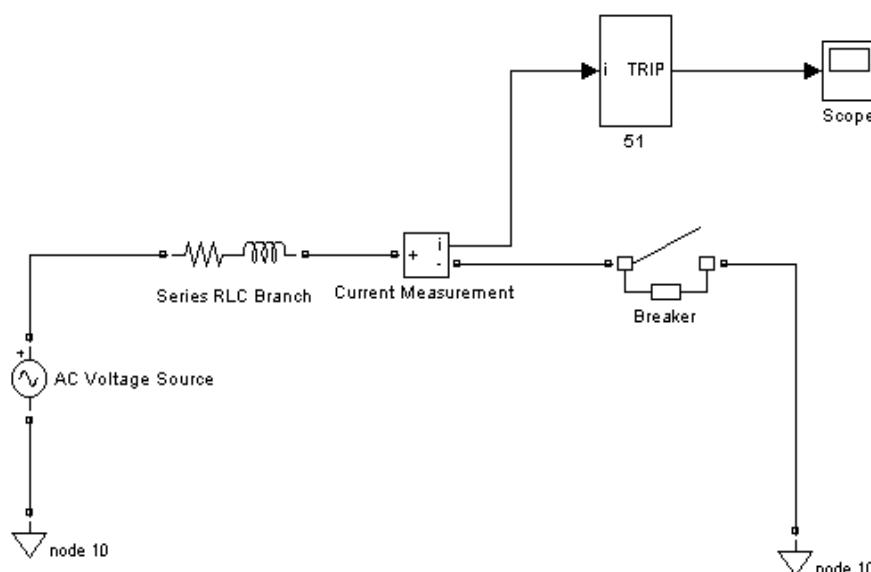


Figura 108 – Representação esquemática de um circuito com indutor no ramo série com o relé de sobrecorrente temporizado alocado.

Para ser válida a comparação, os valores da resistência e indutância equivalentes foram escolhidos de modo que possam resultar em uma impedância equivalente de módulo igual a  $5 \Omega$ , como ao caso anterior, em que se tinha uma impedância puramente resistiva.

Com os parâmetros do circuito e os ajustes do relé definidos, o disjuntor foi fechado em  $t = 0$  s a fim de estabelecer uma corrente de curto-circuito. Neste caso, esta será simétrica, mas com

componente aperiódica. Observa-se que o circuito agora passa a ter uma constante de tempo de 120 ms.

Na Figura 109 está representada a corrente primária do circuito que quando em regime permanente tem um valor de pico de 2.249 A, sendo, portanto, igual ao valor de pico da corrente primária da carga puramente resistiva. Sendo assim espera-se que a resposta do relé para uma corrente assimétrica seja idêntica para uma corrente simétrica, resultando no mesmo tempo de atuação em ambos os casos.

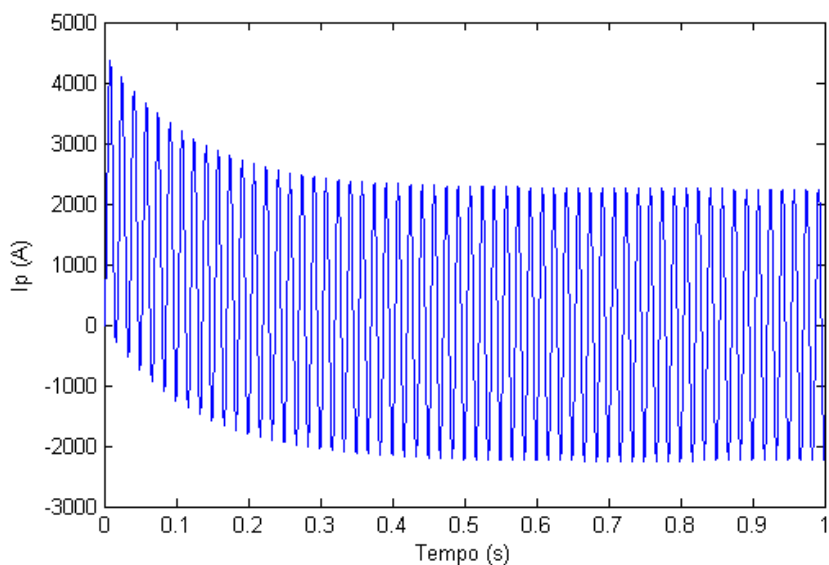


Figura 109 – Forma de onda da corrente primária.

Como no caso anterior, essa corrente primária é, então, reduzida ao valor secundário, compatível com a corrente de valor nominal do relé pelo bloco *RTC* e em seguida passa pelo filtro *anti-aliasing*. A forma de onda amostrada após o período transitório apresenta pico de 15,9 A, que é o mesmo valor para a carga puramente resistiva e está ilustrada na Figura 110.

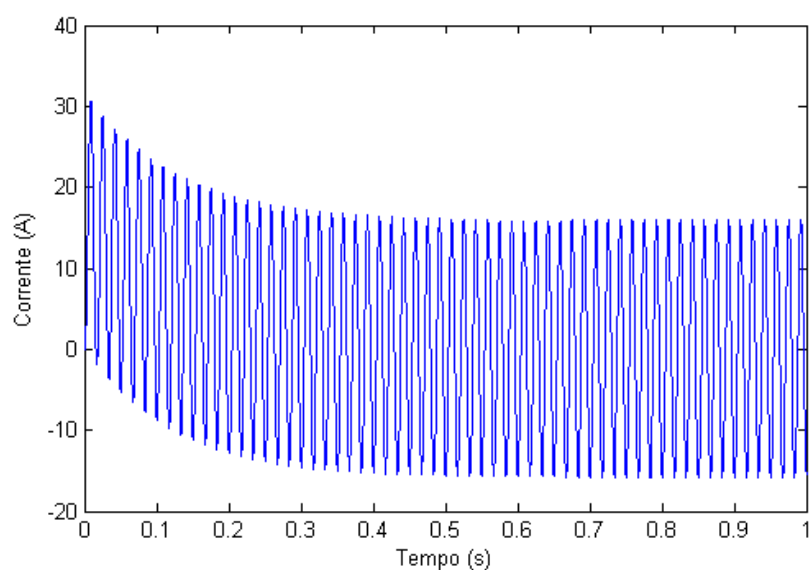


Figura 110 – Forma de onda da corrente na saída do filtro de *Butterworth*.

Agora ao passar pelo bloco *Discrete Fourier* obtém-se a magnitude e a fase do fasor da componente fundamental da corrente. A Figura 111 mostra a magnitude do fasor da componente de frequência fundamental da corrente em torno de 15,9 A, ou seja, a mesma magnitude da corrente simétrica. Nesse caso, fica evidente a ação do filtro em rejeitar a componente de corrente contínua.

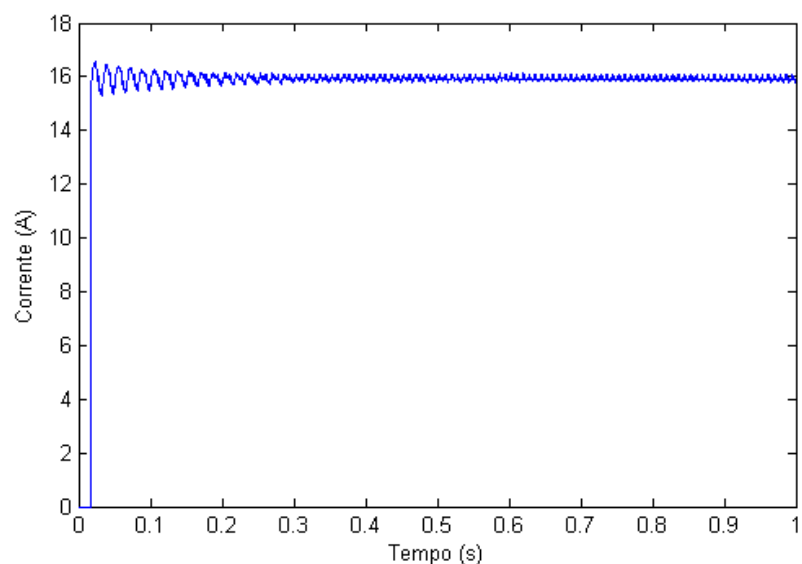


Figura 111 – Forma de onda da magnitude da componente fundamental do fasor de corrente.

É interessante observar as ondulações iniciais na representação da magnitude que estão relacionadas à resposta transitória do algoritmo discreto de *Fourier*, quando a forma de onda amostrada possui uma componente de corrente contínua. No entanto, esse transitório é rapidamente amortecido e acaba não influenciando na integração do múltiplo da corrente de operação como pode

ser visto na Figura 112. Vale acrescentar que como no caso da carga puramente resistiva, a saída do integrador passa a ter valor maior a partir de 0,615 s.

Projetistas de filtros digitais têm desenvolvido algoritmos que reduzem ou eliminam completamente as oscilações transitórias dos filtros baseados no algoritmo de *Fourier* de um ciclo. A utilização do filtro digital tipo co-seno, associado a um filtro digital mímico, praticamente elimina as oscilações transitórias [19]. Todavia, o filtro discreto de *Fourier* da biblioteca de medidas discretas do *SimPowerSystems* tem conduzido a resultados satisfatórios.

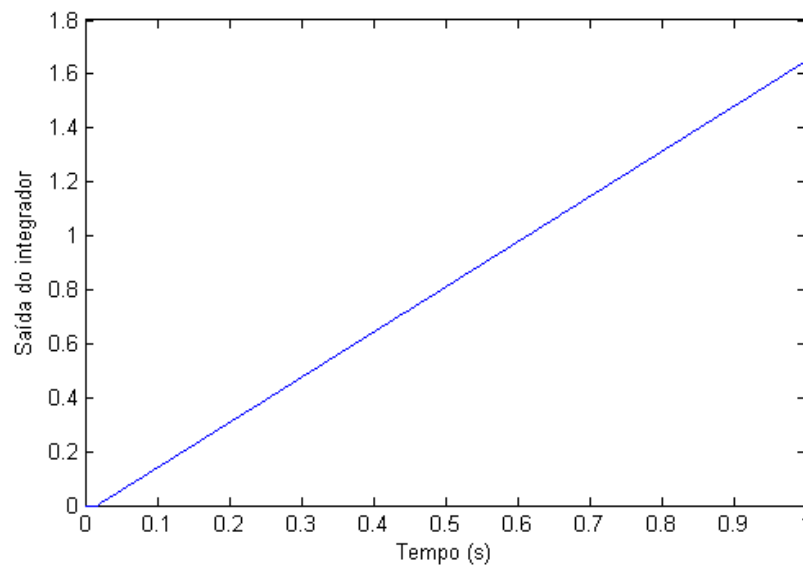


Figura 112 – Forma de onda na saída do bloco *Integrator*.

Portanto, como é a saída do integrador que será comparada ao valor 1, que em seguida servirá como entrada para o bloco *Relay*, a saída deste bloco deve ser a mesma nos dois casos. A representação da saída do bloco de *TRIP* é mostrada na Figura 113 como sendo igual ao tempo de atuação 0,615 s medido com corrente simétrica. Dessa forma, o relé manteve a mesma resposta, comprovando assim o desempenho do modelo de relé de sobrecorrente temporizado desenvolvido.

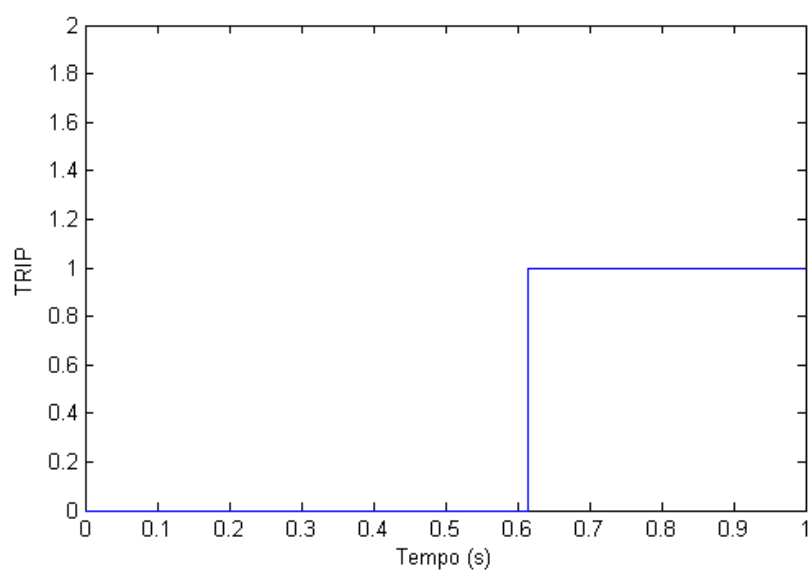


Figura 113 – Forma de onda da saída *TRIP*.

### 4.1.3 – Caso-teste 3: Corrente de Curto-circuito com Saturação do Transformador de Corrente

No caso-teste 2 foi analisada a resposta do relé digital de sobrecorrente temporizado frente a uma corrente de curto-circuito assimétrica. Observando os resultados, notou-se que o filtro discreto de *Fourier* responde transitoriamente no instante de aplicação da falta, por causa da componente de corrente contínua, necessitando de um ciclo para convergência no valor eficaz do fasor de corrente. Porém, para uma análise mais realista, deve-se verificar a resposta do relé diante de uma saturação do transformador de corrente. Com tal objetivo, o circuito da Figura 114 foi utilizado.

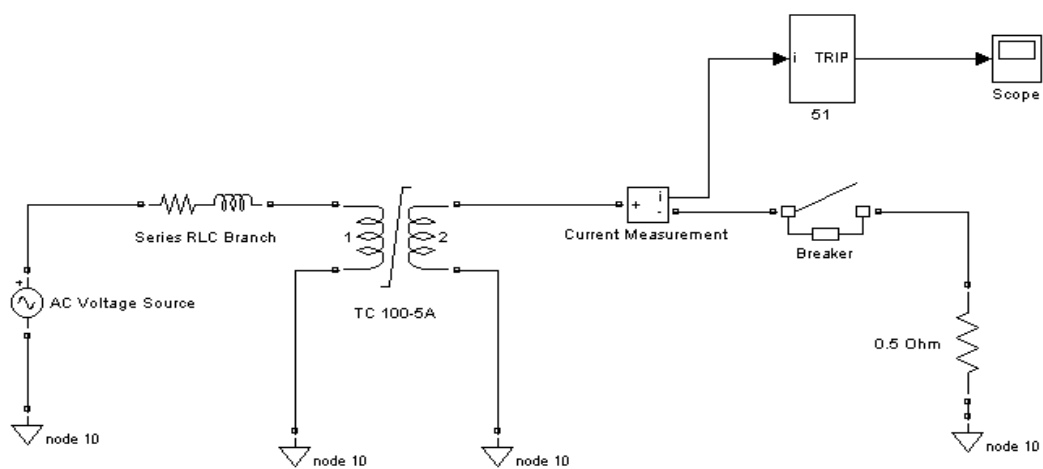


Figura 114 – Representação esquemática do relé de sobrecorrente temporizado ligado a um transformador de corrente.

Este circuito empregado apresenta os mesmos parâmetros ajustados anteriormente para o circuito do caso-teste 2. Contudo, para este caso em específico, foi introduzido um transformador de corrente (TC) de relação igual a 100-5 A junto com um resistor de  $0,5\ \Omega$  ligado ao secundário, que representa a carga nominal do TC.

Pela Figura 115, ilustram-se os ajustes do relé de sobrecorrente em sua respectiva máscara.

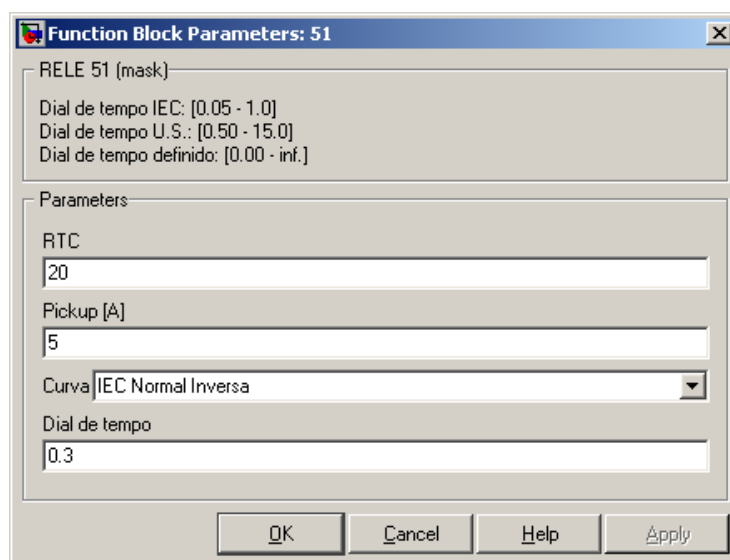


Figura 115 – Máscara de ajustes do relé digital de sobrecorrente temporizado.

É interessante observar os parâmetros utilizados para o transformador de corrente para que este entrasse na região de saturação, pois o transformador apresenta-se na iminência de saturação com seu carregamento nominal. Estes valores estão representados na Figura 116.

**Block Parameters: TC 100-5A**

Saturable Transformer (mask) (link)

Implements a three windings saturable transformer.

Click the Apply or the OK button after a change to the Units popup to confirm the conversion of parameters.

Configuration Parameters Advanced

Units: pu

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)]:  
[250e6 60]

Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(pu) L1(pu)]:  
[13800\*sqrt(2)/sqrt(3) 0 0]

Winding 2 parameters [V2(Vrms) R2(pu) L2(pu)]:  
[13800\*sqrt(2)/sqrt(3) 0 0]

Winding 3 parameters [V3(Vrms) R3(pu) L3(pu)]:  
[181.87e3 0.002 0.08]

Saturation characteristic [i1 phi1; i2 phi2; ...] (pu):  
[0.0; 0.0024, 0.038; 1.0, 1]

Core loss resistance and initial flux [Rm phi0] or [Rm] (pu):  
[500]

OK Cancel Help Apply

Figura 116 – Parâmetros do TC na região de saturação.

Sendo assim, seguiu-se com o mesmo procedimento dos casos-testes anteriores para a obtenção das formas de onda da corrente em certos pontos de interesse para a compreensão do funcionamento do relé de sobrecorrente temporizado.

A Figura 117 mostra a forma de onda da corrente no primário do transformador de corrente. Nota-se uma corrente de curto-circuito assimétrica devido ao indutor em série com a resistência deste lado do TC.

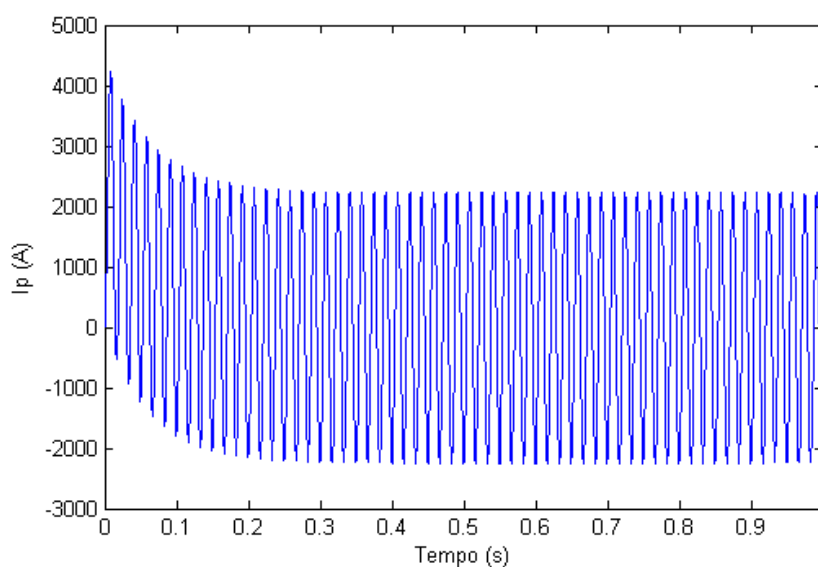


Figura 117 – Forma de onda da corrente primária.

Já na Figura 118, observa-se o comportamento da forma de onda no secundário do transformador de corrente, medida na saída do filtro *anti-aliasing*.

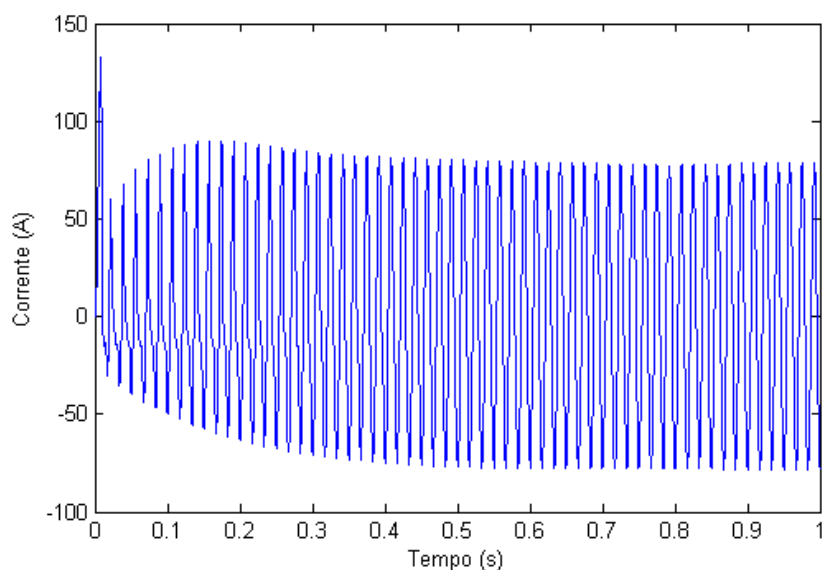


Figura 118 – Forma de onda da corrente na saída do filtro de *Butterworth*.

Ao realizar uma comparação visual entre as Figuras 117 e 118, nota-se que o transformador de corrente responde linearmente apenas no primeiro  $\frac{1}{4}$  de ciclo, antes de sofrer a saturação. Após esse momento, a saturação do TC faz com que a tensão no secundário não seja suficiente para fornecer a corrente exigida pela carga.

Ainda na Figura 118, observa-se que nos primeiros ciclos a corrente no secundário é atenuada, e só depois atinge seu valor de regime permanente ao fim da saturação. Isso se deve ao fato de que a corrente no enrolamento secundário é formada por todas as componentes harmônicas, pares e ímpares, múltiplas inteiras da componente de frequência fundamental, além da componente de corrente contínua. Vale lembrar que ao passar pelo filtro *anti-aliasing*, todas as componentes de frequência acima da 6ª harmônica são atenuadas.

Na Figura 119 está representada a magnitude do fasor da corrente secundária na saída do bloco *Discrete Fourier*.

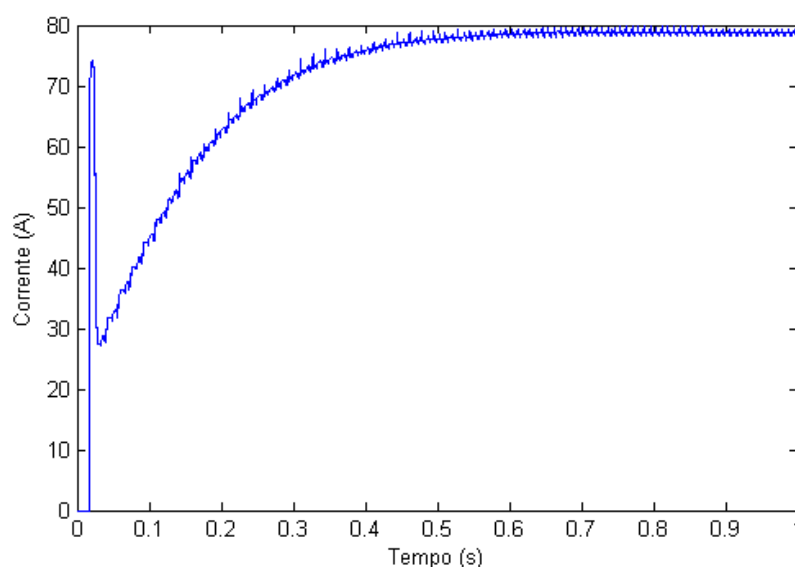


Figura 119 – Forma de onda da magnitude da componente fundamental do fasor de corrente.

Realizando agora uma comparação entre as Figuras 118 e 119, observa-se pela Figura 120, que a envoltória da forma de onda da magnitude do fasor (verde) da corrente não acompanha os picos da corrente secundária (azul), pois a componente de frequência fundamental não participa sozinha na composição da magnitude do fasor, porque o conteúdo harmônico é muito acentuado nos ciclos iniciais de saturação do TC. Desta maneira, a resposta do relé de sobrecorrente será reduzida com a saturação e vai aumentando ao passo que o efeito da saturação vai diminuindo com o passar do tempo.

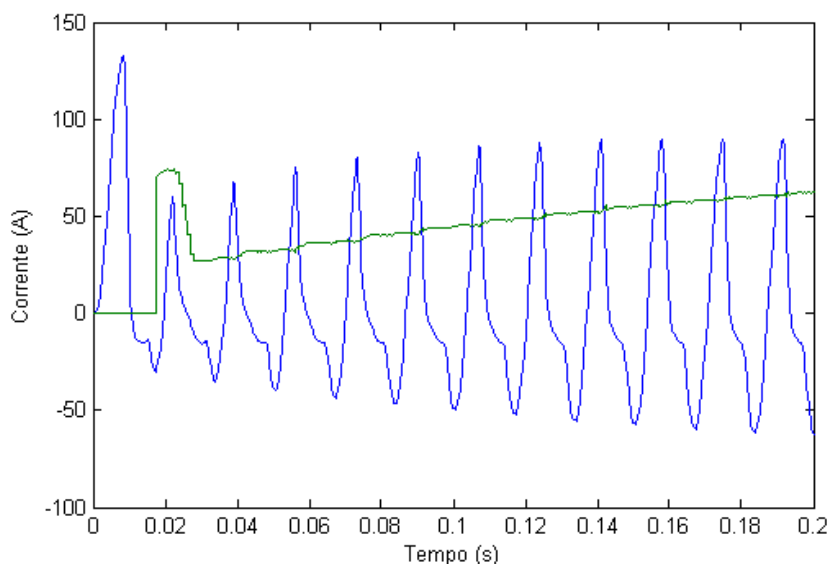


Figura 120 – Estimativa da magnitude do fasor com saturação do TC.

A Figura 121 apresenta a resposta do bloco de saída *TRIP* que representa o tempo de atuação do relé de sobrecorrente após o disjuntor ser fechado em  $t = 0$  s. Observa-se que o relé atuou em 0,803 s.

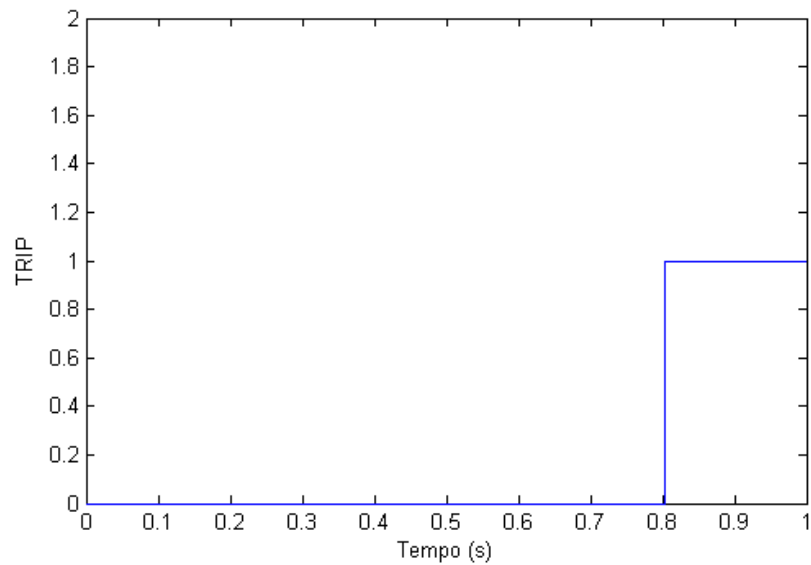


Figura 121 – Forma de onda da saída *TRIP*.

Foram também obtidas as formas de onda com a eliminação do efeito de saturação do TC. Para esta análise foram utilizados os parâmetros *default* das características da curva de saturação do Matlab® para o transformador como mostra a Figura 122.

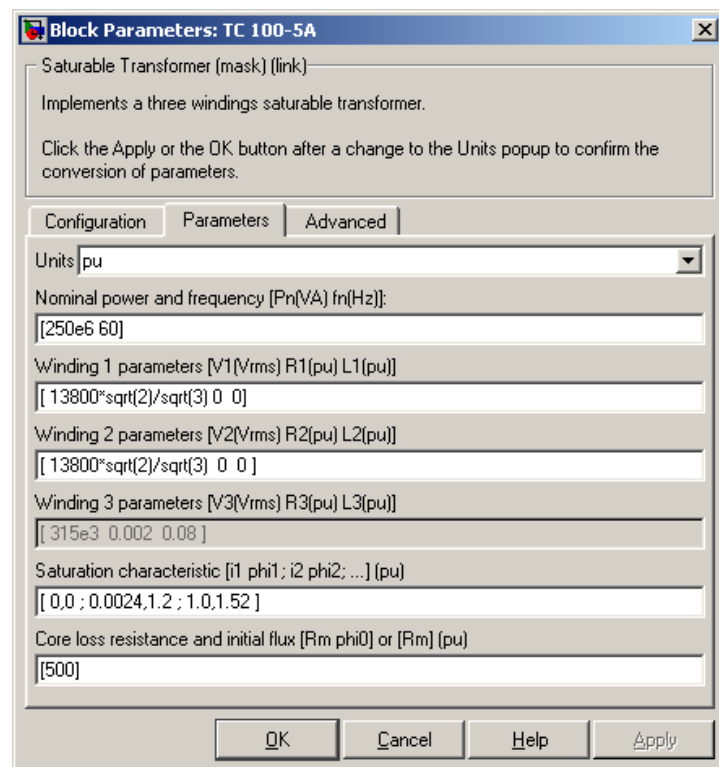


Figura 122 – Parâmetros do TC com eliminação da saturação.

As formas de onda obtidas foram as mesmas que para o caso com saturação, e são ilustradas pelas Figuras de 123 a 126. Observa-se o mesmo comportamento que no caso-teste 2, pois o circuito

sem saturação opera como se fosse apenas um circuito RL. Ao visualizar a forma de onda da saída, nota-se que o relé digital de sobrecorrente atuou em 0,757 s, ou seja, um tempo menor em relação ao medido, quando considerado o efeito de saturação do TC. Portanto a saturação do transformador de corrente implica em um atraso de operação por parte do modelo de relé de sobrecorrente desenvolvido.

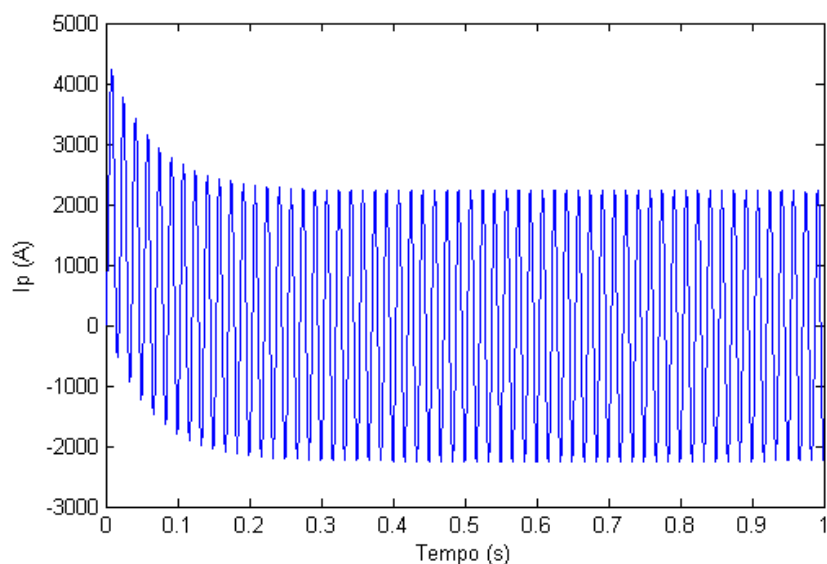


Figura 123 – Forma de onda da corrente primária.

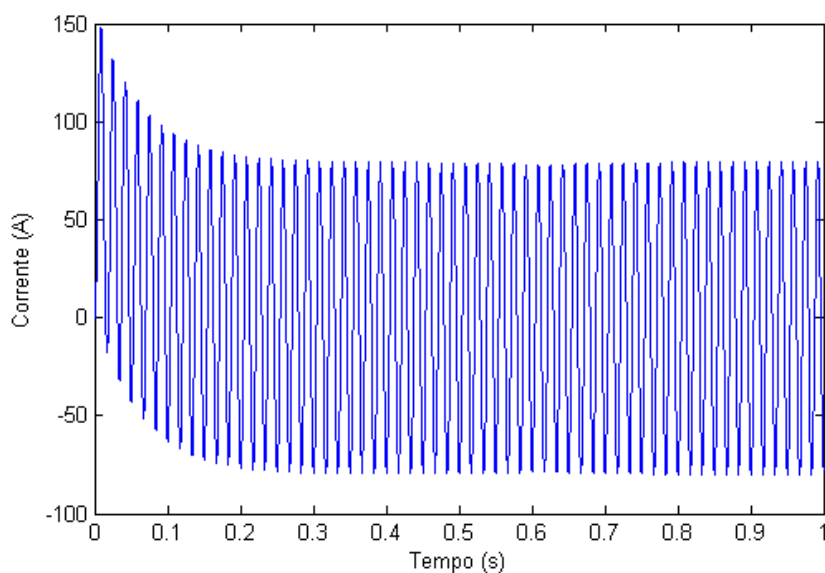


Figura 124 – Forma de onda da corrente na saída do filtro de *Butterworth*.

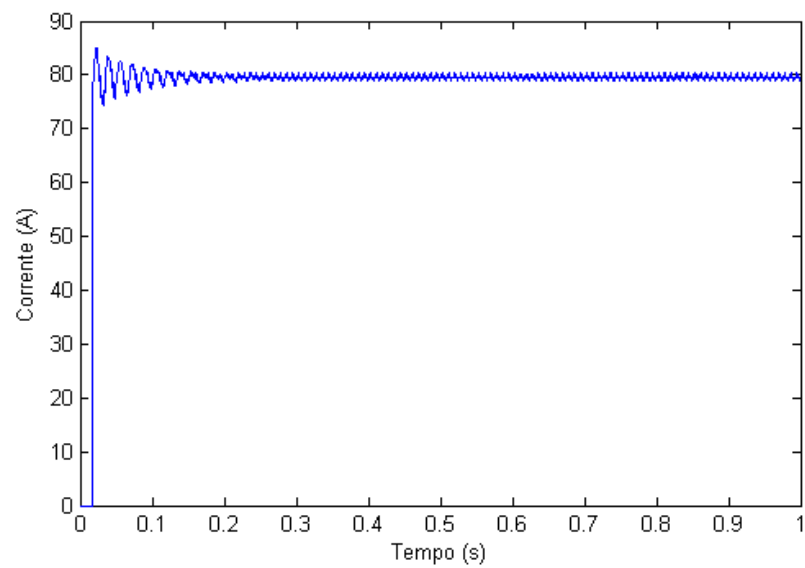


Figura 125 – Forma de onda da magnitude da componente fundamental do fasor de corrente.

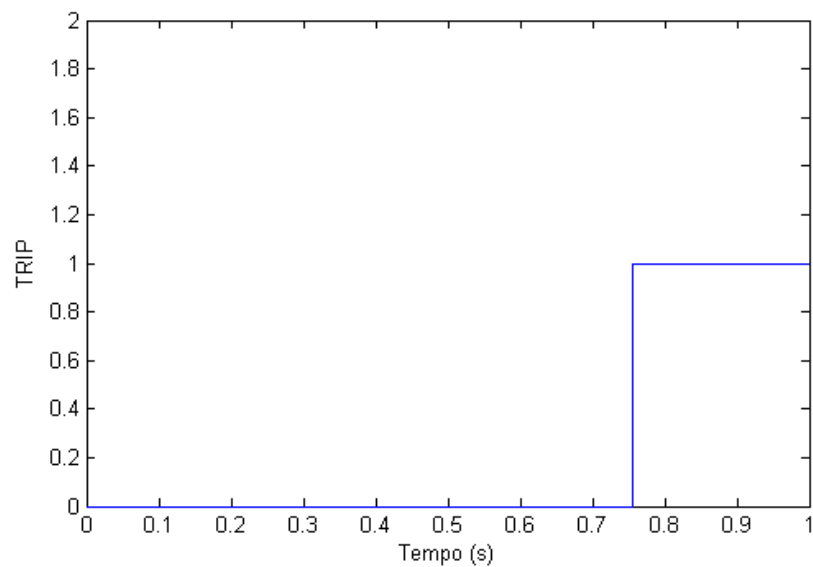


Figura 126 – Forma de onda da saída *TRIP*.

#### 4.2 – O modelo do relé digital de sobrecorrente trifásico

Para este item, o modelo desenvolvido para o relé digital de sobrecorrente trifásico, será validado através da comparação dos resultados obtidos por simulações (capítulo 3), com os valores calculados teoricamente através da equação (5).

Cabe lembrar que os dados de corrente analisados foram gerados através de simulações de transitórios eletromagnéticos utilizando-se do *software* ATP. Então, a partir do arquivo texto contendo os valores das correntes trifásicas gerado pelo *software* ATP, eram selecionadas apenas as colunas de

interesse (tempo e correntes das três fases) e esses dados eram enviados para o *software* Matlab para que pudessem ser utilizados em seu ambiente *Simulink*.

As simulações que serão apresentadas a seguir investigam o comportamento do modelo de relé de sobrecorrente trifásico em um determinado sistema de distribuição real simulado. Cabe frisar que as possibilidades de casos que podem ser simulados são inúmeras. Desta forma somente alguns casos serão discutidos para ilustrar o devido potencial do modelo desenvolvido.

Para a aplicação de defeito (curto-circuito) em um devido sistema, antes é necessário caracterizar como será realizada essa aplicação, definindo, por exemplo, o local de aplicação, o valor da resistência de falta, o ângulo de incidência na forma de onda da falta, a duração da falta, além do seu tipo (monofásica, bifásica e trifásica, com ou sem conexão a terra).

Devido ao grande número de combinações possíveis entre as variáveis apontadas, para cada tópico abordado a seguir, será somente considerada a alteração de uma dessas variáveis, mantendo-se as demais constantes, provendo assim, um melhor efeito de comparação entre as figuras e seus respectivos valores.

Já os parâmetros do relé introduzidos na máscara de ajuste foram mantidos constantes para todas as simulações e são mostrados a seguir:

- RTC = 100
- Pickup TEMP = 5 A
- Curva: IEC Normal Inversa
- Dial de tempo = 0,1
- Pickup INST = 5 A
- Tempo INST = 0 s

#### 4.2.1 – Variação do Local de Aplicação da Falta

Para esse caso, foram escolhidos quatro locais para a aplicação de situações de defeitos, os quais são: conjunto de transformadores 1 e 2, banco de capacitores BC3, transformador 13 e transformador particular 4. Sendo os demais parâmetros mantidos constantes, como:

- Resistência de falta =  $0\Omega$
- Ângulo de incidência de falta =  $0^\circ$  (0,497274 s)
- Tempo de duração da falta = 1 s.
- Tipo de falta = falta fase “A” – terra.

A Figura 127 apresenta a forma de onda da saída de *TRIP* para os locais de aplicação de falta: conjunto de transformadores 1 e 2, banco de capacitores BC3, transformador 13 e transformador particular 4.

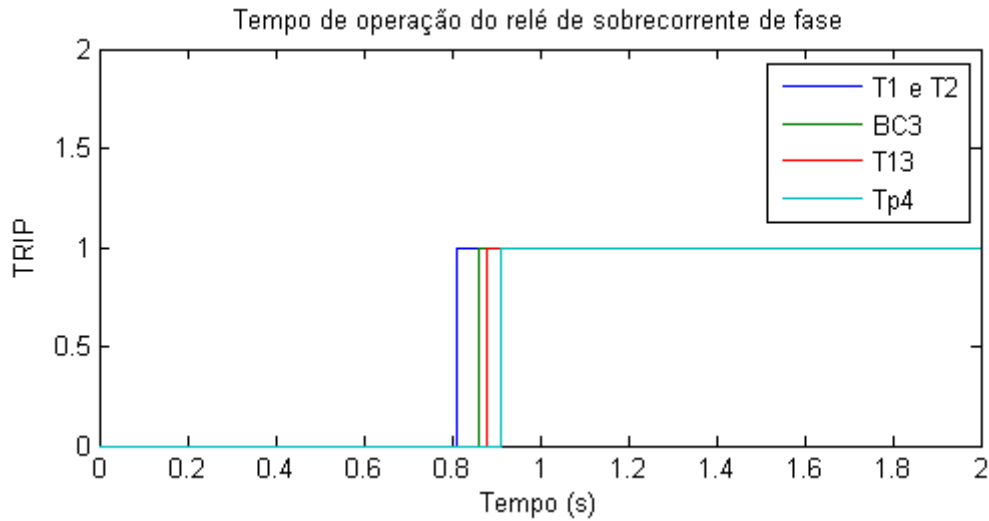


Figura 127 – Saída de *TRIP* para a variação do local de aplicação da falta.

No intuito de verificar a precisão do modelo desenvolvido, os resultados obtidos serão comparados com os valores calculados teoricamente a partir da equação (5). Para exemplificar, este cálculo será explicado no caso do local de aplicação da falta ser no transformador de distribuição T13.

De acordo com os parâmetros inseridos na máscara, têm-se as seguintes variáveis definidas:

- $\beta = 0,14$ ;
- $\alpha = 0,02$ ;
- $L = 0$ ;
- $I_p = 5A$ ;
- $D = 0,1$ .

Portanto, resta apenas definir o valor que será utilizado para a corrente de falta. O método adotado foi considerar a corrente de falta utilizada na fórmula como sendo a corrente amostrada após um ciclo do início da falta. Neste caso, um valor de corrente de 41 A é observado. Assim, calculando:

$$\int_0^{T_m} \left[ \frac{0,14 \cdot 0,1}{\left(\frac{41}{5}\right)^{0,02} - 1} + 0 \cdot 0,1 \right] dt > 1 \Rightarrow \frac{T_m - 0}{0,3257} > 1 \Rightarrow T_m > 0,3257s \quad (7)$$

Como a falta é inserida no instante 0,497274 s, a operação do relé de sobrecorrente irá acontecer 0,3257 s após este instante, ou seja, no instante 0,8230 s.

Sumarizando os resultados obtidos e comparando-os com os valores calculados teoricamente, elaborou-se a Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação do tempo de atuação do relé desenvolvido com o valor teórico esperado para a variação do local de aplicação da falta.

| Local de aplicação da falta | Tempo de atuação do relé (s) | Tempo teórico calculado (s) | Erro relativo (%) |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------|
| T1 e T2                     | 0,8113                       | 0,8230                      | 0,11              |
| BC 3                        | 0,8600                       | 0,8589                      | 0,12              |
| T13                         | 0,8816                       | 0,8717                      | 1,12              |
| TP 4                        | 0,9119                       | 0,8963                      | 1,73              |

Assim, pode-se verificar a grande precisão do modelo desenvolvido, apresentando um erro relativo máximo em torno de 1,73 %. Observa-se que tal situação de defeito foi aplicada quase que no outro extremo do sistema (localização do TP 4), quando tomado a posição física do relé junto a subestação como referência. Já para as situações de curtos aplicados próximos a subestação, como para as posições dos transformadores 1 e 2, este erro ficou em 0,11%.

#### 4.2.2 – Variação do Valor de Resistência da Falta

Para esse caso, dois valores de resistência de falta foram escolhidos como sendo de 0 e de 100  $\Omega$ . Sendo os demais parâmetros mantidos constantes, como:

- Local de aplicação da falta: transformador 13
- Ângulo de incidência da falta =  $0^\circ$  (0,497274 s)
- Tempo de duração da falta = 1 s.
- Tipo de falta = falta fase “A” – terra.

A Figura 128 apresenta a forma de onda da saída de *TRIP* para os valores de resistência de falta de 0 e de 100  $\Omega$ .

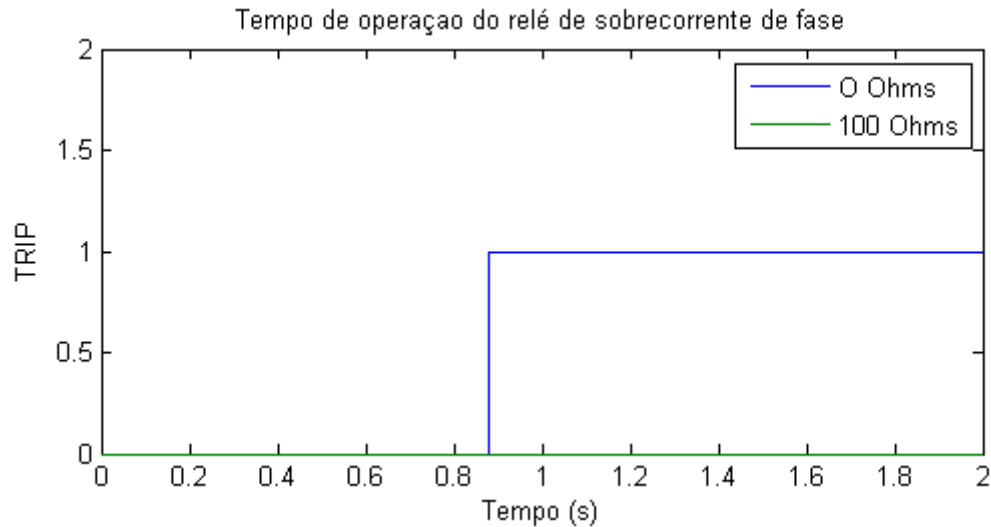


Figura 128 – Saída de *TRIP* para a variação do valor de resistência de falta.

Nota-se, neste caso, a não operação do relé de sobrecorrente para um valor de resistência de falta de 100  $\Omega$ . Isso pode ser explicado pela equação (5), já que para valores muito elevados de resistência de falta, o múltiplo da corrente de operação não terá um valor muito alto, e dessa maneira o denominador da equação será um valor negativo. Sendo assim, a condição necessária para que o relé de sobrecorrente atue não será obtida.

#### 4.2.3 – Variação do Ângulo de Incidência da Falta

Nesse caso, dois valores extremos de ângulo de incidência foram escolhidos para melhor caracterizar os defeitos, sendo estes de 0° (0,497274 s) e 90° (0,50127 s). Os demais parâmetros foram mantidos constantes em:

- Local de aplicação da falta: transformador 13
- Resistência de falta = 0  $\Omega$
- Tempo de duração da falta = 1 s.
- Tipo de falta = falta fase “A” – terra.

A Figura 129 apresenta a forma de onda da saída de *TRIP* para os valores de ângulo de incidência da falta 0 e 90°.

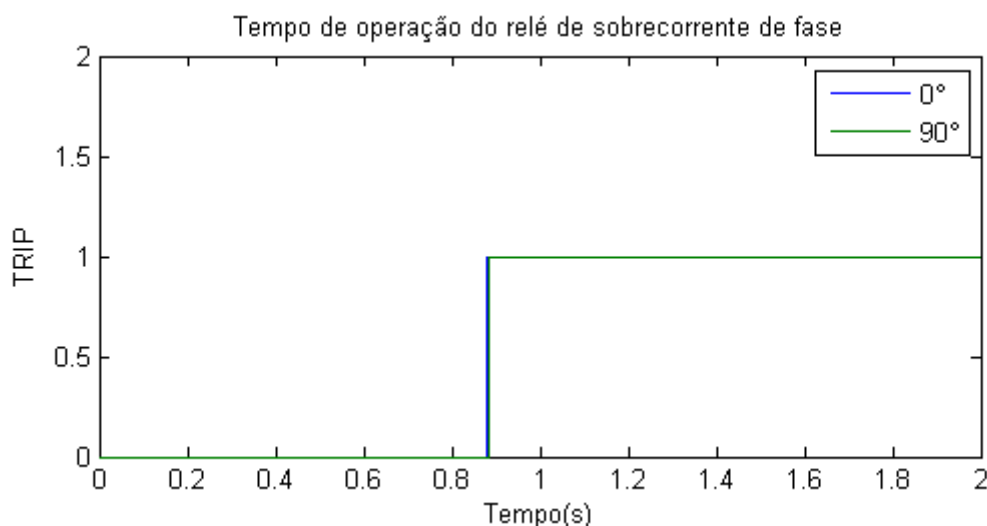


Figura 129 – Saída de *TRIP* para a variação do ângulo de incidência na forma de onda da falta.

Compilando os resultados obtidos nos dois gráficos e comparando-os com os valores calculados teoricamente, foi elaborada a Tabela 5.

Tabela 5 – Comparação do tempo de atuação do relé desenvolvido com o valor teórico esperado para a variação do ângulo de incidência na forma de onda da falta.

| Ângulo de incidência da falta | Tempo de atuação do relé (s) | Tempo teórico calculado (s) | Erro relativo (%) |
|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------|
| 0°                            | 0,8816                       | 0,8717                      | 1,12              |
| 90°                           | 0,8862                       | 0,8954                      | 1,03              |

Mais uma vez, pode-se verificar uma boa precisão do modelo desenvolvido, denotando um erro relativo pequeno. Pela tabela, observa-se uma proximidade entre os dois erros relativos apresentados, o que era de se esperar, visto que as situações de defeitos foram aplicadas no mesmo local (T13). O único responsável, nesse caso, pela diferença de valores no tempo de atuação é a diferença de tempos de aplicação da falta, em torno de 3 ms que se reflete diretamente no tempo de atuação do relé de sobrecorrente.

#### 4.2.4 – Variação do Tempo de Duração da Falta

Para esse caso, foram escolhidos dois tempos de duração de aplicação da situação de defeito, 0,5 segundos e 1 segundo, sendo os demais parâmetros mantidos constantes, a saber:

- Local de aplicação da falta: transformador 13
- Resistência de falta = 0  $\Omega$

- Ângulo de incidência de falta =  $0^\circ$  (0,497274 s)
- Tipo de falta = falta fase “A” – terra.

A Figura 130 apresenta a forma de onda da saída de *TRIP* para os valores de tempo de duração da falta de 1 segundo e 0,5 segundos, respectivamente.

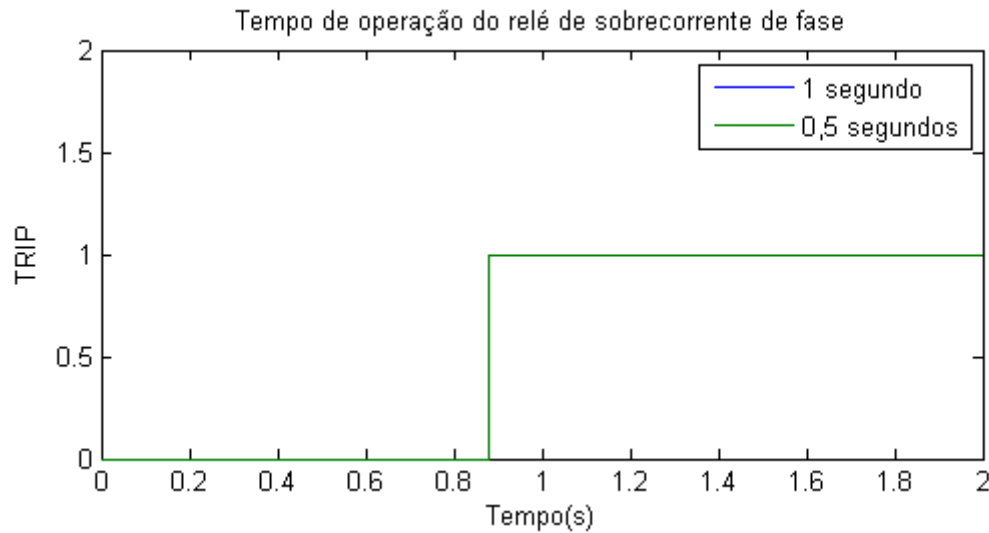


Figura 130 – Saída de *TRIP* para variação do tempo de duração da falta.

Pela simples comparação entre os dois gráficos, observa-se que há uma sobreposição das duas formas de onda. Como as faltas foram aplicadas no mesmo local (T13), o instante em que o relé começa a operar é 0,8816 ms, o que acarreta um relativo muito baixo quando comparado com o valor teórico calculado de 0,8717 ms, em torno de 1,12%.

#### 4.2.5 – Variação no Tipo de Falta Aplicada

Nesse caso, foram escolhidos três tipos de defeitos para serem aplicados ao sistema: falta fase “A” – terra, falta entre as fases “AB” – terra e falta entre as fases “ABC”. Sendo os demais parâmetros mantidos constantes, como:

- Local de aplicação da falta: transformador 13
- Resistência de falta =  $0 \Omega$
- Ângulo de incidência de falta =  $0^\circ$  (0,497274 s)
- Tempo de duração da falta = 1 s.

A Figura 131 apresenta a forma de onda da saída de *TRIP* para os três tipos diferentes de faltas aplicados, “A” – terra, “AB” – terra e “ABC”.

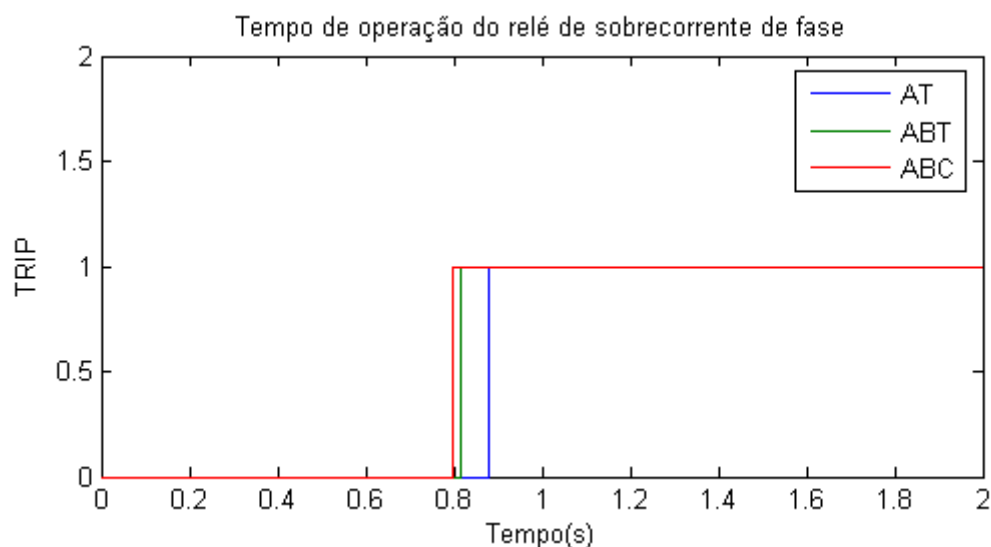


Figura 131 – Saída *TRIP* para variação do tipo de falta aplicada.

Desta forma, resumindo os resultados obtidos nos gráficos e comparando-os com os valores calculados teoricamente, foi elaborada a Tabela 6.

Tabela 6 – Comparação do tempo de atuação do relé desenvolvido com os valores teóricos para variação do tipo de falta aplicada.

| Tipo de falta | Tempo de atuação do relé (s) | Tempo teórico calculado (s) | Erro relativo (%) |
|---------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------|
| AT            | 0,8816                       | 0,8717                      | 1,12              |
| ABT           | 0,8138                       | 0,8284                      | 1,76              |
| ABC           | 0,7969                       | 0,7662                      | 3,99              |

Novamente, pela apreciação dos resultados obtidos, verifica-se a grande precisão para o modelo desenvolvido. O erro relativo que já era baixo para uma falta “A” – terra mantém-se em um patamar baixo. O erro relativo máximo de 3,99% constatado foi para uma situação envolvendo as três fases do sistema. Fato este que comprova o uso apropriado da porta lógica *OR*, utilizada para formar uma saída de disparo comum entre as três fases do sistema.



## 5. CONCLUSÕES

A elaboração deste projeto concentrou-se na modelagem, caracterização e análise de um sistema elétrico de distribuição de energia através do uso do *software Alternative Transients Program (ATP)* e de um relé de sobrecorrente temporizado dispondo do *software Matlab®*.

Inicialmente, realizou-se um levantamento (estudo) bibliográfico sobre o relé de sobrecorrente, focando-se na sua definição conceitual e filosófica propriamente dita, seus ajustes, tipos de funcionamento e equações que o descrevem. Em paralelo a esta atividade, foi também realizado um levantamento para a manipulação do *software Matlab®*, da qual resultou na modelagem computacional do relé de sobrecorrente. No corpo deste documento foi descrito cada bloco, seu funcionamento e seus parâmetros internos. Para maior facilidade de manipulação do usuário final criou-se uma interface através de uma máscara com os parâmetros que caracterizam o relé de sobrecorrente modelado.

Como próximo passo, realizou-se um levantamento bibliográfico relativo à manipulação do *software ATP*. Após esta etapa, foi realizada a caracterização de um sistema elétrico de distribuição dispondo da interface *ATPDraw*. Cabe frisar que todos os parâmetros considerados, desde o tipo de condutor, a disposição geométrica do sistema e todos os demais componentes foram coerentemente repassados ao *software* em função do acompanhamento e discussões realizadas junto ao LSEE. Vale lembrar que o sistema modelado diz respeito a um sistema de distribuição real de uma concessionária regional, cujos dados característicos não fazem parte das bibliotecas do *software*.

No seguimento, foram realizadas várias simulações representativas de situações em regime permanente, obtendo-se certa validação dos resultados observados em vários pontos do sistema em função das formas de onda das tensões e correntes trifásicas. Da mesma forma foram simuladas situações não desejáveis sobre o sistema modelado. Inicialmente, as faltas foram aplicadas considerando o envolvimento da fase “A” com conexão a terra, e após esta etapa, levou-se em consideração curto-circuitos do tipo bifásicos e trifásicos com conexão ou não a terra. Foram consideradas resistências de falta com valores de  $0,001\Omega$  e  $100\Omega$ , com ângulos de incidência de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . Desta maneira observou-se a variação na forma de onda de acordo com a variação desses parâmetros (fase envolvida, resistência de falta, ângulo de incidência e local da falta).

Após a modelagem computacional, conforme relatado, foram realizadas rotinas de casos-testes relacionadas ao modelo desenvolvido. Tais casos foram necessários para verificar a validade do modelo implementado, em função das equações que descrevem cada situação. Os resultados obtidos para esses casos-testes foram satisfatórios, de acordo com os tempos de atuação calculados teoricamente.

Por fim, a precisão do modelo desenvolvido foi corroborada através da comparação do comportamento do modelo implementado aplicado ao sistema de distribuição real modelado através

do *software* ATP, dispondo da sua *interface* ATPDraw. Os resultados obtidos para essas simulações tiveram enorme precisão, com erros relativos muito baixos, sendo os maiores erros obtidos quando da aplicação do defeito em ponto extremo da linha, ou no caso do envolvimento das três fases do sistema.

De uma maneira em geral, cabe afirmar que a modelagem funcional do relé de proteção desenvolvida nesse trabalho mostrou-se precisa e suficiente para o desenvolvimento de pesquisas na área de proteção de sistemas de distribuição de baixa ou média tensão, sendo simples para o entendimento da filosofia de proteção aplicada.

Vale ressaltar que além das modelagens evidenciadas, permitiu-se por este estudo, um melhor entendimento por parte do aluno sobre a filosofia de proteção aplicada e uma melhor análise deste e de outros sistemas de distribuição frente às inúmeras situações de operação que podem vir a ocorrer na prática.

Outra observação é que o modelo desenvolvido pode ser futuramente incluído em uma biblioteca de modelos dinâmicos de relés digitais de proteção, quando da utilização do ambiente *Simulink/Matlab*, já que seu uso é bastante prático e intuitivo. Desta maneira, este poderá ser utilizado em conjunto com diversos programas de análise de transitórios eletromagnéticos, como os próprios *SimPowerSystem* e o *software* ATP.

Cabe frisar que o modelo desenvolvido, como mostrado em sua validação, não é sensibilizado para uma falta com valor de resistência de  $100\Omega$ , isso ocorre também para os relés digitais comerciais em caso de faltas de alta impedância, em que o valor do múltiplo da corrente de operação do relé é baixo, porém em casos de falta permanente pode causar vários prejuízos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. F. D. Breda, M. Oleskovicz, D. Barbosa, *“Uma Representação Computacional do Relé de Sobrecorrente Temporizado empregado em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica”*, 8º Congresso Latino-americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, Ubatuba, 2009.
- [2] M. Moreto, *“Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: uma metodologia baseada em redes neurais”*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- [3] R. C. Paradelo, *“Proteção de sobrecorrente em sistemas de distribuição de energia elétrica através de abordagem probabilística”*, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- [4] The Mathworks Inc., *“Matlab: The Language of Technical Computing. Version 6.5 r13”*, USA, 2004.
- [5] The Mathworks Inc., *“SimPowersystems for Use with Simulink – User’s Guide. Version 4”*, USA, 2004.
- [6] W. S. Meyer, T. Liu, *“Alternative Transients Program 'ATP' Rule Book”*, Canadian /American EMTP User Group, 1992.
- [7] L. Prikler, H. K. Hoidalén, *“ATPDRAW version 3.5 for Windows 9x/NT/2000/XP User’s Manual”*, 2002.
- [8] M. A. D. Almeida, *“Proteção de Sistemas Elétricos”*, Apostila da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2000.
- [9] D. V. Coury, M. Oleskovicz, R. Geovanini, *“Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados Inteligentes”*, USP/EESC, 2007.
- [10] Coury, D. V., *“Proteção de Sistemas Eletroenergéticos”*, Apostila SEL354, São Carlos, 2003.
- [11] A. G. Phadke, J. S. Thorp, *“Computer Relaying for Power Systems”*. Research Studies Press Ltd., 1995.

- [12] W. D. Stevenson Jr., "*Elementos de Análise de Sistemas de Potência*", McGraw-Hill, 2ª Edição em Português (4ª Edição Americana), 1986.
- [13] IEC Std 60255-3, "*Electrical relays - Part 3: Single input energizing quantity measuring relays with dependent or independent time*", 1989.
- [14] IEEE Std C37.2-1996, "*IEEE Standard Electrical Power System Device Function Numbers and Contact Designations*", IEEE Standards Board - Substations Committee, 1996.
- [15] J. Johnson, R. Hamilton, P. Lerley, "*Voltage Restrained Time Overcurrent Relay Principles, Coordination and Dynamic Testing Considerations* ", on 54th Annual Conference for Protective Relay Engineers, Texas A&M University, 2001.
- [16] IEEE Std C37.90-1989, "*IEEE Standard for Relays and Relay Systems Associated with Electric Power Apparatus*", IEEE Standard Board – Power System Relaying Committee, 1989.
- [17] N. J. Salles, "*Modelagem e análise dinâmica de sistemas de proteção de redes de distribuição de energia elétrica na presença de geradores síncronos*", Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- [18] C. J. Santos ; D. V. Coury; M. Oleskovicz, C. M. Tavares, "*Transient Analysis Concerning Capacitor Bank Switching in a Distribution System*", Electric Power System Research, Estados Unidos, v. 65, n. 1, p. 13-21, 2003.
- [19] G. Benmouyal, "*Removal of DC-Offset in Current Waveform Using Digital Mimic Filtering*", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.2, no.2, pp. 621-630, 1995.

## Apêndice A – Máscara gerada pelo software ATP

Este apêndice contém a máscara gerada pelo software ATP do sistema de distribuição modelado durante este trabalho e repassado ao LSEE por uma concessionária de energia elétrica local.

```
BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW dezembro, quinta-feira 10, 2009
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEfAS/NTNU - NORWAY 1994-2006
C -----
POWER FREQUENCY 60.
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
.0001302 2.
C 1 5 1 1 1 0 0 1 0
C 1 2 3 4 5 6 7
8
C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567
890
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
C IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DO SISTEMA REFERIDA EM 138KV
51FONTA ATA 3.5639 49.013
52FONTB ATB 1.1974 18.133
53FONTC ATC
C IMPEDÂNCIA DO TRECHO ENTRE A SE E OS TRAFOS 1 E 2 (T12)
51SEA T12A .183 1.321
52SEB T12B .45 .35
53SEC T12C
C IMPEDÂNCIA DO TRECHO ENTRE A SE E OS TRAFOS T12 E TRECHO CH1
51T12A CH1A .0747 .538
52T12B CH1B .018 .143
53T12C CH1C
C IMPEDÂNCIA ENTRE O TRECHO CH1 E TRAFO T3 (T3)
51CH1A T3_1A .677 .488
52CH1B T3_1B .017 .13
53CH1C T3_1C
C IMPEDÂNCIA DO TRECHO ENTRE O TRAFO TP1 E CH3
51T3_1A TP1A .0942 .679
52T3_1B TP1B .023 .18
53T3_1C TP1C
C IMPEDÂNCIA ENTRE O TRAFO TP1 E CH3
51TP1A CH3A .149 1.08
52TP1B CH3B .037 .286
53TP1C CH3C
C IMPEDÂNCIA ENTRE BC3 E OS TRAFO 4,5,6,7 (T45)
51CH3A T45A .0785 .568
52CH3B T45B .019 .149
53CH3C T45C
C IMPEDÂNCIA ENTRE OS TRAFOS T45 E O TP2 (TP2)
51T45A TP2A .092 .663
52T45B TP2B .023 .178
53T45C TP2C
C IMPEDÂNCIA ENTRE O TRAFO TP2 E O T13 (T13)
51TP2A T13_1A .0379 .273
```

|                                                             |        |       |       |
|-------------------------------------------------------------|--------|-------|-------|
| 52TP2B                                                      | T13_1B | .009  | .072  |
| 53TP2C                                                      | T13_1C |       |       |
| C IMPEDÂNCIA DO TRECHO ENTRE T13 O OS TRAFOS 8,9,10 (T89)   |        |       |       |
| 51T13_1A                                                    | T89A   | .113  | .817  |
| 52T13_1B                                                    | T89B   | .028  | .215  |
| 53T13_1C                                                    | T89C   |       |       |
| C IMPEDÂNCIA ENTRE OS TRAFOS T89 E TP3 (TP3)                |        |       |       |
| 51T89A                                                      | TP3A   | .027  | .195  |
| 52T89B                                                      | TP3B   | .007  | .05   |
| 53T89C                                                      | TP3C   |       |       |
| C IMPEDÂNCIA ENTRE OS TRAFOS T89 E OS TRAFOS 11,12,14 (T11) |        |       |       |
| 51T11A                                                      | T89A   | .1    | .407  |
| 52T11B                                                      | T89B   | .06   | .119  |
| 53T11C                                                      | T89C   |       |       |
| C IMPEDÂNCIA ENTRE OS TRAFOS T11 E O TP4 (TP4)              |        |       |       |
| 51T11A                                                      | TP4_1A | .1    | .407  |
| 52T11B                                                      | TP4_1B | .06   | .119  |
| 53T11C                                                      | TP4_1C |       |       |
| C BANCO DE CAPACITOR 2 - BC2                                |        |       |       |
| BC2A                                                        | NEUT2  |       | 8.36  |
| 0                                                           |        |       |       |
| BC2B                                                        | NEUT2  |       | 8.36  |
| 0                                                           |        |       |       |
| BC2C                                                        | NEUT2  |       | 8.36  |
| 0                                                           |        |       |       |
| C BANCO DE CAPACITOR 1 - BC1                                |        |       |       |
| BC1A                                                        | NEUT1  |       | 16.71 |
| 0                                                           |        |       |       |
| BC1B                                                        | NEUT1  |       | 16.71 |
| 0                                                           |        |       |       |
| BC1C                                                        | NEUT1  |       | 16.71 |
| 0                                                           |        |       |       |
| C BANCO DE CAPACITOR 3 - BC3                                |        |       |       |
| BC3A                                                        | NEUT3  |       | 8.36  |
| 0                                                           |        |       |       |
| BC3B                                                        | NEUT3  |       | 8.36  |
| 0                                                           |        |       |       |
| BC3C                                                        | NEUT3  |       | 8.36  |
| 0                                                           |        |       |       |
| C RESISTÊNCIAS INFINITAS PARA TERRA                         |        |       |       |
| NEUT1                                                       |        | 1.E6  |       |
| 0                                                           |        |       |       |
| NEUT2                                                       |        | 1.E6  |       |
| 0                                                           |        |       |       |
| NEUT3                                                       |        | 1.E6  |       |
| 0                                                           |        |       |       |
| NEUT4                                                       |        | 100.  |       |
| 0                                                           |        |       |       |
| NEUT5                                                       |        | 1.    |       |
| 0                                                           |        |       |       |
| NEUT6                                                       |        | 1.    |       |
| 0                                                           |        |       |       |
| NEUT7                                                       |        | 1.    |       |
| 0                                                           |        |       |       |
| C CONJUNTO DE TRAFOS 1 E 2                                  |        |       |       |
| T12A                                                        |        | 2514. | 2100. |
| 0                                                           |        |       |       |
| T12B                                                        |        | 2514. | 2100. |
| 0                                                           |        |       |       |
| T12C                                                        |        | 2514. | 2100. |
| 0                                                           |        |       |       |

|   |                                            |       |       |
|---|--------------------------------------------|-------|-------|
| C | CONJUNTO DE TRAFOS 4,5,6 E 7               |       |       |
|   | T45A                                       | 1137. | 949.7 |
| 0 |                                            |       |       |
|   | T45B                                       | 1137. | 949.7 |
| 0 |                                            |       |       |
|   | T45C                                       | 1137. | 949.7 |
| 0 |                                            |       |       |
| C | CONJUNTO DE TRAFOS 8,9 E 10                |       |       |
|   | T89A                                       | 3122. | 2616. |
| 0 |                                            |       |       |
|   | T89B                                       | 3122. | 2616. |
| 0 |                                            |       |       |
|   | T89C                                       | 3122. | 2616. |
| 0 |                                            |       |       |
| C | CONJUNTO DE TRAFOS 11,12 E 14              |       |       |
|   | T11A                                       | 1500. | 1253. |
| 0 |                                            |       |       |
|   | T11B                                       | 1500. | 1253. |
| 0 |                                            |       |       |
|   | T11C                                       | 1500. | 1253. |
| 0 |                                            |       |       |
| C | TRAFO PARTICULAR 1 (3 TRAFOS)              |       |       |
|   | TP1A                                       |       | 15.   |
| 0 |                                            |       |       |
|   | TP1B                                       |       | 15.   |
| 0 |                                            |       |       |
|   | TP1C                                       |       | 15.   |
| 0 |                                            |       |       |
|   | TP1A                                       | 45.81 | 107.2 |
| 0 |                                            |       |       |
|   | TP1B                                       | 45.81 | 107.2 |
| 0 |                                            |       |       |
|   | TP1C                                       | 45.81 | 107.2 |
| 0 |                                            |       |       |
| C | TRAFO PARTICULAR 2 (4 TRAFOS)              |       |       |
|   | TP2A                                       | 71.58 | 167.4 |
| 0 |                                            |       |       |
|   | TP2B                                       | 71.58 | 167.4 |
| 0 |                                            |       |       |
|   | TP2C                                       | 71.58 | 167.4 |
| 0 |                                            |       |       |
|   | TP2A                                       |       | 10.   |
| 0 |                                            |       |       |
|   | TP2B                                       |       | 10.   |
| 0 |                                            |       |       |
|   | TP2C                                       |       | 10.   |
| 0 |                                            |       |       |
| C | TRAFO PARTICULAR 3 (2 TRAFOS)              |       |       |
|   | TP3A                                       | 251.2 | 587.5 |
| 0 |                                            |       |       |
|   | TP3B                                       | 251.2 | 587.5 |
| 0 |                                            |       |       |
|   | TP3C                                       | 251.2 | 587.5 |
| 0 |                                            |       |       |
|   | TP3A                                       |       | 3.    |
| 0 |                                            |       |       |
|   | TP3B                                       |       | 3.    |
| 0 |                                            |       |       |
|   | TP3C                                       |       | 3.    |
| 0 |                                            |       |       |
| C | TRANSFORMADOR DA SE - 138/13.8 KV - 25 MVA |       |       |

```

TRANSFORMER          3.019326.899SUB1A  6.3E4
0
    3.04585138        26.6654561
    7.68117963        29.6282846
    15.7373247        32.591113
    16373.2353        38.5167699
    9999
1ATA  ATC              1.7462151.37  138.
2BTA  NEUT4            .01751.51377.8981
TRANSFORMER SUB1A                      SUB1B
1ATB  ATA
2BTB  NEUT4
TRANSFORMER SUB1A                      SUB1C
1ATC  ATB
2BTC  NEUT4
C CARGA NO SECUNDÁRIO DO TRAFO T3
T3_2A          1.4426 1.205
0
T3_2B          1.4426 1.205
0
T3_2C          1.4426 1.205
0
C TRAFO DE DISTRIBUIÇÃO DE 45 KVA - 13.2/0.22 KV - T3 (AMARELO)
TRANSFORMER          .016435.712T3AA  6.3E4
0
    0.016398          35.71255
    0.039992          40.17662
    0.069525          44.64069
    0.088701          46.87272
    0.112229          49.10476
    0.139368          51.3368
    0.174623          53.56883
    0.214978          58.0329
    0.374252          62.49697
    9999
1T3_1A T3_1C          81.819143.53  13.2
2T3_2A NEUT5          .0093 .0163 .127
TRANSFORMER T3AA                      T3AB
1T3_1B T3_1A
2T3_2B NEUT5
TRANSFORMER T3AA                      T3AC
1T3_1C T3_1B
2T3_2C NEUT5
C CARGA NO SECUNDÁRIO DO TRAFO T13
T13_2A          2.4297 2.031
0
T13_2B          2.4297 2.031
0
T13_2C          2.4297 2.031
0
C MODELAGEM NOVA DO TRAFO DE DISTRIBUIÇÃO 13
TRANSFORMER          .016435.712T13AA  6.3E4
0
    0.016398          35.71255
    0.039992          40.17662
    0.069525          44.64069
    0.088701          46.87272
    0.112229          49.10476
    0.139368          51.3368
    0.174623          53.56883
    0.214978          55.80087

```

```

0.261049      58.0329
9999
1T13_1AT13_1C      81.819143.53  13.2
2T13_2ANEUT6      .0093 .0163 .127
  TRANSFORMER T13AA      T13AB
1T13_1BT13_1A
2T13_2BNEUT6
  TRANSFORMER T13AA      T13AC
1T13_1CT13_1B
2T13_2CNEUT6
C TRAFO DE DISTRIBUIÇÃO 4 - 45 KVA - 13.2/0.22 KV
  TRANSFORMER      .016435.712T4AA  6.3E4
0
0.016398      35.71255
0.039992      40.17662
0.069525      44.64069
0.088701      46.87272
0.112229      49.10476
0.139368      51.3368
0.174623      53.56883
0.214978      55.80087
0.261049      58.0329
9999
1TP4_1ATP4_1C      81.819143.53  13.2
2TP4_2ANEUT7      .0093 .0163 .127
  TRANSFORMER T4AA      T4AB
1TP4_1BTP4_1A
2TP4_2BNEUT7
  TRANSFORMER T4AA      T4AC
1TP4_1CTP4_1B
2TP4_2CNEUT7
C CARGA NO SECUNDÁRIO DO TRAFO T4
  TP4_2A      .159 .18
0
  TP4_2B      .159 .18
0
  TP4_2C      .159 .18
0
  TP4_2A      3343.
0
  TP4_2B      3343.
0
  TP4_2C      3343.
0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
C CHAVE (DISJUNTORES) DO ALIMENTADOR
  BTA  SEA      -1.      10.
1
  BTB  SEB      -1.      10.
1
  BTC  SEC      -1.      10.
1
C CHAVE DE COMANDO BC3
  BC3A  CH3A      10.      10.
0
  BC3B  CH3B      10.      10.
0
  BC3C  CH3C      10.      10.
0
C CHAVE DE COMANDO BC1

```

```

    BC1A  CH1A      -1.      10.
0
    BC1B  CH1B      -1.      10.
0
    BC1C  CH1C      -1.      10.
0
C CHAVE DE COMANDO BC2
    BC2A  CH1A      10.      10.
0
    BC2B  CH1B      10.      10.
0
    BC2C  CH1C      10.      10.
0
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl.  >< Freq.  ><Phase/T0><  A1  ><  T1  >< TSTART ><
TSTOP  >
C FONTE EQUIVALENTE DO SISTEMA
14FONTA  0 112676.53      60.      -1.
2.
14FONTB  0 112676.53      60.      -120.      -1.
2.
14FONTC  0 112676.53      60.      120.      -1.
2.
/OUTPUT
    FONTA FONTB FONTC ATA  ATB  ATC  BTA  BTB  BTC
T13_2AT13_2BT13_2CT13_1A
    T13_1BT13_1C
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

## **Apêndice B – Publicações**

Este apêndice contém três comprovantes de publicações decorrentes deste Trabalho de Conclusão de Curso. O primeiro trata-se do comprovante de participação no 16º Simpósio Internacional de Iniciação Científica da Universidade de São Paulo (SIICUSP), ocorrido no ano de 2008 na cidade de São Paulo.

O segundo comprovante faz referência a participação no 8º Congresso Latino-americano de Transmissão de Energia Elétrica (CLAGTEE), ocorrido no ano de 2009 na cidade de Ubatuba.

Já o terceiro comprovante diz respeito à participação no 17º SIICUSP que ocorreu na cidade de São Carlos no ano de 2009. O trabalho apresentado é uma continuação do que foi abordado durante este relatório.

Estes comprovantes de publicação não apenas testificam as atividades desenvolvidas durante os anos de iniciação científica, mas também o sucesso obtido em cada um desses trabalhos.

# 16º SIICUSP

**Agropecuária  
Biológicas e Saúde  
Engenharia e Exatas  
Humanas e Humanidades**

[illegible]

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP

# Certificado

Certificamos que *Jáder Ferrnândo Dias Grede* participou(aram) do 16º Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP - SIICTUSP com o trabalho “*Um Modelo Computacional para o Relé de Sobrecorrente*”, com a colaboração de -- e orientação de(a) Prof(a). Dr(a) *Mário Cieszkowicz*, na área de Ciências Exatas e Engenharias, realizado nos dias 05, 06 e 07 de novembro de 2008, na Escola Politécnica - EP, campus de São Paulo, SP.

São Paulo, 05 de novembro de 2008

Profa. Dra. Mayana Zatz  
PRÓ-REITORA DE PESQUISA DA  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Profa. Dra. Marta Angélica Miglino  
PRESIDENTE DA COMISSÃO COORDENADORA DO  
PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP



**8<sup>TH</sup> LATIN-AMERICAN CONGRESS:  
ELECTRICITY GENERATION AND  
TRANSMISSION – October 18<sup>th</sup> – 22<sup>nd</sup>, 2009**

**CERTIFICATE**

This is to certify that **J. F. D. BREDA** has participated as **author** and **presenter** of the paper: **Uma Representação Computacional do Relé de Sobrecorrente Temporizado empregado em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (*code 591*)**, in the 8<sup>th</sup> Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission.  
Ubatuba, Brazil, October, 22<sup>nd</sup>, 2009.

Prof. Dr. José Luz Silveira  
Executive Chairman



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

A PRÓ-REITORA DE PESQUISA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO,  
CERTIFICA QUE

**JÁDER FERNANDO DIAS BREDÁ**

PARTICIPOU DO



**17º SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE  
INICIAÇÃO CIENTÍFICA**



COM O TRABALHO  
"UMA REPRESENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO RELÉ DE SOBRECORRENTE  
COM RELIGAMENTO AUTOMÁTICO PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO"  
- ENGENHARIAS E EXATAS  
SOB ORIENTAÇÃO DO PROF. DR. MÁRIO OLESKOVICZ  
REALIZADO NOS DIAS 09, 10 E 11 DE NOVEMBRO DE 2009.

SÃO CARLOS, 11 DE NOVEMBRO DE 2009.

  
PRO-REITORA DE PESQUISA  
MAYANA ZATZ



  
PRESIDENTE DA COMISSÃO  
COORDENADORA DO PROGRAMA DE  
INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
MARIA NERES ROCHA HENTZEL  
SANTORO