UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

JACQUELINE PANEZ IZAGUIRRE

MODELAGEM DE UM RELÉ DE PROTEÇÃO DIRECIONAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO NO ATP

CAMPINAS
2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

JACQUELINE PANEZ IZAGUIRRE

MODELAGEM DE UM RELÉ DE PROTEÇÃO DIRECIONAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO NO ATP

Orientadora: Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestra em Engenharia Elétrica, na área de concentração em Energia Elétrica (AF).

Este exemplar corresponde à versão final da dissertação de mestrado defendida pela aluna Jacqueline Panez Izaguirre, e orientada pela Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares

Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares

CAMPINAS
2016

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): CAPES

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

P192m

Panez Izaguirre, Jacqueline, 1982-
Modelagem de um relé de proteção direcional de linha de transmissão no ATP / Jacqueline Panez Izaguirre. – Campinas, SP : [s.n.], 2016.

Orientador: Maria Cristina Dias Tavares.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Linhas elétricas - Transmissão. 2. Modelagem e simulação. 3. Sistemas elétricos de potência. 4. Sistemas de energia elétrica - Proteção. I. Tavares, Maria Cristina Dias,1962-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Modeling a directional protection relay transmission line in ATP
Palavras-chave em inglês:
Electric lines - Transmission
Modeling and simulation
Electric power systems
Power systems - Protection
Área de concentração: Energia Elétrica
Titulação: Mestra em Engenharia Elétrica
Banca examinadora:
Maria Cristina Dias Tavares [Orientador]
Ricardo Caneloi dos Santos
Marcos Julio Rider Flores
Data de defesa: 17-05-2016
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA – DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Candidata: Jacqueline Panez Izaguirre RA: 153773
Data da Defesa: 17 de maio de 2016

Título da Tese: "Modelagem de um relé de proteção direcional de linhas de transmissão no ATP".

Prof. Dra. Maria Cristina Dias Tavares (Presidente, FEEC/UNICAMP)
Prof. Dr. Ricardo Caneloi dos Santos (UFABC)
Prof. Dr. Marcos Julio Rider Flores (FEEC/UNICAMP)

A ata de defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no processo de vida acadêmica da aluna.

Dedico este trabalho aos meus pais, irmãos, sobrinhos e a meu namorado.

“O único homem que não comete erros é aquele que nunca faz nada”.

Johann Wolfgang Goethe

“A imaginação é mais importante que o conhecimento”.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

A minha orientadora, professora Dra. Maria Cristina Dias Tavares, pela orientação, paciência, compreensão e dedicação no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Dr. Jose Pissolato Filho, pela atenção, apoio e compreensão.

Aos professores da FEEC que me brindaram com os seus ensinamentos.

Ao meu pai (Marino), minha mãe (Elsa), meus irmãos (Carlos e Jenny) e a meus sobrinhos (Joseph e Sebastian), pelo amor e apoio.

Ao meu namorado (Luis), pelo amor, apoio e paciência.

Aos engenheiros e amigos Zocimo Ñaupari e Manuel Carranza, pelo apoio.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

A todos aqueles que me apoiaram durante o curso e na elaboração desta dissertação, muito obrigada!

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar a modelagem e a simulação do relé direcional para proteção de linhas de transmissão. Os relés direcionais implementados utilizam três métodos de polarização, sendo estes o método de polarização por tensão, o método de polarização por corrente e o método de impedâncias. Os três métodos utilizam a sequência negativa e sequência zero dos sinais de tensão e corrente para determinar a direção de curto-circuito monofásico, bifásico e bifásico à terra que podem acometer as linhas de transmissão. Para análise do comportamento do relé se utilizou o simulador digital ATP, sendo implementados os relés direcionais no ambiente MODELS. A validação dos modelos foi feita para dois sistemas elétricos de potência simplificados, nos quais se analisam as correntes de sequência negativa e sequência zero, assim como as inversões da tensão e da corrente em linhas de transmissão com compensação série. Toda a modelagem dos dois sistemas elétricos de potência, incluindo a representação dos componentes dos relés direcionais de proteção, é descrita detalhadamente, assim como os testes realizados para validar os modelos desenvolvidos e verificar o desempenho da proteção direcional.

Palavras-chave: ATP. MODELS. Linha de transmissão. Proteção direcional. Compensação em série. Sequência Negativa. Sequência Zero.

ABSTRACT

This work presents the modeling and simulation of directional relay for transmission lines protection. The directional relays implemented use three polarization methods, which are the voltage polarization method, the current polarization method and the impedance method. These three methods use the negative sequence and zero sequence components of voltage and current, to determine the direction of single-phase, two-phase and two-phase to ground short circuits in the transmission lines. The software used in the simulations is ATP, and directional relay was modeled in ATP language called MODELS. The relay model validation was done for two simplified electric power systems, where the voltage and current negative and zero sequence components were analyzed. A series compensated transmission line was also analyzed in order to study the voltage and current inversion during specific fault locations. The transmission system modeling and the proper representation of the directional protection and the relays components are described. Several tests were performed to validate the model and analyze the protection relay performance.

Keywords*: ATP. MODELS. Transmission line. Directional protection. Series Compensation. Negative sequence. Zero sequence.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Operação da proteção direcional. 31
Figura 2.2 – Componentes simétricos: de esquerda para a direita – sequência positiva, sequência negativa e sequência zero. 32
Figura 2.3 – Curto-circuito monofásico na barra k. 33
Figura 2.4 – Conexão das redes de sequência positiva, negativa e zero para um curto-circuito monofásico na barra k. 34
Figura 2.5 – Sistema de fasores, antes e durante um curto-circuito na fase A a terra. 35
Figura 2.6 – Conexão dos transformadores de tensão para a medição da tensão de sequência zero. 36
Figura 2.7 – Conexão dos transformadores de corrente para a medição da corrente de fase e corrente de sequência zero. 36
Figura 2.8 – Diagrama fasorial de operação do relé direcional, com método de polarização por tensão de sequência zero. 36
Figura 2.9 – Conexão dos transformadores de tensão para a medição das tensões de fase. ... 37
Figura 2.10 – Diagrama fasorial de operação do relé direcional, com método de polarização por tensão de sequência negativa. 38
Figura 2.11 – Diagrama fasorial de operação do relé direcional, com método de polarização por corrente de sequência zero. 39
Figura 2.12 – Diagrama fasorial de operação do relé direcional, com método de polarização por corrente de sequência negativa. 39
Figura 2.13 – Característica de operação do elemento 32Q. 41
Figura 2.14 – Característica de operação do elemento 32V. 41
Figura 2.15 – Rede de sequência negativa para uma falta a terra no extremo da linha protegida num sistema com duas fontes. 42
Figura 2.16 – Rede de sequência negativa para uma falta a terra atrás do relé num sistema com duas fontes. 42
Figura 2.17 – Ajustes das zonas “a frente” e “reversa” do elemento 32Q 43
Figura 2.18 – Ajustes das zonas “a frente” e “reversa” do elemento 32V 43
Figura 2.19 – Rede elétrica em componentes de sequências, para uma falta monofásica na linha. 45

Figura 2.20 – Comportamento de V_0 e V_2 com respeito as impedâncias de sequência zero e sequência positiva (Z_0/Z_1), para faltas monofásicas. 46
Figura 2.21 – Comportamento de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta monofásica. 48
Figura 2.22 – Comportamento de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta monofásica. 49
Figura 2.23 – Linhas não transpostas em operação normal geram tensão $3V_0$ e $3V_2$. 50
Figura 2.24 – Linhas não transpostas geram inversão da tensão residual $3V_0$ em faltas remotas. 51
Figura 2.25 – Tensão de sequência negativa. 51
Figura 2.26 – Rede elétrica descrita através dos circuitos de sequências, para uma falta monofásica na linha com compensação série. 52
Figura 2.27 – Compensação da tensão para o método de polarização por corrente. 55
Figura 2.28 – Sem compensação da tensão para o método de polarização por tensão. 55
Figura 2.29 – Com compensação da tensão para o método de polarização por tensão. 56
Figura 2.30 – Linha com compensação em série. (a) à metade, (b) no extremo R e (c) nos dois extremos, com transformador de tensão no lado do barramento. 56
Figura 2.31 – Linha com compensação série. (a) no extremo R e (b) nos dois extremos, com transformador de tensão no lado da linha. 57
Figura 3.1 – Principais componentes do programa ATP vistas na interface ATPDRAW. 60
Figura 3.2 – Diagrama de blocos do sistema geral implementado no ATP. 61
Figura 3.3 – O circuito equivalente do Transformador de Corrente. 62
Figura 3.4 – Curva de saturação segundo a norma IEEE no. C37.110. 63
Figura 3.5 –Modelo da curva de saturação de Transformador de Corrente. 64
Figura 3.6 –Correntes secundárias do TC, para o caso de falta monofásica com saturação do TC. 67
Figura 3.7 –Correntes secundárias do TC, para ilustrar o efeito da carga para uma falta monofásica. 67
Figura 3.8 –Modelo do relé. 67
Figura 3.9 –Comparação dos sinais antes e depois da passagem pelo filtro analógico. 69
Figura 3.10 –Comparação dos sinais antes e depois da passagem pelo sample and hold. 70
Figura 3.11 –Comparação dos Filtros Fourier, Cosseno e Fourier meio ciclo. 74
Figura 3.12 –Impedâncias de sequência negativa calculadas pelo relé. 75
Figura 3.13 - Localização de falta calculada pelo relé. 75
Figura 4.1 – Sistema elétrico em análise (linha de transmissão de 300 km, com compensação reativa em derivação). 81

Figura 4.2 – Sistema elétrico em análise (linha de transmissão de 600 km com compensação em série e compensação reativa em derivação). 82
Figura 4.3 – Torre da linha de transmissão de 500 kV. 82
Figura 4.4 – Ganho de tensão e a admitância de compensação da linha de transmissão de 500 kV. 84
Figura 4.5 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta monofásica e $R_f = 0\ \Omega$. 87
Figura 4.6 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta monofásica e $R_f = 200\ \Omega$ 87
Figura 4.7 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta monofásica e $R_f = 0\ \Omega$. 88
Figura 4.8 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta monofásica e $R_f = 200\ \Omega$. 88
Figura 4.9 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta bifásica a terra e $R_f = 0\ \Omega$. 88
Figura 4.10 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta bifásica a terra e $R_f = 200\ \Omega$. . 88
Figura 4.11 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta bifásica a terra e $R_f = 0\ \Omega$. 88
Figura 4.12 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta bifásica a terra e $R_f = 200\ \Omega$. ... 88
Figura 4.13 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta bifásica e $R_f = 0\ \Omega$. 89
Figura 4.14 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta bifásica e $R_f = 20\ \Omega$. 89
Figura 4.15 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta bifásica e $R_f = 0\ \Omega$. 89
Figura 4.16 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta bifásica e $R_f = 20\ \Omega$. 89
Figura 4.17 –Impedâncias *Z2* calculadas pelo relé R1, para as faltas monofásicas na LT. 91
Figura 4.18 –Impedâncias *Z2* calculadas pelo relé R2, para as faltas monofásicas na LT. 91
Figura 4.19 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na LT. 93
Figura 4.20 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na LT. 93
Figura 4.21 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na LT. 94
Figura 4.22 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na LT. 94
Figura 4.23 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R2, para as faltas monofásicas na LT. 95
Figura 4.24 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R2, para as faltas monofásicas na LT. 95
Figura 4.25 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R2, para as faltas monofásicas na LT. 96

Figura 4.26 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R2, para as faltas monofásicas na LT. 96
Figura 4.27 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta monofásica e com impedância de aterramento do transformador de potência 10 Ω. 97
Figura 4.28 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta monofásica e com impedância de aterramento do transformador de potência 100 Ω. 97
Figura 4.29 –Impedância *Z2* calculada pelo relé R1, para as faltas bifásicas na LT. 98
Figura 4.30 –Impedância *Z2* calculada pelo relé R2, para as faltas bifásicas na LT. 98
Figura 4.31 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas bifásicas na LT. 100
Figura 4.32 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas bifásicas na LT. 100
Figura 4.33 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R2, para as faltas bifásicas na LT. 101
Figura 4.34 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R2, para as faltas bifásicas na LT. 101
Figura 4.35 –Impedância *Z2* calculada pelo relé R1, para as faltas bifásicas a terra na LT. 102
Figura 4.36 –Impedância *Z2* calculada pelo relé R2, para as faltas bifásicas a terra na LT. 102
Figura 4.37 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas bifásicas-terra na LT. 104
Figura 4.38 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas bifásicas-terra na LT. 104
Figura 4.39 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R1, para as faltas bifásicas-terra na LT. 105
Figura 4.40 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R1, para as faltas bifásicas-terra na LT. 105
Figura 4.41 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R2, para as faltas bifásicas-terra na LT. 106
Figura 4.42 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R2, para as faltas bifásicas-terra na LT. 106
Figura 4.43 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R2, para as faltas bifásicas-terra na LT. 107
Figura 4.44 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R2, para as faltas bifásicas-terra na LT. 107

Figura 4.45 –Impedâncias *Z2* calculadas pelo relé R1, para as faltas atrás do relé R1. 109
Figura 4.46 –Impedâncias *Z2* calculadas pelo relé R2, para as faltas atrás do relé R1. 109
Figura 4.47 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas atrás do relé R1. 111
Figura 4.48 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas atrás do relé R1. 111
Figura 4.49 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R1, para as faltas atrás do relé R1. 112
Figura 4.50 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R1, para as faltas atrás do relé R1. 112
Figura 4.51 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R2, para as faltas atrás do relé R1. 113
Figura 4.52 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R2, para as faltas atrás do relé R1. 113
Figura 4.53 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R2, para as faltas atrás do relé R1. 114
Figura 4.54 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R2, para as faltas atrás do relé R1. 114
Figura 4.55 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta monofásica e $R_f = 0\ \Omega$. 117
Figura 4.56 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta monofásica e $R_f = 200\ \Omega$. 117
Figura 4.57 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta monofásica e $R_f = 0\ \Omega$. 117
Figura 4.58 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta monofásica e Rf = 200 Ω. 117
Figura 4.59 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta bifásica a terra e $R_f = 0\ \Omega$. ... 117
Figura 4.60 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta bifásica a terra e $R_f = 200\ \Omega$.117
Figura 4.61 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta bifásica a terra e $R_f = 0\ \Omega$. 118
Figura 4.62 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta bifásica a terra e $R_f = 200\ \Omega$. . 118
Figura 4.63 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta bifásica e $R_f = 0\ \Omega$. 118
Figura 4.64 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta bifásica e $R_f = 20\ \Omega$. 118
Figura 4.65 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta bifásica e $R_f = 0\ \Omega$. 118
Figura 4.66 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta bifásica e $R_f = 20\ \Omega$. 118
Figura 4.67 –Faltas monofásicas simulados ao longo da linha de transmissão para o sistema da figura 4.2. 119

Figura 4.68 –Impedância *Z2* calculada pelo relé R1, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 120
Figura 4.69 –Impedância *Z2* calculada pelo relé R2, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 120
Figura 4.70 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 123
Figura 4.71 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 123
Figura 4.72 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R2 e com compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 124
Figura 4.73 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R2 e com compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 124
Figura 4.74 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R2 e sem compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 125
Figura 4.75 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R2 e sem compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 125
Figura 4.76 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 126
Figura 4.77 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 126
Figura 4.78 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R2 e com compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 127
Figura 4.79 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R2 e com compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 127
Figura 4.80 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R2 e sem compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 128
Figura 4.81 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R2 e sem compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 128
Figura 4.82 –Impedância *Z2* calculada pelo relé R3, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 129
Figura 4.83 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R3, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 131
Figura 4.84 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R3, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 131

Figura 4.85 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R3, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 132
Figura 4.86 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R3, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 132
Figura 4.87 –Impedância *Z2* calculada pelo relé R4, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 134
Figura 4.88 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R4, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 135
Figura 4.89 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R4, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 135
Figura 4.90 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R4, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 136
Figura 4.91 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R4, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 136
Figura 4.92 –Impedância *Z2* calculada pelo relé R5, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 137
Figura 4.93 –Impedância *Z2* calculada pelo relé R6, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 137
Figura 4.94 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R6, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 140
Figura 4.95 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R6, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 140
Figura 4.96 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R5 e com compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 141
Figura 4.97 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R5 e com compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 141
Figura 4.98 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R5 e sem compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 142
Figura 4.99 –Polarização por tensão de sequência negativa, vista pelo relé R5 e sem compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 142
Figura 4.100 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R6, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 143
Figura 4.101 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R6, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 143

Figura 4.102 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R5 e com compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 144
Figura 4.103 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R5 e com compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 144
Figura 4.104 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R5 e sem compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 145
Figura 4.105 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R5 e sem compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR. 145
Figura 4.106 –Esquema de banco capacitor em série com PR (Metal oxide Varistor). 146
Figura 4.107 –Corrente no capacitor e corrente no PR, para a falta monofásica a 0% distância do relé R1. 147
Figura 4.108 –Tensões no capacitor, para a falta monofásica a 0% distância do relé R1. 147
Figura 4.109 –Corrente no capacitor e corrente no PR, para a falta monofásica a 100% distância do relé R1. 147
Figura 4.110 –Tensões no capacitor, para a falta monofásica a 100% distância do relé R1. 147
Figura 4.111 –Corrente no capacitor e corrente no PR, para a falta monofásica a 200% distância do relé R1. 147
Figura 4.112 –Tensões no capacitor, para a falta monofásica a 200% distância do relé R1. 147
Figura 4.113 –Energia no PR, para as faltas monofásicas na linha de transmissão. 148
Figura 4.114 –Impedância de sequência negativa, vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na linha com equipamento PR. 149
Figura 4.115 –Impedância de sequência negativa, vista pelo relé R2, para as faltas monofásicas na linha com equipamento PR. 149
Figura 4.116 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na linha com equipamento PR. 150
Figura 4.117 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na linha com equipamento PR. 150
Figura 4.118 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R2, para as faltas monofásicas na linha com equipamento PR. 151
Figura 4.119 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R2, para as faltas monofásicas na linha com equipamento PR. 151
Figura 4.120 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na linha com equipamento PR. 152

Figura 4.121 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na linha com equipamento PR. 152
Figura 4.122 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R2, para as faltas monofásicas na linha com equipamento PR. 153
Figura 4.123 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R2, para as faltas monofásicas na linha com equipamento PR. 153
Figura 4.124 –Impedância de sequência negativa calculada pelo relé R1. 155
Figura 4.125 – Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R1 para ângulo (***AngV***) igual a -65°. 156
Figura 4.126 – Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R1 para ângulo (***AngV***) igual a -85°. 157

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Desligamentos forçados no ano de 2013. 26
Tabela 1.2 – Estatística de tipo de curto-circuito. 27
Tabela 2.1 – Condições para as inversões das tensões e correntes de sequência negativa e sequência zero..... 54
Tabela 2.2 – Determinação da direção da falta para diferentes tipos de faltas..... 58
Tabela 3.1 – Parâmetros de ajuste do relé direcional com polarização por tensão. 77
Tabela 3.2 – Parâmetros de ajuste do relé direcional com polarização por corrente..... 78
Tabela 3.3 – Parâmetros de ajuste do relé direcional dos elementos 32Q e 32V. 79
Tabela 4.1 – Características dos condutores da linha de transmissão de 500 kV..... 83
Tabela 4.2 – Parâmetros elétricos para 60 Hz da linha transposta do tipo 1/6-1/3-1/3-1/6..... 83
Tabela 4.3 – Ganho para compensação em derivação da linha de transmissão. 84
Tabela 4.4 – Admitância transversal da compensação em derivação da linha de transmissão. 84
Tabela 4.5 – Reativo total da compensação em derivação da linha de transmissão..... 85
Tabela 4.6 – Dados dos transformadores de corrente e de tensão. 85
Tabela 4.7 – Ajustes das zonas "a frente" e "reversa" para os relés R1 e R2 em valores primários (Ω-prim) e secundários (Ω-sec)..... 86
Tabela 4.8 – Ajustes dos dados da linha e dos parâmetros *a0*, *a2*, *k0*, *A50QF* e *A50QR* para os relés R1 e R2. 86
Tabela 4.9 – Ajustes dos relés R1 e R2, para o método de polarização por tensão..... 87
Tabela 4.10 – Ajustes dos relés R1 e R2, para o método de polarização por corrente..... 87
Tabela 4.11 – Impedâncias de sequência negativa e zero em valores primários (Ω-prim) e secundários (Ω-sec) das redes equivalentes atrás dos relés R1 e R2, da rede elétrica da figura 5.1. 90
Tabela 4.12 – Impedâncias de sequência negativa em valores primários (Ω-prim) e secundários (Ω-sec) das redes equivalentes atrás dos relés R1 e R2, da rede elétrica da figura 5.1..... 99
Tabela 4.13 – Impedâncias *Z2* em valores primários (Ω-prim) e secundários (Ω-sec) das redes equivalentes a frente do relé R1 e rede equivalente atrás do relé R2. 108
Tabela 4.14 – Ajustes das zonas "a frente" e "reversa" para os relés R1, R2, R3, R4, R5 e R6 em valores primários (Ω-prim) e secundários (Ω-sec). 115

Tabela 4.15 – Ajustes dos dados da linha e dos parâmetros *a0*, *a2*, *k0*, *A50QF* e *A50QR* para os relés R1, R2, R3, R4, R5 e R6 115
Tabela 4.16 – Ajustes dos relés R1, R2, R3, R4, R5 e R6, para o método de polarização por tensão 116
Tabela 4.17 – Ajustes dos relés R1, R2, R3, R4, R5 e R6, para o método de polarização por corrente 116
Tabela 4.18 – Análises das inversões das tensões e correntes de sequência negativa para os relés R1 e R2. 121
Tabela 4.19 – Análises das inversões das tensões e correntes de sequência zero para os relés R1 e R2. 121
Tabela 4.20 – Análises das inversões das tensões e correntes de sequência negativa para os relés R5 e R6. 138
Tabela 4.21 – Análises das inversões das tensões e correntes de sequência zero para os relés R5 e R6. 138

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Estrutura básica da linguagem MODELS. 61
Quadro 3.2 – Modelo do transformador de corrente implementado na MODELS. 66
Quadro 3.3 – Modelo do filtro analógico implementado na MODELS. 68
Quadro 3.4 – Modelo do sample and hold implementado na MODELS. 70
Quadro 3.5 – Modelo do conversor A/D implementado na MODELS. 72
Quadro 3.6 – Modelo do buffer implementado na MODELS. 72
Quadro 3.7 – Modelo do filtro fasor implementado na MODELS. 74
Quadro 3.8 – Modelo das tensões e das correntes em sequências implementado na MODELS. 76
Quadro 3.9 – Parte do modelo do relé direcional (polarização por tensão 3V2 ou 3V0) implementado na MODELS. 77
Quadro 3.10 – Parte do modelo do relé direcional (polarização por corrente 3I2 ou 3I0) implementado na MODELS. 78
Quadro 3.11 – Modelo do relé direcional (com impedâncias Z2 e Z0) implementado na MODELS. 80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico/Digital
ATP	Alternative Transient Program
a	Operador complexo $1\angle 120°$
Z2	Impedância de sequência negativa
Z0	Impedância de sequência zero
I1	Corrente de sequência positiva
I2	Corrente de sequência negativa
I0	Corrente de sequência zero
3I0	Corrente residual
V1	Tensão de sequência positiva
V2	Tensão de sequência negativa
V0	Tensão de sequência zero
3V0	Tensão residual
32Q	Polarização por tensão de sequência negativa
32V	Polarização por tensão de sequência zero
ip	Corrente primária instantâneo do transformador de corrente
ips	Corrente secundária ideal instantânea do transformador de corrente
is	Corrente secundária real instantânea do transformador de corrente
ie	Corrente de excitação instantânea do transformador de corrente
Ve	Tensão de excitação instantânea do transformador de corrente
N	Número de espiras do transformador de corrente
Rs	Resistência do enrolamento secundário do transformador de corrente
Rb	Resistência da carga
Lb	Indutância da carga
RTC	Relação de transformação das correntes do transformador de corrente

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 ..... **26**

INTRODUÇÃO **26**

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA 26

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO 27

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO 28

1.4 PUBLICAÇÕES DECORRENTES DA PESQUISA 28

CAPÍTULO 2 ..... **29**

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA PROTEÇÃO DIRECIONAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO **29**

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 29

2.2 PROTEÇÃO DIRECIONAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO 31

2.3 COMPONENTES SIMÉTRICAS 31

2.3.1 Curto-circuito Equilibrado **31**

2.3.2 Curto-circuito Desequilibrado **32**

2.3.3 Componente simétrica para curto-circuito monofásico **33**

2.4 MÉTODOS DE POLARIZAÇÃO DA PROTEÇÃO DIRECIONAL PARA FALTA A TERRA 35

2.4.1 Polarização por tensão de sequência zero **35**

2.4.2 Polarização por tensão de sequência negativa **37**

2.4.3 Polarização por corrente de sequência zero **38**

2.4.4 Polarização por corrente de sequência negativa **39**

2.4.5 Impedância de sequência negativa e sequência zero **40**

2.4.5.1 Polarização por tensão de sequência negativa (32Q) 40

2.4.5.2 Polarização por tensão de sequência zero (32V) 41

2.4.5.3 Operação dos elementos 32Q e 32V para faltas envolvendo a terra 42

2.4.5.4 Ajustes das zonas “a frente” e “reversa” 43

2.5 ANÁLISES DAS TENSÕES E CORRENTES DE SEQUÊNCIA NEGATIVA E SEQUÊNCIA ZERO 44

2.5.1 Dependência de V_2 e V_0 com as impedâncias de sequência da rede e da linha **45**

2.5.2 Dependência de $I2$ e $I0$ com as impedâncias de sequência da rede e linha **48**

2.5.3 Medições errôneas de $V2$ e $V0$ em linhas não transpostas **50**

2.6 COMPENSAÇÃO EM SÉRIE EM LINHAS DE TRANSMISSÃO 51

2.6.1 Inversão da tensão de sequência negativa e sequência zero 52

2.6.2 Inversão da corrente de sequência negativa e sequência zero 53

2.6.3 Compensação da tensão para os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão. 54

2.6.4 Ajustes das zonas "a frente" e "reversa" dos elementos 32Q e 32V 56

2.7 TIPOS DE FALTA QUE SÃO DETERMINADOS COM OS MÉTODOS DE POLARIZAÇÃO DESCRITOS 58

CAPÍTULO 3 59

MODELAGEM DO RELÉ DIRECIONAL 59

3.1 ATP E MODELS 59

3.1.1 A linguagem MODELS 60

3.2 MODELAGEM 61

3.2.1 Modelagem do transformador de corrente (TC) 62

3.2.2 Modelagem do Relé Direcional 67

3.2.2.1 Filtro Analógico 68

3.2.2.2 Sample and hold 69

3.2.2.3 Conversor A/D 70

3.2.2.4 Buffer 71

3.2.2.5 Filtro fasor 72

3.2.2.6 Relé direcional implementado 75

CAPÍTULO 4 81

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 81

4.1 DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS 81

4.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES 85

4.2.1 Rede da figura 4.1 Linha de 300 km com compensação reativa em derivação. 86

4.2.1.1 Falta monofásica na linha de transmissão 89

4.2.1.2 Falta bifásica na linha de transmissão 98

4.2.1.3 Falta bifásica-terra na linha de transmissão 102

4.2.1.4 Faltas monofásica, bifásica e bifásica-terra atrás do relé R1. 108

4.2.2 Rede da figura 4.2, Linha de transmissão de 600 km com compensação série e compensação reativa em derivação. 115

4.2.2.1 Falta monofásica na linha de transmissão sem equipamento PR do capacitor série. 119

4.2.2.2 Falta monofásica na linha de transmissão com equipamento para-raios de ZnO (PR) do capacitor série 146

4.2.2.3 Saturação do transformador de corrente. 154

CAPÍTULO 5 158

CONCLUSÕES E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS 158

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

A energia elétrica tem grande importância para o progresso da sociedade, seu uso torna possível a automatização da produção e com isso faz com que aumente a produtividade e melhore as condições de vida dos homens. Então se pode dizer que os homens são cada vez mais dependentes da energia elétrica, e é por isso que a energia elétrica tem que ser fornecida de forma continua, confiável e com qualidade. O bom desempenho da proteção dos sistemas elétricos é muito importante para manter a continuidade da energia elétrica, já que a proteção tem que ser seletiva, rápida e confiável, a fim de extinguir as faltas de forma apropriada.

A tabela 1.1 se apresenta a porcentagem de desligamentos forçados pelos equipamentos do sistema elétrico do Brasil no ano de 2013 causados por vários tipos de ocorrências.

Tabela 1.1 – Desligamentos forçados no ano de 2013. [1]

Equipamento	**Desligamentos [%]**
Linha de transmissão	69,30
Grupos geradores	9,30
Transformadores de potência	13,90
Barramentos	1,40
Reatores	1,20
Banco de capacitores	3,70
Compensadores síncronos	0,60
Compensadores estáticos	0,70

As linhas de transmissão são os componentes que mais sofrem desligamentos forçados devido aos seus longos comprimentos, pois elas percorrem vastas regiões e estão sujeitas a todos os tipos de perturbações naturais, ambientais e operacionais. Os desligamentos também podem ser contabilizados ao longo dos meses do ano, o que varia em cada região dependendo, principalmente, das condições climáticas. Pode-se acrescentar a essas estatísticas as interrupções quanto ao tipo de curto-circuito, como é mostrado na tabela 1.2.

[1] Dados do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico).

Tabela 1.2 – Estatística de tipo de curto-circuito.

Tipo de falta	Ocorrência [%]
Curto-circuito trifásico	8
Curto-circuito bifásico	14
Curto-circuito monofásico	78

O curto-circuito monofásico é o mais frequente nas linhas de transmissão. Nesse contexto, entram em cena o bom desempenho dos relés direcionais, de modo a garantir a continuidade do serviço, reduzir ao mínimo os danos à vida em casos de falha e que as perturbações sejam extintas rápida e apropriadamente, evitando-se o desencadeamento de apagões de energia de grandes proporções.

A proteção direcional deve determinar a direção das faltas que atingem o sistema elétrico de potência e é utilizada pelas proteções de sobrecorrente, distância e teleproteção. A proteção de sobrecorrente precisa de uma proteção direcional quando o sistema elétrico é formado por vários geradores e linhas paralelas, ou se o sistema elétrico for do tipo malha fechada. Nestes casos a coordenação seletiva dos elementos de sobrecorrente é complexa e para facilitar essa coordenação se utiliza os elementos direcionais. A proteção de distância precisa de um elemento direcional quando se tem geradores conectados em ambos os extremos da linha de transmissão.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo da presente pesquisa é apresentar a modelagem de um relé direcional no ATP, usando a linguagem MODELS, a fim de avaliar o seu desempenho quando aplicado na proteção de Linhas de Transmissão frente a curto-circuito monofásico, bifásico e bifásico a terra. Como objetivos específicos, tem-se:

- Fazer uma revisão dos diferentes métodos de polarização da proteção direcional para curto-circuito monofásico, que também podem ser aplicados para curto-circuito bifásico e bifásico a terra.
- Implementar o algoritmo da proteção direcional empregados nos relés de sobrecorrentes para a detecção da direção de curto-circuito monofásico, bifásico e bifásico a terra.

- Avaliar os ajustes dos relés direcionais implementados para linhas de transmissão longas com compensação reativa em derivação (ou shunt) e compensação reativa em série.
- Analisar a operação dos relés direcionais implementados no caso em que o transformador de corrente opere na região saturada.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos com a seguinte estrutura:

No Capítulo 2 realiza-se a revisão teórica da proteção direcional abordando os métodos de polarização que existem nos relés comerciais para a detecção de curto-circuito de tipo monofásico.

No Capítulo 3 descrevem-se detalhadamente todos os passos para a modelagem do transformador de corrente e da proteção direcional, explicando suas funções e como foram implementadas.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados e as análises de simulações dos sistemas elétricos que foram utilizados.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões dos estudos realizados e indicados alguns temas ainda por explorar que podem dar continuidade a este trabalho.

1.4 PUBLICAÇÕES DECORRENTES DA PESQUISA

Jacqueline Panez, Maria C. Tavares. “Modelagem de um Relé de Proteção Direcional de Linhas de Transmissão”, Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE 2016), em Natal – Rio Grande do Norte, 22 - 25 de Maio, 2016.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA PROTEÇÃO DIRECIONAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são apresentados alguns trabalhos que tratam da modelagem do transformador de corrente e a modelagem das proteções dos sistemas elétricos que foram utilizados na presente pesquisa.

Em [1], o autor representa o transformador de corrente (TC) utilizando o modelo do transformador saturado do EMTP/ATP e a compara as simulações realizadas com as oscilografias dos testes de saturação realizados no laboratório.

Em [2], os autores apresentam a modelagem do TC utilizando as ferramentas dos softwares ATP-EMTP, MODELS-TACS, TOP e MATHCAD. Também fazem uma análise dos eventos transitórios para compreender melhor a resposta dos modelos dos relés digitais.

Em [3], os autores apresentam o uso de um conjunto de ferramentas de software-Electromagnetic Transient Program (EMTP), o processador de saída (TOP) e MATHCAD para modelar eventos transitórios no sistema de energia, bem como a resposta do relé para esses eventos.

Em [4], o autor modela o TC utilizando a norma IEEE no.C37.110, onde apresenta as equações matemática do modelo do TC, incluindo a saturação do TC. Este trabalho foi utilizado na presente pesquisa para modelar o TC na MODELS no ATP.

Em [5], os autores apresentam a modelagem do sistema elétrico no ATP e dos relés de distância e sobrecorrente, sendo as últimas feitas na MODELS do ATP utilizando a linguagem C++. O relé é modelado de forma semelhante aos relés digitais: com filtro analógico, conversor A/D e algoritmo do relé.

Em [6], os autores apresentam a modelagem da proteção de distância empregando a ferramenta de MATLAB. O desempenho do modelo do relé de distância foi verificado usando dados sobre diferentes falhas geradas pelo programa de transitórios eletromagnéticos (EMTP-ATP). Os dados gerados por EMTP-ATP são sinais de tensão e corrente que são aplicados no simulador do relé, que avalia a trajetória da impedância da falha entre as zonas do relé de distância no plano R-X.

Em [7], os autores apresentam a modelagem e simulação da proteção diferencial de linhas de transmissão através do ATP e do ambiente MODELS. A modelagem do relé é realizada com relés digitais que tem filtro analógico, circuito grampeador, sample and holder, conversor A/D, buffer, estimação de fasores, e a proteção diferencial de linhas de transmissão no plano alfa.

Em [8], os autores apresentam a implementação de um relé de distância utilizando a linguagem MODELS no EMTP. Foram modelados os filtros anti-aliasing, de remoção da componente DC e de extração da componente fundamental, além da própria função de distância. As simulações de faltas fase-terra e fase-fase foram feitas em um circuito radial composto de gerador, linha de transmissão e carga.

Os sistemas de transmissão de hoje em dia são cada vez mais complexos em função do tamanho da malha e pela inserção cada vez maior da geração distribuída. Por este motivo, os elementos direcionais são cada vez mais utilizados para supervisionar os elementos de proteções do sistema elétrico. As proteções que precisam dos elementos direcionais são as proteções de sobrecorrente, distância e teleproteção [9] [10] [11] [12].

A proteção de sobrecorrente precisa de um elemento direcional quando o sistema elétrico é de malha fechada, já que nesse caso é muito difícil fazer uma coordenação da proteção de sobrecorrente. O elemento direcional faz com que a proteção de sobrecorrente opere somente para faltas numa direção, ou para frente ou para trás, a fim de simplificar a coordenação da proteção [9] [11].

A proteção de distância precisa de um elemento direcional quando se tem geradores conectados a ambos os extremos da linha de transmissão, sendo que nestes casos pode ocorrer sobrealcance ou subalcance da proteção de distância. Nesse caso se utiliza a teleproteção supervionando os elementos direcionais. [9].

A proteção direcional pode atuar erroneamente devido a muitos fatores, como é o caso de linhas de transmissão com compensação em série. Nestes casos podem ocorrer inversões dos sinais de corrente e tensão medidos [13].

Neste capítulo são descritos os métodos de polarização da proteção direcional que são utilizados para curto-circuito monofásico, assim como é feita a análise da proteção direcional de linhas com compensação série.

2.2 PROTEÇÃO DIRECIONAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

A proteção direcional precisa de duas grandezas para atuar, sendo estas a polarização e a operação, ambas utilizando a tensão ou a corrente. A grandeza de polarização tem uma referência fixa, ou fonte de polarização. Para alguma quantidade "operar" (por exemplo, a corrente de sequência zero) esta deve ser comparada com a referência fixa [10]. A fonte de polarização não deve mudar de direção, independentemente da localização da falta, como se mostra na figura 2.1.

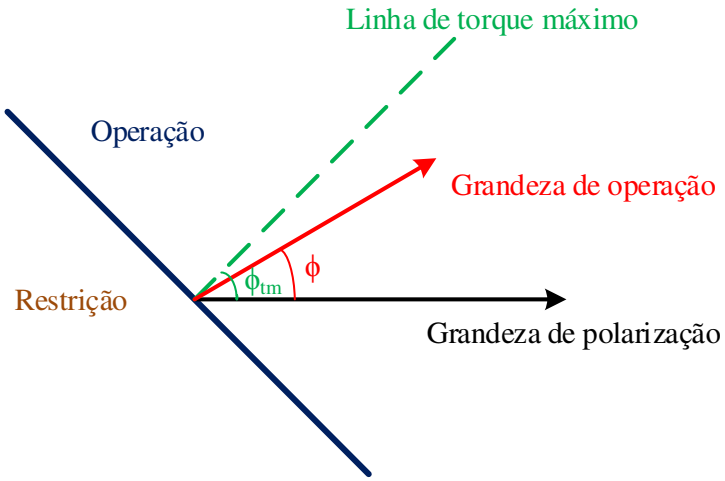


Figura 2.1 – Operação da proteção direcional.

2.3 COMPONENTES SIMÉTRICAS

2.3.1 Curto-circuito Equilibrado

O curto-circuito é dito equilibrado quando as tensões e as correntes das três fases se encontram em completa simetria, isto é, as três fases são iguais em módulo e defasadas entre si de 120°. Isto permite a representação do sistema somente pelo circuito associado à sua componente de sequência positiva, o que é comumente denominado de representação monofásica do sistema. Dentre todos os tipos de curto-circuito apenas o trifásico é equilibrado, ou seja, apresenta somente componentes de sequência positiva [14].

2.3.2 Curto-circuito Desequilibrado

O curto-circuito é dito desequilibrado quando as tensões e as correntes das três fases não são iguais em módulo e/ou têm defasagens entre si diferentes de 120°. Os tipos de curto-circuito desequilibrados são monofásico, bifásico e bifásico a terra [14].

Um método que auxilia o cálculo de curto-circuito desequilibrados se baseia no Teorema de Fortescue, que tem como enunciado o seguinte: "Um sistema trifásico desequilibrado pode ser descomposto em três sistemas equilibrados e está decomposição é única". Estes sistemas decompostos são denominados sequência positiva, sequência negativa e sequência zero, como se mostra na figura 2.2.

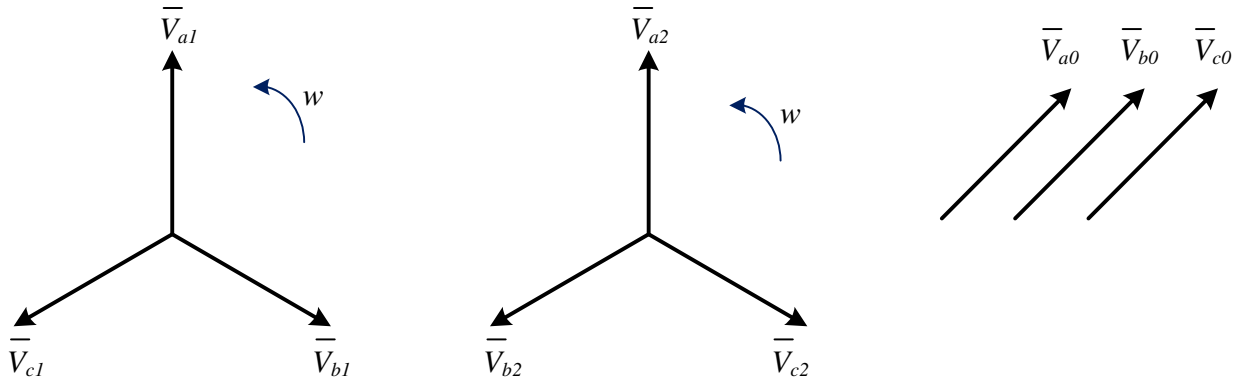


Figura 2.2 – Componentes simétricos: de esquerda para a direita – sequência positiva, sequência negativa e sequência zero.

Os fasores de tensão em função das componentes de sequências podem ser representados na forma matricial, como se mostra na equação 2.1:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_{a0} \\ \bar{V}_{a1} \\ \bar{V}_{a2} \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

Para encontrar as componentes de sequência positiva, negativa e zero da fase A ($\bar{V}_{a1}$, $\bar{V}_{a2}$, $\bar{V}_{a0}$) basta aplicar a matriz inversa, como se mostra pela equação 2.2:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{a0} \\ \bar{V}_{a1} \\ \bar{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

Nas quais $\boldsymbol{a}$ e $\boldsymbol{a^2}$ são operadores que podem ser representados como números complexos, na forma retangular ou exponencial, como se mostra nas equações 2.3 e 2.4:

$$a = \frac{-1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j2\pi/3} \tag{2.3}$$

$$a^2 = \frac{-1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j4\pi/3} \tag{2.4}$$

As equações 2.1 e 2.2 também são válidas para as correntes.

2.3.3 Componente simétrica para curto-circuito monofásico

Seja a ocorrência de um curto-circuito monofásico na fase A da barra *k*, como é mostrado na figura 2.3. Onde, Z_f é a resistência de falta.

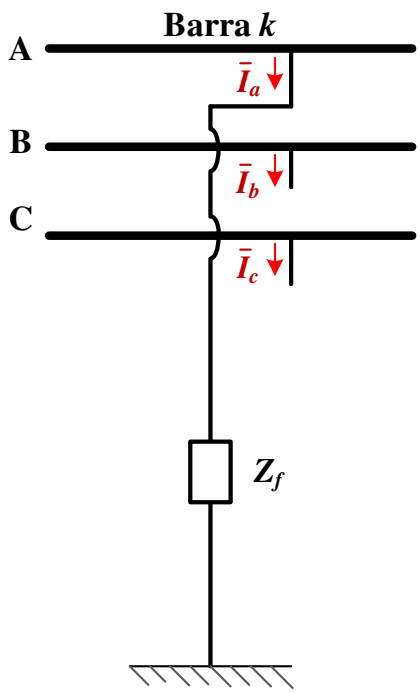


Figura 2.3 – Curto-circuito monofásico na barra k.

As correntes de falta nas fases B e C ($\bar{I}_b$ e $\bar{I}_c$) são zero. Procedendo à transformação das componentes de fases em componentes de sequência da fase A, de acordo com a equação 2.2, se tem:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{a0} \\ \bar{I}_{a1} \\ \bar{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b = 0 \\ \bar{I}_c = 0 \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

$$\bar{I}_{a0} = \bar{I}_{a1} = \bar{I}_{a2} = \frac{1}{3} \cdot \bar{I}_a \tag{2.6}$$

Pela análise da expressão da equação 2.6, observa-se que as correntes de sequência positiva, negativa e zero são iguais. Isso equivale a conectar os diagramas de impedâncias de sequência positiva, negativa e zero em série [14], como se mostra na figura 2.4.

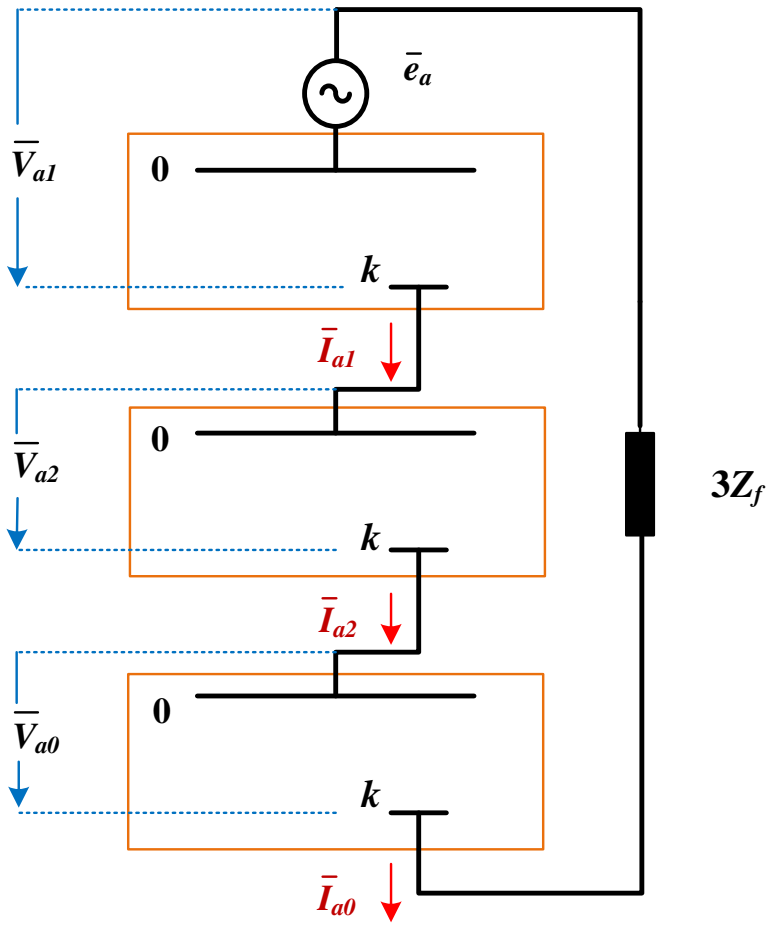


Figura 2.4 – Conexão das redes de sequência positiva, negativa e zero para um curto-circuito monofásico na barra k.

Para o cálculo da corrente de curto-circuito deve-se encontrar a impedância equivalente do circuito da figura 2.4, em seus componentes de sequências (impedância equivalente de sequência positiva, negativa e zero). As tensões de sequência negativa e zero são opostas à de sequência positiva, como se mostra na figura 2.5c.

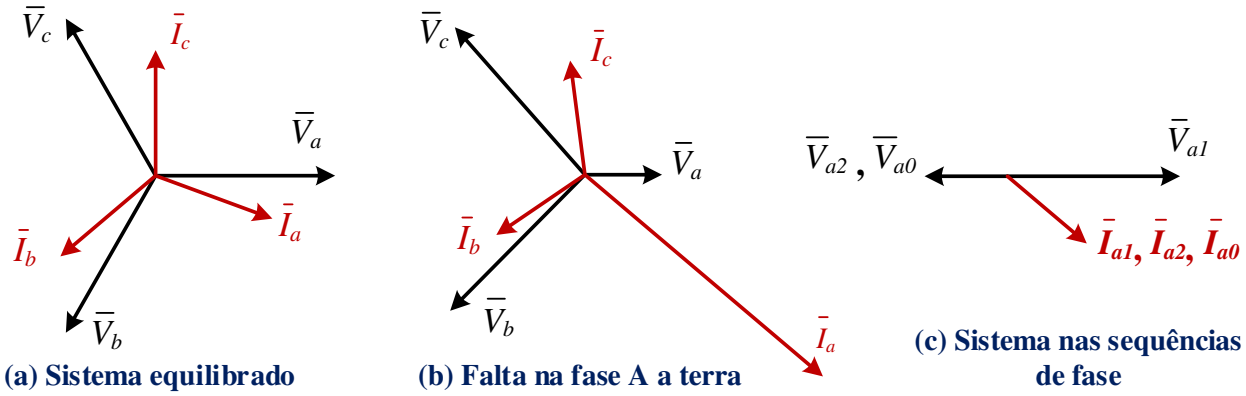


Figura 2.5 – Sistema de fasores, antes e durante um curto-circuito na fase A a terra.

2.4 MÉTODOS DE POLARIZAÇÃO DA PROTEÇÃO DIRECIONAL PARA FALTA A TERRA

Os elementos direcionais tradicionais utilizam as componentes de sequência negativa ou sequência zero, para determinar a direção de curto-circuito monofásico. Verifica-se que essas duas sequências sempre estão presentes e têm as mesmas orientações tanto nas correntes como nas tensões, como foi mostrado na seção 2.2.3.

Nesta seção serão apresentados os métodos de polarização que são utilizados em dois relés direcionais comerciais. Os relés 7SJ82/7SA87 da marca SIEMENS [15] [16] que operam com dois métodos de polarização, sendo estes o método de polarização por tensão e método de polarização por corrente. O relé SEL421 da marca SCHWEITZER INC [17] [18] que opera com o método de impedâncias. Ambos com sequência negativa e sequência zero.

2.4.1 Polarização por tensão de sequência zero

Neste método o elemento de polarização é a tensão residual ($3\bar{V}_0$) e o elemento de operação é a corrente residual ($3\bar{I}_0$). A sequência zero está presente somente em faltas que envolvam a terra [15].

A tensão residual ($3\bar{V}_0$) é medida através dos três transformadores de tensão com o secundário ligado em delta aberto, como se mostra na figura 2.6. A corrente residual ($3\bar{I}_0$) é medida através dos três transformadores de corrente com o secundário ligado em estrela aterrado, como se mostra na figura 2.7.

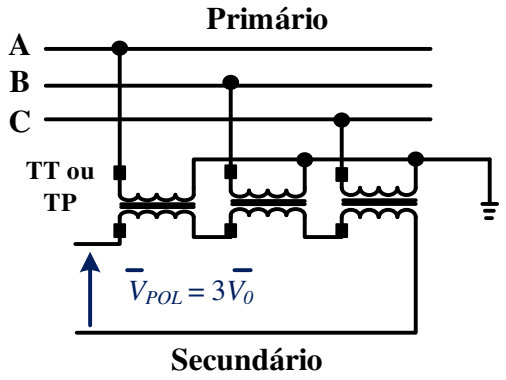


Figura 2.6 – Conexão dos transformadores de tensão para a medição da tensão de sequência zero.

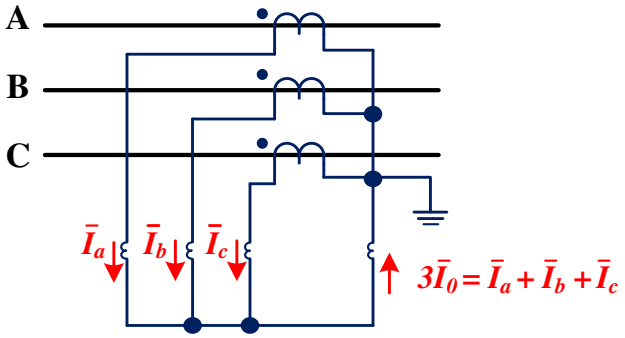


Figura 2.7 – Conexão dos transformadores de corrente para a medição da corrente de fase e corrente de sequência zero.

O diagrama fasorial indicado na figura 2.8, representa as tensões e as correntes de fase durante um curto-circuito monofásico na fase A. A soma vetorial das tensões de fase resulta na tensão residual ($3\bar{V}_0$) que em operação normal do sistema é zero. A soma vetorial das correntes de fase resulta na corrente residual ($3\bar{I}_0$), como se mostra na figura 2.8.

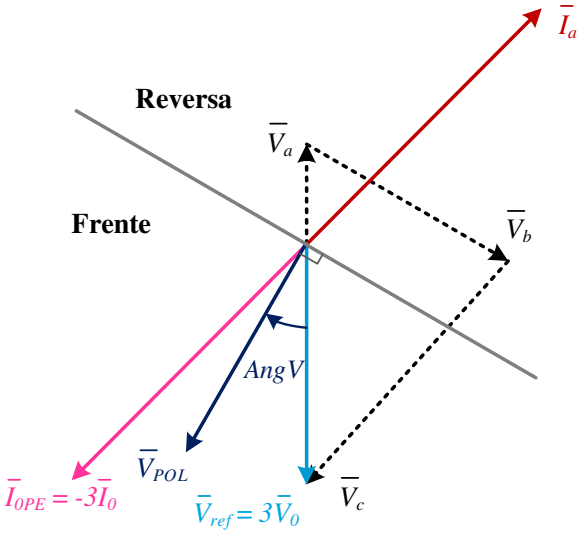


Figura 2.8 – Diagrama fasorial de operação do relé direcional, com método de polarização por tensão de sequência zero.

A tensão residual $3\bar{V}_0$ é o elemento de polarização ($\bar{V}_{ref}$) e mediante um ajuste de ângulo de torque ($AngV$), se rotaciona a tensão de referência ($\bar{V}_{ref}$). A nova tensão de referência é $\bar{V}_{POL}$, e a partir desta nova tensão o relé direcional define as zonas de operação. A zona "a frente" é o plano perpendicular à tensão de referência ($\bar{V}_{POL}$) e para frente. A zona "reversa" é a zona oposta à zona de frente, como se mostra na figura 2.8.

Para que o relé possa operar é necessário obter a corrente residual ($3\bar{I}_0$). O relé inverte o sentido da corrente residual (-$3\bar{I}_0$), e se a corrente cair na zona "a frente" o relé declara a falta para frente, e se cair na zona "reversa" o relé declara a falta reversa.

2.4.2 Polarização por tensão de sequência negativa

Neste método o elemento de polarização é a tensão de sequência negativa, e o elemento de operação é a corrente de sequência negativa [15]. O modo de operação é igual ao caso de polarização por tensão de sequência zero, só que a tensão e a corrente de sequência negativa são calculadas pelo relé direcional, com as equações 2.7 e 2.8 respectivamente.

$$\bar{V}_2 = \frac{1}{3} \cdot (\bar{V}_a + a^2 \cdot \bar{V}_b + a \cdot \bar{V}_c) \tag{2.7}$$

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{3} \cdot (\bar{I}_a + a^2 \cdot \bar{I}_b + a \cdot \bar{I}_c) \tag{2.8}$$

A conexão do transformador de tensão é apresentada na figura 2.9, e a conexão do transformador de corrente é apresentada na figura 2.7.

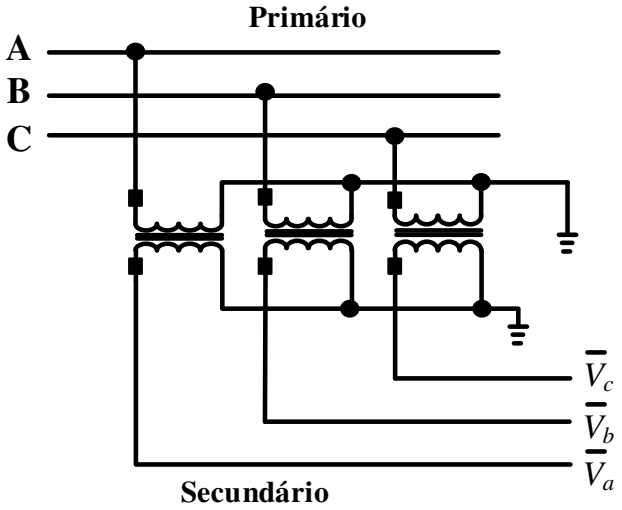


Figura 2.9 – Conexão dos transformadores de tensão para a medição das tensões de fase.

O diagrama fasorial indicado na figura 2.10, representa as tensões e as correntes de fase durante um curto-circuito monofásico na fase A. A soma em componentes simétricas das tensões de fase ($3\bar{V}_2 = \bar{V}_a + a^2 \cdot \bar{V}_b + a \cdot \bar{V}_c$) resulta na tensão de sequência negativa ($3\bar{V}_2$). A soma em componentes simétricas das correntes de fase resulta na corrente de sequência negativa ($3\bar{I}_2$), como se apresenta na figura 2.10.

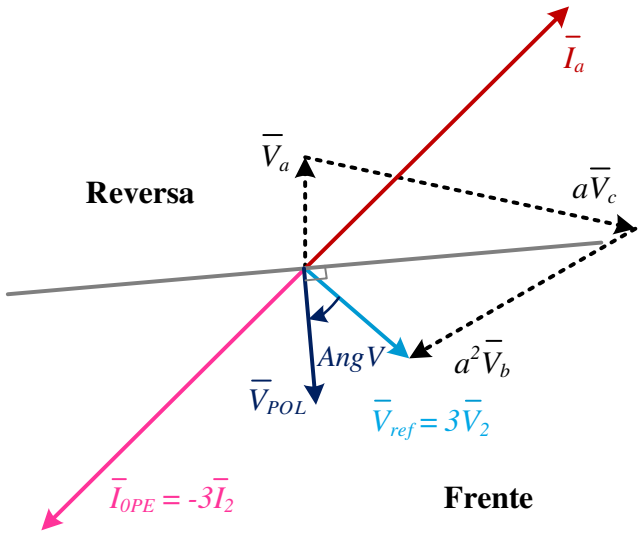


Figura 2.10 – Diagrama fasorial de operação do relé direcional, com método de polarização por tensão de sequência negativa.

A tensão de sequência negativa $3\bar{V}_2$ é o elemento de polarização ($\bar{V}_{ref}$) e mediante um ajuste de ângulo de torque ($AngV$), se rotaciona a tensão de referência ($\bar{V}_{ref}$). A nova tensão de referência é $\bar{V}_{POL}$, e a partir desta nova tensão o relé direcional define as zonas de operação. A zona "a frente" é o plano perpendicular à tensão de referência ($\bar{V}_{POL}$) e para frente. A zona "reversa" é a zona oposta à zona de frente, como se mostra na figura 2.10.

Para que o relé possa operar se precisa da corrente de sequência negativa ($3\bar{I}_2$). O relé inverte o sentido da corrente de sequência negativa (-$3\bar{I}_2$), e se a corrente cair na zona "a frente" o relé declara a falta para frente, e se cair na zona "reversa" o relé declara a falta reversa.

2.4.3 Polarização por corrente de sequência zero

Neste método o elemento de polarização é a corrente de sequência zero que sempre se encontra no eixo real positivo do plano complexo, como se mostra na figura 2.11. O elemento de operação é a tensão de sequência zero [16]. As regiões "a frente" e "reversa" são definidas

através dos ângulos *AngA* e *AngB*, como se mostra na figura 2.11. A referência para os dois ângulos é definida como o eixo real positivo. Para que o relé possa operar se monitora a tensão de sequência zero. Se a tensão cair na zona "a frente" o relé declara a falta para frente, e se cair na zona "reversa" o relé declara a falta reversa.

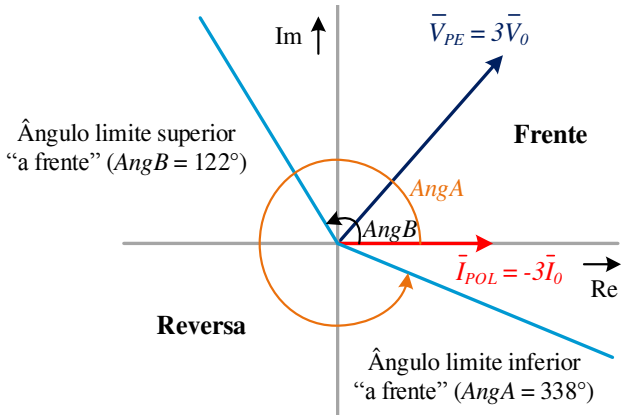


Figura 2.11 – Diagrama fasorial de operação do relé direcional, com método de polarização por corrente de sequência zero.

2.4.4 Polarização por corrente de sequência negativa

Neste método o elemento de polarização é a corrente de sequência negativa que sempre se encontra no eixo real positivo do plano complexo, como se mostra na figura 2.12. O modo de operação é igual ao caso de polarização por corrente de sequência zero [16], como se mostra na figura 2.12. Para que o relé possa operar se monitora a tensão de sequência negativa. Se a tensão cair na zona "a frente" o relé declara a falta para frente, e se cair na zona "reversa" o relé declara a falta reversa.

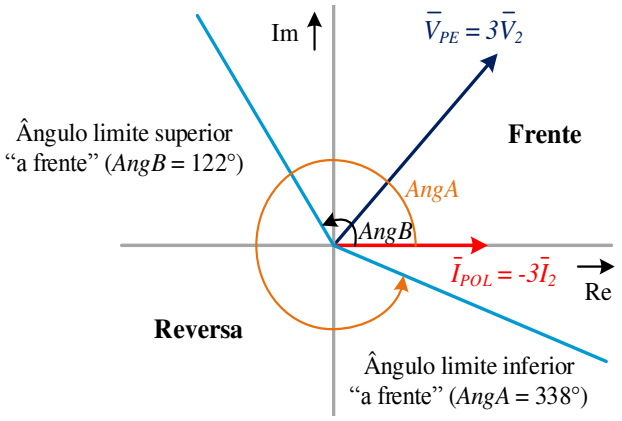


Figura 2.12 – Diagrama fasorial de operação do relé direcional, com método de polarização por corrente de sequência negativa.

2.4.5 Impedância de sequência negativa e sequência zero

Os elementos descritos na seção anterior requerem que os usuários selecionem as quantidades de polarização e operação para cada aplicação da rede, e também selecionem um ajuste ótimo para o ângulo de torque ($AngV$) da proteção direcional com polarização por tensão. Uma modificação na configuração da rede pode causar a operação indevida dos elementos descritos na seção anterior [18].

Essas limitações dos elementos direcionais tradicionais são eliminadas pelos elementos direcionais que respondem a impedâncias de sequência negativa e sequência zero, que resolvem o problema de sensibilidade de tensão dos elementos tradicionais polarizados por tensão para falta a terra remota ou falta de alta impedância.

2.4.5.1 Polarização por tensão de sequência negativa (32Q)

O elemento 32Q serve como elemento direcional de terra. Os relés numéricos fazem o cálculo de seus componentes simétricos [19] [20] [21]. A sequência negativa é usada pelo elemento 32Q que calcula a impedância de sequência negativa ($Z2$) para determinar a direção de curto-circuito monofásico, através da equação 2.9.

$$Z2 = \frac{Re[\bar{V}_2 \cdot (1 \angle\theta_1 \cdot \bar{I}_2)^*]}{|\bar{I}_2|^2} \tag{2.9}$$

Onde:

θ_1: Ângulo da impedância de sequência positiva da linha de transmissão

$*$: Vetor conjugado

O elemento 32Q compara $Z2$ com dois limites de ajustes do relé direcional. Se $Z2$ está abaixo do limite $Z2$F (ajuste do relé para a zona “a frente”), o elemento 32Q declara uma falta na direção “a frente”. Se $Z2$ está acima do limite $Z2$R (ajuste do relé para a zona “reversa”), o elemento 32Q declara uma falta na direção “reversa”, como é mostrado na figura 2.13.

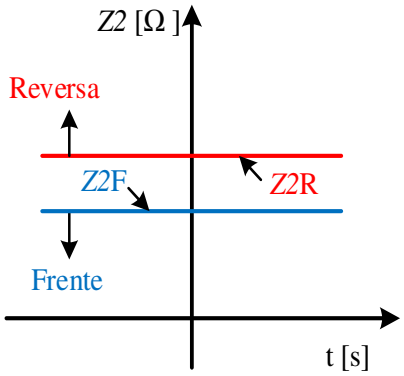


Figura 2.13 – Característica de operação do elemento 32Q.

2.4.5.2 Polarização por tensão de sequência zero (32V)

O elemento 32V opera da mesma forma que o elemento 32Q, sendo que calcula a impedância de sequência zero [18] [20] [22], pela equação 2.10.

$$Z0 = \frac{Re[3\bar{V}_0 \cdot (1\angle\theta_0 \cdot 3\bar{I}_0)^*]}{|3\bar{I}_0|^2} \tag{2.10}$$

Onde:

θ_0: Ângulo da impedância de sequência zero da linha de transmissão

$*$: Vetor conjugado

O elemento 32V compara $Z0$ com dois limites de ajustes do relé direcional. Se $Z0$ está abaixo do limite $Z0$F (ajuste do relé para a zona "a frente"), o elemento 32V declara uma falta na direção "a frente". Se $Z0$ está acima do limite $Z0$R (ajuste do relé para a zona "reversa"), o elemento 32V declara uma falta na direção "reversa", como é mostrado na figura 2.14.

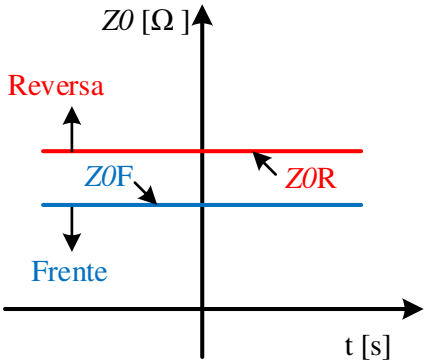


Figura 2.14 – Característica de operação do elemento 32V.

2.4.5.3 Operação dos elementos 32Q e 32V para faltas envolvendo a terra

A figura 2.15 mostra a rede de sequência negativa para uma falta a terra no extremo remoto da linha protegida, num sistema com duas fontes, nas quais Z_{2S} e Z_{2R} são as impedâncias de sequência negativa das fontes local e remota, Z_{2L} é a impedância de sequência negativa da linha protegida [22].

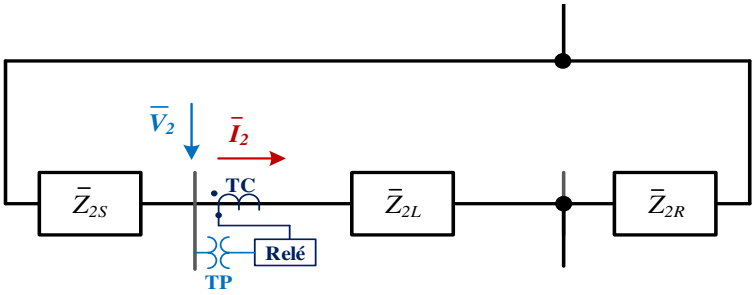


Figura 2.15 – Rede de sequência negativa para uma falta a terra no extremo da linha protegida num sistema com duas fontes.

O elemento 32Q mede a tensão de sequência negativa $\bar{V}_2$ e a corrente de sequência negativa $\bar{I}_2$. Para esta falta na direção "a frente", a tensão $\bar{V}_2$ é:

$$\bar{V}_2 = -\bar{I}_2 . \bar{Z}_{2S} \tag{2.11}$$

Então a impedância que o relé mede é:

$$Z2 = \left|\frac{\bar{V}_2}{\bar{I}_2}\right| = -|\bar{Z}_{2S}| \tag{2.12}$$

Para qualquer localização de falta na direção "a frente" o elemento direcional mede a impedância de sequência negativa do sistema equivalente atrás do relé e de sinal negativo.

A figura 2.16 mostra a rede de sequência negativa para uma falta a terra na direção "reversa" do relé [22].

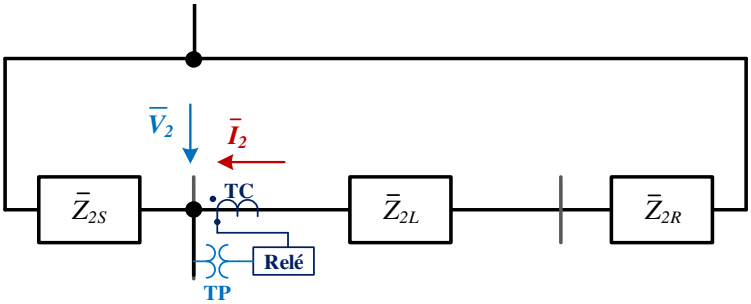


Figura 2.16 – Rede de sequência negativa para uma falta a terra atrás do relé num sistema com duas fontes.

O relé mede a impedância de sequência negativa equivalente a frente dele e de sinal positivo, como se apresenta pela equação 2.13.

$$Z2 = \left|\frac{-\bar{V}_2}{-\bar{I}_2}\right| = |\bar{Z}_{2L} + \bar{Z}_{2R}| \tag{2.13}$$

A operação do elemento 32V para faltas a terra é igual a do elemento 32Q.

2.4.5.4 Ajustes das zonas “a frente” e “reversa”

Para os ajustes das zonas “a frente” e “reversa” dos elementos 32Q (“$Z2F$ = a frente” e “$Z2R$ = reversa”) e 32V (“$Z0F$ = a frente” e “$Z0R$ = reversa”) se deve ter em conta as impedâncias que o relé mede para faltas a frente e atrás [17], como se explicou na seção 2.3.5.3. Nas figuras 2.17 e 2.18 se apresentam as zonas de operação “a frente” e “reversa” dos elementos 32Q e 32V, com os valores das impedâncias que o relé mede para faltas a frente e atrás, onde um ajuste ótimo para os dois elementos são os que se apresentam nas equações 2.14 a 2.17.

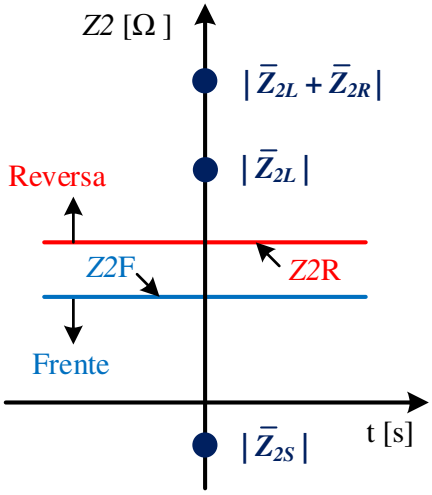


Figura 2.17 – Ajustes das zonas “a frente” e “reversa” do elemento 32Q

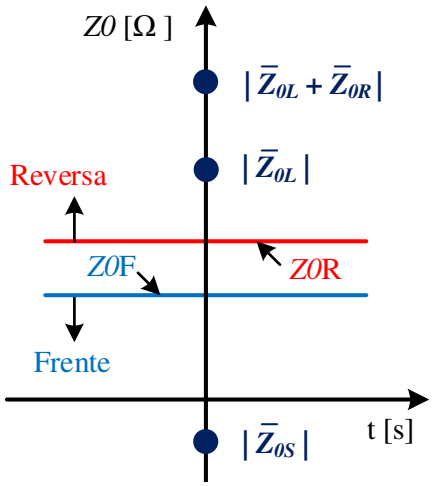


Figura 2.18 – Ajustes das zonas “a frente” e “reversa” do elemento 32V

$$Z_{2F} = \frac{Z_{2L\,(\mathrm{sec})}}{2} \tag{2.14}$$

$$Z_{2R} = Z_{2F} + \frac{1}{2 * I_{N(\mathrm{sec})}} \tag{2.15}$$

$$Z_{0F} = \frac{Z_{0L\ (\mathrm{sec})}}{2} \tag{2.16}$$

$$Z_{0R} = Z_{0F} + \frac{1}{2 * I_{N(\mathrm{sec})})} \tag{2.17}$$

As impedâncias de sequência zero e sequência negativa da linha devem ser calculadas em valores secundários ($Z_{0L\ (\mathrm{sec})}$, $Z_{2L\ (\mathrm{sec})}$), através das equações 2.18 e 2.19.

$$Z_{0L\ (\mathrm{sec})} = \frac{Z_{0L}}{\left(\frac{V_{N(\mathrm{prim})}}{V_{N(\mathrm{sec})}}\right) \Big/ \left(\frac{I_{N(\mathrm{prim})}}{I_{N(\mathrm{sec})}}\right)} \tag{2.18}$$

$$Z_{2L\ (\mathrm{sec})} = \frac{Z_{2L}}{\left(\frac{V_{N(\mathrm{prim})}}{V_{N(\mathrm{sec})}}\right) \Big/ \left(\frac{I_{N(\mathrm{prim})}}{I_{N(\mathrm{sec})}}\right)} \tag{2.19}$$

Onde:

$V_{N(\mathrm{prim})}$*:* Tensão nominal do primário do transformador de tensão.

$V_{N(\mathrm{sec})}$*:* Tensão nominal do secundário do transformador de tensão.

$I_{N(\mathrm{prim})}$*:* Tensão nominal do primário do transformador de corrente.

$I_{N(\mathrm{sec})}$*:* Tensão nominal do secundário do transformador de corrente.

2.5 ANÁLISES DAS TENSÕES E CORRENTES DE SEQUÊNCIA NEGATIVA E SEQUÊNCIA ZERO

Para avaliar qual das duas sequências (sequência negativa ou sequência zero) se deve de utilizar para a proteção direcional, se deve fazer uma análise de curto-circuito monofásico e avaliar se os valores de tensão e corrente são suficientes para que a proteção seja ativada, já que os relés precisam de um valor mínimo de ajuste.

As magnitudes de tensão de sequências negativa e zero estão diretamente relacionadas com a impedância da fonte de Thevenin atrás do relé. Além disto, linhas não transpostas podem produzir desequilíbrio de tensão e corrente, resultando em valores de tensão e corrente de sequência zero e negativa. Estes pequenos valores devem ser menores do que os gerados pelas faltas de modo a não provocar a operação indevida do elemento direcional.

2.5.1 Dependência de V_2 e V_0 com as impedâncias de sequência da rede e da linha

Na figura 2.19 se apresentam os circuitos de sequências (positiva, negativa e zero) de uma rede elétrica de duas fontes. Apresenta-se uma falta monofásica na linha a uma distância "m" da localização do relé. As máximas tensões de sequência zero e sequência negativa aparecem no ponto de falta. Sejam $\bar{Z}_0$, $\bar{Z}_1$ e $\bar{Z}_2$ as impedâncias de sequências equivalentes da rede no ponto de falta e considerando que as impedâncias de sequência negativa e sequência positiva são iguais, se têm as tensões em componentes de sequências (sendo a tensão $\bar{E}_{eq}$ equivalente das tensões das fontes $\bar{E}_S$ e $\bar{E}_R$ na condição em pré-falta):

$$\bar{V}_{2F} = -\frac{\bar{E}_{eq} \cdot \bar{Z}_2}{\bar{Z}_0 + \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} = -\frac{\bar{E}_{eq} \cdot \bar{Z}_1}{\bar{Z}_0 + 2.\bar{Z}_1} \tag{2.20}$$

$$\bar{V}_{0F} = -\frac{\bar{E}_{eq} \cdot \bar{Z}_0}{\bar{Z}_0 + \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} = -\frac{\bar{E}_{eq} \cdot \bar{Z}_0}{\bar{Z}_0 + 2.\bar{Z}_1} \tag{2.21}$$

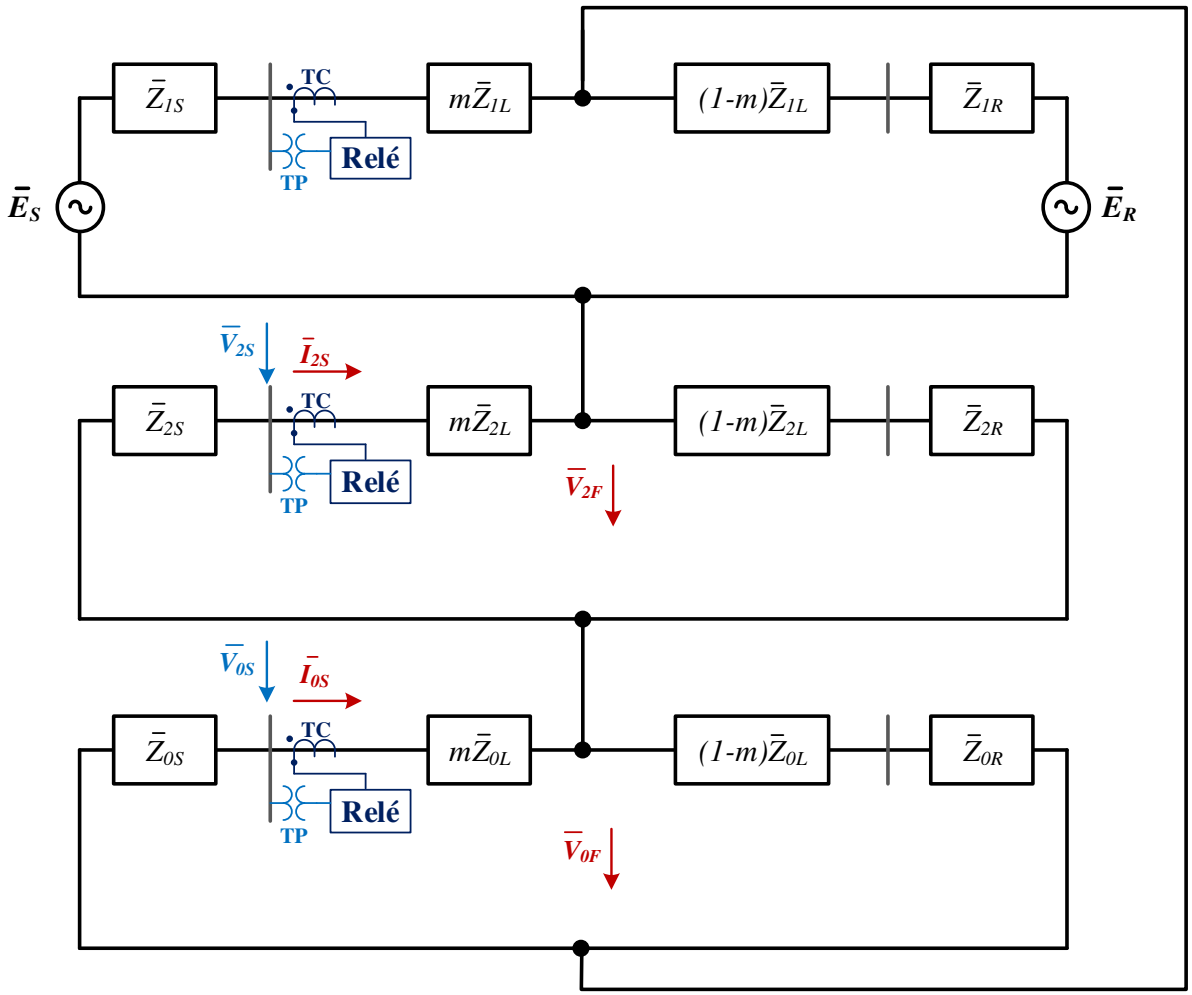


Figura 2.19 – Rede elétrica em componentes de sequências, para uma falta monofásica na linha.

Dividindo por $\bar{E}_{eq}$ às tensões das equações 2.20 e 2.21, se tem em valores por unidade ($\bar{v}_{2F}$ e $\bar{v}_{2F}$):

$$\bar{v}_{2F} = -\frac{\bar{Z}_2/\bar{Z}_1}{\bar{Z}_0/\bar{Z}_1 + 2 \cdot \bar{Z}_1/\bar{Z}_1} = -\frac{1}{\bar{Z}_0/\bar{Z}_1 + 2} \tag{2.22}$$

$$\bar{v}_{0F} = -\frac{\bar{Z}_0/\bar{Z}_1}{\bar{Z}_0/\bar{Z}_1 + 2 \cdot \bar{Z}_1/\bar{Z}_1} = -\frac{\bar{Z}_0/\bar{Z}_1}{\bar{Z}_0/\bar{Z}_1 + 2} \tag{2.23}$$

Na figura 2.20 se mostram os módulos das tensões de sequência negativa e zero no ponto de falta com relação a Z_0/Z_1. Deste ponto de vista, V_2 seria claramente a escolha preferida como uma fonte de polarização para os sistemas com uma razão de Z_0/Z_1 menor do que 1. De modo semelhante, para os sistemas que têm uma relação Z_0/Z_1 mais elevada, V_0 seria preferível, se este fosse o único critério a considerar.

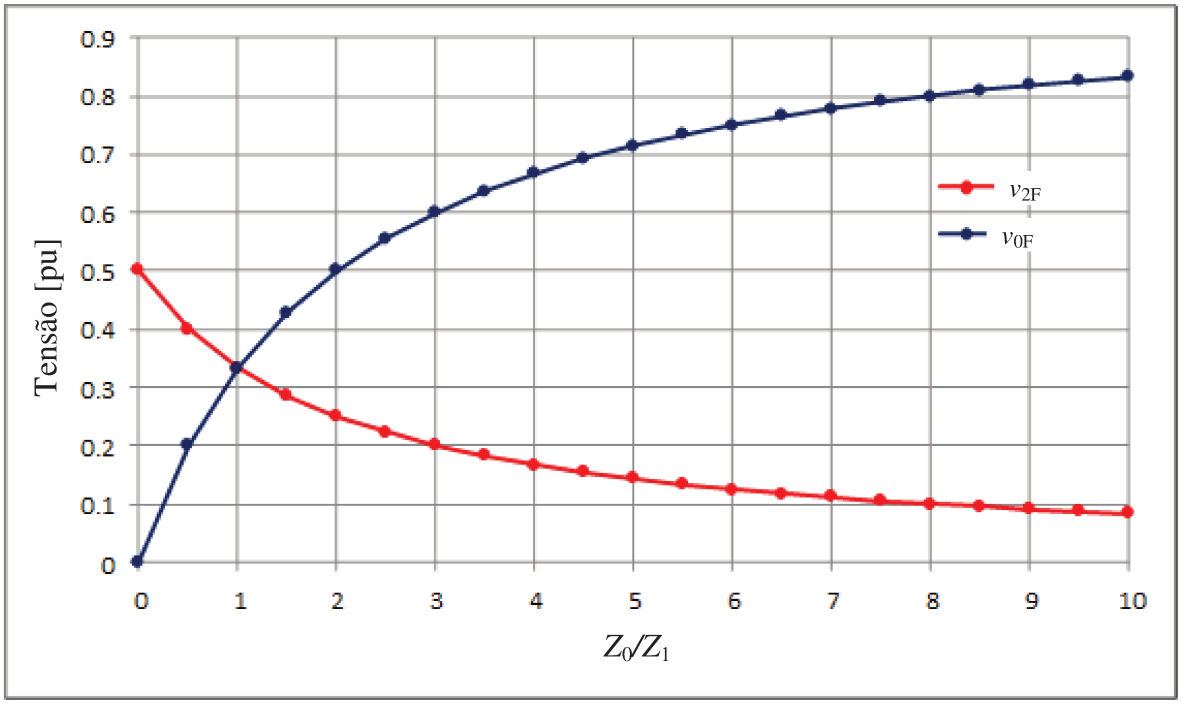


Figura 2.20 – Comportamento de V_0 e V_2 com respeito as impedâncias de sequência zero e sequência positiva (Z_0/Z_1), para faltas monofásicas.

Voltando à figura 2.19, pode ser visto que a tensão no ponto de falta não é a mesma que a tensão no relé. Além disso, as componentes de sequência negativa e de sequência zero da tensão se reduzem na linha e são bastante diferentes. A impedância de sequência zero da linha é aproximadamente três vezes maior do que a impedância de sequência negativa. Isto decorre do fato da impedância de sequência negativa ser igual à de sequência positiva da linha, que é naturalmente baixa para minimizar as perdas na linha. Já a impedância de sequência zero é

bastante elevada por incorporar o efeito dos cabos para-raios, que têm baixa condutividade, e o efeito do solo, que também apresenta alta resistividade. Da figura 2.19, se tem aplicando divisor de tensão:

$$\bar{v}_{0S} = -\bar{v}_{0F} \cdot \frac{\bar{Z}_{0S}}{\bar{Z}_{0S} + m\bar{Z}_{0L}} \tag{2.24}$$

Onde:

$\bar{v}_{0S}$: tensão de sequência zero no relé em por unidade

$m\bar{Z}_{0L}$: impedância de sequência zero de relé até ponto de falta

$\bar{Z}_{0S}$: impedância de sequência zero do equivalente de Thevenin medido atrás do relé

De forma similar para a sequência negativa da rede se tem aplicando novamente divisor de tensão:

$$\bar{v}_{2S} = \bar{v}_{2F} \cdot \frac{\bar{Z}_{2S}}{\bar{Z}_{2S} + m\bar{Z}_{2L}} \tag{2.25}$$

Onde:

$\bar{v}_{2S}$: tensão de sequência negativa no relé em por unidade

$m\bar{Z}_{2L}$: impedância de sequência negativa de relé até ponto de falta

$\bar{Z}_{2S}$: impedância de sequência negativa do equivalente de Thevenin medido atrás do relé

Das equações 2.24 e 2.25, se têm que as tensões de sequência negativa e sequência zero vão depender da impedância equivalente da fonte, da impedância da linha de transmissão e da tensão no ponto de falta e, portanto, também das impedâncias equivalentes de todo o sistema até o ponto de falta.

Por exemplo, se um relé de proteção requer uma tensão mínima de sequência negativa de 1 V secundário, podemos verificar a magnitude da tensão V_{2S} usando a equação 2.25 a partir de dados obtidos de um estudo de faltas e os parâmetros da linha. Se a tensão V_{2S} obtida é inferior a 1 V secundário, então a polarização sequência negativa não seria uma boa escolha para esta aplicação, e da mesma forma, esta análise se aplica para a tensão de sequência zero.

Na figura 2.21 são apresentadas as tensões de sequência negativa e sequência zero, no ponto de falta e no relé, para uma falta monofásica a cada porcentagem de comprimento da linha de transmissão para a rede elétrica do capítulo 4. A tensão de sequência zero no ponto de

falta é maior na maior parte da linha do que a sequência negativa, mas a tensão de sequência zero no relé é muito menor do que a sequência negativa e isso se deve à impedância de sequência zero da fonte que é menor do que a de sequência negativa. Neste caso não é recomendável utilizar a tensão de sequência zero como elemento de polarização, já que para faltas além de 90% de comprimento da linha a tensão de sequência zero será muito baixa, podendo ser menor do que o limite mínimo do relé, o que não será suficiente para polarizar o relé direcional. Então é melhor utilizar a tensão de sequência negativa como elemento de polarização.

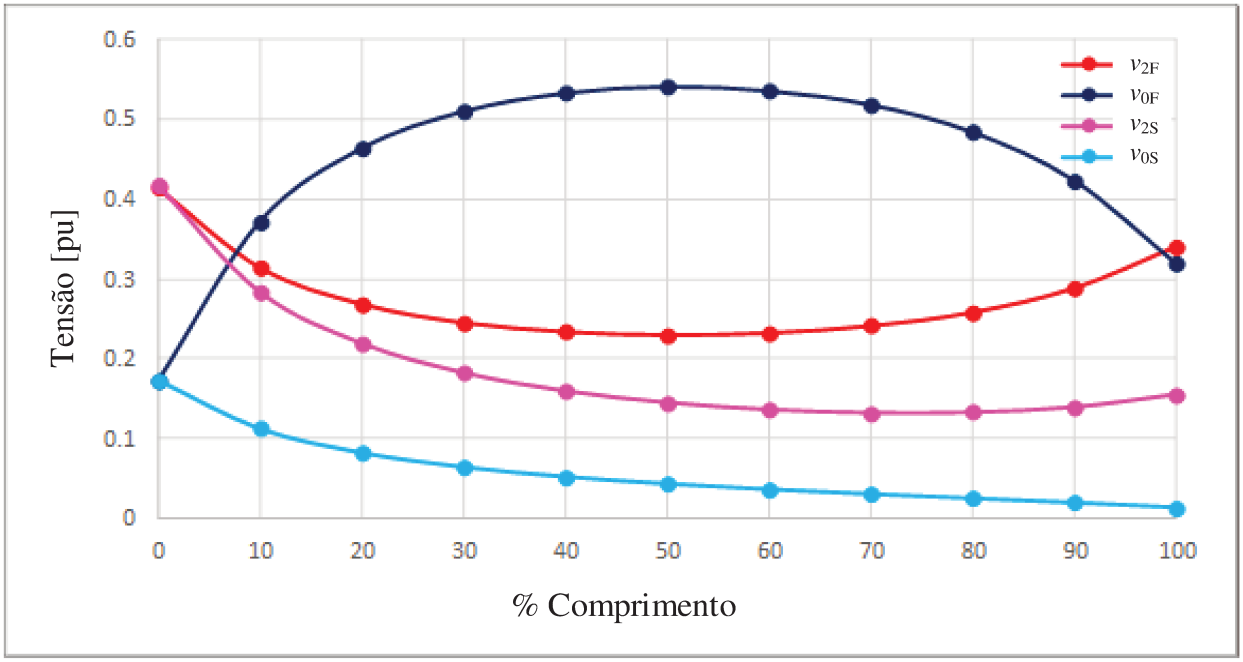


Figura 2.21 – Comportamento de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta monofásica.

2.5.2 Dependência de *I*2 e *I*0 com as impedâncias de sequência da rede e linha

Voltando à figura 2.19, a máxima corrente de sequência zero e corrente de sequência negativa aparecem no ponto de falta. Sejam $\bar{Z}_0$, $\bar{Z}_1$ e $\bar{Z}_2$ as impedâncias de sequências equivalentes no ponto de falta e considerando que as impedâncias de sequência negativa e sequência positiva são iguais, se têm as seguintes correntes em sequências:

$$\bar{I}_{2F} = \bar{I}_{0F} = \frac{\bar{E}_{eq}}{\bar{Z}_0 + \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} = \frac{\bar{E}_{eq}}{\bar{Z}_0 + 2.\bar{Z}_1} \tag{2.26}$$

Dividindo por $\bar{E}_{eq}$ a corrente da equação 2.26, se tem em valores por unidade ($\bar{\imath}_{2F}$ e $\bar{\imath}_{2F}$):

$$\bar{\imath}_{2F} = \bar{\imath}_{0F} = \frac{1/\bar{Z}_1}{\bar{Z}_0/\bar{Z}_1 + 2.\bar{Z}_1/\bar{Z}_1} = \frac{1/\bar{Z}_1}{\bar{Z}_0/\bar{Z}_1 + 2} \tag{2.27}$$

As correntes de sequência negativa e sequência zero em por unidade ($\bar{\imath}_{2S}$ e $\bar{\imath}_{0S}$) no relé são:

$$\bar{\imath}_{2S} = \frac{\bar{v}_{2F}}{\bar{Z}_{2S} + m\bar{Z}_{2L}} \tag{2.28}$$

$$\bar{\imath}_{0S} = \frac{\bar{v}_{0F}}{\bar{Z}_{0S} + m\bar{Z}_{0L}} \tag{2.29}$$

As correntes de sequência negativa e sequência zero são dependentes da impedância da fonte e da impedância no trecho da linha desde o relé até ponto de falta, como se mostra pelas equações 2.28 e 2.29.

Na figura 2.22 são apresentadas as correntes de sequência negativa e sequência zero, no ponto de falta e no relé, para uma falta monofásica em função do percentual do comprimento da linha de transmissão para a rede elétrica do capítulo 4. A corrente de sequência zero no relé só é maior do que a corrente de sequência negativa de 0% até 40% de comprimento da linha e depois a corrente de sequência negativa é maior. Isso é correto porque a impedância de sequência zero da linha é muito maior do que a impedância de sequência negativa e quando a falta se encontra mais afastada da localização do relé menor será a corrente, como se mostra na figura 2.22.

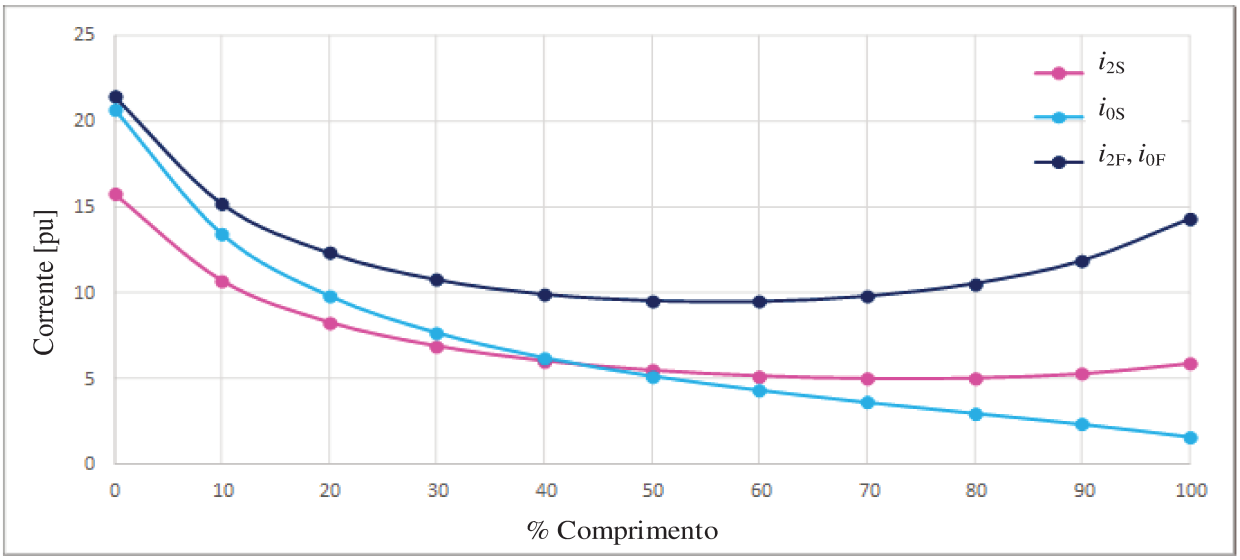


Figura 2.22 – Comportamento de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta monofásica.

Uma corrente de operação baixa ou uma tensão de polarização baixa pode afetar à operação do relé direcional. Para cada configuração da rede elétrica se deve fazer uma análise das tensões e correntes de sequência negativa e sequência zero e assim determinar qual delas deve ser utilizada.

2.5.3 Medições errôneas de *V*2 e *V*0 em linhas não transpostas

Os erros causados por linhas não transpostas podem produzir uma tensão de sequência negativa ou sequência zero errada durante operação normal da linha, como se mostra na figura 2.23. Se estas tensões de erro são maiores do que as tensões de falta gerada, então a tensão de polarização pode ser invertida, resultando em uma decisão da proteção direcional incorreta.

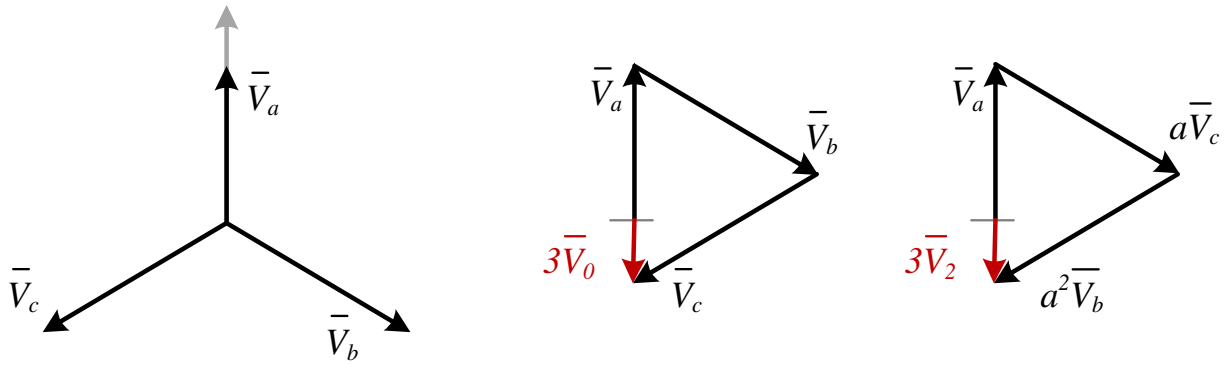


Figura 2.23 – Linhas não transpostas em operação normal geram tensão $3V_0$ e $3V_2$.

A ausência de transposições em linhas de transmissão longas resulta em impedâncias próprias e mútuas distintas, o que resulta em impedâncias de sequência positiva e negativa distintas. Assim, uma falta trifásica, por exemplo, irá gerar tensão de sequência negativa e sequência zero. Em alguns casos de baixa sensibilidade (faltas muito remotas) estas tensões desequilibradas podem causar uma inversão da tensão de polarização resultando em sensoriamento direcional incorreto. Este efeito é ilustrado na figura 2.24, as tensões de sequência negativa e sequência zero foram obtidas graficamente aplicando o conceito de transformação em componentes simétricas.

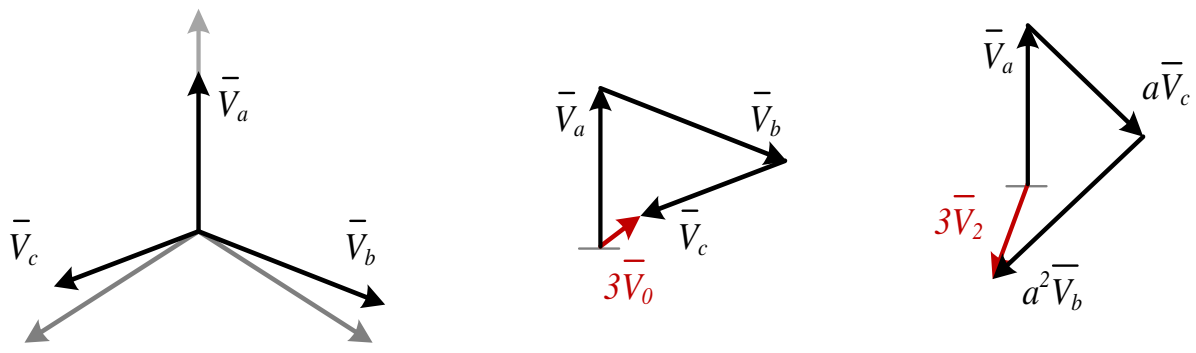


Figura 2.24 – Linhas não transpostas geram inversão da tensão residual $3V_0$ em faltas remotas.

2.6 Compensação em série em linhas de transmissão

A compensação em série em linhas de transmissão longas aumenta a capacidade de transferir potência e melhora a estabilidade do sistema de potência. A desvantagem é um incremento de corrente de curto-circuito e a possibilidade de ocorrer ressonância subsíncronas nos geradores. A reatância capacitiva (X_C) normalmente é de 25% até 75% da reatância indutiva X_L da linha de transmissão [18].

A compensação em série tem influência na proteção direcional pelas inversões da tensão e da corrente que ocasiona. Os elementos direcionais de polarização de tensão de sequência negativa e polarização de sequência zero são influenciados pelas inversões, na figura 2.25 se mostra a inversão da tensão de sequência negativa [13].

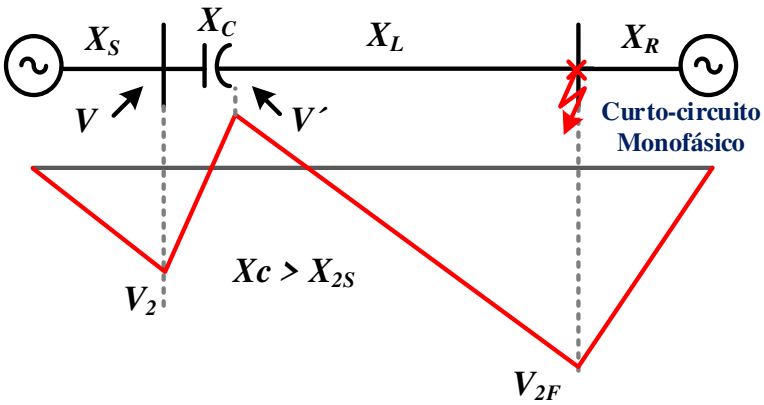


Figura 2.25 – Tensão de sequência negativa.

2.6.1 Inversão da tensão de sequência negativa e sequência zero

Na figura 2.26 se mostra a rede elétrica da figura 2.25 através dos circuitos de componentes de sequências, para uma falta monofásica na linha a uma distância "m" da localização do relé. As máximas tensões de sequência zero e sequência negativa aparecem no ponto de falta e são descritas por $\bar{V}_{2F}$ e $\bar{V}_{0F}$, respectivamente.

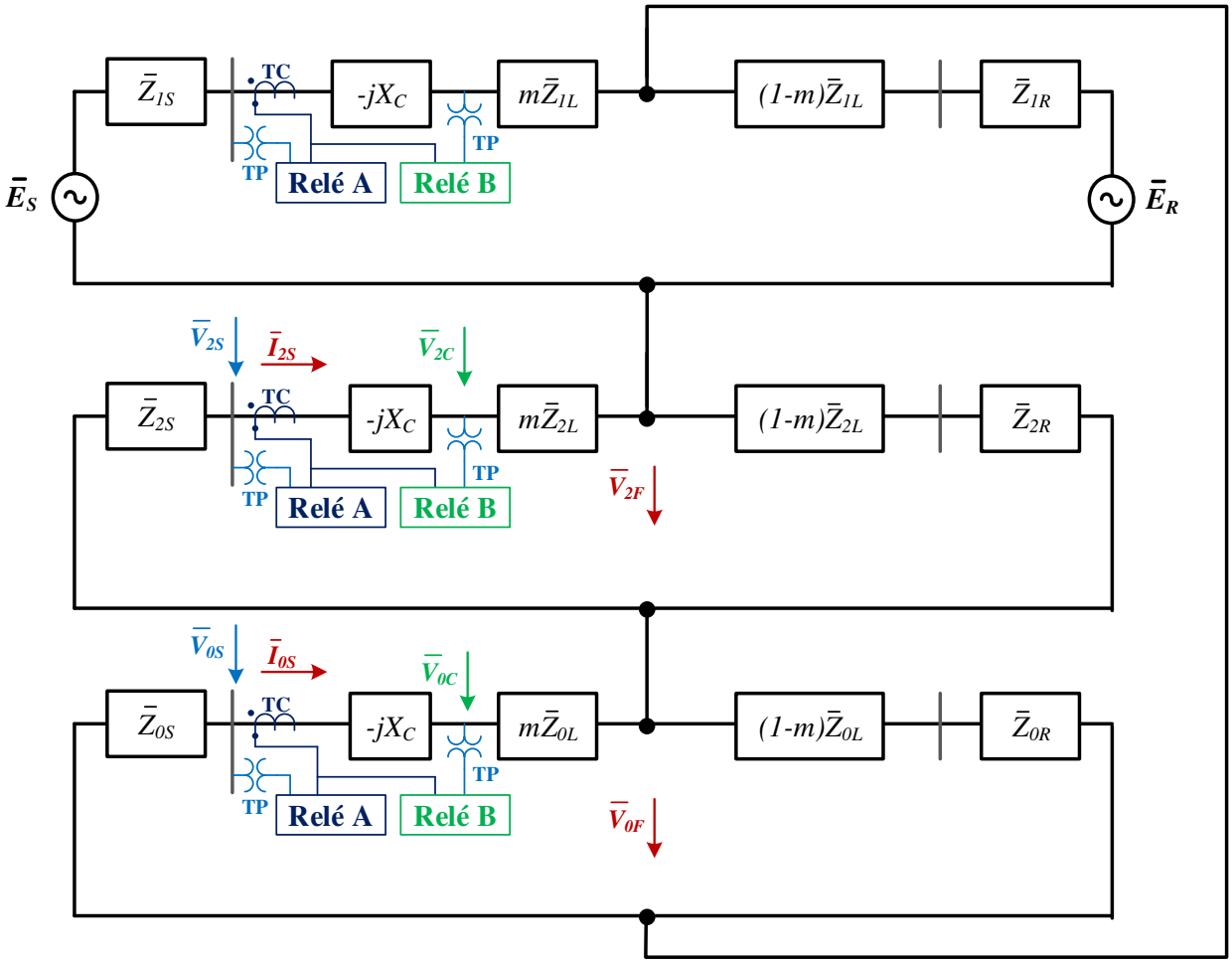


Figura 2.26 – Rede elétrica descrita através dos circuitos de sequências, para uma falta monofásica na linha com compensação série.

Sejam dois relés direcionais A e B, como se apresenta na figura 2.26. Num sistema real não seriam instalados dois relés, mas o objetivo no estudo é verificar as diferenças de medidas dos relés em função do ponto de medição da tensão (posicionamento do TP). As tensões de sequência negativa e sequência zero medidas pelo relé A são:

$$\bar{V}_{2s} = \frac{\bar{V}_{2F}.\bar{Z}_{2S}}{\bar{Z}_{2S} + m\bar{Z}_{2L} - jX_C} \tag{2.30}$$

$$\bar{V}_{0s} = \frac{\bar{V}_{0F}.\bar{Z}_{0S}}{\bar{Z}_{0S} + m\bar{Z}_{0L} - jX_C} \tag{2.31}$$

As tensões de sequência negativa e sequência zero medidas pelo relé B são:

$$\bar{V}_{2C} = \frac{\bar{V}_{2F}.(\bar{Z}_{2S} - jX_C)}{\bar{Z}_{2S} + m\bar{Z}_{2L} - jX_C} \tag{2.32}$$

$$\bar{V}_{0C} = \frac{\bar{V}_{0F}.(\bar{Z}_{0S} - jX_C)}{\bar{Z}_{0S} + m\bar{Z}_{0L} - jX_C} \tag{2.33}$$

As inversões das tensões de sequência negativa e sequência zero são dependentes das parcelas reativas das impedâncias da linha, capacitor e fonte. As inversões das tensões acontecem para as seguintes condições:

Relé A:

- Sequência negativa: $X_C > \bar{X}_{2S} + m\bar{X}_{2L}$
- Sequência zero: $X_C > \bar{X}_{0S} + m\bar{X}_{0L}$

Relé B:

- Sequência negativa: $X_C > \bar{X}_{2S}$ e $X_C < \bar{X}_{2S} + m\bar{X}_{2L}$
- Sequência zero: $X_C > \bar{X}_{0S}$ e $X_C < \bar{X}_{0S} + m\bar{X}_{0L}$

2.6.2 Inversão da corrente de sequência negativa e sequência zero

Voltando à figura 2.26, as correntes de sequência negativa e sequência zero são definidas pelas equações seguintes:

$$\bar{I}_{2S} = \frac{\bar{V}_{2F}}{\bar{Z}_{2S} + m\bar{Z}_{2L} - jX_C} \tag{2.34}$$

$$\bar{I}_{0S} = \frac{\bar{V}_{0F}}{\bar{Z}_{0S} + m\bar{Z}_{0L} - jX_C} \tag{2.35}$$

Também acontece a inversão das correntes de sequência negativa e sequência zero para as seguintes condições:

Relé A e Relé B:

- Sequência negativa: $X_C > \bar{X}_{2S} + m\bar{X}_{2L}$
- Sequência zero: $X_C > \bar{X}_{0S} + m\bar{X}_{0L}$

Na tabela 2.1 se apresenta um resumo das análises feitas nesta seção das inversões das tensões e das correntes para os relés A e B.

Tabela 2.1 – Condições para as inversões das tensões e correntes de sequência negativa e sequência zero.

<table>
<tr><th colspan="2">Inversão das tensões</th><th colspan="2">Inversão das correntes</th></tr>
<tr><td colspan="2">Relé A</td><td colspan="2">Relé A e Relé B</td></tr>
<tr><td>Sequência negativa</td><td>Sequência zero</td><td>Sequência negativa</td><td>Sequência zero</td></tr>
<tr><td>$X_C > X_{2S} + mX_{2L}$</td><td>$X_C > X_{0S} + mX_{0L}$</td><td rowspan="4">$X_C > X_{2S} + mX_{2L}$</td><td rowspan="4">$X_C > X_{0S} + mX_{0L}$</td></tr>
<tr><td colspan="2">Relé B</td></tr>
<tr><td>Sequência negativa</td><td>Sequência zero</td></tr>
<tr><td>$X_C > X_{2S}$ e $X_C < X_{2S} + mX_{2L}$</td><td>$X_C > X_{0S}$ e $X_C < X_{0S} + mX_{0L}$</td></tr>
</table>

2.6.3 Compensação da tensão para os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão.

Devido às inversões da tensão e da corrente que acontecem nas linhas com compensação em série, as proteções direcionais que trabalham com os métodos de polarização por tensão e polarização por corrente operam incorretamente declarando as faltas na direção contrária à que ocorreu [15] [16].

Na figura 2.27 se apresenta o modo de operação da proteção direcional com método de polarização por corrente, onde a tensão de sequência zero ($\bar{V}_{PE} = 3\bar{V}_0 \rightarrow$ medido) é a tensão medida pelo relé para uma falta monofásica na linha (falta a frente). Neste caso o relé opera indicando que a falta ocorreu na direção “reversa”, ou seja, esta é uma operação incorreta decorrente da inversão da tensão. Para evitar essa operação incorreta do relé é feita uma compensação da tensão ($\bar{V}_{Cap} = jX_{cap} \cdot (-3\bar{I}_0)$) e essa tensão é somada à tensão medida pelo relé. Então a proteção passa a ter uma tensão de operação calculada com a tensão de sequência zero compensada ($\bar{V}_{PE} = 3\bar{V}_0 \rightarrow$ compensado) que permite declarar a direção da falta corretamente, falta "a frente".

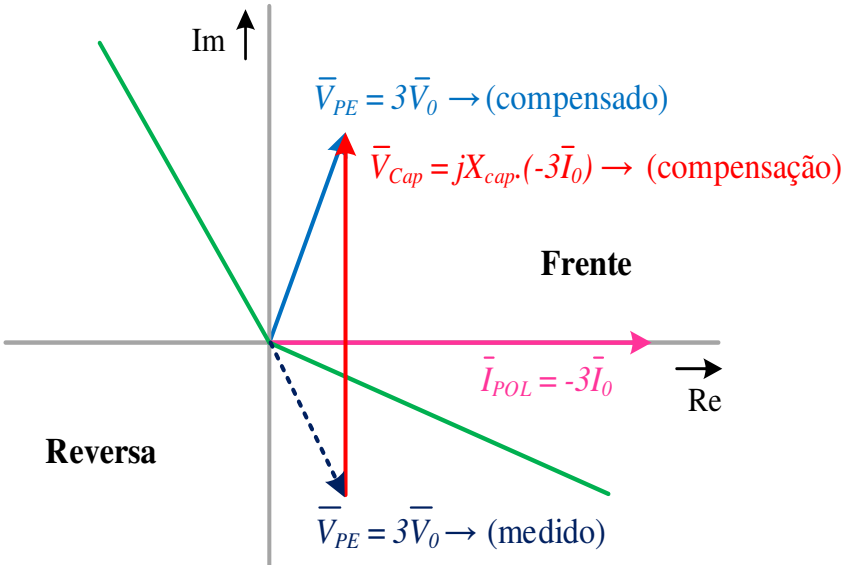


Figura 2.27 – Compensação da tensão para o método de polarização por corrente.

Fazendo a mesma análise da inversão da tensão para o método de polarização por tensão, se pode observar na figura 2.28 que o relé opera incorretamente indicando que a falta ocorreu na direção "reversa". Para evitar essa operação incorreta do relé se faz uma compensação da tensão ($\bar{V}_{Cap} = jX_{cap} \cdot (-3\bar{I}_0)$) e essa tensão é somada à tensão que ele mede, como se mostra na figura 2.29. Com essa nova tensão compensada ($\bar{V}_{ref} = 3\bar{V}_0$) se pode observar que as zonas de operação "a frente" e "reversa" mudam, como se apresenta na figura 2.29, e assim a corrente de operação ($\bar{I}_{OPE} = -3\bar{I}_0$) declara corretamente a falta na direção "a frente".

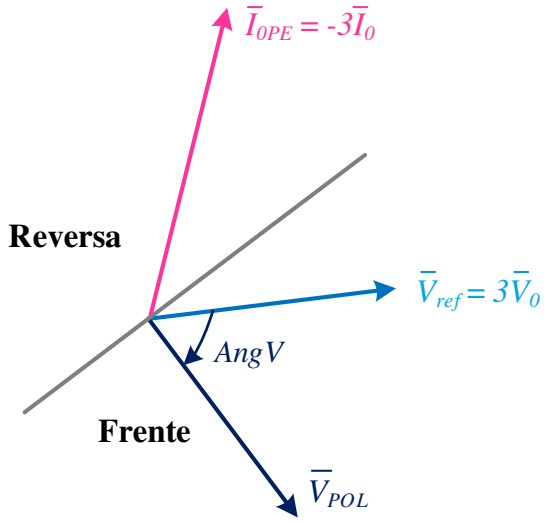


Figura 2.28 – Sem compensação da tensão para o método de polarização por tensão.

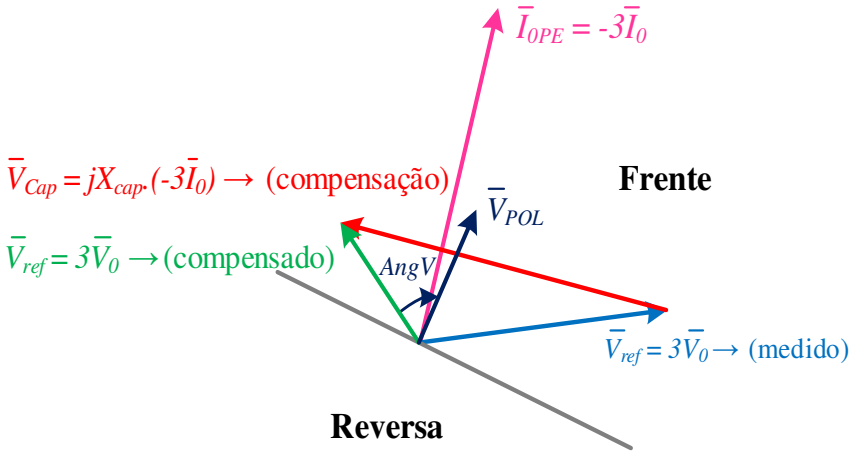


Figura 2.29 – Com compensação da tensão para o método de polarização por tensão.

2.6.4 Ajustes das zonas "a frente" e "reversa" dos elementos 32Q e 32V

A compensação em série altera a impedância da linha, por isso os ajustes das zonas "Z2F=a frente" e "Z2R=reversa" dependem do valor do capacitor e também da sua localização. Na figura 2.30 se apresentam três casos de compensação [13].

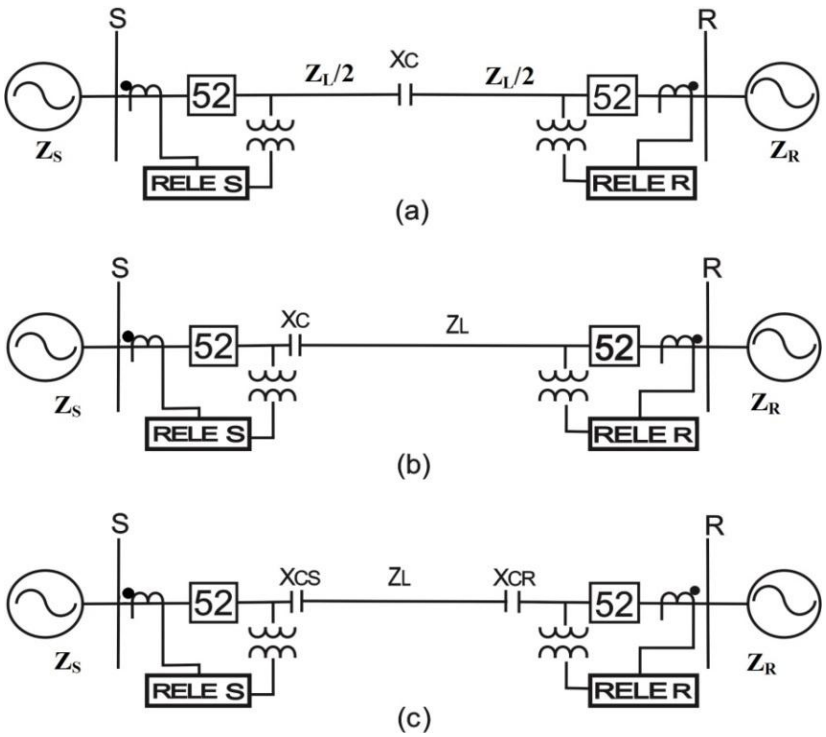


Figura 2.30 – Linha com compensação em série. (a) à metade, (b) no extremo R e (c) nos dois extremos, com transformador de tensão no lado do barramento.

Para os casos (a) e (b) da figura 2.30, com a compensação série localizada no meio da linha e com a compensação série localizada no extremo S da linha, respectivamente, os ajustes para ambos relés (S e R) são:

$$Z_{2F} = \frac{Z_{L2} - X_C}{2} \tag{2.36}$$

$$Z_{2R} = Z_{2F} + \frac{1}{2 * I_{N(\sec)}} \tag{2.37}$$

Para o caso da figura 2.30 (c), com compensação série nos dois extremos da linha, os ajustes para ambos relés (S e R) e para a zona "a frente" é dada pela equação 2.38 e para a zona "reversa" é dada pela equação 2.37.

$$Z_{2F} = \frac{Z_{L2} - (X_{CR} + X_{CS})}{2} \tag{2.38}$$

Para os casos 2.30(b) e 2.30(c), os transformadores de tensão se localizam antes dos capacitores (lado do barramento). Na figura 2.31, os transformadores de tensão se localizam depois dos capacitores (lado da linha).

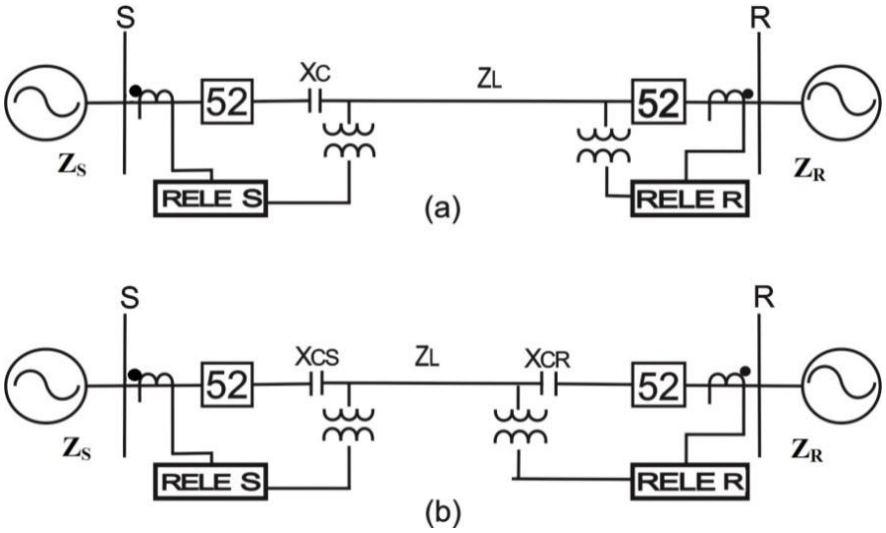


Figura 2.31 – Linha com compensação série. (a) no extremo R e (b) nos dois extremos, com transformador de tensão no lado da linha.

Para o caso 2.31(a), os ajustes do relé S são descritos nas equações 2.39 e 2.37 e para o relé R são apresentadas as equações 2.36 e 2.37.

$$Z_{2F} = \frac{Z_{L2} - X_C}{2} + X_C \tag{2.39}$$

Para o caso 2.31(b), os ajustes do relé S são descritos pelas equações 2.40 e 2.37 e para o relé R são apresentados nas equações 2.41 e 2.37.

$$Z_{2F} = \frac{Z_{L2} - (X_{CR} + X_{CS})}{2} + X_{CS} \tag{2.40}$$

$$Z_{2F} = \frac{Z_{L2} - (X_{CR} + X_{CS})}{2} + X_{CR} \tag{2.41}$$

Os ajustes das zonas de “a frente” e “reversa” do elemento 32V são feitos da mesma forma que o elemento 32Q, lembrando de substituir as impedâncias de sequência negativa pelas de sequência zero.

As impedâncias de sequência zero e sequência negativa da rede elétrica devem ser calculadas em valores secundários como apresentado nas equações 2.18 e 2.19.

2.7 TIPOS DE FALTA QUE SÃO DETERMINADOS COM OS MÉTODOS DE POLARIZAÇÃO DESCRITOS

Na tabela 2.2 pode-se observar quais diferentes tipos de faltas podem ser medidos com os métodos de polarização descritos neste capítulo.

Tabela 2.2 – Determinação da direção da falta para diferentes tipos de faltas.

Tipos de falta	Sequência Negativa	Sequência zero
A, Terra	x	x
B, Terra	x	x
C, Terra	x	x
A, B, Terra	x	x
B, C, Terra	x	x
A, C, Terra	x	x
A, B	x	-
B, C	x	-
A, C	x	-

CAPÍTULO 3

MODELAGEM DO RELÉ DIRECIONAL

O sistema de proteção tem que operar muito rápido na detecção e eliminação de faltas que podem ocorrer no sistema de potência e assim evitar que o sistema elétrico perca a estabilidade, fenômeno que pode provocar o colapso do sistema elétrico. Estes defeitos são responsáveis pelas elevações de corrente e tensão não somente de forma sustentadas, mas também de caráter transitório, que resultam em perturbações de alta frequência nos sinais de tensão e corrente de um sistema. As energizações dos equipamentos do sistema de potência como os transformadores de potência, as linhas de transmissão, bancos de capacitores e bancos de reatores também geram transitórios eletromagnéticos. Por isso é muito importante realizar estudos de transitórios eletromagnéticos para assim evitar atuações errôneas dos dispositivos de proteção.

Os softwares comerciais que são normalmente utilizados para a análise de sistemas de proteção possuem limitações em seus modelos, por serem estes dedicados à análise do sistema na sua frequência fundamental. Nesse sentido, o uso de programas dedicados a estudos de transitórios eletromagnéticos (EMT do termo em inglês electromagnetic transients) vem se mostrando cada vez mais frequente para a modelagem e estudo do desempenho dos relés de proteção. Estes programas utilizam modelos mais elaborados para a representação dos componentes do sistema elétrico, além de permitirem a implementação de modelos mais aprimorados dos relés numéricos microprocessados.

Neste capítulo são descritos os detalhes da modelagem do transformador de corrente e do sistema de proteção em análise utilizando a linguagem MODELS.

3.1 ATP E MODELS

O ATP (Alternative Transients Program) é um dos programas mais utilizados para simulação digital de fenômenos transitórios de natureza eletromagnética em sistemas elétricos de potência. Com ele, redes complexas e sistemas de controle podem ser simulados.

O ATP é derivado do EMTP (Electromagnetic Transients Program), que foi desenvolvido em domínio público pela BPA (Bonneville Power Administration). Desde a sua

origem o ATP tem sido continuamente desenvolvido através de contribuições internacionais de vários especialistas.

O ATP utiliza o método de integração trapezoidal para a resolução das equações diferenciais do sistema elétrico simulado. Na figura 3.1 são apresentados os componentes do programa do ATP através da sua interface gráfica ATPDRAW.

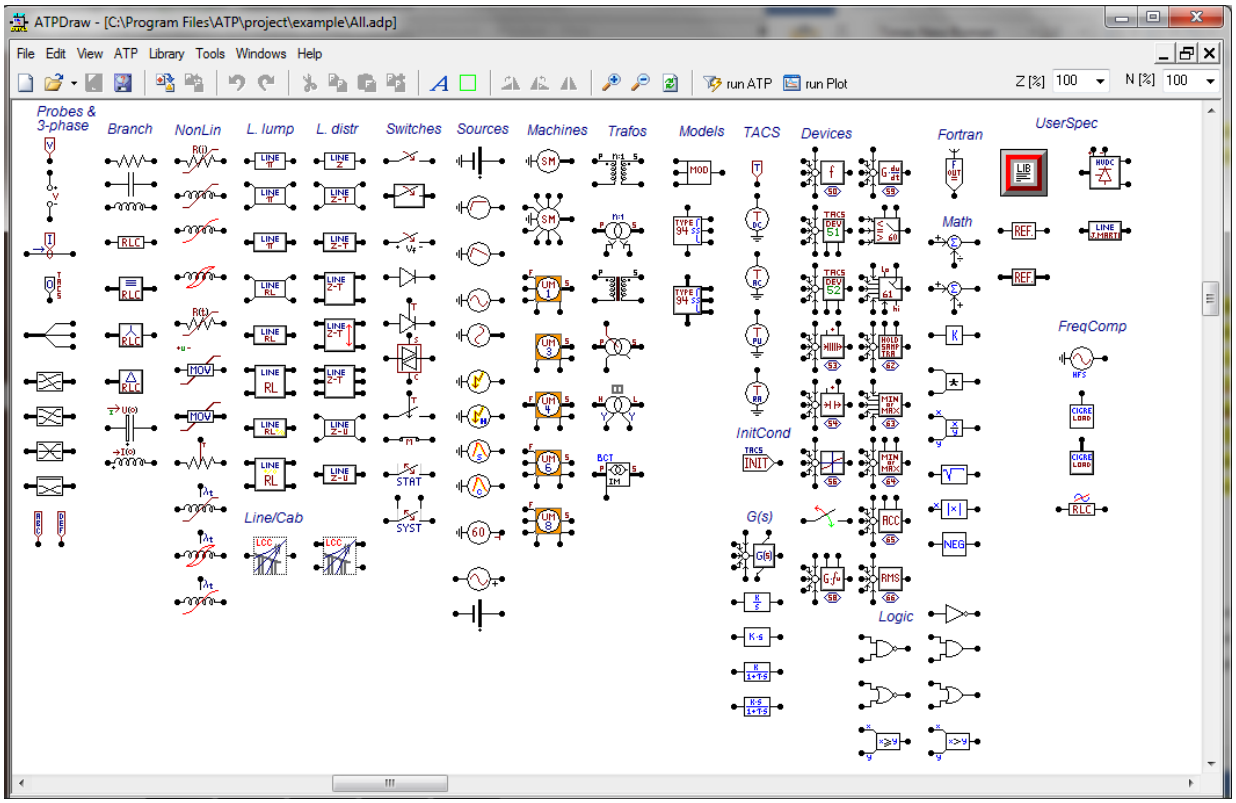


Figura 3.1 – Principais componentes do programa ATP vistas na interface ATPDRAW.

3.1.1 A linguagem MODELS

A MODELS é uma linguagem de programação estruturada interna ao ATP [23], e com ela é possível criar modelos de componentes do sistema elétrico, funções ou controle, como é o caso dos relés digitais de proteção. Sua estrutura de programação é mostrada no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Estrutura básica da linguagem MODELS.

```
MODEL DEFAULT
        DATA  d1, d2                    -- Parâmetros de entrada
        INPUT  i1, i2                   -- Variáveis de entrada
        OUTPUT  o1, o2                  -- Variáveis de saída
        VAR  o1, o2                     -- Declaração de variáveis
        INIT                            -- Inicialização de variáveis
                o1:=0
                o2:=0
        ENDINIT
        EXEC                            -- Realização das operações do programa
                o1:=(i1-i2)*t
                o2:=sin(o1)
        ENDEXEC
ENDMODEL
```

3.2 MODELAGEM

O diagrama de blocos apresentado na figura 3.2 resume toda a simulação desenvolvida neste trabalho. A figura 3.2 apresenta uma visão geral de como ocorrem as iterações entre os componentes simulados no ATP e os modelos criados na MODELS. Do sistema elétrico de potência modelado no ATP são obtidas as correntes e tensões (i_p, v_p) utilizando os transformadores de corrente e transformadores de potencial (TC´s, TP´s), que têm como função principal reduzir as correntes e tensões (i_s, v_s), para depois serem injetadas nos relés digitais. Nas próximas seções será explicada a função de cada um dos blocos apresentados, bem como os detalhes de sua implementação.

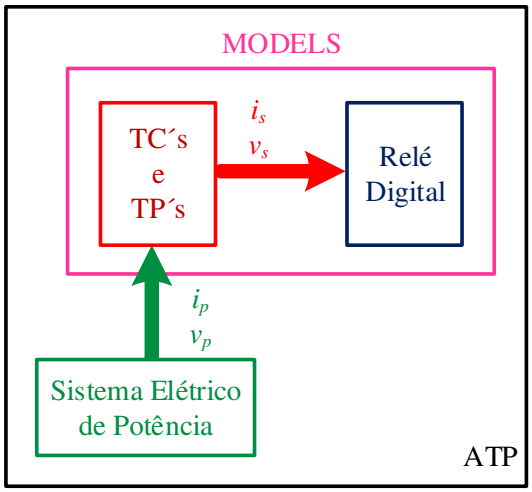


Figura 3.2 – Diagrama de blocos do sistema geral implementado no ATP.

3.2.1 Modelagem do transformador de corrente (TC)

Para a operação dos relés de proteção se faz necessário utilizar um TC, já que a corrente da rede elétrica é muito elevada (kA) para ser inserida diretamente nos relés. A função dos TCs é baixar a corrente a valores da ordem de Amperes, mas a corrente a ser utilizada deve ter a mesma forma de onda da corrente primária medida. Quando os TCs operam saturados ocorre uma distorção da corrente reduzida, fazendo com que a proteção veja uma corrente diferente da corrente primária, podendo provocar uma operação indevida da proteção. Para a modelagem matemática do TC foi utilizada a norma IEEE no. C37.110 [4], que apresenta as equações matemáticas do TC. O modelo foi implementado na MODELS.

O circuito equivalente do TC implementado no ATP é representado na figura 3.3.

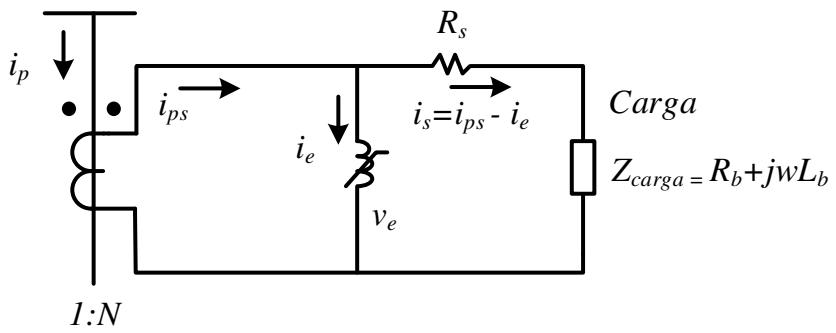


Figura 3.3 – O circuito equivalente do Transformador de Corrente.

Onde:

i_p: Corrente primária instantânea

i_{ps}: Corrente secundária ideal instantânea

i_s: Corrente secundária real instantânea

i_e: Corrente de excitação instantânea

v_e: Tensão de excitação instantânea

N: Número de espiras do TC

R_s: Resistência do enrolamento secundário do TC

R_b: Resistência de carga

L_b: Indutância de carga

A relação de transformação do transformador de corrente (RTC) é definida pela divisão das correntes nominais do primário e do secundário. A corrente secundária ideal (i_{ps}) é igual à

razão entre a corrente primária (i_p) e a relação de transformação do transformador de corrente (RTC), como é mostrado na equação 3.1.

$$ips = \frac{ip}{RTC} \tag{3.1}$$

Na figura 3.4, é apresentada a curva de saturação entre a tensão de excitação (V_e) e a corrente de excitação (I_e) em valores eficazes, de acordo com a norma IEEE no. C37.110.

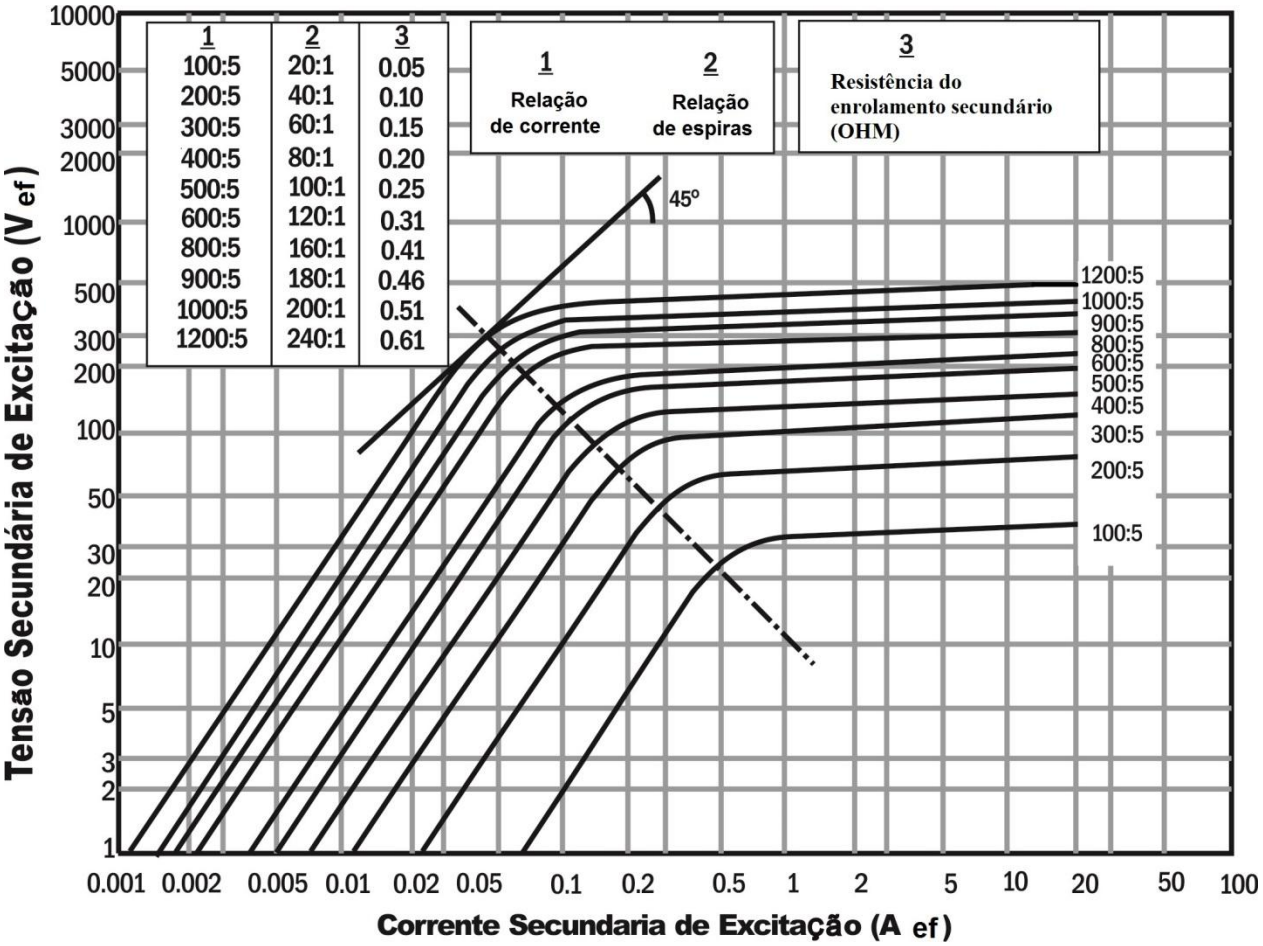


Figura 3.4 – Curva de saturação segundo a norma IEEE no. C37.110.

Da norma IEEE no. C37.110 pode-se verificar:

a) Para uma corrente secundária (I_s) de 20 vezes a corrente nominal do TC é determinada uma corrente de excitação (I_e) de 10 A.

b) A tensão de saturação (V_{sat}) é relacionada com a corrente de excitação (I_e) de 10 A, como é mostrado na figura 3.5.

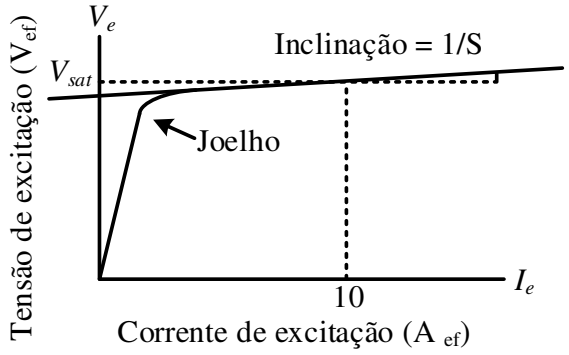


Figura 3.5 –Modelo da curva de saturação de Transformador de Corrente.

Dois parâmetros são extraídos da Figura 3.5 para a modelagem do TC:

a) **Inclinação (1/S):** é a inclinação da seção saturada da curva.

b) ***V_{sat}*:** é a tensão de saturação em valor eficaz.

A curva de saturação é definida matematicamente pela equação 3.2:

$$\log V_e = \frac{1}{S}\log I_e + \log V_i \tag{3.2}$$

Onde:

V_i: é valor de V_e para I_e=1

Então a tensão de saturação em valor eficaz é:

$$V_e = V_i \cdot {I_e}^{1/S} \tag{3.3}$$

A tensão de saturação (v_e) é senoidal, definida pela equação 3.4.

$$v_e = \sqrt{2} \cdot V_e \cdot \cos(\omega t) \tag{3.4}$$

A tensão de saturação (v_e) é igual à derivada do fluxo magnético (λ), como é mostrado nas equações 3.5 e 3.6.

$$v_e = \frac{d\lambda}{dt} \tag{3.5}$$

$$\lambda = \sqrt{2} \cdot V_e \cdot \frac{1}{\omega} \cdot \sin(\omega t) \tag{3.6}$$

A corrente de excitação (i_e) e o fluxo magnético (λ) têm relação entre si que é descrita pela equação 3.7.

$$i_e = \frac{10 \cdot \omega^S}{(\sqrt{2} \cdot V_{sat})^S} \cdot \frac{1}{RP} \cdot sgn(\lambda) \cdot |\lambda|^S \tag{3.7}$$

Onde:

sgn(λ): é sinal do fluxo magnético

ω: Frequência angular fundamental, no caso para 60 Hz (2π60)

RP: Fator definido pela corrente de excitação e definido pela equação 3.8.

$$RP = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} sin^{2S}(\omega t)dt} \tag{3.8}$$

Do circuito equivalente do TC, mostrado na figura 3.3, se tem a seguinte relação:

$$v_e = \left(i_{ps} - i_e\right) \cdot (R_s + R_b) + L_b \cdot \frac{d\left(i_{ps} - i_e\right)}{dt} \tag{3.9}$$

Fazendo simplificações na equação 3.9 a tensão de excitação (v_e) pode ser descrita pela equação 3.10.

$$v_e = \frac{(i_{ps} - i_e) \cdot (R_s + R_b) + L_b \cdot \frac{d(i_{ps})}{dt}}{1 + L_b \cdot A \cdot s \cdot |\lambda|^{s-1}} \tag{3.10}$$

Finalmente a corrente secundária real (i_s) é a diferença entre a corrente secundária ideal (i_{ps}) e a corrente de excitação (i_e), como é mostrada na equação 3.11.

$$i_s = i_{ps} - i_e \tag{3.11}$$

O modelo do TC implementado na MODELS tem todas as equações descritas nesta seção, como é mostrado no Quadro 3.2. O sinal de entrada é a corrente do sistema elétrico (i_p), e o sinal de saída é a corrente secundária real (i_s) que vai para o relé de proteção, como se mostra na figura 3.2. Os comentários (trechos após o símbolo --) descrevem os sinais e variáveis que estão sendo manipulados e calculados.

Quadro 3.2 – Modelo do transformador de corrente implementado na MODELS.

```
MODEL TC
        INPUT
                ip                      -- Corrente primária medido [A]
        OUTPUT
                is                      -- Saída da corrente secundária real [A]
        DATA
                RTC                     -- TC primário entre TC secundário
                Vsat                    -- Tensão de saturação
                Rs                      -- Resistência de TC (ohm)
                Rb                      -- Resistencia de carga (ohm)
                Lb                      -- Inductancia de carga (H)
                Rp                      -- Fator definido por Ie/Ipk
                s                       -- Pendente inversa de Ve vs Ie (zona de saturação)
        VAR
                ips                     -- Corrente secundária ideal [A]
                ips1            -- Corrente secundária ideal [A] (para calcular derivada da corrente)
                dips                    -- Derivada da corrente secundária ideal [A]
                ie                      -- Corrente de excitação [A]
                is                      -- Corrente secundária real [A]
                ve                      -- Tensão de excitação [V]
                flux                    -- Fluxo no núcleo do transformador [Wb]
                dflux                   -- Derivada do fluxo [Wb]
                dt1
        EXEC
                ips := ip /RTC                                          -- Equação 3.1
                dips :=(ips-ips1)/dt1
                ips1 :=ips
                ie := (10/Rp)*(omega/(sqrt(2)*Vsat))**s*sign(flux)*(abs(flux))**s   -- Equação 3.7
                ve :=((ips-ie)*(Rs+Rb)+Lb*dips)/(1+Lb*A*s*(abs(flux))**(s-1))       -- Equação 3.10
                dflux :=ve*dt1                                          -- Equação 3.5
                flux :=dflux+flux
                is :=ips-ie                                             -- Equação 3.11
        ENDEXEC
ENDMODEL
```

Na figura 3.6 são apresentadas as correntes secundárias do TC para uma falta monofásica. O sistema elétrico utilizado é descrito no capítulo 4. A falta começa em 0,055 s e antes da falta se pode verificar que as correntes secundária ideal (i_{ps}) e secundária real (i_s) são iguais. A partir do início da falta essas correntes já não são iguais e devido à componente CC do transitório ocorre a saturação do TC e a corrente secundária real (i_s) se distorce. Desta forma também haverá uma corrente de excitação (i_e) fluindo pelo núcleo magnético do TC. Quando o TC não está saturado, como antes da falta, esta corrente é muito baixa. Outro fator que contribui para a saturação do TC é a carga conectada ao TC, que geralmente é composta pelo relé de proteção e cabos conectados entre o relé e o TC. Na figura 3.7 é mostrado este efeito.

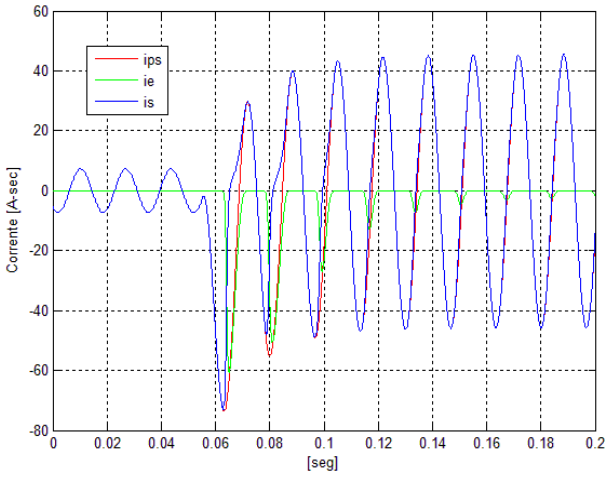


Figura 3.6 –Correntes secundárias do TC, para o caso de falta monofásica com saturação do TC.

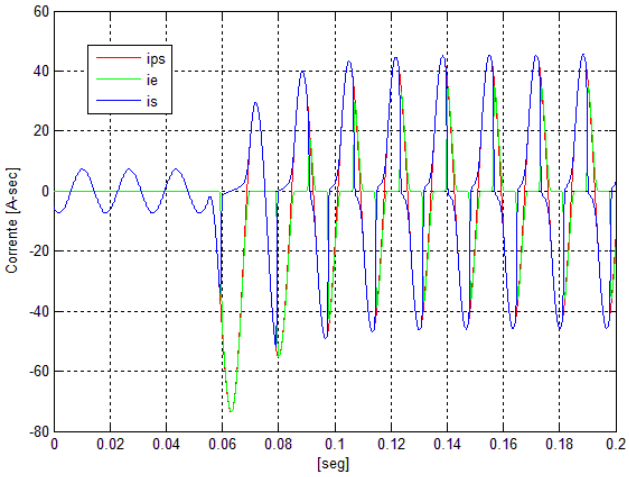


Figura 3.7 –Correntes secundárias do TC, para ilustrar o efeito da carga para uma falta monofásica.

3.2.2 Modelagem do Relé Direcional

Os relés de proteção digital fazem processamentos dos sinais de corrente e tensão, como é indicado na Figura 3.8. Os sinais de tensão e corrente obtidos do sistema de potência devem ser tratados e digitalizados (amostragem e quantização), para que, sejam aplicadas a remoção de corrente CC do transitório, a estimação do fasor e a lógica da proteção direcional propriamente dita [9] [24]. Todas estas etapas são descritas nas seções seguintes com seus respectivos modelos.

Os segmentos de códigos que serão apresentados são aplicados às três fases do sistema, entretanto, para poupar espaço e evitar repetições, somente uma das fases será apresentada. Os comentários (trechos após o símbolo --) descrevem os sinais e variáveis que estão sendo manipulados e calculados.

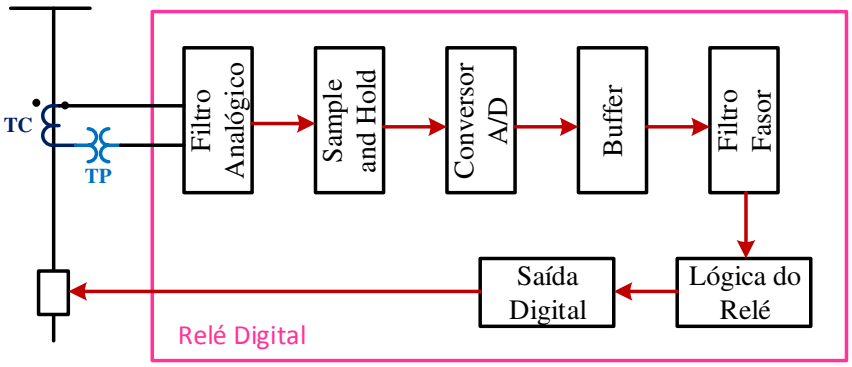


Figura 3.8 –Modelo do relé.

3.2.2.1 Filtro Analógico

A proteção de sistemas elétricos só utiliza a componente fundamental, e algumas proteções utilizam as componentes de segunda, quarta e quinta harmônica para fazer bloqueios. No caso da proteção direcional só se utiliza a componente fundamental.

Para restringir o sinal a essas frequências é utilizado um filtro anti-aliasing antes do processo de amostragem, como é mostrado na figura 3.8. O filtro utilizado nesta pesquisa é do tipo Butterworth passa-baixa de 3ª ordem com frequência de corte de 188 Hz.

A função de transferência do filtro utilizado é mostrada na equação 3.12:

$$H(s) = \frac{1{,}6452 * 10^9}{s^3 + 2{,}3611 * 10^3 * s^2 + 2{,}7873 * 10^6 * s + 1{,}6452 * 10^9} \tag{3.12}$$

A sua implementação foi feita no ambiente MODELS. O filtro foi modelado através da função LAPLACE, como é mostrado no Quadro 3.3. O sinal de entrada é a corrente secundária real modelada no TC e o sinal de saída que é injetado no circuito SAMPLE AND HOLD, como é mostrado no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Modelo do filtro analógico implementado na MODELS.

```
MODEL FILTANA
        INPUT
                is                      -- Sinal de entrada vindo do TC
        CONST                           -- Coeficientes da função de transferência da equação 3.12
                b0 {val:1,6452e9}
                a0 {val:1,6452e9}
                a1 {val:2,7873e6}
                a2 {val:2,3611e3}
                a3 {val:1,0}
        OUTPUT
                isFAN                   -- Sinal de saída do filtro vai para o circuito sample and
        hold
        HISTORY
                isFAN {dflt:0}
        EXEC
                LAPLACE (isFAN / is):= b0|s0 / (a0|s0 + a1|s1 + a2|s2 + a3|s3)        --Equação 3.12
        ENDEXEC
ENDMODEL
```

A figura 3.9 mostra a comparação do sinal de corrente antes e depois de sua passagem pelo filtro analógico. A linha de cor vermelha é a corrente da saída do TC (i_s) e a linha de cor azul é a mesma corrente após a passagem pelo filtro analógico. As frequências de mais alta

ordem são eliminadas pelo filtro e só as frequências menores do que a frequência de corte (188 Hz) não são filtradas.

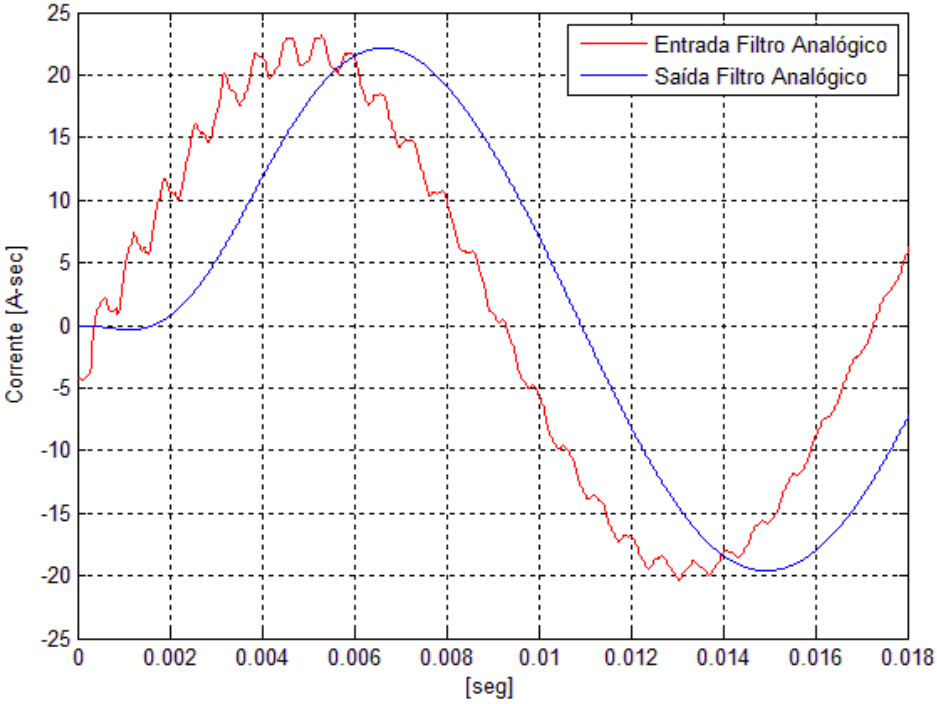


Figura 3.9 –Comparação dos sinais antes e depois da passagem pelo filtro analógico.

3.2.2.2 Sample and hold

A função do circuito Sampler/Holder é de capturar e manter constante um sinal durante um intervalo de tempo. De acordo com o critério de Nyquist para a amostragem do sinal deve-se escolher uma frequência de amostragem de no mínimo duas vezes a frequência fundamental do sistema. Nesta pesquisa foi utilizado por 960 Hz, valor que é utilizado pelo relé e que corresponde a uma taxa de 16 amostras/ciclo.

Para sua implementação foi utilizado, no ambiente MODELS, o comando TIMESTEP MIN, fazendo com que os valores sejam atualizados em um passo diferente da simulação, ou seja, a cada período de amostragem.

No Quadro 3.4 se apresenta a modelagem na MODELS. O sinal de entrada é a corrente vinda do FILTRO ANALÓGICO e o sinal de saída é a mesma corrente que vai para o circuito CONVERSOR A/D.

Quadro 3.4 – Modelo do sample and hold implementado na MODELS.

```
MODEL SAMPHOLD
        INPUT
                isFAN                   -- Sinal de entrada vindo do filtro analógico
        OUTPUT
                isSH                    -- Sinal de saída do sample vai para o circuito conversor
        A/D
        TIMESTEP MIN: 1,0416666667E-3           -- Frequência de 960Hz
        EXEC
                isSH := isFAN
        ENDEXEC
ENDMODEL
```

Na figura 3.10 se mostra a comparação do sinal de corrente antes e depois de sua passagem pelo sample and hold. A linha de cor vermelha é a corrente da saída do filtro analógico e a linha de cor azul é a mesma corrente após a passagem pelo sample and hold.

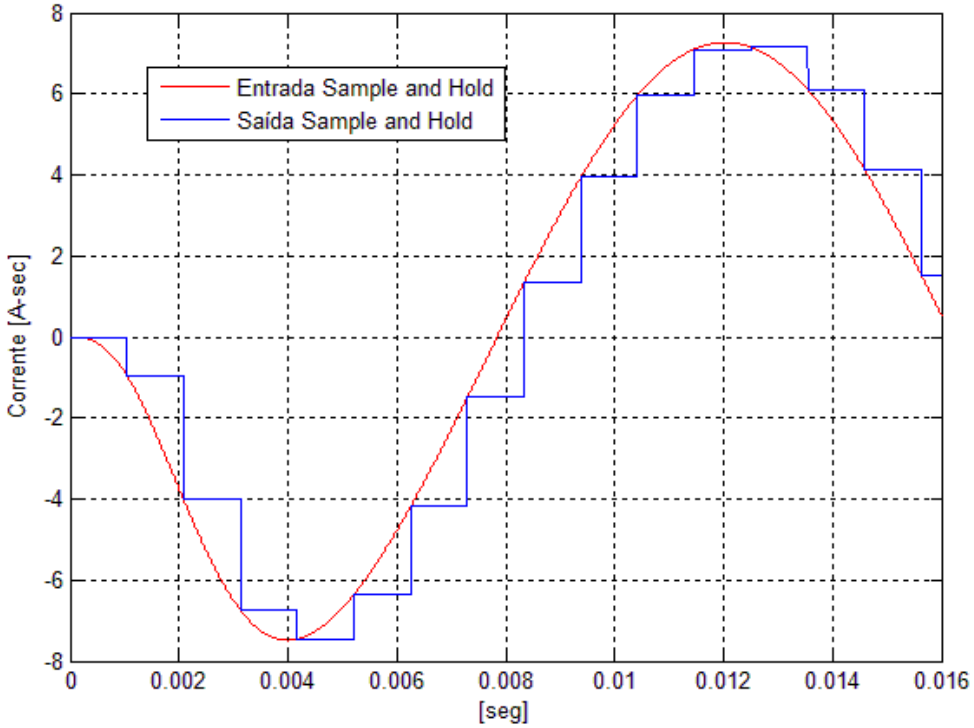


Figura 3.10 –Comparação dos sinais antes e depois da passagem pelo sample and hold.

3.2.2.3 Conversor A/D

O conversor A/D realiza a transformação do sinal analógico em uma palavra digital de vários bits. Neste caso, o método de implementação da conversão utilizado foi por aproximação sucessiva, que é o mais usual nos relés de proteção. Dentre os métodos disponíveis para a modelagem do conversor, foi escolhida a representação de números negativos em complemento

de dois e a utilização de palavras de 16 bits. Na equação 3.13 se define a resolução do conversor A/D, na qual *Y* representa a excursão simétrica do sinal analógico de entrada, no caso 10 V, e *b* é o tamanho em bits da palavra digital menos um, ou seja, 15.

$$Res = \frac{Y}{2^b - 1} \tag{3.13}$$

Para um determinado valor *x*, o valor digitalizado Z_{10} pode ser definido pelas equações 3.14a e 3.14b. Onde Z_{10} é um valor inteiro na base 10 e *ROUND* representa a operação de arredondamento.

$$Z_{10} = \begin{cases} ROUND(\frac{x * (2^b - 1)}{Y}) & , se\ x\ \text{é}\ positivo \quad (3.14a) \\ ROUND(\frac{(2 * Y - |x|) * 2^b}{Y}) & , se\ x\ \text{é}\ negativo \quad (3.14b) \end{cases}$$

A partir da resolução do conversor A/D, obtém-se o valor de saída em ponto flutuante como:

$$FP = \begin{cases} Z_{10} * Res & , se\ x\ \text{é}\ positivo \quad (3.15a) \\ [Z_{10} - 2^{b+1}] * Res & , se\ x\ \text{é}\ negativo \quad (3.15b) \end{cases}$$

A sua implementação foi realizada no ambiente MODELS, como é mostrada no Quadro 3.5. O sinal de entrada é a corrente vinda do SAMPLE AND HOLD e o sinal de saída, que também é a mesma corrente, vai para o circuito BUFFER, como é mostrado no Quadro 3.5.

3.2.2.4 Buffer

O buffer é responsável por armazenar as amostras das correntes e das tensões que serão utilizadas no algoritmo de estimação dos fasores. Para o algoritmo de estimação de fasores escolhido são utilizadas 17 amostras, o que corresponde a um ciclo mais uma amostra. Para sua implementação foi utilizado o ambiente MODELS, como é mostrado no Quadro 3.6.

Quadro 3.5 – Modelo do conversor A/D implementado na MODELS.

```
MODEL CONVERSOR
        INPUT
                isSH                    -- Sinal de entrada vindo do sample and hold
        OUTPUT
                isAD                    -- Sinal de saída do conversor A/D vai para o circuito
        Buffer
        INIT
                Y := 10                 -- Valor de pico do conversor A/D
                b := 15                 -- (Número de bits das palavras do conversor)-1
                Res := Y/((2**b)-1)     -- Resolução do conversor como na equação 3.13
        ENDINIT
        EXEC
                IF isSH >= 0 THEN                       -- Verifica se a amostra é positiva ou
        negativa
                        Z10 := round(isSH /Res)                         -- Equações 3.13 e 3.14a
                        isAD := Z10*Res                                 -- Equação 3.15a
                 ELSE
                        Z10 := round((((2*Y-abs(isSH))*(2**b)))/Y)      -- Equação 3.14b
                        isAD := (Z10-2**(b+1))*Res                      -- Equação 3.15b
                ENDIF
        ENDEXEC
ENDMODEL
```

Quadro 3.6 – Modelo do buffer implementado na MODELS.

```
MODEL BUFFER
        INPUT
                isAD                    -- Sinal de entrada vindo do conversor A/D
        OUTPUT
                BuffeIs[1..17]          -- Sinal de saída do buffer vai para o circuito filtro fasor
        INIT
                BuffeIs[1..17]:=0
        ENDINIT
        TIMESTEP MIN: 1,0416666667E-3           -- Frequência de 960Hz
        EXEC
                FOR i:=2 TO 17 DO
                        BuffeIs[i-1]:= BuffeIs[i]
                ENDFOR
        BuffeIs[17]:= isAD
        ENDEXEC
ENDMODEL
```

3.2.2.5 Filtro fasor

Durante a ocorrência de faltas no sistema elétrico surgem a componente de decaimento exponencial CC e as harmônicas transitórias. Estas contribuições dificultam a estimação da componente fundamental dos sinais de tensão e corrente. Estas componentes alteram o cálculo de módulo e a fase dos fasores estimados e afetam o bom desempenho dos algoritmos dos relés de proteção.

A função do filtro fasor digital dos relés de proteção é de eliminar a componente CC e os harmônicos, para assim só trabalhar com a componente fundamental. Para a estimação de um fasor se tem vários tipos de filtros, neste trabalho, aplica-se o Filtro Cosseno por ter melhor desempenho [25].

O Filtro Fourier de ciclo completo é baseado nas seguintes equações que representam, respectivamente, a parte real e imaginária do fasor estimado é:

$$I_r{}^m = \frac{2}{N}\sum_{n=0}^{N-1} x[n] * \cos\left(n * \frac{2\pi}{N} m\right) \tag{3.16}$$

$$I_i{}^m = \frac{2}{N}\sum_{n=0}^{N-1} x[n] * \sin\left(n * \frac{2\pi}{N} m\right) \tag{3.17}$$

Nas quais *N* é o número de amostras por ciclo, *x* é o sinal de entrada e *m* é a ordem harmônica.

O Filtro Fourier de meio ciclo é baseado nas seguintes equações que representam, respectivamente, a parte real e imaginária do fasor estimado é:

$$I_r{}^m = \frac{4}{N}\sum_{n=0}^{N/2-1} x[n] * \cos\left(n * \frac{2\pi}{N} m\right) \tag{3.18}$$

$$I_i{}^m = \frac{4}{N}\sum_{n=0}^{N/2-1} x[n] * \sin\left(n * \frac{2\pi}{N} m\right) \tag{3.19}$$

O Filtro Coseno é baseado nas seguintes equações que representam, respectivamente, a parte real e imaginária do fasor estimado é:

$$I_r{}^m(n) = \frac{2}{N}\sum_{n=0}^{N-1} x[n] * \cos\left(n * \frac{2\pi}{N} m\right) \tag{3.20}$$

$$I_i{}^m = \frac{I_r{}^m(n-1) - \cos\left(m * \frac{2\pi}{N}\right) * I_r{}^m(n)}{\sin\left(m * \frac{2\pi}{N}\right)} \tag{3.21}$$

Neste trabalho aplica-se o Filtro Cosseno e para sua implementação foi utilizado o ambiente MODELS, como é mostrado no Quadro 3.7. O sinal de entrada é a corrente proveniente do BUFFER e o sinal de saída é a mesma corrente que vai para o circuito RELÉ DIRECIONAL, como é mostrado no Quadro 3.7.

Quadro 3.7 – Modelo do filtro fasor implementado na MODELS.

```
MODEL FILTROFASOR
        INPUT
                BuffeIs [1..17]                         -- Sinal de entrada vindo do buffer
        CONST
                amostras {val: 16}
                delta {val: 2*pi/amostras}
        OUTPUT
                re, im
        EXEC
                -- Componente fundamental:
                M1:=0
                M2:=0
                FOR i:=1 TO 16 DO
                        M1 := M1 + (sqrt(2)/amostras)* BuffeIs [i]*cos((i-1)*delta)
                        M2 := M2 + (sqrt(2)/amostras)* BuffeIs [i+1]*cos((i-1)*delta)
                ENDFOR
                re := (2/amostras)*M2                                   -- Equação 3.20
                im := (2/amostras)* (-M2*cos(delta)+M1)/sin(delta)      -- Equação 3.21
        ENDEXEC
ENDMODEL
```

Na figura 3.11 é mostrado um sinal e seu fasor estimado com os três tipos de filtros (Filtro Fourier de ciclo completo, Filtro Fourier de meio ciclo e Filtro Cosseno).

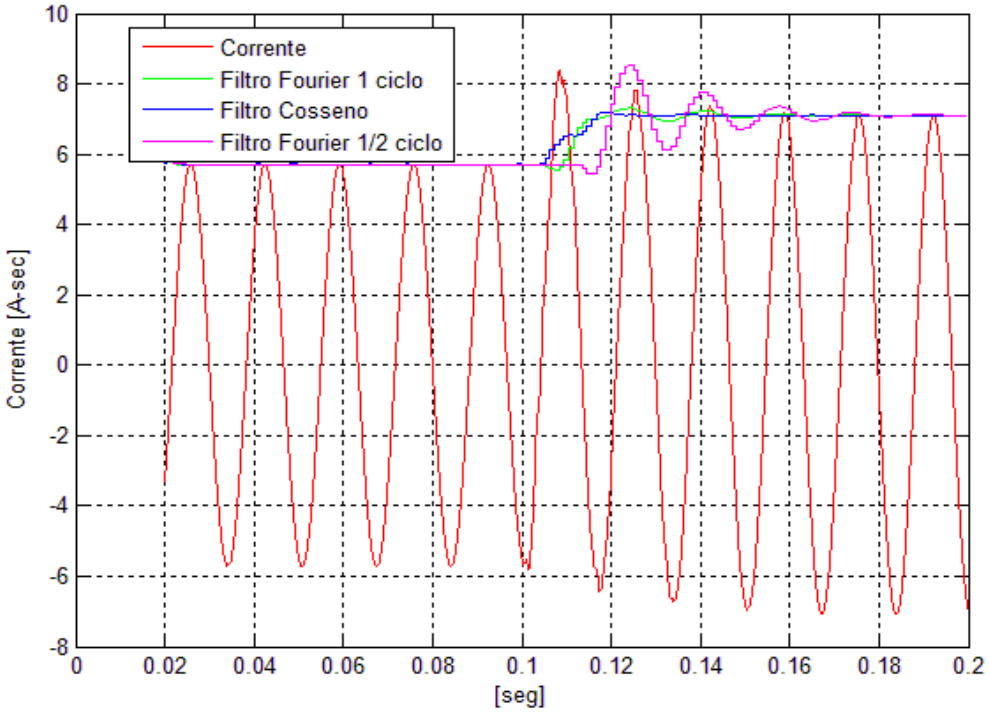


Figura 3.11 –Comparação dos Filtros Fourier, Cosseno e Fourier meio ciclo.

Com a finalidade de comparar o desempenho dos três filtros na proteção foram feitas simulações com os três filtros mencionados. Os dois principais fatores que afetam o desempenho dos relés de proteção são a velocidade de atuação e a convergência.

Na figura 3.12 são apresentadas as impedâncias de sequência negativa calculadas pelo relé direcional 32Q modelado e se pode ver que com o Filtro Cosseno o relé atua mais rápido, seguido pelo Filtro Fourier de ciclo completo e o Filtro Fourier de meio ciclo tem o pior desempenho.

Na figura 3.13 são apresentadas a localização de falta em porcentagem o cálculo do relé modelado e se pode ver que com o Filtro Cosseno a resposta do relé converge mais rapidamente, em seguida temos o Filtro de Fourier completo e finalmente o Filtro Fourier de meio ciclo, que tem o pior desempenho quando analisamos a convergência.

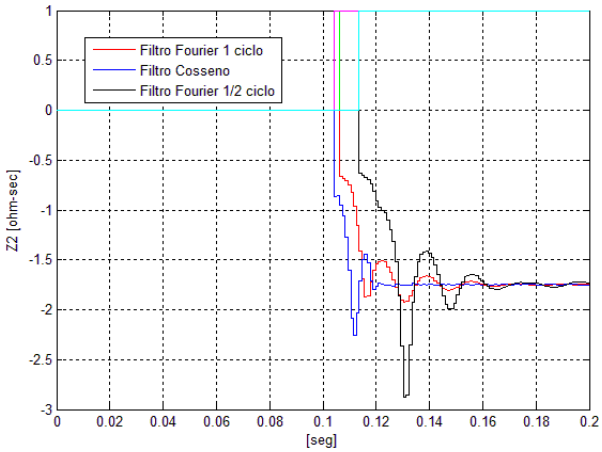


Figura 3.12 –Impedâncias de sequência negativa calculadas pelo relé.

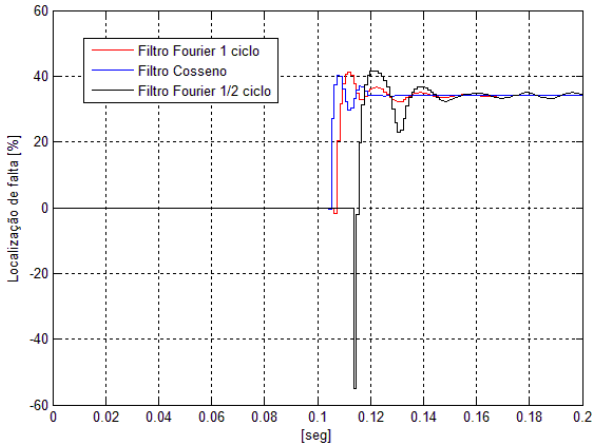


Figura 3.13 - Localização de falta calculada pelo relé.

3.2.2.6 Relé direcional implementado

Os relés direcionais utilizam a tensão e a corrente em componentes de sequência negativa e sequência zero. Para a sequência negativa o relé faz o cálculo com as equações 2.7 e 2.8 da seção 2.4.2 e para a sequência zero o relé faz medições dos transformadores de tensão e corrente, com descrito na seção 2.4.1. O cálculo das componentes de sequência foi feito no ambiente MODELS, como é mostrado no Quadro 3.8, utilizando o sinal de entrada vindo do FILTRO FASOR.

Quadro 3.8 – Modelo das tensões e das correntes em sequências implementado na MODELS.

```
MODEL SEQUENCIAS
  INPUT
      IfunI0[1..2]                    -- Fasor da corrente 3I0
      Ifund[1..6]                     -- Fasores das correntes de fases
      Vfund[1..6]                     -- Fasores das tensões de fases
      VfunV0[1..2]                    -- Fasor da tensão 3V0
  OUTPUT
      I2[1..3], I1[1..3], I0[1..3]    -- Saída das correntes em sequências
      V0[1..3],  V1[1..3], V2[1..3]   -- Saída das tensões em sequências
  EXEC
      -- Corrente de sequência zero
      I0[1..2]:=IfunI0[1..2]/3
      I0[3]:=norm(I0[1],I0[2])
      -- Corrente de sequência positiva
      I1[1]:=(Ifund[1]-0,5*Ifund[3]-0,5*Ifund[5]+(sqrt(3)/2)*(-Ifund[4]+Ifund[6]))/3
      I1[2]:=(Ifund[2]-0,5*Ifund[4]-0,5*Ifund[6]+(sqrt(3)/2)*(-Ifund[5]+Ifund[3]))/3
      I1[3]:=norm(I1[1],I1[2])
      -- Corrente de sequência negativa
      I2[1]:=(Ifund[1]-0,5*Ifund[3]-0,5*Ifund[5]+(sqrt(3)/2)*(Ifund[4]-Ifund[6]))/3
      I2[2]:=(Ifund[2]-0,5*Ifund[4]-0,5*Ifund[6]+(sqrt(3)/2)*(Ifund[5]-Ifund[3]))/3
      I2[3]:=norm(I2[1],I2[2])
      -- Tensão de sequência zero
      V0[1..2]:=VfunV0[1..2]/3
      V0[3]:=norm(V0[1],V0[2])
      -- Tensão de sequência positiva
      V1[1]:=(Vfund[1]-0,5*Vfund[3]-0,5*Vfund[5]+(sqrt(3)/2)*(-Vfund[4]+Vfund[6]))/3
      V1[2]:=(Vfund[2]-0,5*Vfund[4]-0,5*Vfund[6]+(sqrt(3)/2)*(-Vfund[5]+Vfund[3]))/3
      V1[3]:=norm(V1[1],V1[2])
      -- Tensão de sequência negativa
      V2[1]:=(Vfund[1]-0,5*Vfund[3]-0,5*Vfund[5]+(sqrt(3)/2)*(Vfund[4]-Vfund[6]))/3
      V2[2]:=(Vfund[2]-0,5*Vfund[4]-0,5*Vfund[6]+(sqrt(3)/2)*(Vfund[5]-Vfund[3]))/3
      V2[3]:=norm(V2[1],V2[2])
  ENDEXEC
ENDMODEL
```

Foram implementados os três relés direcionais com os métodos de polarização descritos no capítulo 2.

a) **Relé direcional com polarização por tensão de sequência zero ou sequência negativa:** Neste método de polarização se precisa do ajuste de ângulo de torque da tensão de polarização (*AngV*), assim como da corrente (*IPI*) e da tensão (*VPI*) de arranque e, no caso de haver linhas com compensação em série, se precisa da reatância do capacitor (*Xc*). Com o valor da reatância do capacitor o relé faz a compensação da tensão de polarização como se explicou na seção 2.6.3 do capítulo 2, e assim evita a inversão da tensão produzida pelos capacitores.

   Na tabela 3.1 se mostram as faixas de ajustes dos parâmetros mencionados que são fornecidas pelo relé SIEMENS [15]. Pode-se observar que o ângulo da zona "a frente" está limitada pelo ângulo de ±86° e não ±90° como se viu nas seções 2.4.1 e 2.4.2 do capítulo 2.

Tabela 3.1 – Parâmetros de ajuste do relé direcional com polarização por tensão.

Parâmetro	TC (Inom_secundário)	Faixa de ajuste	Ajuste padrão
AngV		-180° até 180°	-45°
Angulo da frente			±86°
VPI		0,15 V até 20 V	2 V
IPI	1 A	0,03 A até 10 A	0,03 A
	5 A	0,15 A até 50 A	0,15 A
Xc	1 A	0 até 600 Ω	10 Ω
	5 A	0 até 120 Ω	2 Ω

Todos os ajustes mencionados são apresentados no código DATA da MODELS do quadro 3.9. Como sinal de entrada se utilizam a tensão e a corrente de sequência negativa ou sequência zero, já que neste método de polarização as duas sequências têm operações iguais. No quadro 3.9 se apresenta parte do modelo e no anexo A7 se apresenta todo o modelo implementado na MODELS.

Quadro 3.9 – Parte do modelo do relé direcional (polarização por tensão 3V2 ou 3V0) implementado na MODELS.

```
MODEL DIR67NPOLV
   DATA
            AngV              -- Angulo de torque [°]
            VPI               -- Tensão mínimo de arranque [V]
            IPI               -- Corrente mínimo de arranque [A]
            Xc                -- Reatância do capacitor em série à linha [ohm-sec]
   INPUT
           I[1..3], V[1..3]   -- Corrente e tensão de entrada (sequência negativa ou sequência zero)
   OUTPUT
           IOPE[1..2], VPOL[1..2]      -- Corrente e tensão de saída (sequência negativa ou sequência zero)
           FR[1..2], AnFR[1..2], AnRE[1..2], F, R
   EXEC
           IF (3*I[3]>=IPI) AND (3*V[3]>=VPI) THEN
           --- Tensão de polarização
           VPOL[1]:=3*norm(Xc*I[2]+V[1],-Xc*I[1]+V[2])*cos(AngV*pi/180+atan2(-Xc*I[1]+V[2],
Xc*I[2]+V[1]))
           VPOL[2]:=3*norm(Xc*I[2]+V[1], -Xc*I[1]+V[2])*sin(AngV*pi/180+atan2(-Xc*I[1]+V[2],
Xc*I[2]+V[1]))
           --- Corrente de operação
              IOPE[1]:=-3*I[1]
              IOPE[2]:=-3*I[2]
           ENDIF
   ENDEXEC
ENDMODEL
```

b) **Relé direcional com polarização por corrente de sequência zero ou sequência negativa:** Neste método de polarização se precisa do ajuste de dois ângulos para a zona à frente (AngB=β e AngA=α), assim também da corrente (IPI) e da tensão (VPI) de arranque e caso existam linhas com compensação em série, se precisa da reatância do capacitor (Xc) em série para que o relé faça a compensação da tensão

de operação, como se explicou na seção 2.6.3 do capítulo 2, e assim evite a inversão da tensão produzida pelos capacitores. Na tabela 3.2 se apresentam as faixas de ajustes dos parâmetros mencionados que são fornecidas pelo relé SIEMENS [16].

Tabela 3.2 – Parâmetros de ajuste do relé direcional com polarização por corrente.

Parâmetro	TC (Inom_secundário)	Faixa de ajuste	Ajuste padrão
AngB		0° até 360°	122°
AngA		0° até 360°	338°
VPI		0,15 V até 34 V	1,213 V
IPI	1 A	0,03 A até 10 A	0,03 A
	5 A	0,15 A até 50 A	0,15 A
Xc	1 A	0 até 600 Ω	10 Ω
	5 A	0 até 120 Ω	2 Ω

Todos os ajustes mencionados se apresentam em DATA da MODELS do quadro 3.10. Como sinal de entrada se requer tensão e corrente de sequência negativa ou sequência zero, já que neste método de polarização as duas sequências têm operações iguais. No quadro 3.10 se apresenta parte do modelo e no anexo A8 se apresenta todo o modelo implementado na MODELS.

Quadro 3.10 – Parte do modelo do relé direcional (polarização por corrente 3I2 ou 3I0) implementado na MODELS.

```
MODEL DIR67NPOLI                    --Polarização por corrente de sequência zero ou sequência negativa
  DATA
      VPI                           -- Tensão mínimo de arranque [V]
      IPI                     -- Corrente mínimo de arranque [A]
      AngB                          -- Angulo beta da zona a frente [122°]
      AngA                          -- Angulo alfa da zona a frente [338°]
      Xc                      -- Reatância do capacitor em série à linha [ohm-sec]
  INPUT
      I[1..3], V[1..3]              -- Corrente e tensão de entrada (sequência negativa ou sequência zero)
  OUTPUT
      IPOL[1..2], VPE[1..2], F, R
  EXEC
      IF (3*I[3]>=IPI) AND (3*V[3]>=VPI) THEN
          ---Angulo da corrente de polarização
          IF (-I[1]=0) AND (-I[2]=0) THEN
              AnIP:=0
          ELSIF (-I[1]>0 AND -I[2]<0) OR (-I[1]<0 AND -I[2]<0) THEN
              AnIP:=360+atan2(-I[2], -I[1]) *180/pi
          ELSE
              AnIP:=atan2(-I[2], -I[1]) *180/pi
          ENDIF
          ---Angulo da tensão de operação
          IF (3*(V[1]+Xc*I[2])=0 AND 3*(V[2]-Xc*I[1])=0) THEN
              AnVP:=0
          ELSIF (3*(V[1]+Xc*I[2])>0 AND 3*(V[2]-Xc*I[1])<0) OR
                (3*(V[1]+Xc*I[2])<0 AND 3*(V[2]-Xc*I[1])<0) THEN
              AnVP:=360+atan2(3*V[2] - Xc*3*I[1], 3*V[1]+Xc*3*I[2]) *180/pi
          ELSE
              AnVP:=atan2(3*V[2] - Xc*3*I[1], 3*V[1]+Xc*3*I[2]) *180/pi
          ENDIF
      ENDIF
  ENDEXEC
ENDMODEL
```

c) **Relé direcional com impedâncias de sequência zero e sequência negativa:** O método de polarização por tensão de sequência negativa (32Q) foi descrito no Capítulo 2, seção 2.4.5.1. O relé calcula a impedância de sequência negativa mediante a equação 2.9. Assim como para o método de polarização por tensão de sequência zero (32V) descrito no Capítulo 2, seção 2.4.5.2, o relé calcula a impedância de sequência zero através da equação 2.10.

Para sua implementação foi utilizado o ambiente MODELS, como é apresentado no Quadro 3.11. Para a operação da proteção direcional se precisa dos parâmetros da linha como sua impedância de sequência zero (*Z0L*) e sequência positiva (*Z1L*), assim como seus ângulos respectivos (*Z01ANG* e *Z1ANG,* uma vez que estes são números complexos.). Também se precisa dos ajustes das zonas de "a frente" e "reversa" (*Z2F*, *Z2R*, *Z0F* e *Z0R*), os ajustes das correntes de arranque (ou partida) (*A50QF* e *A50QR*) e dos parâmetros *a0*, *a2* e *k0*. Na tabela 3.3 se apresentam as faixas de ajustes dos parâmetros mencionados [17]. Todos os ajustes mencionados se mostram em DATA da MODELS do quadro 3.11.

O fator *a2* aumenta a segurança dos elementos direcionais polarizados por tensão de sequência negativa. Este fator evita que o elemento direcional opere para correntes de sequência negativa originárias de desequilíbrios do sistema causados por assimetrias de linhas, saturação dos transformadores de corrente durante curtos-circuitos trifásicos, etc.

O fator *k0* é a relação entre as correntes de sequência negativa e sequência zero, de modo que o elemento direcional polarizado por tensão de sequência negativa seja habilitado antes do elemento polarizado por tensão de sequência zero.

O fator *a0* evita que o elemento direcional opere para correntes de sequência zero originárias de desequilíbrios do sistema causados por assimetrias de linhas, saturação dos transformadores de corrente durante curtos-circuitos trifásicos, etc.

Tabela 3.3 – Parâmetros de ajuste do relé direcional dos elementos 32Q e 32V.

Parâmetro	TC (Inom_secundário)	Faixa de ajuste
A50QF	1 A	0,05 até 1 A
A50QR	5 A	0,25 até 5 A
Z2F, Z2R, Z0F e Z0R	1 A	320 até 320 Ω
	5 A	-64 até 64 Ω
Z0L* e *Z1L		0,05 até 255 Ω
Z01ANG* e *Z1ANG		5 até 90°
a2* e *a0		0,02 até 0,5
k2		0,1 até 1,2

Quadro 3.11 – Modelo do relé direcional (com impedâncias Z2 e Z0) implementado na MODELS.

```
MODEL DIR67NZ0Z2
        DATA
                Z1ANG                   -- Angulo de sequência positiva da linha [°]
                Z1L                     -- Impedância de sequência positiva da linha [ohm-sec]
                Z0ANG                   -- Angulo de sequência cero da linha [°]
                Z0L                     -- Impedância de sequência cero da linha [ohm-sec]
                a0                      -- Sequência positiva, fator restrição, I0/I1
                a2                      -- Sequência positiva, fator restrição, I2/I1
                k0                      -- Sequência zero, fator restrição, I2/I0
                A50QF                   -- Frente direcional sobrecorrente pickup [A,sec]
                A50QR                   -- Reversa direcional sobrecorrente pickup [A,sec]
                Z2F                     -- Ajuste da zona a frente para polarização sequência negativa
                Z2R                     -- Ajuste da zona reversa para polarização sequência negativa
                Z0F                     -- Ajuste da zona a frente para polarização sequência zero
                Z0R                     -- Ajuste da zona reversa para polarização sequência zero
        INPUT
                I2[1..3],  I1[1..3],  I0[1..3]          -- As correntes em sequências positiva, negativa e zero
                V0[1..3], V1[1..3], V2[1..3]  -- As tensões em sequências positiva, negativa e zero
        OUTPUT
                Z2                      -- Impedância de sequência negativa
                Z2R, Z2F
                F32Q                    -- Função da sequência negativa para a direção frente
                Z0                      -- Impedância de sequência zero
                Z0R, Z0F
                F32V                    -- Função da sequência zero para a direção frente
        EXEC
                -- Polarização por tensão de sequência negativa 32Q
                IF (3*I2[3]>A50QF OR 3*I2[3]>A50QR) AND (I2[3]>a2*I1[3] AND I2[3]>k0*I0[3]) THEN
                    Z2:=(V2[1]*I2[1]+V2[2]*I2[2])/(I2[3]**2)*sin(rad(90-Z1ANG))+(V2[2]*I2[1]-
                        V2[1]*I2[2])/(I2[3]**2)*cos(rad(90-Z1ANG))
                    IF Z2<=Z2F THEN
                        F32Q:=1
                    ELSIF Z2>=Z2R THEN
                        F32Q:=0
                    ENDIF
                ELSE
                -- Polarização por tensão de sequência zero 32V
                IF (3*I0[3]>A50QF OR 3*I0[3]>A50QR) AND (I0[3]>a0*I1[3] AND I2[3]<k0*I0[3]) THEN
                    Z0:=(V0[1]*I0[1]+V0[2]*I0[2])/(I0[3]**2)*sin(rad(90-Z0ANG))+(V0[2]*I0[1]-
                        V0[1]*I0[2])/(I0[3]**2)*cos(rad(90-Z0ANG))
                    IF Z0<=Z0F THEN
                         F32V:=1
                    ELSIF Z0>=Z0R THEN
                        F32V:=0
                    ENDIF
                ELSE
        ENDEXEC
ENDMODEL
```

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A fim de avaliar o desempenho da proteção direcional com os modelos desenvolvidos serão apresentados resultados de simulações feitas no ATP utilizando dois sistemas elétricos. Os parâmetros utilizados são descritos neste capítulo.

4.1 DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS

Nas figuras 4.1 e 4.2 são apresentados os diagramas unifilares dos sistemas elétricos em análise. A linha de transmissão foi modelada com transposição do tipo 1/6-1/3-1/3-1/6.

Na figura 4.1 é apresentado o sistema elétrico com fontes nos extremos da linha de transmissão que tem 300 km de comprimento e conta com compensação reativa em derivação. Os relés direcionais analisados são R1 e R2 que se localizam nos extremos da linha, como se mostra na figura 4.1.

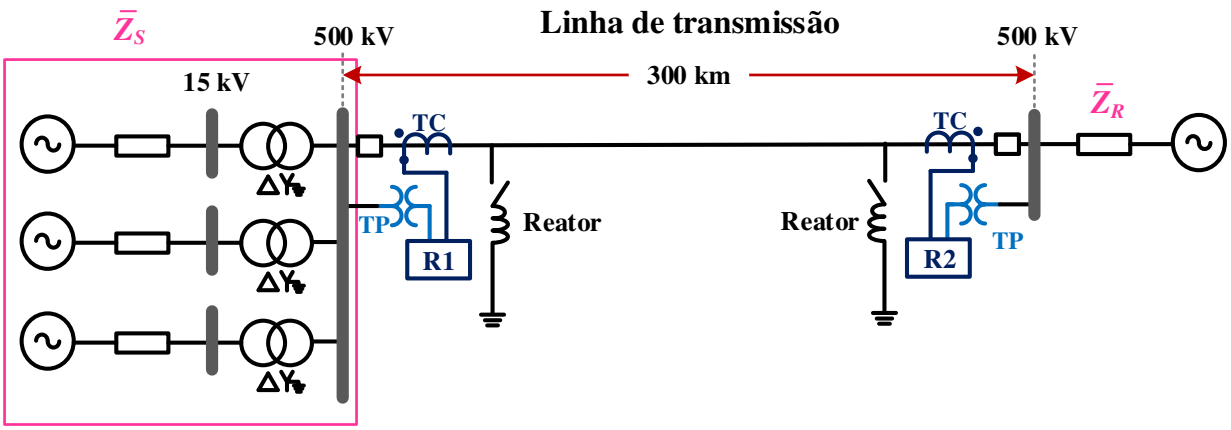


Figura 4.1 – Sistema elétrico em análise (linha de transmissão de 300 km, com compensação reativa em derivação).

Na figura 4.2 é apresentado o sistema elétrico com fontes nos extremos da linha de transmissão que tem 600 km de comprimento e conta com compensação em série e compensação reativa em derivação. A compensação em série (Xc) se localiza nos dois extremos da linha e suas impedâncias são de 25% da reatância longitudinal de sequência positiva total da linha.

Os relés direcionais analisados são R1, R2, R3, R4, R5 e R6. Os relés R1 e R6 se encontram antes dos capacitores (lado barramento) e os relés R2 e R5 se encontram depois dos capacitores (lado linha), como se mostra na figura 4.2. Num sistema real não seriam instalados dois relés nos terminais da linha, mas o objetivo deste caso foi o de verificar operações indevidas em função do posicionamento da medição de tensão do relé (dos TPs).

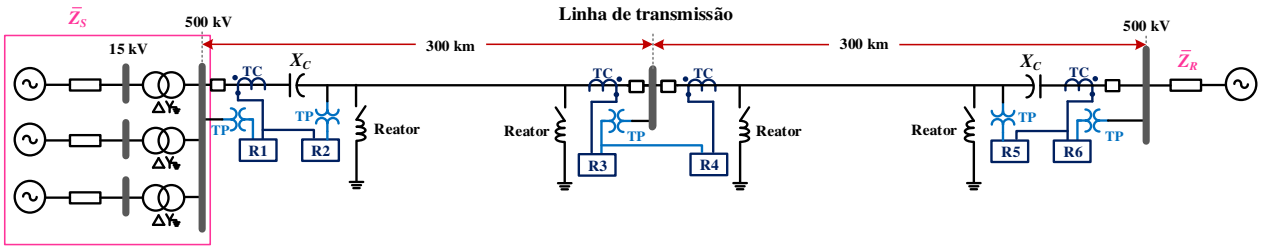


Figura 4.2 – Sistema elétrico em análise (linha de transmissão de 600 km com compensação em série e compensação reativa em derivação).

A geometria da linha de transmissão, especificamente a geometria dos feixes dos condutores de fase e os condutores dos cabos para-raios, assim como as distâncias vertical e horizontal deles é apresentada na figura 4.3.

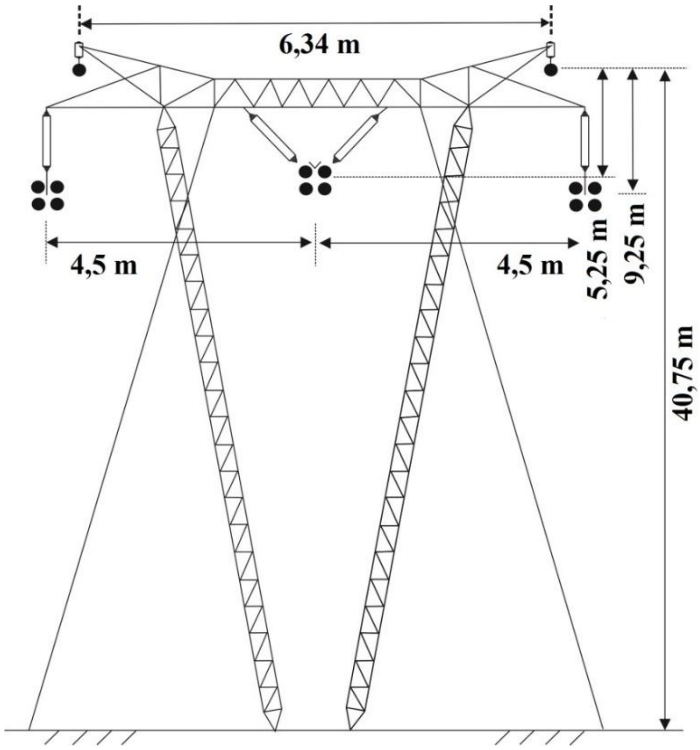
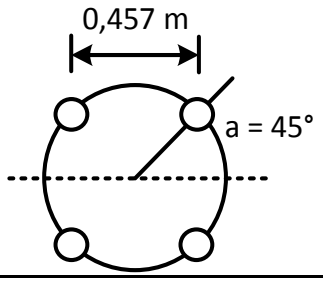


Figura 4.3 – Torre da linha de transmissão de 500 kV.

Os dados elétricos dos condutores de fase e os cabos para-raios da linha de transmissão são mostrados na tabela 4.1. A resistividade do solo assumida foi de 4000 Ω.m.

Tabela 4.1 – Características dos condutores da linha de transmissão de 500 kV.

	Condutor de fase	**Cabo de para-raios**
	500 kV	**500 kV**
N° de condutores em feixe	4	1
Distância dos feixes [m]		
Resistência DC [Ω/km]	0,0614	3,510
Raio externo [cm]	1,4795	0,457
Raio interno [cm]	0,3700	-
Permeabilidade magnética relativa	1	70

Na tabela 4.2 são apresentados os parâmetros elétricos com a transposição de tipo 1/6-1/3-1/3-1/6 da linha.

Tabela 4.2 – Parâmetros elétricos para 60 Hz da linha transposta do tipo 1/6-1/3-1/3-1/6.

Homopolar (sequência zero)	**R0 (Ω/km)**	0,47806
	X0 (Ω/km)	1,55690
	Y0 (μS/km)	2,60070
Não Homopolar (sequência positiva = negativa)	**R1 (Ω/km)**	0,016036
	X1 (Ω/km)	0,266530
	Y1 (μS/km)	6,11580

Na figura 4.4 na esquerda são apresentados os ganhos de tensão da linha de transmissão de 500 kV, sem e com compensação reativa de (70%; 80%; 90%; 95% e 100%), assim também se apresenta na tabela 4.3. Na tabela 4.5 se apresenta a potência reativa total da compensação reativa em derivação.

Na figura 4.4 na direita é apresentada a metade da admitância de compensação reativa (Yc/2) com respeito ao comprimento da linha de transmissão de 500 kV, com compensação reativa de (70%; 80%; 90%; 95% e 100%). Assim também se apresenta na tabela 4.4.

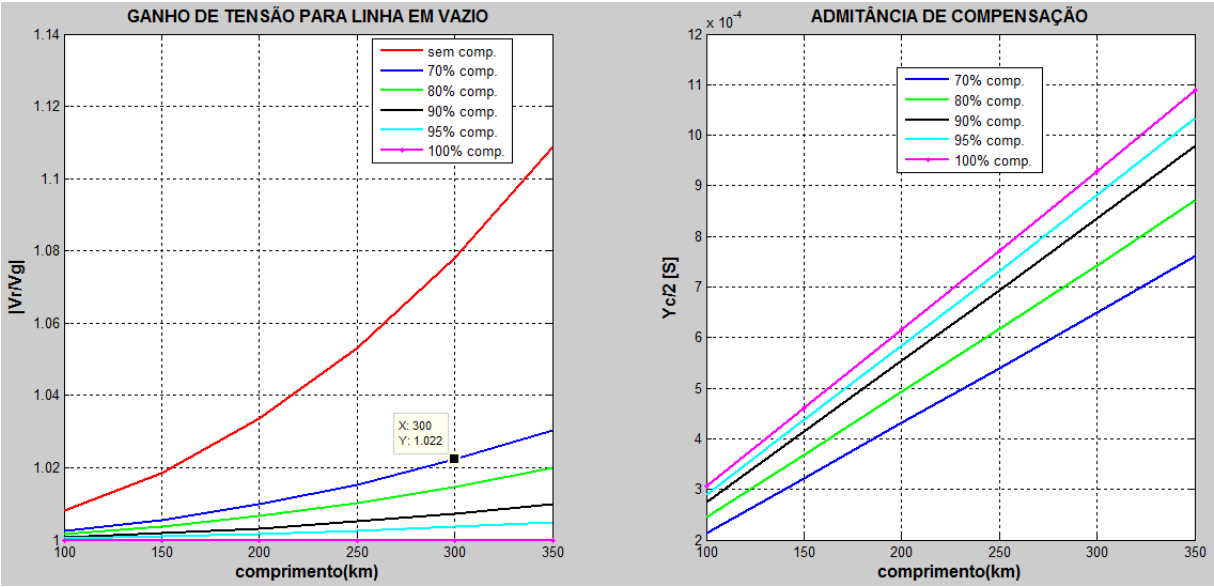


Figura 4.4 – Ganho de tensão e a admitância de compensação da linha de transmissão de 500 kV.

Tabela 4.3 – Ganho para compensação em derivação da linha de transmissão.

Comprimento da linha [km]	Ganho sem comp.	Ganho com comp. 70%	Ganho com comp. 80%	Ganho com comp. 90%	Ganho com comp. 95%	Ganho com comp. 100%
100	1,00821	1,00245	1,00163	1,00081	1,00041	1,00000
150	1,01862	1,00551	1,00367	1,00183	1,00091	1,00000
200	1,03351	1,00982	1,00653	1,00325	1,00162	1,00000
250	1,05319	1,01539	1,0102	1,00508	1,00253	1,00000
300	1,07811	1,02222	1,01471	1,0073	1,00364	1,00000
350	1,10886	1,03035	1,02003	1,00992	1,00493	1,00000

Tabela 4.4 – Admitância transversal da compensação em derivação da linha de transmissão.

Comprimento da linha [km]	Yc/2 [S] 70%	Yc/2 [S] 80%	Yc/2 [S] 90%	Yc/2 [S] 95%	Yc/2 [S] 100%
100	0,0002143	0,0002450	0,0002756	0,0003000	0,0003000
150	0,0003221	0,0003681	0,0004141	0,0004000	0,0005000
200	0,0004304	0,0004919	0,0005534	0,0006000	0,0006000
250	0,0005397	0,0006168	0,0006939	0,0007000	0,0008000
300	0,0006501	0,0007430	0,0008359	0,0009000	0,0009000
350	0,0007619	0,0008707	0,0009796	0,0010000	0.0011000

Tabela 4.5 – Reativo total da compensação em derivação da linha de transmissão.

Comprimento da linha [km]	Reativo 70% [Mvar]	Reativo 80% [Mvar]	Reativo 90% [Mvar]	Reativo 95% [Mvar]	Reativo 100% [Mvar]
100	107,17212	122,48242	137,79272	145,44787	153,10302
150	161,03221	184,03681	207,04141	218,54371	230,04601
200	215,22366	245,96989	276,71613	292,08925	307,46237
250	269,86114	308,41274	346,96433	366,24012	385,51592
300	325,06308	371,50067	417,93825	441,15704	464,37583
350	380,95267	435,37448	489,79629	517,00719	544,2181

Para as redes elétricas das figuras 4.1 e 4.2 se utilizou a compensação reativa em derivação a 70%. Os reatores são de 325 MVar com fator de qualidade (X/R) de 400 e reator de neutro de 2461 Ω com fator de qualidade (X/R) de 50 [26] [27].

4.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Com os modelamentos feitos dos relés direcionais será possível observar o seu desempenho, desde o momento da aplicação da falta, passando pela sua detecção e indo até o regime permanente da falta (resposta sustentada). Para todos os casos analisados as faltas começam no tempo 0,05 s. Os seguintes casos foram simulados:

a. Para a rede elétrica da figura 4.1 foram analisadas faltas monofásica, bifásica e bifásica a terra na linha e atrás do relé 1.
b. Para a rede elétrica da figura 4.2 foram analisadas faltas monofásicas na linha com e sem equipamento para-raios de ZnO (PR) do capacitor em série.
c. Foi analisada a saturação do transformador de corrente para a rede da figura 4.2.

Os dados dos transformadores de corrente e tensão são os apresentados na tabela 4.6. Os relés direcionais com operação de impedâncias (32Q e 32V) implementados calculam as impedâncias de sequência negativa e sequência zero em valores secundários. A obtenção em valores secundários é obtida com a divisão da relação de transformação do transformador de tensão entre a relação de transformação do transformador de corrente, como se mostra na tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Dados dos transformadores de corrente e de tensão.

Transformador de corrente [A]	600/5
Transformador de tensão [kV]	500/0,11
Transformação da impedância primária para a secundária	37,879

4.2.1 Rede da figura 4.1 Linha de 300 km com compensação reativa em derivação.

Na tabela 4.7 se apresentam os ajustes das zonas de operação ”a frente” e ”reversa” do relé direcional com o método de polarização por impedâncias de sequência negativa e sequência zero para os relés R1 e R2, em valores primários (Ω-prim) e secundários (Ω-sec). Tais ajustes foram calculados conforme apresentado no capítulo 2.

Tabela 4.7 – Ajustes das zonas “a frente” e “reversa” para os relés R1 e R2 em valores primários (Ω-prim) e secundários (Ω-sec).

	Relé R1		**Relé R2**	
	Z2F	***Z2R***	***Z2F***	***Z2R***
***Z2* [Ω-prim]**	39,9773	43,7652	39,9773	43,7652
***Z2* [Ω-sec]**	**1,0554**	**1,1554**	**1,0554**	**1,1554**
***Z0* [Ω-prim]**	233,5358	237,3237	233,5358	237,3237
***Z0* [Ω-sec]**	**6,1653**	**6,2653**	**6,1653**	**6,2653**

Na tabela 4.8 se apresentam os ajustes dos dados da linha de transmissão e dos parâmetros *a0*, *a2*, *k0*, *A50QF* e *A50QR*, sendo todos em valores secundários. Todos esses parâmetros se encontram descritos na seção 3.2.2.6 (c) do capítulo 3.

Os elementos 32Q e 32V serão ativados para correntes de desequilíbrios (I_2 e I_0) maiores do que 10% da corrente de sequência positiva I_1, que são dados pelos ajustes de *a2* e *a0* iguais a 0,1. Também serão ativados se as correntes $3I_2$ e $3I_0$ forem maiores do que 0,25 A-sec, de acordo com os ajustes de *A50QF* [A-sec].

Com o modelamento feito nos elementos 32Q e 32V só um de eles operará. Isso ocorre devido ao ajuste de *k0* igual a 0,2 sempre que a seguinte condição ($I_2 > 0{,}2 \cdot I_0$) for verdadeira. Se a condição anterior não for verdadeira então o elemento 32V será ativado.

Tabela 4.8 – Ajustes dos dados da linha e dos parâmetros *a0*, *a2*, *k0*, *A50QF* e *A50QR* para os relés R1 e R2.

	Relé R1	**Relé R2**
***Z1ANG* [°]**	86,557	86,557
***Z1L* [Ω-sec]**	2,115	2,115
***Z0ANG* [°]**	72,930	72,930
***Z0L* [Ω-sec]**	12,899	12,899
a0* e *a2	0,100	0,100
k0	0,200	0,200
***A50QF* e *A50QR* [A-sec]**	0,250	0,250

Nas tabelas 4.9 e 4.10 são apresentados os ajustes dos relés (R1 e R2) para os métodos de polarização por tensão e polarização por corrente, respectivamente. As proteções serão ativadas se suas respectivas correntes ($3I_2$ e $3I_0$) forem maiores do que 0,25 A-sec e suas respectivas tensões ($3V_2$ e $3V_0$) forem maiores do que 1,213 V-sec, que são dados pelos ajustes *IPI* e *VPI*, respectivamente. A impedância do capacitor é zero porque neste sistema elétrico não se tem compensação série.

Tabela 4.9 – Ajustes dos relés R1 e R2, para o método de polarização por tensão.

	Relé R1	**Relé R2**
***AngV* [°]**	-45°	-45°
***VPI* [V-sec]**	1,213	1,213
***IPI* [A-sec]**	0,25	0,25
***Xc* [Ω-sec]**	0	0

Tabela 4.10 – Ajustes dos relés R1 e R2, para o método de polarização por corrente.

	Relé R1	**Relé R2**
VPI [V-sec]	1,213	1,213
IPI [A-sec]	0,250	0,250
AngB [°]	122	122
AngA [°]	338	338
Xc [Ω-sec]	0	0

Nas figuras 4.5 até a figura 4.16 se apresentam os módulos das tensões e correntes de sequência negativa e sequência zero para faltas monofásica, bifásica e bifásica a terra ao longo da linha de 300 km. Pode-se verificar que as grandezas de sequência negativa são as mais indicadas a utilizar para todas as faltas desequilibradas, já que as de sequência zero são muito baixas para faltas de alta impedância, assim como para faltas no extremo remoto da linha, e não estão presentes para faltas bifásicas sem terra.

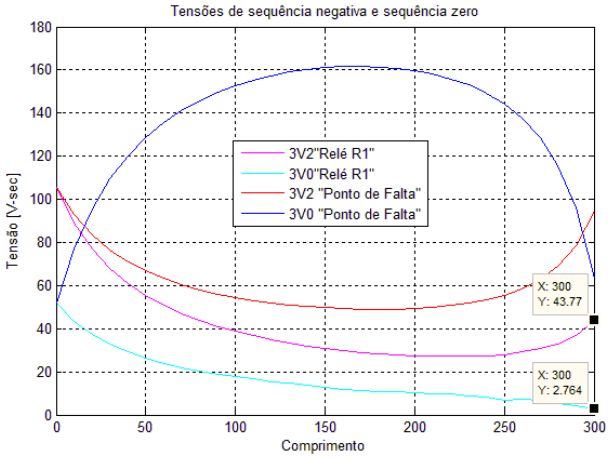


Figura 4.5 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta monofásica e R_f= 0 Ω.

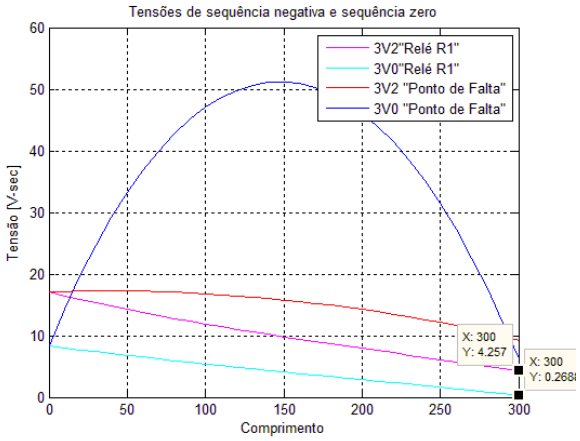


Figura 4.6 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta monofásica e R_f= 200 Ω .

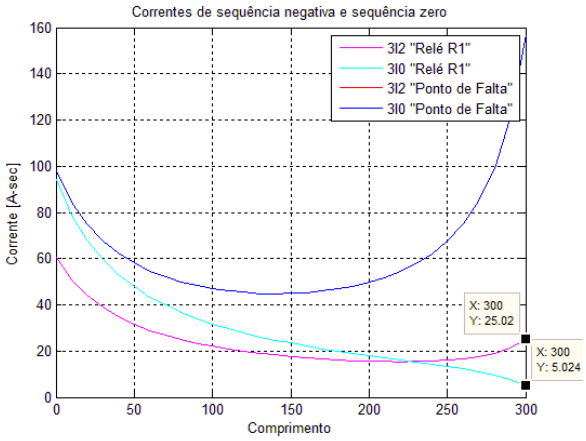


Figura 4.7 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta monofásica e $R_f = 0\ \Omega$.

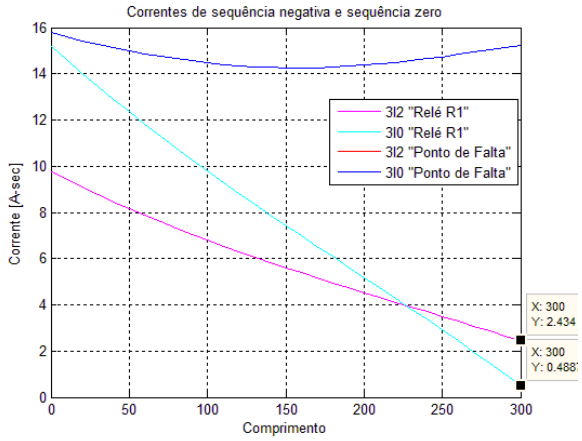


Figura 4.8 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta monofásica e $R_f = 200\ \Omega$.

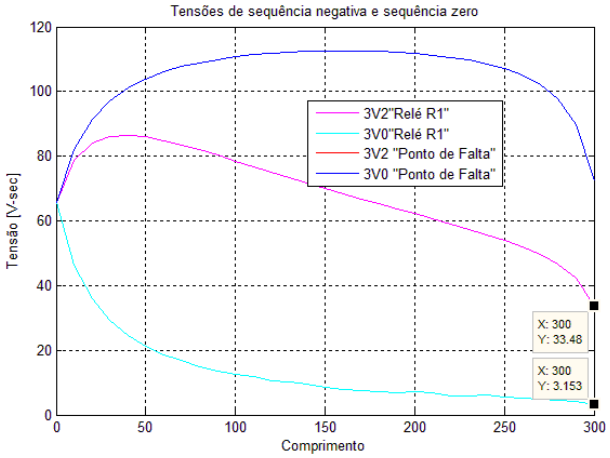


Figura 4.9 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta bifásica a terra e $R_f = 0\ \Omega$.

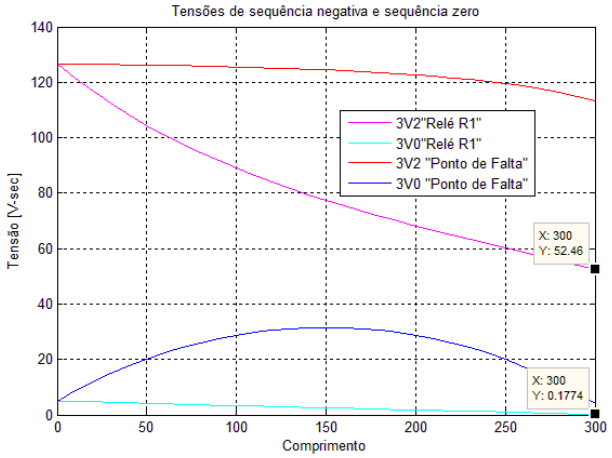


Figura 4.10 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta bifásica a terra e $R_f = 200\ \Omega$.

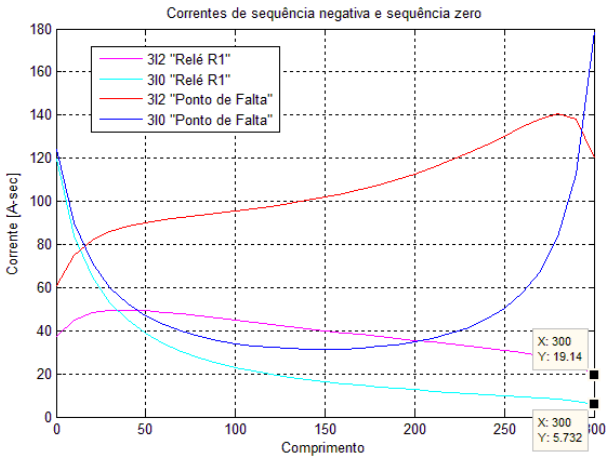


Figura 4.11 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta bifásica a terra e $R_f = 0\ \Omega$.

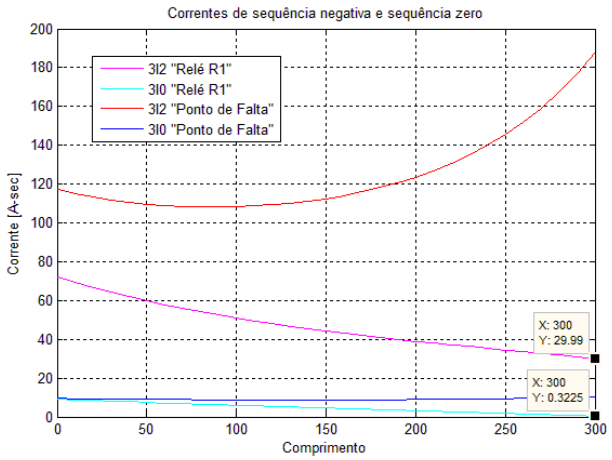


Figura 4.12 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta bifásica a terra e $R_f = 200\ \Omega$.

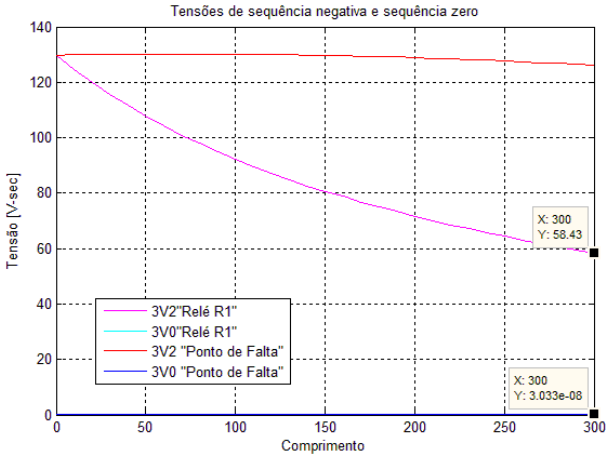


Figura 4.13 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta bifásica e $R_f = 0\ \Omega$.

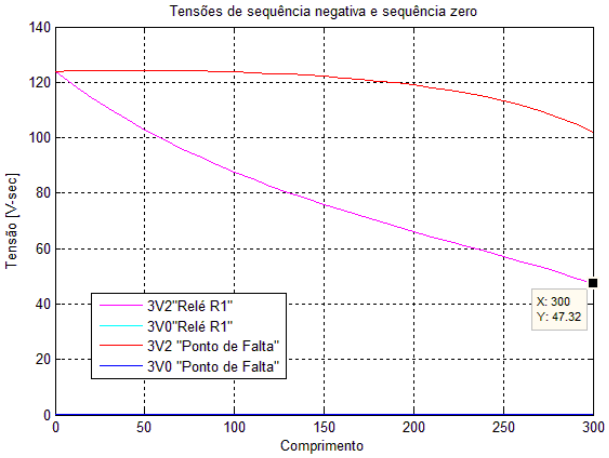


Figura 4.14 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta bifásica e $R_f = 20\ \Omega$.

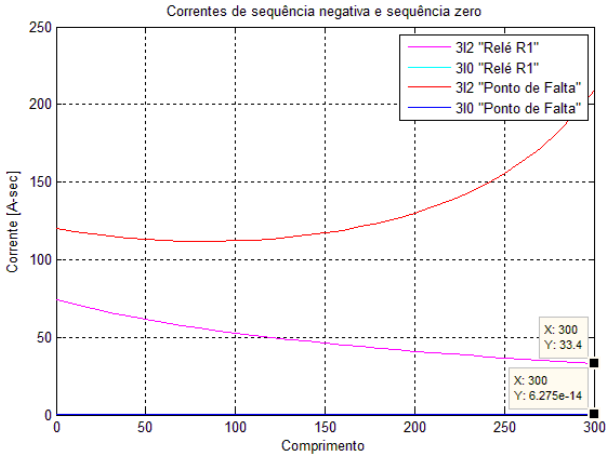


Figura 4.15 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta bifásica e $R_f = 0\ \Omega$.

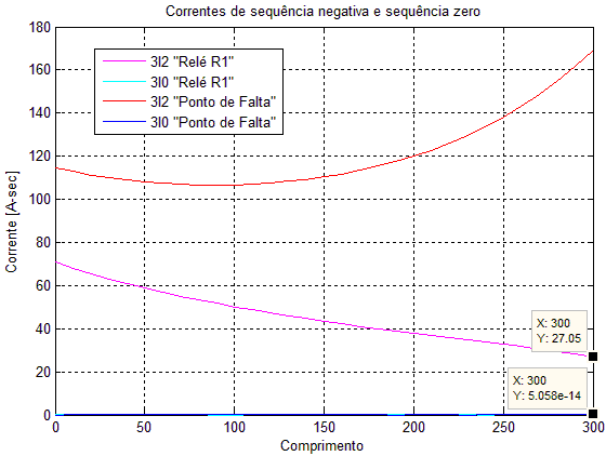


Figura 4.16 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta bifásica e $R_f = 20\ \Omega$.

4.2.1.1 Falta monofásica na linha de transmissão

Foram simuladas faltas monofásicas na linha a 16,6%; 50% e 83,33% de distância do relé R1. Nas figuras 4.17 e 4.18 são apresentadas as impedâncias de sequência negativa (*Z2*) calculadas pelos relés R1 e R2 no domínio do tempo. A falta começa em 0,05 s e depois de um ciclo da falta (0,0667 s) essas impedâncias (*Z2*) convergem às impedâncias equivalentes das redes atrás dos relés.

Na tabela 4.11 se apresentam as impedâncias de sequência negativa e sequência zero dos equivalentes das redes atrás dos relés R1 e R2 da figura 4.1 que foram utilizadas e calculadas pelos relés. Para faltas desequilibradas (monofásica, bifásica e bifásica a terra) ao

longo da linha os relés sempre calculam essas impedâncias equivalentes, como pode ser verificado nas simulações feitas nesta seção.

Tabela 4.11 – Impedâncias de sequência negativa e zero em valores primários (Ω-prim) e secundários (Ω-sec) das redes equivalentes atrás dos relés R1 e R2, da rede elétrica da figura 5.1.

	Relé R1			Relé R2		
	Teórico (Z_{2S})	Calculada pelo relé (Z_{2S})	Erro [%]	Teórico (Z_{2R})	Calculada pelo relé (Z_{2R})	Erro [%]
Z2 [Ω-prim]	66,2449	66,2121	0,05	26,3890	26,1364	0,96
Z2 [Ω-sec]	1,7489	1,7480	0,05	0,6967	0,6900	0,96
Z0 [Ω-prim]	21,2047	20,4129	3,73	15,0796	16,1742	-7,26
Z0 [Ω-sec]	0,5598	0,5389	3,77	0,3981	0,4270	-7,26

Os relés R1 e R2 operam corretamente indicando que as faltas ocorrem na direção "a frente", já que essas impedâncias (*Z2*) calculadas pelos relés se encontram abaixo dos seus ajustes da zona a frente (*Z2F*). A impedância (*Z2*) calculada pelo relé R1 é a impedância de sequência negativa da rede equivalente (Z_{2S}) atrás dele e de sinal negativo, como se mostra na figura 4.17. O relé R2 também calcula a impedância de sequência negativa (*Z2*) da rede equivalente (Z_{2R}) atrás dele e de sinal negativo, como se mostra na figura 4.18.

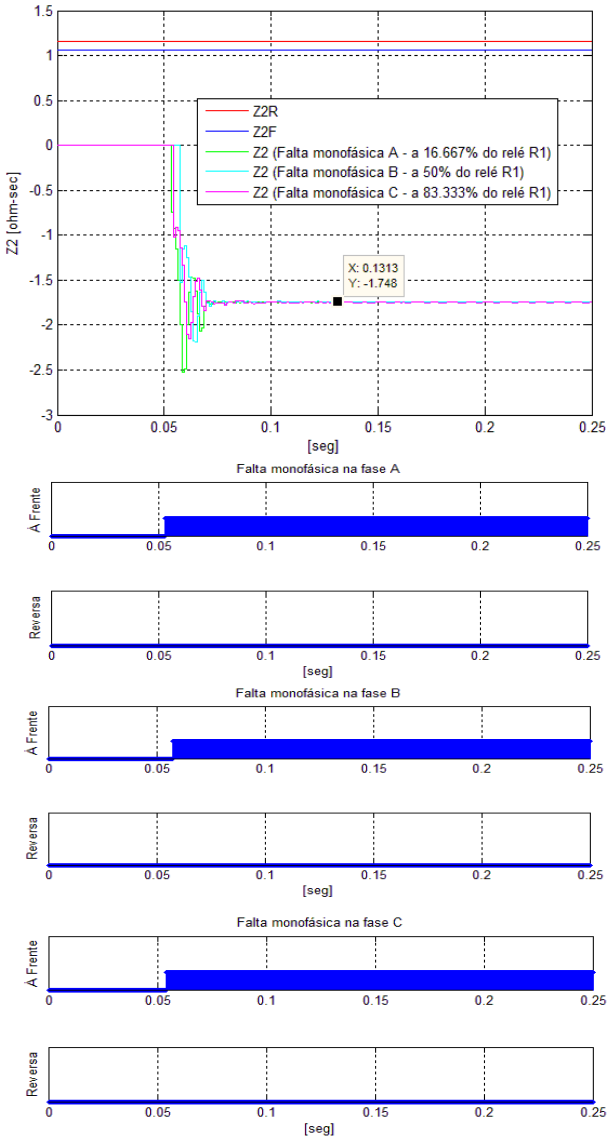


Figura 4.17 –Impedâncias *Z2* calculadas pelo relé R1, para as faltas monofásicas na LT.

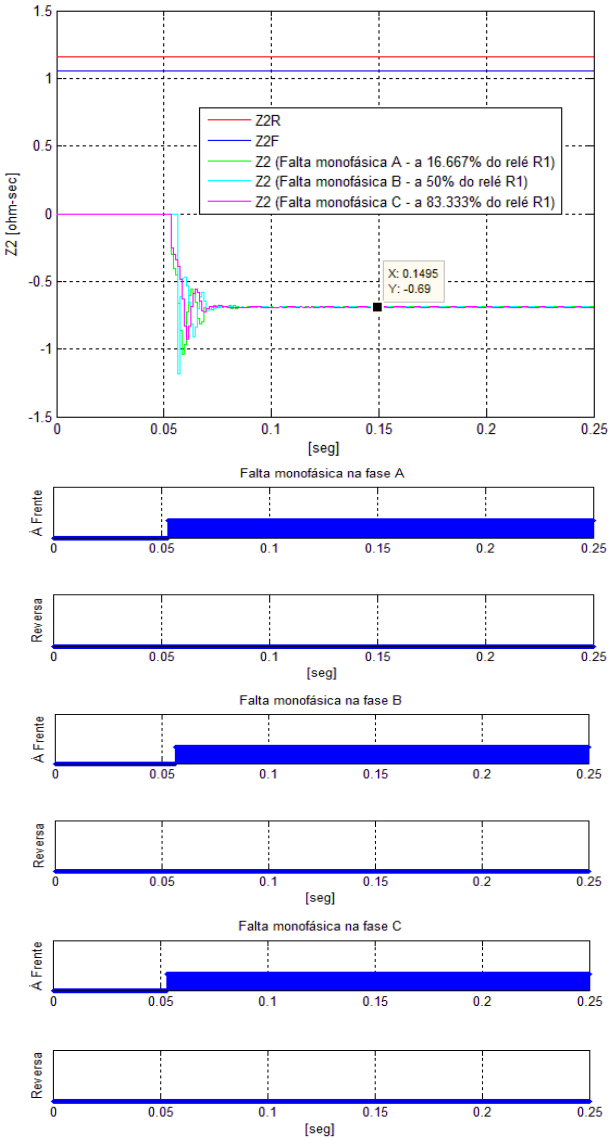


Figura 4.18 –Impedâncias *Z2* calculadas pelo relé R2, para as faltas monofásicas na LT.

Nas figuras 4.19 e 4.20 são apresentadas as tensões e correntes de sequência negativa vistas pelo relé R1 para as três faltas monofásicas na linha e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente. Pode-se observar que o relé R1 opera corretamente indicando que as faltas ocorrem na direção “a frente”.

Nas figuras 4.21 e 4.22 são apresentadas as tensões e correntes de sequência zero vistas pelo relé R1 para as três faltas monofásicas na linha e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente. Pode-se observar que o relé R1 opera corretamente indicando que as faltas ocorrem na direção “a frente”.

Nas figuras 4.23 e 4.24 são apresentadas as tensões e correntes de sequência negativa vistas pelo relé R2 para as três faltas monofásicas na linha e com os métodos de polarização por

corrente e polarização por tensão, respectivamente. Pode-se observar que o relé R2 opera corretamente indicando que as faltas ocorrem na direção “a frente”.

Nas figuras 4.25 e 4.26 são apresentadas as tensões e correntes de sequência zero vistas pelo relé R2 para as três faltas monofásicas na linha e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente. Pode-se observar que novamente o relé R2 opera corretamente indicando que as faltas ocorrem na direção “a frente”.

Pode-se observar que as correntes e tensões de sequência negativa e sequência zero se reduzem quando a falta é mais distante em relação aos relés. Isso ocorre porque as correntes são inversamente proporcionais à impedância da rede equivalente mais o trecho de impedância da linha entre o relé e ponto em falta. Desta forma, como a impedância de sequência zero é maior do que a impedância de sequência negativa (igual à de sequência positiva) da linha ocorre o maior decaimento da corrente de sequência zero.

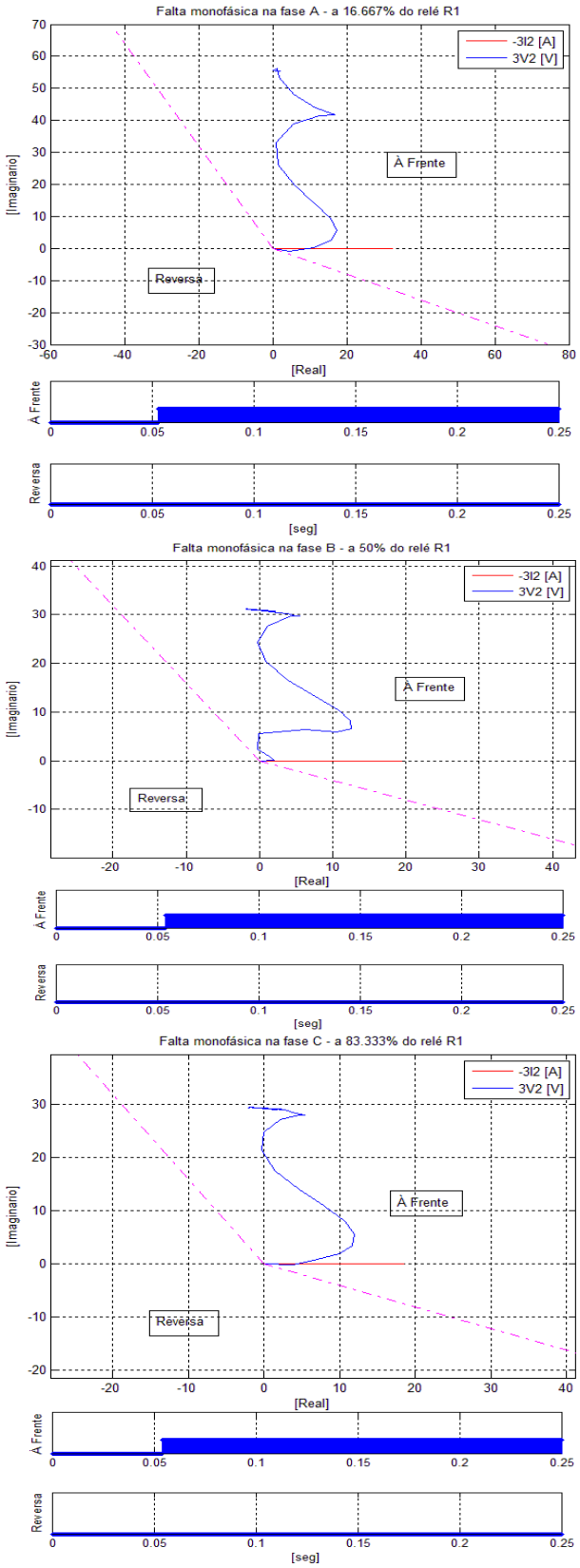


Figura 4.19 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na LT.

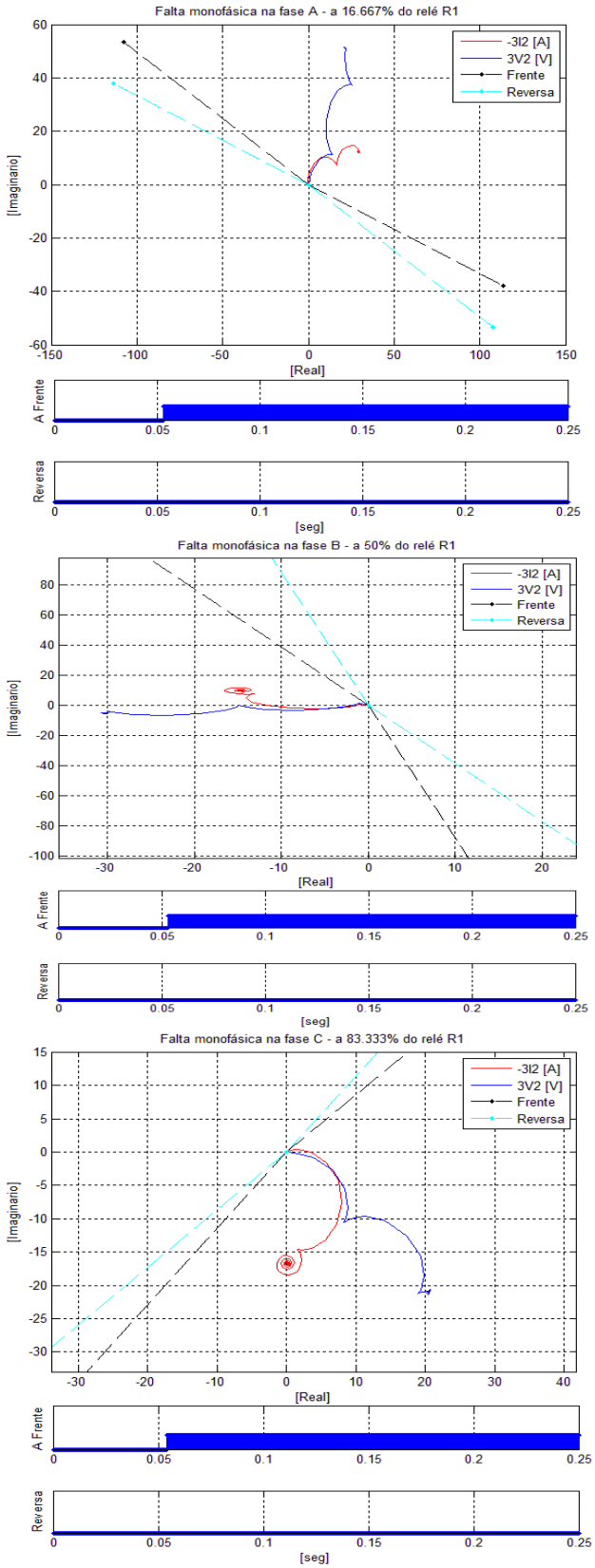


Figura 4.20 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na LT.

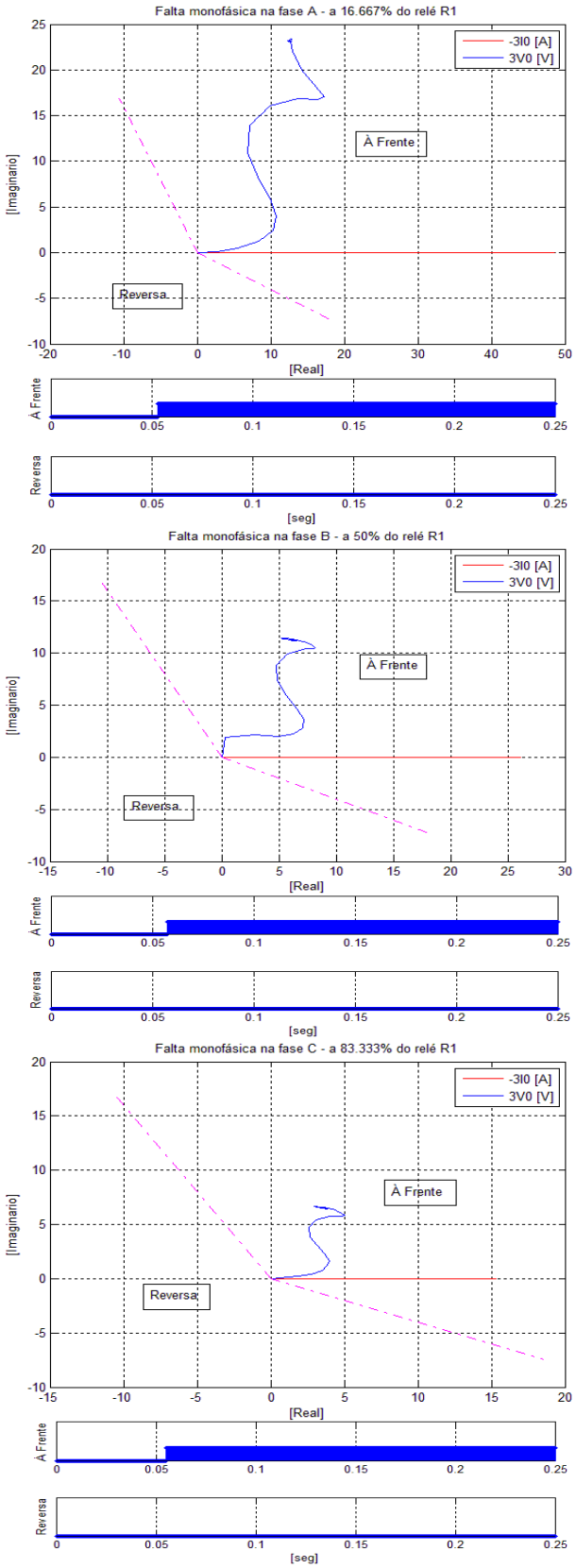


Figura 4.21 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na LT.

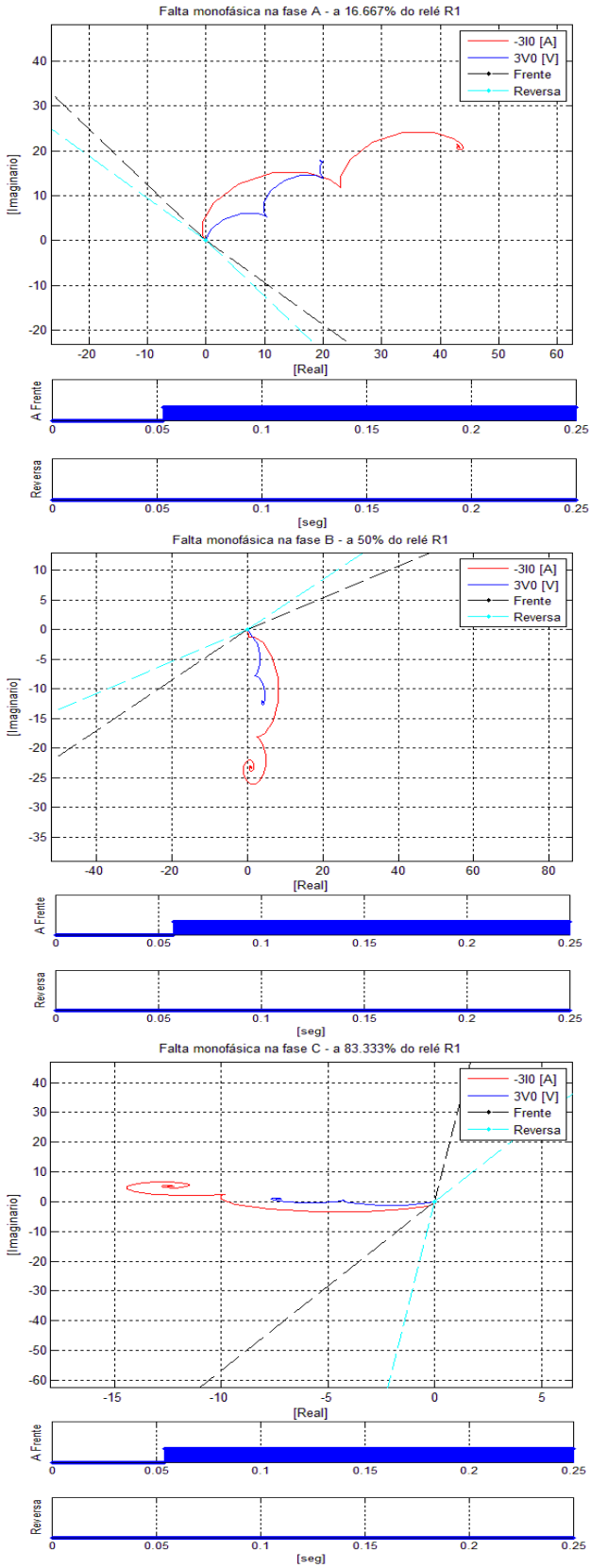


Figura 4.22 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na LT.

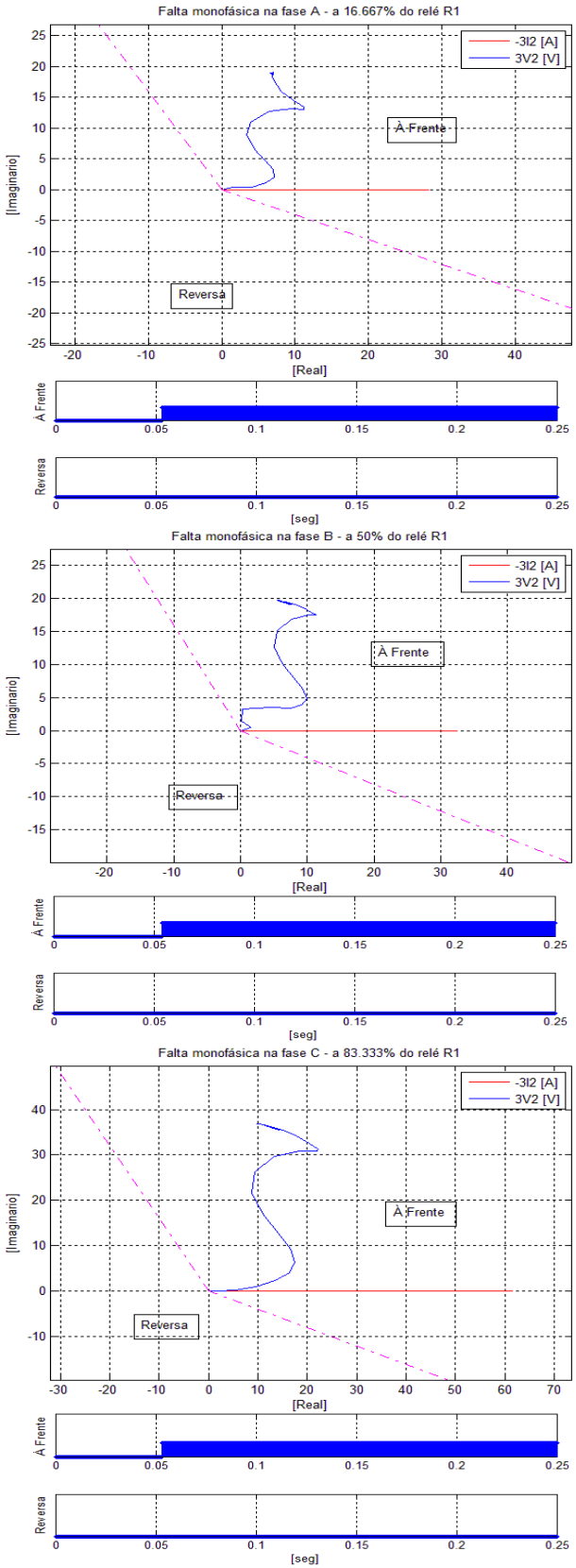


Figura 4.23 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R2, para as faltas monofásicas na LT.

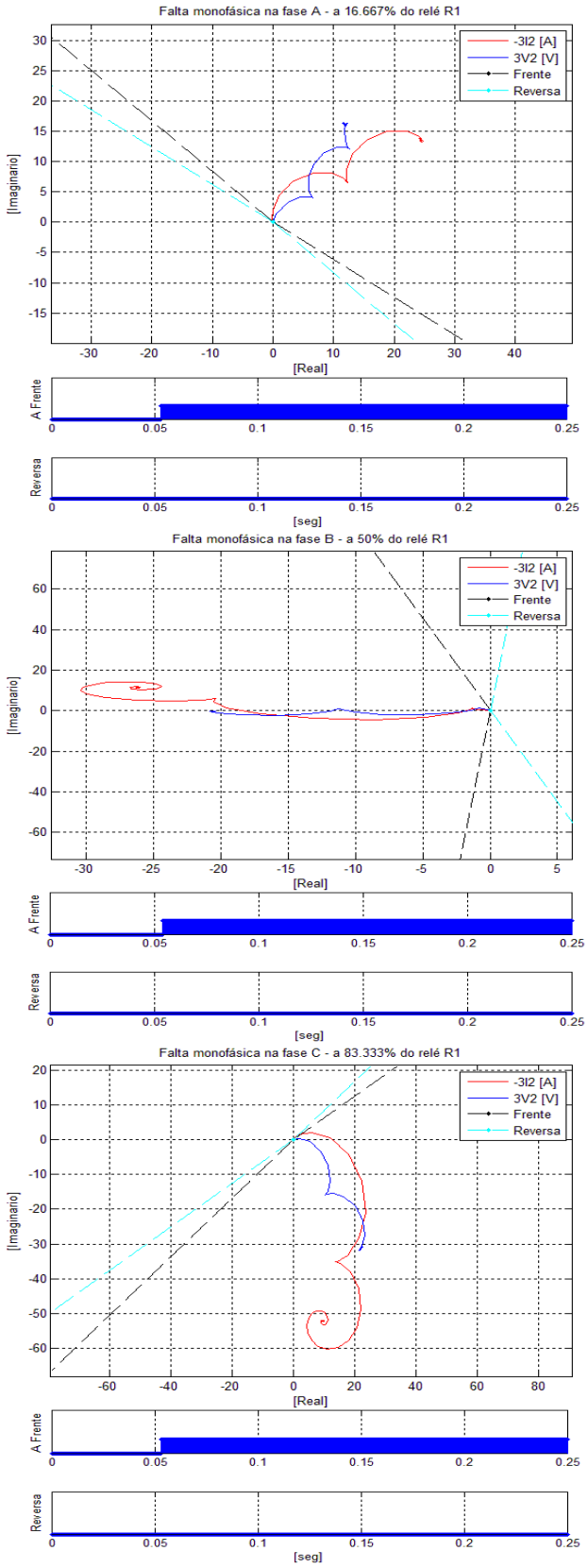


Figura 4.24 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R2, para as faltas monofásicas na LT.

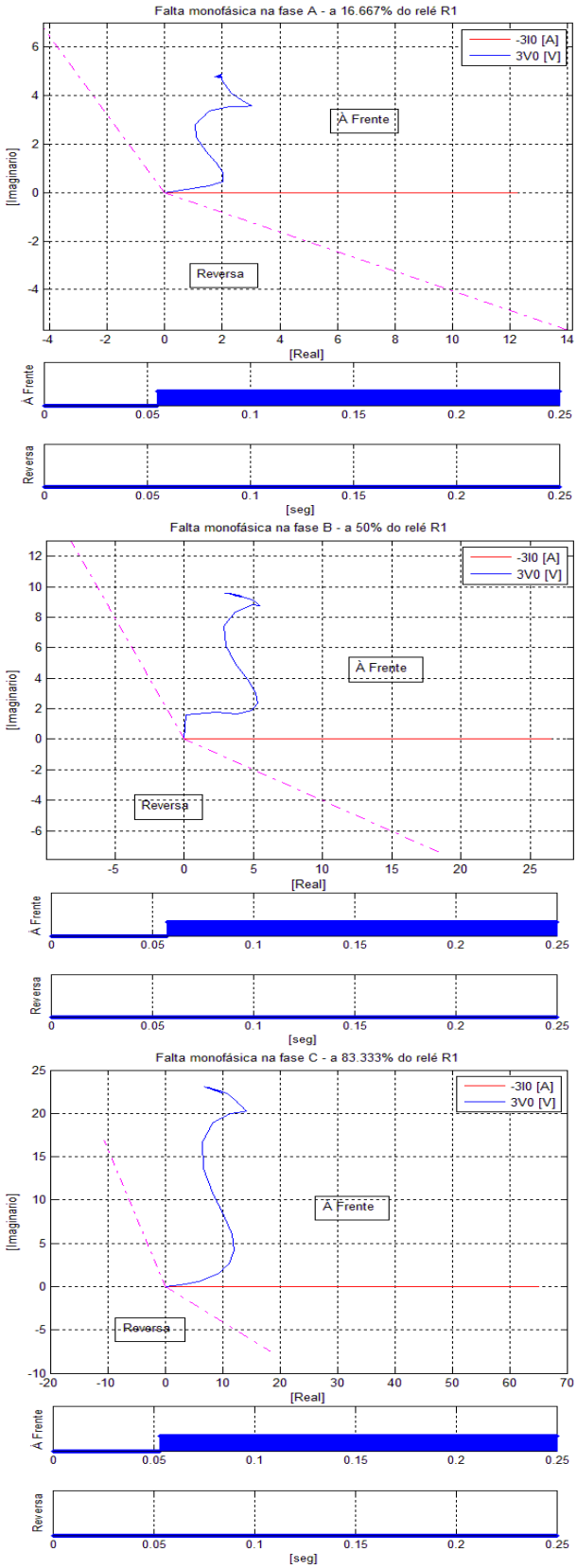


Figura 4.25 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R2, para as faltas monofásicas na LT.

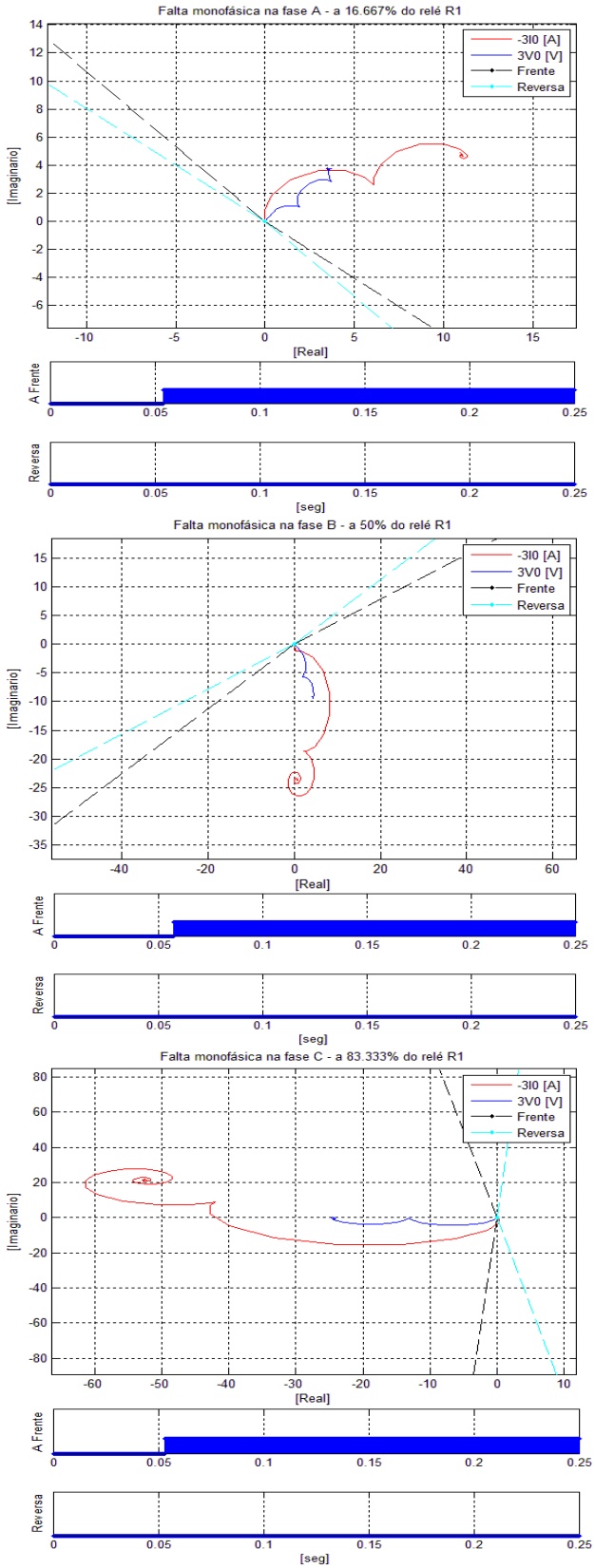


Figura 4.26 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R2, para as faltas monofásicas na LT.

As tensões de sequência negativa e sequência zero são dependentes das correntes de sequência negativa e sequência zero, respectivamente e também são dependentes das impedâncias das redes equivalentes atrás dos relés. Então quanto menor a impedância da rede menor será a tensão, como se mostra nas figuras 4.27 e 4.28 onde se variou a impedância de aterramento dos transformadores de potência dos geradores e se pode observar que a tensão de sequência zero aumenta ao se elevar a impedância de aterramento. Este efeito deve ser considerado já que para faltas monofásicas de alta impedância os relés podem não atuar devido a valores muitos baixos de tensão e corrente, que necessitam de um valor mínimo para que a proteção direcional seja ativada.

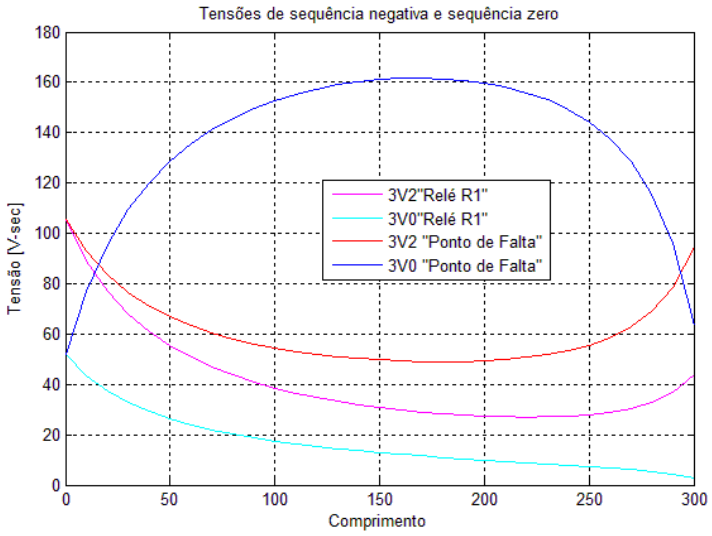


Figura 4.27 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta monofásica e com impedância de aterramento do transformador de potência 10 Ω.

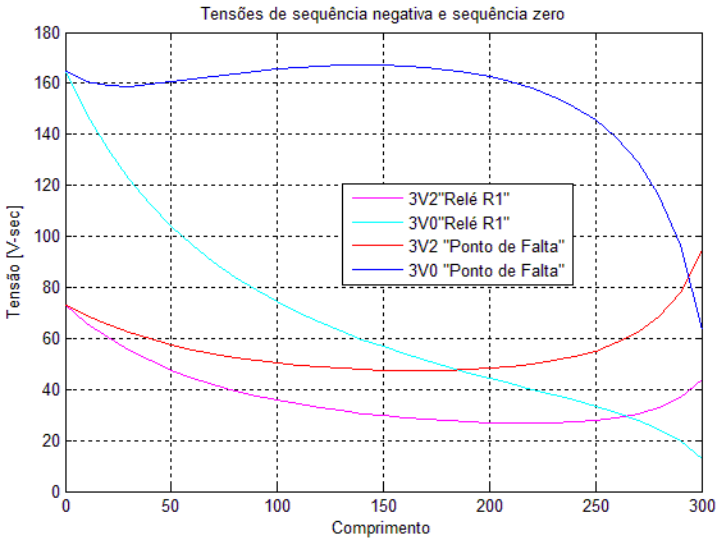


Figura 4.28 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta monofásica e com impedância de aterramento do transformador de potência 100 Ω.

4.2.1.2 Falta bifásica na linha de transmissão

Foram simuladas faltas bifásicas na linha a 16,6%; 50% e 83,33% de distância do relé R1. No caso de falta bifásica sem ligação a terra só a sequência negativa atua porque não haverá valores de sequência zero. Nas figuras 4.29 e 4.30 se apresentam as impedâncias de sequência negativa (*Z2*) calculadas pelos relés R1 e R2 no domínio do tempo.

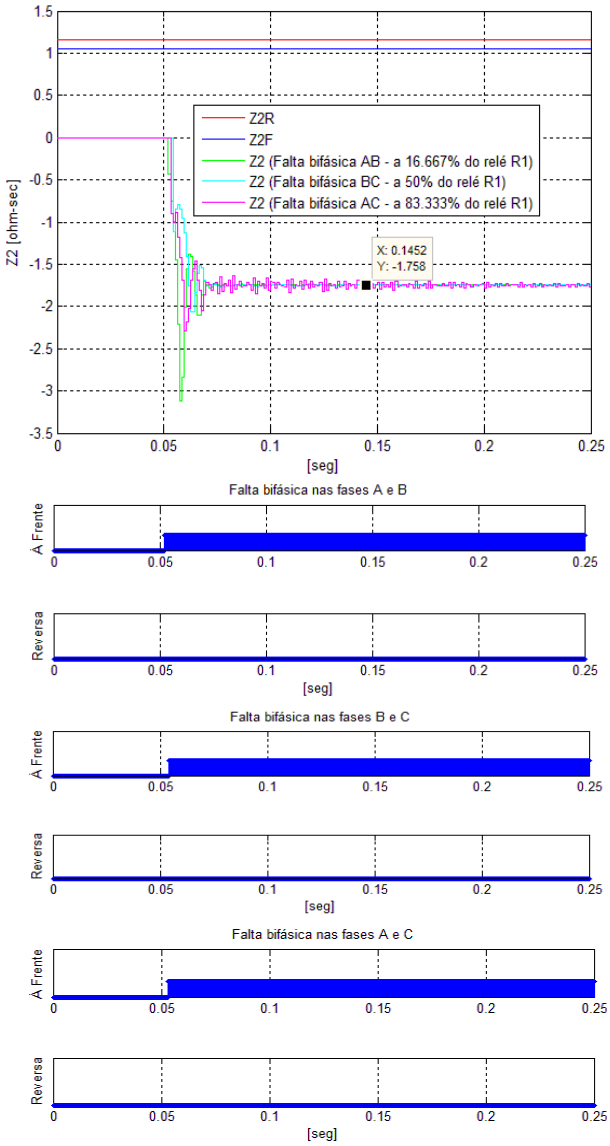


Figura 4.29 –Impedância *Z2* calculada pelo relé R1, para as faltas bifásicas na LT.

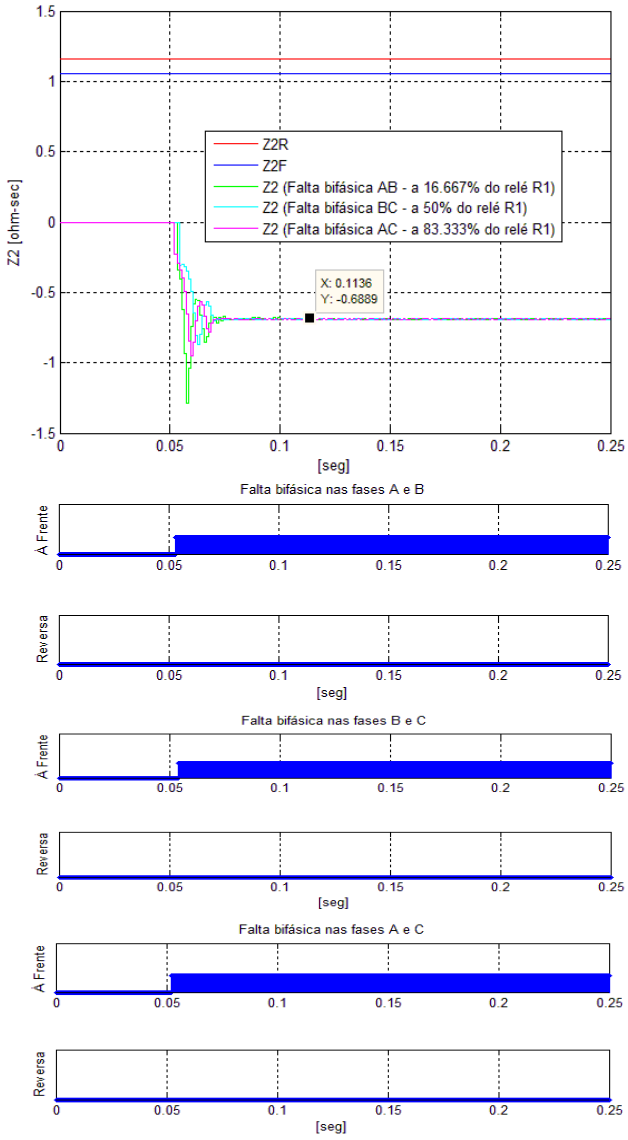


Figura 4.30 –Impedância *Z2* calculada pelo relé R2, para as faltas bifásicas na LT.

Os relés R1 e R2 operam corretamente indicando que as faltas bifásicas ocorrem na direção "a frente", já que essas impedâncias (*Z2*) calculadas pelos relés se encontram abaixo dos seus ajustes da zona a frente (*Z2F*). A impedância (*Z2*) calculada pelo relé R1 é a impedância de sequência negativa da rede equivalente (Z_{2S}) atrás dele e de sinal negativo, como

se mostra na figura 4.29. O relé R2 também calcula a impedância de sequência negativa (*Z2*) da rede equivalente (Z_{2R}) atrás dele e de sinal negativo, como se mostra na figura 4.30.

Pode-se observar que as impedâncias (*Z2*) calculadas pelos relés R1 e R2 são as mesmas impedâncias calculadas quando as faltas foram monofásicas do caso anterior com um pouco de erro como se mostra na tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Impedâncias de sequência negativa em valores primários (Ω-prim) e secundários (Ω-sec) das redes equivalentes atrás dos relés R1 e R2, da rede elétrica da figura 5.1.

	Relé R1			Relé R2		
	Teórico (Z_{2S})	Calculado pelo relé (Z_{2S})	Error [%]	Teórico (Z_{2R})	Calculado pelo relé (Z_{2R})	Error [%]
Z2 [Ω-prim]	66,2449	66,5909	-0,52	26,3890	26,0947	1,12
Z2 [Ω-sec]	1,7489	1,7580	-0,52	0,6967	0,6889	1,12

Nas figuras 4.31 e 4.32 são apresentadas as tensões e correntes de sequência negativa vistas pelo relé R1 para as três faltas bifásicas na linha e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente. Pode-se observar que o relé R1 opera corretamente indicando que as faltas ocorrem na direção “a frente”.

Nas figuras 4.33 e 4.34 são apresentadas as tensões e correntes de sequência negativa vistas pelo relé R2 para as três faltas bifásicas na linha e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente. Observa-se que o relé R2 opera corretamente indicando que as faltas ocorrem na direção “a frente”.

Pode-se observar que as tensões e correntes também se reduzem quando a falta é mais afastada do seu respectivo relé de proteção. Os ângulos entre as tensões e correntes da resposta sustentada da falta têm o mesmo comportamento que o da falta monofásica do caso anterior.

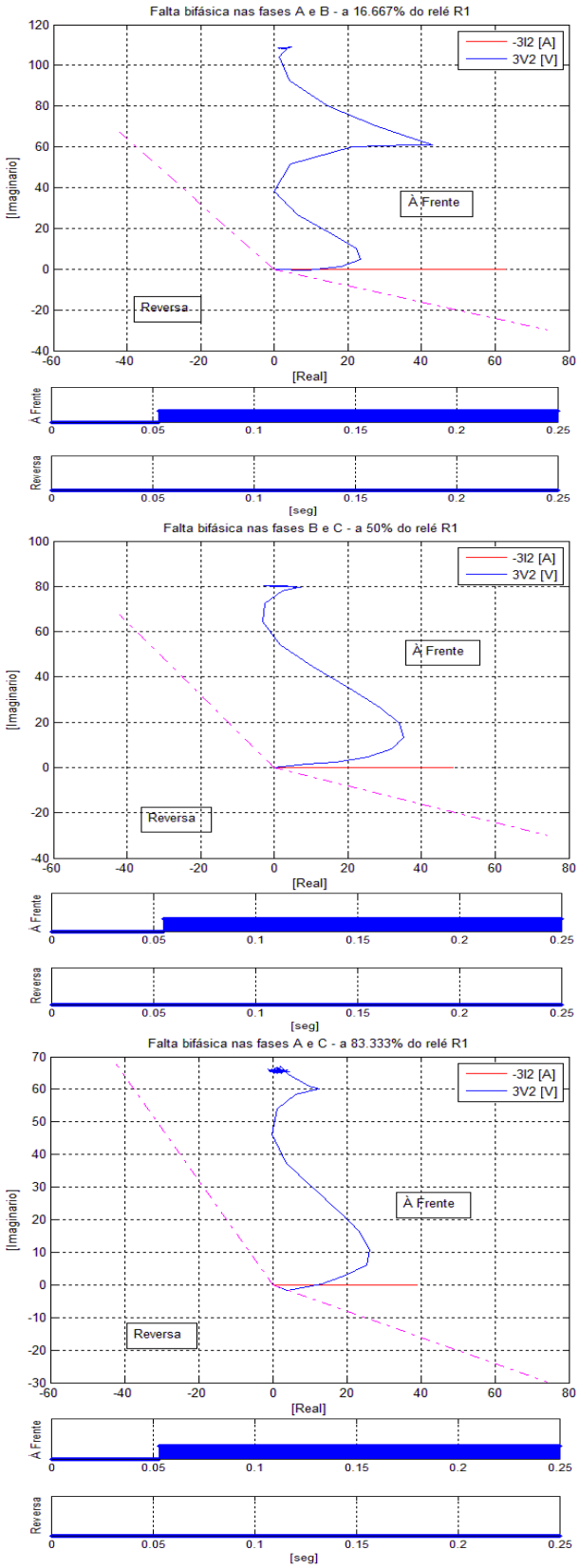


Figura 4.31 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas bifásicas na LT.

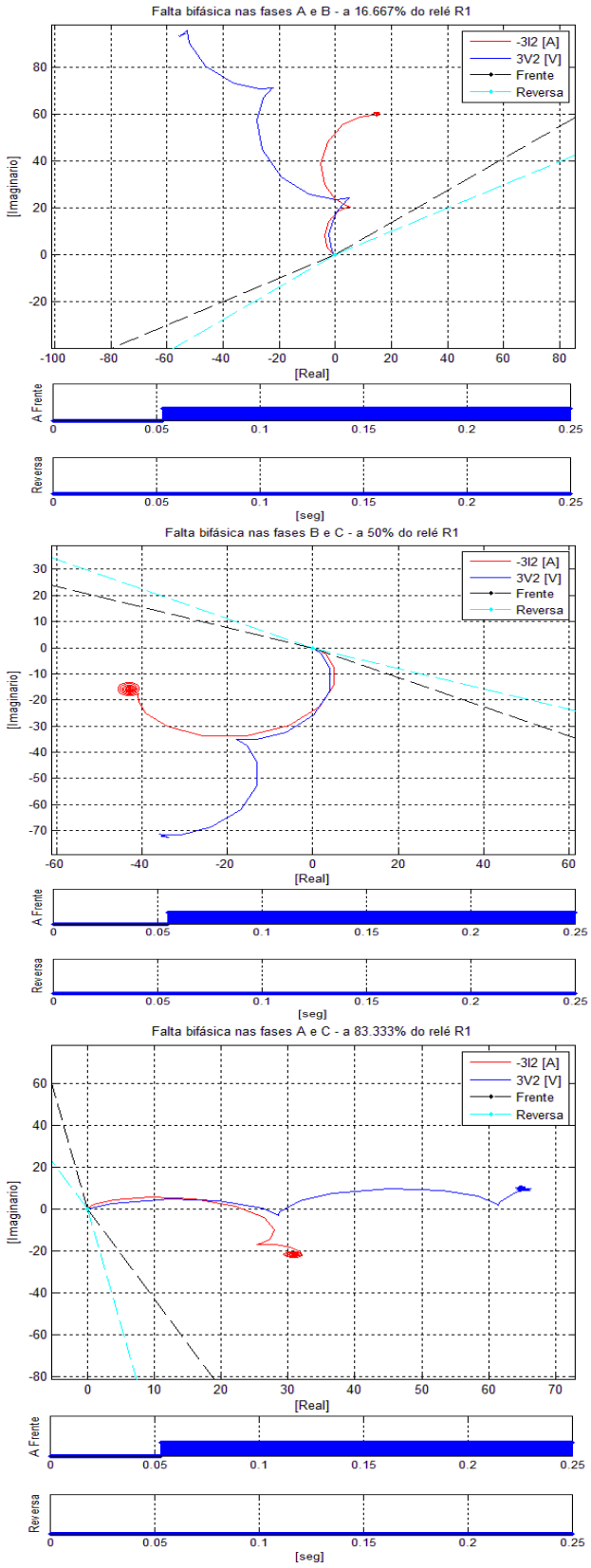


Figura 4.32 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas bifásicas na LT.

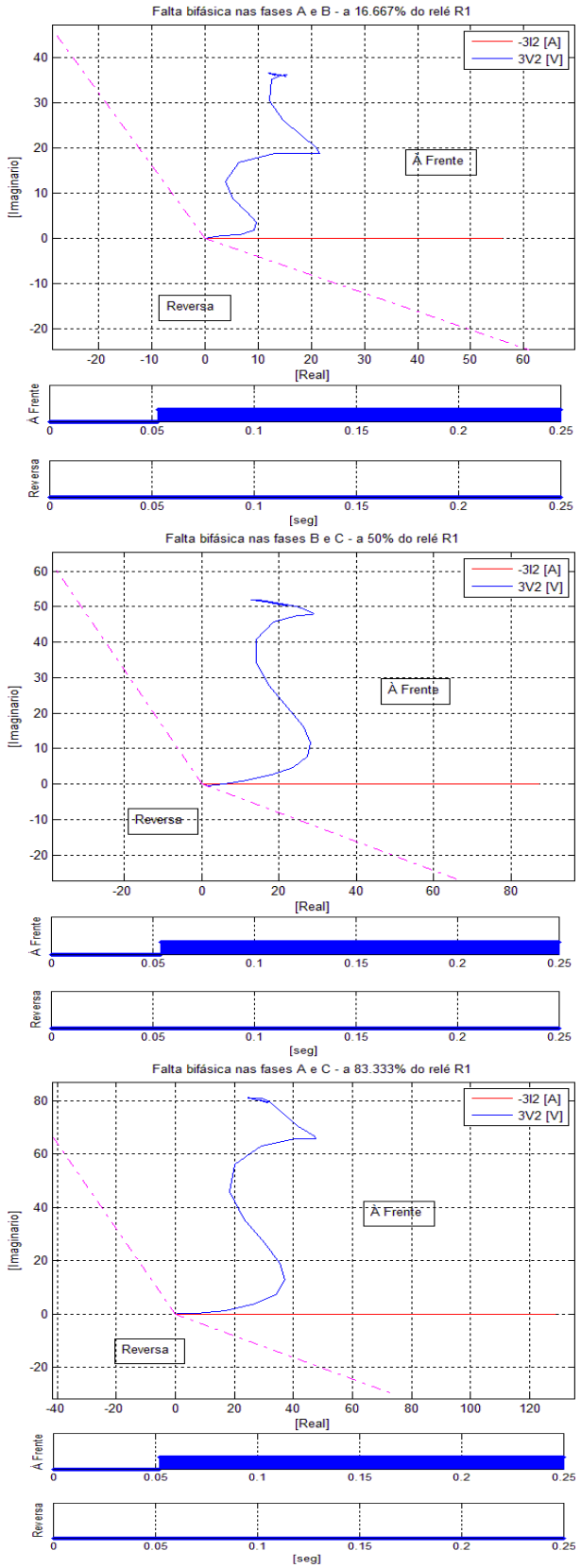


Figura 4.33 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R2, para as faltas bifásicas na LT.

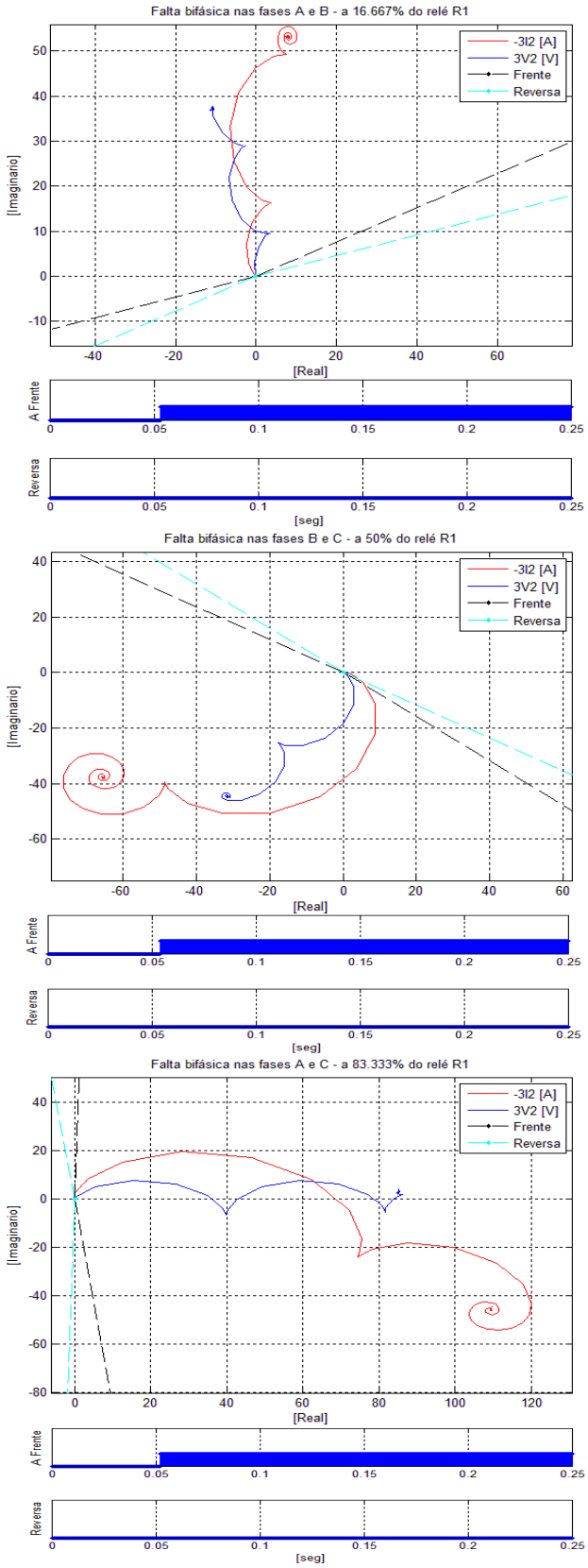


Figura 4.34 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R2, para as faltas bifásicas na LT.

4.2.1.3 Falta bifásica-terra na linha de transmissão

Simularam-se faltas bifásicas a terra na linha a 16,6%; 50% e 83,33% de distância do relé R1. Neste caso de falta bifásica com ligação a terra as proteções com as duas sequências (negativa e zero) atuaram. Nas figuras 4.35 e 4.36 mostram-se as impedâncias de sequência negativa (*Z2*) calculadas pelos relés R1 e R2 no domínio do tempo.

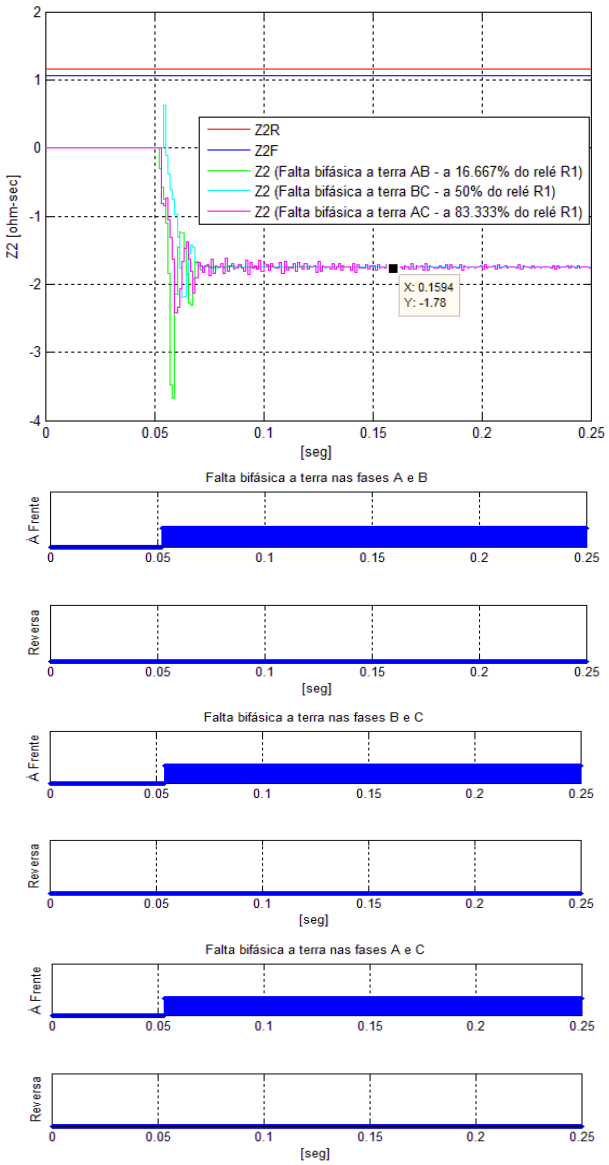


Figura 4.35 –Impedância *Z2* calculada pelo relé R1, para as faltas bifásicas a terra na LT.

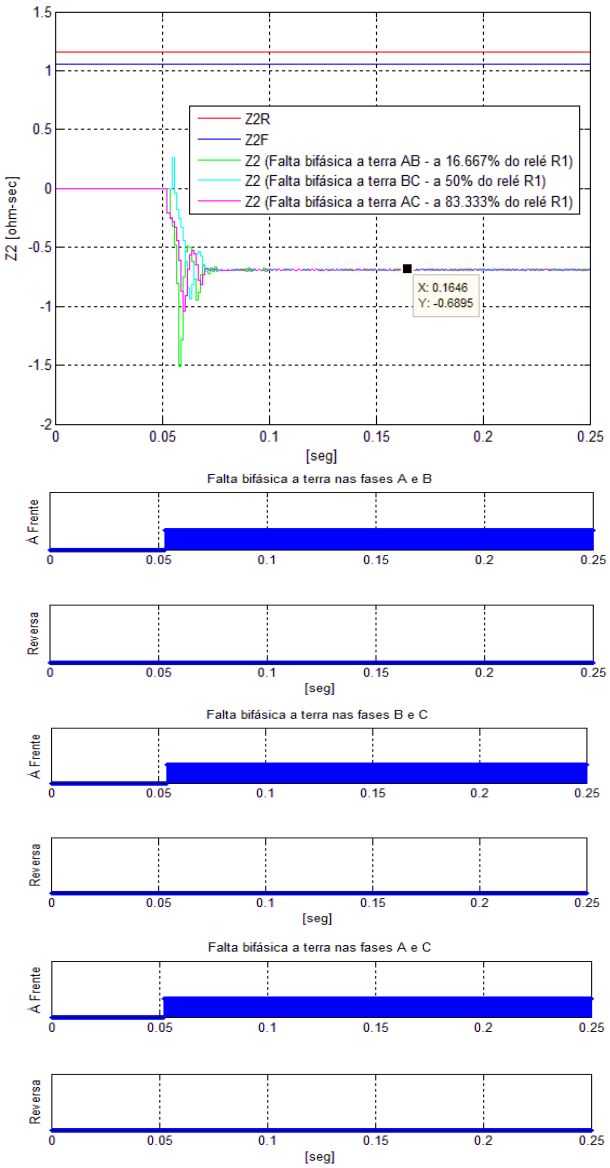


Figura 4.36 –Impedância *Z2* calculada pelo relé R2, para as faltas bifásicas a terra na LT.

Os relés R1 e R2 operam corretamente indicando que as faltas ocorrem na direção "a frente", já que essas impedâncias (*Z2*) calculadas pelos relés se encontram abaixo dos seus

ajustes da zona a frente (*Z2F*). A impedância (*Z2*) calculada pelo relé R1 é a impedância de sequência negativa da rede equivalente (Z_{2S}) atrás dele e de sinal negativo, como se mostra na figura 4.35. O relé R2 também calcula a impedância de sequência negativa (*Z2*) da rede equivalente (Z_{2R}) atrás dele e de sinal negativo, como se mostra na figura 4.36.

Pode-se observar que as impedâncias (*Z2*) calculadas pelos relés R1 e R2 são as mesmas impedâncias calculadas quando as faltas eram monofásicas e bifásicas dos casos anteriores.

Nas figuras 4.37 e 4.38 são apresentadas as tensões e correntes de sequência negativa vistas pelo relé R1 para as três faltas bifásicas a terra na linha e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente. Pode-se observar que o relé R1 opera corretamente indicando que as faltas ocorrem na direção “a frente”.

Nas figuras 4.39 e 4.40 são apresentadas as tensões e correntes de sequência zero vistas pelo relé R1 para as três faltas bifásicas a terra na linha e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente. Pode-se observar que o relé R1 opera corretamente indicando que as faltas ocorrem na direção “a frente”.

Nas figuras 4.41 e 4.42 são apresentadas as tensões e correntes de sequência negativa vistas pelo relé R2 para as três faltas bifásicas a terra na linha e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente. Pode-se observar que o relé R2 opera corretamente indicando que as faltas ocorrem na direção “a frente”.

Nas figuras 4.43 e 4.44 são apresentadas as tensões e correntes de sequência zero vistas pelo relé R2 para as três faltas bifásicas a terra na linha e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente. Pode-se observar que o relé R2 opera corretamente indicando que as faltas ocorrem na direção “a frente”.

Se pode observar que as tensões e correntes também se reduzem quando a falta é mais afastada do seu respectivo relé de proteção. Os ângulos entre as tensões e correntes no estado permanente da falta têm o mesmo comportamento que os das faltas monofásicas e bifásicas dos casos anteriores.

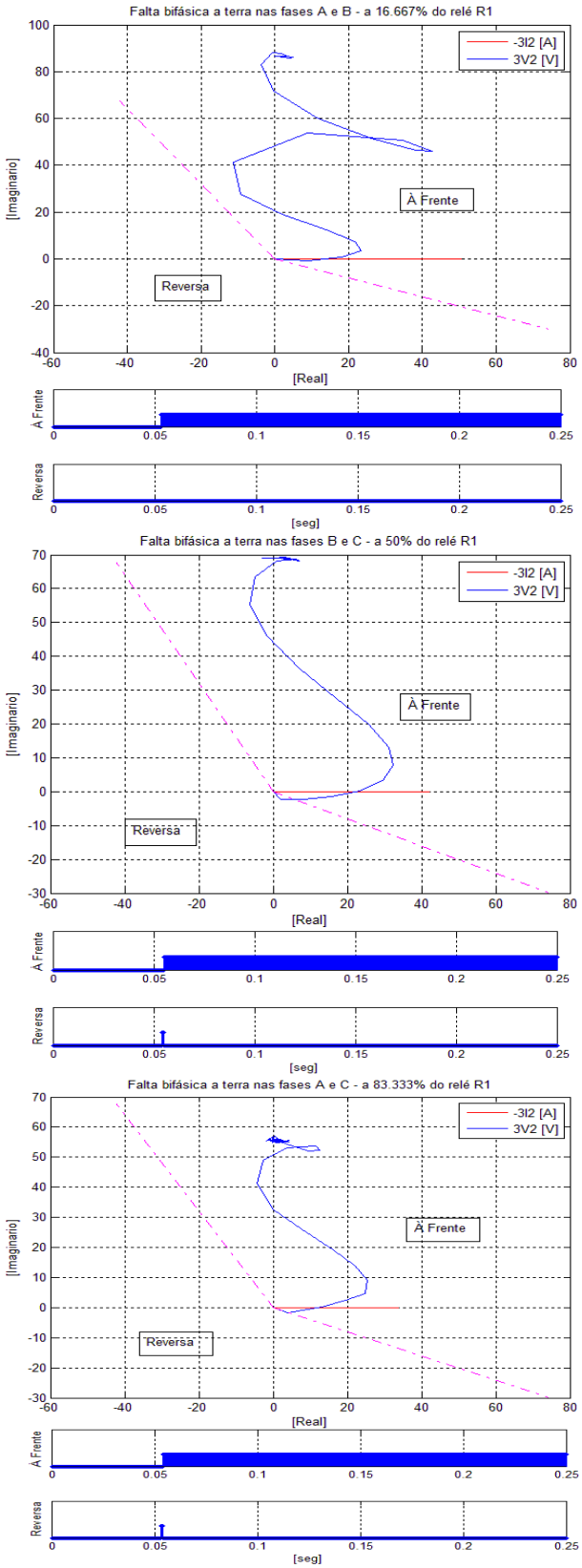


Figura 4.37 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas bifásicas-terra na LT.

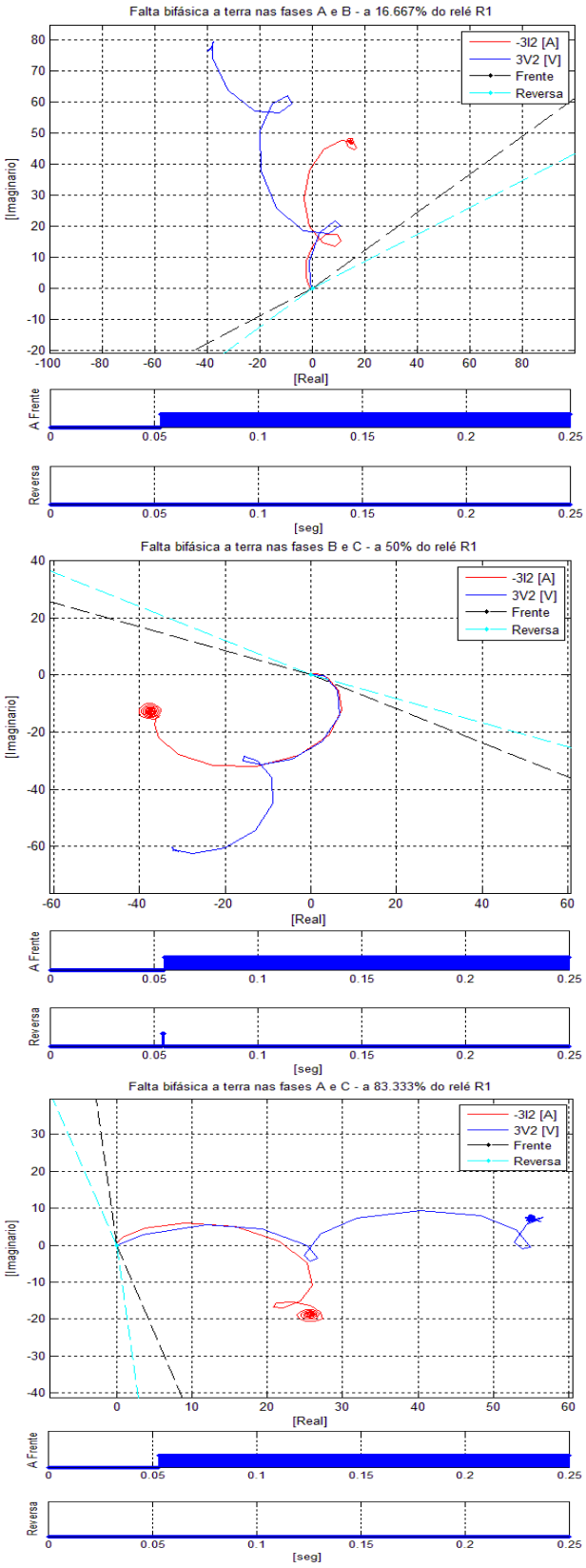


Figura 4.38 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas bifásicas-terra na LT.

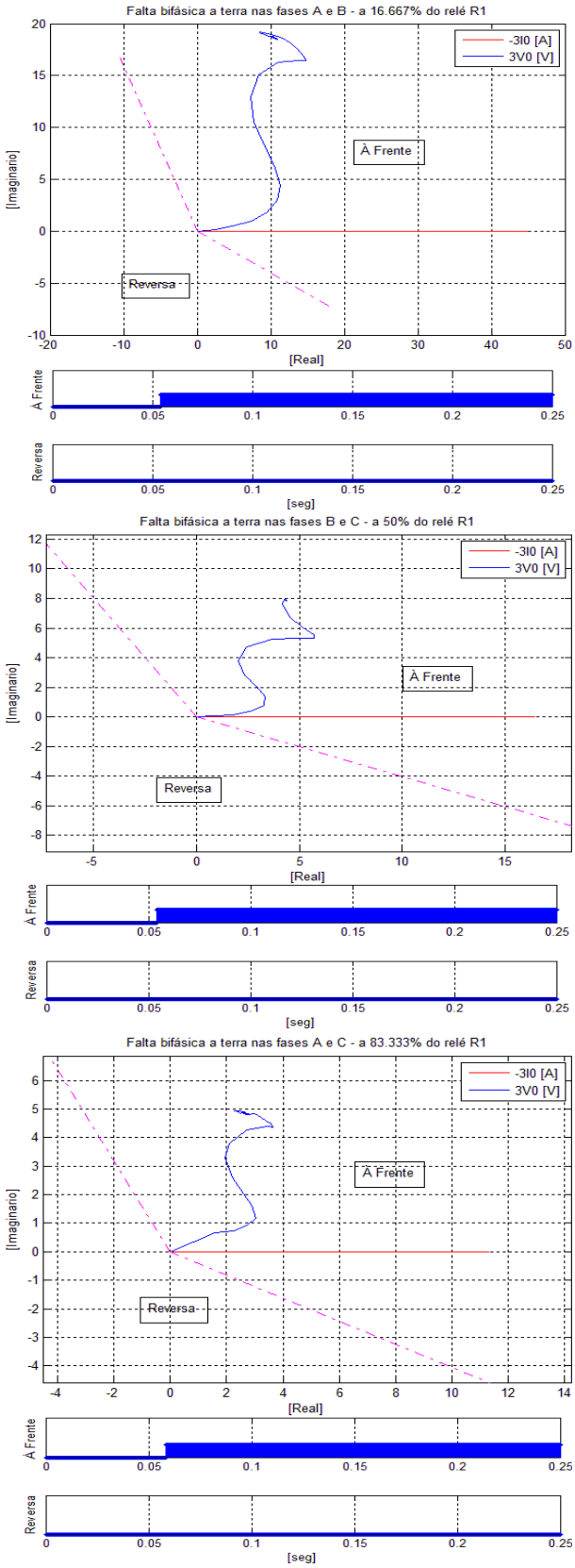


Figura 4.39 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R1, para as faltas bifásicas-terra na LT.

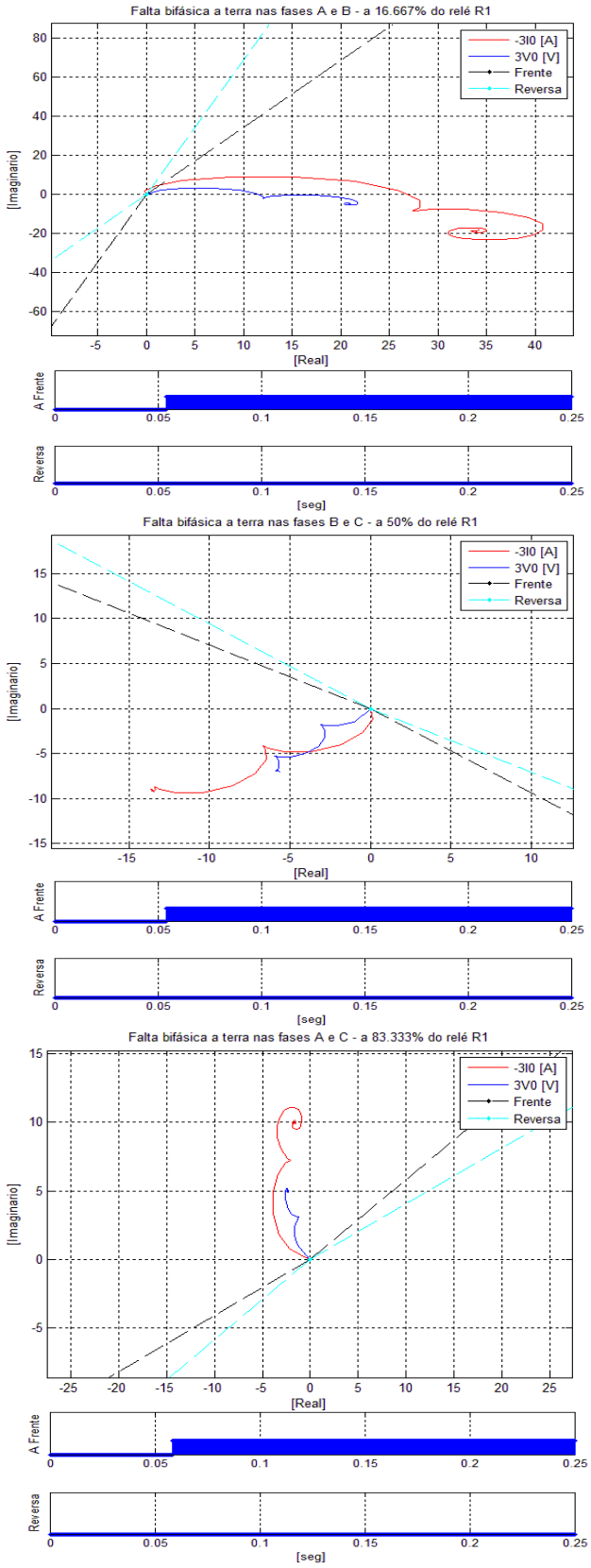


Figura 4.40 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R1, para as faltas bifásicas-terra na LT.

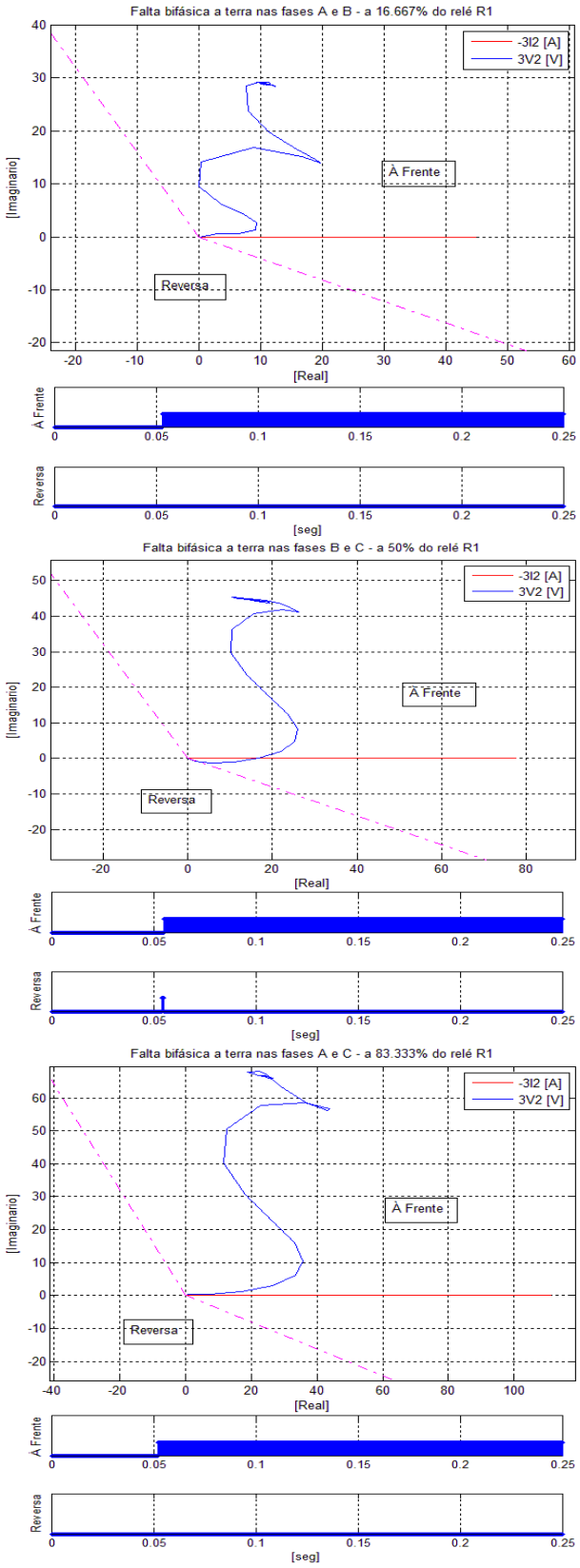


Figura 4.41 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R2, para as faltas bifásicas-terra na LT.

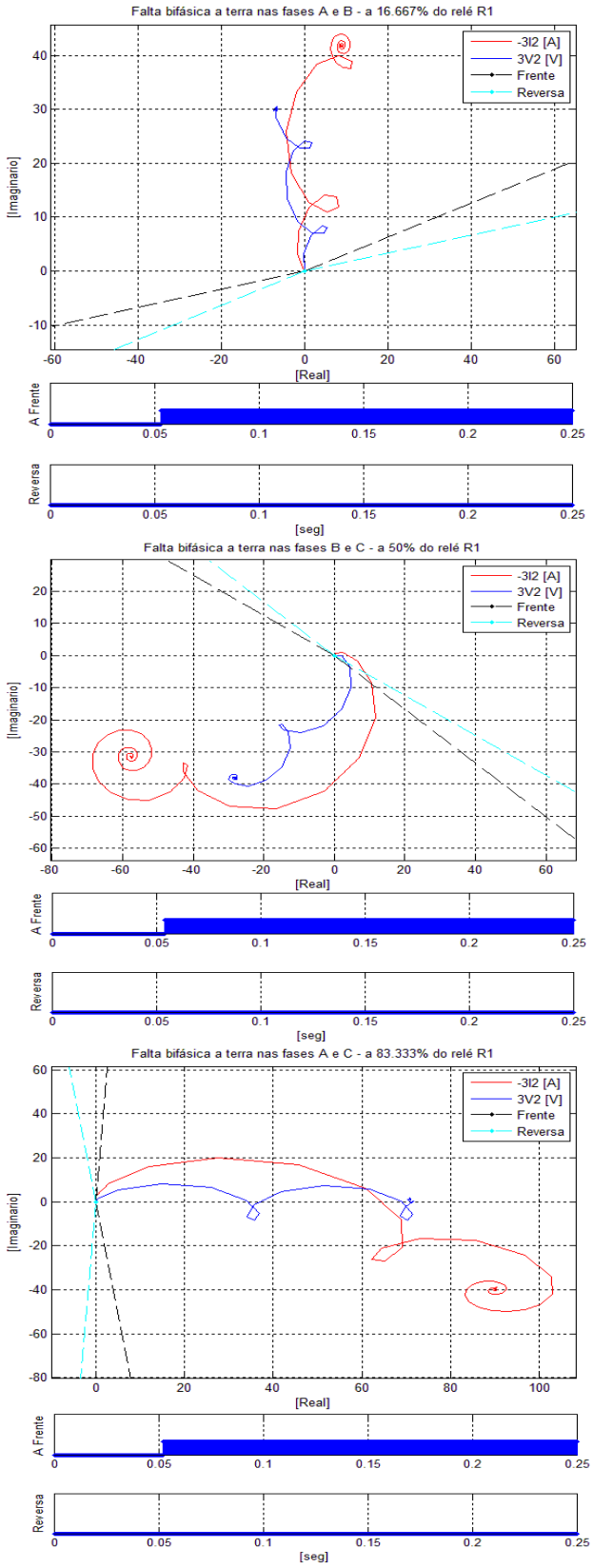


Figura 4.42 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R2, para as faltas bifásicas-terra na LT.

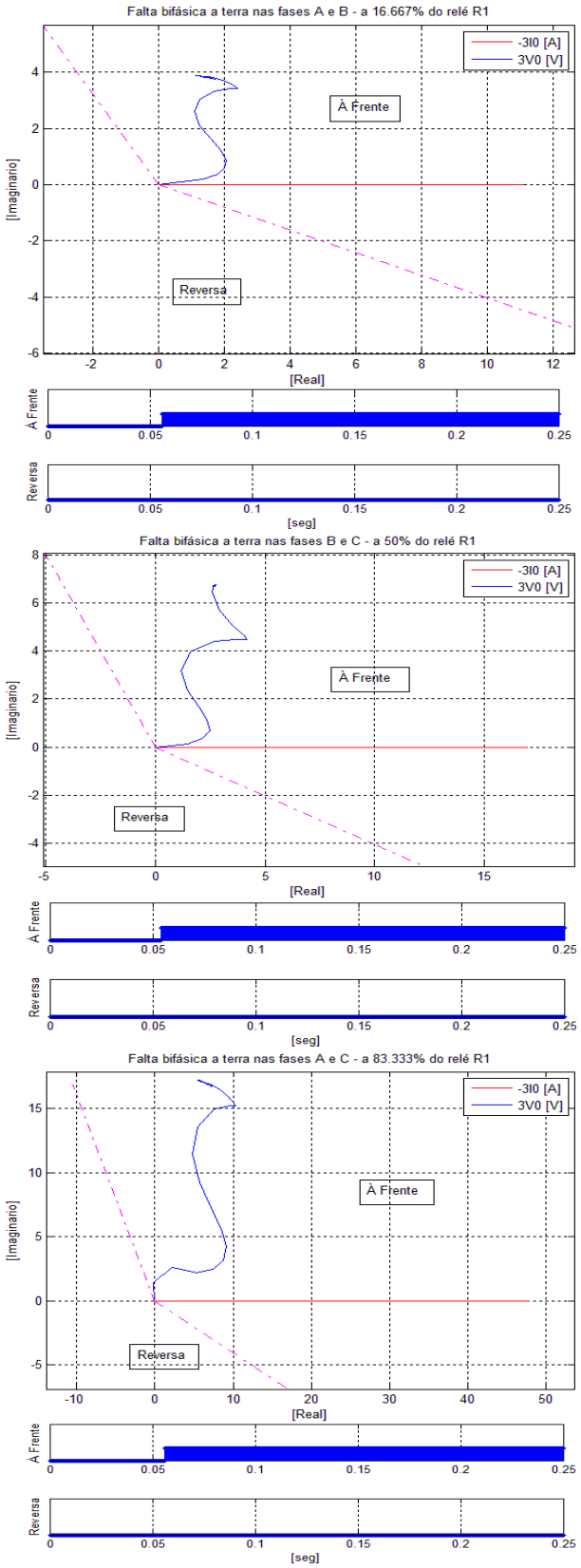


Figura 4.43 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R2, para as faltas bifásicas-terra na LT.

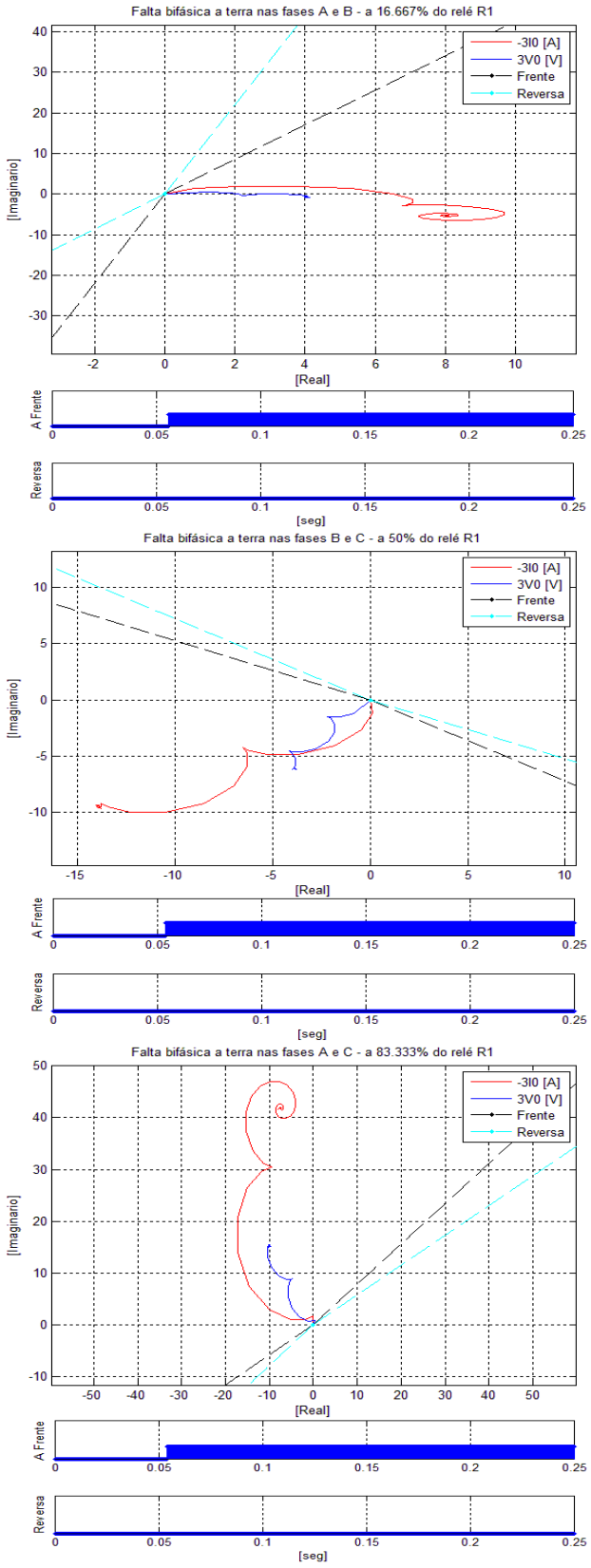


Figura 4.44 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R2, para as faltas bifásicas-terra na LT.

4.2.1.4 Faltas monofásica, bifásica e bifásica-terra atrás do relé R1.

Simularam-se faltas monofásica, bifásica e bifásica a terra atrás do relé R1. Nas figuras 4.45 e 4.46 se apresentam as impedâncias de sequência negativa (Z2) calculadas pelos relés R1 e R2 no domínio do tempo.

O relé R1 opera corretamente indicando que as faltas ocorrem na direção "reversa", já que essas impedâncias (*Z2*) calculadas pelo relé R1 se encontram acima do seu ajuste da zona reversa (*Z2R*). A impedância (*Z2*) calculada pelo relé R1 é a impedância de sequência negativa da linha (Z_{2L}) mais a impedância (Z_{2R}) da rede equivalente de seu extremo remoto e de sinal positivo, como se mostra na figura 4.45 e na tabela 4.13.

O relé R2 opera corretamente indicando que as faltas ocorrem na direção "a frente", já que essas impedâncias (*Z2*) calculadas pelo relé R2 se encontram abaixo do ajuste da zona a frente (*Z2F*). A impedância calculada pelo relé R2 é a impedância (Z_{2R}) equivalente da rede atrás dele e de sinal negativo, como se mostra na figura 4.46 e na tabela 4.13.

Na tabela 4.13 se apresentam as impedâncias de sequência negativa (*Z2*) teóricas e calculadas pelos relés R1 e R2 para as faltas atrás do relé R1, que também podem ser verificadas nas simulações feitas nesta seção.

Tabela 4.13 – Impedâncias *Z2* em valores primários (Ω-prim) e secundários (Ω-sec) das redes equivalentes a frente do relé R1 e rede equivalente atrás do relé R2.

	Relé R1			Relé R2		
	Teórico (Z_{2L}+Z_{2R})	Calculada pelo relé (Z_{2L} + Z_{2R})	Erro [%]	Teórico (Z_{2R})	Calculada pelo relé (Z_{2R})	Erro [%]
Z2 [Ω-prim]	107,6604	107,1212	0,50	26,3894	25,9242	1,76
Z2 [Ω-sec]	2,8422	2,8280	0,50	0,6967	0,6844	1,76

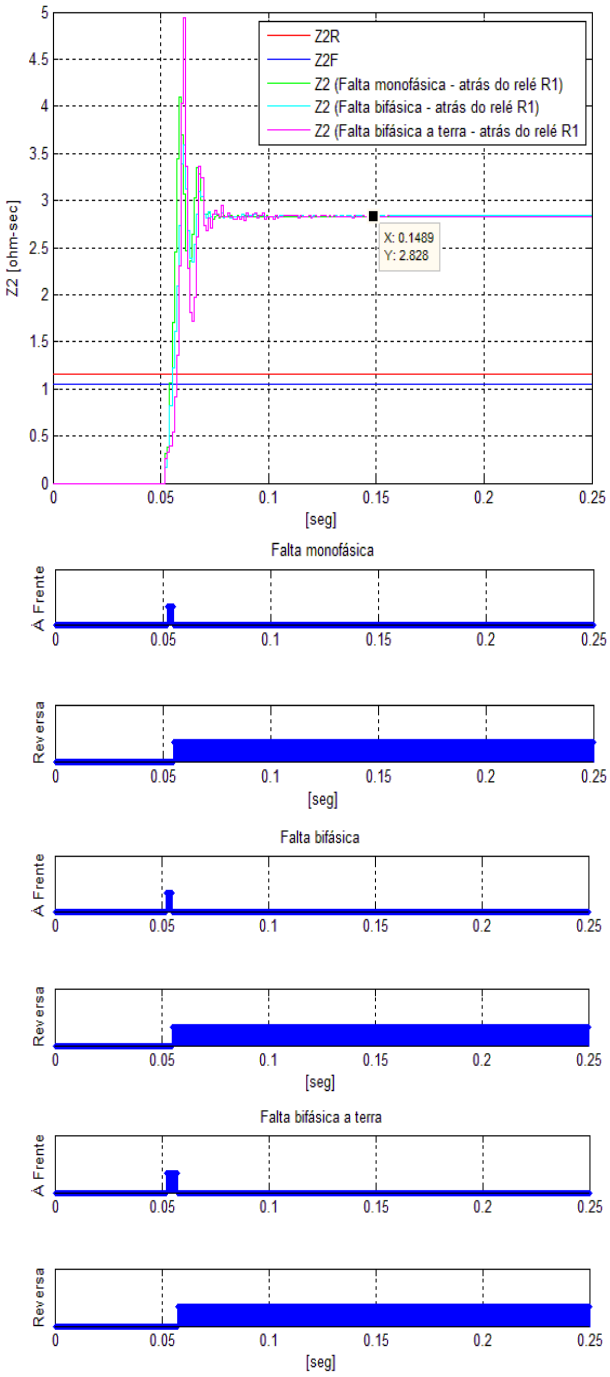


Figura 4.45 –Impedâncias *Z2* calculadas pelo relé R1, para as faltas atrás do relé R1.

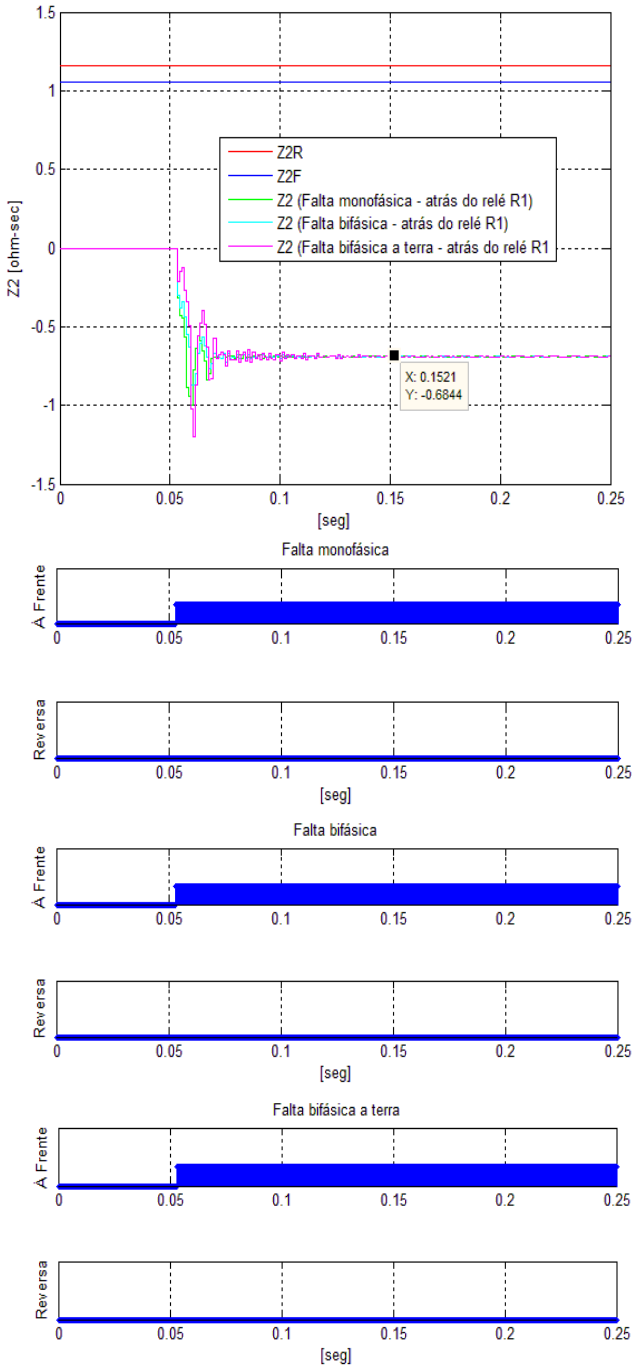


Figura 4.46 –Impedâncias *Z2* calculadas pelo relé R2, para as faltas atrás do relé R1.

Nas figuras 4.47 e 4.48 são apresentadas as tensões e correntes de sequência negativa vistas pelo relé R1 para as três faltas e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente. Pode-se observar que o relé R1 opera corretamente, indicando que as faltas ocorrem na direção “reversa”.

Nas figuras 4.49 e 4.50 são apresentadas as tensões e correntes de sequência zero vistas pelo relé R1 para as três faltas e com os métodos de polarização por corrente e polarização por

tensão, respectivamente. Pode-se observar que o relé R1 opera corretamente, indicando que as faltas ocorrem na direção “reversa”.

Nas figuras 4.51 e 4.52 são apresentadas as tensões e correntes de sequência negativa vistas pelo relé R2 para as três faltas e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente. Pode-se observar que o relé R2 opera corretamente, indicando que as faltas ocorrem na direção “a frente”.

Nas figuras 4.53 e 4.54 são apresentadas as tensões e correntes de sequência zero vistas pelo relé R2 para as três faltas e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente. Pode-se observar que o relé R2 opera corretamente, indicando que as faltas ocorrem na direção “a frente”.

Pode-se observar que os relés R1 e R2 não atuam com a sequência zero para a falta bifásica sem ligação a terra porque não se tem valores de sequência zero.

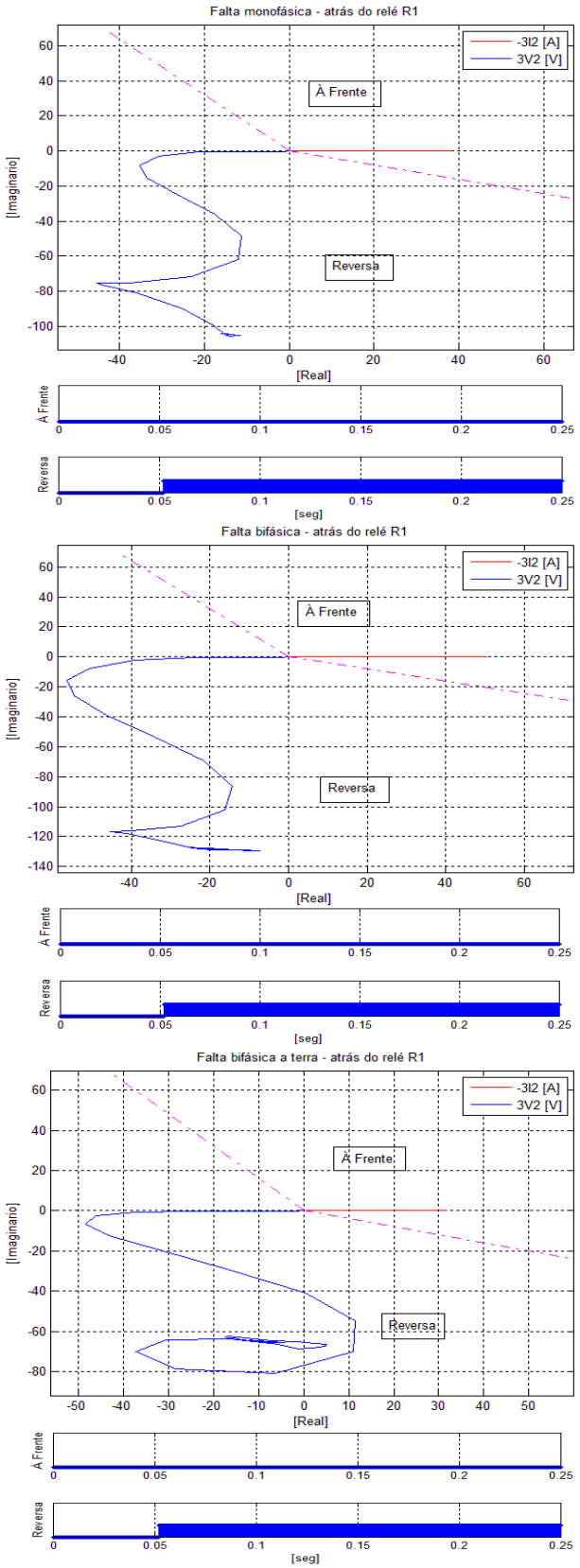


Figura 4.47 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas atrás do relé R1.

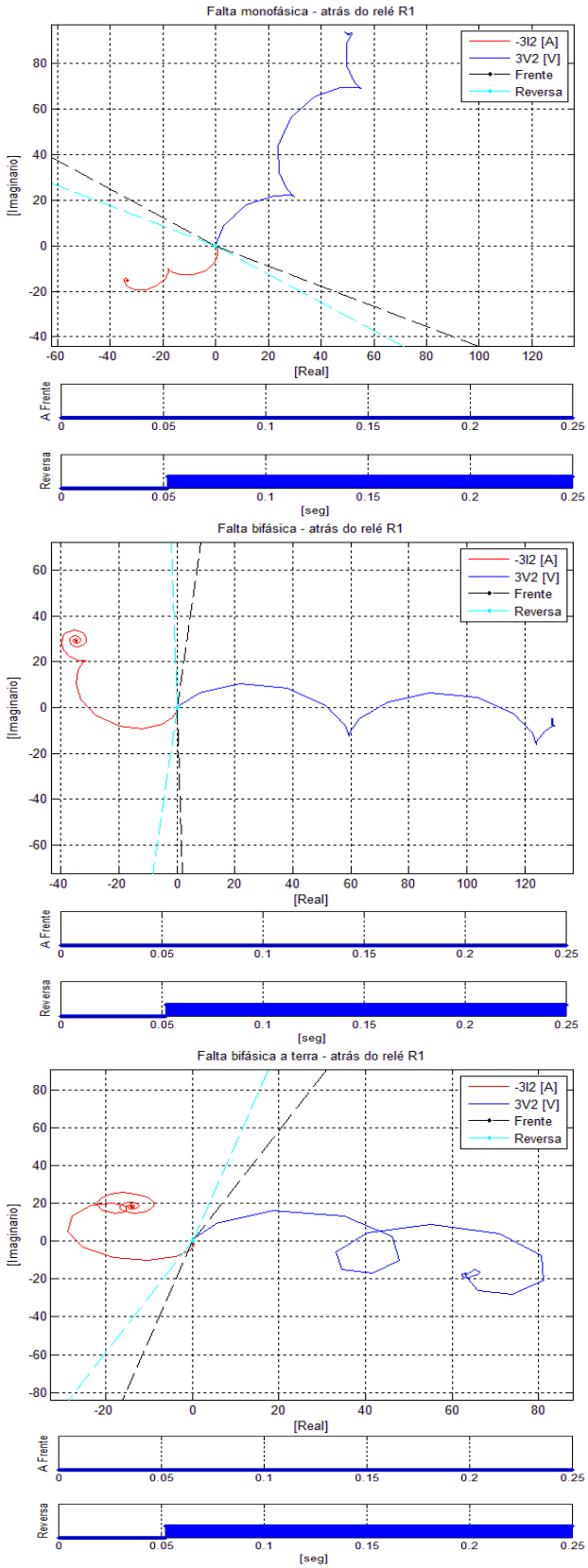


Figura 4.48 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas atrás do relé R1.

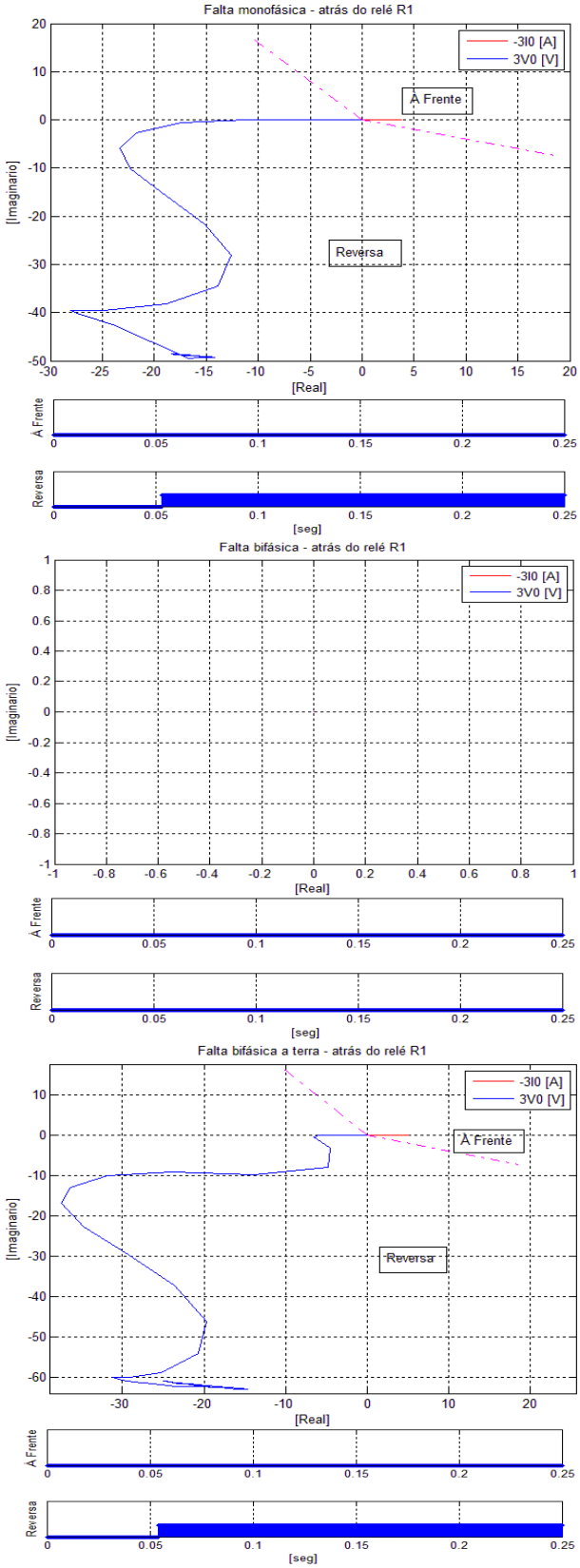


Figura 4.49 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R1, para as faltas atrás do relé R1.

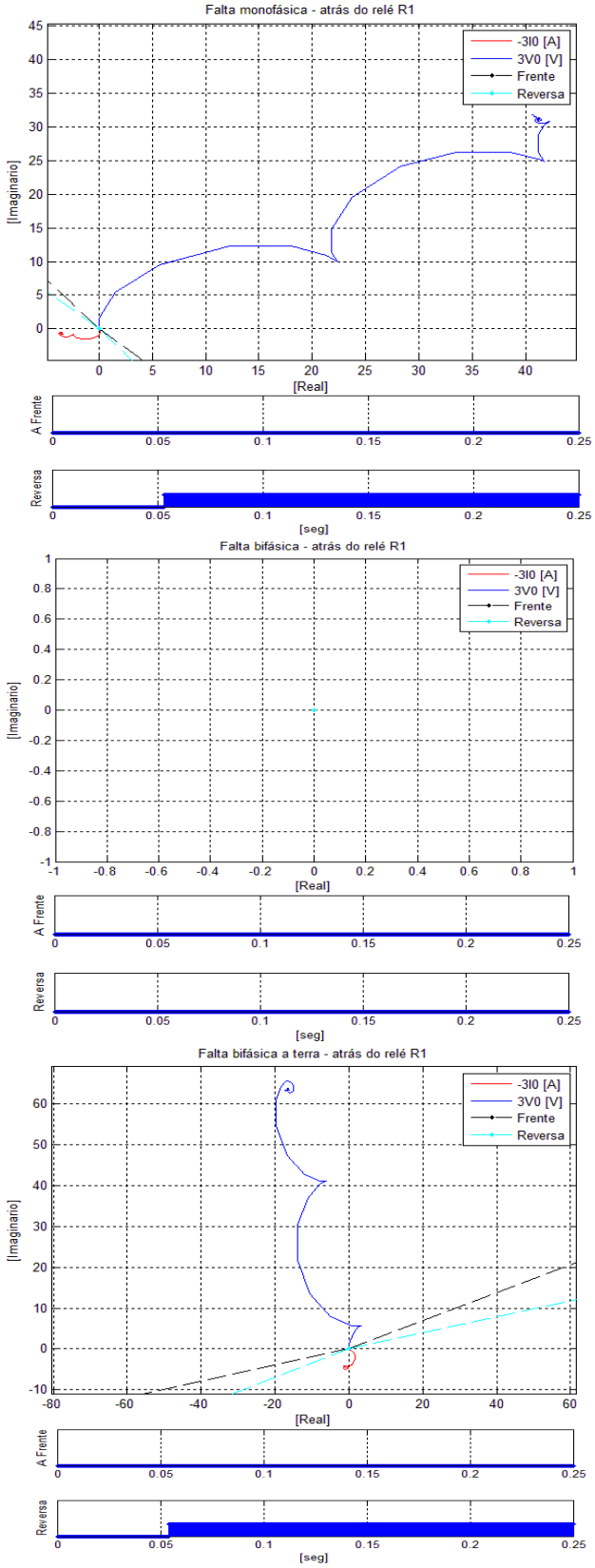


Figura 4.50 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R1, para as faltas atrás do relé R1.

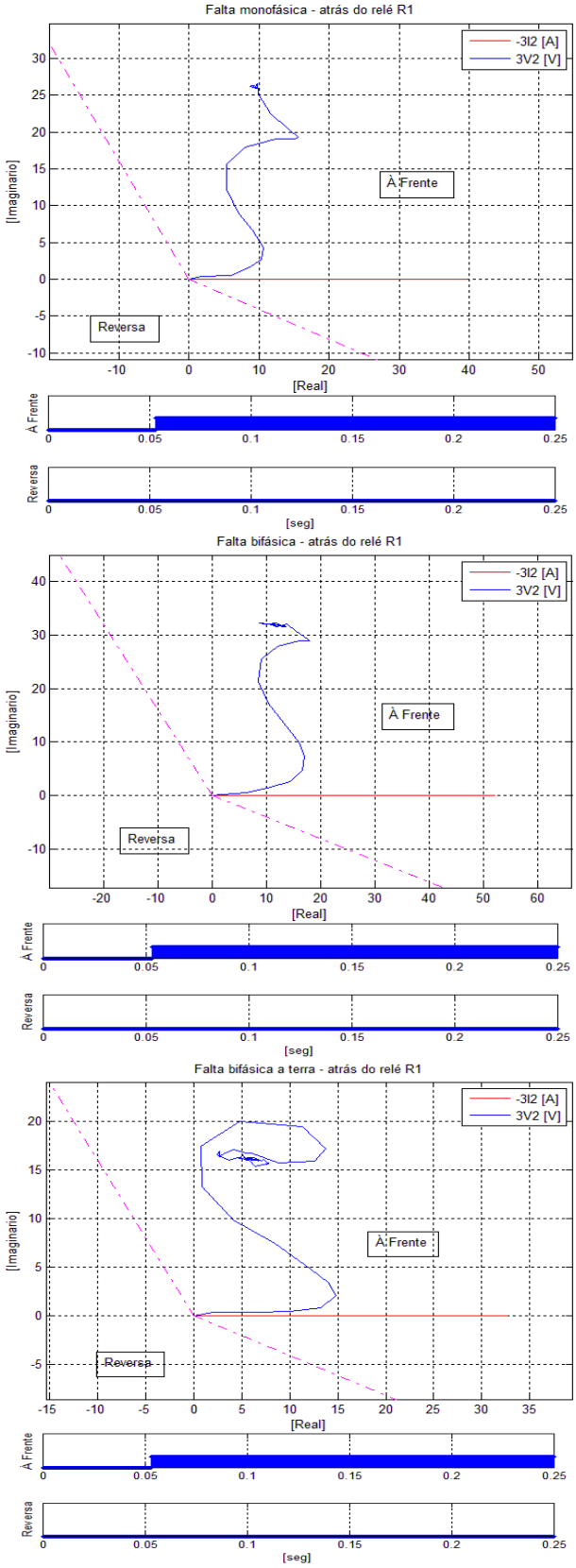


Figura 4.51 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R2, para as faltas atrás do relé R1.

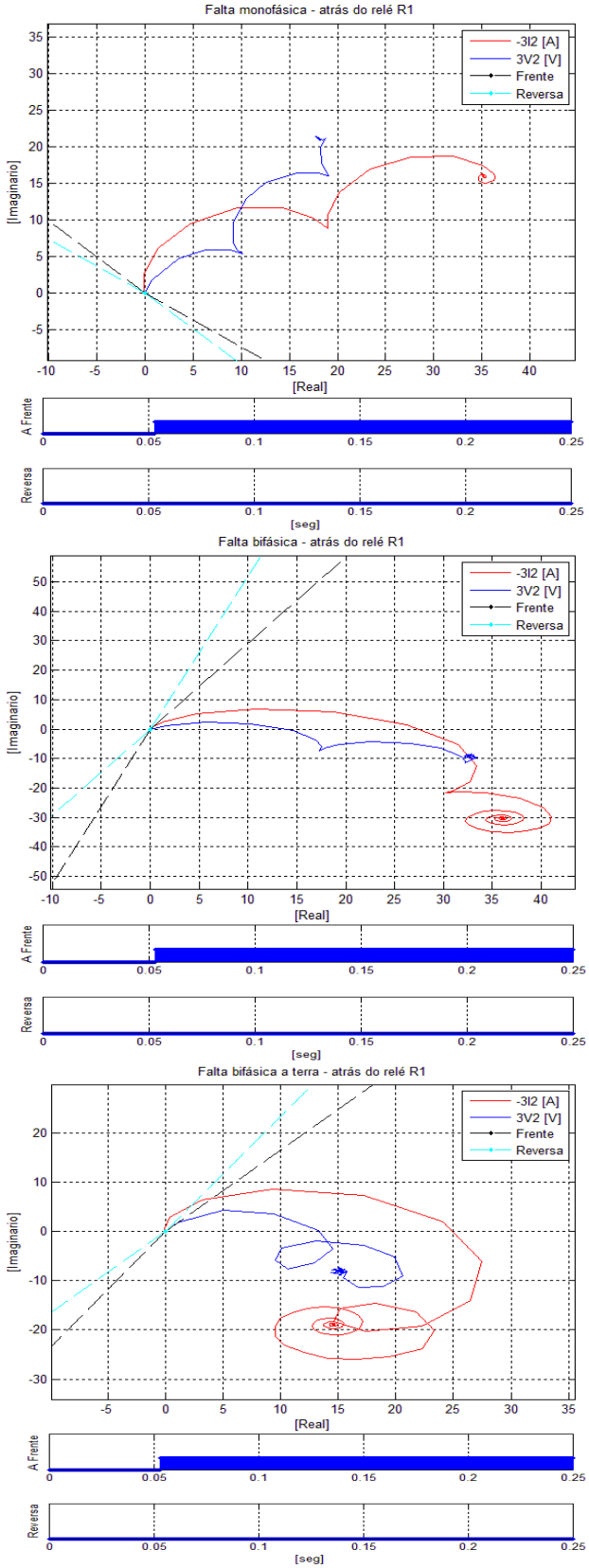


Figura 4.52 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R2, para as faltas atrás do relé R1.

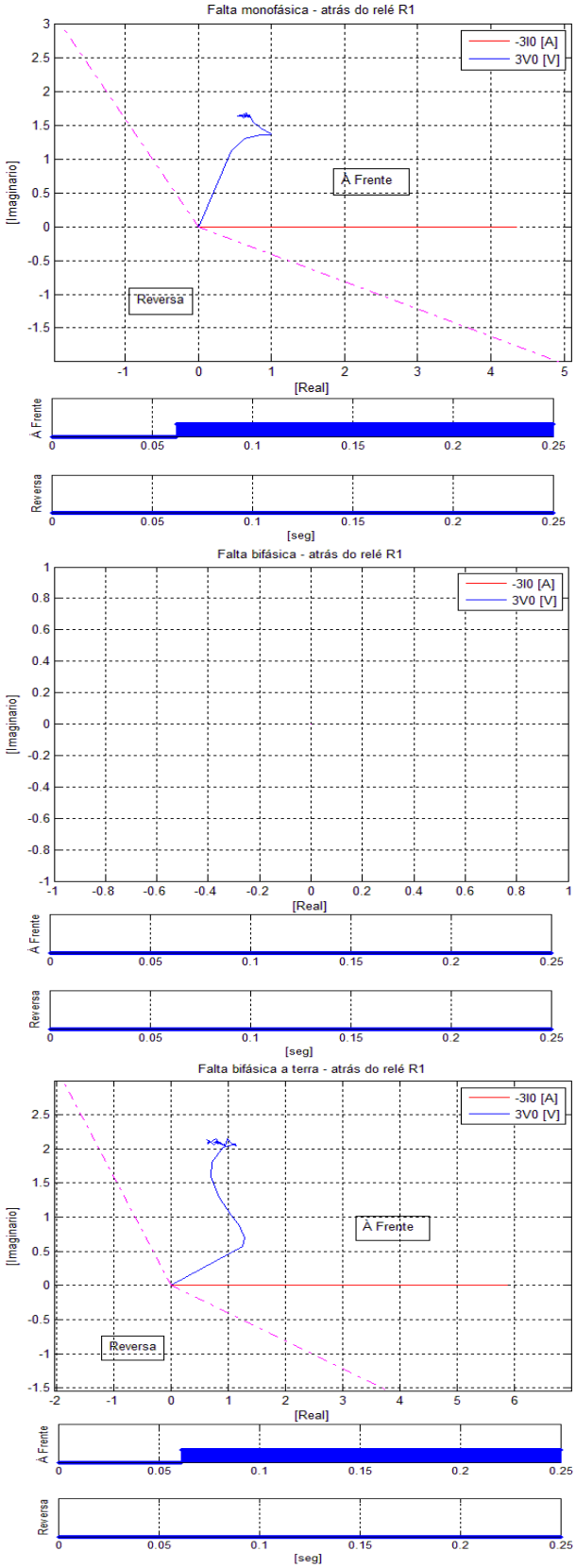


Figura 4.53 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R2, para as faltas atrás do relé R1.

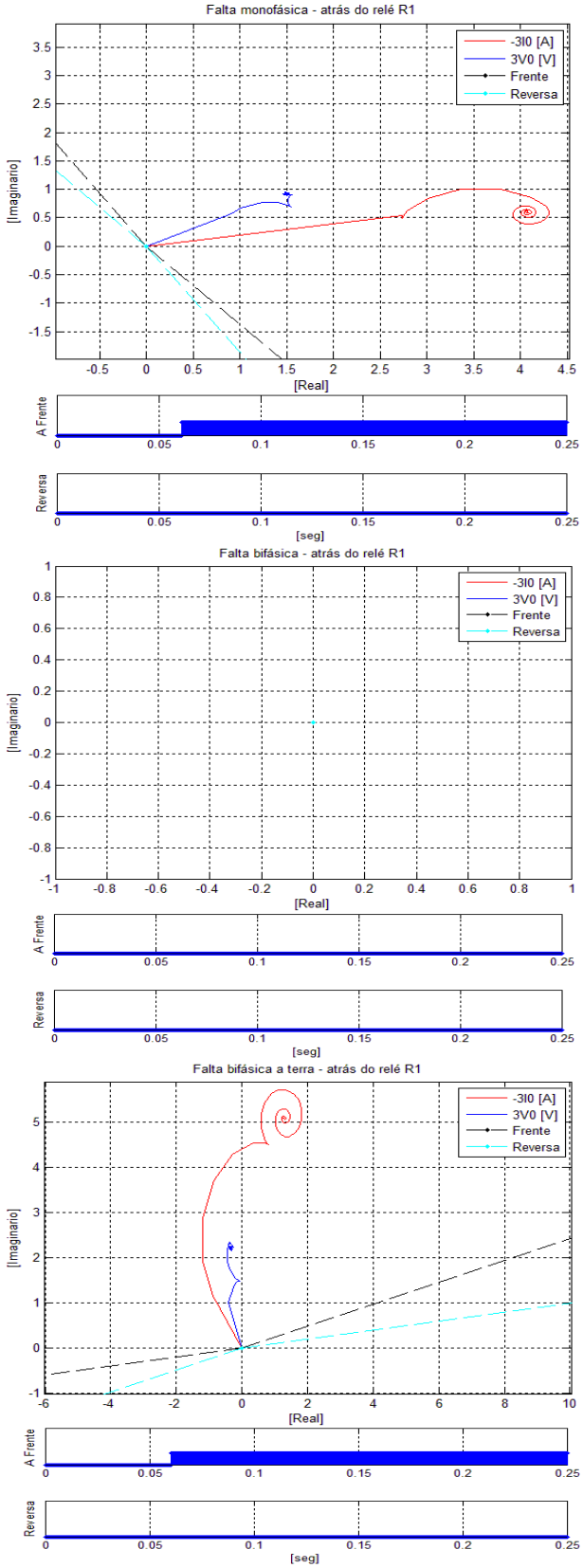


Figura 4.54 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R2, para as faltas atrás do relé R1.

4.2.2 Rede da figura 4.2, Linha de transmissão de 600 km com compensação série e compensação reativa em derivação.

Esta simulação tem o objetivo de ilustrar os efeitos das inversões da corrente e da tensão como se explicou no capítulo 2, que são devidos aos capacitores em série da linha de transmissão.

Na tabela 4.14 se apresentam os ajustes das zonas de operação (”a frente” e ”reversa”) com o método de polarização por impedâncias de sequência negativa e sequência zero para os relés R1, R2, R3, R4, R5 e R6. Os ajustes foram calculados seguindo a teoria apresentada no capítulo 2.

Na tabela 4.15 se apresentam os ajustes dos dados da linha de transmissão e dos parâmetros *a0*, *a2*, k0, *A50QF* e *A50QR*, todos são em valores secundários. Todos esses parâmetros se encontram descritos no capítulo 3.

Tabela 4.14 – Ajustes das zonas “a frente” e “reversa” para os relés R1, R2, R3, R4, R5 e R6 em valores primários (Ω-prim) e secundários (Ω-sec).

	Relé R1		**Relé R2**		**Relé R3**		**Relé R4**		**Relé R5**		**Relé R6**	
	Z2F	***Z2R***	***Z2F***	***Z2R***	***Z2F***	***Z2R***	***Z2F***	***Z2R***	***Z2F***	***Z2R***	***Z2F***	***Z2R***
***Z2* [Ω-prim]**	40,951	44,739	79,958	83,746	20,474	24,262	20,474	24,262	79,958	83,746	40,951	44,739
***Z2* [Ω-sec]**	**1,081**	**1,181**	**2,111**	**2,211**	**0,541**	**0,641**	**0,541**	**0,641**	**2,111**	**2,211**	**1,081**	**1,181**
***Z0* [Ω-prim]**	428,068	431,856	467,083	470,871	214,030	217,818	214,030	217,818	467,083	470,871	428,068	431,856
***Z0* [Ω-sec]**	**11,301**	**11,401**	**12,331**	**12,431**	**5,650**	**5,750**	**5,650**	**5,750**	**12,331**	**12,431**	**11,301**	**11,401**

Tabela 4.15 – Ajustes dos dados da linha e dos parâmetros *a0*, *a2*, *k0*, *A50QF* e *A50QR* para os relés R1, R2, R3, R4, R5 e R6

	Relé R1	**Relé R2**	**Relé R3**	**Relé R4**	**Relé R5**	**Relé R6**
***Z1ANG* [°]**	86,557	86,557	86,557	86,557	86,557	86,557
***Z1L* [Ω-sec]**	4,230	4,230	2,1147	2,1147	4,230	4,230
***Z0ANG* [°]**	72,930	72,930	72,930	72,930	72,930	72,930
***Z0L* [Ω-sec]**	25,798	25,798	12,8989	12,8989	25,798	25,798
a0	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
a2	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
k0	0,200	1,000	1,000	1,000	1,000	0,200
***A50QF* [A-sec]**	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250
***A50QR* [A-sec]**	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250

Nas tabelas 4.16 e 4.17 são mostrados os ajustes dos relés (R1, R2, R3, R4, R5 e R6), para os métodos de polarização por tensão e polarização por correntes, respectivamente. Os relés R2 e R5 precisam do ajuste da reatância do capacitor em série, para que a proteção direcional faça a compensação da inversão da tensão, já que devido às inversões da tensão ou corrente a proteção atua erroneamente como se explicou no capítulo 2 e podem ser verificadas nas simulações nesta seção.

Tabela 4.16 – Ajustes dos relés R1, R2, R3, R4, R5 e R6, para o método de polarização por tensão

	Relé R1	**Relé R2**	**Relé R3**	**Relé R4**	**Relé R5**	**Relé R6**
AngV [°]	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°
VPI [V-sec]	1,213	1,213	1,213	1,213	1,213	1,213
IPI [A-sec]	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Xc [Ω-sec]	0	1,030	0	0	1,030	0

Tabela 4.17 – Ajustes dos relés R1, R2, R3, R4, R5 e R6, para o método de polarização por corrente

	Relé R1	**Relé R2**	**Relé R3**	**Relé R4**	**Relé R5**	**Relé R6**
VPI [V-sec]	1,213	1,213	1,213	1,213	1,213	1,213
IPI [A-sec]	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250
AngB [°]	122	122	122	122	122	122
AngA [°]	338	338	338	338	338	338
Xc [Ω-sec]	0	1,030	0	0	1,030	0

Nas figuras 4.55 até a figura 4.66 se apresentam os módulos das tensões e correntes de sequência negativa e sequência zero que são vistas pelo relé R1 (em valores secundários) para faltas monofásica, bifásica e bifásica a terra ao longo da linha de 600 km. A sequência negativa seria a preferida a utilizar para todas as faltas desequilibradas já que a sequência zero é muito baixa para faltas de alta impedância, assim também para faltas no extremo remoto da linha e não estão presentes nas faltas bifásicas. Também se pode verificar que as tensões e correntes são elevadas para faltas próximas ao capacitor em função da redução da impedância da rede causada pelo capacitor, o que resulta no aumento da corrente de curto-circuito.

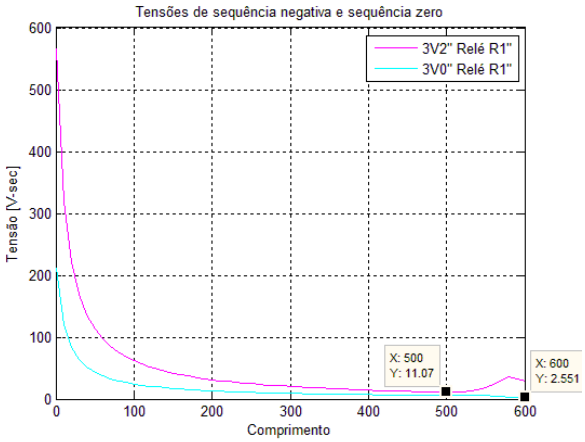


Figura 4.55 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta monofásica e $R_f = 0\ \Omega$.

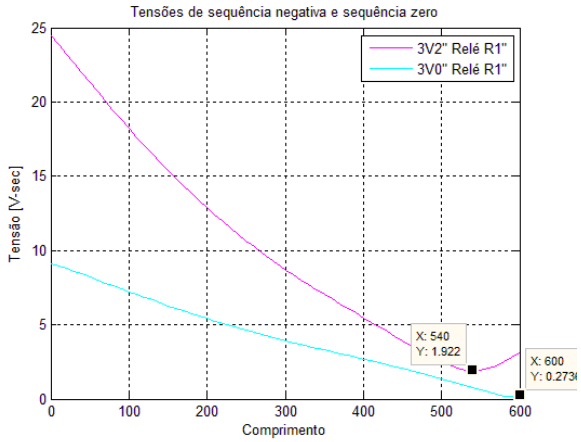


Figura 4.56 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta monofásica e $R_f = 200\ \Omega$.

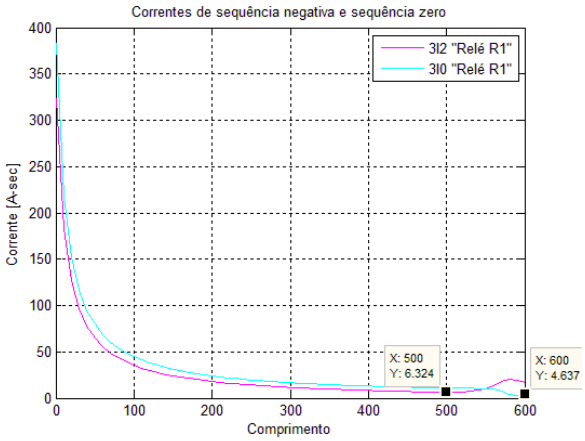


Figura 4.57 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta monofásica e $R_f = 0\ \Omega$.

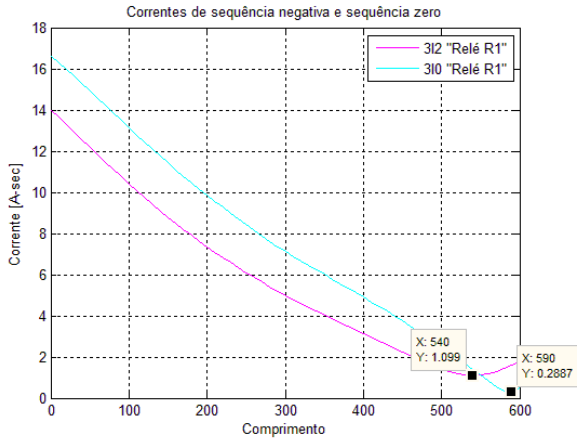


Figura 4.58 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta monofásica e Rf = 200 Ω.

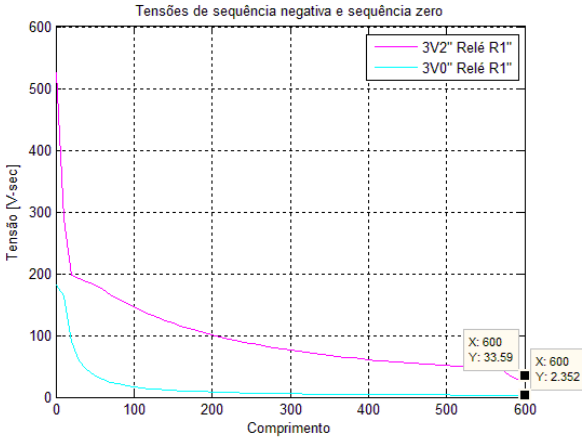


Figura 4.59 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta bifásica a terra e $R_f = 0\ \Omega$.

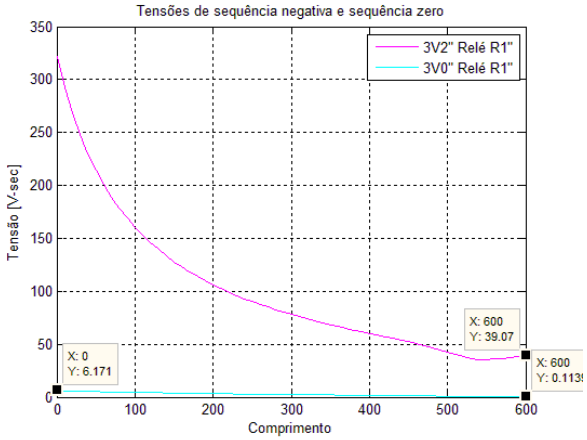


Figura 4.60 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta bifásica a terra e $R_f = 200\ \Omega$.

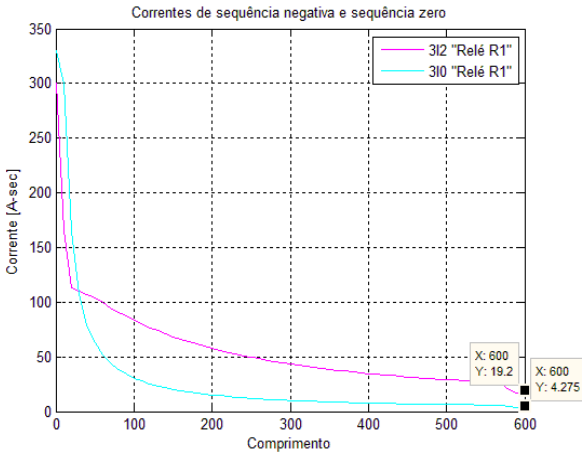


Figura 4.61 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta bifásica a terra e $R_f = 0\ \Omega$.

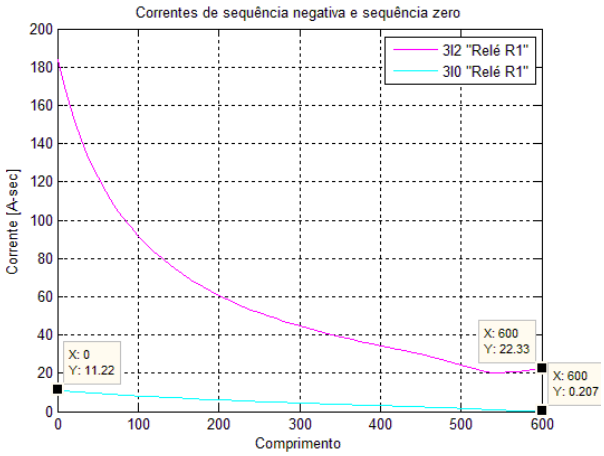


Figura 4.62 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta bifásica a terra e $R_f = 200\ \Omega$.

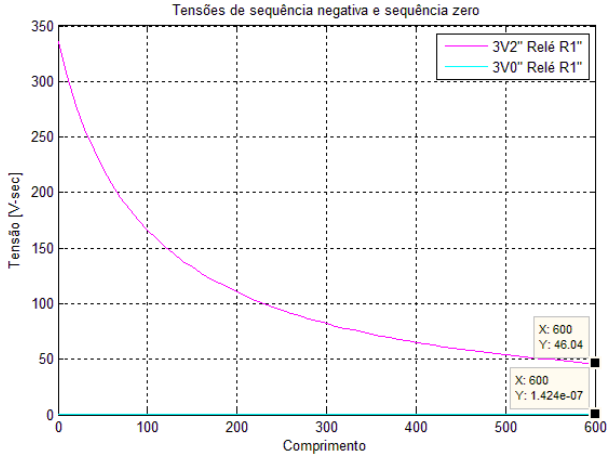


Figura 4.63 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta bifásica e $R_f = 0\ \Omega$.

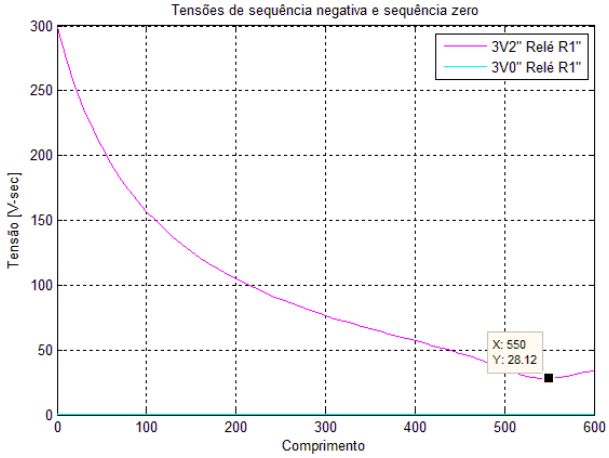


Figura 4.64 – Módulo de V_0 e V_2 ao longo da linha, para falta bifásica e $R_f = 20\ \Omega$.

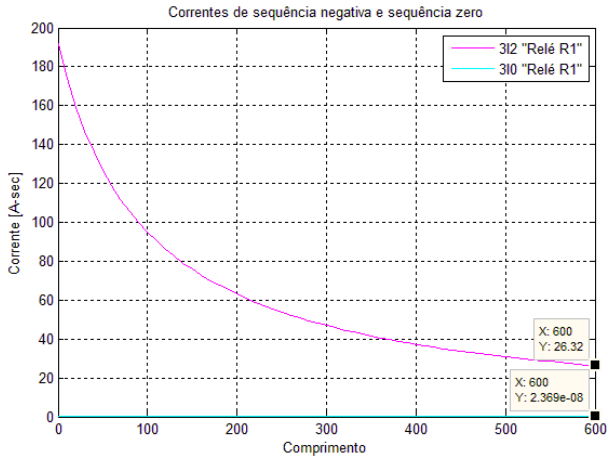


Figura 4.65 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta bifásica e $R_f = 0\ \Omega$.

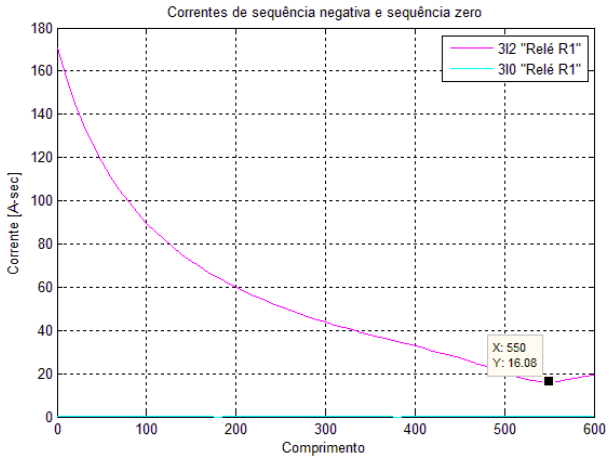


Figura 4.66 – Módulo de I_0 e I_2 ao longo da linha, para falta bifásica e $R_f = 20\ \Omega$.

4.2.2.1 Falta monofásica na linha de transmissão sem equipamento PR do capacitor série.

Foram simuladas faltas monofásicas na linha a 0%; 100% e 200% de distância do relé R1 (F1, F2 e F3), como se mostra na figura 4.67. As impedâncias calculadas pelos relés R1, R2, R5 e R6, irão variar em função da localização dos transformadores de tensão. Os transformadores de tensão para os relés R1 e R6 se encontram antes do capacitor (lado do barramento) e para os relés R2 e R5 se encontram depois do capacitor (lado da linha), como se mostra a figura 4.67.

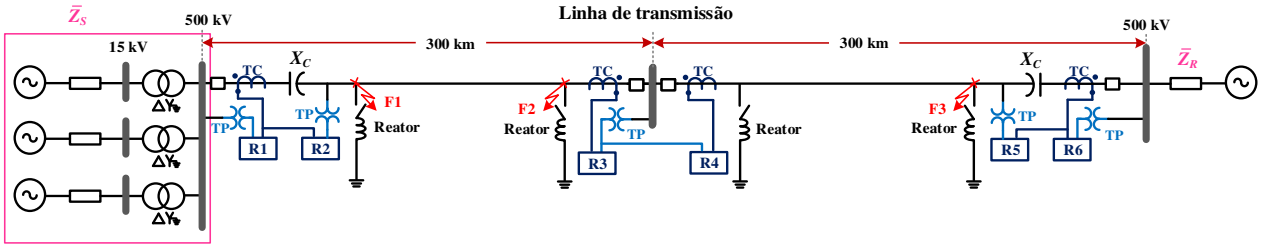


Figura 4.67 –Faltas monofásicas simulados ao longo da linha de transmissão para o sistema da figura 4.2.

As figuras 4.68 e 4.69 são apresentadas as impedâncias de sequência negativa (*Z2*) calculadas pelos relés R1 e R2 no domínio do tempo. Os relés R1 e R2 operam corretamente, indicando que as faltas ocorrem na direção "a frente", já que essas impedâncias (*Z2*) calculadas se encontram por abaixo dos seus ajustes da zona a frente (*Z2F*).

A impedância (*Z2*) calculada pelo relé R1 é a impedância de sequência negativa da rede equivalente (Z_{2S}) atrás dele e de sinal negativo, como se mostra na figura 4.68. A impedância (*Z2*) que é calculada pelo relé R2 é a impedância de sequência negativa da rede equivalente (Z_{2S}-X_C) atrás dele e de sinal negativo, como se mostra na figura 4.69. As impedâncias calculadas pelos relés demoram mais para convergir do que o caso da rede da figura 4.1. Isso ocorre porque o capacitor série provoca ressonância subsíncrona que causa uma pequena oscilação nos fasores de tensão que por fim geram este ruído ou instabilidade na medição.

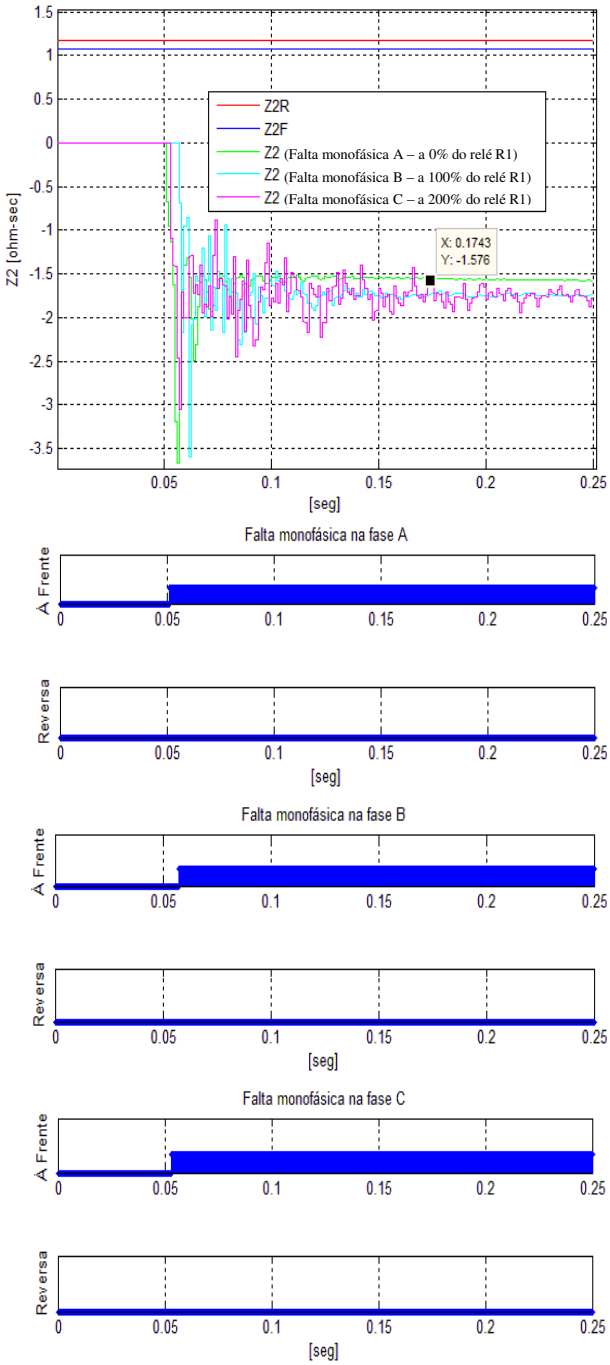


Figura 4.68 –Impedância *Z2* calculada pelo relé R1, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

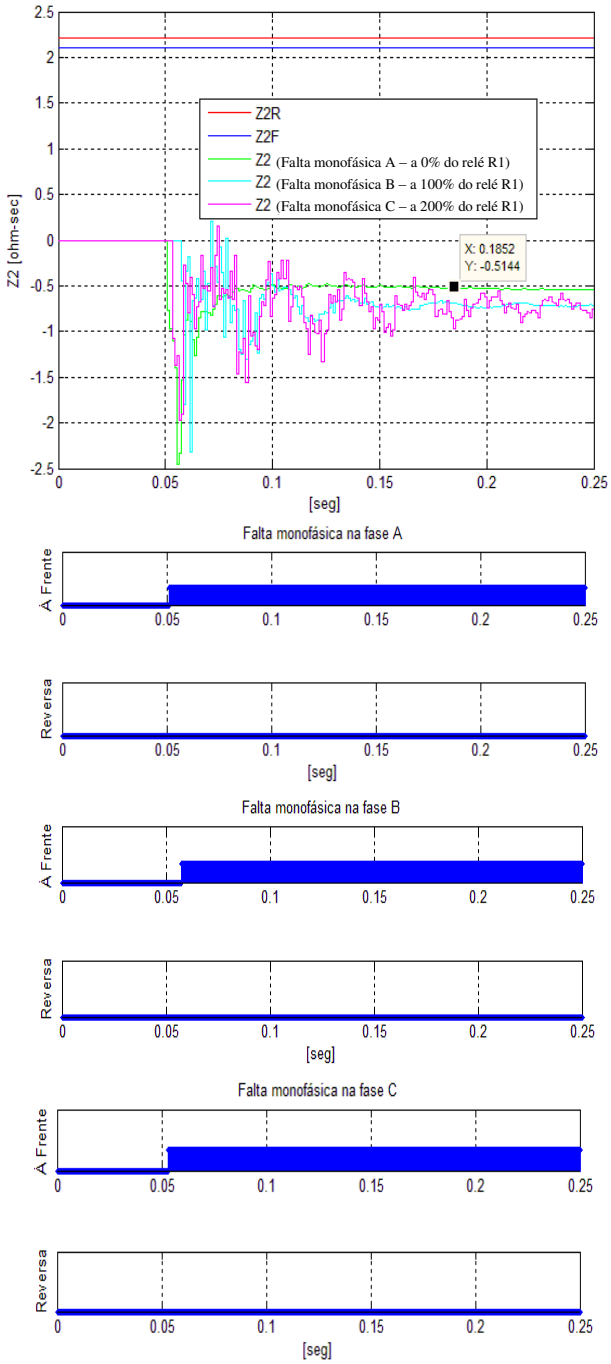


Figura 4.69 –Impedância *Z2* calculada pelo relé R2, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

Os relés direcionais com métodos de polarização por tensão e polarização por corrente são influenciados pelas inversões da corrente e da tensão provocada pelos capacitores série. Nas tabelas 4.18 e 4.19 é apresentado um resumo das análises das inversões das tensões e correntes de sequência negativa e sequência zero para as três faltas (F1, F2 e F3). Para a análise se utilizou a teoria apresentada no capítulo 2.

Tabela 4.18 – Análises das inversões das tensões e correntes de sequência negativa para os relés R1 e R2.

Sequência Negativa										
Ponto de Falta	**Impedâncias reativas da rede**				**Inversão da tensão**		**Inversão da corrente**		**Operação do Relé direcional**	
	X_C	X_{2S}	mX_{2L}	$X_{2S} + mX_{2L}$	**R1**	**R2**	**R1**	**R2**	**R1**	**R2**
F1	39,979	66,245	0	66,245	Não	Não	Não	Não	Corretamente	Corretamente
F2	39,979	66,245	79,959	146,204	Não	Não	Não	Não	Corretamente	Corretamente
F3	39,979	66,245	159,918	226,163	Não	Não	Não	Não	Corretamente	Corretamente

Tabela 4.19 – Análises das inversões das tensões e correntes de sequência zero para os relés R1 e R2.

Sequência Zero										
Ponto de Falta	**Impedâncias reativas da rede**				**Inversão da tensão**		**Inversão da corrente**		**Operação do Relé direcional**	
	X_C	X_{0S}	mX_{0L}	$X_{0S} + mX_{0L}$	**R1**	**R2**	**R1**	**R2**	**R1**	**R2**
F1	39,979	18,275	0	18,275	Sim	Não	Sim	Sim	Corretamente	Incorretamente
F2	39,979	18,275	467,07	485,345	Não	Sim	Não	Não	Corretamente	Incorretamente
F3	39,979	18,275	934,14	952,415	Não	Sim	Não	Não	Corretamente	Incorretamente

Da tabela 4.18 se conclui que não haverá inversões da tensão e da corrente de sequência negativa para os relés R1 e R2.

Da tabela 4.19 se conclui que para o relé R1 só haverá inversão da tensão e da corrente para a falta F1. Para o relé R2 haverá inversões da tensão de sequência zero para as faltas F2 e F3, e só haverá inversão da corrente sequência zero para a falta F1. Então o relé R2 operará incorretamente em função da inversão de somente uma grandeza, tensão ou corrente.

Nas figuras 4.70 e 4.71 são apresentadas as tensões e correntes de sequência negativa vistas pelo relé R1 para as três faltas monofásicas e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente. Se pode observar que o relé R1 opera corretamente indicando que as faltas ocorrem na direção “a frente”.

Nas figuras 4.72 e 4.73 são apresentadas as tensões e correntes de sequência negativa vistas pelo relé R2 para as três faltas monofásicas e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente. Pode-se observar que o relé R2 opera corretamente indicando que as faltas ocorrem na direção “a frente”. Nas figuras 4.74 e 4.75 se mostra a operação do relé R2 com os mesmos métodos de polarização, mas sem a compensação do capacitor e se pode observar que o relé R2 opera corretamente, indicando que as faltas ocorrem

na direção “a frente”. Mas em função das oscilações provocadas pelos capacitores série surgem transitórios que causam a operação indevida do relé.

Da análise acima se verifica que para a falta F1 haverá inversão da tensão e da corrente de sequência zero para o relé R1, que irá operar corretamente porque se invertem os dois sinais (tensão e corrente). A operação indevida ocorreria se só um dos sinais se invertesse. Nas figuras 4.76 e 4.77 são apresentadas as tensões e correntes de sequência zero com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente. Se pode observa que o relé R1 opera corretamente indicando que as faltas ocorrem na direção “a frente”.

Da análise acima se verifica que o relé R2 terá inversão da tensão de sequência zero para as faltas F2 e F3, e só haverá inversão da corrente de sequência zero para a falta F1. Para o relé R2 é preciso implementar o ajuste da compensação do capacitor para evitar a operação incorreta do relé. Nas figuras 4.78 e 4.79 são apresentadas as tensões e correntes de sequência zero com o ajuste da compensação do capacitor e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente. Pode-se observar que o relé R2 opera corretamente, indicando que as faltas ocorrem na direção “a frente”. Nas figuras 4.80 e 4.81 se apresentam a operação do relé R2 com os mesmos métodos de polarização, mas sem a compensação do capacitor e se pode observar que o relé R2 opera incorretamente, indicando que as faltas ocorrem na direção “reversa”. Mas em função das oscilações provocadas pelos capacitores série surgem transitórios que causam a operação indevida do relé, alternando a indicação da direção do defeito.

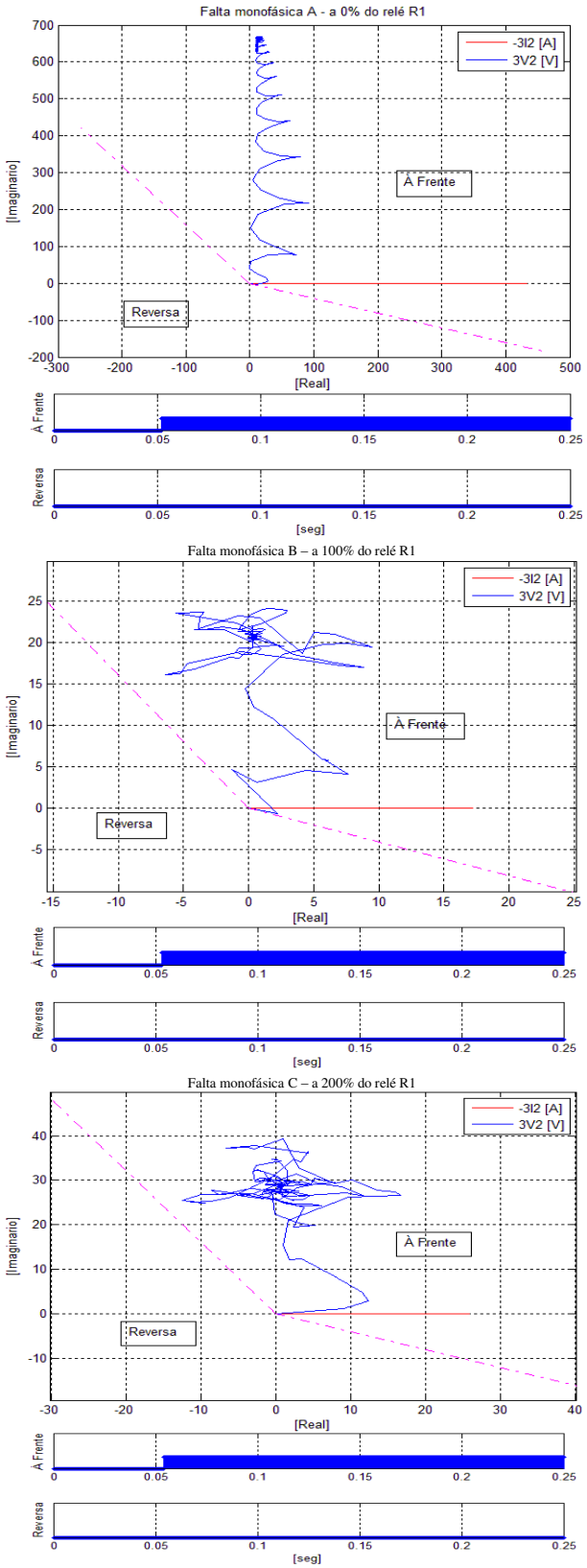


Figura 4.70 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

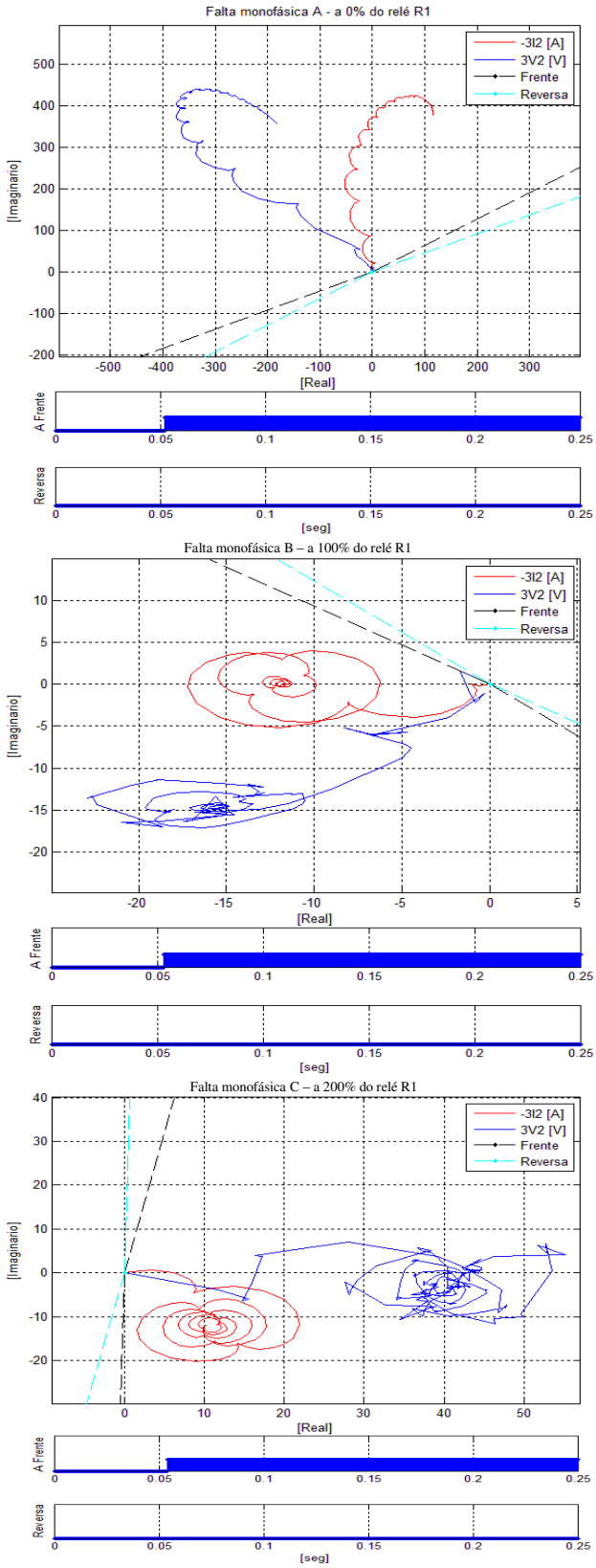


Figura 4.71 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

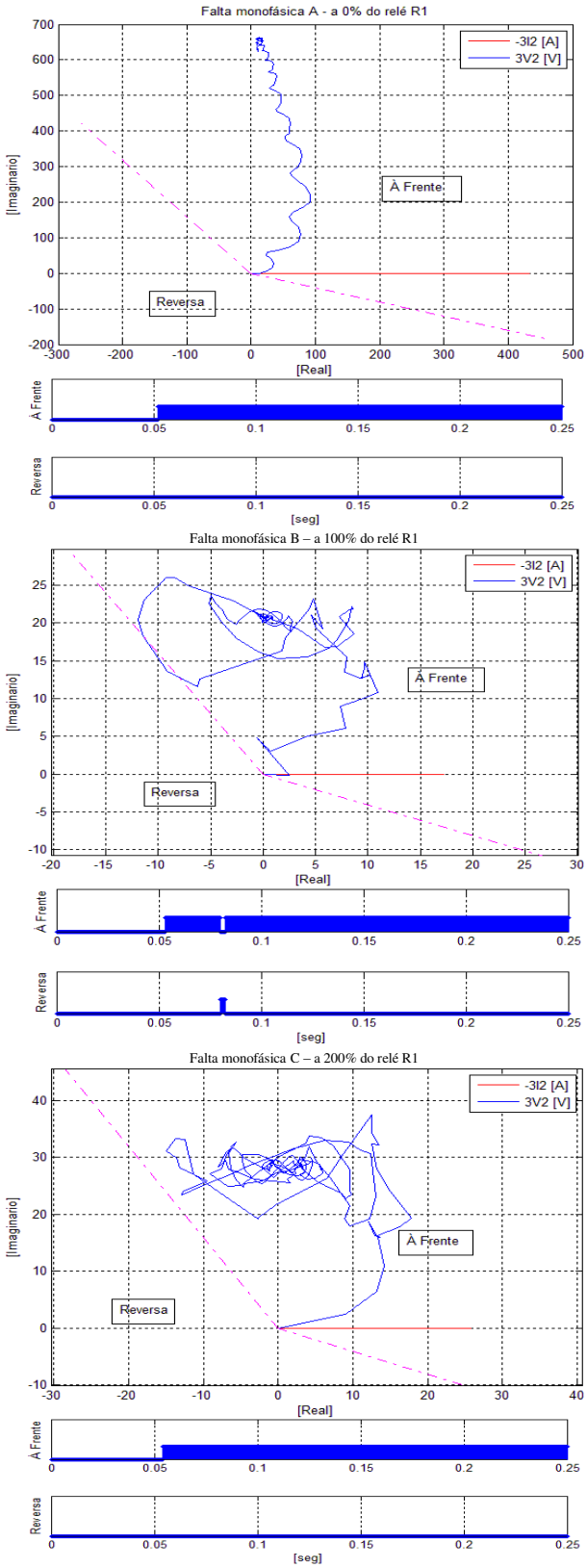


Figura 4.72 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R2 e com compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

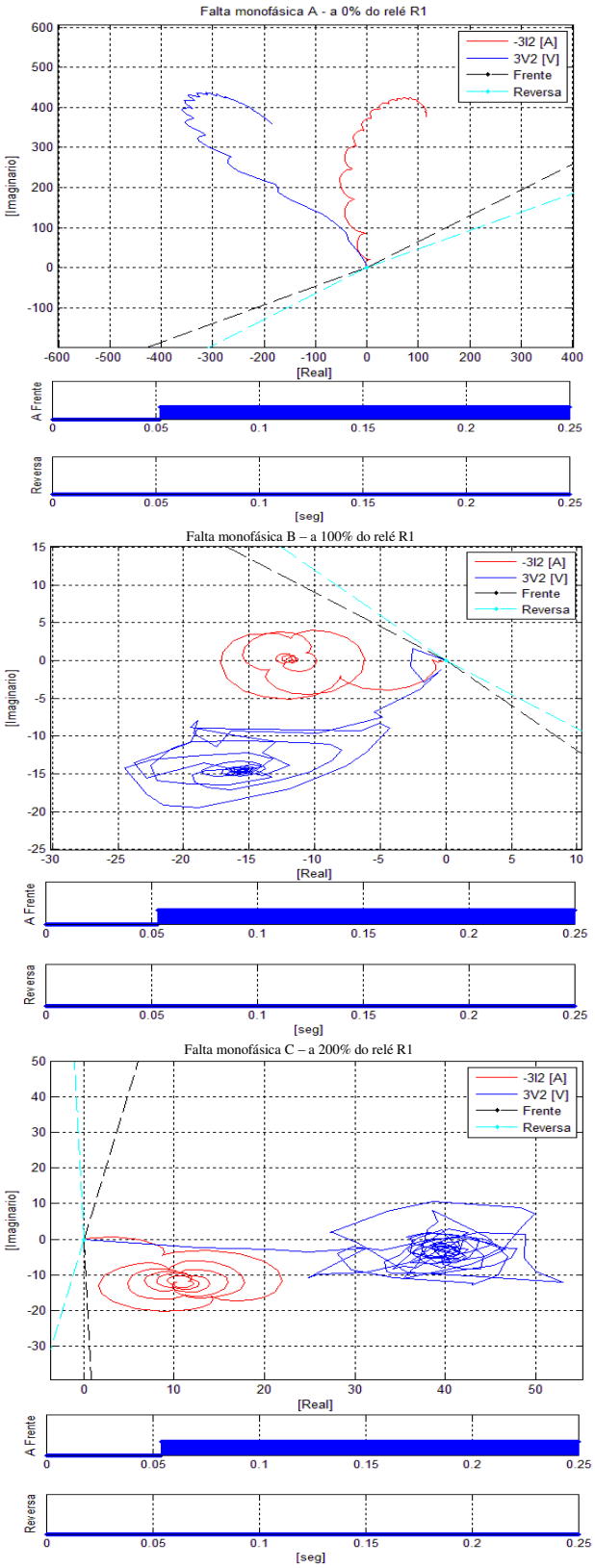


Figura 4.73 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R2 e com compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

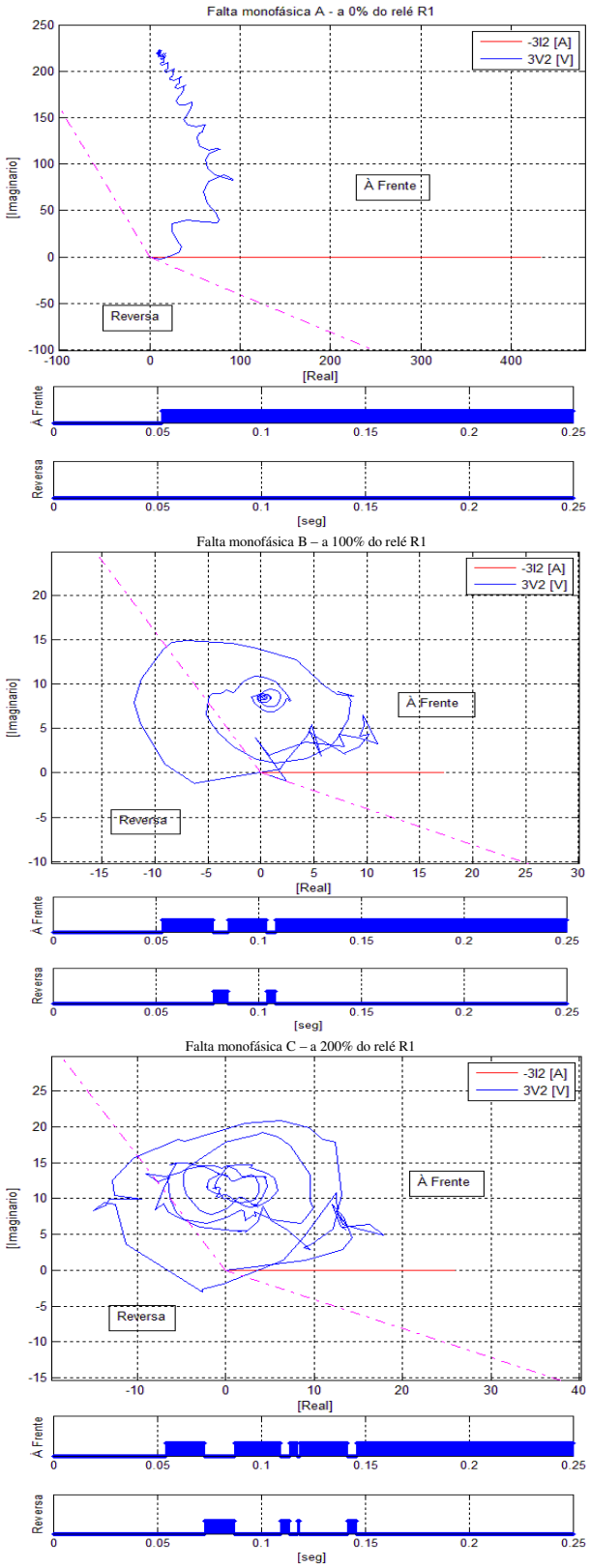


Figura 4.74 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R2 e sem compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

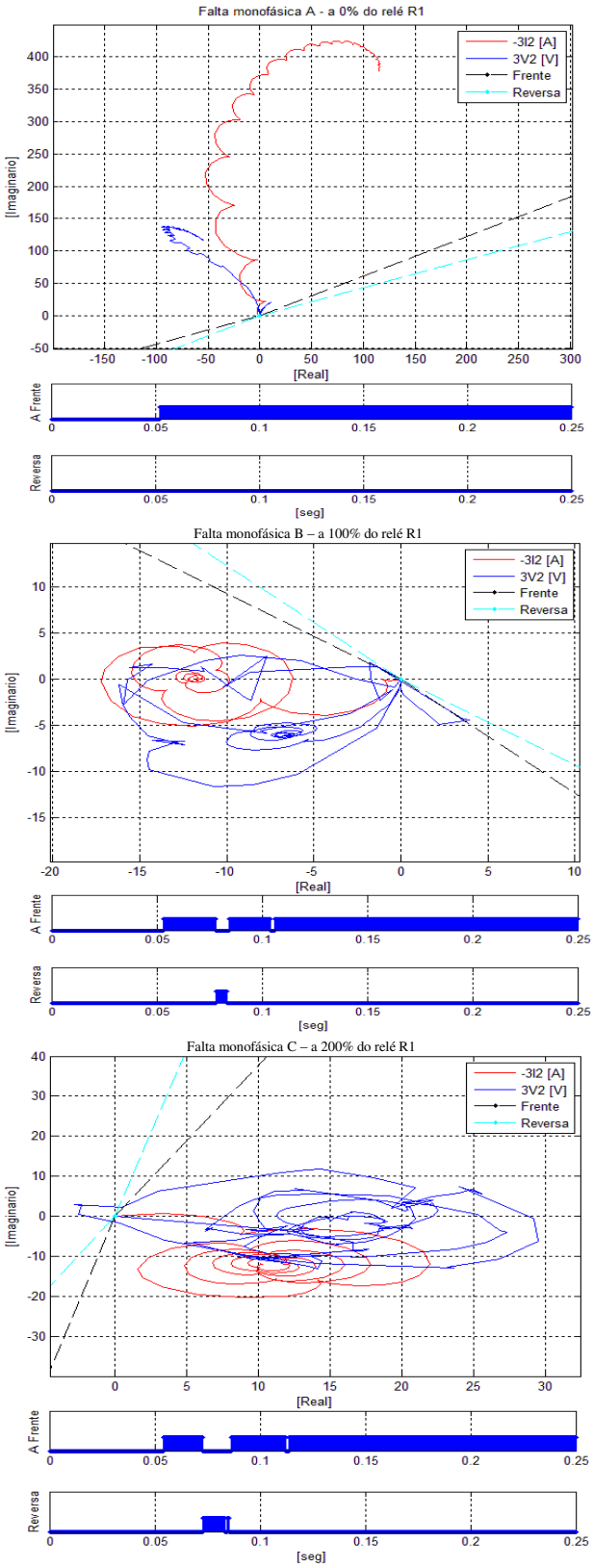


Figura 4.75 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R2 e sem compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

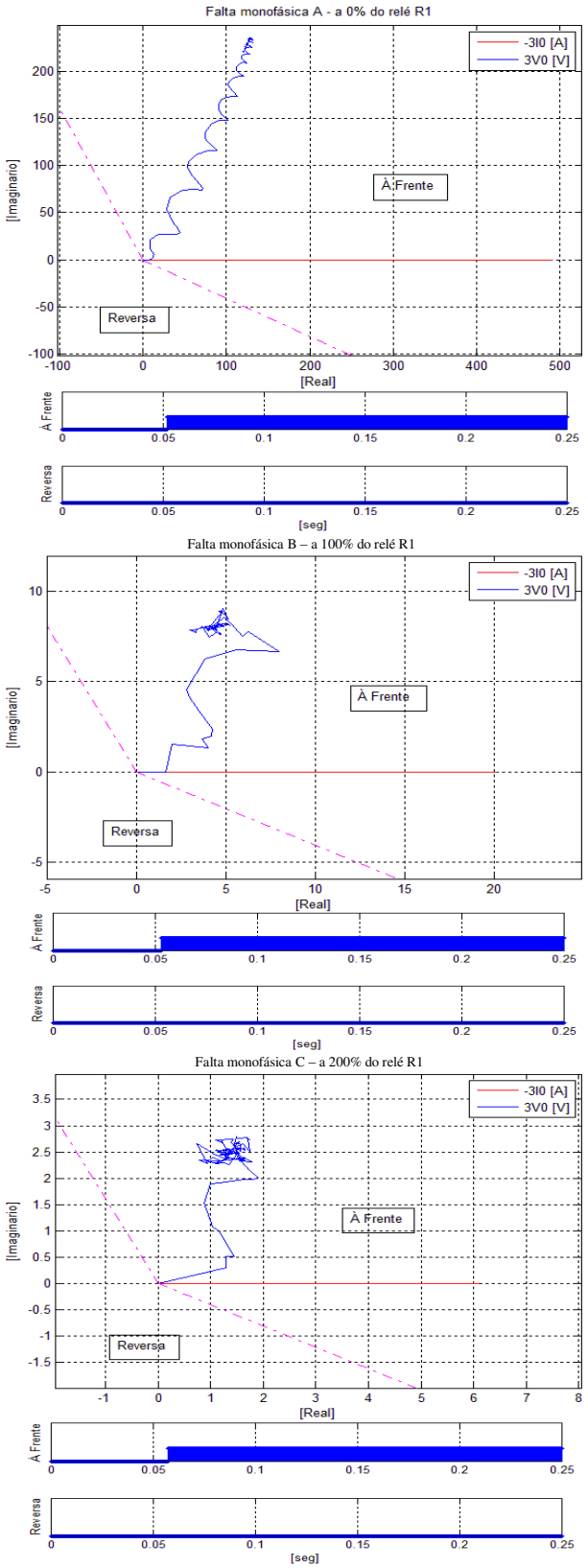


Figura 4.76 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

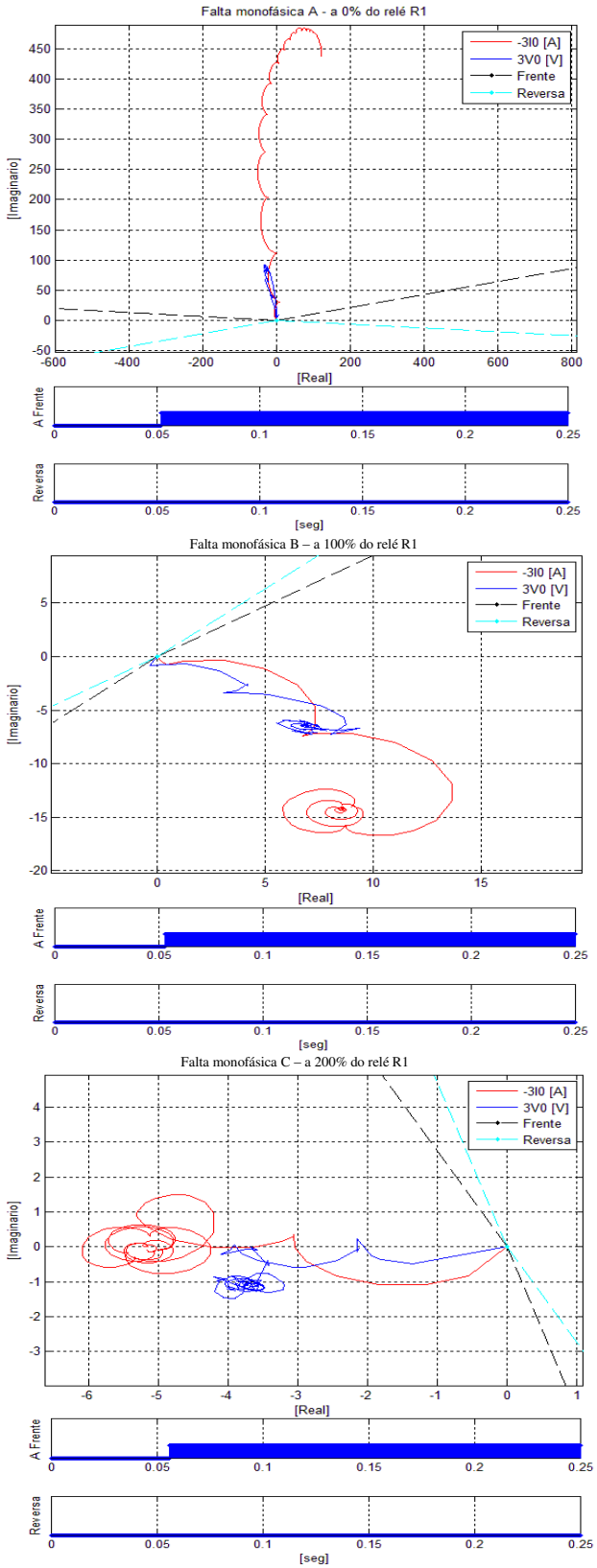


Figura 4.77 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

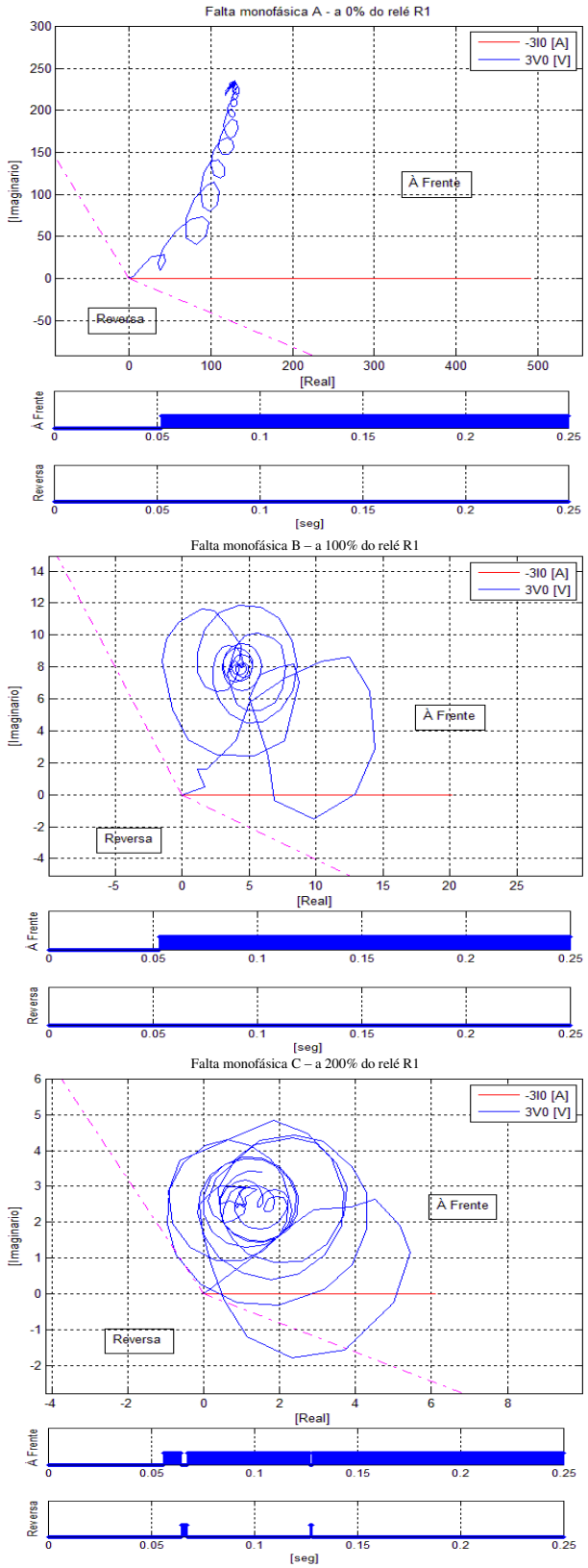


Figura 4.78 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R2 e com compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

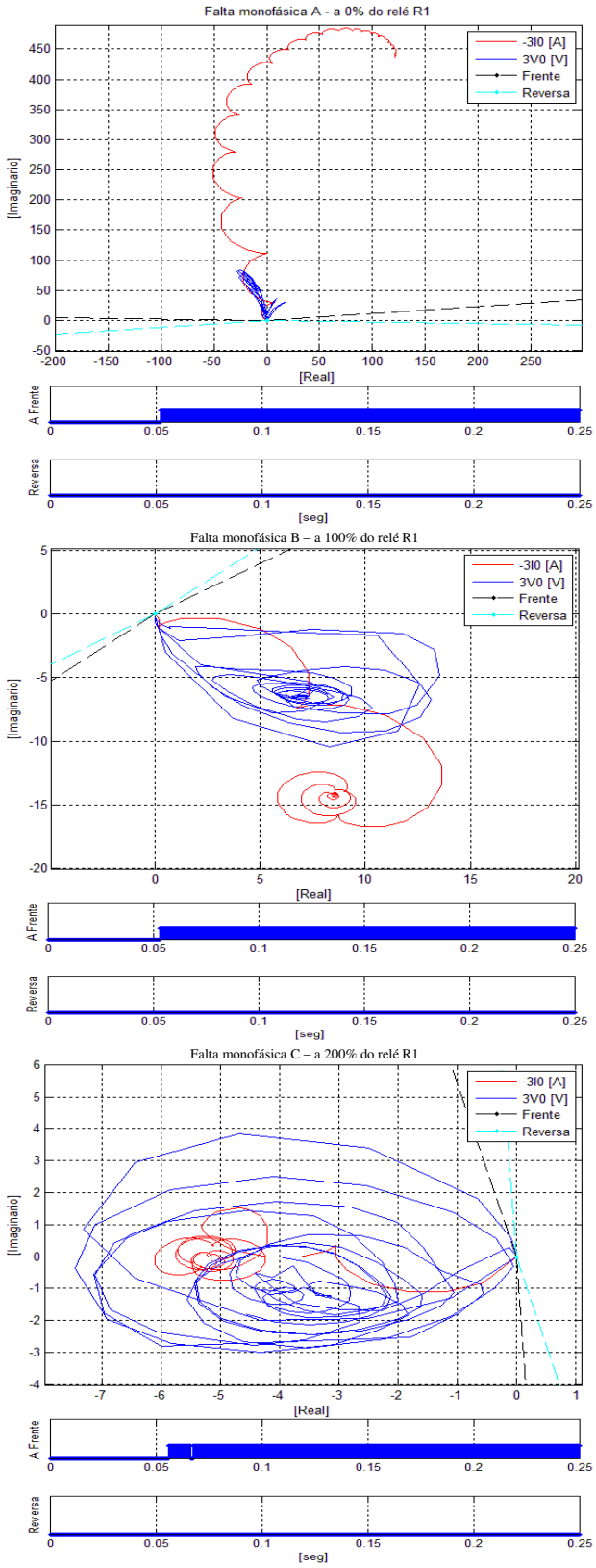


Figura 4.79 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R2 e com compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

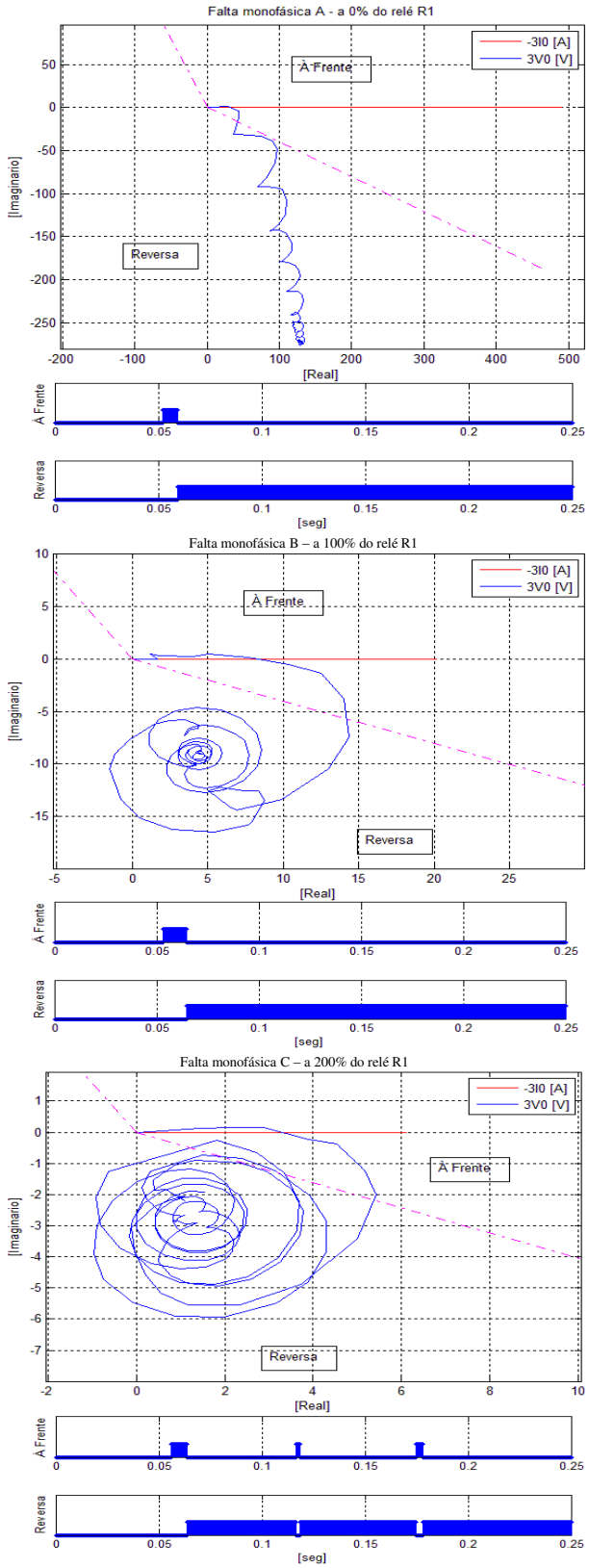


Figura 4.80 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R2 e sem compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

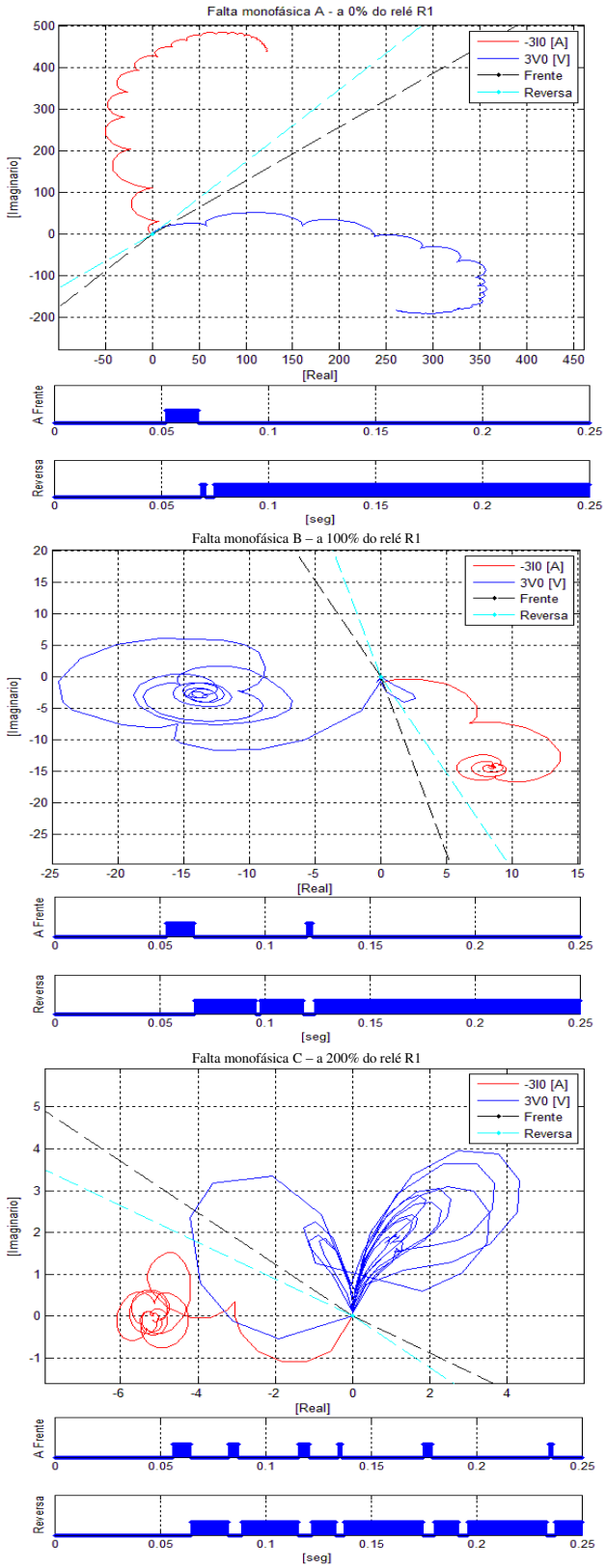


Figura 4.81 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R2 e sem compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

Na figura 4.82 são apresentadas as impedâncias de sequência negativa (*Z2*) calculadas pelo relé R3. O relé R3 se localiza na metade da linha, como se mostra na figura 4.67. Para as duas faltas monofásicas nas fases A e B, o relé R3 opera corretamente indicando que as faltas ocorrem na direção "a frente" e para a falta monofásica na fase C o relé R3 opera corretamente indicando que a falta ocorre na direção "reversa", como se mostra na figura 4.82.

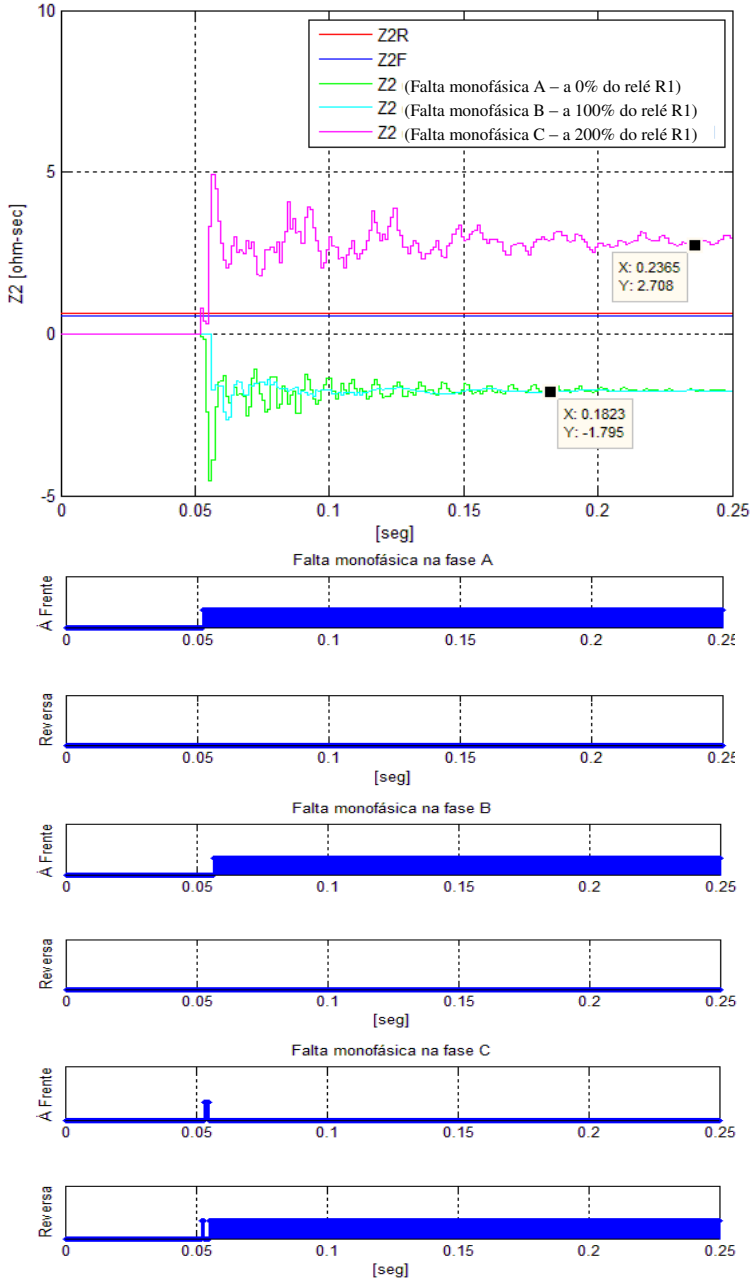


Figura 4.82 –Impedância *Z2* calculada pelo relé R3, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

Nas figuras 4.83 e 4.84 são apresentadas as tensões e correntes de sequência negativa vistas pelo relé R3 para as três faltas monofásicas e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente. Para as duas faltas monofásicas nas fases A e B, o relé R3 opera corretamente indicando que as faltas ocorrem na direção “a frente” e para a falta monofásica na fase C o relé R3 opera corretamente, indicando que a falta ocorre na direção “reversa”.

Nas figuras 4.85 e 4.86 são apresentadas as tensões e correntes de sequência zero vistas pelo relé R3 para as três faltas monofásicas e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente. Para as duas faltas monofásicas nas fases A e B, o relé R3 opera corretamente indicando que as faltas ocorrem na direção “a frente” e para a falta monofásica na fase C o relé R3 opera corretamente, indicando que a falta ocorre na direção “reversa”.

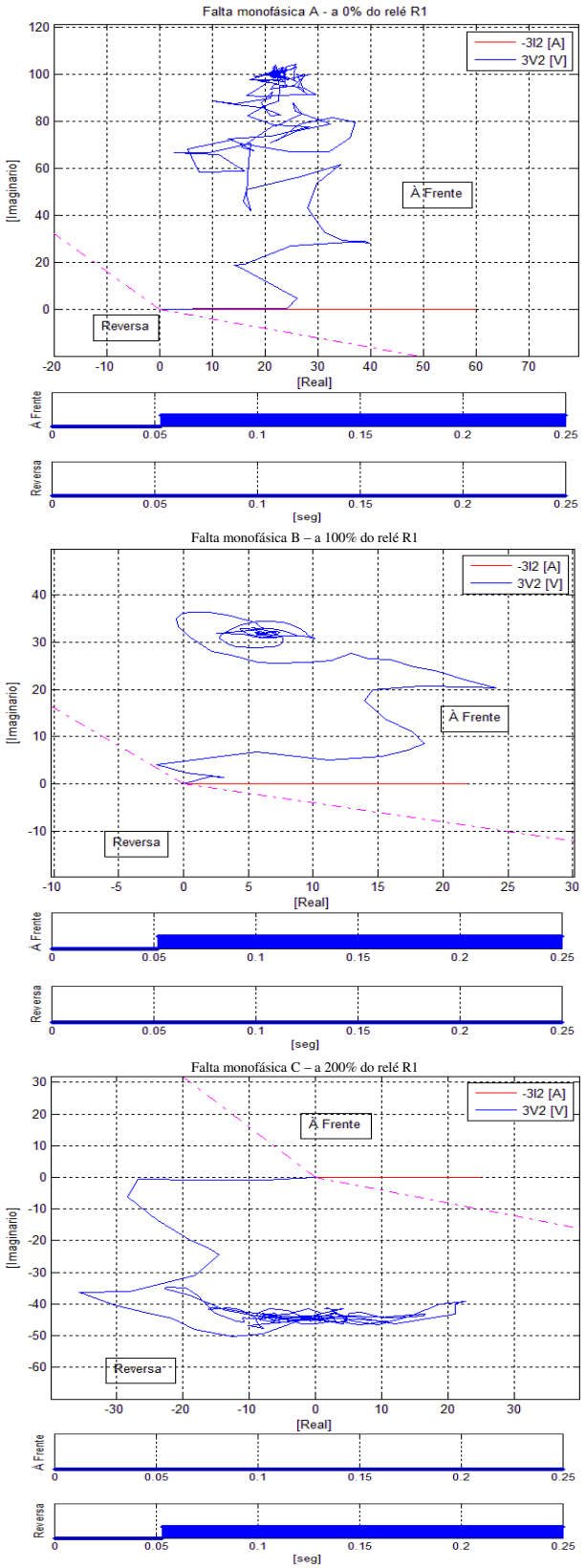


Figura 4.83 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R3, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

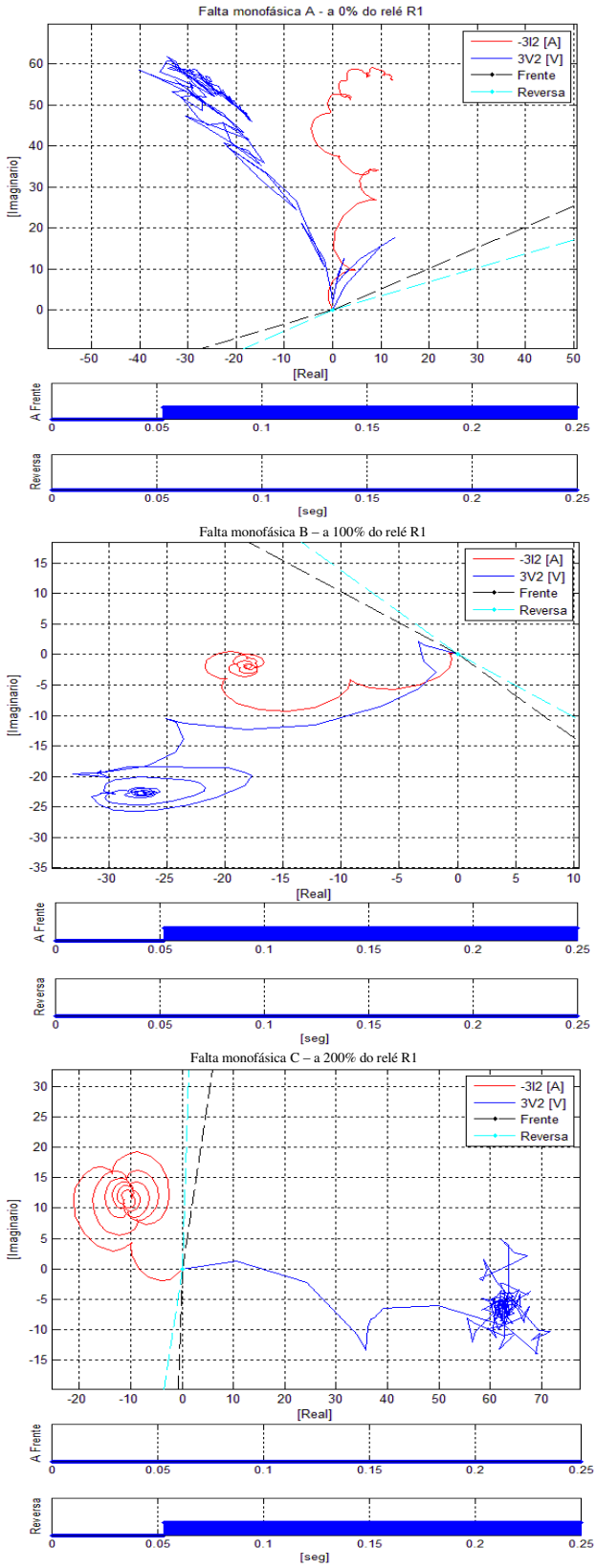


Figura 4.84 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R3, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

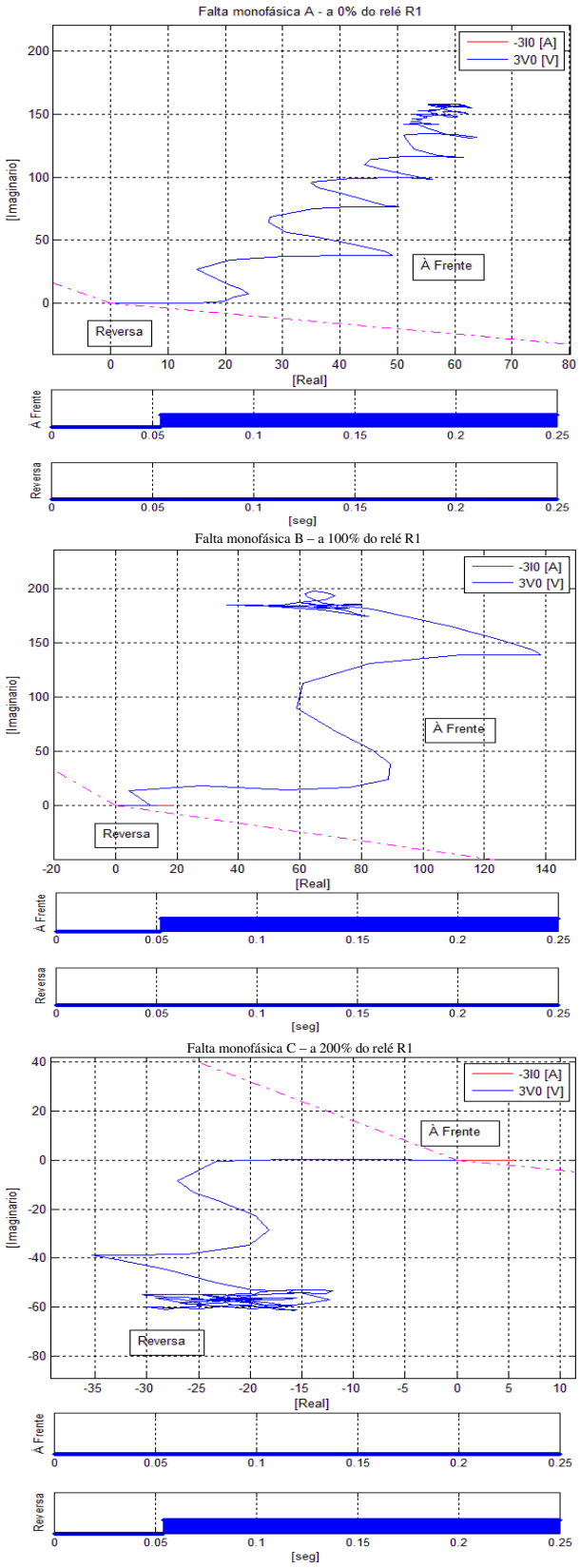


Figura 4.85 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R3, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

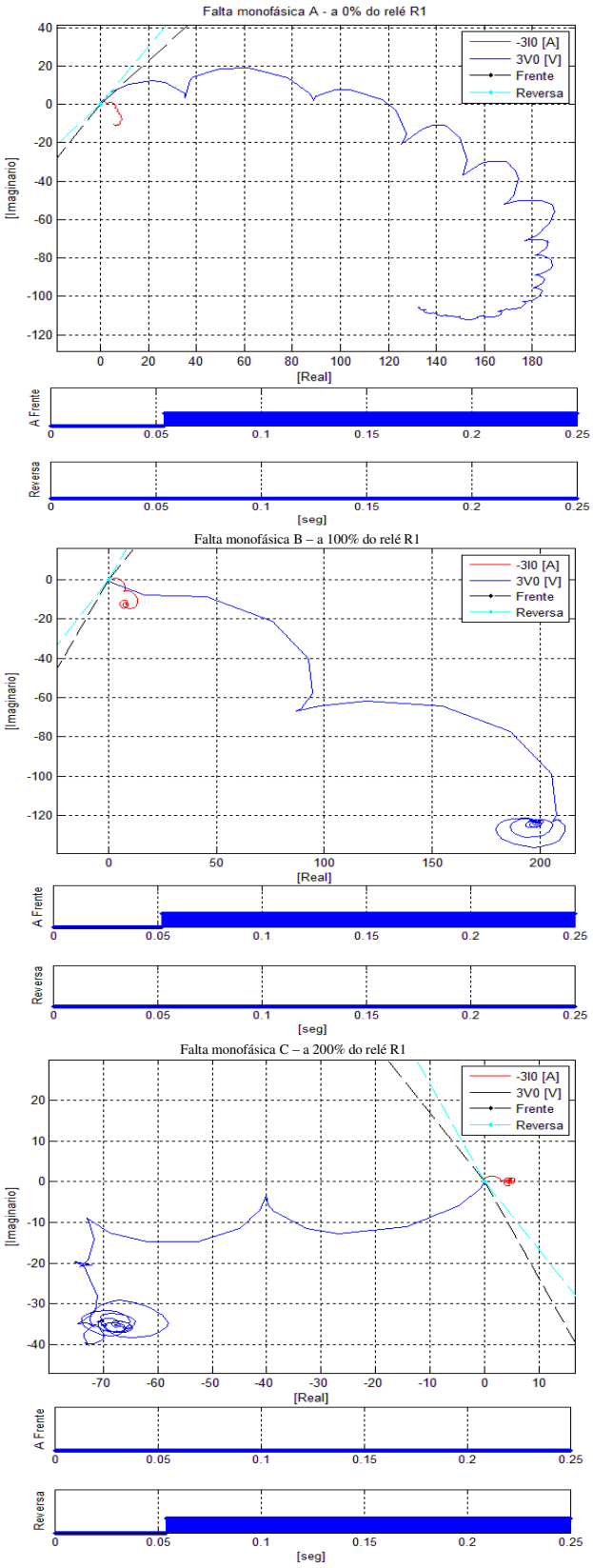


Figura 4.86 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R3, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

A figura 4.87 se apresentam as impedâncias de sequência negativa (*Z2*) calculadas pelo relé R4, o relé se localiza na metade da linha e na direção oposto ao relé R3, como se mostra na figura 4.67. Para as duas faltas monofásicas nas fases A e B, o relé R4 opera corretamente indicando que as faltas ocorrem na direção "reversa" e para a falta monofásica na fase C o relé R4 opera corretamente, indicando que a falta ocorre na direção "a frente", como se mostra na figura 4.87.

Nas figuras 4.88 e 4.89 são apresentadas as tensões e correntes de sequência negativa vistas pelo relé R4 para as três faltas monofásicas e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente. Para as duas faltas monofásicas nas fases A e B, o relé R4 opera corretamente, indicando que as faltas ocorrem na direção "reversa" e para a falta monofásica na fase C o relé R4 opera corretamente indicando que a falta ocorre na direção "a frente".

Nas figuras 4.90 e 4.91 são apresentadas as tensões e correntes de sequência zero vistas pelo relé R4 para as três faltas monofásicas e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente. Para as duas faltas monofásicas nas fases A e B, o relé R4 opera corretamente, indicando que as faltas ocorrem na direção "reversa" e para a falta monofásica na fase C o relé R4 opera corretamente indicando que a falta ocorre na direção "a frente".

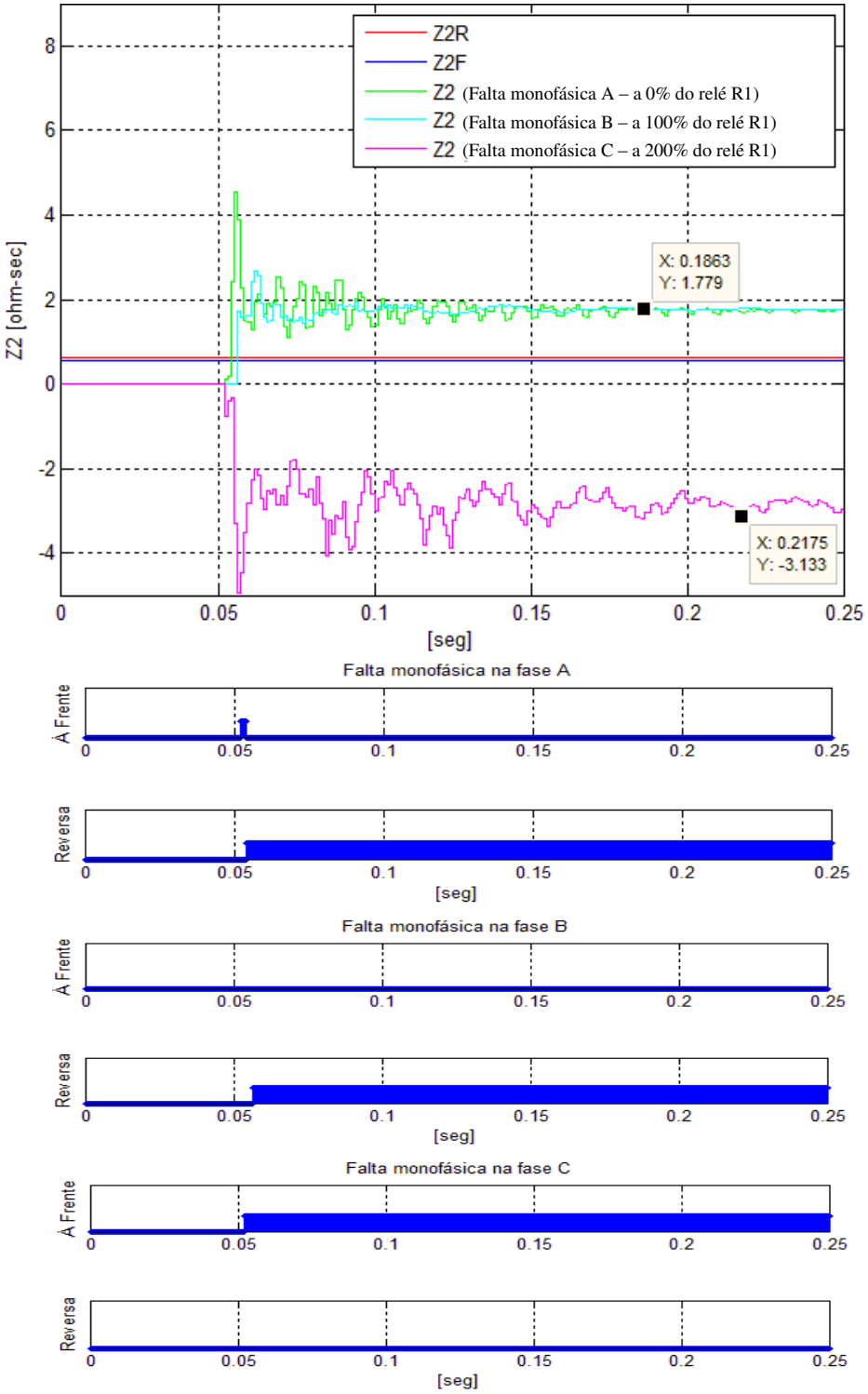


Figura 4.87 –Impedância *Z2* calculada pelo relé R4, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

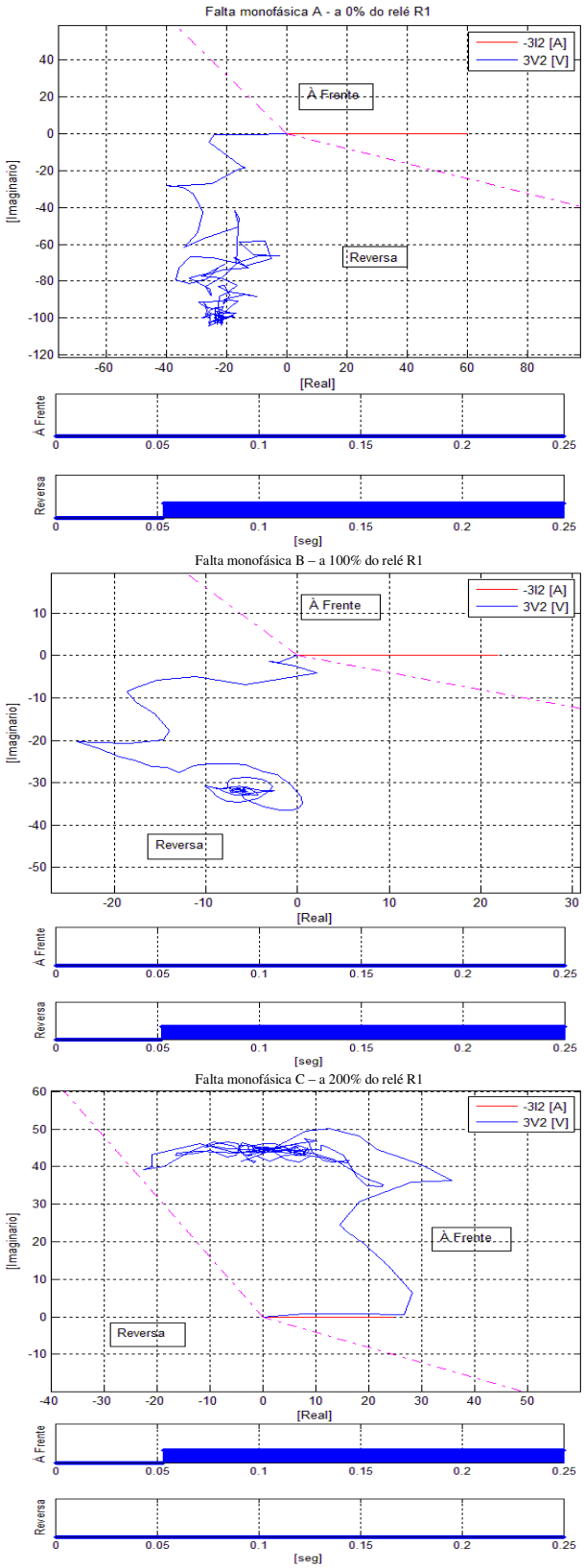


Figura 4.88 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R4, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

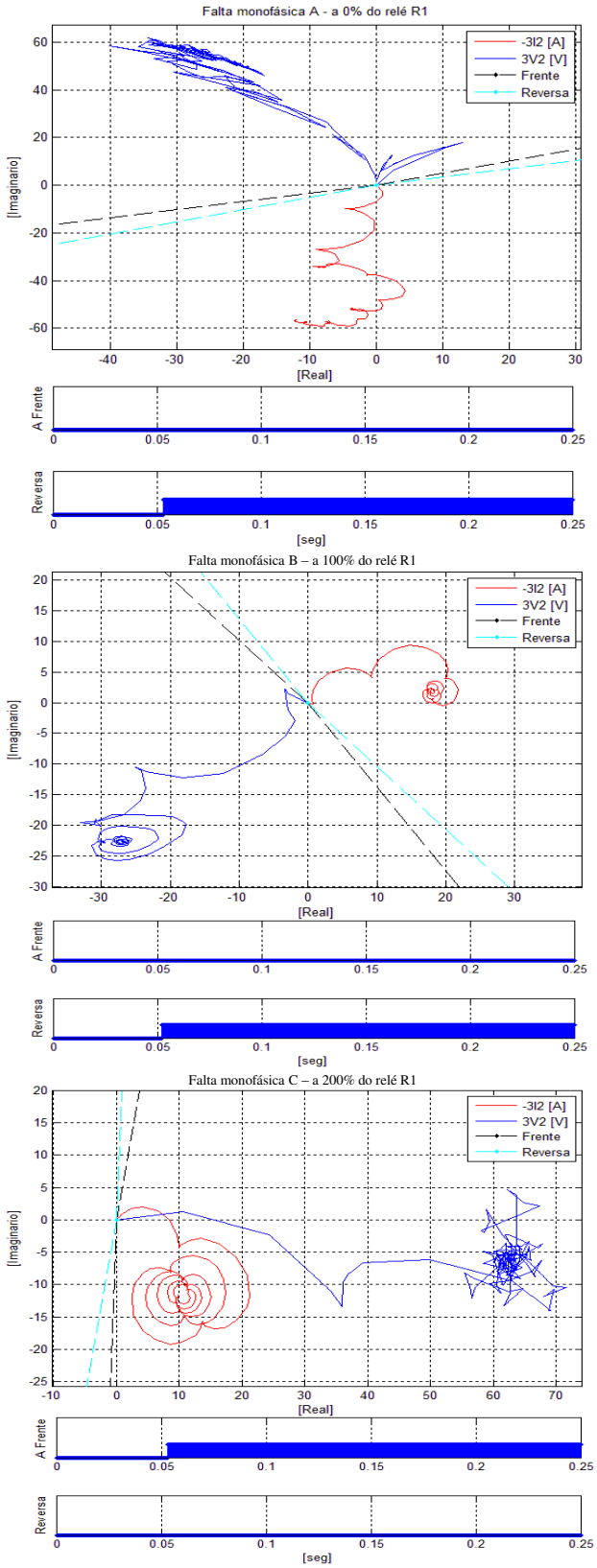


Figura 4.89 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R4, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

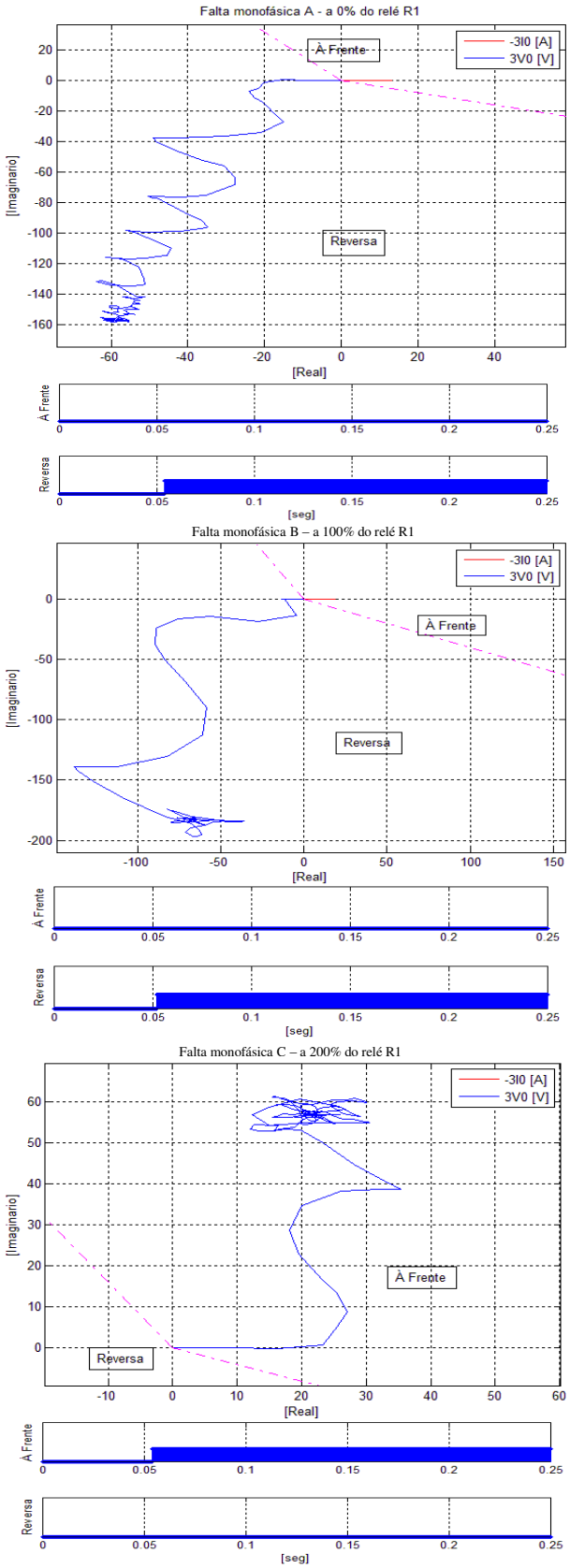


Figura 4.90 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R4, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

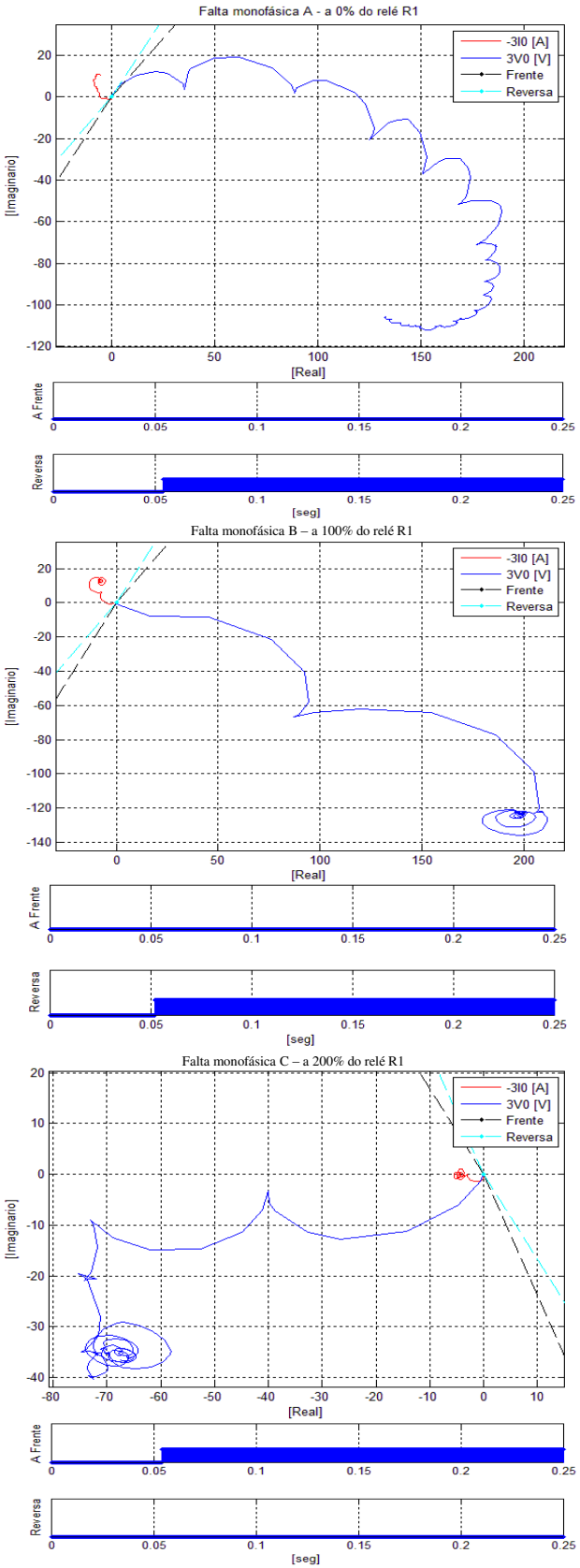


Figura 4.91 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R4, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

As figuras 4.92 e 4.93 são apresentadas as impedâncias de sequência negativa (*Z2*) calculadas pelos relés R5 e R6 no domínio do tempo. Os relés R5 e R6 operam corretamente, indicando que as faltas ocorrem na direção "a frente" já que essas impedâncias (*Z2*) calculadas se encontram abaixo do seu ajuste da zona a frente (*Z2F*).

A impedância (*Z2*) calculada pelo relé R6 é a impedância de sequência negativa da rede equivalente (Z_{2R}) atrás dele e de sinal negativo, como se mostra na figura 4.93. A impedância (*Z2*) calculada pelo relé R5 é a impedância de sequência negativa da rede equivalente (Z_{2R}-X_C) atrás dele e de sinal positivo, como se mostra na figura 4.92. As impedâncias calculadas pelos relés demoram mais para convergir do que o caso da rede da figura 4.1, novamente por causa da oscilação subsíncrona causada pelo capacitor série.

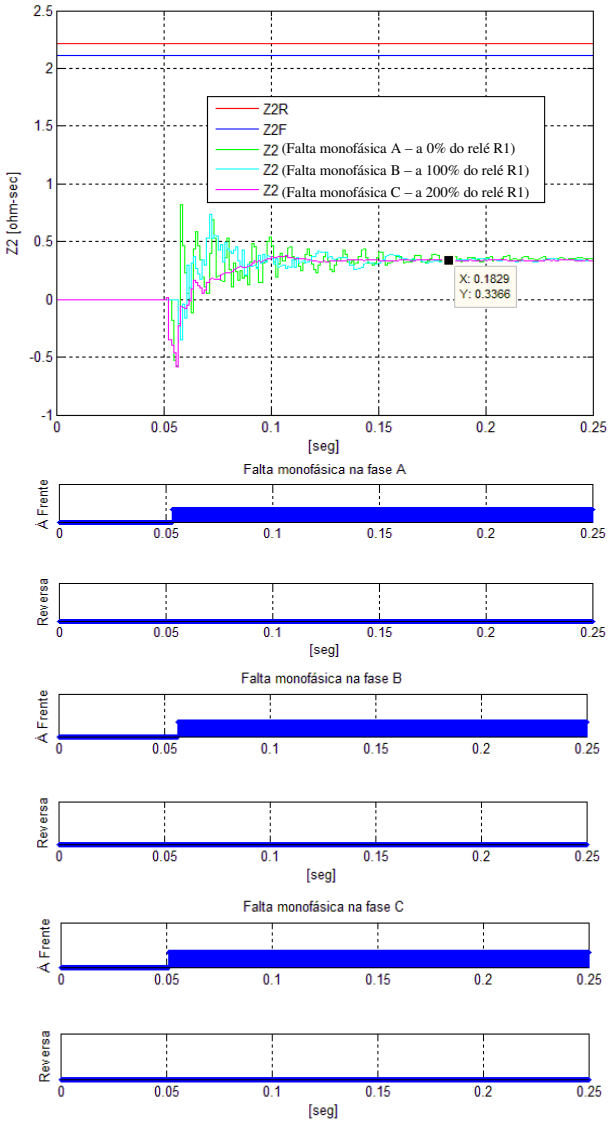


Figura 4.92 –Impedância *Z2* calculada pelo relé R5, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

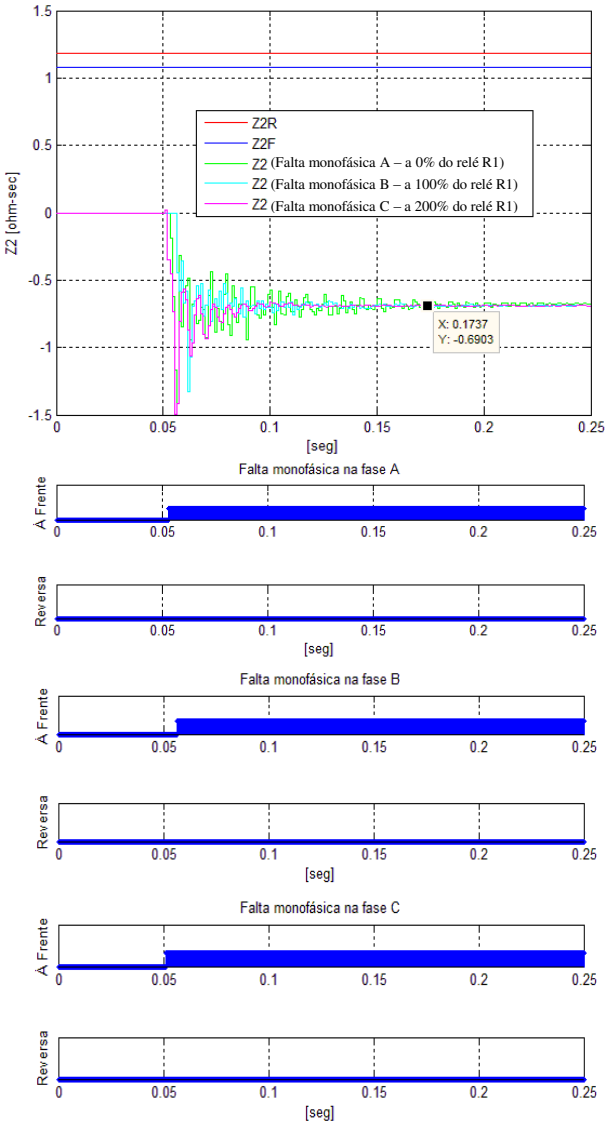


Figura 4.93 –Impedância *Z2* calculada pelo relé R6, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

Nas tabelas 4.20 e 4.21 é apresentado um resumo das análises das inversões das tensões e correntes de sequência negativa e sequência zero para as três faltas (F1, F2 e F3), baseada na teoria apresentada no capítulo 2.

Tabela 4.20 – Análises das inversões das tensões e correntes de sequência negativa para os relés R5 e R6.

Sequência Negativa										
Ponto de Falta	**Impedâncias reativas da rede**				**Inversão da tensão**		**Inversão da corrente**		**Operação do Relé direcional**	
	X_C	X_{2R}	mX_{2L}	$X_{2R} + mX_{2L}$	**R6**	**R5**	**R6**	**R5**	**R6**	**R5**
F1	39,979	26,389	159,918	186,307	Não	Sim	Não	Não	Corretamente	Incorretamente
F2	39,979	26,389	79,959	106,348	Não	Sim	Não	Não	Corretamente	Incorretamente
F3	39,979	26,389	0	26,389	Sim	Não	Sim	Sim	Corretamente	Incorretamente

Tabela 4.21 – Análises das inversões das tensões e correntes de sequência zero para os relés R5 e R6.

Sequência Zero										
Ponto de Falta	**Impedâncias reativas da rede**				**Inversão da tensão**		**Inversão da corrente**		**Operação do Relé direcional**	
	X_C	X_{0R}	mX_{0L}	$X_{0R} + mX_{0L}$	**R6**	**R5**	**R6**	**R5**	**R6**	**R5**
F1	39,979	15,079	934,14	949,219	Não	Sim	Não	Não	Corretamente	Incorretamente
F2	39,979	15,079	467,07	482,149	Não	Sim	Não	Não	Corretamente	Incorretamente
F3	39,979	15,079	0	15,079	Sim	Não	Sim	Sim	Corretamente	Incorretamente

Da tabela 4.20 se conclui que para o relé R6 só haverá inversão da tensão e da corrente para a falta F3. Para o relé R5 haverá inversão da tensão para as faltas F1 e F2, e só haverá inversão da corrente para a falta F3.

Da tabela 4.19 se conclui que para o relé R6 só haverá inversão da tensão e da corrente para a falta F3. Para o relé R5 haverá inversão da tensão para as faltas F1 e F2, e só haverá inversão da corrente para a falta F3.

Nas figuras 4.94 e 4.95 são apresentadas as tensões e correntes de sequência negativa vistas pelo relé R6 para as três faltas monofásicas e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente. Se pode observa que o relé R6 opera corretamente indicando que as faltas ocorrem na direção “a frente”.

Para o relé R5 é necessário implementar o ajuste da compensação do capacitor para evitar a operação incorreta. Nas figuras 4.96 e 4.97 são apresentadas as tensões e correntes de

sequência negativa com o ajuste da compensação do capacitor e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente e se pode observar que o relé R5 opera corretamente, indicando que as faltas ocorrem na direção “a frente”. Nas figuras 4.98 e 4.99 se mostra a operação do relé R5 com os mesmos métodos de polarização, mas sem a compensação do capacitor e se pode observar que o relé R5 opera incorretamente, indicando que as faltas ocorrem na direção “reversa”. Mas em função da oscilação que os capacitores série causam ao método o relé direcional atua indevidamente, alternando a indicação da direção do defeito.

Nas figuras 4.100 e 4.101 são apresentadas as tensões e correntes de sequência zero vistas pelo relé R6 para as três faltas monofásicas e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente. Pode-se observar que o relé R6 opera corretamente, indicando que as faltas ocorrem na direção “a frente”.

Nas figuras 4.102 e 4.103 são apresentadas as tensões e correntes de sequência zero com o ajuste da compensação do capacitor e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão, respectivamente e se pode observa que o relé R5 opera corretamente, indicando que as faltas ocorrem na direção “a frente”. Nas figuras 4.104 e 4.105 se apresentam a operação do relé R5 com os mesmos métodos de polarização, mas sem a compensação do capacitor e se pode observar que o relé R5 opera incorretamente, indicando que as faltas ocorrem na direção “reversa”. Mas como os capacitores série causam perturbações transitórias no cálculo do relé, o relé direcional atua indevidamente, novamente alternando a indicação da direção do defeito.

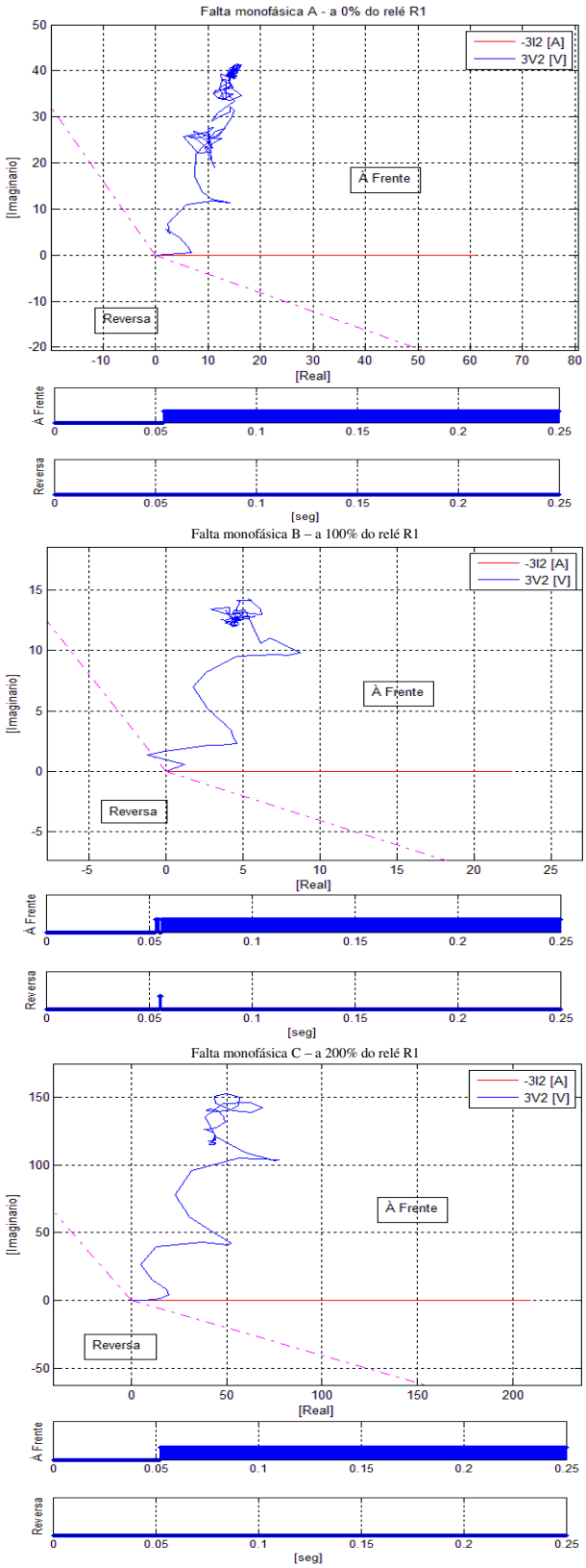


Figura 4.94 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R6, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

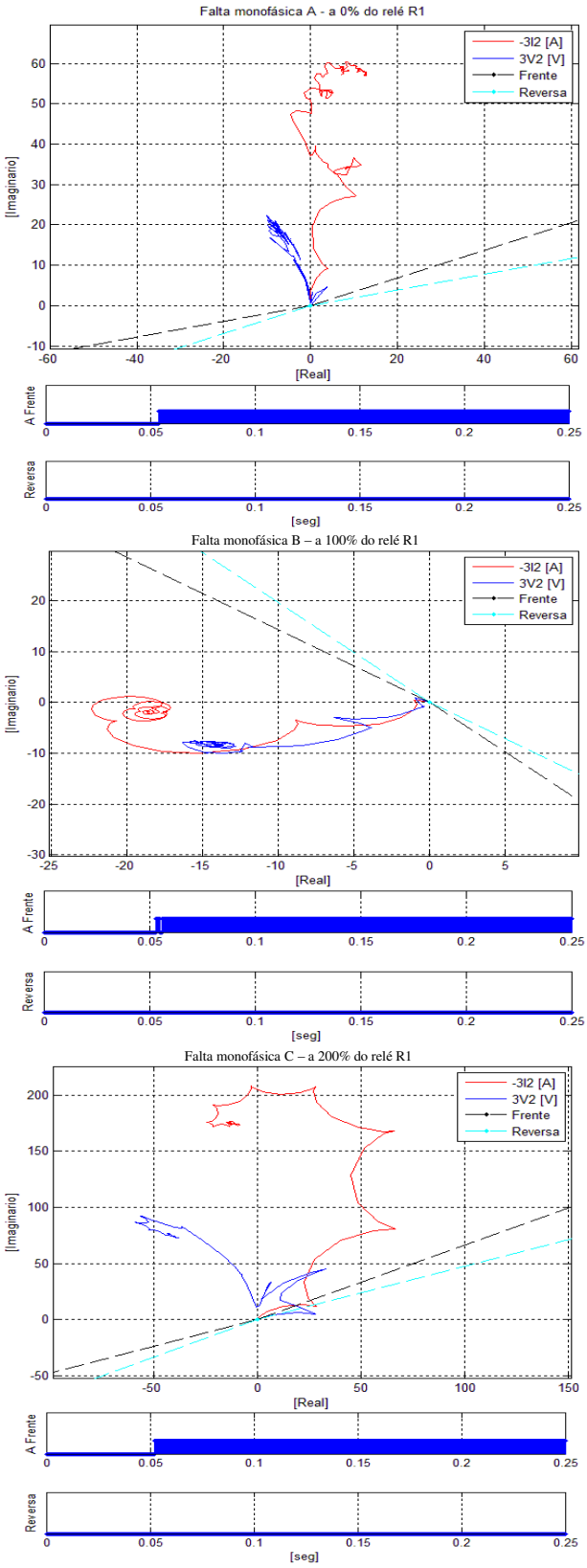


Figura 4.95 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R6, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

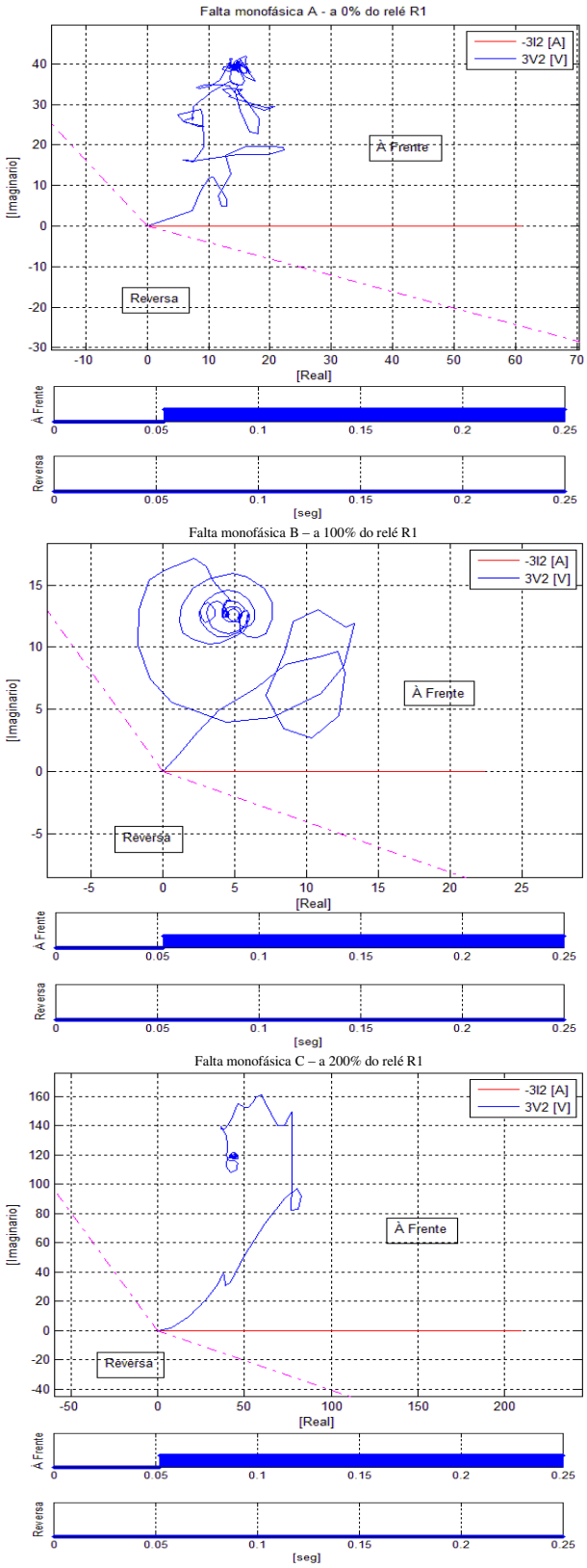


Figura 4.96 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R5 e com compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

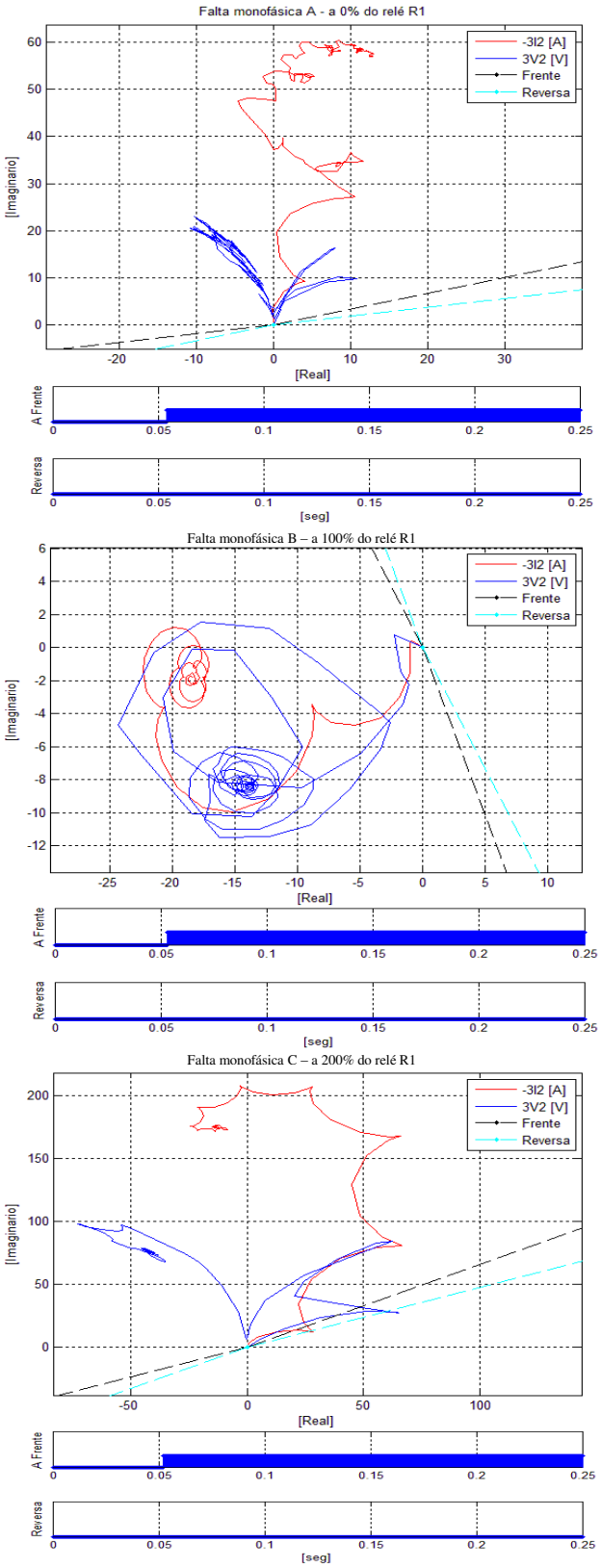


Figura 4.97 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R5 e com compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

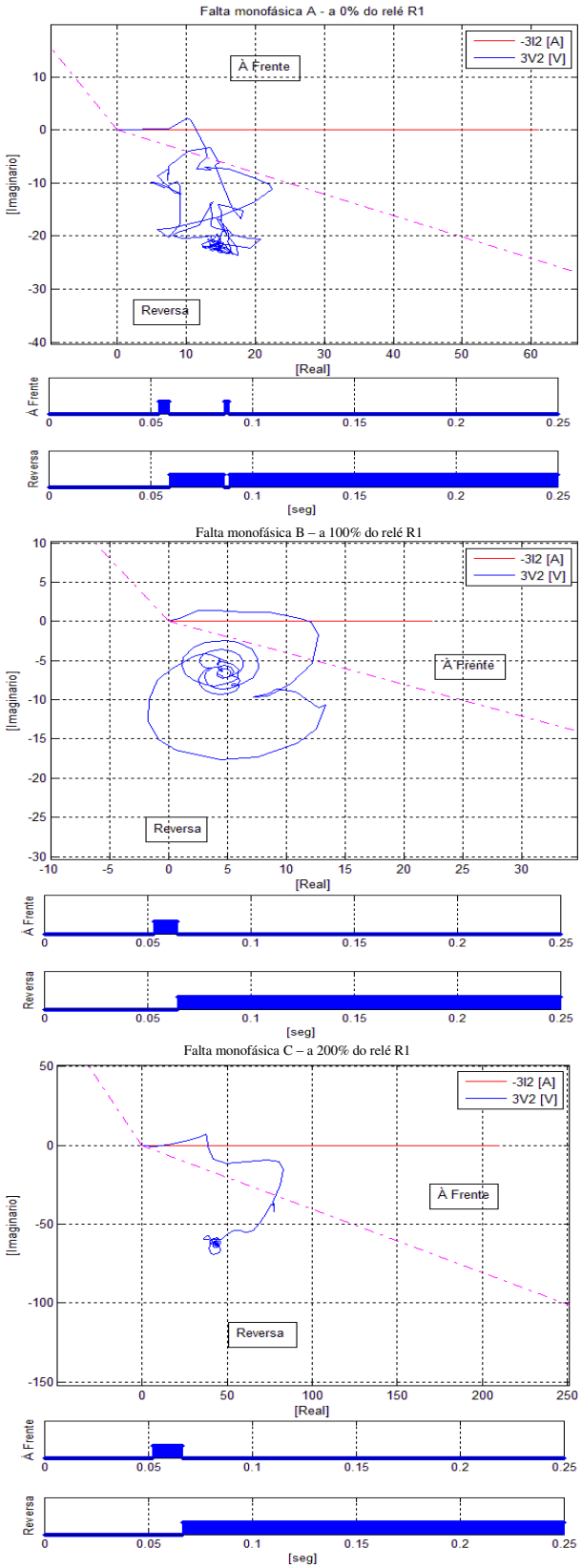


Figura 4.98 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R5 e sem compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

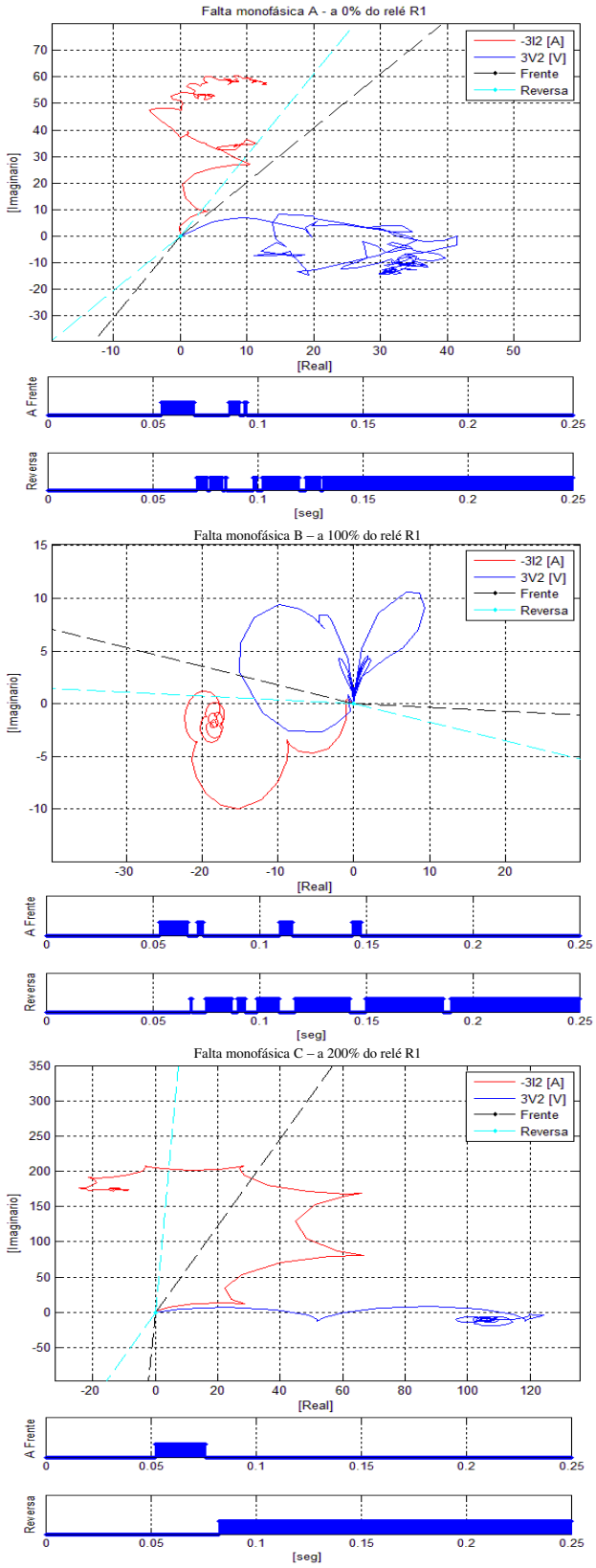


Figura 4.99 –Polarização por tensão de sequência negativa, vista pelo relé R5 e sem compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

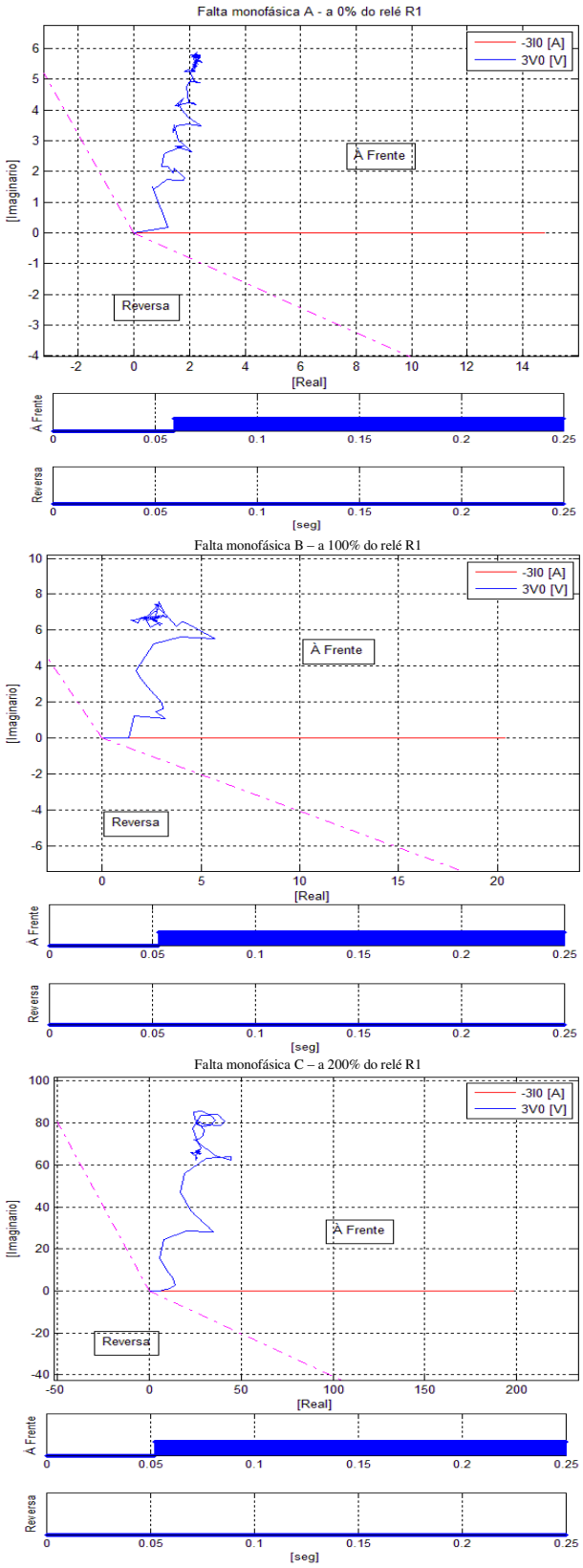


Figura 4.100 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R6, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

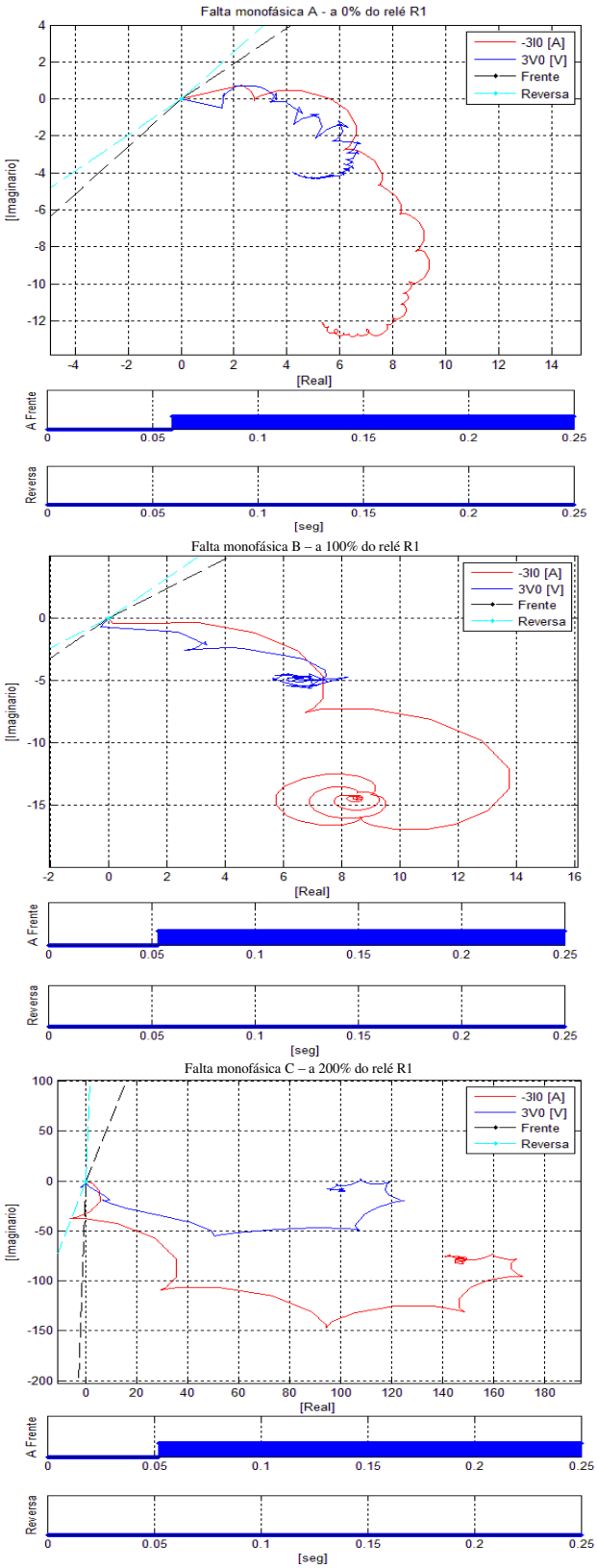


Figura 4.101 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R6, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

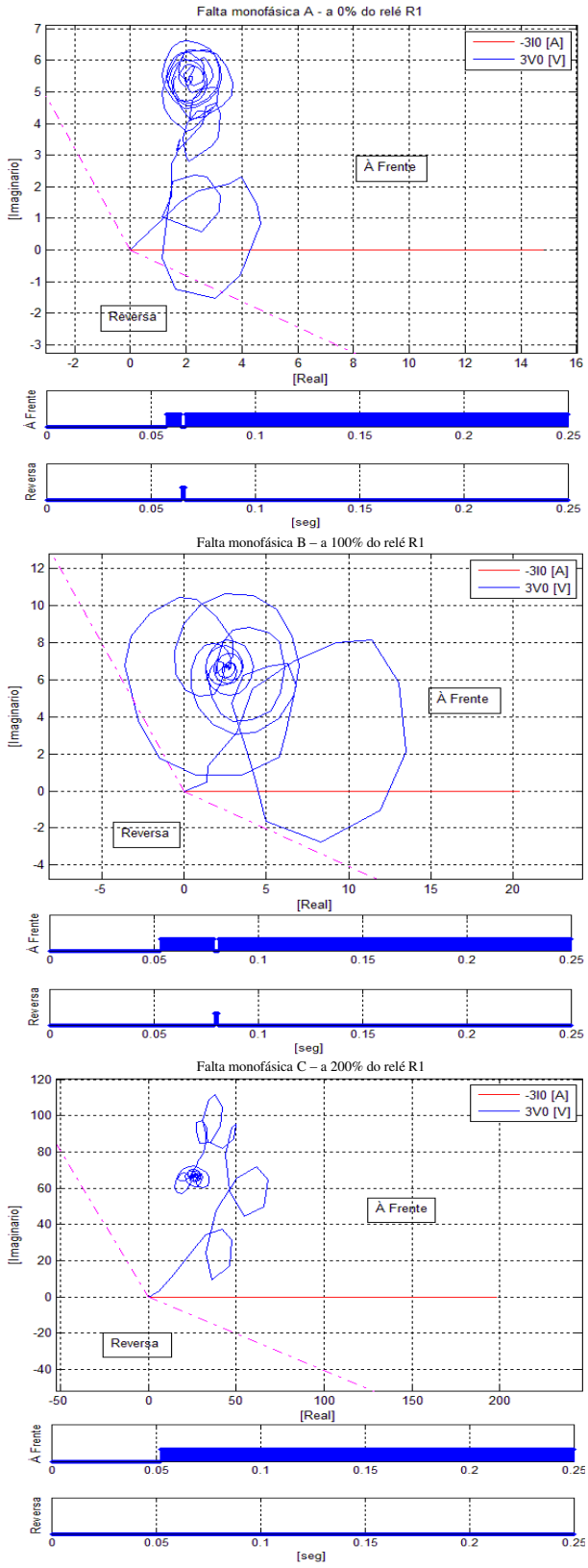


Figura 4.102 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R5 e com compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

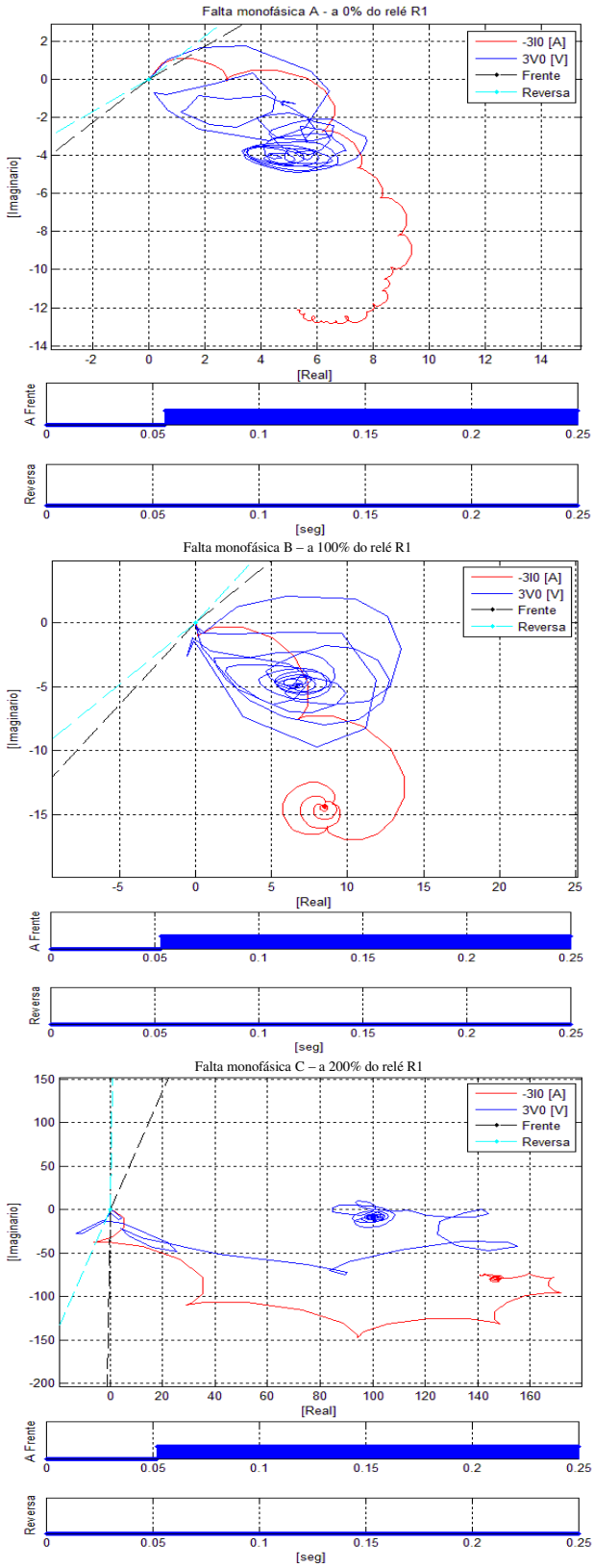


Figura 4.103 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R5 e com compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

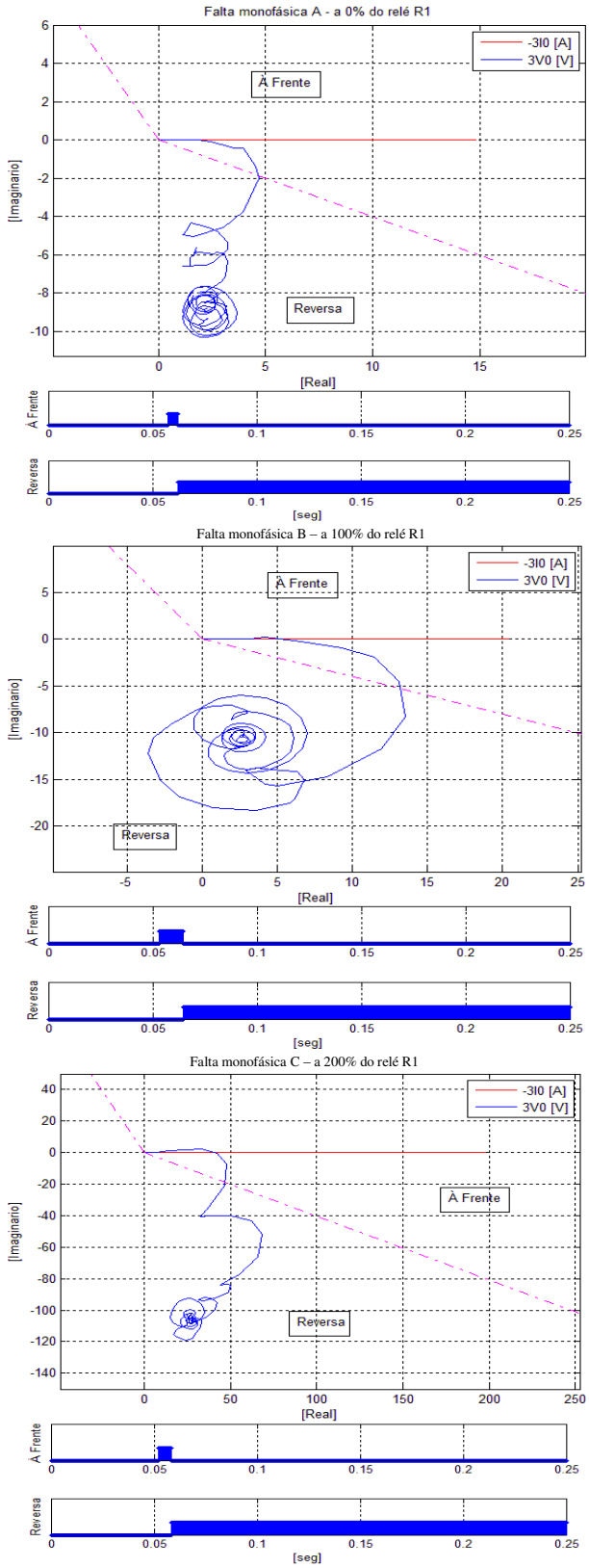


Figura 4.104 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R5 e sem compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

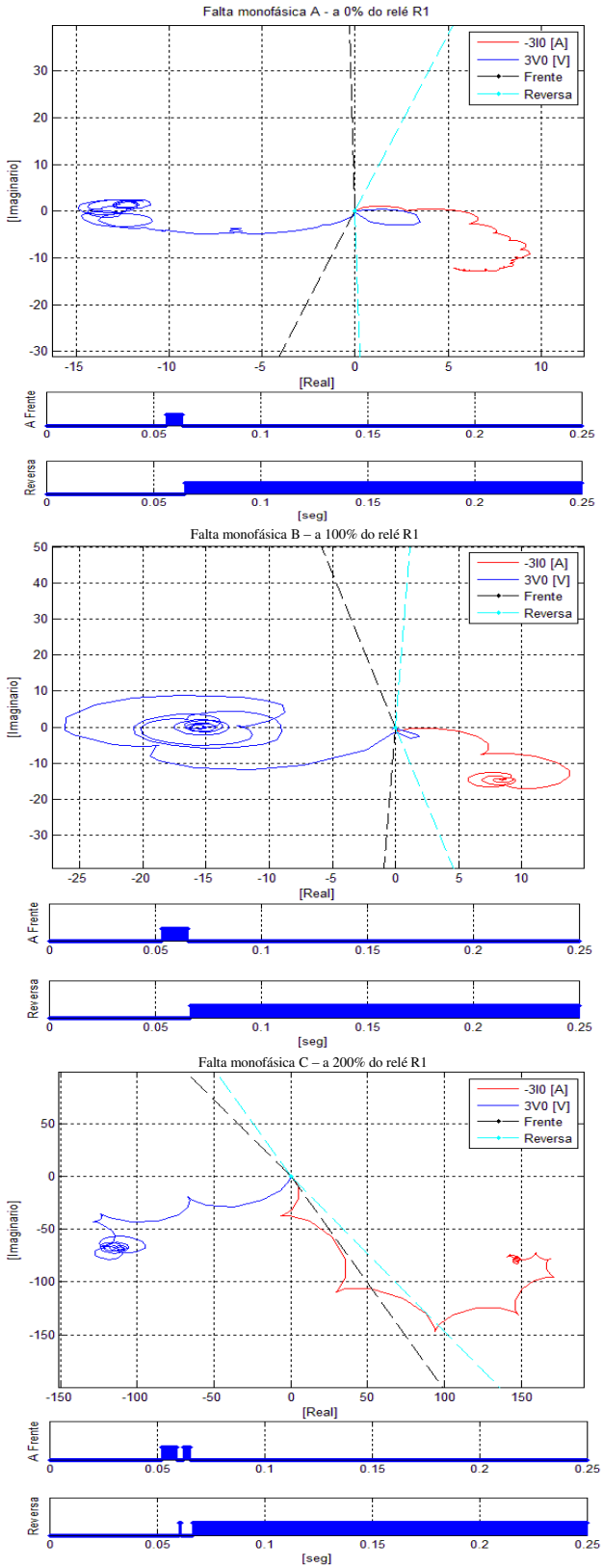


Figura 4.105 –Polarização por tensão de sequência zero vista pelo relé R5 e sem compensação do capacitor, para as faltas monofásicas na LT e sem equipamento PR.

4.2.2.2 Falta monofásica na linha de transmissão com equipamento para-raios de ZnO (PR) do capacitor série

Neste caso a linha opera com compensação em série que tem associado um para-raios do tipo ZnO (em inglês MOV - Metal oxide Varistor) e hastes centelhadoras (em inglês gap), como se mostra na figura 4.106. O PR deve conduzir para falta internas (faltas na linha de transmissão) e quando a tensão nos terminais do PR atinge o valor limite para as elevadas correntes que circulam pela linha durante a falta, protegendo desta forma os capacitores contra sobretensões. O Gap protege o conjunto de capacitor mais PR, caso os limites de corrente ou energia dos PR sejam superados pelo ajuste e, assim, o conjunto (Capacitor + PR) é curto-circuitado pela ação do Gap e posterior fechamento do disjuntor [28] [29] [30] [31] [32].

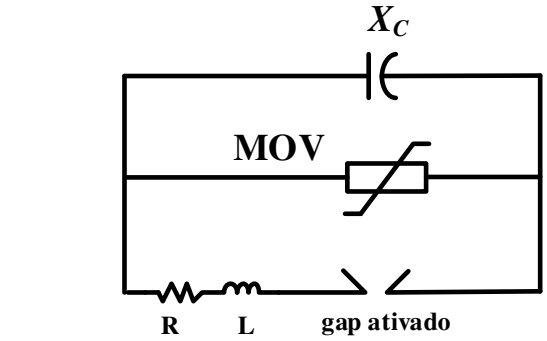


Figura 4.106 –Esquema de banco capacitor em série com PR (Metal oxide Varistor).

Foram analisadas as mesmas faltas monofásicas na linha do caso sem o equipamento PR. Das simulações feitas se têm que só para a falta F1 o PR conduz, como se mostra nas figuras 4.107, 4.109 e 4.111 já que nesse ponto se tem máxima corrente de curto-circuito. O Gap opera para a falta F1, devido ao excesso de energia acumulada de 60 MJ, como se mostra na figura 4.113. Nas figuras 4.108, 4.110 e 4.112 se apresentam as tensões nos terminais do capacitor, onde se pode observar que para a falta F1 ocorre sobretensão da fase A e que é limitado pelo PR que tem um ajuste de 143 kV rms.

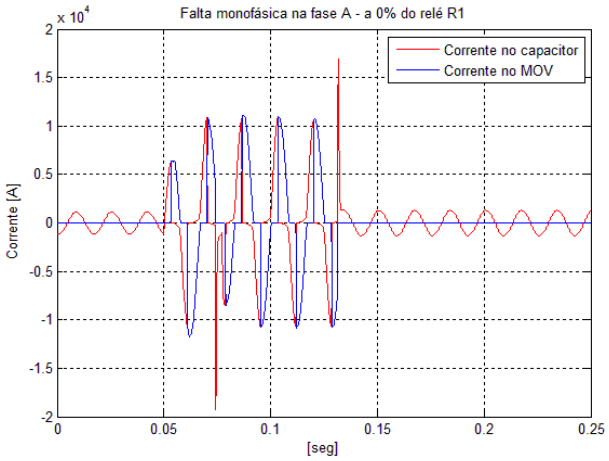


Figura 4.107 –Corrente no capacitor e corrente no PR, para a falta monofásica a 0% distância do relé R1.

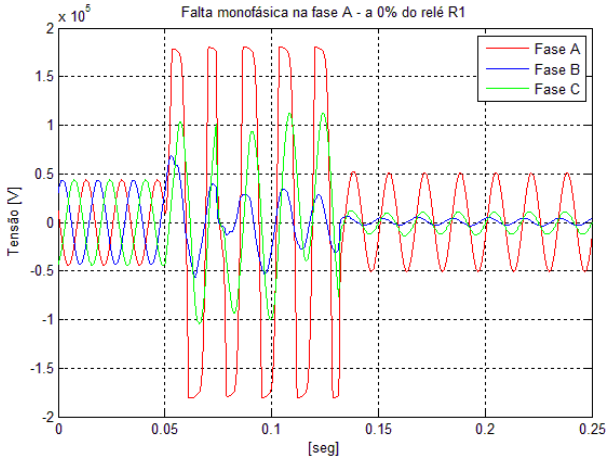


Figura 4.108 –Tensões no capacitor, para a falta monofásica a 0% distância do relé R1.

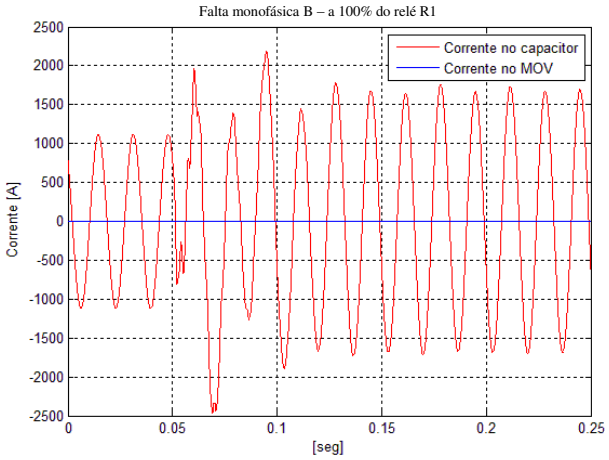


Figura 4.109 –Corrente no capacitor e corrente no PR, para a falta monofásica a 100% distância do relé R1.

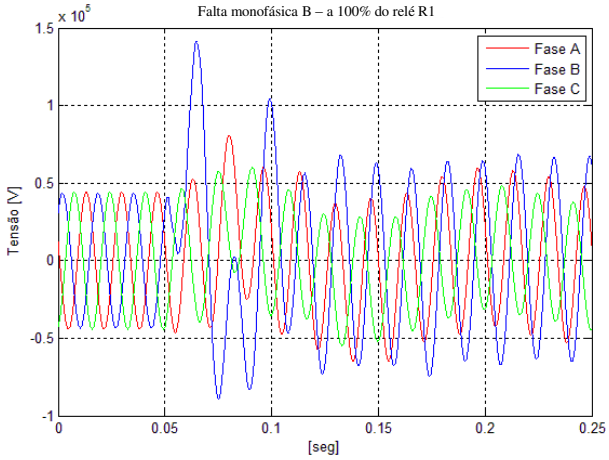


Figura 4.110 –Tensões no capacitor, para a falta monofásica a 100% distância do relé R1.

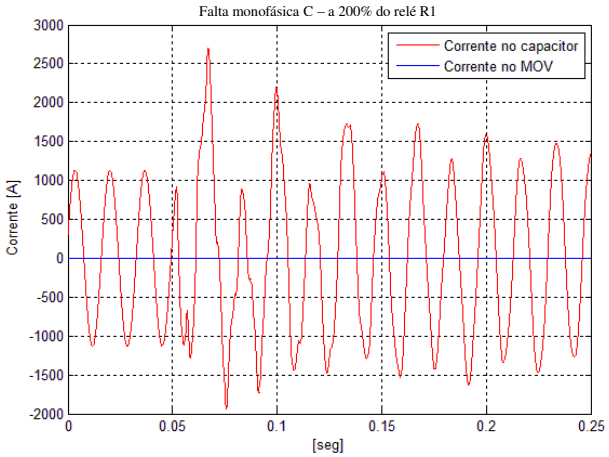


Figura 4.111 –Corrente no capacitor e corrente no PR, para a falta monofásica a 200% distância do relé R1.

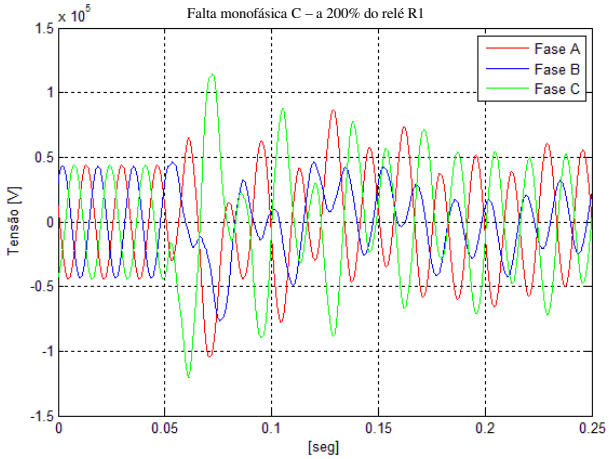


Figura 4.112 –Tensões no capacitor, para a falta monofásica a 200% distância do relé R1.

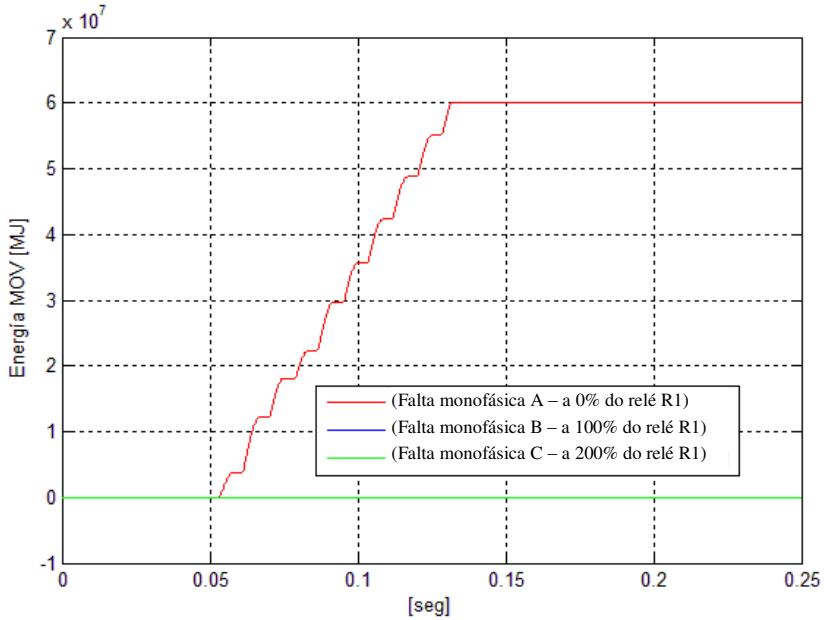


Figura 4.113 –Energia no PR, para as faltas monofásicas na linha de transmissão.

Comparando as impedâncias calculadas pelos relés R1 e R2 das simulações da seção 4.2.2.1 (figuras 4.68 e 4.69) e desta seção (figuras 4.114 e 4.115), se verifica que as impedâncias de sequência negativa (*Z2*) calculadas pelo relé R2 para o caso de falta monofásica F1 (0% de distância do relé R1) são diferentes. Isso ocorre porque o PR e o Gap operam somente para essa falta. Como o Gap opera curto-circuitando o conjunto (capacitor mais PR), o sistema ficará sem o capacitor série e o relé R2 calculará a mesma impedância do relé R1, que é a impedância da rede equivalente (Z_{2S}) atrás dele, como se mostra na figura 4.115.

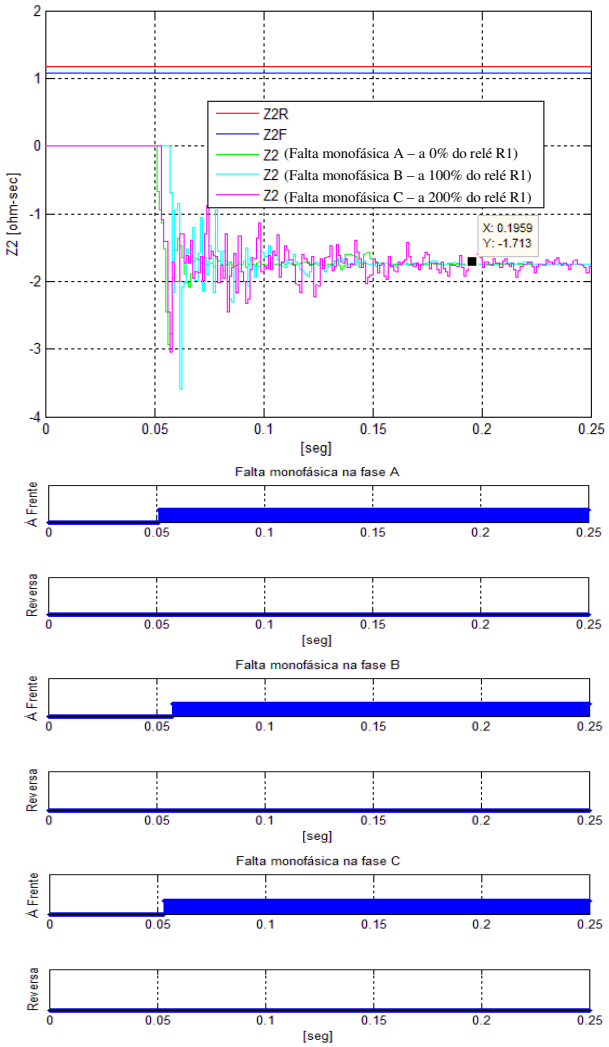


Figura 4.114 –Impedância de sequência negativa, vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na linha com equipamento PR.

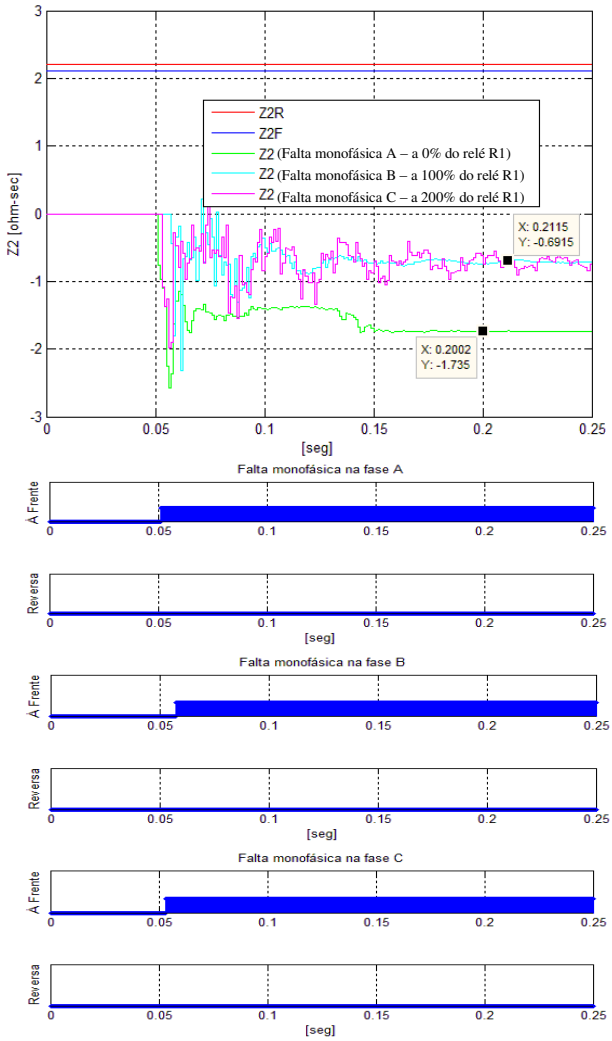


Figura 4.115 –Impedância de sequência negativa, vista pelo relé R2, para as faltas monofásicas na linha com equipamento PR.

Comparando as simulações da seção 4.2.2.1 (figuras 4.70, 4.71, 4.72, 4.73, 4.76, 4.77, 4.78 e 4.79) e desta seção (figuras 4.116, 4.117, 4.118, 4.119, 4.120, 4.121, 4.122 e 4.123), que são do relé direcional com polarização por tensão e polarização por corrente verifica-se que as correntes e tensões de sequência negativa e sequência zero são menores do que o caso da falta monofásica F1 (0% de distância do relé R1). Isso ocorre porque o PR e o Gap operam somente para essa falta. Para o relé R2 se implementou a compensação do capacitor e se pode observar que o relé R2 opera corretamente para todos os casos.

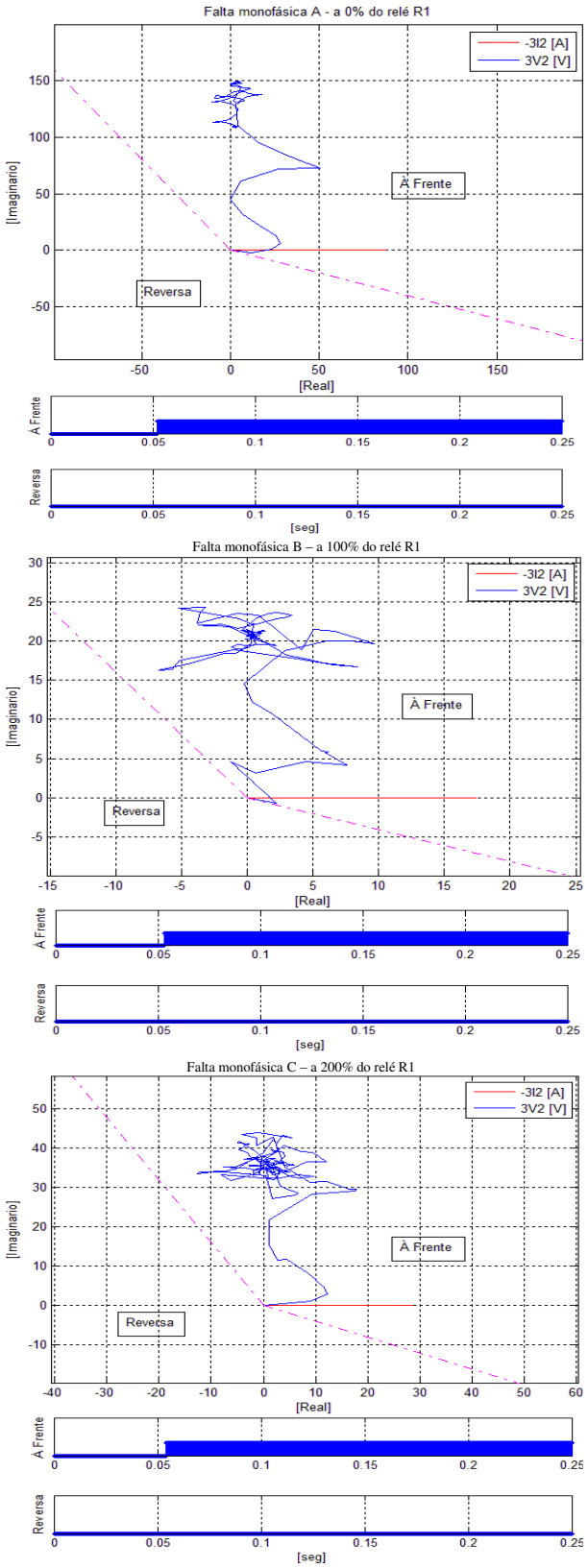


Figura 4.116 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na linha com equipamento PR.

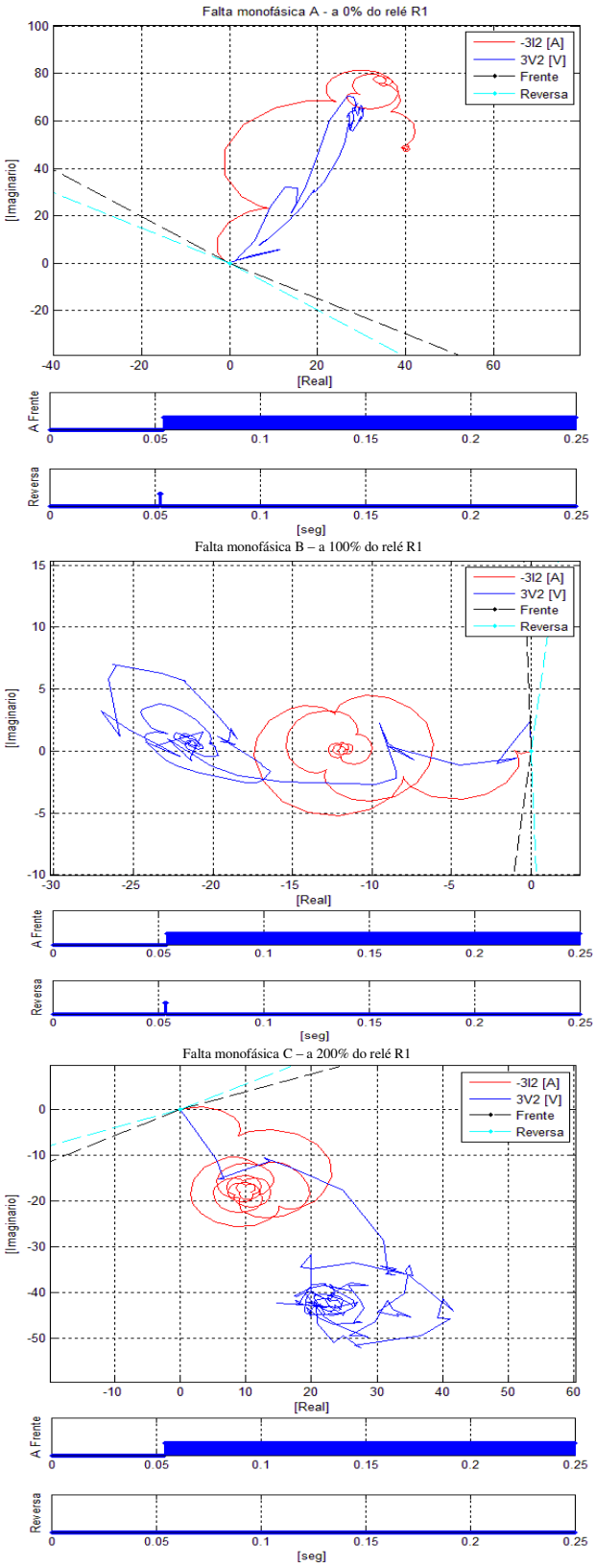


Figura 4.117 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na linha com equipamento PR.

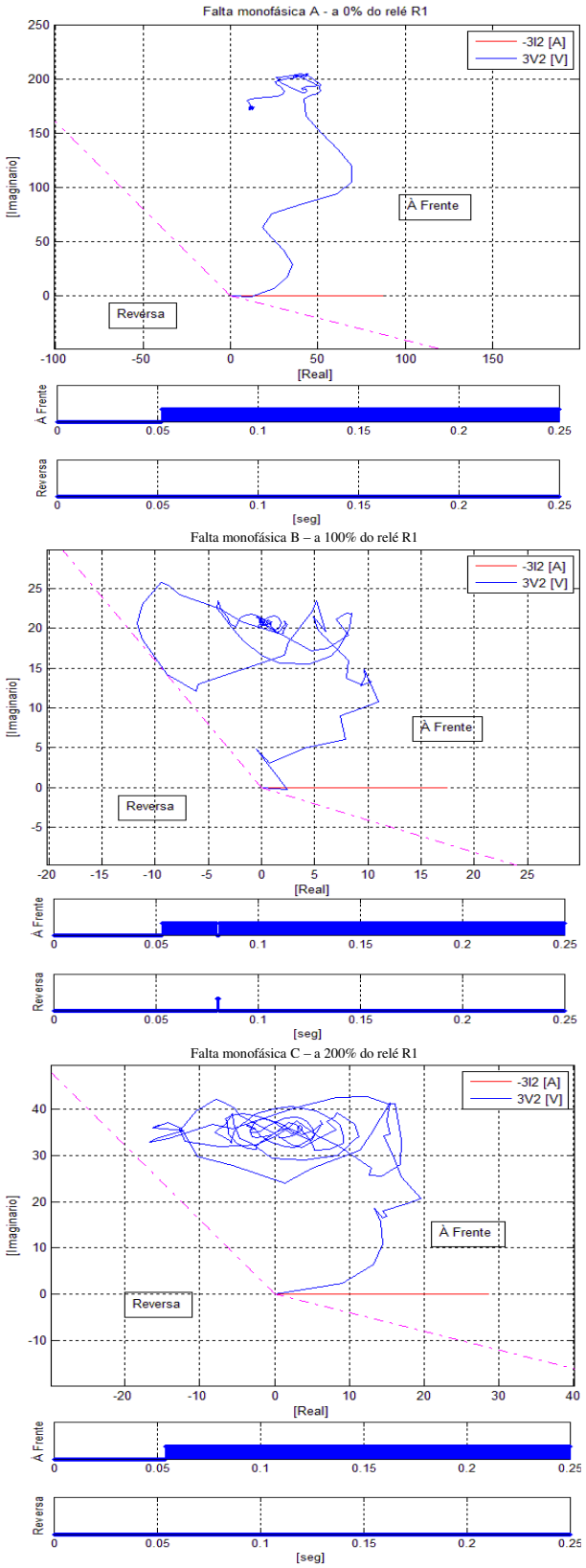


Figura 4.118 –Polarização por corrente de sequência negativa vista pelo relé R2, para as faltas monofásicas na linha com equipamento PR.

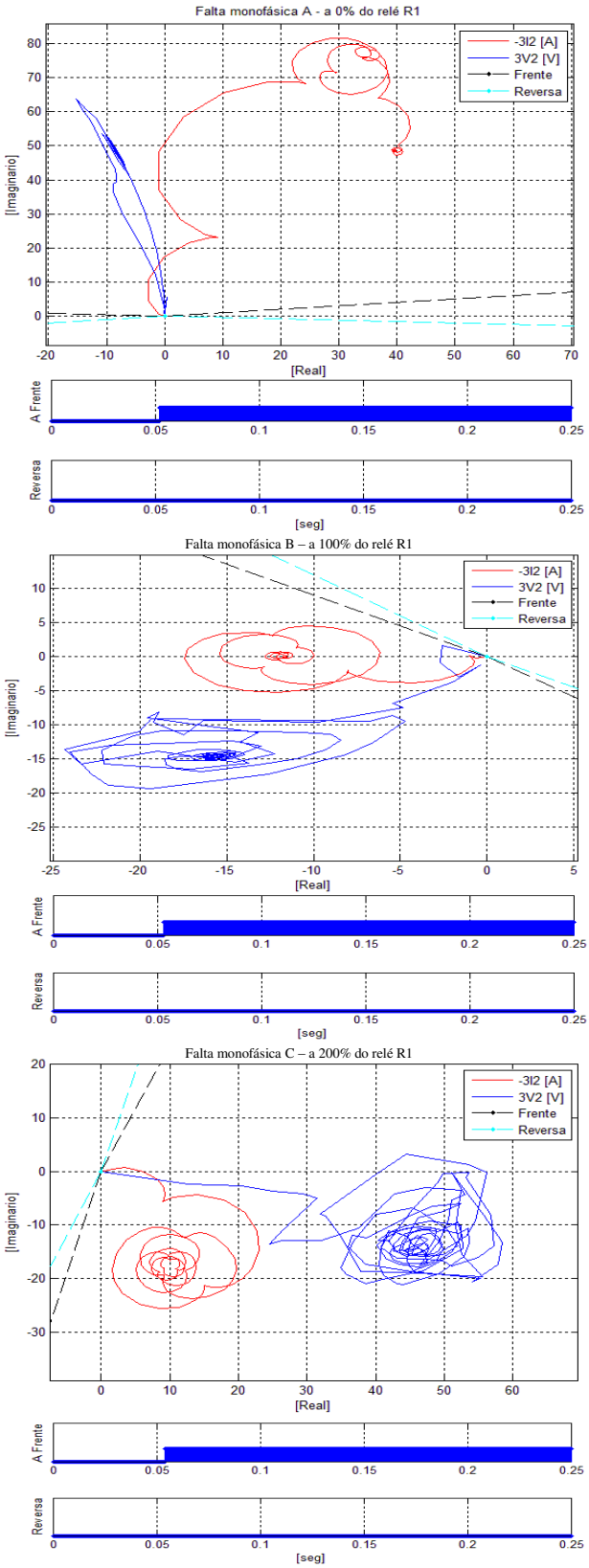


Figura 4.119 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R2, para as faltas monofásicas na linha com equipamento PR.

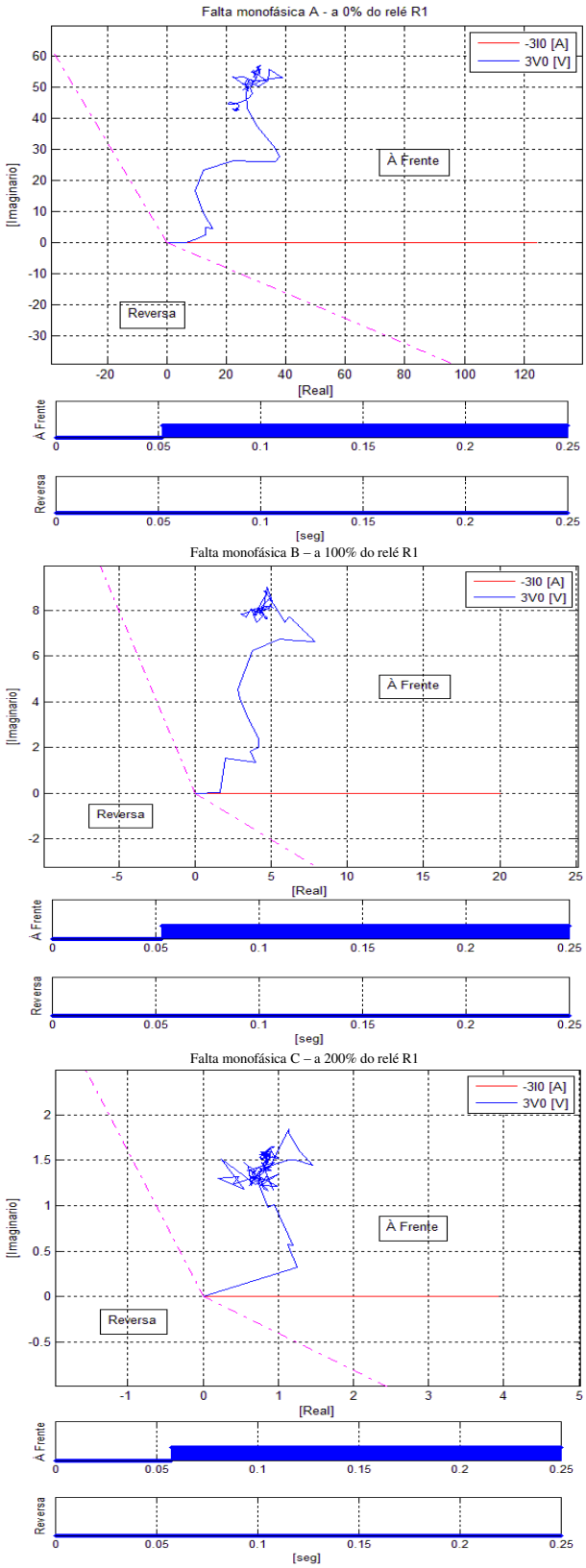


Figura 4.120 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na linha com equipamento PR.

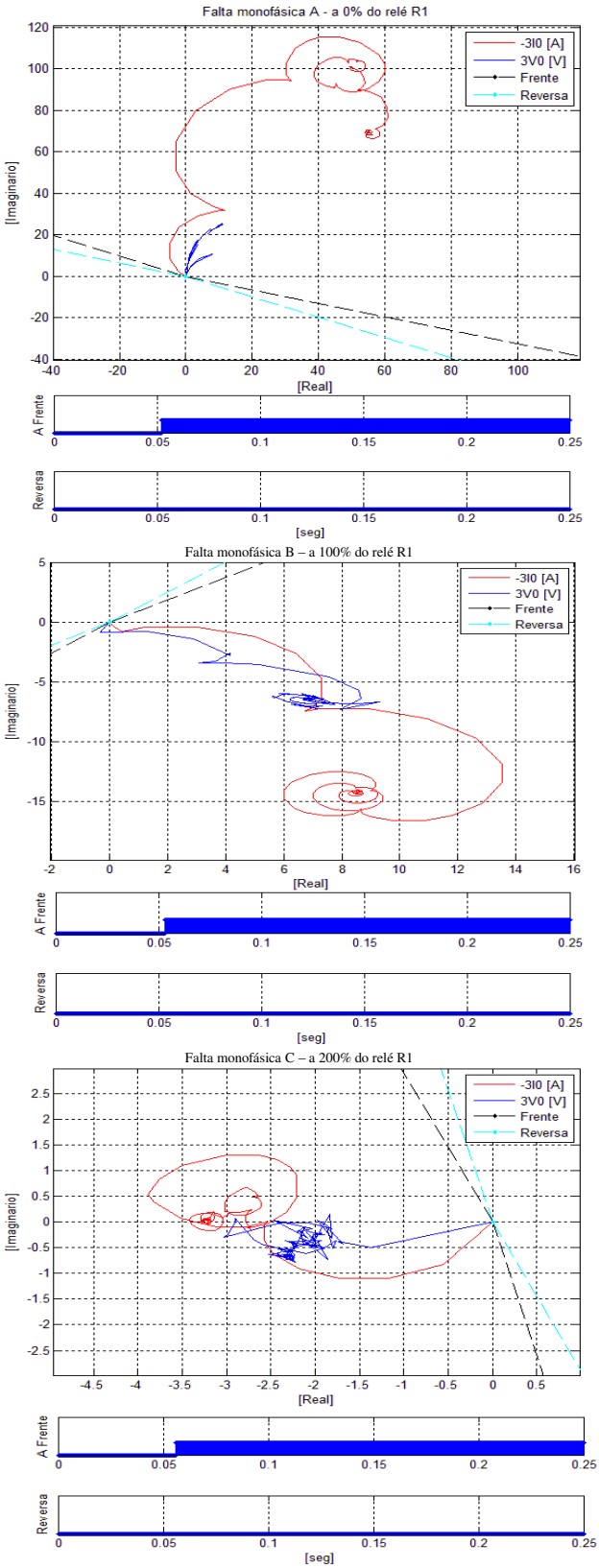


Figura 4.121 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R1, para as faltas monofásicas na linha com equipamento PR.

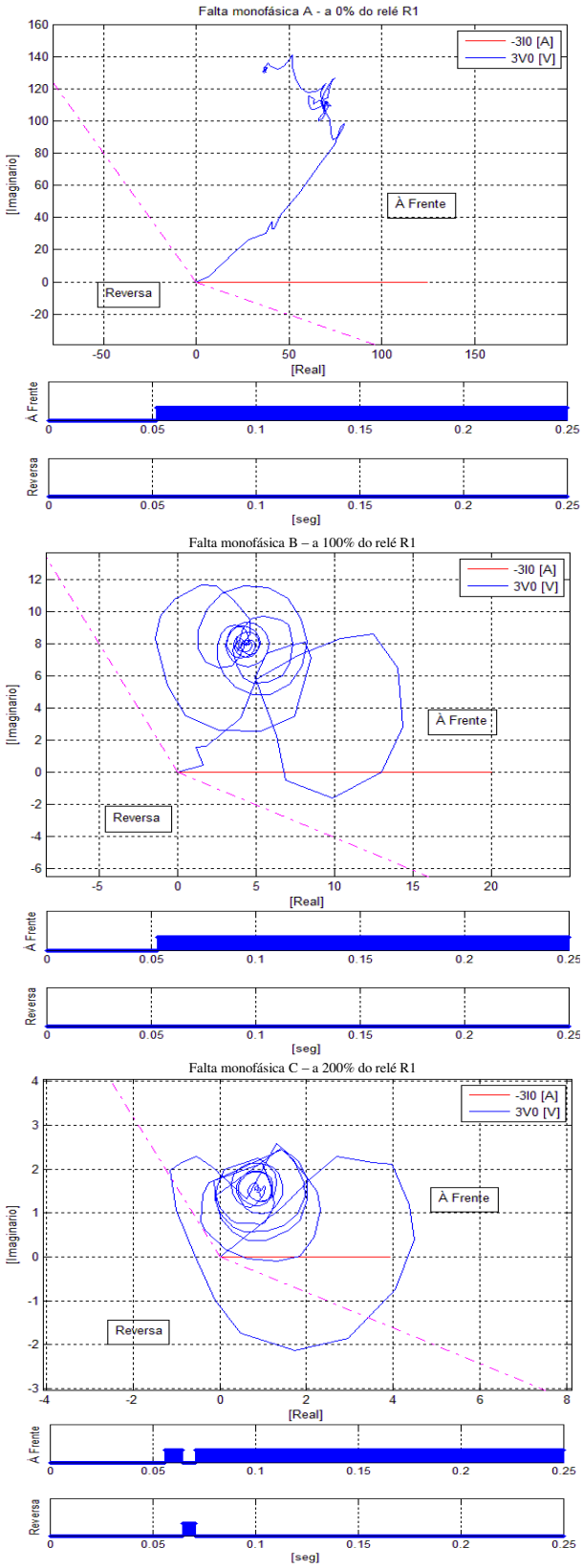


Figura 4.122 –Polarização por corrente de sequência zero vista pelo relé R2, para as faltas monofásicas na linha com equipamento PR.

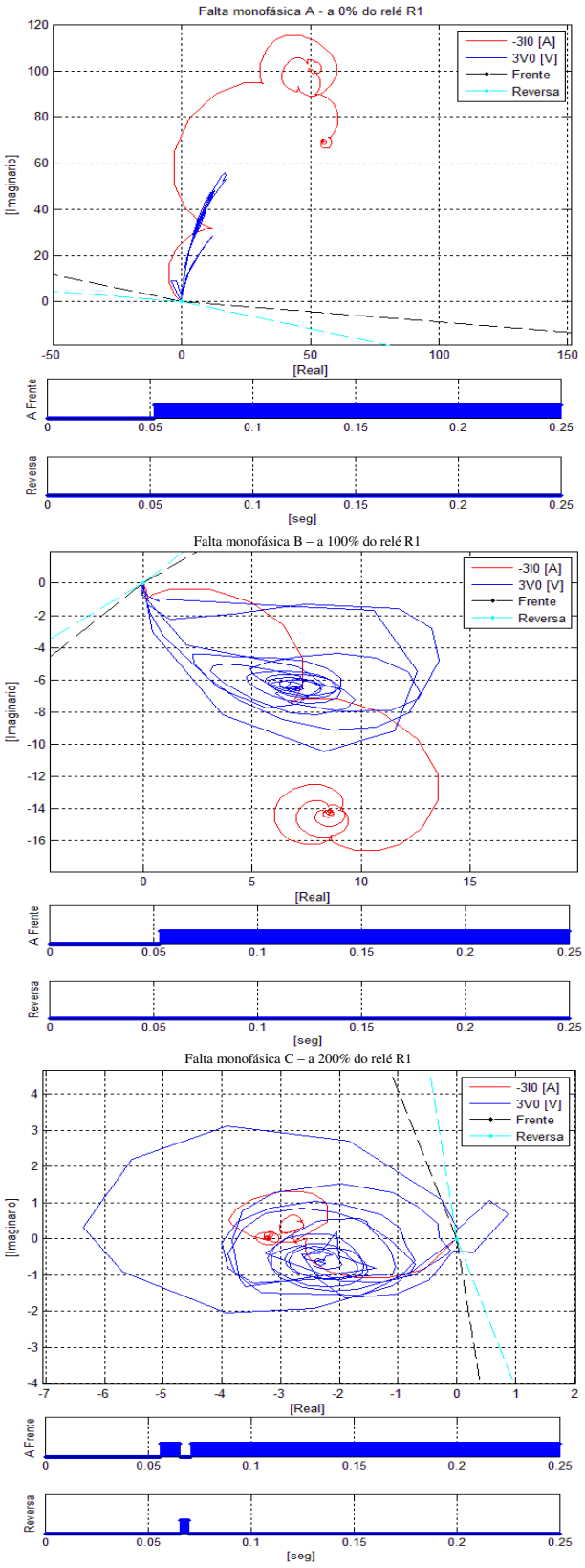


Figura 4.123 –Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R2, para as faltas monofásicas na linha com equipamento PR.

4.2.2.3 Saturação do transformador de corrente.

Para os casos de faltas simulados anteriormente o TC não satura porque a tensão de saturação do TC foi considerada igual a 1000 V. Para analisar o efeito da saturação do TC se reduziu a tensão de saturação para 300 V e 100 V, e para analisar o efeito da carga (*Rb*) do TC se consideraram dois valores de resistências: 2 Ω e 10 Ω.

Na figura 4.124 se apresentam as impedâncias de sequência negativa (*Z2*) calculadas pelo relé R1 com e sem saturação do TC. Pode-se observar que abaixando a tensão de saturação (*Vs*) do TC o módulo da impedância (|*Z2*|) aumenta. A redução da tensão de saturação do TC provoca a diminuição da sua corrente. Com o aumento da carga (*Rb*) se observará uma maior distorção da corrente do TC, assim como da impedância *Z2*, o que acaba resultando na operação incorreta do relé direcional 32Q.

Nas figuras 4.125 e 4.126 se apresentam o modo de operação da proteção direcional com polarização por tensão de sequência negativa para o relé R1 com e sem saturação do TC. Pode-se observar que abaixando a tensão de saturação (*Vs*) do TC a corrente de sequência negativa (-3I2) diminui e gira no sentido anti-horário. Quanto maior a carga (Rb) maior será a distorção da corrente (-3I2), podendo entrar na operação da zona reversa. Desta forma o relé R1 operaria incorretamente. Outro fator a considerar é o ângulo de torque (***AngV***) que se aplica ao relé direcional com polarização por tensão, como se pode observar nas figuras 4.99 e 4.100, onde com o ajuste de ângulo de torque igual a -85° o relé R1 operaria incorretamente.

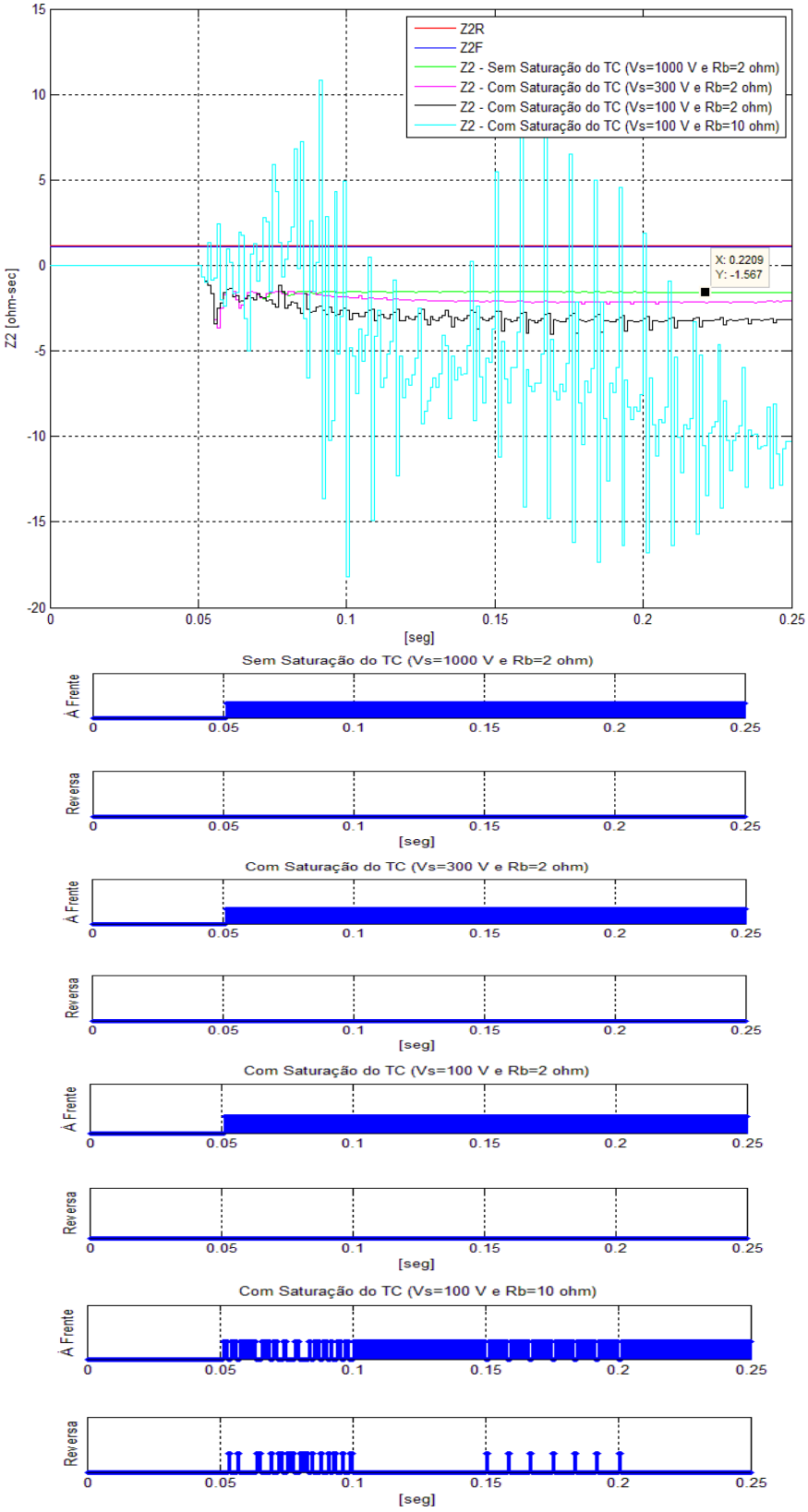


Figura 4.124 –Impedância de sequência negativa calculada pelo relé R1.

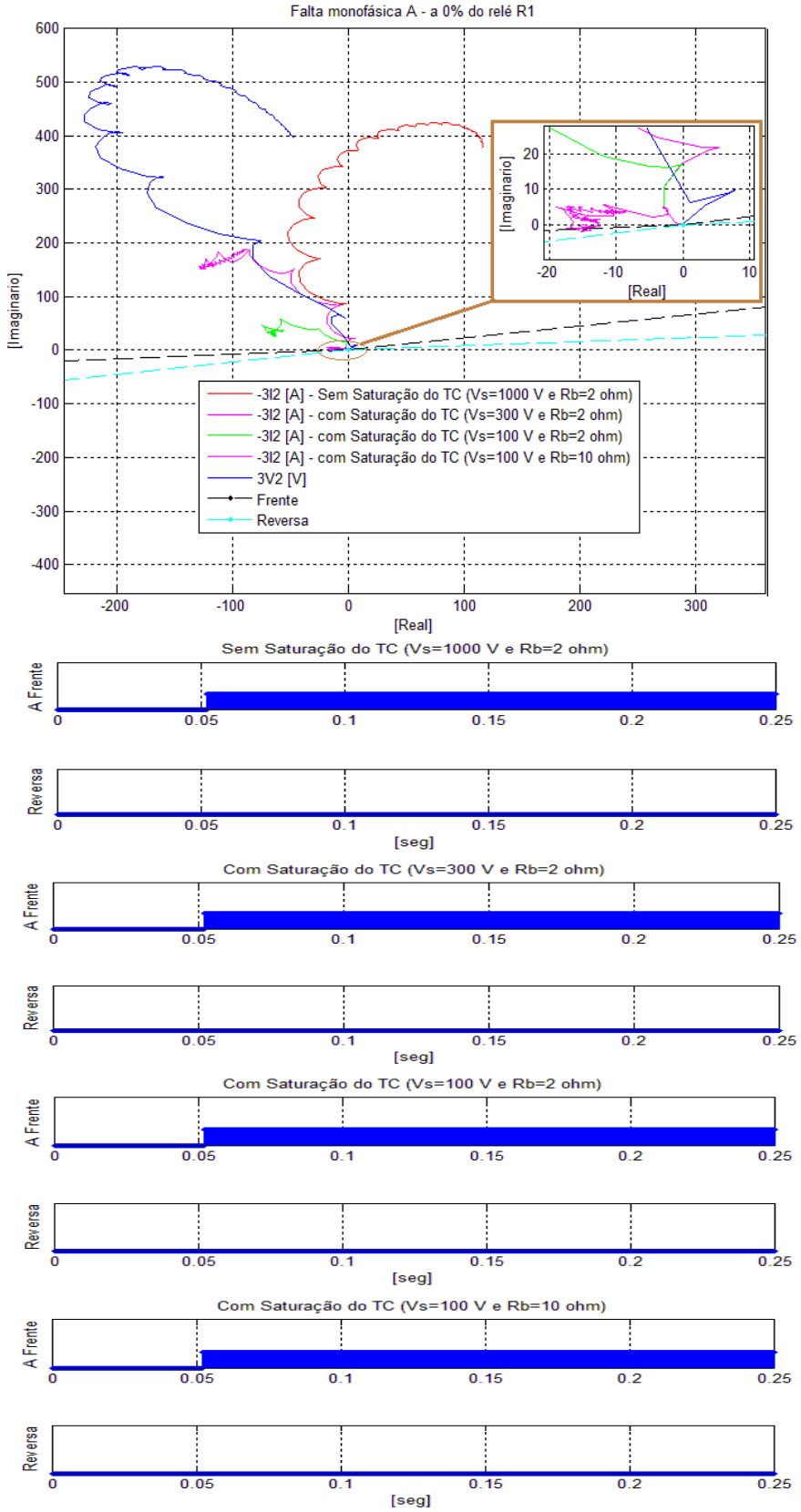


Figura 4.125 – Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R1 para ângulo (***AngV***) igual a -65°.

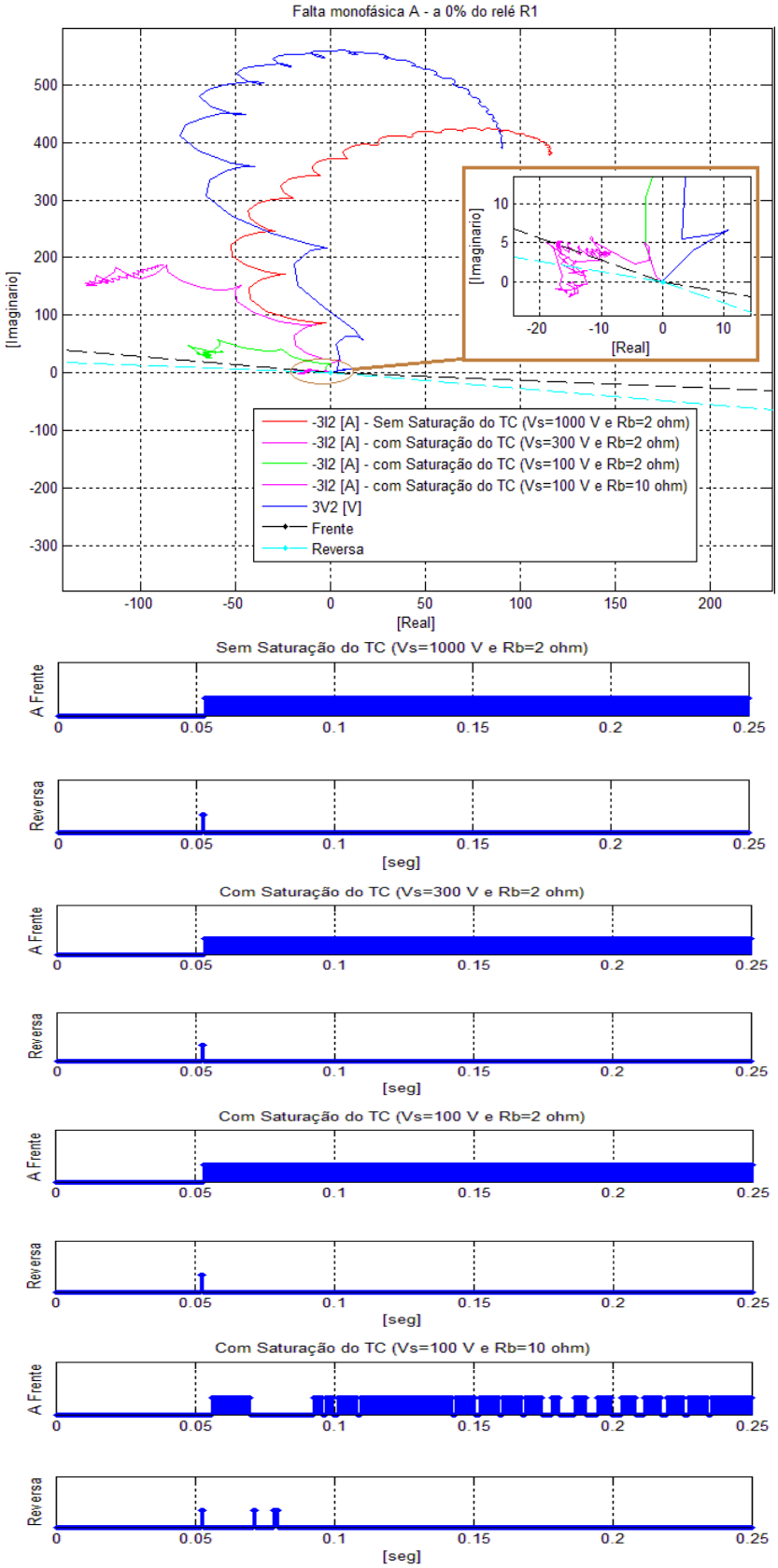


Figura 4.126 – Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R1 para ângulo (***AngV***) igual a -85°.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Nesta pesquisa foi apresentada uma revisão dos métodos de polarização que existem em dois relés direcionais comerciais, onde o primeiro opera com sinais de corrente e tensão e o outro com medidas de impedância, sendo que ambos com componentes de sequência negativa e sequência zero.

O relé foi modelado considerando seus módulos de condicionamento de sinais, aquisição de dados e algoritmo. Inicialmente foi implementado o modelo matemático que representa o transformador de corrente. Em seguida foram implementados os modelos que representam o funcionamento do interno do relé, que são o processo de filtragem analógica anti-aliasing, sample and hold, conversor A/D, buffer, a estimação de fasor e a lógica da proteção direcional.

O relé direcional foi modelado na linguagem MODELS do ATP, sendo esta uma contribuição importante da pesquisa. Foram simulados alguns casos de faltas monofásica, bifásica e bifásica a terra tanto interna quanto externa à zona de proteção. Os testes foram realizados em dois sistemas de potência, um formado por uma linha longa de 300 km e outro formado por uma linha de 600 km com compensação série. Os resultados mostraram a atuação dos três métodos de polarização modelados, indicando a direcionalidade da falta.

Para faltas monofásicas ao longo da linha de transmissão, nem sempre a corrente de sequência zero é maior do que a corrente de sequência negativa, ocorrendo o mesmo para as tensões de sequências; e estes cálculos dependem das impedâncias de sequências da rede elétrica. É por isso que alguns relés comercias têm a opção de utilizar ambas sequências.

Para identificar qual das sequências (sequência negativa ou sequência zero) se deve utilizar é preciso fazer uma análise das impedâncias equivalentes da rede elétrica e, assim, garantir que se tem suficiente tensão e corrente para que o relé direcional possa operar.

Para o método de polarização por tensão se precisa do ajuste de ângulo de torque e para isso se deve fazer a análise do ângulo da rede equivalente atrás do relé, para todas as configurações de operação da rede elétrica. Com um mal ajuste deste ângulo de torque o relé direcional pode operar incorretamente.

Para os métodos de polarização por tensão e polarização por corrente para linhas com capacitores em série se implementou um método de compensação de tensão capacitiva,

melhorando a segurança da proteção direcional, principalmente quando o transformador de tensão se encontra depois do capacitor (lado da linha).

Das simulações feitas pode-se afirmar que:

As simulações para a linha de 300 km:

- Para o relé direcional com método de impedância se observa que para faltas desequilibradas (monofásica, bifásica e bifásica a terra) na linha e em qualquer ponto da linha o relé sempre calcula a impedância da rede equivalente atrás dele e de sinal negativo.
- Para o relé direcional com método de impedância se observou que este opera corretamente para todos os casos de faltas desequilibradas analisadas, tanto para faltas na linha como para faltas atrás do relé.
- Os relés direcionais com os métodos de polarização por tensão e polarização por corrente operam corretamente para todos os casos de faltas desequilibradas analisadas, tanto para faltas na linha e faltas atrás do relé.

As simulações para a linha de 600 km:

- Observa-se que o relé direcional com método de impedâncias opera corretamente para todos os casos de faltas, mas as impedâncias calculadas pelos relés convergem em mais tempo do que o caso da rede sem capacitor série. Isso ocorre porque o capacitor série provoca oscilações no cálculo dos fasores que o relé não filtra por serem menores do que a frequência de corte do filtro analógico.
- Para o relé R2 (TP localizado depois do capacitor série - lado linha) haverá inversão da tensão de sequência zero para as faltas F2 e F3, e só haverá inversão da corrente de sequência zero para a falta F1. Nestes casos o relé R2 opera incorretamente porque só um sinal se inverteu (tensão ou corrente). Para o relé direcional R2 e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão são necessários implementar os ajustes da compensação do capacitor em série de modo a evitar a operação indevida por conta destas inversões.
- Para o relé R5 (TP localizado antes do capacitor série - lado linha) haverá inversão da tensão de sequência zero e sequência negativa para as faltas F1 e F2, e só haverá inversão da corrente de sequência zero e sequência negativa para a falta F3. Nestes casos o relé R5 opera incorretamente, pois somente um dos sinais se inverteu (tensão ou corrente). Para o relé direcional R5 e com os métodos de polarização por corrente e polarização por tensão são necessários

implementar os ajustes da compensação do capacitor em série de modo a evitar a operação indevida causadas por estas inversões.

- Os relés direcionais podem operar incorretamente se a carga do TC for elevada e se o joelho da curva de saturação for baixo. A saturação do TC prejudica a operação dos relés direcionais, seja o que opera por tensão/corrente ou o que opera por impedância.

Pode-se afirmar para as linhas com o capacitor série que:

- Em linhas longas com capacitor série os sinais dos relés direcionais demoram a estabilizar em função da pequena oscilação nos fasores.
- O relé com o método de impedância pode ser posicionado em qualquer lugar (barramento ou linha).
- No caso do relé polarizado por tensão ou corrente o TP não deve ser localizado no lado linha, mas tão somente no lado barramento, para evitar a atuação incorreta em função da inversão de uma das grandezas (tensão ou corrente) quando o ajuste da compensação não é efetuado. Com a correção da compensação o relé opera corretamente.

Como propostas para trabalhos futuros, sugere-se:

- Fazer modelamento do transformador de tensão capacitivo, e assim analisar as sobretensões transitórias que podem aparecer no secundário do transformador de tensão e como isto afeta a proteção direcional.
- Analisar a proteção direcional em linhas de transmissão longas (um pouco mais de meio comprimento de onda).
- Avaliar a influência do acoplamento magnético em linhas de circuito duplo sobre a proteção direcional.
- Analisar a influência do desequilíbrio das linhas de transmissão não transpostas ou parcialmente transpostas que geram componentes de sequência zero e negativa

REFERÊNCIAS

[1] Aguilar J., Member, IEEE. **Modelado y Simulación de Transformadores de Corriente con el Programa EMTP/ATP**. 5p.

[2] A. Mechraoui, A. Draou, A. Akkouche, and S. AL Ahmadi. **Current Transformer Performance Study Using Software Tools**. Department of Electronics Technology Madinah College of Technology, Madinah Council of Technical Education and Vocational Training, Saudi Arabia.

[3] Folkers R., Schweitzer, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. **Determine Current Transformer Suitability Using EMTP Models,** 26th Annual Wester Protective Relay Conference, Spokane, Washington, October 26-28, 1999**,** 47p.

[4] Glenn Swift, **Theory for CT SAT Calculator (PSRC)**, IEEE PSRC, C37.110 IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes, pp. 9, June. 2001.

[5] X. Luo e M. Kezunovic. **Interactive Protection System Simulation Using ATP MODELS and C++**. 2005/2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas, may 21-24, 2016.

[6] A. Abdlrahem, H. Sherwali. **Modelling of Numerical Distance Relays Using Matlab**. IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA 2009), October 4-6, 2009, Kuala Lumpur, Malaysia.

[7] E. C. Molas e K. M. Silva. **Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Linhas de Transmissão no ATP**. IV SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Brasil, Goiânia, Goiás, 15 a 18 de maio 2012.

[8] Chul-Hwan Kim, Myung-Hee Lee, Raj K. Aggarwal, and Allan T. Johns. **Educational Use of EMTP MODELS for the Study of a Distance Relaying Algorithm for Protecting Transmission Lines**. IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 15. No. I, February 2000. Pages 9-15.

[9] Walter A. Elmore. ABB - **Protective Relaying Theory and Applications**. 432p livro, Second Edition (September 9, 2003), Revised and Expanded.

[10] Juan M. Gers and Edward J. Holmes. **Protection of Electricity Distribution Networks**. 2nd Edition 357p. livro.

[11] J. L. Blackburn. **Protective Relaying Principles and Applications**. 3ª. ed. Nova York, 2006. 647p livro.

[12] P. M. ANDERSON. **Power System Protection.** Piscataway, New Jersey, EUA: John Wiley & Sons, Inc., 1999. Livro.

[13] Héctor J. Altuve, Joseph B. Mooney, and George E. Alexander, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. **Advances in Series-Compensated Line Protection**. 13p Disponível em: < https://www.selinc.com/literature/TechnicalPapers/.

[14] Stanley E. Zocholl, E.O. Schweitzer, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. **Introduction to symmetrical components**. 15p Disponível em: < https://www.selinc.com/literature/ TechnicalPapers/.

[15] SIEMENS. Manual SIPROTEC 5 – **Overcurrent Protection 7SJ82/7SJ85. V6.00**. 1374p. Disponível em: <http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/Protection/Pages/overview.aspx

[16] SIEMENS. Manual SIPROTEC 5 – **Distance Protection, Line Differential Protection, and Breaker Management for 1-Pole and 3-Pole Tripping 7SA87, 7SD87, 7SL87, 7VK87. V6.00**. 1580p Disponível em: < http://w3.siemens.com/smartgrid/global/ en/products-systems-solutions/Protection/Pages/overview.aspx

[17] SEL-421-4, -5 **Relay Protection and Automation System – Instruction Manual – Applications Handbook**. 422p. Disponível em: < https://www.selinc.com/SEL-421/#st_applications.

[18] Altuve, H. J. and Schweitzer E. **Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems**. 2014. 397p livro.

[19] Fleming B. Schweitzer, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. **Negative-Sequence Impedance Directional Element**. 1998. 12p Disponível em: < https://www.selinc.com/literature/ TechnicalPapers/.

[20] Roberts J. and Guzman A. Schweitzer, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. **Directional Design and Evaluation**, 21st Annual Western Protective Relay Conference, Spokame, WA, October 1994. Disponível em: < https://www.selinc.com/literature/TechnicalPapers/.

[21] Calero F. Schweitzer, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. **Rebirth of negative-sequence quantities in protective relaying with microprocessor-based relays**. 30p. Disponível em: < https://www.selinc.com/literature/TechnicalPapers/.

[22] A. Guzman, J. Roberts, D. Hou. Schweitzer, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. **New ground directional elements operate reliably for changing system conditions**. 20p. April 30 – May 2, 1997. 51st Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference Atlanta, Georgia.

[23] L. Dube. **User Guide to Models in ATP**. USA, Abr. 1996.

[24] D. Vinicius, M. Oleskovicz, R. Giovanini. **Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: Dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados inteligentes**, Universidade de São Paulo – USP, ISBN 978-85-85205-78-2, 2007, pp. 1-18.

[25] Daqing Hou, E.O. Schweitzer, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. **Filtragem para relés de proteção.** 21p.

[26] C.M. Portela, M.C. Tavares. **Proposing a New Methodology to Optimize the Transient Study of a Transmission System**. International Conference on Power Systems Transients – IPST'01, Junho 24 – 28, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.

[27] M.C. Tavares, C.M. Portela, **Transmission System Parameters Optimization-Sensitivity Analysis of Secondary Arc Current and Recovery Voltage**, Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE, 6-10 June 2004, Denver, Colorado USA.

[28] J. Rohan Lucas, Peter G. McLaren. **An MOV model for series compensation studies.** Department of Electrical and Computer Engineering University of Manitoba Winnipeg, Manitoba, Canada R3T 2N2.

[29] Daniel L. Goldsworthy, Member, IEEE. **A Linearized Model for MOV-Protected Series Capacitors**. IEEE Power Engineering Review, November 1987.

[30] R.J. Marttila, Member, IEEE. **Performance of distance relay mho elements on MOV-protected series-compensated transmission lines**. IEEE Transactions on Power Delivery, Toronto, Ontario, Canada 1992.

[31] Mojtaba Khederzadeh, Senior Member, IEEE. **Impact of MOV Operation on Power Quality in Transmission Lines Compensated by TCSC**. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 21-24 April 2008.

[32] Yuanfang Wen, Xianglian Yan, Xiaoyu Yi, Yujing Liang, Yuyi Zhao. **Investigation on the Equivalent Circuit for MOV**. Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, 6-10 Oct. 2002.

[33] Ziegler, G. **Numerical Distance Protection: Principles and Applications**. 2. ed. Berlin, Germany: Siemens, AG, 2006. Livro.

[34] **Network Protection and Automation Guide. Alstom Grid**, 2011.

[35] Zanetta JR, L. C. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**. 1. ed. São Paulo: EDUSP, 2003. Livro.

[36] Lutz Kirschner, Quan Bailu, Ding Yansheng, Wang Zuli, Zhou Yan, Karl Uecker. **Increasing Wanzhou Power Transfer Capability by 550kV Fixed Series Capacitor FSC Fengjie**. Siemens.

[37] IEEE Power Engineering Society. **Series Capacitor Bank Protection Tutorial**. 40p, 1998.

ANEXO A – MODELS ELABORADOS

A.1 Transformador de corrente

```
MODEL TC
        INPUT
                ipA             -- Corrente primária medido corrente da fase A [A]
                ipB             -- Corrente primária medido corrente da fase B [A]
                ipC             -- Corrente primária medido corrente da fase C [A]
        OUTPUT
                isA             -- Saída da corrente secundária real corrente da fase A [A]
                isB             -- Saída da corrente secundária real corrente da fase B [A]
                isC             -- Saída da corrente secundária real corrente da fase C [A]
        DATA
                RTC             -- TC primário entre TC secundário
                Vsat            -- Tensão de saturação
                Rs              -- Resistência de TC (ohm)
                Rb              -- Resistencia de carga (ohm)
                Lb              -- Inductancia de carga (H)
                Rp              -- Fator definido por Ie/Ipk
                s               -- Pendente inversa de Ve vs Ie (zona de saturação)
        VAR
                -- Da fase A
                ipsA            -- Corrente secundária ideal [A]
                ips1A           -- Corrente secundária ideal [A] (para calcular derivada da corrente)
                dipsA           -- Derivada da corrente secundária ideal [A]
                ieA             -- Corrente de excitação [A]
                isA             -- Corrente secundária real [A]
                veA             -- Tensão de excitação [V]
                fluxA           -- Fluxo no núcleo do transformador [Wb]
                dfluxA          -- Derivada do fluxo [Wb]
                -- Da fase B
                ipsB            -- Corrente secundária ideal [A]
                ips1B           -- Corrente secundária ideal [A] (para calcular derivada da corrente)
                dipsB           -- Derivada da corrente secundária ideal [A]
                ieB             -- Corrente de excitação [A]
                isB             -- Corrente secundária real [A]
                veB             -- Tensão de excitação [V]
                fluxB           -- Fluxo no núcleo do transformador [Wb]
                dfluxB          -- Derivada do fluxo [Wb]
                -- Da fase C
                ipsC            -- Corrente secundária ideal [A]
                ips1C           -- Corrente secundária ideal [A] (para calcular derivada da corrente)
                dipsC           -- Derivada da corrente secundária ideal [A]
                ieC             -- Corrente de excitação [A]
                isC             -- Corrente secundária real [A]
                veC             -- Tensão de excitação [V]
                fluxC           -- Fluxo no núcleo do transformador [Wb]
                dfluxC          -- Derivada do fluxo [Wb]

                dt1
        EXEC
                -- Da fase A
                ipsA := ipA /RTC
                dipsA :=(ipsA-ips1A)/dt1
                ips1A :=ipsA
                ieA := (10/Rp)*(omega/(sqrt(2)*Vsat))**s*sign(fluxA)*(abs(fluxA))**s
                veA :=((ipsA-ieA)*(Rs+Rb)+Lb*dipsA)/(1+Lb*A*s*(abs(flux))**(s-1))
                dfluxA :=veA*dt1
                fluxA :=dfluxA+fluxA
                isA :=ipsA-ieA
```

```
                -- Da fase B
                ipsB := ipB /RTC
                dipsB :=(ipsB-ips1B)/dt1
                ips1B :=ipsB
                ieB := (10/Rp)*(omega/(sqrt(2)*Vsat))**s*sign(fluxB)*(abs(fluxB))**s
                veB :=((ipsB-ieB)*(Rs+Rb)+Lb*dipsB)/(1+Lb*A*s*(abs(flux))**(s-1))
                dfluxB :=veB*dt1
                fluxB :=dfluxB+fluxB
                isB :=ipsB-ieB
                -- Da fase C
                ipsC := ipC /RTC
                dipsC :=(ipsC-ips1C)/dt1
                ips1C :=ipsC
                ieC := (10/Rp)*(omega/(sqrt(2)*Vsat))**s*sign(fluxC)*(abs(fluxC))**s
                veC :=((ipsC-ieC)*(Rs+Rb)+Lb*dipsC)/(1+Lb*A*s*(abs(flux))**(s-1))
                dfluxC :=veC*dt1
                fluxC :=dfluxC+fluxC
                isC :=ipsC-ieC
        ENDEXEC
ENDMODEL
```

A.2 Filtro Analógico

```
MODEL FILTANA
        INPUT
                isA             -- Sinal de entrada vindo do transformador de corrente da fase A
                isB             -- Sinal de entrada vindo do transformador de corrente da fase B
                isC             -- Sinal de entrada vindo do transformador de corrente da fase C
                VsVNA           -- Sinal de entrada vindo do transformador de tensão da fase A
                VsVNB           -- Sinal de entrada vindo do transformador de tensão da fase B
                VsVNC           -- Sinal de entrada vindo do transformador de tensão da fase C
        CONST                   -- Coeficientes da função de transferência da equação 3.12
                b0 {val:1,6452e9}
                a0 {val:1,6452e9}
                a1 {val:2,7873e6}
                a2 {val:2,3611e3}
                a3 {val:1,0}
        OUTPUT
                iIsFANA                 -- Sinal de saída da corrente do filtro da fase A
                isFANB                  -- Sinal de saída da corrente do filtro da fase B
                isFANC                  -- Sinal de saída da corrente do filtro da fase C
                VsFANA                  -- Sinal de saída da tensão do filtro da fase A
                VsFANB                  -- Sinal de saída da tensão do filtro da fase B
                VsFANC                  -- Sinal de saída da tensão do filtro da fase C
        HISTORY
                isFANA {dflt:0}
                isFANB {dflt:0}
                isFANC {dflt:0}
                VsFANA {dflt:0}
                VsFANB {dflt:0}
                VsFANC {dflt:0}
        EXEC
                LAPLACE (isFANA/isA) := b0|s0 / (a0|s0 + a1|s1 + a2|s2 + a3|s3)
                LAPLACE (isFANB/isB) := b0|s0 / (a0|s0 + a1|s1 + a2|s2 + a3|s3)
                LAPLACE (isFANC/isC) := b0|s0 / (a0|s0 + a1|s1 + a2|s2 + a3|s3)
                LAPLACE (VsFANA/VsVNA) := b0|s0 / (a0|s0 + a1|s1 + a2|s2 + a3|s3)
                LAPLACE (VsFANB/VsVNB) := b0|s0 / (a0|s0 + a1|s1 + a2|s2 + a3|s3)
                LAPLACE (VsFANC/VsVNC) := b0|s0 / (a0|s0 + a1|s1 + a2|s2 + a3|s3)
        ENDEXEC
ENDMODEL
```

A.3 Sample and Hold

```
MODEL SAMPHOLD
        INPUT
                isFANA
                isFANB
                isFANC
                VsFANA
                VsFANB
                VsFANC
        OUTPUT
                isSHA
                isSHB
                isSHC
                VsOUTA
                VsOUTB
                VsOUTC
        TIMESTEP MIN: 1,0416666667E-3
        EXEC
                isSHA := isFANA
                isSHB := isFANB
                isSHC := isFANC
                VsOUTA := VsFANA
                VsOUTB := VsFANB
                VsOUTC := VsFANC
        ENDEXEC
ENDMODEL
```

A.4 Buffer

```
MODEL BUFFER
        INPUT
                isSHA
                isSHB
                isSHC
                VsVNA
                VsVNB
                VsVNC
        OUTPUT
                BuffeIA[1..17]
                BuffeIB[1..17]
                BuffeIC[1..17]
                BuffeVA[1..17]
                BuffeVB[1..17]
                BuffeVC[1..17]
        INIT
                BuffeIA[1..17]:=0
                BuffeIB[1..17]:=0
                BuffeIC[1..17]:=0
                BuffeVA[1..17]:=0
                BuffeVB[1..17]:=0
                BuffeVC[1..17]:=0
        ENDINIT
        TIMESTEP MIN: 1,0416666667E-3
        EXEC
                FOR i:=2 TO 17 DO
                        BuffeIA[i-1]:= BuffeIA[i]
                        BuffeIB[i-1]:= BuffeIB[i]
                        BuffeIC[i-1]:= BuffeIC[i]
                        BuffeVA[i-1]:= BuffeVA[i]
                        BuffeVB[i-1]:= BuffeVB[i]
                        BuffeVC[i-1]:= BuffeVC[i]
                ENDFOR
                BuffeIA[17]:= isSHA
                BuffeIB[17]:= isSHB
                BuffeIC[17]:= isSHC
                BuffeVA[17]:= VsVNA
                BuffeVB[17]:= VsVNB
                BuffeVC[17]:= VsVNC
        ENDEXEC
ENDMODEL
```

A.5 Filtro Fasor

```
MODEL FILTROFASOR
        INPUT
                BuffeIA[1..17]
                BuffeIB[1..17]
                BuffeIC[1..17]
                BuffeVA[1..17]
                BuffeVB[1..17]
                BuffeVC[1..17]
        CONST
                amostras {val: 16}
                delta {val: 2*pi/amostras}
        OUTPUT
                reIA, imIA, reIB, imIB, reIC, imIC
                reVA, imVA, reVB, imVB, reVC, imVC
        EXEC
                -- Componente fundamental das correntes
                M1:=0
                M2:=0
                FOR i:=1 TO 16 DO
                        M1 := M1 + (sqrt(2)/amostras)* BuffeIA [i]*cos((i-1)*delta)
                        M2 := M2 + (sqrt(2)/amostras)* BuffeIA [i+1]*cos((i-1)*delta)
                ENDFOR
                reIA := (2/amostras)*M2
                imIA := (2/amostras)* (-M2*cos(delta)+M1)/sin(delta)

                M1:=0
                M2:=0
                FOR i:=1 TO 16 DO
                        M1 := M1 + (sqrt(2)/amostras)* BuffeIB [i]*cos((i-1)*delta)
                        M2 := M2 + (sqrt(2)/amostras)* BuffeIB [i+1]*cos((i-1)*delta)
                ENDFOR
                reIB := (2/amostras)*M2
                imIB := (2/amostras)* (-M2*cos(delta)+M1)/sin(delta)

                M1:=0
                M2:=0
                FOR i:=1 TO 16 DO
                        M1 := M1 + (sqrt(2)/amostras)* BuffeIC [i]*cos((i-1)*delta)
                        M2 := M2 + (sqrt(2)/amostras)* BuffeIC [i+1]*cos((i-1)*delta)
                ENDFOR
                reIC := (2/amostras)*M2
                imIC := (2/amostras)* (-M2*cos(delta)+M1)/sin(delta)

                -- Componente fundamental das tensões
                M1:=0
                M2:=0
                FOR i:=1 TO 16 DO
                        M1 := M1 + (sqrt(2)/amostras)* BuffeVA [i]*cos((i-1)*delta)
                        M2 := M2 + (sqrt(2)/amostras)* BuffeVA [i+1]*cos((i-1)*delta)
                ENDFOR
                reVA := (2/amostras)*M2
                imVA := (2/amostras)* (-M2*cos(delta)+M1)/sin(delta)

                M1:=0
                M2:=0
                FOR i:=1 TO 16 DO
                        M1 := M1 + (sqrt(2)/amostras)* BuffeVB [i]*cos((i-1)*delta)
```

```
                M2 := M2 + (sqrt(2)/amostras)* BuffeVB [i+1]*cos((i-1)*delta)
            ENDFOR
            reVB := (2/amostras)*M2
            imVB := (2/amostras)* (-M2*cos(delta)+M1)/sin(delta)

            M1:=0
            M2:=0
            FOR i:=1 TO 16 DO
                M1 := M1 + (sqrt(2)/amostras)* BuffeVC [i]*cos((i-1)*delta)
                M2 := M2 + (sqrt(2)/amostras)* BuffeVC [i+1]*cos((i-1)*delta)
            ENDFOR
            reVC := (2/amostras)*M2
            imVC := (2/amostras)* (-M2*cos(delta)+M1)/sin(delta)
        ENDEXEC
ENDMODEL
```

A.6 Correntes e tensões em sequências

```
MODEL SEQUENCIAS
        INPUT
            IfunI0[1..2]                    -- Fasor da corrente 3I0
            Ifund[1..6]                     -- Fasores das correntes de fases
            Vfund[1..6]                     -- Fasores das tensões de fases
            VfunV0[1..2]                    -- Fasor da tensão 3V0
        OUTPUT
            I2[1..3], I1[1..3], I0[1..3]    -- Saída das correntes em sequências
            V0[1..3],  V1[1..3], V2[1..3]   -- Saída das tensões em sequências
        EXEC
            -- Corrente de sequência zero
            I0[1..2]:=IfunI0[1..2]/3
            I0[3]:=norm(I0[1],I0[2])
            -- Corrente de sequência positiva
            I1[1]:=(Ifund[1]-0,5*Ifund[3]-0,5*Ifund[5]+(sqrt(3)/2)*(-Ifund[4]+Ifund[6]))/3
            I1[2]:=(Ifund[2]-0,5*Ifund[4]-0,5*Ifund[6]+(sqrt(3)/2)*(-Ifund[5]+Ifund[3]))/3
            I1[3]:=norm(I1[1],I1[2])
            -- Corrente de sequência negativa
            I2[1]:=(Ifund[1]-0,5*Ifund[3]-0,5*Ifund[5]+(sqrt(3)/2)*(Ifund[4]-Ifund[6]))/3
            I2[2]:=(Ifund[2]-0,5*Ifund[4]-0,5*Ifund[6]+(sqrt(3)/2)*(Ifund[5]-Ifund[3]))/3
            I2[3]:=norm(I2[1],I2[2])
            -- Tensão de sequência zero
            V0[1..2]:=VfunV0[1..2]/3
            V0[3]:=norm(V0[1],V0[2])
            -- Tensão de sequência positiva
            V1[1]:=(Vfund[1]-0,5*Vfund[3]-0,5*Vfund[5]+(sqrt(3)/2)*(-Vfund[4]+Vfund[6]))/3
            V1[2]:=(Vfund[2]-0,5*Vfund[4]-0,5*Vfund[6]+(sqrt(3)/2)*(-Vfund[5]+Vfund[3]))/3
            V1[3]:=norm(V1[1],V1[2])
            -- Tensão de sequência negativa
            V2[1]:=(Vfund[1]-0,5*Vfund[3]-0,5*Vfund[5]+(sqrt(3)/2)*(Vfund[4]-Vfund[6]))/3
            V2[2]:=(Vfund[2]-0,5*Vfund[4]-0,5*Vfund[6]+(sqrt(3)/2)*(Vfund[5]-Vfund[3]))/3
            V2[3]:=norm(V2[1],V2[2])
        ENDEXEC
ENDMODEL
```

A.7 Relé direcional com polarização por tensão de sequência negativa ou sequência zero

```
MODEL DIR67NPOLV
        DATA
                AngV            -- Angulo de torque [°]
                VPI             -- Tensão mínimo de arranque [V]
                IPI             -- Corrente mínimo de arranque [A]
                Xc              -- Reatância do capacitor em série à linha [ohm-sec]
        INPUT
                I[1..3], V[1..3]  -- Corrente e tensão de entrada (sequência negativa ou sequência zero)
        OUTPUT
                IOPE[1..2], VPOL[1..2], FR[1..2], AnFR[1..2], AnRE[1..2], F, R
        EXEC
                IF (3*I[3]>=IPI) AND (3*V[3]>=VPI) THEN
                --- Tensão de polarização
                VPOL[1]:=3*norm(Xc*I[2]+V[1],-Xc*I[1]+V[2])*cos(AngV*pi/180+atan2(-Xc*I[1]+V[2],
        Xc*I[2]+V[1]))
                VPOL[2]:=3*norm(Xc*I[2]+V[1], -Xc*I[1]+V[2])*sin(AngV*pi/180+atan2(-Xc*I[1]+V[2],
        Xc*I[2]+V[1]))
                --- Corrente de operação
                  IOPE[1]:=-3*I[1], IOPE[2]:=-3*I[2]
                --- Angulo da corrente de operação
                  IF (IOPE[1]=0) AND (IOPE[2]=0) THEN
                    AnIOPE:=0
                  ELSIF (IOPE[1]>0 AND IOPE[2]<0) OR (IOPE[1]<0 AND IOPE[2]<0) THEN
                    AnIOPE:=360+atan2(IOPE[2],IOPE[1]) *180/pi
                  ELSE
                    AnIOPE:=atan2(IOPE[2],IOPE[1]) *180/pi
                  ENDIF
                --- Zona de operação frente
                  FR[1]:=cos(AngV*pi/180+ atan2(-Xc*I[1]+V[2], Xc*I[2]+V[1])+86*pi/180)
                  FR[2]:=sin(AngV*pi/180+ atan2(-Xc*I[1]+V[2], Xc*I[2]+V[1])+86*pi/180)
                --- Angulo da zona de frente
                  IF (FR[1]=0) AND (FR[2]=0) THEN
                    AnFR[1]:=0
                  ELSIF (FR[1]>0 AND FR[2]<0) OR (FR[1]<0 AND FR[2]<0) THEN
                    AnFR[1]:=360+atan2(FR[2],FR[1]) *180/pi
                  ELSE
                    AnFR[1]:=atan2(FR[2],FR[1]) *180/pi
                  ENDIF
                  IF AnFR[1]<=172 THEN
                    AnFR[2]:= AnFR[1]+188
                  ELSIF AnFR[1]>172 THEN
                    AnFR[2]:= AnFR[1]-172
                  ENDIF
                --- Angulo da zona de reversa
                IF AnFR[1]<=180 THEN
                  AnRE[1]:=AnFR[1]+180
                ELSIF AnFR[1]>180 THEN
                  AnRE[1]:=AnFR[1]-180
                ENDIF
                IF AnFR[1]<=352 THEN
                  AnRE[2]:=AnFR[1]+8
                ELSIF AnFR[1]>352 THEN
                  AnRE[2]:=AnFR[1]-352
                ENDIF
                --- Determinação da direção da falta (a frente ou reversa)
                  IF AnFR[1]>=0 AND AnFR[1]<=90 AND AnFR[2]>=188 AND AnFR[2]<=278 THEN
                    IF AnFR[1]>AnIOPE AND AnIOPE<AnFR[2] THEN
                      F:=1, R:=0
                    ELSIF AnFR[1]<AnIOPE AND AnIOPE>AnFR[2] THEN
                      F:=1, R:=0
                    ELSE
                      F:=0
                    ENDIF
                  ELSIF AnFR[1]>90 AND AnFR[1]<=172 AND AnFR[2]>=278 AND AnFR[2]<=360 THEN
```

```
                IF AnFR[1]>AnIOPE AND AnIOPE<AnFR[2] THEN
                  F:=1, R:=0
                ELSIF AnFR[1]<AnIOPE AND AnIOPE>AnFR[2] THEN
                  F:=1, R:=0
                ELSE
                  F:=0
                ENDIF
              ELSIF AnFR[1]>172 AND AnFR[1]<=360 AND AnFR[2]>=0 AND AnFR[2]<270 THEN
                IF AnFR[1]>AnIOPE AND AnIOPE>AnFR[2] THEN
                  F:=1, R:=0
                ELSE
                  F:=0
                ENDIF
              ELSE
                  F:=0
              ENDIF
             --Reversa
              IF AnRE[1]>=0 AND AnRE[1]<=90 AND AnRE[2]>=188 AND AnRE[2]<=278 THEN
                IF AnRE[1]>AnIOPE AND AnIOPE<AnRE[2] THEN
                  R:=1, F:=0
                ELSIF AnRE[1]<AnIOPE AND AnIOPE>AnRE[2] THEN
                  R:=1, F:=0
                ELSE
                  R:=0
                ENDIF
              ELSIF AnRE[1]>90 AND AnRE[1]<=172 AND AnRE[2]>=278 AND AnRE[2]<=360 THEN
                IF AnRE[1]>AnIOPE AND AnIOPE<AnRE[2] THEN
                  R:=1, F:=0
                ELSIF AnRE[1]<AnIOPE AND AnIOPE>AnRE[2] THEN
                  R:=1, F:=0
                ELSE
                  R:=0
                ENDIF
              ELSIF AnRE[1]>172 AND AnRE[1]<=360 AND AnRE[2]>=0 AND AnRE[2]<270 THEN
                IF AnRE[1]>AnIOPE AND AnIOPE>AnRE[2] THEN
                  R:=1, F:=0
                ELSE
                  R:=0
                ENDIF
              ELSE
                  R:=0
              ENDIF
          ENDIF
        ENDEXEC
ENDMODEL
```

A.8 Relé direcional com polarização por corrente de sequência negativa ou sequência zero

```
MODEL DIR67NPOLI                    --Polarização por corrente de sequência zero ou sequência negativa
        DATA
            VPI                         -- Tensão mínimo de arranque [V]
            IPI                         -- Corrente mínimo de arranque [A]
            AngB                        -- Angulo beta da zona a frente [122°]
            AngA                        -- Angulo alfa da zona a frente [338°]
            Xc                          -- Reatância do capacitor em série à linha [ohm-sec]
        INPUT
            I[1..3], V[1..3]            -- Corrente e tensão de entrada (sequência negativa ou sequência zero)
        OUTPUT
            IPOL[1..2], VPE[1..2], F, R
        EXEC
            IF (3*I[3]>=IPI) AND (3*V[3]>=VPI) THEN
                ---Angulo da corrente de polarização
                IF (-I[1]=0) AND (-I[2]=0) THEN
                    AnIP:=0
                ELSIF (-I[1]>0 AND -I[2]<0) OR (-I[1]<0 AND -I[2]<0) THEN
                    AnIP:=360+atan2(-I[2], -I[1]) *180/pi
                ELSE
                    AnIP:=atan2(-I[2], -I[1]) *180/pi
                ENDIF
                ---Angulo da tensão de operação
                IF (3*(V[1]+Xc*I[2])=0 AND 3*(V[2]-Xc*I[1])=0) THEN
                    AnVP:=0
                ELSIF (3*(V[1]+Xc*I[2])>0 AND 3*(V[2]-Xc*I[1])<0) OR
                        (3*(V[1]+Xc*I[2])<0 AND 3*(V[2]-Xc*I[1])<0) THEN
                    AnVP:=360+atan2(3*V[2] - Xc*3*I[1], 3*V[1]+Xc*3*I[2]) *180/pi
                ELSE
                    AnVP:=atan2(3*V[2] - Xc*3*I[1], 3*V[1]+Xc*3*I[2]) *180/pi
                ENDIF
                ---Corrente de polarização
                IPOL[1]:=3*norm(I[1],I[2]), IPOL[2]:=0
                ---Tensão de operação
                VPE[1]:=3*norm(V[1]+Xc*I[2], V[2]-Xc*I[1])*(cos(AnVP*pi/180)*cos(AnIP*pi/180)+
                        sin(AnVP*pi/180)*sin(AnIP*pi/180))
                VPE[2]:= 3*norm(V[1]+Xc*I[2], V[2]-Xc*I[1])*(sin(AnVP*pi/180)*cos(AnIP*pi/180)-
                        cos(AnVP*pi/180)*sin(AnIP*pi/180))
                ---Angulo da tensão de operação
                IF (VPE[1]=0) AND (VPE[2]=0) THEN
                    AnVPE:=0
                ELSIF (VPE[1]>0 AND VPE[2]<0) OR (VPE[1]<0 AND VPE[2]<0)  THEN
                    AnVPE:=360+atan2(VPE[2],VPE[1]) *180/pi
                ELSE
                    AnVPE:=atan2(VPE[2],VPE[1]) *180/pi
                ENDIF
                --- Determinação da direção da falta
                IF AnVPE>=AngA AND AnVPE<=360 THEN
                    F:=1, R:=0
                ELSIF AnVPE>=0 AND AnVPE<=AngB THEN
                    F:=1, R:=0
                ELSE
                    F:=0, R:=1
                ENDIF
            ENDIF
        ENDEXEC
ENDMODEL
```

A.9 Relé direcional com impedâncias de sequência negativa e sequência zero

```
MODEL RELEDIRE
        DATA
                Z1ANG                   -- Angulo de sequência positiva da linha [°]
                Z1L                     -- Impedância de sequência positiva da linha [ohm-sec]
                Z0ANG                   -- Angulo de sequência cero da linha [°]
                Z0L                     -- Impedância de sequência cero da linha [ohm-sec]
                a0                      -- sequência positiva, fator restrição, I0/I1
                a2                      -- sequência positiva, fator restrição, I2/I1
                k0                      -- sequência zero, fator restrição, I2/I0
                A50QF                   -- Forward direcional sobrecorrente pickup [A,sec]
                A50QR                   -- Reverse direcional sobrecorrente pickup [A,sec]
                Z2F                     -- Ajuste da zona a frente para polarização sequência negativa
                Z2R                     -- Ajuste da zona reversa para polarização sequência negativa
                Z0F                     -- Ajuste da zona a frente para polarização sequência zero
                Z0R                     -- Ajuste da zona reversa para polarização sequência zero
        INPUT
                I2[1..3],  I1[1..3],  I0[1..3]          -- As correntes em sequências positiva, negativa e zero
                V0[1..3], V1[1..3], V2[1..3]  -- As tensões em sequências positiva, negativa e zero
        OUTPUT
                Z2                      -- Impedância de sequência negativa
                Z2R
                Z2F
                F32Q                    -- Função da sequência negativa para a direção frente
                Z0                      -- Impedância de sequência zero
                Z0R
                Z0F
                F32V                    -- Função da sequência zero para a direção frente
        EXEC
                -- polarizado por tensão de sequência negativa 32Q
                IF (3*I2[3]>A50QF OR 3*I2[3]>A50QR) AND (I2[3]>a2*I1[3] AND I2[3]>k0*I0[3]) THEN
                        Z2:=(V2[1]*I2[1]+V2[2]*I2[2])/(I2[3]**2)*sin(rad(90-Z1ANG))+(V2[2]*I2[1]-
                        V2[1]*I2[2])/(I2[3]**2)*cos(rad(90-Z1ANG))
                    IF Z2<=Z2F THEN
                        F32Q:=1
                    ELSIF Z2>=Z2R THEN
                        F32Q:=0
                    ENDIF
                ELSE
                -- polarizado por tensão de sequência cero 32V
                IF (3*I0[3]>A50QF OR 3*I0[3]>A50QR) AND (I0[3]>a0*I1[3] AND I2[3]<k0*I0[3]) THEN
                            Z0:=(V0[1]*I0[1]+V0[2]*I0[2])/(I0[3]**2)*sin(rad(90-Z0ANG))+(V0[2]*I0[1]-
                                V0[1]*I0[2])/(I0[3]**2)*cos(rad(90-Z0ANG))
                    IF Z0<=Z0F THEN
                         F32V:=1
                    ELSIF Z0>=Z0R THEN
                        F32V:=0
                    ENDIF
                ELSE
        ENDEXEC
ENDMODEL
```