



DESEMPENHO DA PROTEÇÃO DE REATORES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO  
FRENTE A MANOBRAS E FALHAS INTERNAS E EXTERNAS

Tatiana Maria Tavares de Souza Alves

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Sebastião Ércules Melo de Oliveira  
Alexandre Pinto Alves da Silva

Rio de Janeiro  
Outubro de 2011

DESEMPENHO DA PROTEÇÃO DE REATORES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO  
FRENTE A MANOBRAS E FALHAS INTERNAS E EXTERNAS

Tatiana Maria Tavares de Souza Alves

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

---

Prof. Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D.Sc.

---

Prof. Alexandre Pinto Alves da Silva, Ph.D.

---

Dr. Marco Antonio Macciola Rodrigues, D.Sc.

---

Dr. Renan Giovanini, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2011

Alves, Tatiana Maria Tavares de Souza

Desempenho da Proteção de Reatores de Linhas de Transmissão frente a Manobras e Falhas Internas e Externas. / Tatiana Maria Tavares de Souza Alves – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

XX, 157 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Sebastião Ércules Melo de Oliveira

Alexandre Pinto Alves da Silva

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 156-157.

1. Proteção. 2. Reator Shunt. 3. Modelagem de relés. I. Oliveira, Sebastião Ércules Melo de *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Ofereço este trabalho  
À minha avó Pedrina Romanazzi (in memoriam)  
por me fazer acreditar que sou capaz.*

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar a Deus por me dar forças e sabedoria.

À minha família pelo amor, em especial:

À minha mãe Lúcia, pelo exemplo de determinação.

Ao meu marido Nelicio, por estar sempre ao meu lado.

Ao meu irmão Daniel, por sua eterna amizade e companheirismo.

Ao meu padrasto Jorge e ao meu avô José, pelo apoio.

À minha filha Alice, por dar sentido a minha vida.

Ao amigo e Prof. Antônio Carlos da Rocha Duarte. Seus ensinamentos foram indispensáveis para elaboração deste trabalho, bem como na minha formação profissional.

Ao Engenheiro Arjan pela contribuição técnica e por seu valioso incentivo.

Aos Engenheiros do ONS: Fernando Viotti, Marco Aurélio, Renan, David, Guilherme, Henildo e a todos os outros, que não foram citados nominalmente, mas que colaboraram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Sebastião, pelo apoio e incentivo.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DESEMPENHO DA PROTEÇÃO DE REATORES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO  
FRENTE A MANOBRAS E FALHAS INTERNAS E EXTERNAS

Tatiana Maria Tavares de Souza Alves

Outubro/2011

Orientadores: Sebastião Ércules Melo de Oliveira

Alexandre Pinto Alves da Silva

Programa: Engenharia Elétrica

É observado um elevado número de desligamentos de reatores shunt no Sistema Interligado Nacional – SIN por atuações incorretas para falhas externas e manobras no sistema. Estes tipos de atuações podem afetar a segurança operativa do SIN e até mesmo trazer prejuízos financeiros para o agente proprietário do reator, como perda de receita através de descontos de Parcela Variável - PV.

A proposta desta dissertação é, através de estudos de simulações, utilizando os programas Alternative Transients Program - ATP para a modelagem do sistema elétrico de potência e MATLAB/ SIMULINK para a modelagem dos relés, avaliar o comportamento das proteções diferenciais de fase, de terra restrita e as de sobrecorrente de fase, residual e de neutro dos reatores para diversas falhas e condições de operação encontradas na prática, reavaliando as arquiteturas atualmente utilizadas e indicando possíveis soluções para os principais problemas encontrados.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PERFORMANCE OF REACTOR PROTECTION OF TRANSMISSION LINES  
DURING MANEUVERS AND INTERNAL AND EXTERNAL FAULT

Tatiana Maria Tavares de Souza Alves

October/2011

Advisors: Sebastião Ércules Melo de Oliveira

Alexandre Pinto Alves da Silva

Department: Electrical Engineering

A high number of disconnections of shunt reactors in the National Interconnected System - NIS has been observed due incorrect trips during system maneuvers or external faults. These types of malfunctioning may affect NIS operational safety and even bring financial loss to the reactor's owner, such as revenue loss imposed by Variable Portion - PV.

The purpose of this dissertation is to evaluate the behavior of phase and restricted ground differential protection and phase, residual and neutral overcurrent protection for shunt reactors. Various faults and operating conditions are simulated using Alternative Transients Program - ATP for modeling the Electric Power System - EPS and MATLAB / SIMULINK for modeling the relay. The current protection architectures are evaluated and possible solutions are indicated for the major problems found.

# Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivo .....	3
1.2	Estrutura do Texto .....	4
<b>2</b>	<b>REATOR SHUNT.....</b>	<b>5</b>
2.1	Características de operação dos reatores shunt.....	8
2.1.1	Linearidade .....	8
2.1.2	Conteúdo harmônico.....	8
2.1.3	Assimetria entre as fases.....	8
2.2	Condições operacionais adversas às proteções dos reatores shunt.....	9
2.2.1	Energização de reatores shunt.....	9
2.2.2	Desenergização de reator shunt .....	12
2.2.3	Remoção de um curto-circuito externo próximo ao reator .....	13
2.2.4	Saturação dos Transformadores de Corrente devido às altas correntes de curto-circuito .....	13
2.2.5	Sobreexcitação de reator shunt .....	15
<b>3</b>	<b>PROTEÇÃO DE REATORES SHUNT .....</b>	<b>16</b>
3.1	Proteções Unitárias .....	18
3.1.1	Proteção Diferencial .....	18
3.1.1.1	Aplicação do princípio diferencial à proteção de reatores .....	20
3.2	Proteções Gradativas.....	24
3.2.1	Proteção de sobrecorrente.....	24
3.3	Proteções intrínsecas do reator.....	29
3.3.1	Relé detector de gás (tipo Buchholz).....	29
3.3.2	Relé de temperatura de óleo.....	30
3.3.3	Relé de temperatura de enrolamento.....	30

<b>4</b>	<b>MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO.....</b>	<b>32</b>
4.1	Software de simulação ATP/EMTP.....	32
4.2	Processo de modelagem do sistema elétrico.....	33
4.3	Modelagem do Reator Shunt .....	38
4.4	Modelagem dos Transformadores de Corrente.....	40
<b>5</b>	<b>MODELAGEM DAS PROTEÇÕES DOS REATORES SHUNT .....</b>	<b>41</b>
5.1	Relés de tecnologia digital .....	42
5.1.1	Modelo computacional dos relés de sobrecorrente.....	44
5.1.2	Modelo computacional dos relés diferenciais.....	48
<b>6</b>	<b>CÁLCULO DOS AJUSTES DAS PROTEÇÕES .....</b>	<b>51</b>
6.1	Ajuste das proteções referentes ao Modelo 1 .....	51
6.1.1	Proteção Diferencial de Fase .....	51
6.1.2	Proteção Diferencial de Terra Restrita.....	54
6.1.3	Proteções de Sobrecorrente de Fase do lado de AT (50/51 AT) .....	55
6.1.3.1	Unidade temporizada (51AT).....	55
6.1.3.2	Unidade instantânea (50AT) .....	59
6.1.4	Proteções de Sobrecorrente Residuais do lado de AT .....	60
6.1.4.1	Unidade temporizada (51NAT).....	60
6.1.4.2	Unidade instantânea (50NAT) .....	63
6.1.5	Proteção de Sobrecorrente de Neutro ou Residual do lado de neutro do reator .. .....	64
6.1.5.1	Unidade temporizada (51G).....	64
6.1.5.2	Unidade instantânea (50G).....	65
6.2	Ajuste das proteções referentes ao Modelo 2 .....	66
6.2.1	Proteção Diferencial de Fase .....	66
6.2.2	Proteção Diferencial de Terra Restrita.....	68

6.2.3	Proteções de Sobrecorrente de Fase do lado de AT (50/51 AT) .....	70
6.2.3.1	Unidade temporizada (51AT).....	70
6.2.3.2	Unidade instantânea (50AT) .....	73
6.2.4	Proteções de Sobrecorrente Residuais do lado de AT .....	74
6.2.4.1	Unidade temporizada (51NAT).....	74
6.2.4.2	Unidade instantânea (50NAT) .....	76
6.2.5	Proteção de Sobrecorrente de Neutro ou Residual do lado de neutro do reator .. .....	77
6.2.5.1	Unidade temporizada (51G).....	77
6.2.5.2	Unidade instantânea (50G).....	79
<b>7</b>	<b>DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES EXECUTADAS E RESULTADOS</b>	<b>80</b>
7.1	Simulações e resultados obtidos do modelo 1 .....	81
7.1.1	Caso 1 – Falha interna a 10 % do enrolamento do reator .....	82
7.1.2	Caso 2 – Falha interna a 50 % do enrolamento do reator .....	88
7.1.3	Caso 3 – Falha interna a 90 % do enrolamento do reator .....	94
7.1.4	Caso 4 – Falha externa – Curto-circuito monofásico em barra próxima ao reator .....	100
7.1.5	Caso 5 – Falha externa – Curto-circuito bifásico-terra em barra próxima ao reator .....	102
7.1.6	Caso 6 – Falha externa – Curto-circuito trifásico evolutivo em barra próxima ao reator .....	104
7.1.7	Caso 7 – Manobra de fechamento do reator para normalização da Linha de Transmissão.....	106
7.1.8	Caso 8 – Falha externa - Curto-circuito monofásico a 10 % da Linha de Transmissão a partir da barra próxima ao reator .....	107
7.1.9	Caso 9 – Falha externa - Curto-circuito monofásico a 10 % da Linha de Transmissão paralela, a partir da barra próxima ao reator .....	109
7.2	Simulações e resultados obtidos do modelo 2 .....	111

7.2.1	Caso 1 – Falha interna a 10 % do enrolamento do reator .....	111
7.2.2	Caso 2 – Falha interna a 50 % do enrolamento do reator .....	117
7.2.3	Caso 3 – Falha interna a 90 % do enrolamento do reator .....	122
7.2.4	Caso 4 – Falha externa – Curto-circuito monofásico em barra próxima ao reator .....	127
7.2.5	Caso 5 – Falha externa – Curto-circuito bifásico-terra em barra próxima ao reator .....	129
7.2.6	Caso 6 – Falha externa – Curto-circuito trifásico evolutivo em barra próxima ao reator .....	131
7.2.7	Caso 7 – Manobra de normalização da linha de transmissão com fechamento de paralelo entre subsistemas .....	133
7.3	Análise dos resultados das simulações em função do fator $f_d$ .....	135
7.4	Verificação da corrente de inrush .....	147
7.5	Síntese dos resultados obtidos nas simulações .....	148
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>150</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>156</b>

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Aplicação de Reatores Shunt em Sistemas Elétricos de Potência.....	6
Figura 2.2 – Reator da Barra de 500 kV da SE Fortaleza II da CHESF .....	6
Figura 2.3 – Reatores conectados em estrela aterrada através de reator e em delta .....	7
Figura 2.4 – Correntes de fase de um banco de reatores shunt durante a sua energização – simulação.....	10
Figura 2.5 – Correntes de fase de um banco de reatores shunt durante a sua energização .....	10
Figura 2.6 – Caso real de atuação incorreta de proteção de reator, frente a uma corrente de inrush .....	11
Figura 2.7 – Corrente de neutro de um banco de reatores shunt durante a sua energização .....	12
Figura 3.1 – Esquema de proteção de reatores com TC no neutro.....	17
Figura 3.2 – Esquema de proteção sem TC no neutro.....	18
Figura 3.3 – 2º lei de Kirchhoff – Lei dos Nós.....	18
Figura 3.4 – Proteção Diferencial – Falta Externa .....	19
Figura 3.5 – Proteção Diferencial – Falta Interna .....	19
Figura 3.6 – Conexão do Relé Diferencial .....	20
Figura 3.7 – Relé Diferencial Percentual.....	21
Figura 3.8 – Característica do Relé Diferencial Percentual.....	23
Figura 3.9 – curva normal inversa segundo a norma IEC-60255-3.....	27
Figura 3.10 – curva inversa ANSI segundo a norma IEEE C37-112.....	29
Figura 4.1 – Modelo 1 - LT 500 kV Adrianópolis – Cachoeira Paulista C2.....	34
Figura 4.2 – Modelo 2 - LT 345 kV Ouro Preto 2 – Vitória .....	36
Figura 4.3 – Sub-bobinas formadas no reator shunt, quando de falha interna para terra	39
Figura 4.4 – Modelo do reator shunt para simulações de falhas internas.....	40

Figura 5.1 – Modelo do sistema de proteções unitárias e gradativas dos reatores shunt	42
Figura 5.2 – Estrutura básica de um relé digital .....	43
Figura 5.3 – Integração dos modelos ATP e MATLAB/SIMULINK – relé de sobrecorrente .....	44
Figura 5.4 – Integração dos modelos ATP e MATLAB/SIMULINK – relé diferencial	48
Figura 7.1 – Correntes do Caso 1-a – Modelo 1.....	82
Figura 7.2 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 1-a – Modelo 1 .....	83
Figura 7.3 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 1-a – Modelo 1 .....	83
Figura 7.4 – Correntes do Caso 1-b – Modelo 1 .....	84
Figura 7.5 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 1-b – Modelo 1 .....	85
Figura 7.6 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 1-b – Modelo 1.....	85
Figura 7.7 – Correntes do Caso 1-c – Modelo 1.....	86
Figura 7.8 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 1-c – Modelo 1 .....	87
Figura 7.9 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 1-c – Modelo 1 .....	88
Figura 7.10 – Correntes do Caso 2-a – Modelo 1.....	89
Figura 7.11 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 2-a – Modelo 1 .....	89
Figura 7.12 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 2-a – Modelo 1 .....	90
Figura 7.13 – Correntes do Caso 2-b – Modelo 1 .....	91
Figura 7.14 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 2-b – Modelo 1 .....	91
Figura 7.15 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 2-b – Modelo 1.....	92
Figura 7.16 – Correntes do Caso 2-c – Modelo 1.....	92
Figura 7.17 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 2-c – Modelo 1 .....	93
Figura 7.18 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 2-c – Modelo 1 .....	94
Figura 7.19 – Correntes do Caso 3-a – Modelo 1.....	95
Figura 7.20 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 3-a – Modelo 1 .....	95
Figura 7.21 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 3-a – Modelo 1 .....	96

Figura 7.22 – Correntes do Caso 3-b – Modelo 1 .....	97
Figura 7.23 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 3-b – Modelo 1 .....	97
Figura 7.24 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 3-b – Modelo 1 .....	98
Figura 7.25 – Correntes do Caso 3-c – Modelo 1 .....	99
Figura 7.26 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 3-c – Modelo 1 .....	99
Figura 7.27 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 3-c – Modelo 1 .....	100
Figura 7.28 – Correntes do Caso 4 – Modelo 1 .....	101
Figura 7.29 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 4 – Modelo 1 .....	101
Figura 7.30 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 4 – Modelo 1 .....	102
Figura 7.31 – Correntes do Caso 5 – Modelo 1 .....	102
Figura 7.32 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 5 – Modelo 1 .....	103
Figura 7.33 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 5 – Modelo 1 .....	103
Figura 7.34 – Correntes do Caso 6 – Modelo 1 .....	104
Figura 7.35 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 6 – Modelo 1 .....	105
Figura 7.36 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 6 – Modelo 1 .....	105
Figura 7.37 – Correntes do Caso 7 – Modelo 1 .....	106
Figura 7.38 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 7 – Modelo 1 .....	107
Figura 7.39 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 7 – Modelo 1 .....	107
Figura 7.40 – Correntes do Caso 8 – Modelo 1 .....	108
Figura 7.41 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 8 – Modelo 1 .....	109
Figura 7.42 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 8 – Modelo 1 .....	109
Figura 7.43 – Correntes do Caso 9 – Modelo 1 .....	110
Figura 7.44 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 9 – Modelo 1 .....	110
Figura 7.45 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 9 – Modelo 1 .....	111
Figura 7.46 – Correntes do Caso 1-a – Modelo 2 .....	112
Figura 7.47 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 1-a – Modelo 2 .....	112

Figura 7.48 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 1-a – Modelo 2 .....	113
Figura 7.49 – Correntes do Caso 1-b – Modelo 2 .....	113
Figura 7.50 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 1-b – Modelo 2 .....	114
Figura 7.51 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 1-b – Modelo 2 .....	115
Figura 7.52 – Correntes do Caso 1-c – Modelo 2 .....	115
Figura 7.53 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 1-c – Modelo 2 .....	116
Figura 7.54 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 1-c – Modelo 2 .....	117
Figura 7.55 – Correntes do Caso 2-a – Modelo 2 .....	118
Figura 7.56 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 2-a – Modelo 2 .....	118
Figura 7.57 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 2-a – Modelo 2 .....	119
Figura 7.58 – Correntes do Caso 2-b – Modelo 2 .....	119
Figura 7.59 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 2-b – Modelo 2 .....	120
Figura 7.60 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 2-b – Modelo 2 .....	120
Figura 7.61 – Correntes do Caso 2-c – Modelo 2 .....	121
Figura 7.62 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 2-c – Modelo 2 .....	121
Figura 7.63 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 2-c – Modelo 2 .....	122
Figura 7.64 – Correntes do Caso 3-a – Modelo 2 .....	123
Figura 7.65 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 3-a – Modelo 2 .....	123
Figura 7.66 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 3-a – Modelo 2 .....	124
Figura 7.67 – Correntes do Caso 3-b – Modelo 2 .....	124
Figura 7.68 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 3-b – Modelo 2 .....	125
Figura 7.69 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 3-b – Modelo 2 .....	125
Figura 7.70 – Correntes do Caso 3-c – Modelo 2 .....	126
Figura 7.71 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 3-c – Modelo 2 .....	126
Figura 7.72 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 3-c – Modelo 2 .....	127
Figura 7.73 – Correntes do Caso 4 – Modelo 2 .....	128

Figura 7.74 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 4 – Modelo 2 .....	128
Figura 7.75 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 4 – Modelo 2 .....	129
Figura 7.76 – Correntes do Caso 5 – Modelo 2.....	129
Figura 7.77 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 5 – Modelo 2 .....	130
Figura 7.78 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 5 – Modelo 2 .....	130
Figura 7.79 – Correntes do Caso 6 – Modelo 2.....	131
Figura 7.80 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 6 – Modelo 2 .....	132
Figura 7.81 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 6 – Modelo 2 .....	132
Figura 7.82 – Correntes do Caso 7 – Modelo 2.....	133
Figura 7.83 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 7 – Modelo 2 .....	134
Figura 7.84 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 7 – Modelo 2 .....	134
Figura 7.85 – Corrente da fase sob defeito (FI-10%) medida pelos TC de fase do lado de alta tensão do reator – Modelo 1 .....	135
Figura 7.86 – Corrente da fase sob defeito (FI-10%) medida pelo TC de fase do lado de neutro do reator – Modelo 1 .....	136
Figura 7.87 – Corrente de neutro medida pelo TC de neutro do reator (FI-10%) – Modelo 1.....	136
Figura 7.88 – Corrente da fase sob defeito (FI-10%) medida pelos TC de fase do lado de alta tensão do reator – Modelo 2 .....	137
Figura 7.89 – Corrente da fase sob defeito (FI-10%) medida pelo TC de fase do lado de neutro do reator – Modelo 2 .....	138
Figura 7.90 – Corrente de neutro medida pelo TC de neutro do reator (FI-10%) – Modelo 2.....	138
Figura 7.91 – Corrente da fase sob defeito (FI-50%) medida pelos TC de fase do lado de alta tensão do reator – Modelo 1 .....	139
Figura 7.92 – Corrente da fase sob defeito (FI-50%) medida pelo TC de fase do lado de neutro do reator – Modelo 1 .....	140

Figura 7.93 – Corrente de neutro medida pelo TC de neutro do reator (FI-50%) – Modelo 1.....	140
Figura 7.94 – Corrente da fase sob defeito (FI – 50%) medida pelos TC de fase do lado de alta tensão do reator – Modelo 2.....	141
Figura 7.95 – Corrente da fase sob defeito (FI – 50%) medida pelo TC de fase do lado de neutro do reator – Modelo 2 .....	142
Figura 7.96 – Corrente de neutro medida pelo TC de neutro do reator (FI-50%) – Modelo 2.....	142
Figura 7.97 – Corrente da fase sob defeito (FI-90%) medida pelos TC de fase do lado de alta tensão do reator – Modelo 1 .....	143
Figura 7.98 – Corrente da fase sob defeito (FI-90%) medida pelo TC de fase do lado de neutro do reator – Modelo 1 .....	144
Figura 7.99 – Corrente de neutro medida pelo TC de neutro do reator (FI-90%) – Modelo 1.....	144
Figura 7.100 – Corrente da fase sob defeito (FI-90%) medida pelos TC de fase do lado de alta tensão do reator – Modelo 2.....	145
Figura 7.101 – Corrente da fase sob defeito (FI-90%) medida pelo TC de fase do lado de neutro do reator – Modelo 2 .....	146
Figura 7.102 – Corrente de neutro medida pelo TC de neutro do reator (FI-90%) - Modelo 2.....	146
Figura 7.103 – Corrente de energização (fases) - Modelo 1 .....	147
Figura 7.104 – Corrente de energização (neutro) - Modelo 1 .....	148

## **Lista de Tabelas**

Tabela 3.1– Classificação de curvas segundo a norma IEC-60255-3 .....	26
Tabela 3.2 – Classificação de curvas segundo a norma IEEE C37-112.....	28
Tabela 7.1 – Resultados das simulações do Modelo 1 .....	149
Tabela 7.2 – Resultados das simulações do Modelo 2 .....	149

# Nomenclatura

A/D – Analógico/Digital

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANAFAS – Análise de Falhas Simultâneas

ANSI – American National Standards Institute

ATP – Alternative Transients Program

CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco

CPU – Central Processing Unit

DC – Direct Current

D/I – Digital Input

D/O – Digital Output

DFT – Discrete Fourier Transformer

EMTP – Electromagnetic Transients Program

IEC – International Electrotechnical Commission

IED – Intelligent Electronic Device

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

LT – Linha de Transmissão

MATLAB – Matrix Laboratory

ONAN – Oléo Natural Ar Natural

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PV – Parcela Variável

RTDS – Real Time Digital Simulator

SE – Subestação

SEP – Sistemas Especiais de Proteção

SIN – Sistema Interligado Nacional

TC – Transformador de Corrente

UHE – Usina Hidrelétrica

# 1 INTRODUÇÃO

Tem sido observado no Sistema Interligado Nacional – SIN um número elevado de desligamentos de reatores shunt por atuações incorretas de suas proteções quando de manobras no sistema e falhas externas.

Dentre as atuações incorretas para falhas e manobras no sistema, podemos destacar: atuação da proteção diferencial durante manobras de fechamento de paralelo entre subsistemas; atuação da proteção de sobrecorrente de neutro durante o fechamento do disjuntor do banco de reatores com a linha de transmissão desenergizada, durante a preparação para a energização da linha de transmissão; atuação da proteção de sobrecorrente de neutro, durante o período de fase aberta imposto pelo religamento automático monopolar de linhas de transmissão e atuação da proteção de sobrecorrente de neutro para falhas externas, em linhas de transmissão ou no barramento próximo ao reator.

Este último caso foi observado na perturbação ocorrida no SIN do dia 10 de novembro de 2009, com interrupção de 24.436 MW (40 % da carga do SIN), onde a proteção de sobrecorrente residual do reator shunt da LT 765 kV Itaberá - Ivaiporã C3, em Ivaiporã, atuou para uma falha na barra da SE Itaberá, desligando a LT remanescente do tronco e interrompendo totalmente a conexão entre as SEs Itaberá e Ivaiporã, rejeitando a geração de 5.564 MW, da UHE Itaipú 60 Hz, para o SIN [1].

Estes tipos de atuações trazem diversas conseqüências negativas para o sistema, tais como: agravamento de perturbações, aumentando a sua área de abrangência; bloqueios de fechamento de disjuntores de reatores, retardando a recomposição do sistema; acionamento de equipes de manutenção, indisponibilizando os reatores e prejudicando a operação do sistema, além de impacto financeiro aos agentes de transmissão, em função de descontos da Parcela Variável (PV) das suas receitas.

A filosofia comumente adotada para proteção de reatores shunt é composta de proteções diferenciais, sobrecorrente de fase, residuais e de neutro; além das proteções intrínsecas de gás, alívio de pressão e alta temperatura dos enrolamentos e do óleo do reator.

Com relação aos ajustes, é sempre necessária uma avaliação das condições

operativas e anormais do reator shunt, principalmente porque alguns reatores de linha necessitam ser manobrados várias vezes durante o dia para o controle de tensão do sistema. Cada fabricante de relés possui uma abordagem diferente para dessensibilizar ou inibir a atuação da proteção diferencial durante uma energização, sempre baseadas em bloqueio ou restrição por harmônicos [2]. Porém, os relés diferenciais de mercado são concebidos tendo como foco principal a aplicação em transformadores e/ou máquinas síncronas, que apresentam problemas diferentes dos apresentados pelos reatores.

Poucas publicações abordam os aspectos de proteção de reatores shunt; sendo o IEEE [3] e o artigo publicado por Zoran e outros [4], os mais referenciados e tradicionais sobre este assunto.

Em [3], encontra-se um guia elaborado por um Grupo de Trabalho de Proteção de Sistemas de Potência do IEEE, onde são apresentadas as principais arquiteturas de proteção utilizadas em reatores shunt, considerando as suas características construtivas e tipo de conexão no sistema elétrico.

Em [4], os autores discursam sobre a aplicação de reatores shunt nos sistemas elétricos, aspectos construtivos, características de operação e transitórios de energização e desenergização. Especificamente sobre as proteções, este artigo analisa o desempenho dos relés diferenciais de terra restrita, diferenciais de fase e de sobrecorrente durante os transitórios de energização e desenergização. No mesmo, também são apresentados os benefícios da utilização de relés diferenciais de terra restrita, sem, entretanto fazer nenhuma comparação entre o seu desempenho com o dos demais relés de proteção de reatores shunt para falhas internas e externas aos mesmos, o que foi feito no presente trabalho. Para as falhas internas o artigo analisa apenas dois casos extremos: falhas a 1% do enrolamento do reator a partir do neutro e falhas nas buchas. Para outros pontos de falhas os autores assumem que os valores de corrente estarão compreendidos entre aqueles apresentados para os casos extremos. Finalmente o artigo apresenta duas arquiteturas tradicionais de proteção de reatores, uma delas apresentando a proteção diferencial de terra restrita conectada ao circuito residual dos TCs de fase do lado de alta tensão do reator e ao TC de neutro.

## 1.1 OBJETIVO

Ultimamente tem se observado um elevado número de desligamentos de reatores shunt no Sistema Interligado Nacional – SIN por atuações incorretas de suas proteções quando de falhas externas, ou manobras no sistema.

Desta forma, com o objetivo de aprimorar a filosofia de proteção de reatores shunt e os procedimentos usuais para determinação dos ajustes destas proteções, procurou-se reproduzir com precisão os sistemas de proteção destes equipamentos, utilizando um ambiente híbrido de simulação computacional no qual facilidades das ferramentas ATP e MATLAB/SIMULINK foram empregadas, de forma simultânea e sincronizada.

Nesse trabalho são apresentados resultados de simulações dos eventos correspondentes a falhas internas em reatores shunt, variando o ponto de aplicação das falhas, através de um modelo de reator adequado à verificação da influência do fator de acoplamento entre as sub-bobinas formadas durante o defeito, sendo apresentada uma análise de sensibilidade a este fator, denominado fator de dispersão. Também são analisadas falhas externas próximas aos reatores shunt e condições de chaveamento, baseadas em situações práticas vivenciadas no SIN, considerando dois modelos de reatores, um com o neutro solidamente aterrado e outro com o neutro aterrado através de resistor e reator de aterramento.

Para cada falha e condição de chaveamento simulada é analisado o comportamento das proteções diferencial de fase e de terra restrita, e das proteções de sobrecorrente, permitindo uma comparação de suas sensibilidades e segurança para as diversas condições. A partir das análises são apontados problemas, com as respectivas soluções para se obter um bom desempenho do sistema de proteção de reatores shunt, visando melhorar a sua sensibilidade durante falhas internas e a sua seletividade para falhas externas.

Adicionalmente, também é objetivo deste trabalho a apresentação de um estudo de desempenho de sistemas de proteção e dos ajustes associados, utilizando-se apenas ferramentas computacionais como uma alternativa mais simples e de menor custo aos testes tradicionais utilizando caixas de teste e relés ou até mesmo simuladores como o Real Time Digital Simulator –RTDS.

## 1.2 ESTRUTURA DO TEXTO

Para apresentar e analisar todos os aspectos abordados, a dissertação de mestrado foi organizada de modo a considerar as seguintes etapas:

O capítulo 1 apresenta um breve descritivo sobre os problemas verificados no SIN correlacionados ao desempenho das proteções de reatores shunt, com ênfase na importância de uma análise criteriosa do sistema de proteção dos mesmos inclusive com o auxílio de modelos e ferramentas computacionais.

No capítulo 2 é apresentada uma breve revisão sobre a utilização de reatores shunt em aplicações reais e aspectos construtivos e características operacionais dos mesmos.

No capítulo 3 são descritos os conceitos gerais mais importantes sobre o sistema de proteção dos reatores shunt, tanto para as proteções elétricas diferenciais e de sobrecorrente, quanto para as proteções intrínsecas do mesmo.

No capítulo 4 são descritas as características gerais dos sistemas de transmissão utilizados como exemplo e das ferramentas de análise utilizadas, bem como apresentadas informações gerais sobre a modelagem dos equipamentos.

No capítulo 5 é apresentada uma visão geral sobre a estrutura de um relé digital além das informações sobre os modelos computacionais dos sistemas de proteção dos reatores, bem como as ferramentas de simulação utilizadas.

No capítulo 6 são apresentados os cálculos dos ajustes das proteções dos reatores shunt, bem como os critérios utilizados. Estes ajustes foram utilizados nas proteções modeladas.

No capítulo 7 são descritos os casos de simulações executados, sendo apresentados os resultados obtidos quanto à influência do fator de dispersão, associado às sub-bobinas formadas durante os defeitos internos, nas correntes de curto-circuito que circulam pelo reator e quanto ao desempenho geral das suas proteções.

O capítulo 8 apresenta as conclusões finais e enumera sugestões de assuntos para utilização em trabalhos de pesquisa futuros.

## 2 REATOR SHUNT

Durante a operação normal de um sistema de energia elétrica, as tensões de transmissão e distribuição devem ser mantidas dentro de uma pequena faixa, tipicamente de 0,95 a 1,05 pu do valor nominal. Os níveis de tensão dependem fortemente do fluxo de potência reativa do sistema elétrico. Quando há deficiência de potência reativa, o nível de tensão cai. De maneira inversa, quando há excesso de potência reativa, o nível de tensão sobe.

Portanto, o controle dos níveis de tensão em um sistema elétrico é feito através do controle da geração e da absorção do fluxo de potência reativa no sistema, a partir das seguintes premissas: os reatores shunt absorvem potência reativa e a característica da maior parte das cargas do sistema também é de absorver potência reativa, ao passo que capacitores shunt geram potência reativa para o sistema da mesma forma que os cabos condutores das linhas de transmissão, em virtude da alta capacitância entre estes e o solo.

Da mesma forma, também é possível controlar os fluxos de potência reativa e, conseqüentemente, os níveis de tensão, ajustando-se a excitação das unidades geradoras e compensadores síncronos, ou alterando-se os tapes dos transformadores.

Outra aplicação importante para os reatores shunt resulta de sua utilização para evitar o efeito Ferranti, que consiste na elevação de tensão sustentada (regime permanente) na extremidade aberta de uma linha de transmissão, ou seja, tensão na recepção em vazio superior à tensão na geração.

O dimensionamento e a especificação dos pontos de conexão dos reatores shunt são feitos por meio de estudos de fluxo de potência, levando-se em conta as possíveis configurações do sistema. Dependendo da tensão do sistema, reatores shunt podem ser inseridos diretamente ao barramento da subestação (posição 1), nos terminais de linhas de transmissão (posição 2) ou conectados ao enrolamento terciário de grandes transformadores de potência (posição 3), como mostrado na figura 2.1 [5].

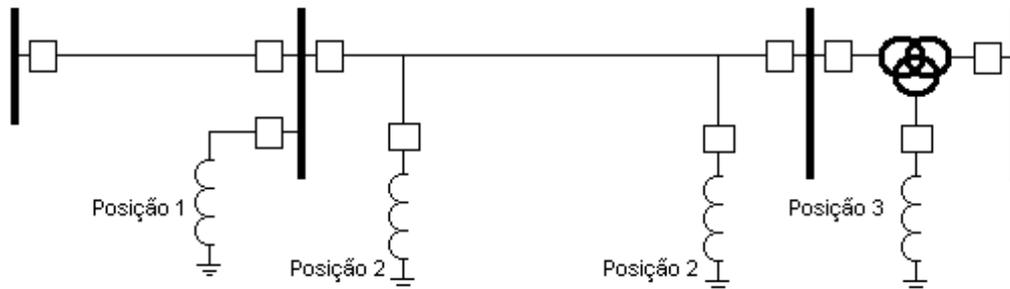


Figura 2.1 – Aplicação de Reatores Shunt em Sistemas Elétricos de Potência

A maioria dos reatores shunt, para tensões de sistema acima de 72,5 kV, é conectada diretamente ao barramento de alta tensão ou nos terminais de linhas de transmissão e o tipo mais comum é o imerso em óleo. Enquanto a maioria dos reatores shunt, utilizados em sistemas com um nível de tensão menor que 72,5 kV são conectados em enrolamento terciário de transformadores de potência, neste caso o tipo mais comum de reator é do tipo seco [5].

A figura 2.2 apresenta um reator monofásico do tipo imerso em óleo, conectado na fase A do Barramento de 500 kV da SE Fortaleza da CHESF [6].



Figura 2.2 – Reator da Barra de 500 kV da SE Fortaleza II da CHESF [6]

Os reatores podem ser conectados em delta ou em estrela, sendo a ligação em estrela a mais comum, pois, neste caso, os enrolamentos ficam submetidos às tensões de fase, requerendo menor isolamento e, conseqüentemente, menor custo. Em sistemas de alta e extra-alta tensão o mais comum é a utilização de banco de reatores monofásicos, pois a potência dos mesmos está acima dos limites de um reator shunt trifásico, conectados em estrela aterrada solidamente ou através de reator de aterramento. O objetivo deste reator de aterramento é aumentar a reatância de seqüência zero total da linha de transmissão à qual o reator está conectado, visando reduzir as correntes para faltas monofásicas. Isto facilita a extinção de arco quando da abertura monopolar dos disjuntores da linha, o que implica no aumento de sucesso nos religamentos monopolares da mesma.

Para níveis de tensão mais baixos é comum a conexão de reatores em estrela não aterrada nos enrolamentos terciários dos transformadores de potência. A figura 2.3 apresenta o diagrama esquemático de um reator conectado em estrela, aterrado através de reator, e de um reator conectado em delta.

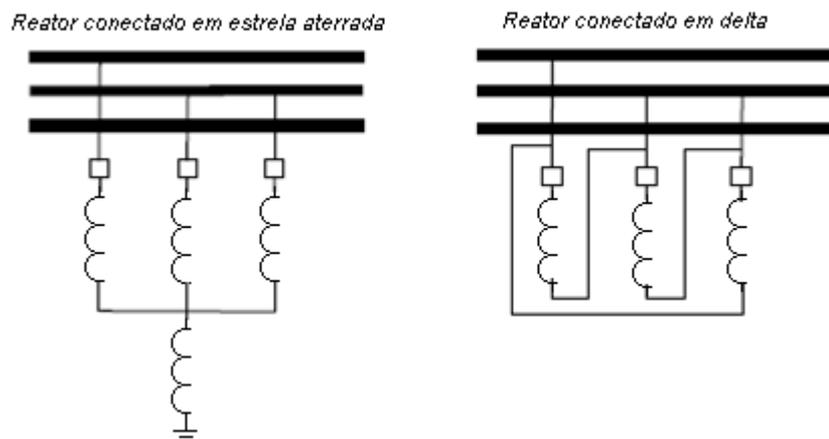


Figura 2.3 – Reatores conectados em estrela aterrada através de reator e em delta [5]

O foco deste trabalho está na avaliação das proteções de bancos monofásicos de reatores shunt, utilizados em sistemas de alta e extra-alta tensão, conectados em estrela aterrada solidamente ou através de reator de aterramento.

## **2.1 CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO DOS REATORES SHUNT**

A seguir serão apresentadas características de operação dos reatores shunt que podem ser consideradas quando da definição e da execução dos cálculos dos ajustes do sistema de proteção destes equipamentos.

### **2.1.1 LINEARIDADE**

Para tensões normais de operação, existe uma relação linear entre a tensão aplicada e a corrente do reator (ou seja, um pequeno aumento na tensão resultará em um aumento proporcional na corrente). Os fluxos magnéticos e as densidades de fluxo no reator também são proporcionais à tensão aplicada, sendo o desvio da verdadeira forma de onda senoidal da tensão de linha, em geral, insignificante para a tensão normal de operação.

Como o fluxo magnético, tem o seu caminho, em grande parte, no núcleo magnético de aço, este núcleo irá saturar a partir de uma determinada densidade de fluxo, denominado ponto de saturação.

Abaixo deste ponto de saturação, a corrente necessária para a magnetização do núcleo é bastante pequena e para alcançar um aumento marginal na densidade de fluxo o aumento necessário desta corrente também é bem pequeno. Uma vez acima do ponto de saturação, a corrente extra, necessária para aumentar a densidade de fluxo, passa a ser considerável.

### **2.1.2 CONTEÚDO HARMÔNICO**

Harmônicos na corrente de regime permanente do reator surgem em função da saturação parcial do circuito magnético do mesmo.

Este efeito é de fato muito pequeno e sem importância prática para as proteções e equipamentos de comunicação.

### **2.1.3 ASSIMETRIA ENTRE AS FASES**

As tolerâncias de assimetria entre as fases de um reator trifásico, ou entre as unidades monofásicas formadoras de um banco trifásico, podem ser julgadas pela

quantidade de harmônicos residual. O resultado é uma corrente de seqüência zero circulando no neutro do reator. Os ajustes das proteções de sobrecorrente residuais e de neutro devem ser superiores a esta corrente de desequilíbrio.

## **2.2 CONDIÇÕES OPERACIONAIS ADVERSAS ÀS PROTEÇÕES DOS REATORES SHUNT**

Algumas situações, diferentes de faltas internas, geram correntes consideráveis oriundas de fenômenos transitórios que podem provocar atuações incorretas das proteções de reator. A relação abaixo apresenta as principais causas do surgimento de correntes indesejadas:

- Energização do reator shunt;
- Desenergização do reator shunt;
- Remoção de um curto-circuito externo próximo ao reator;
- Saturação dos TCs devido às altas correntes de curto-circuito;
- Sobreexcitação do reator.

### **2.2.1 ENERGIZAÇÃO DE REATORES SHUNT**

A energização de um reator shunt dá origem a uma “corrente de inrush” - um fenômeno transitório relacionado com a saturação do circuito magnético do reator. Este fenômeno é similar a corrente de energização de um transformador. Entretanto uma diferença importante é que o amortecimento da condição assimétrica - componente de nível DC - é lento, devido às baixas perdas inerentes a um reator shunt, dependendo também da relação X/R do sistema. Portanto, o conhecimento desse fenômeno é necessário para se projetar o sistema de proteção dos reatores shunt.

A Figura 2.4 ilustra os valores instantâneos, obtidos a partir de simulação, das correntes secundárias de fase de um banco de reatores shunt, 500 kV – 165 MVar, durante sua energização. A Figura 2.5 ilustra este mesmo evento, através de registros obtidos em campo, quando da energização de um reator shunt 440 kV – 99,2 MVar [4]. Observa-se um nível DC elevado nas correntes.

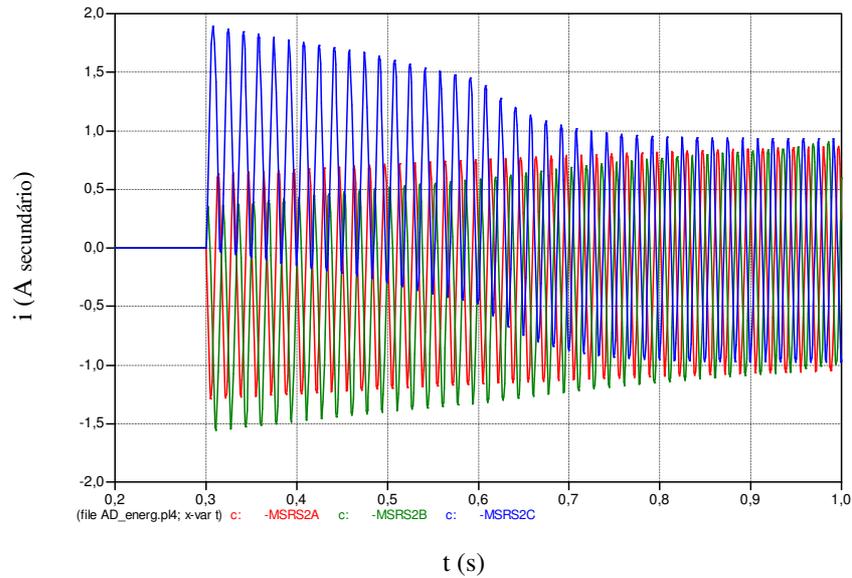


Figura 2.4 – Correntes de fase de um banco de reatores shunt durante a sua energização – simulação

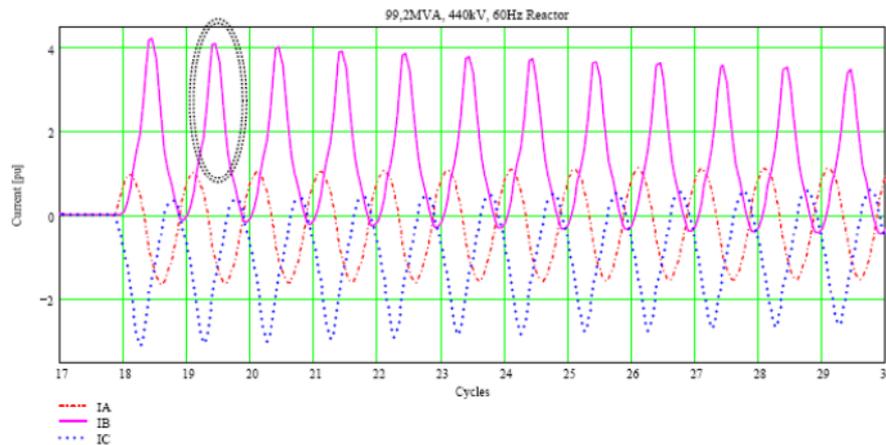


Figura 2.5 – Correntes de fase de um banco de reatores shunt durante a sua energização [4]

O nível de componente DC depende do instante do chaveamento do reator, sendo a pior condição quando a fase é fechada no instante zero de tensão. Isto ocorre por que neste instante tanto a corrente quanto o fluxo magnético irão começar a aumentar a partir do zero, e não a partir do pico negativo, que seria a posição das mesmas durante a operação normal no instante zero de tensão. Desta forma, na energização do reator, o fluxo vai atingir, aproximadamente, o dobro de sua magnitude

normal, correspondente à "integral" da área da onda de tensão na primeira metade do ciclo. Este efeito reflete no aumento proporcional da corrente apenas até a densidade de fluxo atingir o ponto de saturação do núcleo, pois acima do ponto de saturação a corrente vai aumentar bem mais rapidamente. Sendo assim, o pico de corrente, durante a energização do reator, pode chegar a um valor de 3 a 5,5 vezes a corrente nominal [4], dependendo em particular dos detalhes de projeto do reator shunt. Uma característica importante da corrente de inrush é o elevado conteúdo de 2º harmônico presente. Esta particularidade se torna útil para os relés de proteção fazerem a sua distinção e inibir o seu comando de disparo.

A Figura 2.6, a seguir, ilustra a influência desta corrente no sistema de proteção, onde é apresentada uma oscilografia de uma tentativa de fechamento de uma LT 345 kV do SIN – Sistema Interligado Nacional, onde operou a proteção diferencial percentual (87), fase C, com bloqueio do banco de reatores no instante do fechamento do 2º terminal da linha de transmissão. Após análise gráfica foi possível observar a existência de uma corrente diferencial na fase C, ligeiramente acima do limiar de operação do relé diferencial do reator devido às diferentes respostas dos TCs de bucha do reator perante a corrente de inrush.

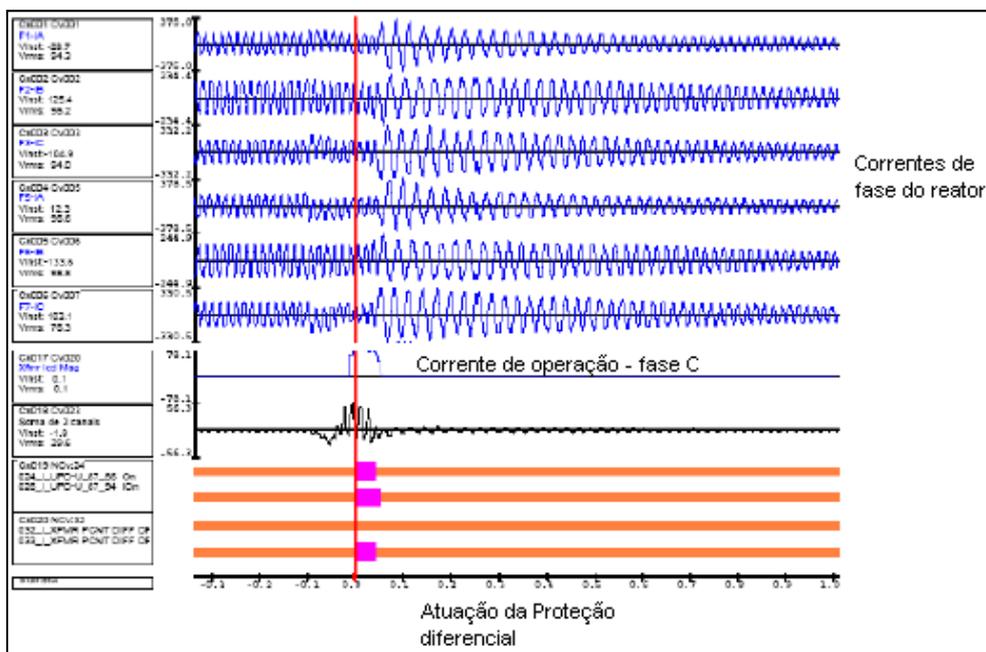


Figura 2.6 – Caso real de atuação incorreta de proteção de reator, frente a uma corrente de inrush

Outro fator importante é que na prática, durante a energização do reator, as suas fases não são fechadas no mesmo instante, de forma que a combinação dos deslocamentos individuais das fases gera uma corrente de neutro rica em harmônicos, conforme pode ser observado na Figura 2.7. Esta figura apresenta a corrente secundária de neutro, de um banco de reatores shunt, 500 kV – 165 MVar, durante a sua energização, como obtida por simulação. Este fenômeno deve ser considerado quando da definição dos ajustes das proteções de sobrecorrente residual e de neutro.

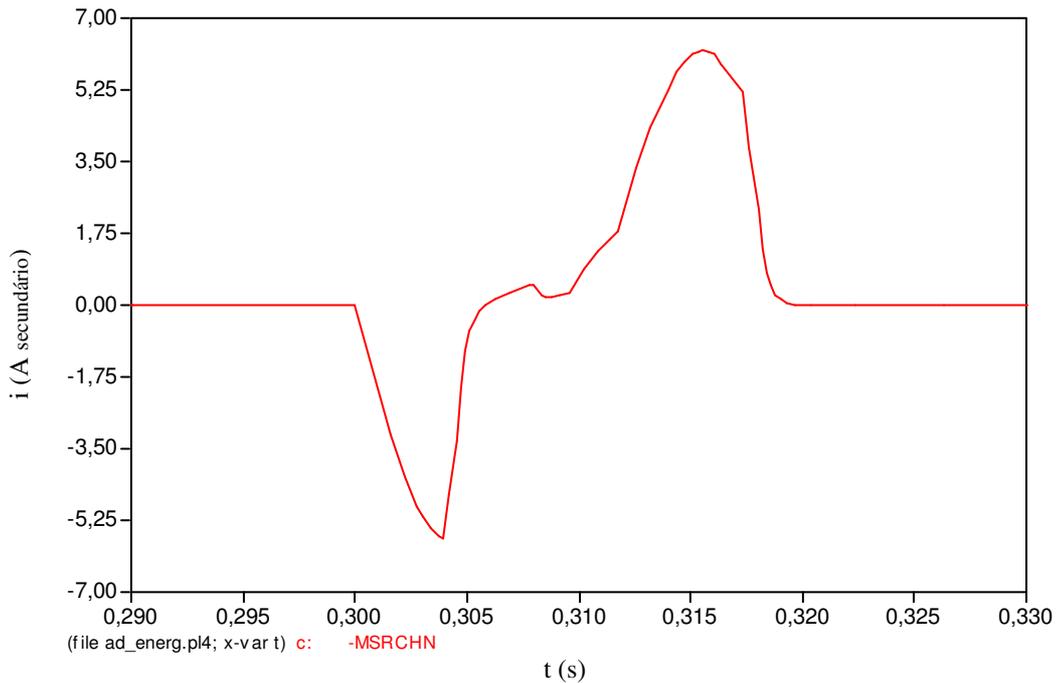


Figura 2.7 – Corrente de neutro de um banco de reatores shunt durante a sua energização

## 2.2.2 DEENERGIZAÇÃO DE REATOR SHUNT

A interrupção da corrente primária faz com que um fenômeno transitório apareça no circuito secundário do transformador de corrente - TC. Este fenômeno consiste em uma corrente com elevado nível DC que decresce exponencialmente. Esta corrente no secundário do TC não tem correspondência no sistema elétrico de potência. Este fenômeno pode ser explicado simplesmente como uma descarga de energia magnética armazenada no núcleo magnético do TC. Normalmente, para reatores, estas correntes são muito pequenas não representando problemas para os esquemas de proteção dos reatores com relés numéricos.

### **2.2.3 REMOÇÃO DE UM CURTO-CIRCUITO EXTERNO PRÓXIMO AO REATOR**

Na ocorrência de uma falta externa próxima do reator, quando da sua eliminação, a tensão sobre este equipamento excursiona de um valor de falta para um valor pós-falta, desta forma a correspondente variação do fluxo produzirá saturação no circuito magnético e produzirá uma crista muito grande na corrente de magnetização.

Este comportamento é similar àquele que ocorre durante a energização do reator, porém de menor amplitude, visto que nessa condição, o reator permanece em carga o que amortece o efeito do Inrush.

### **2.2.4 SATURAÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE DEVIDO ÀS ALTAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO**

O transformador de corrente, segundo a ABNT [7], é um equipamento destinado a reproduzir no seu circuito secundário a corrente do seu circuito primário, mantendo substancialmente a sua posição fasorial, com uma proporção definida e conhecida, adequada ao uso de equipamentos de medição, proteção e controle.

O comportamento do TC durante um curto-circuito depende da inter-relação das características do sistema com as características próprias do TC, bem como do instante de estabelecimento do curto-circuito.

Quando a densidade de fluxo no núcleo do TC entra na região de saturação ocorre uma distorção significativa na forma de onda da corrente secundária do dispositivo. Portanto, a corrente secundária de um TC pode não representar precisamente a sua corrente primária se o dispositivo saturar. Assim, os relés que dependem desta corrente podem facilmente operar de forma incorreta durante este período, comprometendo a eficiência da proteção do equipamento em questão.

Além de valores elevados de corrente de falta, a presença de componente DC na mesma também pode levar um TC à saturação. Isto ocorre por que a componente contínua introduz no núcleo do TC um fluxo contínuo sobre o qual oscila o fluxo resultante da componente alternada. Desta forma, uma corrente deslocada por componente DC necessita de uma corrente de excitação maior do que a curva de excitação secundária indicaria. Por conseguinte, a resposta do TC para esse tipo de corrente é menor do que a esperada.

Outra situação que também contribui com a saturação de TC é o religamento quando ainda existir fluxo remanescente no núcleo do TC.

A duração dessa condição de saturação é diretamente proporcional à relação X/R do sistema. Lembrando que próximo a unidades geradoras a relação X/R é alta, a seleção dos TCs adjacentes e os projetos de proteção devem considerar essa característica.

Portanto a possibilidade de saturação dos TCs deve ser criteriosamente abordada no projeto de um sistema de proteção.

No intuito de ilustrar a resposta de um TC saturado, é apresentado na Figura 2.8, a seguir, a oscilografia de um caso real de saturação de TC, ocorrido na UHE Serra da Mesa, provocando o desligamento de uma de suas unidades geradoras, por atuação incorreta da proteção diferencial do gerador para uma falha externa monofásica, com um elevado nível DC, envolvendo a fase C. Ressalta-se que como a falta monofásica ocorreu no lado de alta do transformador elevador da referida unidade geradora, ligado em estrela aterrada, o mesmo foi “visto” pelo lado primário, ligado em delta, como uma falta bifásica envolvendo as fases B e C. Conforme observado na oscilografia, o TC da fase C reproduziu corretamente a corrente primária, enquanto o TC da fase B saturou, ocasionando a atuação incorreta da proteção diferencial do gerador.

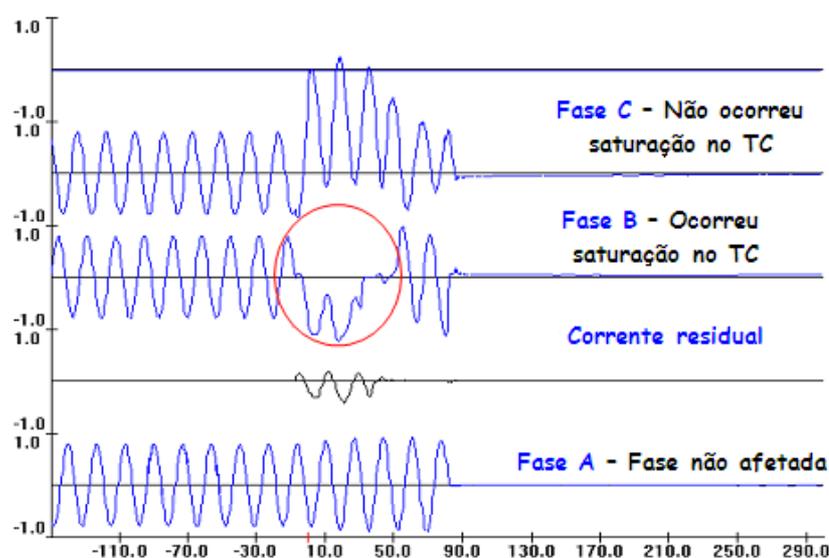


Figura 2.8 – Caso real de saturação de TC

A figura a seguir apresenta a decomposição harmônica da forma de onda da corrente da fase B onde ocorreu o fenômeno de saturação do TC, apresentado na Figura 2.8. A partir desta análise harmônica, pode se observar a predominância do 2º harmônico seguido de forte presença de 3º harmônico.

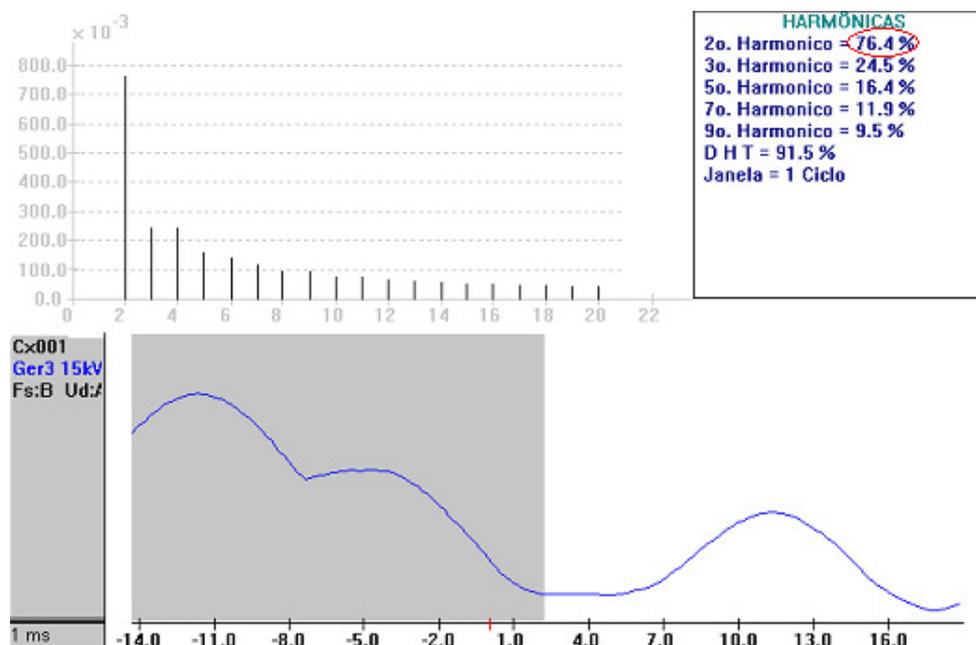


Figura 2.9 – Análise harmônica do caso de TC saturado

### 2.2.5 SOBREEXCITAÇÃO DE REATOR SHUNT

O fluxo magnético no núcleo do reator é diretamente proporcional à tensão aplicada e inversamente proporcional à frequência do sistema. Condições de sobretensão e/ou subfrequência podem produzir níveis de fluxo que saturam o núcleo do reator.

A sobreexcitação causa o aquecimento do reator, além de aumento na corrente de excitação, ruído e vibração. Uma severa sobreexcitação pode trazer danos ao equipamento, caso o mesmo não seja desconectado do sistema. Como as proteções elétricas do reator não controlam o nível de sobreexcitação que este equipamento pode tolerar, a sua atuação nesta situação é indesejada.

Visto que esse fenômeno gera um aumento nos valores de magnetização, uma característica peculiar à sobreexcitação do reator é a significativa presença de harmônicos ímpares, principalmente os de 3º e 5º ordem na corrente de excitação.

### 3 PROTEÇÃO DE REATORES SHUNT

O sistema de proteção do reator shunt deve ser projetado para enviar comando de disparo na detecção de qualquer das seguintes condições:

- falhas internas para a terra;
- falhas internas entre fases;
- falhas entre espiras;
- falhas na Bucha;
- sobreaquecimento.

Os reatores shunt devem dispor de três sistemas de proteção independentes, de acordo com os Procedimentos de Rede: proteção unitária ou restrita, proteção gradativa ou irrestrita e proteção intrínseca, que deve ser ajustada de acordo com a recomendação de seu fabricante, referência [5].

O sistema de proteção unitária ou restrita deve detectar e eliminar, de forma seletiva, e sem retardo de tempo intencional, falhas associadas ao reator, operando dentro de uma área designada, ou seja, a área entre os TCs de bucha e os TCs do lado do neutro do reator. As proteções unitárias ou restritas do reator são as proteções diferenciais de fase e de terra restrita.

O sistema de proteção gradativa ou irrestrita deve detectar e eliminar falhas que ocorram no reator e pode fornecer proteção adicional para os componentes adjacentes. Em sua aplicação como proteção de retaguarda, sua atuação é coordenada com a atuação das proteções dos equipamentos adjacentes por meio de retardo de tempo intencional. As proteções gradativas ou irrestritas do reator são as proteções de sobrecorrente de fase, residual e neutro.

O sistema de proteção intrínseca é o conjunto de dispositivos de proteção normalmente integrados ao reator, tais como relés de gás, válvulas de alívio de pressão, sensores de temperatura, sensores de nível de óleo, etc.

Para os reatores de sistemas de alta e extra-alta tensão, deve haver redundância nos sistemas de proteção para cobrir diversos tipos de falhas de equipamentos. Isso inclui sistemas de dupla proteção (principal e alternada) com sistemas de bateria dual,

alimentação obtida de núcleos independentes de transformadores de corrente e saídas para acionar disjuntores com dois circuitos de disparo independentes. Em esquemas de proteção modernos, são utilizados relés numéricos multifuncionais que incorporam as diversas funções de proteção no mesmo IED (Intelligent Electronic Device).

As proteções unitárias e gradativas podem ser utilizadas nos seguintes esquemas de proteção, dependendo do projeto e disponibilidade de TC:

- Com TC antes do fechamento do neutro e no neutro no Reator, conforme apresentado na Figura 3.1, ressaltando que a proteção diferencial de terra restrita também pode ser conectada nos circuitos residuais dos TCs de fase;

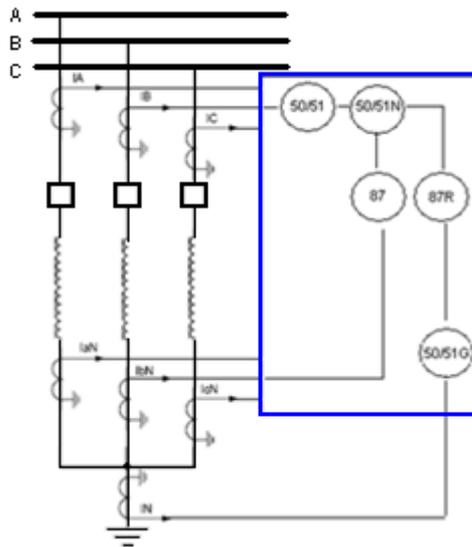


Figura 3.1 – Esquema de proteção de reatores com TC no neutro

- Sem TC no neutro do Reator, conforme apresentado na Figura 3.2.

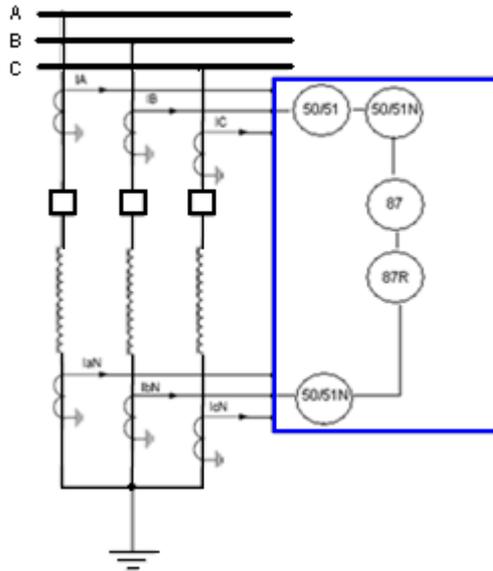


Figura 3.2 – Esquema de proteção sem TC no neutro

### 3.1 PROTEÇÕES UNITÁRIAS

As proteções unitárias dos Reatores são as Proteções Diferenciais por fase e de Terra Restrita.

#### 3.1.1 PROTEÇÃO DIFERENCIAL

O princípio de atuação da Proteção Diferencial consiste na comparação das correntes que entram e saem do equipamento protegido. Esta comparação é baseada na 2ª lei de Kirchhoff, a Lei dos Nós, que determina que, em qualquer instante, a soma algébrica das correntes que entram e saem num nó é nula.

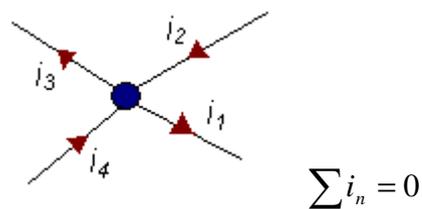


Figura 3.3 – 2ª lei de Kirchhoff – Lei dos Nós

Desta forma, a comparação das correntes que entram e saem do equipamento

protegido, em condições ideais e normais de funcionamento, se comporta da seguinte maneira:

- Para faltas externas → são iguais, logo, como a sua diferença é nula, não circula corrente no circuito de operação, caracterizando que não existe problema no equipamento protegido, permanecendo o relé bloqueado.

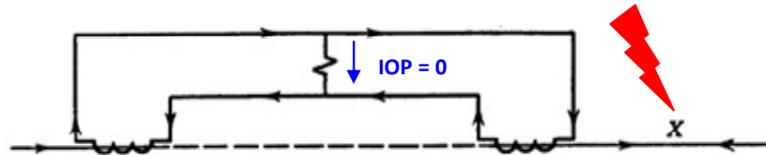


Figura 3.4 – Proteção Diferencial – Falta Externa

- Para as faltas internas → estas correntes são diferentes e fluem ambas no sentido do equipamento protegido, logo, circula corrente no circuito de operação e quando essa corrente atingir um valor considerável, ultrapassado um valor predefinido, denominado corrente de pickup, o relé opera desconectando o equipamento do sistema. Normalmente para falhas internas a corrente que circula no circuito de operação do relé é igual a corrente de curto-circuito total, vista do secundário dos TCs que compõem a malha diferencial.

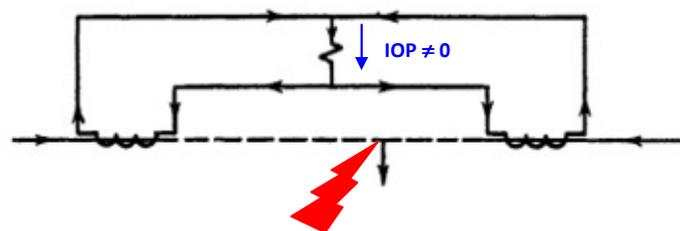


Figura 3.5 – Proteção Diferencial – Falta Interna

Para a aquisição das correntes passantes pelo equipamento protegido utilizam-se TCs, acoplados em série ao sistema, de forma que as correntes obtidas nos secundários dos mesmos reproduzam as correntes que circulam no primário. Estes sinais de corrente

são transferidos para o relé diferencial a partir da interconexão dos secundários desses TC.

A Figura 3.6 apresenta, a partir de um diagrama simplificado, a conexão de um Relé Diferencial.



Figura 3.6 – Conexão do Relé Diferencial

### 3.1.1.1 APLICAÇÃO DO PRINCÍPIO DIFERENCIAL À PROTEÇÃO DE REATORES

Conforme apresentado no item anterior, o elemento diferencial deve ser sensível aos defeitos internos e indiferentes aos defeitos externos, ou seja, que ocorram fora da zona de proteção. É comum a utilização da proteção diferencial de fase e a de terra restrita, a qual utiliza a corrente residual medida nos TCs instalados no lado de alta tensão ( $I_A+I_B+I_C$ ) associada à corrente residual medida nos TCs instalados próximo ao neutro do reator ( $I_a+I_b+I_c$ ), ou até mesmo, a corrente de neutro ( $I_N$ ), opção para os casos onde há TC no neutro do reator.

Todavia, na aplicação da proteção diferencial em reatores, é sabido que mesmo em condições normais de operação a proteção diferencial sempre trabalha com uma corrente diferencial não nula, corrente de erro, proveniente das seguintes causas:

- corrente de inrush do reator, durante manobras de energização, conforme apresentado no capítulo 2;
- desequilíbrio natural entre as fases de um banco de reatores em função dos aspectos construtivos das mesmas (afeta a proteção diferencial de terra restrita);
- erros intrínsecos dos transformadores de corrente utilizados para aquisição das correntes;

— erros na adequação das relações de transformação dos transformadores de corrente utilizados para aquisição das correntes (erro de mismatch).

Desta forma, ao longo do tempo, no sentido de evitar que a proteção diferencial atue para estas situações, esta tem sido aperfeiçoada, onde novas características foram acrescentadas. Essa evolução deu origem à “Proteção Diferencial Percentual”, que atualmente é o esquema de proteção mais utilizado para reatores e transformadores de potência.

Neste tipo de proteção, foi introduzido o conceito de circuito de restrição, cujo objetivo é fazer com que o relé não seja sensibilizado por pequenas correntes diferenciais, impedindo a operação indesejável nesses casos.

A Figura 3.7, a seguir mostra como a bobina de restrição é conectada à bobina de operação no relé diferencial percentual eletromecânico.

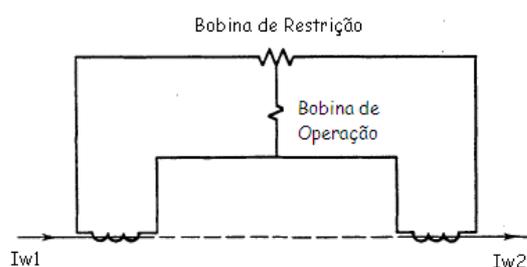


Figura 3.7 – Relé Diferencial Percentual

O princípio destes relés está na comparação, pelos elementos diferenciais do relé, da corrente de operação ( $I_{OP}$ ) com a corrente de restrição ( $I_{RT}$ ).

A corrente de operação, também chamada de corrente diferencial, pode ser obtida a partir do módulo da soma das correntes medidas em ambos os lados do elemento protegido, com os TCs conectados conforme Figura 3.6, conforme apresentado na Equação 3.1.

$$I_{op} = |I_{w1} + I_{w2}| \quad (3.1)$$

Para as condições de operação a corrente de operação ( $I_{OP}$ ) é proporcional a corrente de falta interna e aproximadamente zero para as faltas externas ao elemento protegido.

A corrente de restrição ( $I_{RT}$ ) pode ser obtida a partir da média dos módulos das correntes medidas em ambos os lados do elemento protegido, com os TCs conectados conforme Figura 3.6, pois a bobina de operação está conectada ao centro da bobina de restrição, conforme a equação abaixo:

$$I_{RT} = \frac{|I_{w1}| + |I_{w2}|}{2} \quad (3.2)$$

Portanto, a característica do Relé Diferencial Percentual é dada a partir da equação abaixo:

$$I_{OP} = k * I_{RT} + I_{PK} \quad (3.3)$$

Onde:

$I_{OP}$ : corrente de operação;

$I_{RT}$ : corrente de restrição;

$I_{PK}$ : corrente de pickup do relé, ou seja, é a corrente mínima para a operação do mesmo;

$I_{w1}$ : corrente secundária referente ao TC do lado 1 do equipamento protegido (Figura 3.7);

$I_{w2}$ : corrente secundária referente ao TC do lado 2 do equipamento protegido (Figura 3.7);

$k$ : inclinação da característica diferencial, também chamado de Slope.

O Slope é um parâmetro ajustável no relé, que representa a inclinação da característica diferencial podendo ser expresso em valores percentuais, com ajustes típicos de 10 a 40% em características com apenas um Slope. O ângulo ( $\alpha$ ) da característica pode ser obtido a partir da equação a seguir.

$$\alpha = \arctan(k) \quad (3.4)$$

O ajuste correto do parâmetro ( $k$ ) e da corrente mínima de operação ( $I_{PK}$ ), que torna o dispositivo tolerante a uma pequena corrente diferencial próxima a origem da característica do relé, minimiza pelo menos alguns problemas apresentados

anteriormente: erros intrínsecos dos TCs, incompatibilização nas relações de transformação dos TCs e desequilíbrios naturais. Todavia, vale ressaltar que, quanto maior esse ajuste, menor a sensibilidade do relé para faltas internas.

A seguir, na Figura 3.8, é apresentada uma característica de operação típica de um Relé Diferencial Percentual, com as regiões de operação e restrição definidas, além da corrente mínima de pickup do relé ( $I_{PK}$ ).

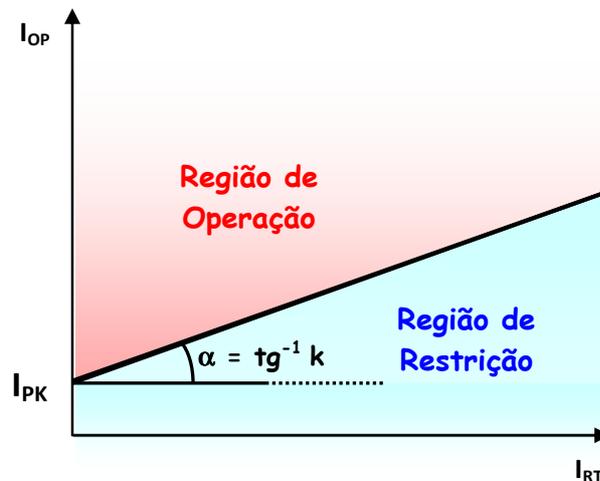


Figura 3.8 – Característica do Relé Diferencial Percentual

Ainda para evitar a atuação incorreta da proteção diferencial para correntes de inrush e condições de sobreexcitação do reator, os relés diferenciais dispõem de lógicas de restrição ou bloqueio por análise harmônica.

Nos relés digitais, através das facilidades disponíveis pelas técnicas de filtragem, os elementos de harmônicas pares (segunda e quarta harmônicas) filtrados são utilizados para identificação de correntes de inrush, da mesma forma que o elemento de quinta harmônica é utilizado para evitar a operação indevida do relé durante condições admissíveis de sobreexcitação, sendo complementados pelo elemento DC, que mede o deslocamento da corrente provocado por componente DC (offset).

Os elementos de harmônicas, nos relés digitais, permitem a escolha entre o bloqueio por harmônicas e a restrição por harmônicas, ou até mesmo a habilitação dos dois métodos. No modo bloqueio, este é selecionado tendo como base uma fase

individual ou considerando uma base comum, de acordo com a aplicação e filosofia. Os valores limites da segunda, quarta e quinta harmônicas são ajustados independentemente, assim como as funções de restrição por harmônica e bloqueio por componente DC, que também são habilitadas independentemente. Alguns relés digitais, ainda oferecem uma função adicional de alarme para a corrente de quinta harmônica utilizando um valor limite, qualquer, e um temporizador ajustável para alarme.

Ressalta-se que, conforme apresentado no capítulo anterior, elevadas correntes de falta podem provocar saturação de TC, onde há predominância do 2º harmônico. Caso estas faltas sejam internas, é importante lembrar que pode haver uma interpretação errônea de relés com bloqueio de 2º harmônico, visto que a forte presença desta componente caracteriza uma corrente de inrush, bloqueando a operação desses relés. Ou seja, os ajustes destas funções devem ser criteriosos no sentido de não interferir na sensibilidade da proteção para faltas internas.

### **3.2 PROTEÇÕES GRADATIVAS**

As Proteções Gradativas dos Reatores são as seguintes:

- **Lado de AT** - Proteções de Sobrecorrente de Fase (50/51) e Proteção de Sobrecorrente Residual (50/51N).
- **Lado do Neutro** - Proteções de Sobrecorrente Residuais (50/51N) ou Proteções de Sobrecorrente de Neutro (50/51 G).

#### **3.2.1 PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE**

A proteção de sobrecorrente, conforme sugerido pelo próprio nome tem como grandeza de operação a corrente elétrica do sistema elétrico de potência. Esta função pode ser aplicada para a proteção de diversos componentes do sistema, tais como linhas de transmissão, transformadores, geradores, reatores, e até mesmo SEP – Sistemas Especiais de Proteção.

Quanto à característica tempo x corrente, a função de sobrecorrente pode ser classificada em: instantânea (função 50 – ANSI) ou temporizada (função 51 – ANSI).

A função de sobrecorrente instantânea é assim denominada porque não é

introduzida nenhuma temporização intencional quando se atinge o limiar da corrente de disparo (corrente de pickup do relé – parâmetro ajustável). Sua atuação apresenta apenas uma temporização inerente, que depende da tecnologia e da construção do relé.

Os elementos temporizados, nos relés digitais, possuem basicamente, os seguintes ajustes: corrente de “pickup”, a definição da curva de tempo e o “time-dial”, exceto os de tempo definido, onde além do pickup é ajustado apenas o temporizador associado, definindo o seu tempo de atuação. A corrente de pickup é ajustada em função das correntes de curto-circuito e o “time-dial” é ajustado de acordo com as temporizações requeridas para a coordenação, utilizando-se as equações apresentadas para a curva escolhida.

As características de resposta das funções de sobrecorrente são representadas num gráfico em função de um múltiplo da corrente de pickup versus tempo (segundos), para cada ajuste de “time-dial”. A seguir serão apresentadas as equações, normalmente utilizadas nos relés digitais baseadas nas normas IEC e ANSI.

#### a) Curvas de Tempo Inverso IEC (IEC 60255-3)

As curvas de tempo inverso da norma IEC são baseadas na equação apresentada a seguir e são classificadas de acordo com a tabela 1, em função dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ .

$$T = TD \times \frac{\beta}{(M^{\alpha-1,0})} (seg) \quad (3.5)$$

onde:

$T$ : Tempo de Atuação;

$TD$ : Time-Dial;

$M$ : Multiplicador, calculado a partir da seguinte equação:

$$M = \frac{I_{cc}}{(RTC \times P)} \quad (3.6)$$

$I_{cc}$ : Corrente de curto-circuito;

$P$ : Ajuste de pickup;

*RTC*: Relação de Transformação do TC.

$\alpha$  e  $\beta$  → Constantes que variam conforme tabela a seguir:

Tabela 3.1– Classificação de curvas segundo a norma IEC-60255-3

<b>Classificação</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>\beta</math></b>
Normal Inversa	0,02	0,14
Muito Inversa	1,0	13,5
Extremamente Inversa	2,0	80,0
Inversa de Tempo Longo	1,0	120

O TD influencia no posicionamento da curva com relação ao tempo, e quanto menor o TD, mais rápida será a atuação do relé para a mesma corrente.

A figura a seguir apresenta a curva de tempo normal inversa segundo a norma IEC-60255-3.

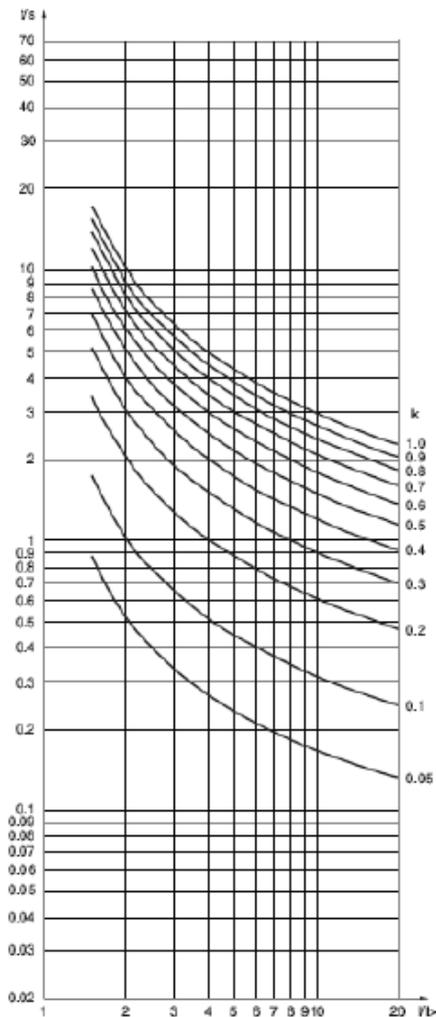


Figura 3.9 – curva normal inversa segundo a norma IEC-60255-3.

**b) Curvas de Tempo Inverso ANSI (IEEE C37-112)**

As curvas de tempo inverso ANSI são baseadas na equação apresentada a seguir e são classificadas de acordo com a tabela 2, em função dos parâmetros A, B e P.

$$T = TD \times \left( \frac{A}{(M^P - 1,0)} + B \right) (seg) \tag{3.7}$$

onde:

*T*: Tempo de Atuação;

*TD*: Time-Dial;

*M*: Multiplicador, calculado a partir da seguinte equação:

$$M = \frac{I_{cc}}{(RTC \times P)} \quad (3.8)$$

*I<sub>cc</sub>*: Corrente de curto-circuito;

*P*: Ajuste de pickup;

*RTC*: Relação de Transformação do TC.

*A*, *B* e *P*: Constantes que variam conforme tabela abaixo:

Tabela 3.2 – Classificação de curvas segundo a norma IEEE C37-112

<b>Classificação</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>P</b>
Extremamente Inversa	6,4070	0,0250	2,00
Muito Inversa	2,8550	0,0712	2,00
Inversa	0,0086	0,0185	0,02

A figura a seguir apresenta a curva de tempo inversa segundo a norma IEEE C37-112.

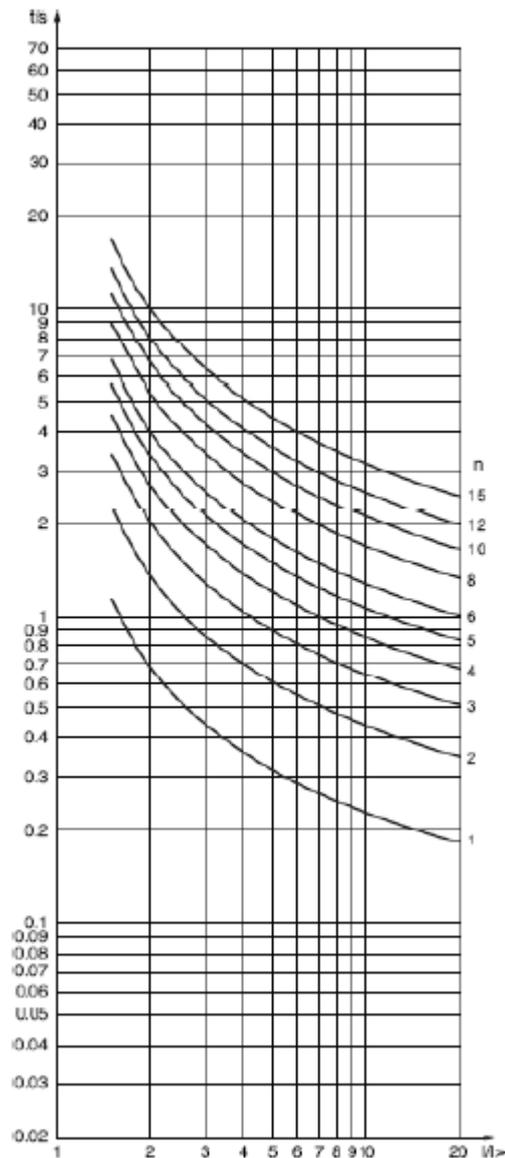


Figura 3.10 – curva inversa ANSI segundo a norma IEEE C37-112.

### 3.3 PROTEÇÕES INTRÍNSECAS DO REATOR

A seguir serão apresentadas as principais proteções intrínsecas do reator, cujos ajustes necessários devem respeitar as orientações do fabricante, tais como: Relé detector de gás (tipo Buchholz), Relé de temperatura de óleo e Relé de temperatura de enrolamento.

#### 3.3.1 RELÉ DETECTOR DE GÁS (TIPO BUCHHOLZ)

O relé de gás é instalado imerso em óleo e detecta as falhas de isolamento que

causam tanto a formação de gás quanto a movimentação de óleo para o tanque de expansão. Isso se aplica a falhas internas para a terra ou entre espiras. O relé também detecta perdas de óleo causado por vazamentos, bem como defeitos, tais como condutores quebrados e conexões desgastadas.

O relé possui duas bóias internas, e sua operação ocorre em dois estágios:

- **Primeiro estágio** - A atuação do primeiro estágio ocorre quando há produção lenta de gás devido a uma falha de isolamento, por exemplo.
- **Segundo estágio** - Já a atuação do segundo estágio ocorre quando há formação de gás em grandes quantidades, comum quando ocorre curto-circuito interno, ou vazamento de óleo. Nesse caso é feito o desligamento do reator.

### **3.3.2 RELÉ DE TEMPERATURA DE ÓLEO**

A proteção de temperatura de óleo se destina a manter o óleo sem a deterioração das suas propriedades isolantes protegendo o equipamento de falhas com riscos de incêndio.

As proteções de temperatura de óleo modernas são geralmente compostas por um ou dois sensores de temperatura, localizado na parte superior do reator, de modo a medir a temperatura do óleo do topo. Geralmente, por redundância, dois sensores são utilizados para a medição de temperatura. Isto pode ser de grande vantagem, considerando que a substituição do sensor, apenas é possível com o reator desligado.

Geralmente, estas proteções possuem configurações eletrônicas programáveis com dois níveis de ação: Um primeiro nível de alarme e um segundo nível de comando de desligamento do reator, para temperaturas muito elevadas. Geralmente este comando de desligamento passa por um temporizador ajustado para vários minutos (em torno de 20 minutos), para permitir ação dos operadores da subestação, uma vez que, em função da inércia térmica do óleo, a variação de temperatura é bastante lenta.

### **3.3.3 RELÉ DE TEMPERATURA DE ENROLAMENTO**

A proteção de temperatura de enrolamento tem como objetivo manter o

isolamento sólido entre as espiras, evitando a deterioração do material isolante e diminuindo os riscos de falhas entre espiras.

A medição da temperatura do enrolamento é feita pelo processo de imagem térmica, que consiste em calcular a temperatura a partir da corrente no enrolamento, obtida por um transformador de corrente.

Geralmente, estas proteções possuem configurações eletrônicas programáveis, com dois níveis de ação, integradas à proteção de temperatura de óleo: com o primeiro nível de alarme e o segundo nível de comando de desligamento do reator, após alguns minutos.

## **4 MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO**

As perturbações decorrentes de faltas e os chaveamentos em sistemas de potência são seguidos sempre de transitórios que, geralmente, envolvem no seu início sobretensões e/ou sobrecorrentes de altas frequências que se estabilizam, após alguns ciclos, nos novos valores de tensão, corrente e frequência.

Para a verificação do comportamento de proteções de alta velocidade e para a especificação e/ou ajuste de dispositivos de proteções convencionais é importante avaliar também as sobrecorrentes e sobretensões que permanecem alguns ciclos após a ocorrência da falta.

A quantificação e a geração dos sinais destes fenômenos elétricos, tanto em regime transitório como em regime permanente, é então, o propósito desta etapa do trabalho.

O programa computacional que foi utilizado na elaboração deste trabalho, para modelar, calcular e gerar os sinais originados dos chaveamentos e faltas dos sistemas em estudo é o ATP/EMTP (Alternative Transients Program/ Electromagnetic Transients Program).

### **4.1 SOFTWARE DE SIMULAÇÃO ATP/EMTP**

O programa ATP/EMTP permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, por um método que utiliza a matriz de admitância de barras. A formulação matemática é baseada no método das características (método de Bergeron) para elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para parâmetros concentrados. Durante a solução são utilizadas técnicas de esparsidade e de fatorização triangular otimizada de matrizes.

Como um programa digital não permite obter uma solução contínua no tempo, são calculados valores a intervalos de tempo discretos.

O programa permite a representação de elementos com parâmetros concentrados, elementos com parâmetros distribuídos, chaves, transformadores, reatores, não-linearidades, etc.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizada uma interface gráfica de processamento de arquivos de dados de entrada da rede a ser simulada com o programa ATP, denominado ATPDraw.

#### **4.2 PROCESSO DE MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO**

Com o objetivo de uma análise mais completa sobre proteção de reatores shunt, foram modeladas duas redes, com aplicações de reatores shunt de características diferentes. Estas diferenças refletem em diferentes cuidados nos projetos de seus sistemas de proteção. Sendo estes os seguintes:

Modelo 1 – Banco trifásico de reator shunt de linha de transmissão de 500 kV, conectado em estrela solidamente aterrada (LT 500 kV Adrianópolis – Cachoeira Paulista C2). Trata-se de uma linha de transmissão com dois circuitos paralelos, onde será avaliado o efeito do acoplamento mútuo entre circuitos para a proteção do reator. A seguir serão apresentados os dados do reator shunt:

Tipo: Siemens EO 06 000318

Refrigeração: óleo isolante e radiadores (ONAN)

Potência Nominal do Banco: 165 MVar (3 x 55 MVar)

Tensão Nominal: 550 kV /  $\sqrt{3}$  fase-neutro

TC de fase: 10B100 – RM 1200 - 5 A

TC de Neutro: 10B400 – 200 - 5 A

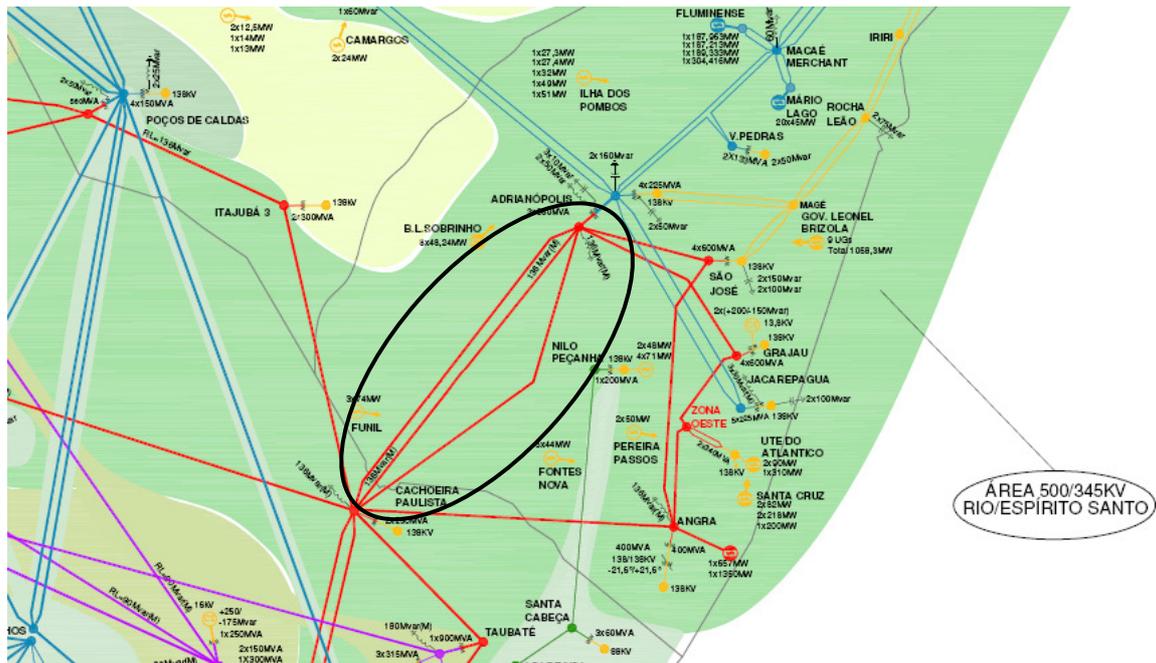


Figura 4.1 – Modelo 1 - LT 500 kV Adrianópolis – Cachoeira Paulista C2

Modelo 2 – Banco trifásico de reator shunt de linha de transmissão de 345 kV, conectado em estrela aterrada através de reator e resistor de aterramento (LT 345 kV Ouro Preto 2 – Vitória). Trata-se de uma linha de transmissão longa, de 383 Km, onde nos processos de recomposição são verificados fechamento de paralelo de sistemas com defasagens angulares de tensão elevadas. A seguir serão apresentados os dados do reator shunt e reator e resistor de aterramento:

— **Reator Shunt:**

Tipo: 7356 Siemens

Nº de Fases: 1 (uma)

Frequência: 60 Hz

Normas: NBR 5119-NBR 7569

Potência Nominal (ONAN): 22 MVar

Tensão Nominal (V):  $362\ 000 / \sqrt{3}$

Corrente Nominal (ONAN): 105,3 A

Impedância a 75° C com tensão nominal: 1957 ohms

Indutância a 75°C com tensão nominal: 5,19H

— **Reator de Aterramento do Neutro:**

Tipo: 4549 Siemens

Nº de Fases: 1 (uma)

Frequência: 60 Hz

Normas: NBR-5119-NBR 7569

Potência Nominal Contínua (ONAN): 43 KVAr

Tensão Nominal Contínua: 4300 V

Corrente Nominal (ONAN): 10 A

Potência Nominal Curta Duração (0,5s): 9041 kVAr

Tensão Nominal Curta Duração: 62350 V

Corrente Nominal Curta Duração: 145 A

Impedância a 75°C com tensão nominal: 444,8 ohms

Indutância a 75°C com tensão nominal: 1180 H

— **Resistor de Aterramento:**

Potência Nominal: 4,5 kW

Resistência Nominal: 45 ohms

Corrente Permanente: 10 A

Corrente em 500ms (0,5s): 145 A

Corrente em 5 ciclos: 285 A

— **Transformadores de Corrente:**

TC de fase: 10B200 – 1000 - 5 A

TC de Neutro: 10B200 – 200 - 5 A

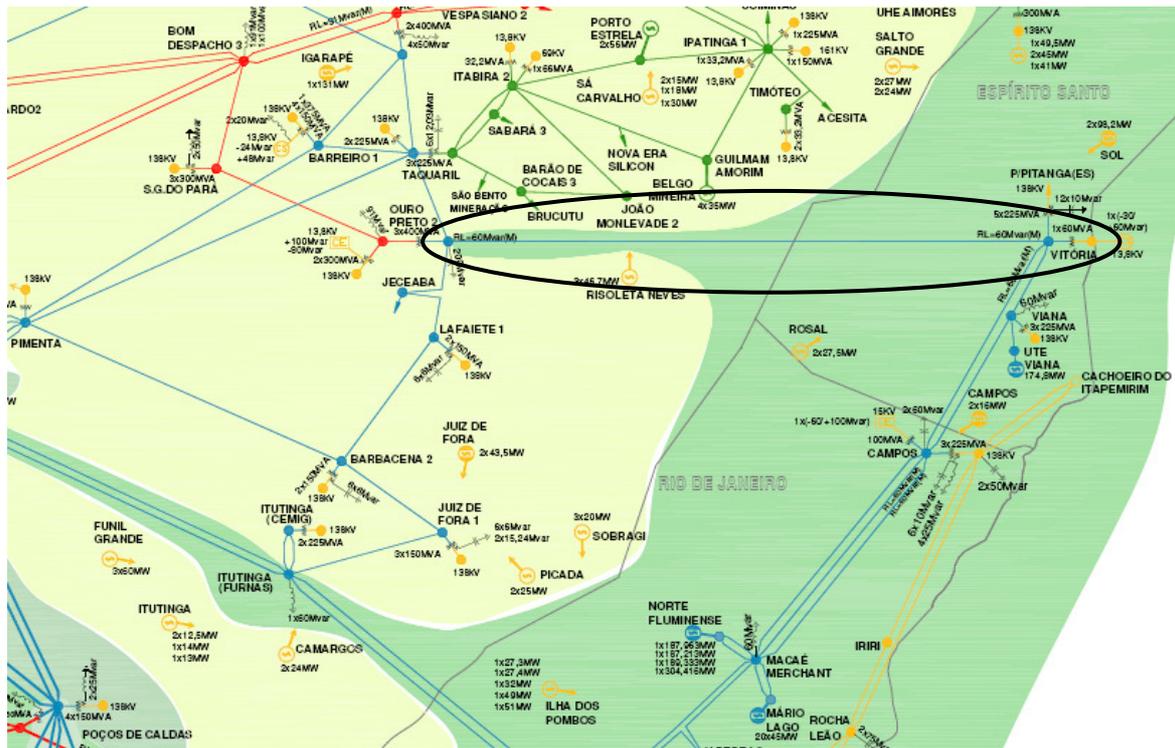


Figura 4.2 – Modelo 2 - LT 345 kV Ouro Preto 2 – Vitória

Devido às dimensões e a complexidade dos sistemas, o primeiro passo para preparar os modelos é delimitar o trecho em estudo, especificando quais linhas e barras do sistema estarão envolvidas, visto que a representação de todo o sistema é inviável para simulações de transitórios eletromagnéticos.

A rede elétrica simulada considerou a representação detalhada de equipamentos conectados até pelo menos uma distância elétrica de dois barramentos dos pontos de manobra, conforme recomendado nos Procedimentos de Rede do ONS, submódulo 23.3 - Diretrizes e critérios para estudos elétricos [8]. Assim, para representar o sistema elétrico como um todo, em tamanho compatível com a capacidade de representação do software, é preciso reproduzir o resto do sistema representado sob a forma de impedâncias de transferência entre as barras representadas e unidades geradoras equivalentes. Desta forma, a representação reduzida do sistema, consistindo de um menor número de barras, linhas, transformadores e geradores, permitem reproduzir, sem perda significativa de precisão, o comportamento transitório do sistema.

Calcular um equivalente transitório sem uma ferramenta computacional

adequada pode ser uma tarefa extremamente laboriosa e de sucesso duvidoso, principalmente quando é necessário reduzir drasticamente a dimensão do sistema original e representar o efeito produzido por muitas unidades geradoras e seus controles através de poucas unidades equivalentes.

Visando reduzir o esforço e o tempo gasto na realização desta tarefa, e melhorar a qualidade do equivalente representado, geralmente estes equivalentes são calculados com o auxílio de um software. O software utilizado neste trabalho para os cálculos dos equivalentes do sistema, foi o ANAFAS - Análise de Faltas Simultâneas, do Cepel – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica.

Assim, com trecho a ser representado determinado, e com os equivalentes do sistema calculados, é possível então montar o caso em estudo no ATPDraw.

Os equivalentes de geração e de sistema conectados aos barramentos de fronteira foram modelados por ramos R-L-C série, mutuamente acoplados, reproduzindo os valores das impedâncias de seqüência zero e positiva calculados na freqüência fundamental.

A fim de reproduzir a corrente de desequilíbrio resultante do esquema de transposição dos condutores dos três circuitos existentes entre as SE Cachoeira Paulista e Adrianópolis, referentes ao Modelo 1, bem como o acoplamento eletromagnético e eletrostático entre essas Linhas, a simulação em ATP/EMTP contemplou a seguinte representação: a) os oito trechos de circuito com comprimentos diferenciados foram modelados sob parâmetros constantes com perdas concentradas em três pontos (constant parameter line model); b) os parâmetros série e shunt associados a cada trecho foram modelados em nove modos de propagação distintos; c) os valores dos parâmetros série, shunt e das matrizes de transformação modal-fase foram computados para freqüência até 2KHz. O modelo de simulação adotado para a Linha de Transmissão localizada entre as SEs Oura Preto 2 e Vitória, referente ao Modelo 2, considerou transposição total de forma que foram representados apenas dois modos de propagação distintos (seqüências zero e positiva).

Para concluir o modelo do sistema elétrico no ATPDraw, tornou-se necessário adequar as tensões das barras para um caso de carga pesada, situação mais severa para um curto circuito, e validar o seu comportamento. Para isto, foram utilizados casos de estudo de fluxo de potência, em carga pesada, dos sistemas que estão sendo

representados. A partir dos estudos de fluxo de potência, foram obtidas as seguintes informações: tensão (módulo e ângulo) nas barras envolvidas, geração e carga em cada barra (em MW e MVar), carregamento das linhas e potências dos capacitores ou reatores das barras (em MVar).

A partir das tensões nas barras, foram calculados os valores de tensão (em módulo e ângulo) das fontes de tensão equivalentes. Estes valores foram utilizados nos modelos do ATPDraw e, após simulações, foram obtidos relatórios com os valores de tensão, corrente e potência nos pontos especificados, o que possibilitou a comparação dos carregamentos das linhas nos modelos gerados pelo ATP/EMTP com os valores apresentados nos estudos de fluxo de potência. Após a verificação da coincidência dos valores, considerando uma margem de erro, os modelos foram validados para um caso de fluxo de carga pesada.

### **4.3 MODELAGEM DO REATOR SHUNT**

A modelagem dos Reatores shunt das Linhas de Transmissão, do Modelo 1 e 2, levou em consideração a possibilidade de simulação de defeitos internos envolvendo o enrolamento e o neutro desses equipamentos. A simulação de tal defeito demanda a representação do acoplamento eletromagnético entre as duas bobinas formadas a partir da subdivisão do enrolamento no ponto da falta. A dificuldade desta modelagem reside na determinação do chamado fator de dispersão, ou seja, de uma grandeza associada aos valores de indutâncias próprias e mútuas do enrolamento subdividido na fase sob defeito. A referência [10] apresenta os aspectos teóricos necessários à obtenção do fator de dispersão da bobina subdividida, através de formulação analítica baseada na geometria do enrolamento e dimensões físicas do núcleo ferromagnético.

Na ferramenta ATP/EMTP, tal representação pode ser obtida através da utilização de dois modelos matemáticos: a) ramo R-L mutuamente acoplado; b) transformador/autotransformador de dois enrolamentos (STC model). Ambos os modelos contemplam a representação das perdas ôhmicas da bobina, devendo, entretanto, a saturação magnética ser conectada externamente. Esse trabalho adotou o primeiro modelo sem incluir a representação da saturação magnética devido ao valor elevado do joelho da característica (acima de 1,6 pu).

Com base nas equações apresentadas na referência [11], foram obtidas as

seguintes equações para obtenção da matriz L (dados de entrada do modelo: ramo R-L mutuamente acoplado do ATP/EMTP), correspondentes ao modelo do reator apresentado na figura 4.3. A matriz R é calculada a partir da proporcionalidade direta entre as sub-bobinas formadas após o defeito:

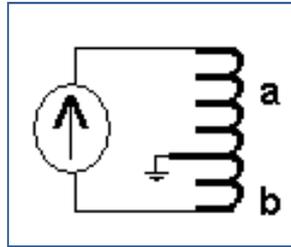


Figura 4.3 – Sub-bobinas formadas no reator shunt, quando de falha interna para terra

$$L_a = \frac{L}{\left(\frac{1}{k^2}\right) + \left(\frac{2\sqrt{1-\alpha_{ab}}}{k}\right) + 1} \quad (4.1)$$

$$L_b = \frac{L}{(k^2) + (2k\sqrt{1-\alpha_{ab}})} \quad (4.2)$$

$$M_{ab} = \frac{L\sqrt{1-\alpha_{ab}}}{\left(k + \frac{1}{k}\right) + (2\sqrt{1-\alpha_{ab}})} \quad (4.3)$$

$$k = \frac{n_a}{n_b} \quad (4.4)$$

Onde:

$\alpha_{ab}$ : Fator de dispersão;

$n_a$  : número de espiras da “sub-bobina” a;

$n_b$  : número de espiras da “sub-bobina” b;

$L_a$  : Indutância própria da “sub-bobina” a;

$L_b$  : Indutância própria da “sub-bobina” b;

$M_{ab}$  : Indutância Mútua entre as sub-bobinas formadas;

$L$ : Reatância original do Reator.

Nas simulações realizadas nesse trabalho, dada a ausência de dados construtivos do Reator, assumiu-se uma faixa de variação entre 1 e 0 para o fator de dispersão, correspondentes ao mínimo e máximo acoplamento eletromagnético entre os dois segmentos de bobina [11]. Desta forma, para uma análise de sensibilidade deste fator sobre os resultados, foram realizadas simulações considerando o fator de dispersão como 0.25, 0.5 e 0.75.

A figura 4.4, apresentada a seguir, sintetiza o modelo do reator shunt utilizado.

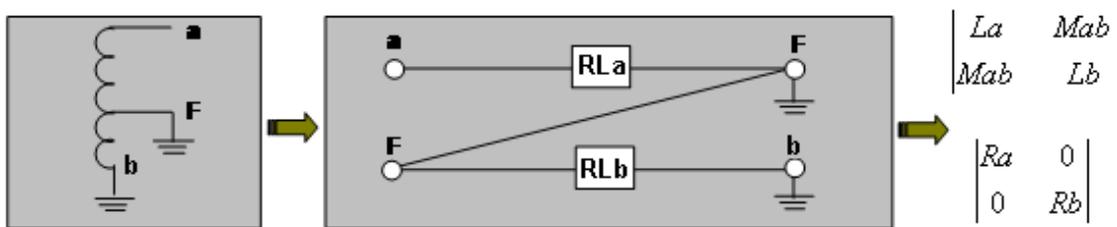


Figura 4.4 – Modelo do reator shunt para simulações de falhas internas

#### 4.4 MODELAGEM DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE

Para a representação dos transformadores de corrente empregou-se o modelo matemático referendado pelo grupo de trabalho C-5 do subcomitê de sistemas de proteção do IEEE [12]. Esse modelo incorpora a representação da reatância de curto-circuito do secundário e da saturação magnética do núcleo, seja por reprodução da característica normal (element TYPE-98) seja por reprodução do laço de histerese (element TYPE-96) do equipamento. Ao secundário dos transformadores de corrente foram conectados burdens resistivos de valor normalizado para a classe de exatidão do respectivo equipamento. Na ferramenta ATP essa modelagem é realizada através do elemento STC-model, que possibilita a reprodução da resposta adequada do equipamento às correntes de falta assimétricas e de amplitudes elevadas.

## 5 MODELAGEM DAS PROTEÇÕES DOS REATORES SHUNT

A proposta deste trabalho é a avaliação de ajustes e filosofias de proteção através de modelos computacionais do sistema de proteção dos reatores shunt, utilizando uma forma alternativa às usuais realizadas em laboratório, utilizando-se o aparato formado por caixas de teste e relés similares aos instalados em campo, ou através de simuladores dos tipo RTDS - Real Time Digital Simulator.

A princípio, o ideal seria a representação do sistema elétrico de potência conjugado com o sistema de proteção em apenas um ambiente computacional. Entretanto, dentre as ferramentas computacionais disponíveis, é observado que ou a mesma possui a sua biblioteca de modelos especializada para sistemas elétricos de potência, como o ATP/EMTP, ou para sistemas de proteção e controle, como o programa MATLAB/SIMULINK.

Desta forma, a fim de explorar as funcionalidades oferecidas por estes programas, optou-se pela utilização do programa ATP/EMTP para a simulação do sistema elétrico de potência, conforme já apresentado no capítulo 4, e o MATLAB/SIMULINK para a modelagem do sistema de proteção do equipamento em estudo: reator shunt.

Para a integração dos modelos foi utilizado um ambiente híbrido de simulação no qual a interação entre ATP e MATLAB/SIMULINK é realizada de forma compartilhada, sendo as duas tarefas executadas simultaneamente e de forma independente, porém sincronizadas. Esta ferramenta de simulação é denominada ATPIntegrate e foi, desenvolvida pelo ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico.

Basicamente, os relés modelados são: os relés de sobrecorrente, com funções instantâneas e temporizadas, e os relés diferenciais, de fase e de terra restrita. Estes modelos serão utilizados para compor as proteções unitárias e gradativas dos reatores shunt em estudo.

A Figura 5.1, apresenta os modelos desenvolvidos, no ambiente MATLAB/SIMULINK, que compõem o sistema de proteções unitárias e gradativas dos reatores shunt.



sinais de entrada para as respectivas saídas possibilitam uma solução economicamente viável ao processo de amostragem do sinal.

- **Subsistema de processamento digital de sinais** – Este subsistema compreende o hardware e o software do relé. O hardware consiste em uma central de processamento de dados (CPU), memórias e dispositivos de entrada e saída (D/I e D/O). O software compreende a parte lógica do relé e o princípio de operação acrescido de algumas rotinas que possibilitam o seu correto funcionamento, tais como: rotinas para a manipulação de dados de entrada e saída, rotinas para a auto-verificação do hardware, etc.

Os subsistemas de condicionamento e de conversão de sinais são comuns nos diversos tipos de relés digitais. O terceiro subsistema, de processamento, varia de acordo com a aplicação para a qual o relé foi projetado.

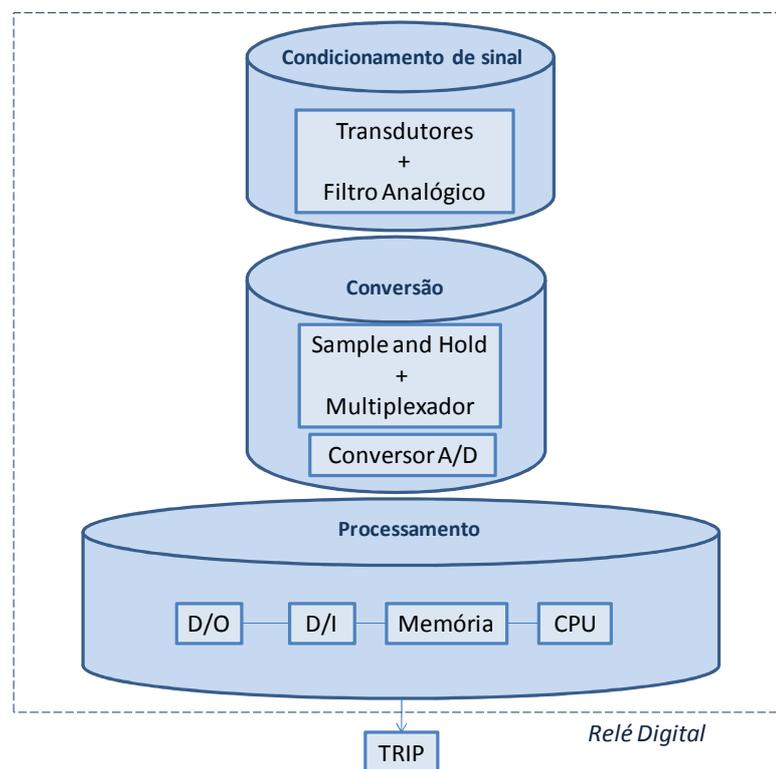


Figura 5.2 – Estrutura básica de um relé digital

### 5.1.1 MODELO COMPUTACIONAL DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE

Foram desenvolvidos dois modelos de relé de sobrecorrente, um trifásico e um monofásico para ser utilizado como proteção de sobrecorrente de neutro ou residual. Foram utilizados os blocos oferecidos na biblioteca do programa MATLAB/SIMULINK. Os sinais analógicos que compõem as entradas analógicas dos relés provém dos secundários dos transformadores de corrente modelados na ferramenta ATP, integrados através da ferramenta computacional ATPIntegrate. A figura 5.3, ilustra esta integração.

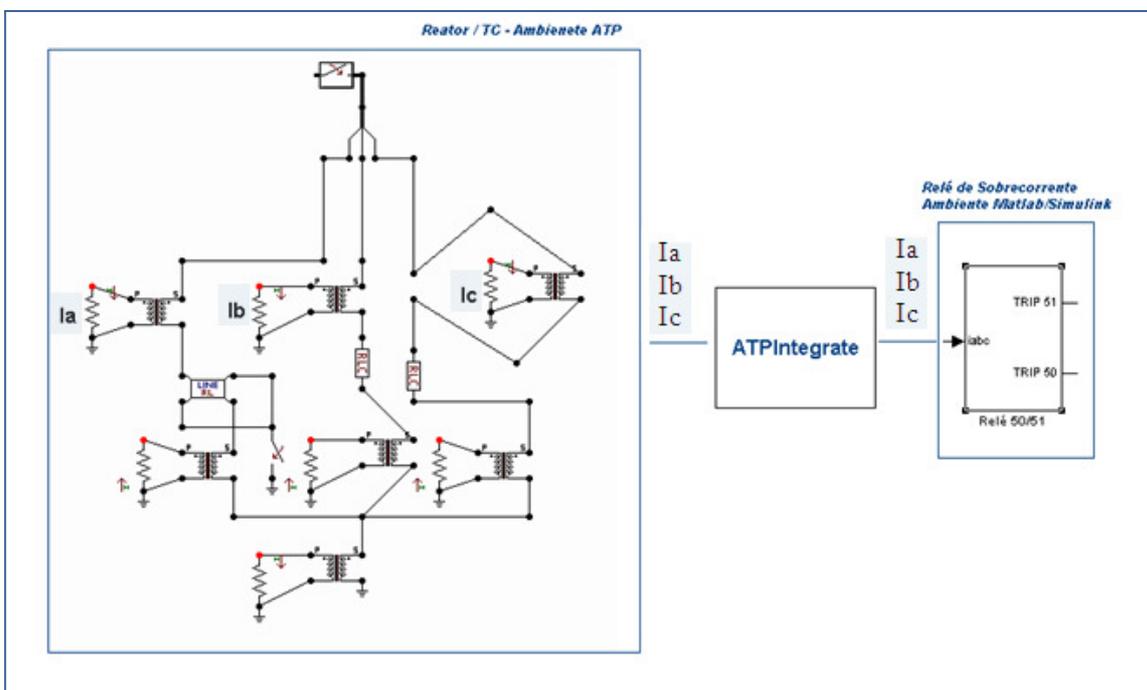


Figura 5.3 – Integração dos modelos ATP e MATLAB/SIMULINK – relé de sobrecorrente

A seguir serão descritas as principais etapas, blocos e parâmetros utilizados no modelo dos relés de sobrecorrente:

#### a) Filtro Analógico

O primeiro tratamento dado aos sinais de entrada é a filtragem analógica, com a finalidade de reduzir os componentes de alta frequência presentes, evitando-se assim o fenômeno denominado aliasing, que é uma sobreposição de espectros que acarreta erros

no processo de conversão analógica/digital.

As características dinâmicas dos filtros passa-baixa assim como suas características em regime são de fundamental importância. Entre elas destacam-se:

- **Tempo de subida:** característica que indica quanto tempo a saída de um filtro passa-baixa demora a atingir o seu valor final;
- **Overshoot:** característica que indica o quanto a saída do filtro irá ultrapassar o seu valor em regime;
- **Tempo de acomodação:** que indica quanto tempo o filtro demora até acomodar-se no seu valor em regime.

Todas as características acima atuam na resposta dinâmica dos sistemas de proteção digital. O filtro analógico utilizado na modelagem do relé foi o filtro passa-baixa Butterworth de 2º ordem, cujas características dinâmicas foram consideradas adequadas à aplicação de proteção. O Bloco de Função, do MATLAB/SIMULINK, utilizado foi o Analog Filter Design. Este modelo simula um filtro passa-baixa analógico real.

Por se tratar de um sistema de decisão rápido, o processo de filtragem deve ser projetado com uma frequência de corte que proporcione o melhor desempenho e que ao mesmo tempo, não proporcione longos atrasos na filtragem.

Para a escolha da frequência de corte, foi obedecido o teorema da amostragem de Nyquist, que postula que se um sinal contém somente as frequências menores que a frequência de corte ( $f_c$ ) [13], então todas as informações contidas no sinal podem ser recuperadas com uma taxa de amostragem de  $2f_c$ . A inequação abaixo sintetiza este teorema:

$$f_a \geq 2 \times f_c \quad (5.1)$$

Considerando a digitalização do relé modelado com 32 amostras por ciclo da frequência de 60 Hz a frequência de amostragem ( $f_a$ ) será de 1920 Hz, conforme indicado na equação que se segue:

$$f_a = T_a * f_s \text{ (Hz)} \quad (5.2)$$

$$f_a = 32 * 60 = 1920 \text{ Hz}$$

Onde:

$f_a$  : Frequência de amostragem;

$f_s$  : Frequência síncrona;

$T_a$  : Taxa de amostragem.

Logo a frequência de corte escolhida, de acordo com o teorema de Nyquist (inequação 5.1), deverá obedecer à seguinte restrição:

$$1920 \geq 2 \times f_c$$

$$f_c \leq 960 \text{ Hz}$$

Nas aplicações em proteção, geralmente é suficiente considerar a ausência de aliasing até a frequência síncrona (60 Hz). Entretanto, como mais a frente, este modelo de relé de sobrecorrente será parte da proteção diferencial que possui lógicas de bloqueio por 2º e 5º harmônicos, ou seja, trabalhará com frequências de até 300 Hz, a frequência escolhida para corte será de 480 Hz. Esta frequência de corte atende ao teorema de Nyquist e esta de acordo com a aplicação do relé diferencial.

## **b) Filtro Digital**

O filtro digital utilizado neste trabalho foi o filtro de Fourier de ciclo completo, ou seja, com uma janela retangular de comprimento igual a um ciclo da componente fundamental. Este filtro foi utilizado por ser o mais conhecido e vastamente utilizado por fabricantes de relés.

O algoritmo numérico deste filtro é baseado na técnica desenvolvida pela transformada discreta de Fourier, também conhecida por DFT (Discrete Fourier Transformer) que possibilita a determinação do conteúdo espectral de um sinal periódico. A taxa de amostragem foi fixada em 32 amostras por ciclo da frequência de 60 Hz. O Bloco de Função, do MATLAB/SIMULINK, utilizado foi o Discrete Fourier.

### c) Processamento

Após o processo de amostragem e filtragem, obtém-se a magnitude e a fase do fasor da componente fundamental de frequência do sinal de corrente. Para o relé de sobrecorrente, apenas a magnitude do fasor da corrente é utilizado, sendo esta comparada com o ajuste da seguinte forma:

Unidade instantânea – se a magnitude da corrente for *maior* que o valor de ajuste da corrente de pickup da unidade instantânea, haverá sinal de disparo, se for *menor* não haverá atuação da função.

Unidade temporizada - se a magnitude do fasor de corrente for maior que o valor de ajuste da corrente de pickup da unidade temporizada, terá início a integração da equação apresentada a seguir, referente as curvas características de tempo inverso definidas pelas normas IEC e ANSI:

$$T = \frac{x \times TD}{M^{y-1}} + B \times TD \quad (5.3)$$

Onde:

*T*: Tempo de Atuação;

*TD*: Time-Dial;

*M*: Multiplicador, calculado a partir da seguinte equação (3.6);

*x* e *y*: correspondem a  $\alpha$  e  $\beta$  da tabela 3.1 (para curvas IEC) e a A e B da tabela 3.2 (para as curvas ANSI);

*B*: parâmetro correspondente as curvas ANSI apresentado na tabela 3.2.

Esta integração irá continuar até que a inequação (5.4) seja satisfeita. Neste momento o tempo de atuação (*T*) é determinado.

$$\int_0^T \left[ \frac{x \times TD}{M^{y-1}} + B \times TD \right]^{-1} dt > 1 \quad (5.4)$$

Se, neste instante, a magnitude do fasor de corrente permanecer *maior* que o valor de ajuste da corrente de pickup da unidade temporizada, haverá sinal de disparo.

Se a magnitude do fasor de corrente cair para valores inferiores ao ajuste, a integração é interrompida. O Bloco de Função utilizado no MATLAB/SIMULINK foi o Integrator.

### 5.1.2 MODELO COMPUTACIONAL DOS RELÉS DIFERENCIAIS

Foram desenvolvidos dois modelos de relé diferencial, um trifásico para exercer a função de diferencial por fase, e outro monofásico, para exercer a função de terra restrita. Foram utilizados os blocos oferecidos na biblioteca do programa MATLAB/SIMULINK. Os sinais analógicos que compõem as entradas analógicas dos relés provém dos secundários dos transformadores de corrente modelados na ferramenta ATP, integrados através da ferramenta computacional ATPIntegrate. A figura 5.4, ilustra esta integração.

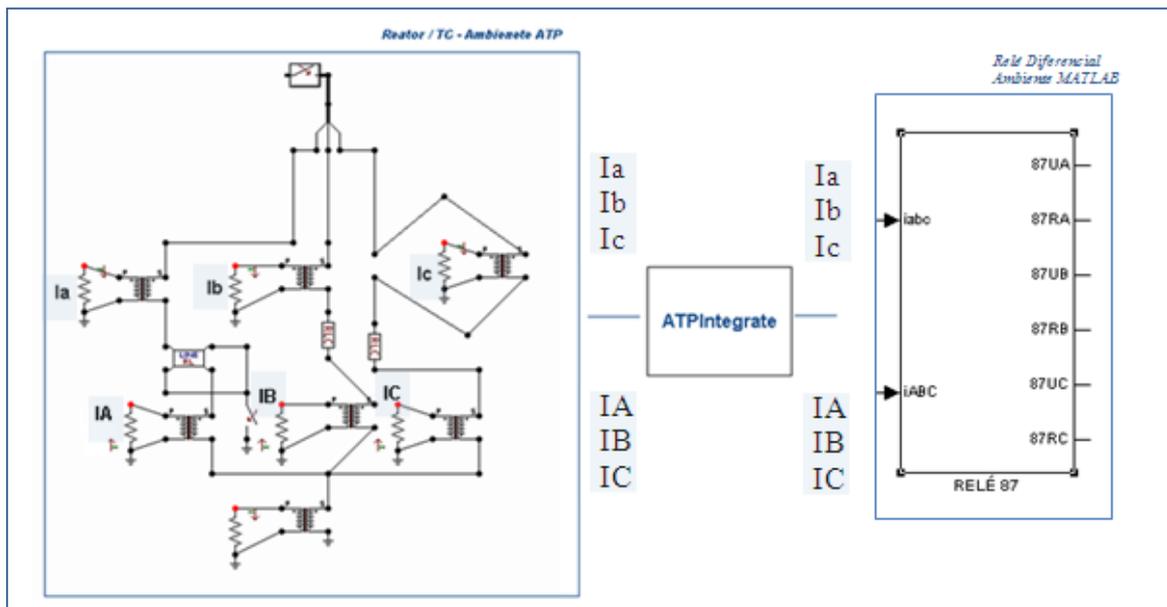


Figura 5.4 – Integração dos modelos ATP e MATLAB/SIMULINK – relé diferencial

A seguir serão descritas as principais etapas, blocos e parâmetros utilizados no modelo dos relés diferenciais:

#### a) Filtro Analógico

Foi utilizado para o relé diferencial o mesmo filtro analógico projetado para o

relé de sobrecorrente já apresentado no item 5.1.1, item a.

### **b) Filtro Digital**

Foi utilizado para o relé diferencial, para a extração da componente fundamental do sinal, o mesmo filtro digital projetado para o relé de sobrecorrente já apresentado no item 5.1.1, item b. Entretanto, para permitir a implementação de lógicas de bloqueio por 2º e 5º harmônicos, foi necessária a utilização de mais dois filtros, agora sintonizados nas frequências de 120 e 300 Hz, para a extração dos sinais harmônicos citados.

### **c) Processamento**

Após o processo de amostragem e filtragem, obtém-se a magnitude e a fase dos fasores da componente fundamental, da componente de segundo harmônico e da componente de quinto harmônico de frequência do sinal de corrente. Para o relé diferencial a direcionalidade é importante, desta forma, tanto a magnitude quanto a fase do fasor da corrente são utilizados. Os sinais de saída dos blocos Discrete Fourier, são transformados então em números complexos, para serem utilizados, nas Equações 3.1 e 3.2, no cálculo das correntes de operação ( $I_{OP1}$ ) e restrição ( $I_{RT}$ ) na frequência fundamental, e das correntes de operação nas frequências de segundo ( $I_{OP2}$ ) e quinto harmônicos ( $I_{OP5}$ ). Este processo no relé trifásico é realizado para cada fase individualmente.

As correntes de operação ( $I_{OP1}$ ) obtidas em cada fase, são então comparadas com as respectivas correntes de restrição ( $I_{RT}$ ) multiplicadas por um fator  $k$  (parâmetro ajustável - conforme apresentado no item 3.1.1.1), mais a corrente de pickup da função (parâmetro ajustável). Se a corrente de operação calculada ( $I_{OP1}$ ) for maior, haverá a atuação da função diferencial simples, ou seja sem bloqueio por harmônicos. A inequação abaixo sintetiza a característica de operação da proteção diferencial. Ressalta-se que o relé diferencial modelado possui apenas uma característica de inclinação, ou seja, permite apenas um ajuste de slope.

$$I_{OP1} > k \times I_{RT} + I_{PK} \quad (5.5)$$

Onde:

$I_{OP1}$ : corrente de operação de cada fase calculada na frequência fundamental;

$I_{RT}$ : corrente de restrição;

$I_{PK}$ : corrente de pickup do relé, ou seja, corrente mínima para a operação do mesmo;

$k$ : inclinação da característica diferencial, também chamada de Slope.

A lógica de bloqueio por harmônico é implementada da seguinte forma: se a relação entre as correntes de operação ( $I_{OP2}$  ou  $I_{OP5}$ ), referentes as componentes de segundo e quinto harmônicos da frequência fundamental, e a correntes de operação ( $I_{OP1}$ ), referente a frequência fundamental, for maior que o valor percentual ajustado ( $BH2$  ou  $BH5$ ), a atuação do relé será bloqueada enquanto um destas condições permanecer verdadeira. As equações abaixo sintetizam esta lógica.

$$\frac{I_{OP2}}{I_{OP1}} > BH2 \% \quad (5.6)$$

$$\frac{I_{OP5}}{I_{OP1}} > BH5 \% \quad (5.7)$$

Onde:

$I_{OP1}$ : corrente de operação de cada fase na frequência fundamental;

$I_{OP2}$ : corrente de operação de cada fase na frequência de 2º harmônico;

$I_{OP5}$ : corrente de operação de cada fase na frequência de 5º harmônico;

$BH2$ : parâmetro ajustável, referente ao percentual de bloqueio por 2º harmônico;

$BH5$ : parâmetro ajustável, referente ao percentual de bloqueio por 5º harmônico.

Foram monitoradas as saídas dos relés diferenciais com bloqueio por harmônicos e a saída da lógica diferencial simples.

## 6 CÁLCULO DOS AJUSTES DAS PROTEÇÕES

Neste capítulo serão apresentados os cálculos dos ajustes referentes às proteções unitárias e gradativas dos bancos de reatores shunt, referentes ao Modelo 1 – Reator 500 kV da LT 500 kV Adrianópolis - Cachoeira Paulista C2, terminal de Cachoeira Paulista e Modelo 2 - Reator 345 kV da LT Ouro Preto 2 – Vitória, Terminal de Ouro preto 2.

### 6.1 AJUSTE DAS PROTEÇÕES REFERENTES AO MODELO 1

A seguir serão apresentados os cálculos dos ajustes das proteções do reator shunt da LT 500 kV Adrianópolis - Cachoeira Paulista C2, terminal de Cachoeira Paulista, que serão inseridos no modelo do MATLAB/SIMULINK. Os critérios utilizados para a definição destes ajustes foram utilizados com objetivo de obter seletividade sem perder a sensibilidade das proteções.

Seguem as relações dos transformadores de corrente:

— Relação de Transformação dos TC de fase ( $RTC_F$ ):

$$RTC_F = \frac{1200}{5} = 240$$

$$RTC_F = 240$$

— Relação de Transformação do TC de Neutro ( $RTC_N$ ):

$$RTC_N = \frac{200}{5} = 40$$

$$RTC_N = 40$$

#### 6.1.1 PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE FASE

Seguem os ajustes da proteção diferencial de fase, sendo estes os seguintes: corrente de pickup (87P), inclinação da característica (SLP) e funções de bloqueio por

porcentagem de 2° e 5° harmônicos da fundamental (BH2 e BH5).

**a) Definição da Corrente de Pickup (87P)**

O ajuste da função 87P deve ser o mais sensível possível, entretanto deve ser considerada uma margem de segurança de tal forma que evite operações indesejadas causadas por erros em TC ou corrente de excitação do reator. No caso da corrente de excitação do reator, para se evitar atuações indevidas também será utilizado o bloqueio por percentual de 2° harmônico.

Desta forma, admitindo-se um erro de medição dos TCs em 10% e considerando o erro médio quadrático dos mesmos, é obtido o seguinte valor:

$$erro_{TC} = \sqrt{erro_{Tc1}^2 + erro_{Tc2}^2} \quad (6.1)$$

$$erro_{TC} = \sqrt{0,1^2 + 0,1^2} = 0,14$$

Logo o pickup (87P) será ajustado para 15% da corrente nominal ( $I_n$ ) do TC.

$$87P = 0,15 \times I_n \quad (6.2)$$

$$87P = 0,15 \times 5$$

$$87P = 0,75 A$$

Ajuste:

$$\mathbf{87P = 0,75 A}$$

**b) Definição do Slope, ou seja, inclinação da característica (SLP)**

O relé modelado tem três elementos diferenciais, um para cada fase. Esses elementos usam as grandezas de operação e restrição calculadas a partir das correntes de

entrada dos enrolamentos.

Os elementos diferenciais são ajustados com característica diferencial porcentual com inclinação simples. A utilização do Slope tem como objetivo considerar as correntes diferenciais resultantes dos erros de medição e de casos de saturação de TC quando de faltas externas de alta intensidade. Será utilizado um valor típico de ajuste, orientado em diversos catálogos de fabricantes de relés, para característica com apenas 1 Slope:

Ajuste:

$$\mathbf{SLP = 40\%}$$

#### **c) Funções de Bloqueio por Porcentagem de 2º e 5º Harmônicos da Fundamental.**

— Bloqueio 2º Harmônico (BH2) - Os elementos de harmônicas pares (o relé modelado utiliza o segundo harmônico) proporcionam segurança quando da ocorrência de correntes de inrush durante a energização do reator. Será utilizado um valor típico de ajuste (15 %).

Ajuste:

$$\mathbf{BH2 = 15\%}$$

— Bloqueio 5º Harmônico (BH5) - O elemento de quinta harmônica é utilizado para evitar a operação indevida do relé durante condições admissíveis de sobreexcitação. Será utilizado um valor típico de ajuste (30 %).

Ajuste:

$$\mathbf{BH5 = 30\%}$$

### 6.1.2 PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TERRA RESTRITA

Seguem os ajustes da proteção diferencial de terra restrita, sendo estes os seguintes: corrente de pickup (87R), inclinação da característica (SLP) e funções de bloqueio por porcentagem de 2° e 5° harmônicos da fundamental (BH2 e BH5).

#### a) Definição da Corrente de Pickup (87R)

Este ajuste define o limite de sensibilidade da corrente residual, que pode ser bem sensível por se tratar de corrente de seqüência zero, presente apenas quando de falhas ou desequilíbrios. O valor mínimo aceitável deve ser maior que qualquer desequilíbrio natural de 3I0 causado por condições de carga e ser maior que um valor mínimo, determinado pelo desequilíbrio provocado pelas diferenças intrínsecas aos TCs utilizados.

O pickup (87R) será ajustado para 10% da corrente nominal ( $I_n$ ) do TC.

$$87R = 0,10 \times I_n \quad (6.3)$$

$$87R = 0,10 \times 5 = 0,5 \text{ A}$$

Ajuste:

$$\mathbf{87R = 0,5 A}$$

#### b) Definição do Slope, ou seja, inclinação da característica (SLP)

O relé modelado tem característica diferencial porcentual com inclinação simples. A utilização do Slope tem como objetivo considerar as correntes diferenciais resultantes dos erros de medição e de casos de saturação de TC quando de faltas externas de alta intensidade. Será utilizado um valor típico de ajuste, orientado em diversos catálogos de fabricantes de relés, para característica com apenas 1 Slope:

Ajuste:

$$\mathbf{SLP = 40\%}$$

### c) Funções de Bloqueio por Porcentagem de 2° e 5° Harmônicos da Fundamental.

— Bloqueio 2° Harmônico (BH2) - Os elementos de harmônicas pares (o relé modelado utiliza o segundo harmônico) proporcionam segurança quando da ocorrência de correntes de inrush durante a energização do reator. Como esta função utiliza apenas a corrente de seqüência zero, o seu ajuste pode ser menor do que nos relés diferenciais de fase. Será utilizado o valor de 10 %.

Ajuste:

$$\mathbf{BH2 = 10\%}$$

— Bloqueio 5° Harmônico (BH5) - O elemento de quinta harmônica é utilizado para evitar a operação indevida do relé durante condições admissíveis de sobreexcitação. Como esta função utiliza apenas a corrente de seqüência zero, o seu ajuste pode ser menor do que nos relés diferenciais de fase. Será utilizado o valor de 15 %.

Ajuste:

$$\mathbf{BH5 = 15\%}$$

### 6.1.3 PROTEÇÕES DE SOBRECORRENTE DE FASE DO LADO DE AT (50/51 AT)

Esta função serve como retaguarda para faltas no reator, medindo a contribuição do sistema elétrico para o curto-circuito.

#### 6.1.3.1 UNIDADE TEMPORIZADA (51AT)

##### a) Definição da Corrente de Pickup (P51AT)

O valor de pickup da unidade temporizada deve ser ajustado acima da corrente

de carga do reator, considerando uma sobretensão de 15% e adotando-se uma margem de segurança de cerca de 10%, para cobrir possíveis erros de medição.

$$P_{51AT} = 1,10 \times I_{carga} \quad (6.4)$$

— Cálculo da Reatância Indutiva do reator:

$$Q_n = \frac{V^2}{X_l} \rightarrow X_l = \frac{V^2}{Q_n} \quad (6.5)$$

Onde:

$Q_n$ : Potência Nominal do banco de reatores (MVAr);

$V$ : Tensão Nominal de Operação (V);

$X_l$ : Reatância Indutiva do reator.

$$X_l = \frac{500000^2}{165000000} = 1515 \Omega$$

— Cálculo da corrente de carga para uma sobretensão de 15%:

$$I_{carga} = \frac{V}{X_l \times \sqrt{3} \times RTC_{fase}} \quad (6.6)$$

Onde:

$I_{carga}$ : Corrente de carga do reator (deve ser considerado sobretensão de 15 %);

$Q_n$ : Potência Nominal do banco de reatores (MVAr);

$V$ : Tensão Nominal de Operação (V);

$X_l$ : Reatância Indutiva do Reator;

*RTC fase*: Relação de Transformação dos TC de fase.

$$I_{carga} = \frac{1,15 \times 500000}{1515 \times \sqrt{3} \times 240} = 0,91 A$$

$$I_{carga} = 0,91 A \text{ (considerando sobretensão de 15\%)}$$

$$P51AT = 1,10 \times 0,91 = 1A$$

Ajuste:

$$\mathbf{P51AT = 1 A}$$

#### **b) Definição da Curva de Tempo e Time-Dial (51ATD)**

A curva de tempo deve ser selecionada de modo que o relé não atue, ou atue num tempo superior a 1 s para a máxima corrente de contribuição do Reator para uma falha fase-terra na barra.

Será adotada a curva com característica Normal Inversa (C1) padrão IEC, para a função de sobrecorrente de fase temporizada de tempo inverso.

Ajuste:

$$\mathbf{Curva = Normal Inversa (C1)}$$

— Equação da Curva Normal Inversa C1:

$$T = TD \times \frac{0,14}{(M^{0,02}-1,0)} \text{ (seg)} \quad (6.7)$$

Onde:

*T*: Tempo de Atuação;

*TD*: Time-Dial;

*M*: Multiplicador, calculado a partir da seguinte equação:

$$M = \frac{I_{cc}}{(RTC_{fase} \times P51AT)} \quad (6.8)$$

Onde:

*I<sub>cc</sub>*: Corrente de curto-circuito;

*P51AT*: Ajuste de pickup;

*RTC<sub>fase</sub>*: Relação de Transformação do TC.

Ajuste do TD para a atuação desta função em um tempo, maior que 1 seg, para um curto-circuito monofásico na barra.

Curto-circuito monofásico na barra (IΦ Barra) → Corrente de contribuição, pelo reator, para um curto-circuito monofásico na barra.

Foi obtido o seguinte valor de IΦ Barra, utilizando-se o programa de curto-circuito ANAFAS do Cepel.

IΦ Barra = 79 A primários = 0,33 A secundários

Como:

$$I_{carga} = 0,91 \text{ A (considerando sobretensão de 15\%)}$$

Observa-se que a corrente de contribuição para um curto-circuito na barra é inferior a corrente de carga do reator, não havendo atuação da unidade da fase defeituosa para falhas externas.

O TD será ajustado para atuar em 0,3 s, para um curto-circuito trifásico entre o TC e a bucha do reator.

Curto-circuito trifásico entre o TC e a bucha do reator (I3Φ) → Corrente máxima de curto-circuito, correspondente a um curto-circuito trifásico entre o TC e a

bucha do reator.

Foi obtido o seguinte valor de  $I3\Phi$ , utilizando-se o programa de curto-circuito ANAFAS do Cepel.

$$I3\Phi = 24231 \text{ A primários} = 100,96 \text{ A secundários}$$

Logo, a partir da Equação 6.8:

$$M = \frac{24231}{(240 \times 1)} = 100,96$$

Para  $T = 0,3$  seg, é obtido o seguinte TD, a partir da Equação 6.7:

$$0,3 = TD \times \frac{0,14}{(100,96^{0,02} - 1,0)}$$

$$TD = 0,21$$

Ajuste:

$$\mathbf{TD = 0,21}$$

### 6.1.3.2 UNIDADE INSTANTÂNEA (50AT)

#### a) Definição da Corrente de Pickup (P50AT)

O valor de pickup da unidade instantânea será ajustado para  $5 \times I_{carga}$  do reator, para se evitar atuações indesejadas durante transitório de falhas externas.

$$P50AT = 5 \times I_{carga}$$

$$I_{carga} = \frac{Qn \times 1000}{V \times RTC_{fase} \times \sqrt{3}} \quad (6.9)$$

Onde:

*I*<sub>carga</sub>: Corrente nominal de carga do reator;

$Q_n$ : Potência Nominal do banco de reatores (kVAr);

$V$ : Tensão Nominal de Operação (kV);

$RTC\ fase$ : Relação de Transformação dos TC de fase.

$$I_{carga} = \frac{165 \times 1000}{500 \times 240 \times \sqrt{3}} = 0,79 A$$

$$I_{carga} = 0,79 A$$

$$P_{51AT} = 5 \times 0,79 = 3,95 A$$

Ajuste:

$$\mathbf{P_{51AT} = 4 A}$$

#### 6.1.4 PROTEÇÕES DE SOBRECORRENTE RESIDUAIS DO LADO DE AT

Esta função serve como retaguarda para falhas em grande parte dos enrolamentos do reator.

##### 6.1.4.1 UNIDADE TEMPORIZADA (51NAT)

###### a) Definição da Corrente de Pickup (P51NAT)

O valor de pickup da unidade temporizada deve ser ajustado o mais sensível possível, servindo como retaguarda para falhas em grande parte dos enrolamentos do reator. Será utilizado um valor prático de ajuste de 10% da corrente nominal do TC ( $I_n$ ).

$$P_{50NAT} = 0,10 \times I_n \quad (6.10)$$

$$P_{50NAT} = 0,10 \times 5 = 0,5 A$$

Ajuste:

$$\mathbf{P_{51NAT} = 0,5 A}$$

## b) Definição da Curva de Tempo e Time-Dial (51NATD)

A curva de tempo deve ser selecionada de modo que o relé atue num tempo de 1,5 s ou superior para a máxima corrente de contribuição do reator para uma falha fase-terra na barra.

Será adotada a curva com característica Normal Inversa (C1) padrão IEC, para a função de sobrecorrente de fase temporizada de tempo inverso.

Ajuste:

***Curva = Normal Inversa (C1)***

Será utilizada a equação da Curva Normal Inversa C1(Equação 6.7).

Ajuste do TD para a atuação desta função em 1,5 seg, para um curto-circuito monofásico na barra.

Curto-circuito monofásico na barra ( $I\Phi$  Barra)  $\rightarrow$  Corrente de contribuição ( $3I0$ ) pelo reator, para um curto-circuito monofásico na barra.

Foi obtido o seguinte valor de  $I\Phi$  Barra, utilizando-se o programa de curto-circuito ANAFAS do Cepel.

$$I\Phi \text{ Barra} = 3I0 = 3 \times 79 \text{ A primários} = 237 \text{ A primários} = 0,99 \text{ A secundários}$$

Logo, a partir da Equação 6.8:

$$M = \frac{237}{(240 \times 0,5)} = 1,98$$

Para  $T= 1,5$  seg, é obtido o seguinte TD, a partir da Equação 6.7 :

$$1,5 = TD \times \frac{0,14}{(1,98^{0,02} - 1,0)}$$

$$TD = 0,15$$

— Verificação do tempo de atuação desta função para um curto-circuito bifásico-terra entre o TC e a bucha do reator.

Curto-circuito bifásico-terra entre o TC e a bucha do reator ( $I_{2\Phi T}$ ) → Corrente mínima de curto-circuito, correspondente a um curto-circuito bifásico entre o TC e a bucha do reator.

Foi obtido o seguinte valor de  $I_{2\Phi T}$ , utilizando-se o programa de curto-circuito ANAFAS do Cepel.

$I_{2\Phi T}$  entre o TC e a bucha do reator →  $3I_0 = 3 \times 4882 \text{ A primários} = 14646 \text{ A primários}$

Logo, a partir da Equação 6.8:

$$M = \frac{14646}{(240 \times 0,5)} = 122,05$$

Para  $TD = 0,15$ :

$$T = 0,15 \times \frac{0,14}{(122,05^{0,02} - 1)}$$

$$T = 0,2 \text{ seg}$$

— Verificação do tempo de atuação desta função para um curto-circuito monofásico entre o TC e a bucha do reator.

$I_{\Phi}$  → Corrente máxima de curto-circuito, correspondente a um curto-circuito monofásico entre o TC e a bucha do reator.

Foi obtido o seguinte valor de  $I_{\Phi}$ , utilizando-se o programa de curto-circuito ANAFAS do Cepel.

$I_{\Phi}$  →  $3I_0 = 3 \times 6089 \text{ A primários} = 18267 \text{ A primários}$

Logo, a partir da Equação 6.8:

$$M = \frac{18267}{(240 \times 0,5)} = 152,23$$

Para TD= 0,15:

$$T = 0,15 \times \frac{0,14}{(152,23^{0,02} - 1)}$$

$$T = 0,19 \text{ seg}$$

Ajuste:

$$\mathbf{TD = 0,15}$$

#### 6.1.4.2 UNIDADE INSTANTÂNEA (50NAT)

##### a) Definição da Corrente de Pickup (P50NAT)

O valor de pickup da unidade instantânea será ajustado para que esta não atue para uma falha monofásica na barra.

Curto-circuito monofásico na barra ( $I\Phi$  Barra)  $\rightarrow$  Corrente de contribuição ( $3I0$ ) pelo reator, para um curto-circuito monofásico na barra (externo).

Foi obtido o seguinte valor de  $I\Phi$  Barra, utilizando-se o programa de curto-circuito ANAFAS do Cepel.

$$I\Phi \text{ Barra} = 3I0 = 3 \times 79 \text{ A primários} = 237 \text{ A primários} = 0,99 \text{ A secundários}$$

$$P50NAT \geq 0,99 \times 1,1 \text{ (considerando 10\% de erros de medição)}$$

$$P50NAT \geq 1,1 \text{ A}$$

Ajuste:

$$\mathbf{P50NAT = 2 A}$$

### 6.1.5 PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE DE NEUTRO OU RESIDUAL DO LADO DE NEUTRO DO REATOR

Esta função serve como retaguarda para falhas em grande parte dos enrolamentos do reator.

#### 6.1.5.1 UNIDADE TEMPORIZADA (51G)

##### a) Definição da Corrente de Pickup (P51G)

O valor de pickup da Unidade temporizada deve ser ajustado o mais sensível possível, servindo como retaguarda para falhas em grande parte dos enrolamentos do reator. Será utilizado um valor prático de ajuste de 10% da corrente nominal do TC ( $I_n$ ).

$$P51G = 0,10 \times I_n \quad (6.11)$$

$$P51G = 0,10 \times 5 = 0,5 A$$

Ajuste:

$$\mathbf{P51G = 0,5 A}$$

##### b) Definição da Curva de Tempo e Time-Dial (51GD)

A curva de tempo deve ser selecionada de modo que o relé atue num tempo de 1,5 s ou superior para a máxima corrente de contribuição do reator para uma falha fase-terra na barra.

Será adotada a curva com característica Normal Inversa (C1) padrão IEC, para a função de sobrecorrente de fase temporizada de tempo inverso.

Ajuste:

$$\mathbf{Curva = Normal Inversa (C1)}$$

Será utilizada a equação da Curva Normal Inversa C1(Equação 6.7).

Ajuste do TD para a atuação desta função em 1,5 seg, para um curto-circuito monofásico na Barra.

Curto-circuito monofásico na Barra ( $I\Phi$  Barra) → Corrente de contribuição ( $3I0$ ) pelo reator, para um curto-circuito monofásico na barra.

Foi obtido o seguinte valor de  $I\Phi$  Barra, utilizando-se o programa de curto-circuito ANAFAS do Cepel.

$$I\Phi \text{ Barra} = 3I0 = 3 \times 79 \text{ A primários} = 237 \text{ A primários} = 0,99 \text{ A secundários}$$

Logo, a partir da Equação 6.8:

$$M = \frac{237}{(40 \times 0,5)} = 11,85$$

Para  $T = 1,5$  seg, é obtido o seguinte TD, a partir da Equação 6.7:

$$1,5 = TD \times \frac{0,14}{(11,85^{0,02} - 1,0)}$$

$$TD = 0,54$$

Ajuste:

$$\mathbf{TD = 0,54}$$

### 6.1.5.2 UNIDADE INSTANTÂNEA (50G)

#### a) Definição da Corrente de Pickup (P50G)

O valor de pickup da unidade instantânea será ajustado para que esta não atue para uma falha monofásica na barra.

Curto-circuito monofásico na Barra ( $I\Phi$  Barra) → Corrente de contribuição ( $3I0$ ) pelo reator, para um curto-circuito monofásico na barra (externo).

Foi obtido o seguinte valor de  $I\Phi$  Barra, utilizando-se o programa de curto-circuito ANAFAS do Cepel.

$$I\Phi \text{ Barra} = 3I0 = 3 \times 79 \text{ A primários} = 237 \text{ A primários} = 5,9 \text{ A secundários}$$

$$P50G \geq 5,9 \times 1,1 \text{ (considerando 10\% de erros de medição)}$$

$$P50G \geq 6,5 \text{ A}$$

Ajuste:

$$\mathbf{P50G = 6,5 \text{ A}}$$

## 6.2 AJUSTE DAS PROTEÇÕES REFERENTES AO MODELO 2

A seguir serão apresentados os cálculos dos ajustes das proteções do reator shunt da LT Ouro Preto 2 – Vitória, do terminal de Ouro Preto 2, que serão inseridos no modelo do MATLAB/SIMULINK. Os critérios utilizados para a definição destes ajustes foram utilizados com objetivo de obter seletividade sem perder a sensibilidade das proteções.

Seguem as relações dos transformadores de corrente:

— Relação de Transformação dos TC de fase ( $RTC_F$ ):

$$RTC_F = \frac{1000}{5} = 200$$

$$\mathbf{RTC_F = 200}$$

— Relação de Transformação do TC de Neutro ( $RTC_N$ ):

$$RTC_N = \frac{200}{5} = 40$$

$$\mathbf{RTC_N = 40}$$

### 6.2.1 PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE FASE

Seguem os ajustes da proteção diferencial de fase, sendo estes os seguintes: corrente de pickup (87P), inclinação da característica (SLP) e funções de bloqueio por porcentagem de 2° e 5° harmônicos da fundamental (BH2 e BH5).

### a) Definição da Corrente de Pickup (87P)

O ajuste da função 87P deve ser o mais sensível possível, entretanto deve ser considerada uma margem de segurança de tal forma que evite operações indesejadas causadas por erros em TCs ou corrente de excitação do reator. No caso da corrente de excitação do reator, para se evitar atuações indevidas também será utilizado o bloqueio por percentual de 2º harmônico.

Desta forma, admitindo-se um erro de medição dos TCs em 10% e considerando o erro médio quadrático dos mesmos, é obtido o seguinte valor através da Equação 6.1:

$$erro_{TC} = \sqrt{erro_{TC1}^2 + erro_{TC2}^2}$$
$$erro_{TC} = \sqrt{0,1^2 + 0,1^2} = 0,14$$

Logo o pickup (87P) será ajustado para 15% da corrente nominal ( $I_n$ ) do TC, utilizando-se a Equação 6.2.

$$87P = 0,15 \times I_n$$

$$87P = 0,15 \times 5$$

$$87P = 0,75 A$$

Ajuste:

$$\mathbf{87P = 0,75 A}$$

### b) Definição do Slope, ou seja, inclinação da característica (SLP)

O relé modelado tem três elementos diferenciais, um para cada fase. Esses elementos usam as grandezas de operação e restrição calculadas a partir das correntes de entrada dos enrolamentos.

Os elementos diferenciais são ajustados com característica diferencial porcentual com inclinação simples. A utilização do Slope tem como objetivo considerar as

correntes diferenciais resultantes dos erros de medição e de casos de saturação de TC quando de faltas externas de alta intensidade. Será utilizado um valor típico de ajuste, orientado em diversos catálogos de fabricantes de relés, para característica com apenas 1 Slope:

Ajuste:

$$SLP = 40\%$$

### c) Funções de Bloqueio por Porcentagem de 2° e 5° Harmônicos da Fundamental.

— Bloqueio 2° Harmônico (BH2) - Os elementos de harmônicas pares (o relé modelado utiliza o segundo harmônico) proporcionam segurança quando da ocorrência de correntes de inrush durante a energização do reator. Será utilizado um valor típico de ajuste (15 %).

Ajuste:

$$BH2 = 15\%$$

— Bloqueio 5° Harmônico (BH5) - O elemento de quinta harmônica é utilizado para evitar a operação indevida do relé durante condições admissíveis de sobreexcitação. Será utilizado um valor típico de ajuste (30 %).

Ajuste:

$$BH5 = 30\%$$

## 6.2.2 PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TERRA RESTRITA

Seguem os ajustes da proteção diferencial de terra restrita, sendo estes os seguintes: corrente de pickup (87R), inclinação da característica (SLP) e funções de bloqueio por porcentagem de 2° e 5° harmônicos da fundamental (BH2 e BH5).

### a) Definição da Corrente de Pickup (87R)

Este ajuste define o limite de sensibilidade da corrente residual, que pode ser bem sensível por se tratar de corrente de seqüência zero, presente apenas quando de falhas ou desequilíbrios. O valor mínimo aceitável deve ser maior que qualquer desequilíbrio natural de 3I0 causado por condições de carga e ser maior que um valor mínimo, determinado pelo desequilíbrio provocado pelas diferenças intrínsecas aos TC utilizados.

Em função do reator do Modelo 2, ser aterrado através de resistor e reator de aterramento, o que minimiza as correntes de curto-circuito, e em função desta proteção estar conectada em TCs de relação de transformação alta, o pickup (87R) será ajustado para 5% da corrente nominal ( $I_n$ ) do TC.

$$87R = 0,05 \times I_n$$

$$87R = 0,05 \times 5 = 0,25 A$$

Ajuste:

$$\mathbf{87R = 0,25 A}$$

### b) Definição do Slope, ou seja, inclinação da característica (SLP)

O Relé modelado tem característica diferencial porcentual com inclinação simples. A utilização do Slope tem como objetivo considerar as correntes diferenciais resultantes dos erros de medição e de casos de saturação de TC quando de faltas externas de alta intensidade. Será utilizado um valor típico de ajuste, orientado em diversos catálogos de fabricantes de relés, para característica com apenas 1 Slope:

Ajuste:

$$\mathbf{SLP = 40\%}$$

### c) Funções de Bloqueio por Porcentagem de 2° e 5° Harmônicos da Fundamental.

— Bloqueio 2° Harmônico (BH2) - Os elementos de harmônicas pares (o relé modelado utiliza o segundo harmônico) proporcionam segurança quando da ocorrência de correntes de inrush durante a energização do reator. Como esta função utiliza apenas a corrente de seqüência zero, o seu ajuste pode ser menor do que nas diferenças de fase. Será utilizado o valor de 10 %.

Ajuste:

$$BH2 = 10\%$$

— Bloqueio 5° Harmônico (BH5) - O elemento de quinta harmônica é utilizado para evitar a operação indevida do relé durante condições admissíveis de sobreexcitação. Como esta função utiliza apenas a corrente de seqüência zero, o seu ajuste pode ser menor do que nas diferenças de fase. Será utilizado o valor de 15 %.

Ajuste:

$$BH5 = 15\%$$

### 6.2.3 PROTEÇÕES DE SOBRECORRENTE DE FASE DO LADO DE AT (50/51 AT)

Esta função serve como retaguarda para faltas no reator, medindo a contribuição do sistema elétrico para o curto-circuito.

#### 6.2.3.1 UNIDADE TEMPORIZADA (51AT)

##### a) Definição da Corrente de Pickup (P51AT)

O valor de pickup da unidade temporizada deve ser ajustado acima da corrente de carga do reator, considerando uma sobretensão de 15% e adotando-se uma margem de segurança de cerca de 10%, para cobrir possíveis erros de medição. Será utilizada a

Equação 6.4.

— Cálculo da Reatância Indutiva do reator. Será utilizada a Equação 6.5:

$$Xl = \frac{V^2}{Qn} \quad (6.5)$$

Onde:

$Qn$ : Potência Nominal do banco de reatores (MVA<sub>r</sub>);

$V$ : Tensão Nominal de Operação (V);

$Xl$ : Reatância Indutiva do reator.

$$Xl = \frac{345000^2}{66000000} = 1803 \Omega$$

— Cálculo da corrente de carga para uma sobretensão de 15%. Será utilizada a Equação 6.6:

$$I_{carga} = \frac{1,15 \times 345000}{1803 \times \sqrt{3} \times 200} = 0,64 A$$

$$I_{carga} = 0,64 A \text{ (considerando sobretensão de 15\%)}$$

$$P51AT = 1,10 \times 0,64$$

$$P51AT = 0,70 A$$

Ajuste:

$$\mathbf{P51AT = 0,70 A}$$

#### **b) Definição da Curva de Tempo e Time-Dial (51ATD)**

A curva de tempo deve ser selecionada de modo que o relé não atue, ou atue

num tempo superior a 1 s para a máxima corrente de contribuição do reator para uma falha fase-terra na barra.

Será adotada a curva com característica Normal Inversa (C1) padrão IEC, para a função de sobrecorrente de fase temporizada de tempo inverso.

Ajuste:

***Curva = Normal Inversa (C1)***

Será utilizada a Equação 6.7, referente à curva com característica Normal Inversa (C1) padrão IEC.

Ajuste do TD para a atuação desta função em um tempo, maior que 1 s, para um curto-circuito monofásico na barra.

Curto-circuito monofásico na Barra (I $\Phi$  Barra) → Corrente de contribuição, pelo reator, para um curto-circuito monofásico na barra.

Foi obtido o seguinte valor de I $\Phi$  Barra, utilizando-se o programa de curto-circuito ANAFAS do Cepel.

$$I\Phi \text{ Barra} = 19 \text{ A primários} = 0,095 \text{ A secundários}$$

Como:

$$I_{carga} = 0,64 \text{ A (considerando sobretensão de 15\%)}$$

Observa-se que a corrente de contribuição para um curto-circuito na barra é inferior a corrente de carga do reator, não havendo atuação da unidade da fase defeituosa para falhas externas.

O TD será ajustado para atuar em 0,3 seg para um curto-circuito trifásico entre o TC e a bucha do reator.

Curto-circuito trifásico entre o TC e a bucha do reator (I3 $\Phi$ ) → Corrente

máxima de curto-circuito, correspondente a um curto-circuito trifásico entre o TC e a bucha do reator.

Foi obtido o seguinte valor de  $I_{3\Phi}$ , utilizando-se o programa de curto-circuito ANAFAS do Cepel.

$$I_{3\Phi} = 11925 \text{ A primários} = 59,63 \text{ A secundários}$$

Logo, a partir da Equação 6.8:

$$M = \frac{11925}{(200 \times 0,7)} = 85,18$$

Para  $T = 0,3$  seg, é obtido o seguinte TD, a partir da Equação 6.7:

$$0,3 = TD \times \frac{0,14}{(85,18^{0,02} - 1,0)}$$

$$TD = 0,20$$

Ajuste:

$$\mathbf{TD = 0,21}$$

### 6.2.3.2 UNIDADE INSTANTÂNEA (50AT)

#### a) Definição da Corrente de Pickup (P50AT)

O valor de pickup da unidade instantânea será ajustado para  $5 \times I_{carga}$  do reator, para se evitar atuações indesejadas durante transitório de falhas externas.

$$P50AT = 5 \times I_{carga}$$

O  $I_{carga}$  será calculado através da Equação 6.9.

$$I_{carga} = \frac{66 \times 1000}{345 \times 200 \times \sqrt{3}} = 0,55 \text{ A}$$

$$I_{carga} = 0,55 A$$

$$P51AT = 5 \times 0,55$$

$$P50AT = 2,75 A$$

Ajuste:

$$**P50AT = 2,8 A**$$

## 6.2.4 PROTEÇÕES DE SOBRECORRENTE RESIDUAIS DO LADO DE AT

Esta função serve como retaguarda para falhas em grande parte dos enrolamentos do reator.

### 6.2.4.1 UNIDADE TEMPORIZADA (51NAT)

#### a) Definição da Corrente de Pickup (P51NAT)

O valor de pickup da Unidade temporizada deve ser ajustado o mais sensível possível, servindo como retaguarda para falhas em grande parte dos enrolamentos do reator. Em função do reator do Modelo 2, ser aterrado através de resistor e reator de aterramento, o que minimiza as correntes de contribuição para curtos-circuitos, o pickup desta função será ajustado para 5% da corrente nominal do TC ( $I_n$ ).

$$P51NAT = 0,05 \times I_n \quad (6.12)$$

$$P51NAT = 0,05 \times 5$$

$$P51NAT = 0,25 A$$

Ajuste:

$$**P51NAT = 0,25 A**$$

#### b) Definição da Curva de Tempo e Time-Dial (51NATD)

A curva de tempo deve ser selecionada de modo que o relé atue num tempo de

1,5 s ou superior para a máxima corrente de contribuição do reator para uma falha fase-terra na barra.

Será adotada a curva com característica Normal Inversa (C1) padrão IEC, para a função de sobrecorrente de fase temporizada de tempo inverso.

Ajuste:

**Curva = Normal Inversa (C1)**

Será utilizada a equação da Curva Normal Inversa C1(Equação 6.7).

Ajuste do TD para a atuação desta função em 1,5 seg, para um curto-circuito monofásico na barra.

Curto-circuito monofásico na Barra (IΦ Barra) → Corrente de contribuição (3I0) pelo reator, para um curto-circuito monofásico na barra.

Foi obtido o seguinte valor de IΦ Barra, utilizando-se o programa de curto-circuito ANAFAS do Cepel.

IΦ Barra = 3I0 = 3 x 19 A primários = 57 A primários = 0,29 A secundários

Logo, a partir da Equação 6.8:

$$M = \frac{57}{(200 \times 0,25)} = 1,14$$

Para T= 1,5 seg, é obtido o seguinte TD, a partir da Equação 6.7 :

$$1,5 = TD \times \frac{0,14}{(1,14^{0,02} - 1,0)}$$

$$TD = 0,03$$

Como o TD mínimo para ajuste é 0,05, o tempo de atuação será:

$$T = 0,05 \times \frac{0,14}{(1,14^{0,02} - 1,0)}$$

$$T = 2,7 \text{ seg}$$

— Verificação do tempo de atuação desta função para um curto-circuito bifásico-terra entre o TC e a bucha do reator.

Curto-circuito bifásico-terra entre o TC e a bucha do reator ( $I2\Phi T$ ) → Corrente mínima de curto-circuito, correspondente a um curto-circuito bifásico entre o TC e a bucha do reator.

Foi obtido o seguinte valor de  $I2\Phi T$ , utilizando-se o programa de curto-circuito ANAFAS do Cepel.

$$I\Phi = 3I0 = 3 \times 4308 \text{ A primários} = 12924 \text{ A primários}$$

Logo, a partir da Equação 6.8:

$$M = \frac{12924}{(200 \times 0,25)} = 258,4$$

Para  $TD = 0,05$ , a partir da Equação 6.7:

$$T = 0,05 \times \frac{0,14}{(258,4^{0,02} - 1)}$$

$$T = 0,06 \text{ seg}$$

Ajuste:

$$\mathbf{TD = 0,05}$$

#### 6.2.4.2 UNIDADE INSTANTÂNEA (50NAT)

##### a) Definição da Corrente de Pickup (P50NAT)

O valor de pickup da unidade instantânea será ajustado para que esta não atue para uma falha monofásica na barra.

Curto-circuito monofásico na barra ( $I\Phi$  Barra) → Corrente de contribuição ( $3I0$ ) pelo reator, para um curto-circuito monofásico na barra (externo).

Foi obtido o seguinte valor de  $I\Phi$  Barra, utilizando-se o programa de curto-circuito ANAFAS do Cepel.

$I\Phi \text{ Barra} = 3I0 = 3 \times 19 \text{ A primários} = 57 \text{ A primários} = 0,29 \text{ A secundários}$

$P50NAT \geq 0,29 \times 1,1$  (*considerando 10% de erros de medição*)

$$P50NAT \geq 0,32 \text{ A}$$

Ajuste:

$$P50NAT = \mathbf{0,4 \text{ A}}$$

### **6.2.5 PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE DE NEUTRO OU RESIDUAL DO LADO DE NEUTRO DO REATOR**

Esta função serve como retaguarda para falhas em grande parte dos enrolamentos do reator.

#### **6.2.5.1 UNIDADE TEMPORIZADA (51G)**

##### **a) Definição da Corrente de Pickup (P51G)**

O valor de pickup da unidade temporizada deve ser ajustado o mais sensível possível, servindo como retaguarda para falhas em grande parte dos enrolamentos do reator. Em função do reator do Modelo 2 ser aterrado através de resistor e reator de aterramento, o que minimiza as correntes de contribuição para curtos-circuitos, o pickup desta função será ajustado para 5% da corrente nominal do TC ( $I_n$ ).

$$P51G = 0,05 \times I_n \quad (6.13)$$

$$P51G = 0,05 \times 5$$

$$P51G = 0,25 \text{ A}$$

Ajuste:

$$P51G = \mathbf{0,25 \text{ A}}$$

## b) Definição da Curva de Tempo e Time-Dial (51GD)

A curva de tempo deve ser selecionada de modo que o relé atue num tempo de 1,5 s ou superior para a máxima corrente de contribuição do reator para uma falha fase-terra na barra.

Será adotada a curva com característica Normal Inversa (C1) padrão IEC, para a função de sobrecorrente de fase temporizada de tempo inverso.

Ajuste:

$$\text{Curva} = \text{Normal Inversa (C1)}$$

Será utilizada a equação da Curva Normal Inversa C1(Equação 6.7).

Ajuste do TD para a atuação desta função em 1,5 seg, para um curto-circuito monofásico na Barra.

Curto-circuito monofásico na Barra ( $I\Phi$  Barra) → Corrente de contribuição ( $3I0$ ) pelo reator, para um curto-circuito monofásico na Barra.

Foi obtido o seguinte valor de  $I\Phi$  Barra, utilizando-se o programa de curto-circuito ANAFAS do Cepel.

$$I\Phi \text{ Barra} = 3I0 = 3 \times 19 \text{ A primários} = 57 \text{ A primários} = 1,425 \text{ A secundários}$$

Logo, a partir da Equação 6.8:

$$M = \frac{57}{(40 \times 0,25)} = 5,7$$

Para  $T= 1,5$  seg, é obtido o seguinte TD, a partir da Equação 6.7:

$$1,5 = TD \times \frac{0,14}{(5,7^{0,02} - 1,0)}$$

$$TD = 0,38$$

Ajuste:

$$TD = 0,38$$

### 6.2.5.2 UNIDADE INSTANTÂNEA (50G)

#### a) Definição da Corrente de Pickup (P50G)

O valor de pickup da unidade instantânea será ajustado para que esta não atue para uma falha monofásica na barra.

Curto-circuito monofásico na Barra ( $I\Phi$  Barra)  $\rightarrow$  Corrente de contribuição ( $3I0$ ) pelo reator, para um curto-circuito monofásico na barra (externo).

Foi obtido o seguinte valor de  $I\Phi$  Barra, utilizando-se o programa de curto-circuito ANAFAS do Cepel.

$$I\Phi \text{ Barra} = 3I0 = 3 \times 19 \text{ A primários} = 57 \text{ A primários} = 1,425 \text{ A secundários}$$

$$P50G \geq 1,425 \times 1,1 \text{ (considerando 10\% de erros de medição)}$$

$$P50G \geq 1,57 \text{ A}$$

Ajuste:

$$\mathbf{P50G = 1,6 A}$$

## 7 DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES EXECUTADAS E RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentadas as simulações realizadas referentes aos dois sistemas elétricos e reatores modelados, com a finalidade de se observar peculiaridades, em função de características do sistema e tipo de aterramento, que devem ser observadas quando da definição dos sistemas de proteção e seus respectivos ajustes.

Os pontos de leitura de corrente especificados são referentes aos secundários dos TCs dos reatores, tanto para os de fase quanto para o neutro.

No modelo do sistema elétrico de potência, implementado no ATP/EMTP, foram simulados os seguintes casos:

— Falhas internas ao reator:

Falhas monofásicas a 90, 50 e 10 % do enrolamento do reator, considerando o fator de dispersão do reator em 0,25, 0,5 e 0,75, com a finalidade de determinar a influência deste parâmetro, que depende de aspectos construtivos do mesmo, no desempenho das proteções.

— Falhas externas ao reator:

Falhas monofásicas, bifásica-terra e trifásica evolutiva na barra próxima ao reator em estudo, falhas monofásicas em linhas de transmissão paralelas, com eliminação pela proteção da referida linha (Modelo 1) e falha na própria linha onde está conectado o reator, também com eliminação pela proteção da linha.

— Manobras no sistema:

Processo de energização da linha de transmissão, com conexão do reator na mesma (modelo 1) e energização de linha de transmissão, com fechamento de paralelo entre sistemas (modelo 2).

Os tempos de pré-falta, falta e pós-falta são definidos da seguinte maneira: para as faltas internas é estipulado um tempo, de pelo menos 400 ms, para garantir a estabilização dos filtros utilizados nos modelos dos relés, onde em seguida é aplicada a falta sem simulação de abertura do disjuntor, num tempo total de 1s para testar o comportamento dos relés.

Para as faltas externas aos reatores é utilizado um tempo de pré-falta conforme descrito no caso anterior, e o tempo de falta é determinado pelo tempo de abertura estipulado aos disjuntores da linha ou barra onde foi simulada a falta (até 100 ms conforme orientado pelo submódulo 2.6 dos Procedimentos de Rede do ONS [9]).

Para cada caso simulado serão apresentadas três figuras:

- A primeira apresenta as correntes de fase do lado de alta tensão do reator (Fase HV), as correntes de fase do lado do fechamento de neutro do reator (Fase N) e a corrente de neutro (N), em valores secundários.
- A segunda figura apresenta as saídas de disparo dos relés de sobrecorrente, sendo estes os seguintes: sobrecorrente residual do lado de alta tensão do reator (51RHV – unidade temporizada, 50RHV – unidade instantânea); sobrecorrente de fase do lado de alta tensão do reator (51FHV – unidade temporizada, 50FHV – unidade instantânea) e sobrecorrente de neutro do reator (51N – unidade temporizada, 50N – unidade instantânea).
- A terceira figura apresenta as saídas de disparo dos relés diferenciais, sendo estes os seguintes: diferencial de fase (87F – unidade sem bloqueio por harmônico, 87FH – unidade com bloqueio por harmônico) e diferencial de terra restrita (87R – unidade sem bloqueio por harmônico, 87RH – unidade com bloqueio por harmônico);

Os relés diferenciais de terra restrita foram conectados nos TCs de fase, sendo alimentado por suas correntes residuais. Foram monitoradas as saídas dos relés diferenciais com e sem bloqueio por harmônicos para análise desta função.

## **7.1 SIMULAÇÕES E RESULTADOS OBTIDOS DO MODELO 1**

Os seguintes resultados foram obtidos a partir do Modelo 1, cujo reator 500 kV tem como característica estar conectado em linha de transmissão com circuitos paralelos e como o neutro aterrado solidamente.

### 7.1.1 CASO 1 – FALHA INTERNA A 10 % DO ENROLAMENTO DO REATOR

Curto-circuito monofásico, aplicado a 10 % do enrolamento do reator a partir da bucha do mesmo. A falha foi aplicada em 400 ms sem simulação de abertura de disjuntor com um tempo de simulação de 1s.

#### a) Fator de dispersão de 0.25

A partir da Figura 7.1 observa-se saturação nos TCs de fase do lado da bucha do reator e do TC de neutro.

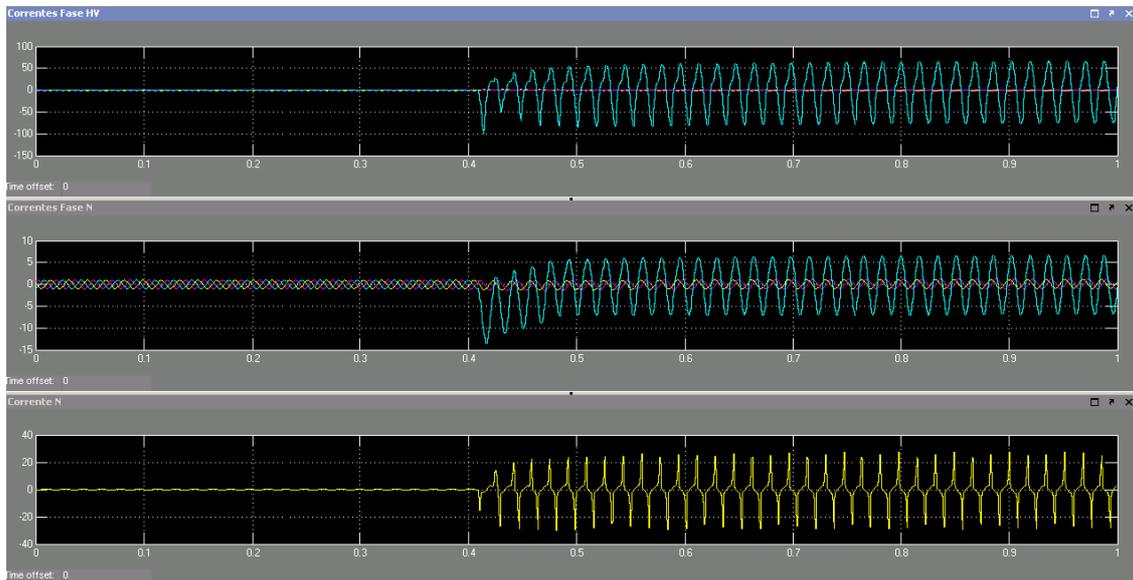


Figura 7.1 – Correntes do Caso 1-a – Modelo 1

A partir da Figura 7.2 observa-se a atuação de todas as unidades instantâneas de sobrecorrente, com um pequeno atraso de atuação da 50N. Quanto as unidades temporizadas, foi verificado a atuação da 51RHV, em 300 ms após o início da falta, e da 51FHV, em 450 ms após o início da falta. Em até 1 s, não foi verificado a atuação da função 51N.

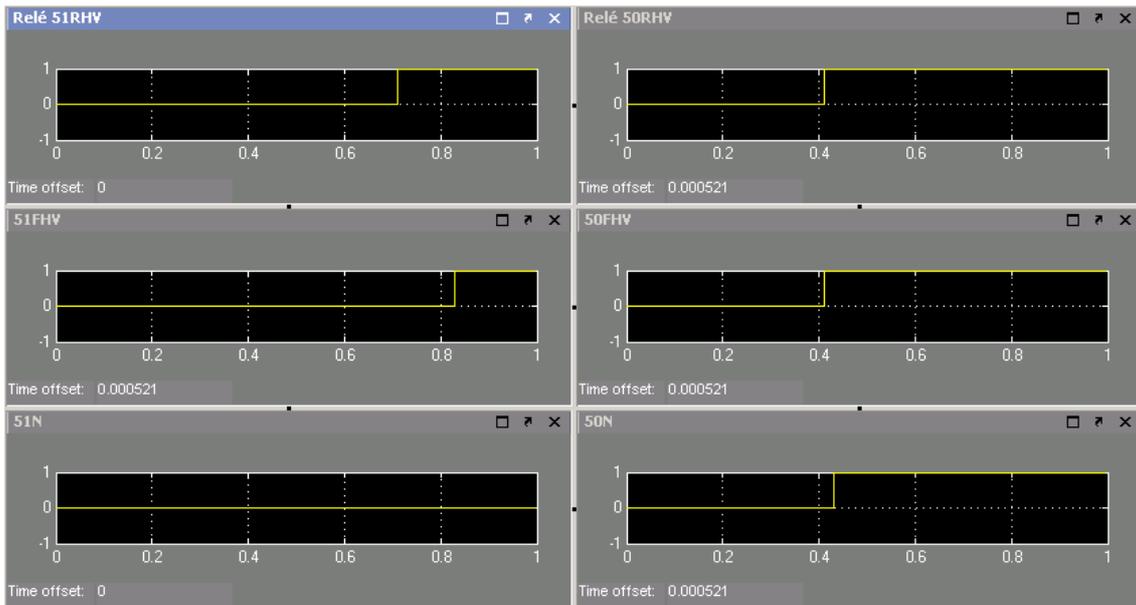


Figura 7.2 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 1-a – Modelo 1

A partir da Figura 7.3 observa-se a atuação das proteções diferenciais de fase e de terra restrita. As mesmas atuaram imediatamente após o início da falta, entretanto observa-se que as funções com bloqueio por harmônicos, permaneceram bloqueadas por quase 300 ms após o início da falta, sendo as suas atuações liberadas em seguida de forma intermitente. Este bloqueio ocorreu em função da presença de 2º harmônico provocado pela saturação dos TCs de fase do lado da bucha do reator.

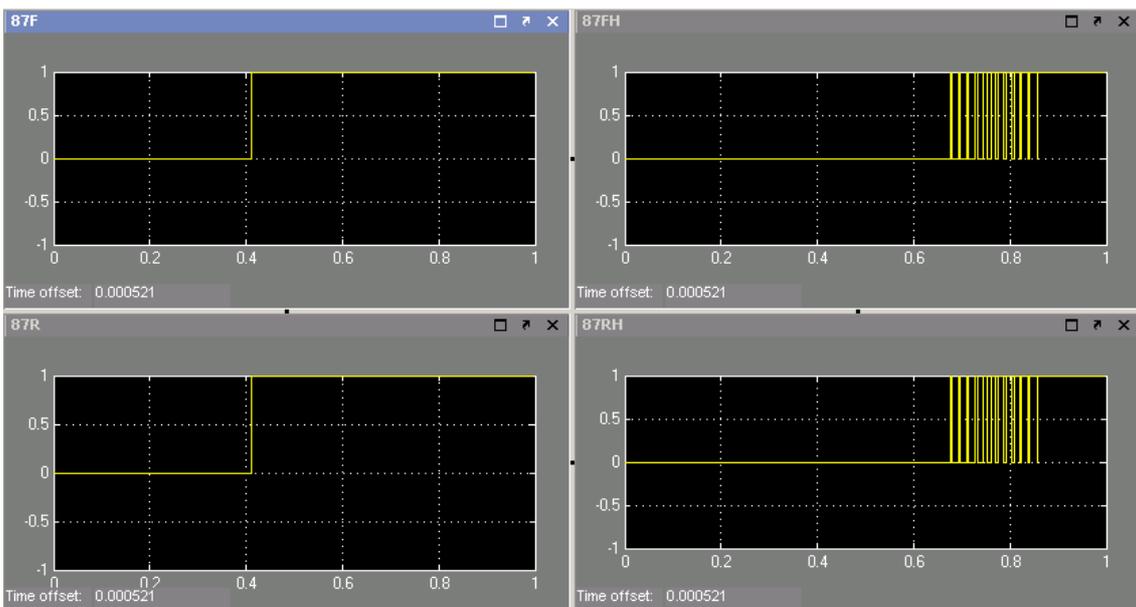


Figura 7.3 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 1-a – Modelo 1

## b) Fator de dispersão de 0.5

A partir da Figura 7.4 observa-se saturação nos TCs de fase do lado da bucha do reator e do TC de neutro.

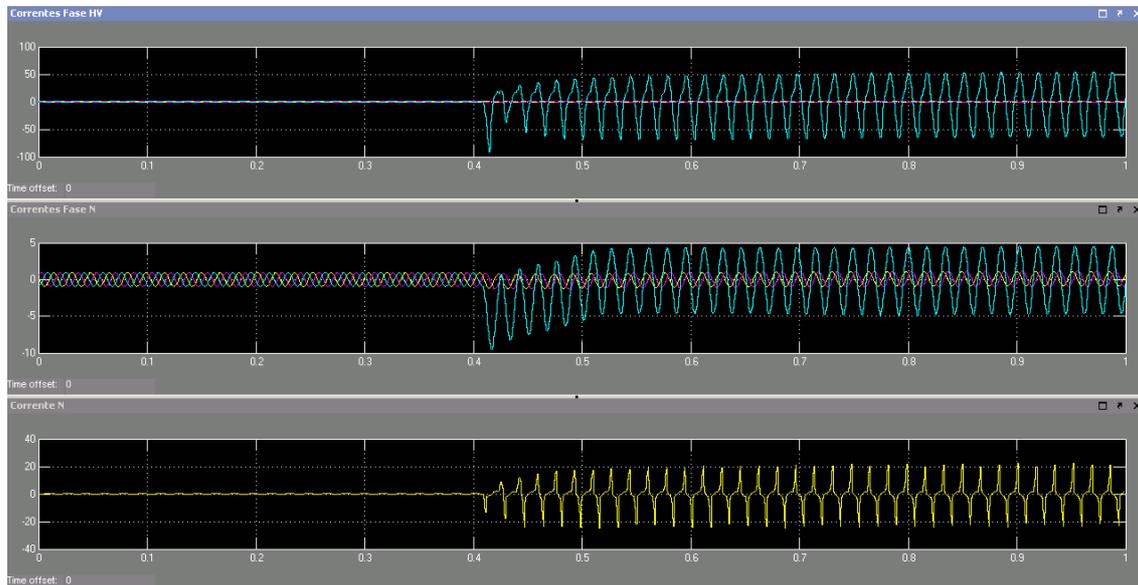


Figura 7.4 – Correntes do Caso 1-b – Modelo 1

A partir da Figura 7.5 observa-se a atuação de todas as unidades instantâneas de sobrecorrente, com um pequeno atraso de atuação da 50N. Quanto as unidades temporizadas, foi verificada a atuação da 51RHV, em 300 ms após o início da falta, e da 51FHV, em 450 ms após o início da falta. Em até 1 s, não foi verificada a atuação da função 51N. Os tempos verificados foram similares aos observados no caso 1-a.

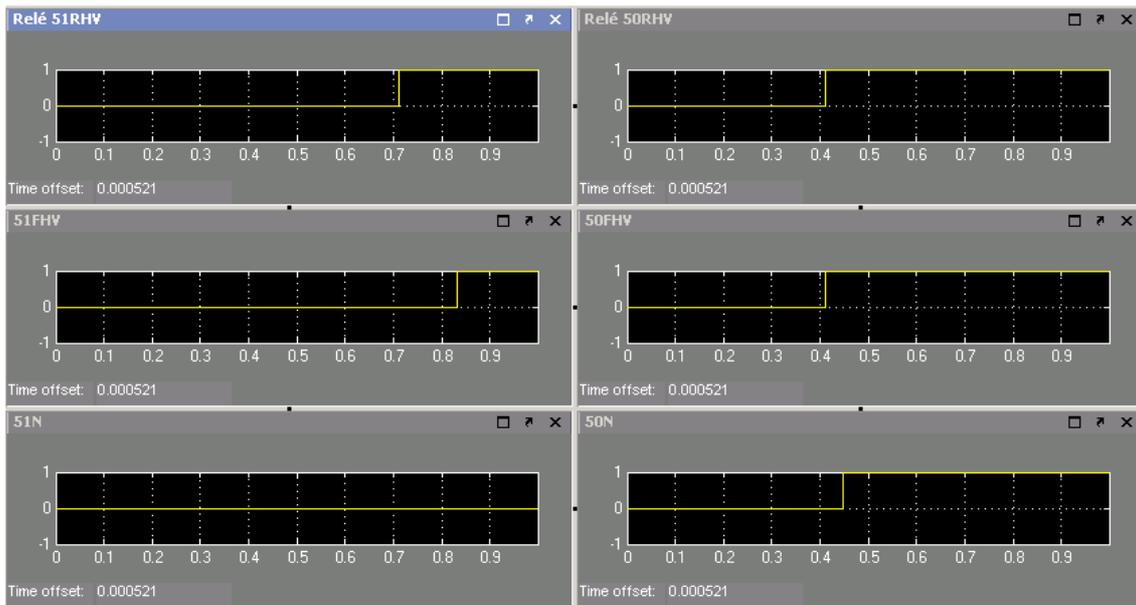


Figura 7.5 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 1-b – Modelo 1

A partir da Figura 7.6 observa-se a atuação das proteções diferenciais de fase e de terra restrita. As mesmas atuaram imediatamente após o início da falta. Entretanto, observa-se que as funções com bloqueio por harmônicos permaneceram bloqueadas por quase 300 ms após o início da falta, sendo as suas atuações liberadas em seguida de forma intermitente. Este bloqueio ocorreu em função da presença de 2º harmônico provocado pela saturação dos TCs de fase do lado da bucha do reator. Os tempos verificados foram similares aos observados no caso 1-a.

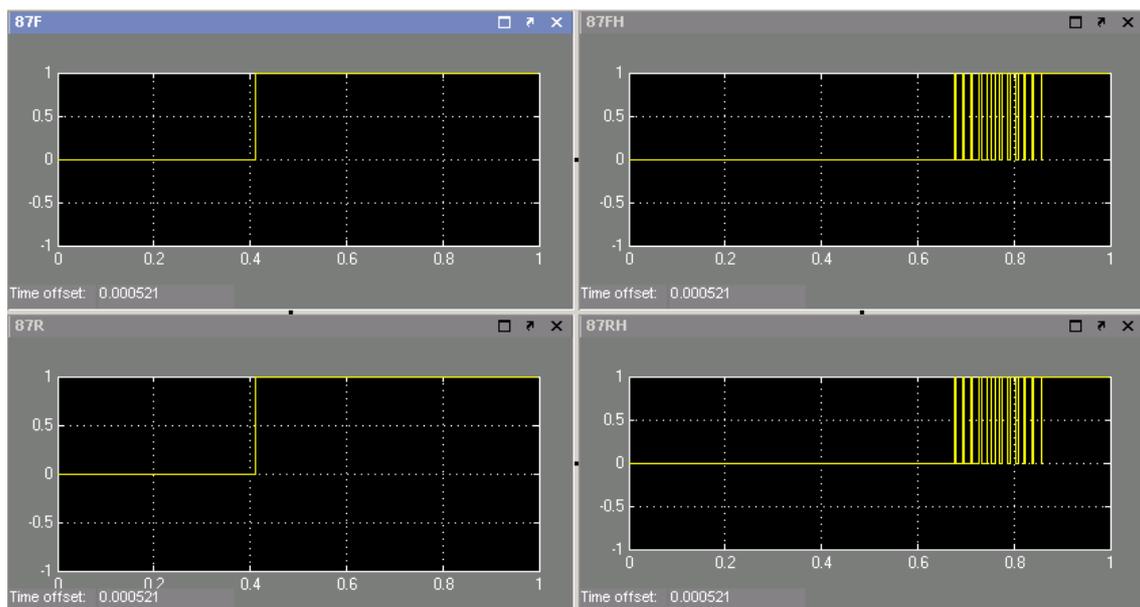


Figura 7.6 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 1-b – Modelo 1

### c) Fator de dispersão de 0.75

A partir da Figura 7.7 observa-se saturação nos TCs de fase do lado da bucha do reator e do TC de neutro.

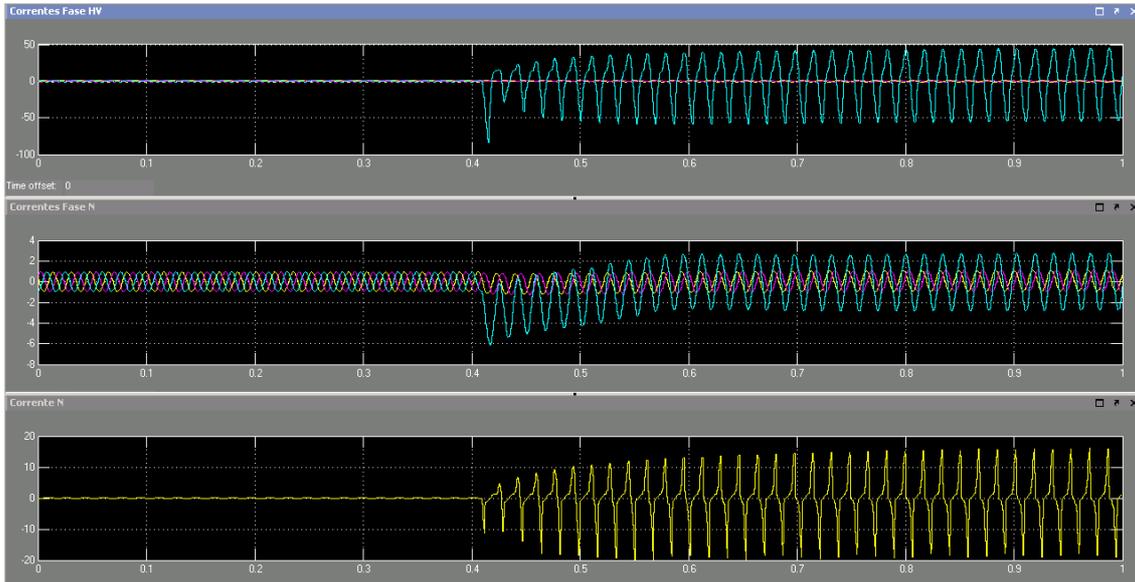


Figura 7.7 – Correntes do Caso 1-c – Modelo 1

A partir da Figura 7.8 observa-se a atuação de todas as unidades instantâneas de sobrecorrente, com um atraso de atuação da 50N. Quanto às unidades temporizadas, foi verificada a atuação da 51RHV, em 300 ms após o início da falta, e da 51FHV, em 450 ms após o início da falta. Em até 1 s, não foi verificada a atuação da função 51N. Os tempos verificados foram similares aos observados nos casos 1-a e 1-b.

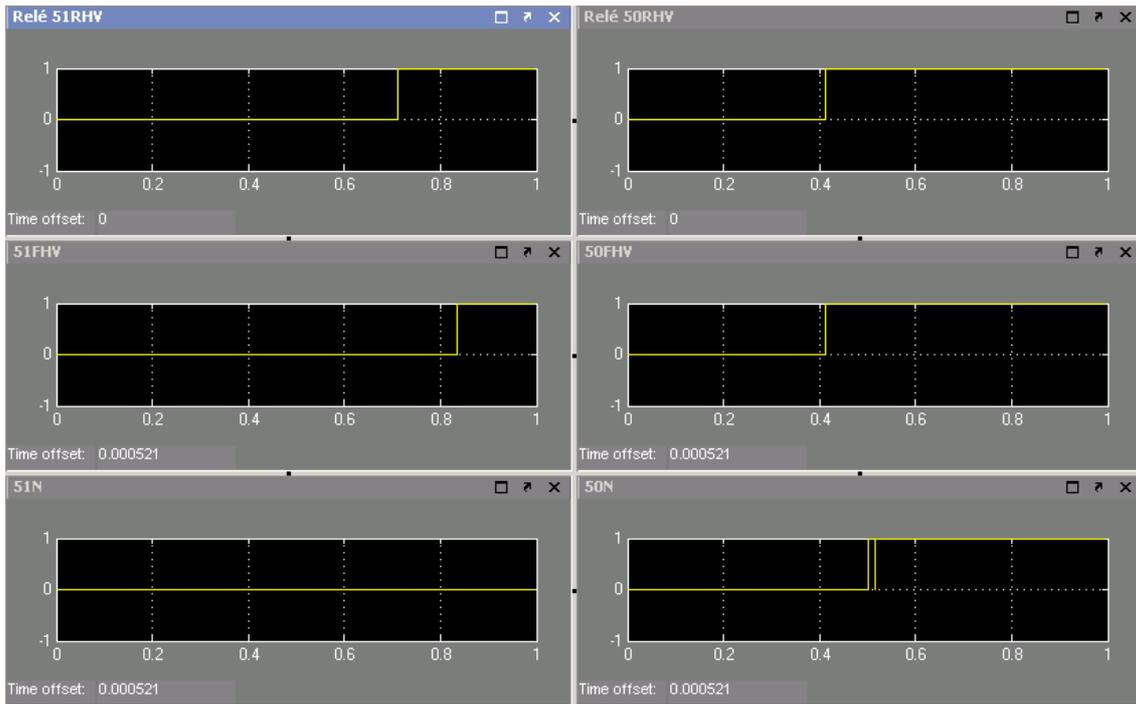


Figura 7.8 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 1-c – Modelo 1

A partir da Figura 7.9 observa-se a atuação das proteções diferenciais de fase e de terra restrita. As mesmas atuaram imediatamente após o início da falta. Entretanto, observa-se que as funções com bloqueio por harmônicos, permaneceram bloqueadas por quase 450 ms após o início da falta, sendo as suas atuações liberadas em seguida de forma intermitente. Este bloqueio ocorreu em função da presença de 2º harmônico provocado pela saturação dos TCs de fase do lado da bucha do reator.

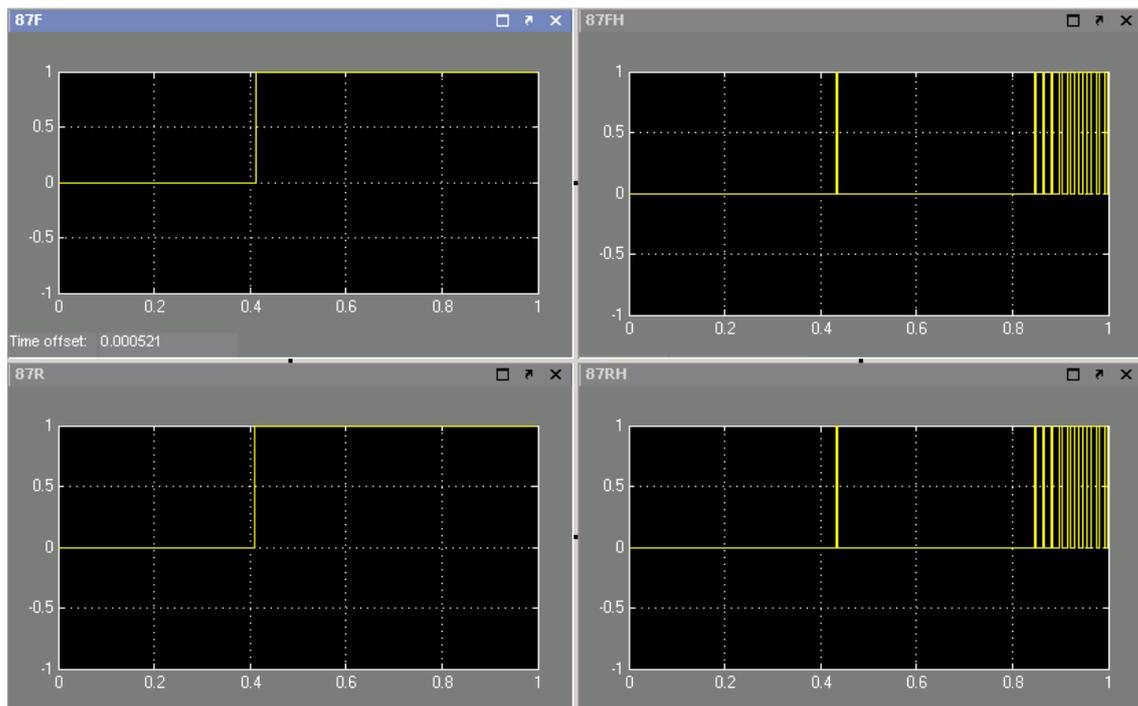


Figura 7.9 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 1-c – Modelo 1

### 7.1.2 CASO 2 – FALHA INTERNA A 50 % DO ENROLAMENTO DO REATOR

Curto-circuito monofásico, aplicado a 50 % do enrolamento do reator. A falha foi aplicada em 400 ms sem simulação de abertura de disjuntor com um tempo de simulação de 1s.

#### a) Fator de dispersão de 0.25

A partir da Figura 7.10 observa-se uma leve saturação nos TCs de fase e saturação do TC de neutro do reator.

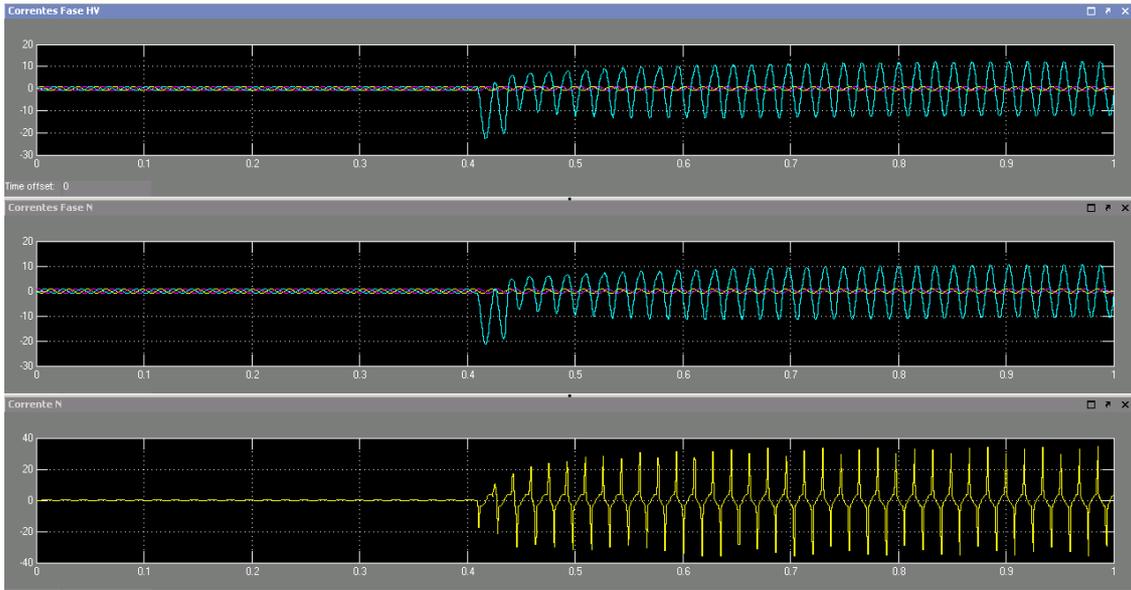


Figura 7.10 – Correntes do Caso 2-a – Modelo 1

A partir da Figura 7.11 observa-se a atuação de todas as unidades instantâneas de sobrecorrente, com um pequeno atraso de atuação da 50N. Quanto às unidades temporizadas, em até 1 s foi verificada apenas a atuação da unidade 51RHV, em 350 ms após o início da falta.

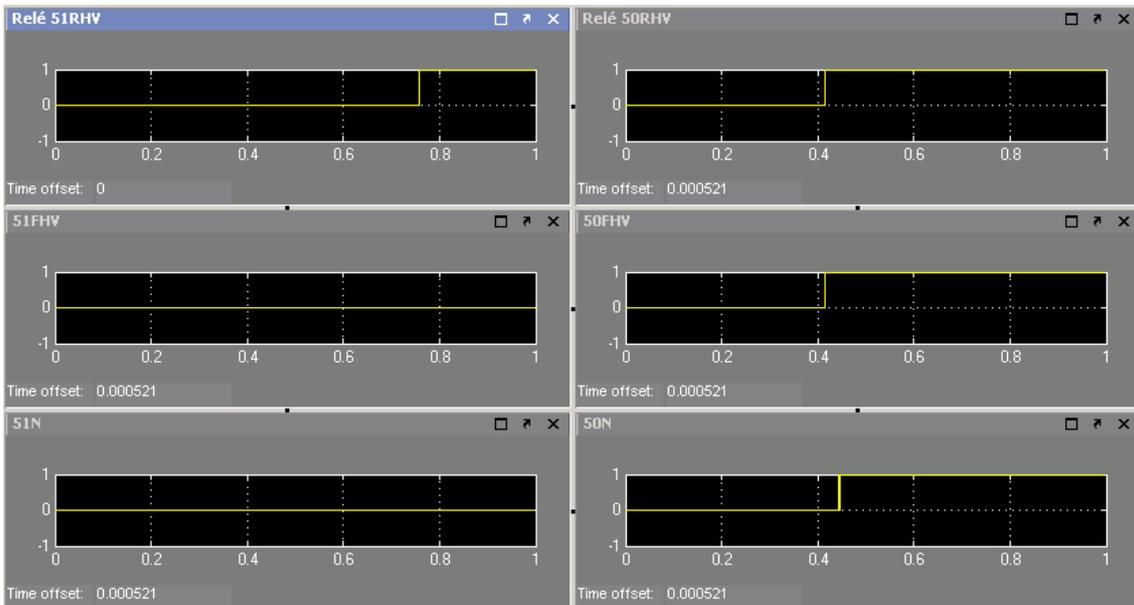


Figura 7.11 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 2-a – Modelo 1

A partir da Figura 7.12 observa-se a atuação das proteções diferenciais de fase e

de terra restrita. As mesmas atuaram imediatamente após o início da falta. Entretanto, observa-se que as funções com bloqueio por harmônicos foram bloqueadas após alguns milissegundos das suas atuações, permanecendo bloqueadas por quase 200 ms, sendo as mesmas liberadas em seguida. Este bloqueio ocorreu em função da presença de 2º harmônico provocado pela saturação dos TCs de fase.

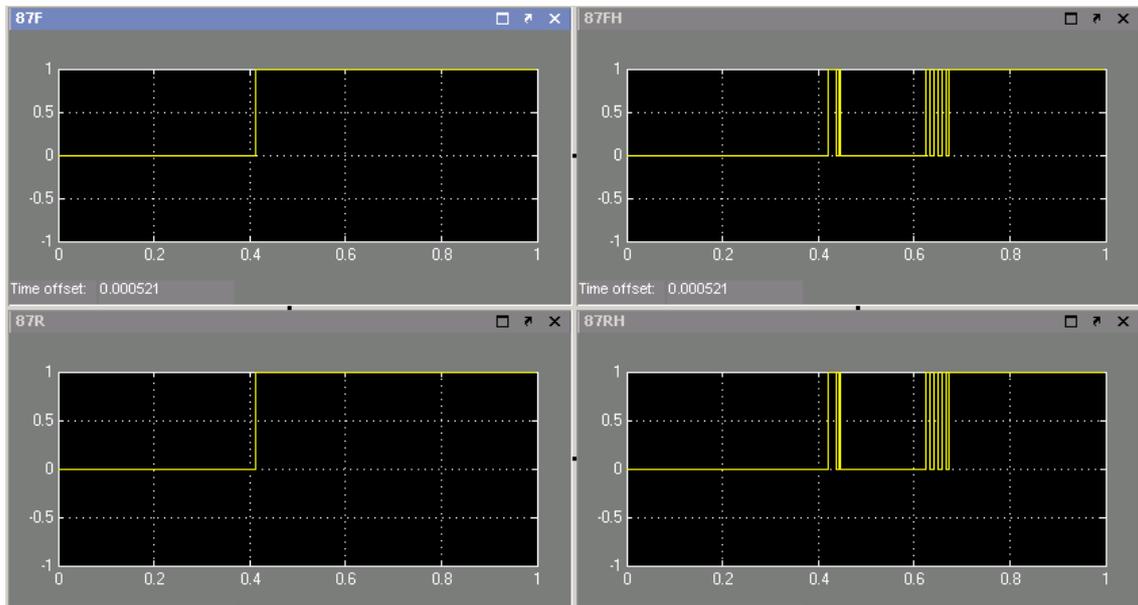


Figura 7.12 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 2-a – Modelo 1

### b) Fator de dispersão de 0.5

A partir da Figura 7.13 observa-se uma leve saturação nos TCs de fase e saturação do TC de neutro do reator.

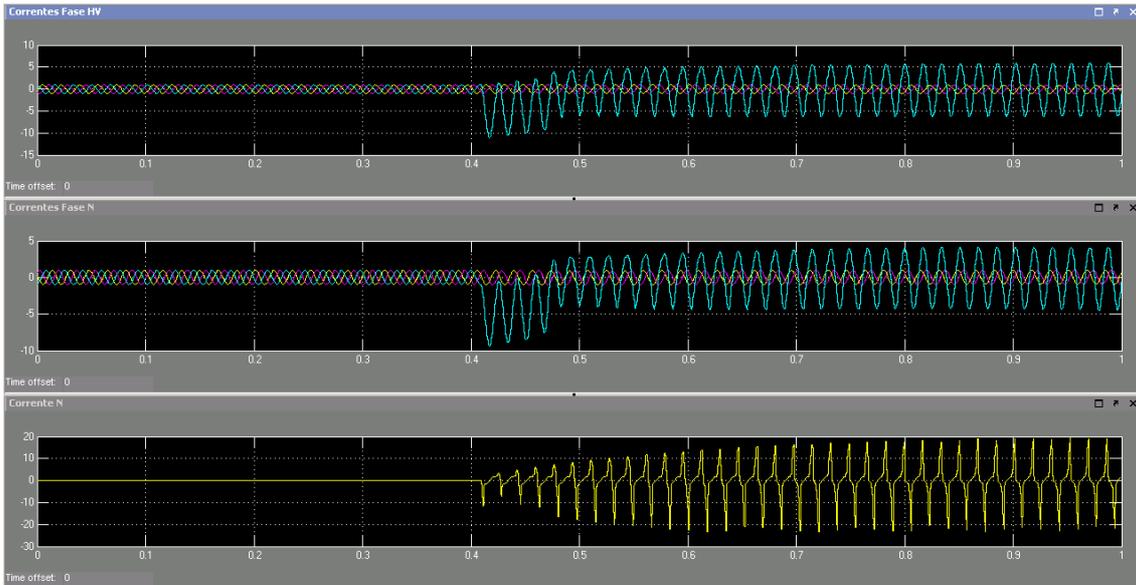


Figura 7.13 – Correntes do Caso 2-b – Modelo 1

A partir da Figura 7.14 observa-se a atuação de todas as unidades instantâneas de sobrecorrente, com um atraso de aproximadamente 150 ms da atuação do 50N. Quanto às unidades temporizadas, em até 1 s apenas foi verificada a atuação da unidade 51RHV, em 470 ms após o início da falta.

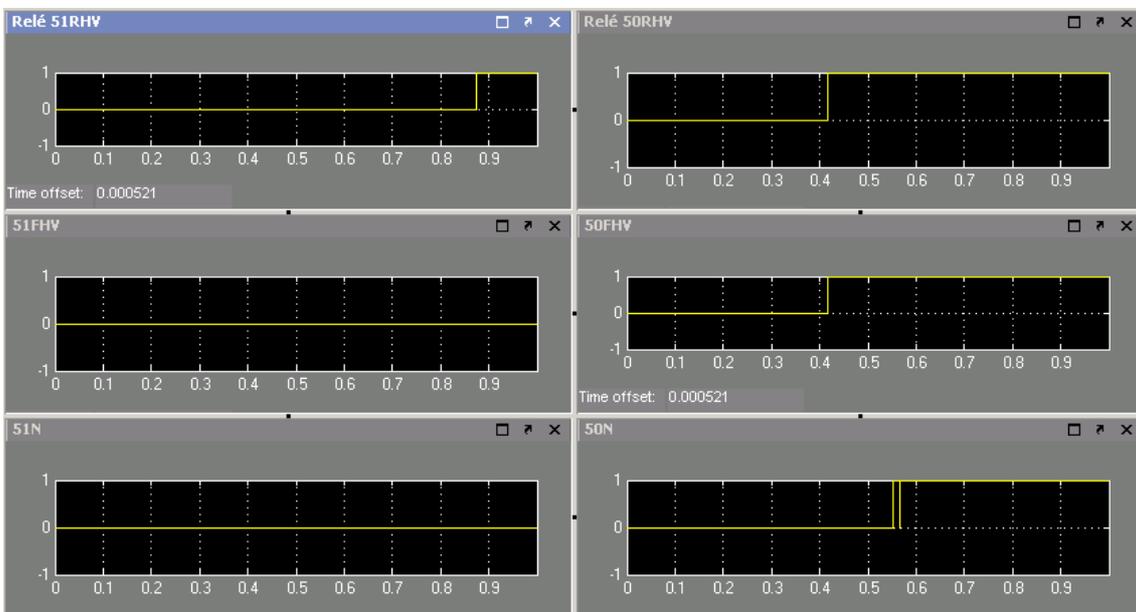


Figura 7.14 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 2-b – Modelo 1

A partir da Figura 7.15 observa-se a atuação das proteções diferenciais de fase e

de terra restrita. As mesmas atuaram imediatamente após o início da falta. Entretanto, as funções com bloqueio por harmônicos, foram bloqueadas de forma intermitente até 300 ms de falta.

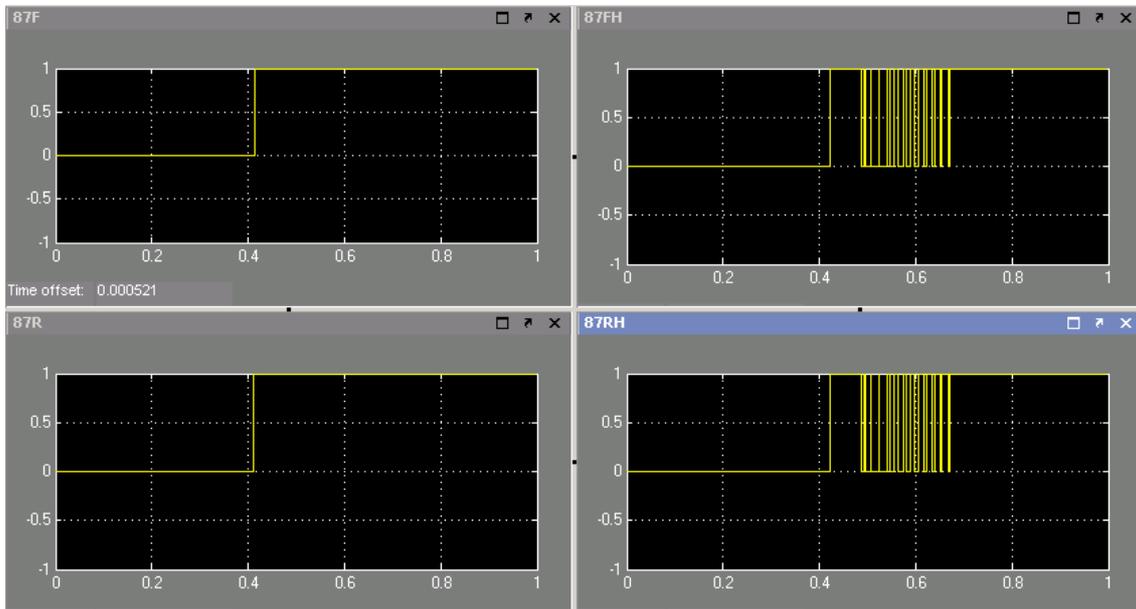


Figura 7.15 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 2-b – Modelo 1

### c) Fator de dispersão de 0.75

A partir da Figura 7.16 observa-se saturação do TC de neutro do reator.

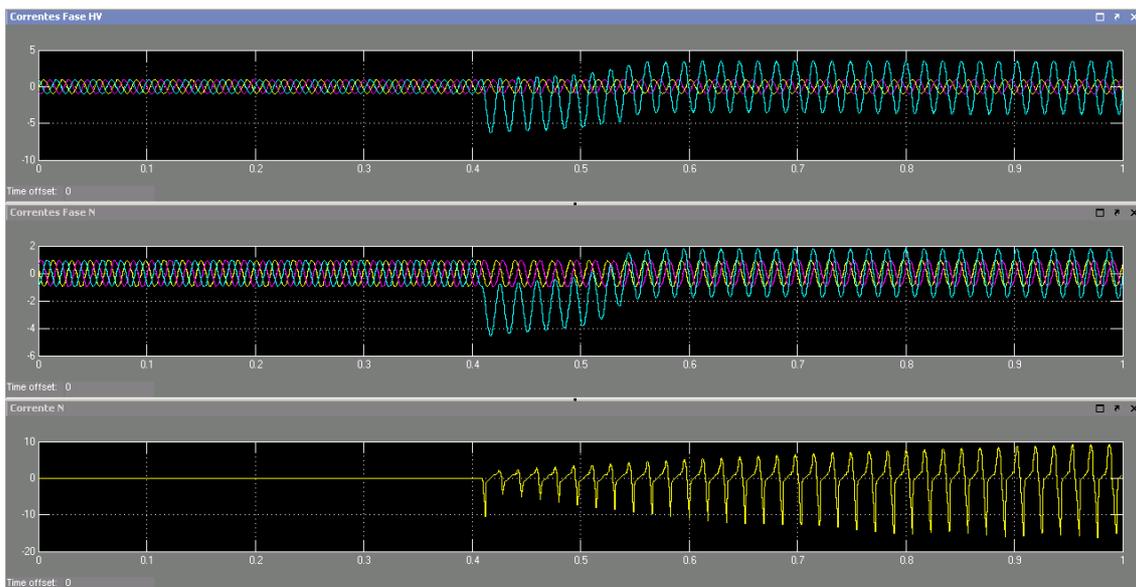


Figura 7.16 – Correntes do Caso 2-c – Modelo 1

A partir da Figura 7.17 observa-se que houve a atuação da unidade instantânea de sobrecorrente 50RHW, que não houve a atuação da unidade instantânea 50FHV e que a unidade instantânea de sobrecorrente de neutro, 50N, operou com um atraso de aproximadamente 550 ms após o início da falta. Quanto às unidades temporizadas, em até 1 s não foi observada atuação.

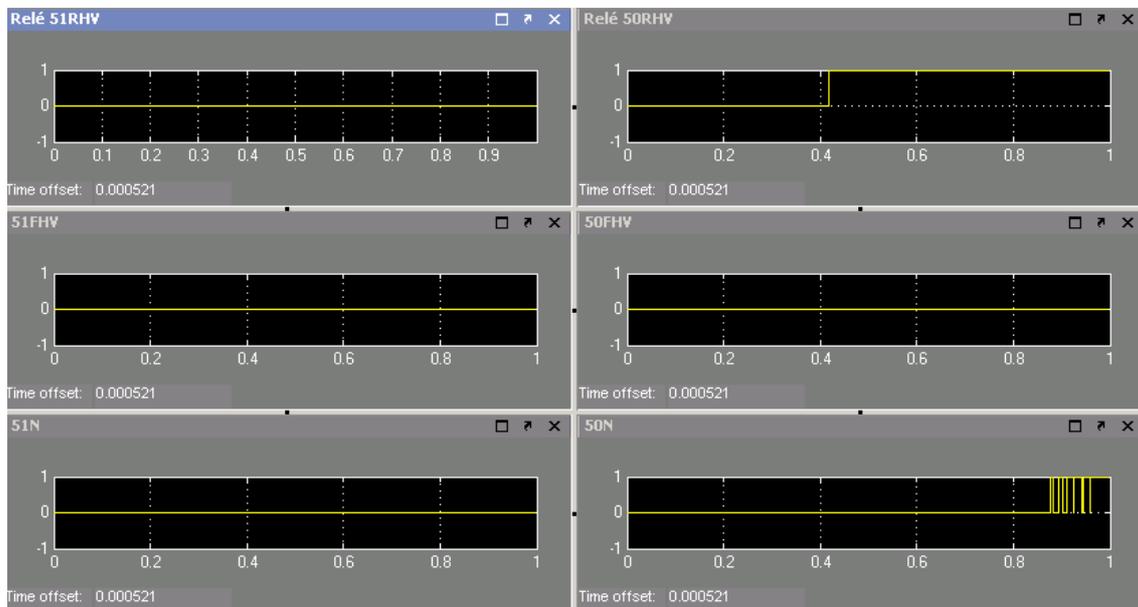


Figura 7.17 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 2-c – Modelo 1

A partir da Figura 7.18 observa-se a atuação das proteções diferenciais de fase e de terra restrita. As mesmas atuaram imediatamente após o início da falta, sem bloqueio por harmônicos.

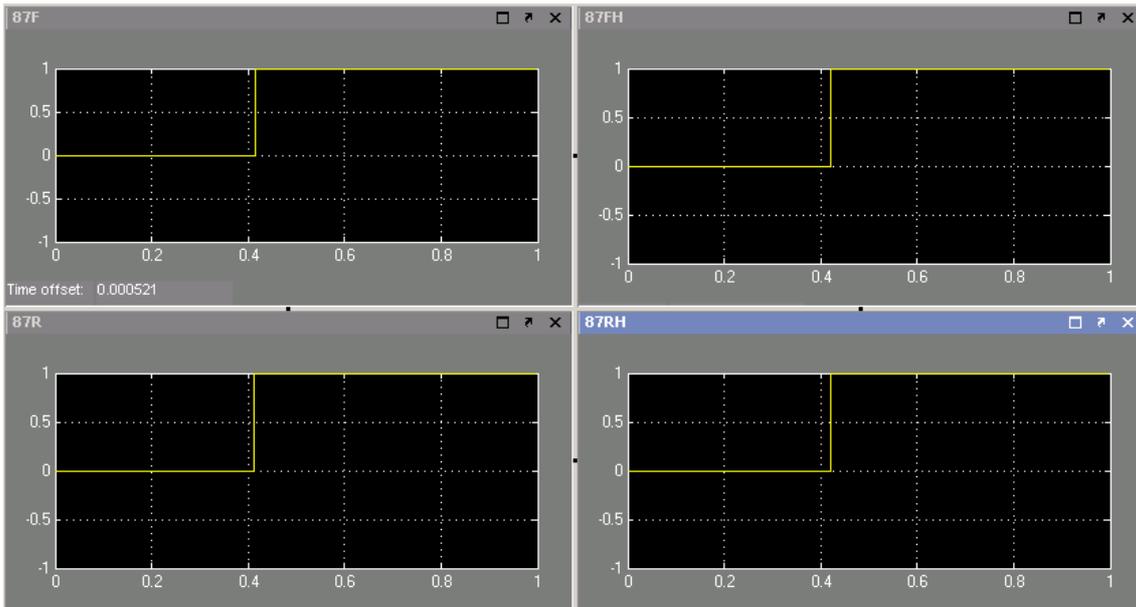


Figura 7.18 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 2-c – Modelo 1

### 7.1.3 CASO 3 – FALHA INTERNA A 90 % DO ENROLAMENTO DO REATOR

Curto-circuito monofásico, aplicado a 90 % do enrolamento do reator a partir da bucha do mesmo. A falha foi aplicada em 400 ms sem abertura de disjuntor, com um tempo de simulação de 1s.

#### a) Fator de dispersão de 0.25

A partir da Figura 7.19, observa-se uma leve saturação nos TCs de fase próximos ao neutro do reator e saturação do TC de neutro do reator.

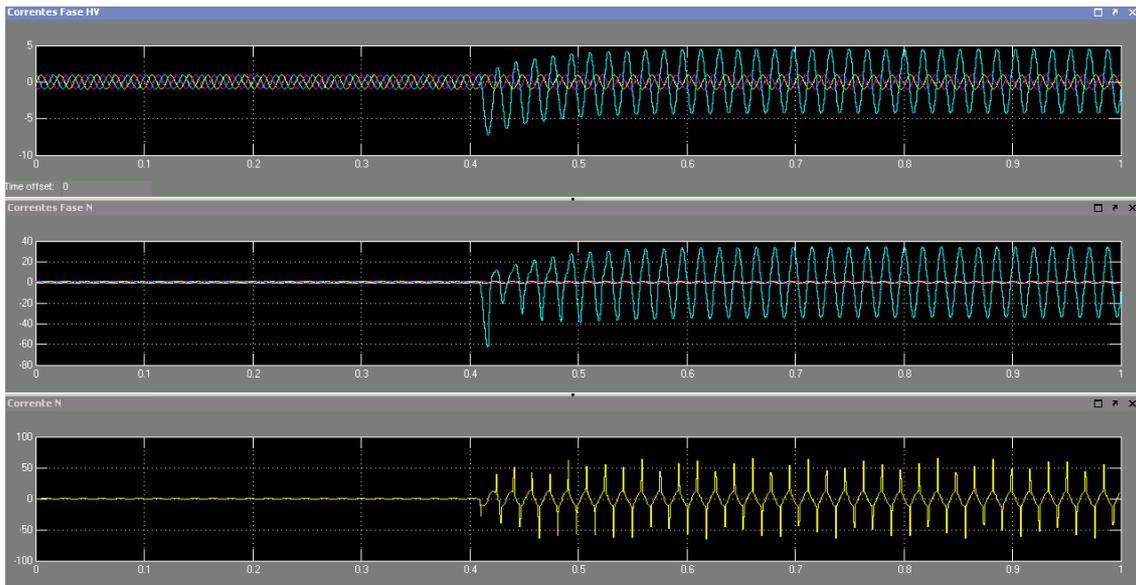


Figura 7.19 – Correntes do Caso 3-a – Modelo 1

A partir da Figura 7.20 observa-se a atuação de todas as unidades instantâneas de sobrecorrente. Quanto às unidades temporizadas, em até 1 s foi verificada apenas a atuação da unidade 51RHV, em 550 ms após o início da falta.

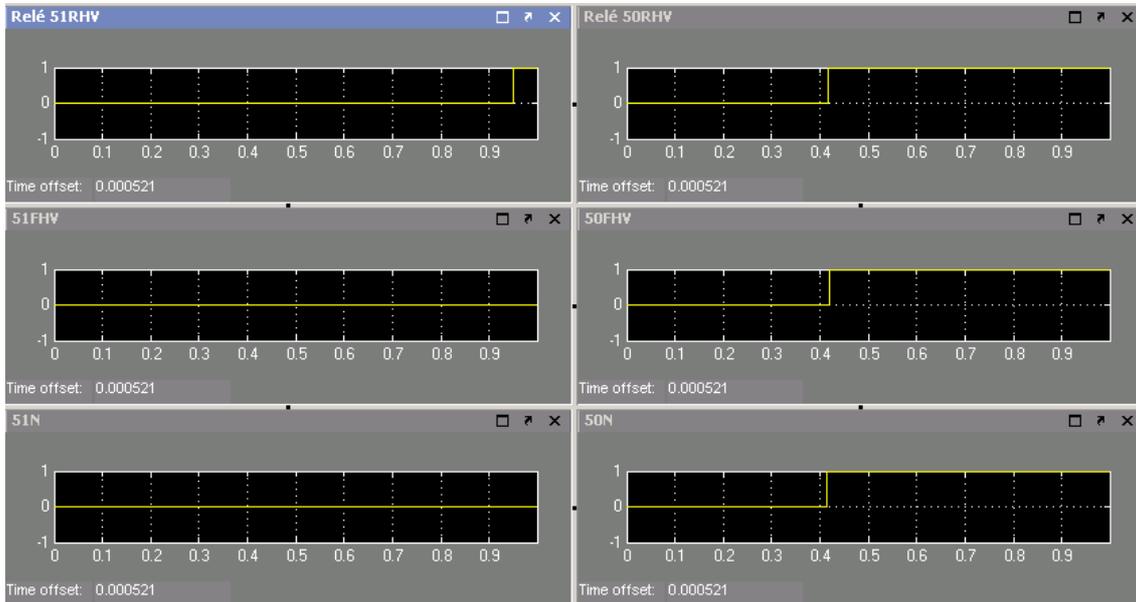


Figura 7.20 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 3-a – Modelo 1

A partir da Figura 7.21 observa-se a atuação das proteções diferenciais de fase e de terra restrita. As mesmas atuaram imediatamente após o início da falta. Entretanto

observa-se que as funções com bloqueio por harmônicos foram bloqueadas, permanecendo assim até, aproximadamente, 150 ms do início da falta, sendo as mesmas liberadas em seguida. Este bloqueio ocorreu em função da presença de 2º harmônico provocado pela saturação dos TCs de fase, próximo ao neutro do reator.

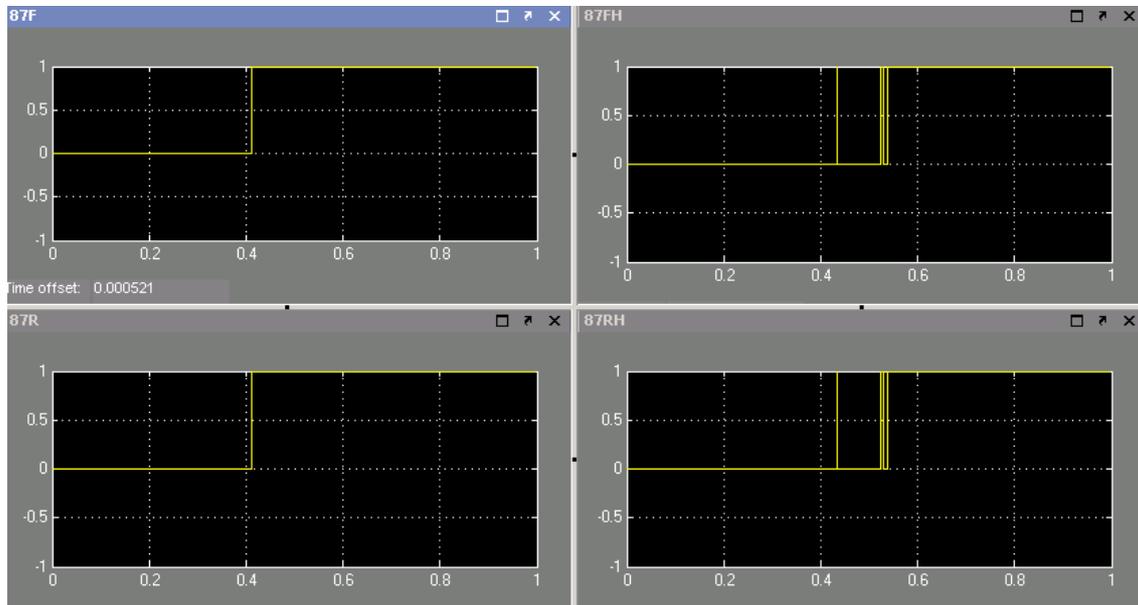


Figura 7.21 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 3-a – Modelo 1

### b) Fator de dispersão de 0.5

A partir da Figura 7.22, observa-se uma leve saturação nos TCs de fase próximos ao neutro do reator, e saturação do TC de neutro do reator.

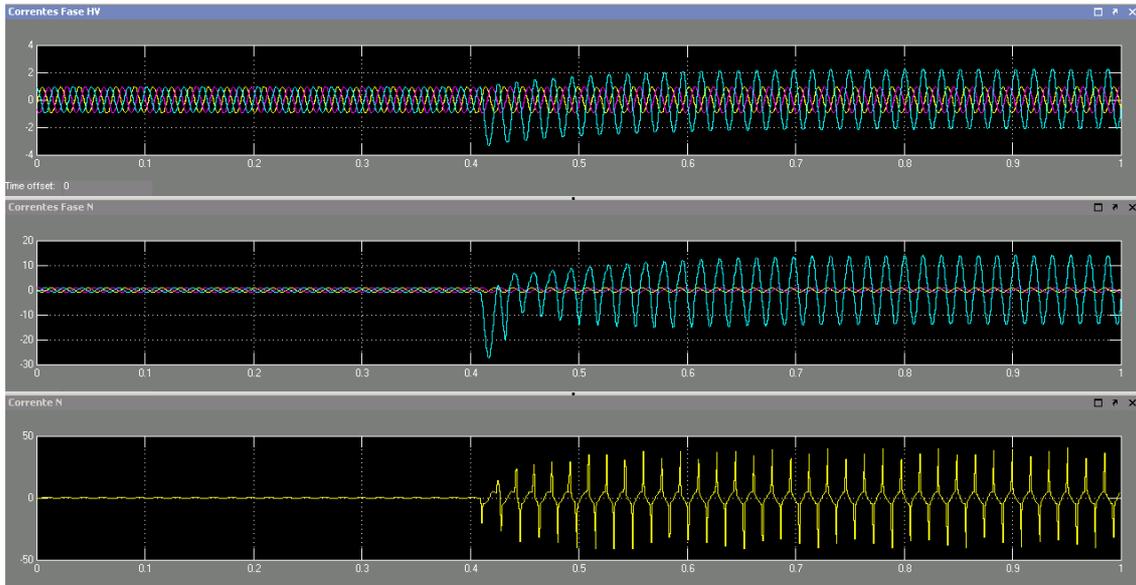


Figura 7.22 – Correntes do Caso 3-b – Modelo 1

A partir da Figura 7.23 observa-se a atuação apenas da unidade instantânea de sobrecorrente de neutro 50N. Quanto às unidades temporizadas, em até 1 s não foi verificada atuação.

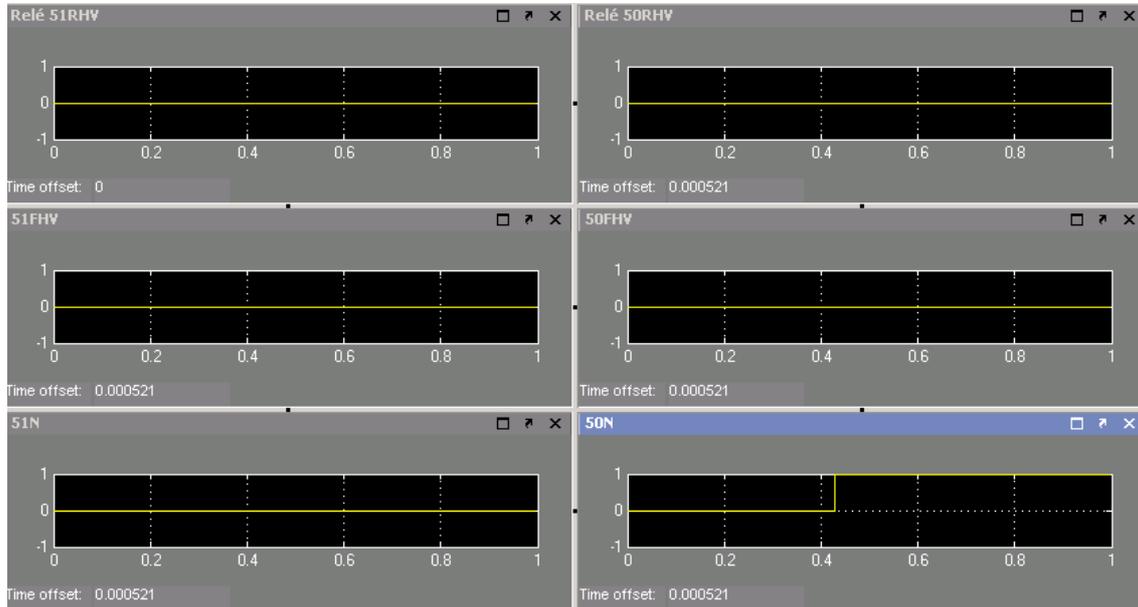


Figura 7.23 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 3-b – Modelo 1

A partir da Figura 7.24 observa-se a atuação das proteções diferenciais de fase e de terra restrita. As mesmas atuaram imediatamente após o início da falta. Entretanto

observa-se que as funções com bloqueio por harmônicos foram bloqueadas após alguns milissegundos das suas atuações, permanecendo assim até, aproximadamente, 170 ms do início da falta, sendo as mesmas liberadas em seguida. Este bloqueio ocorreu em função da presença de 2º harmônico provocado pela saturação dos TCs de fase, próximo ao neutro do reator.

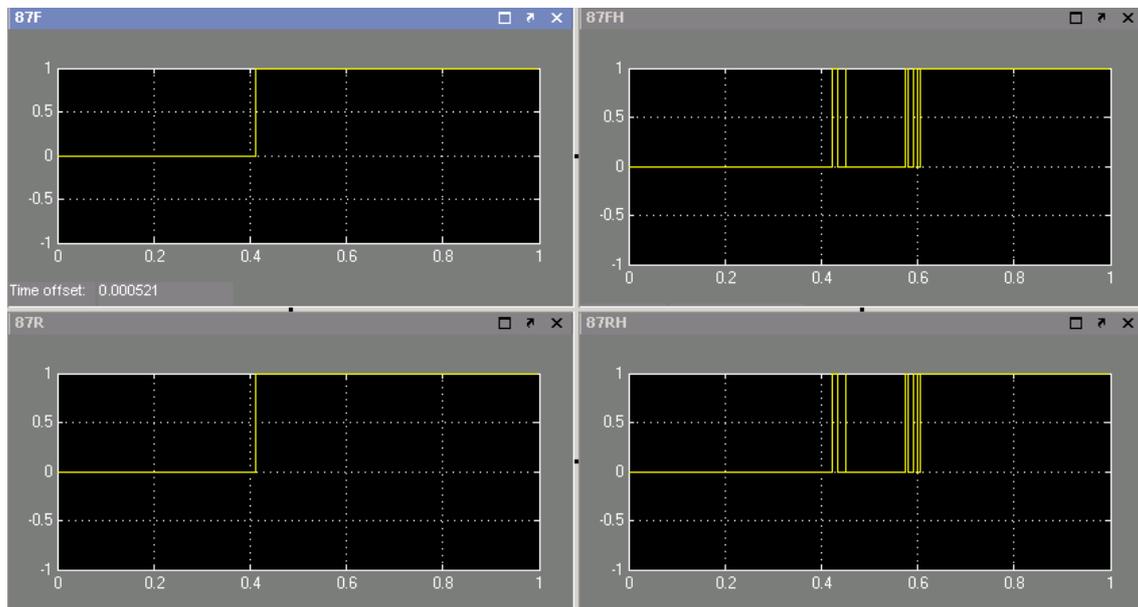


Figura 7.24 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 3-b – Modelo 1

### c) Fator de dispersão de 0.75

A partir da Figura 7.25, observa-se uma leve saturação nos TCs de fase próximos ao neutro do reator, e saturação do TC de neutro do reator.

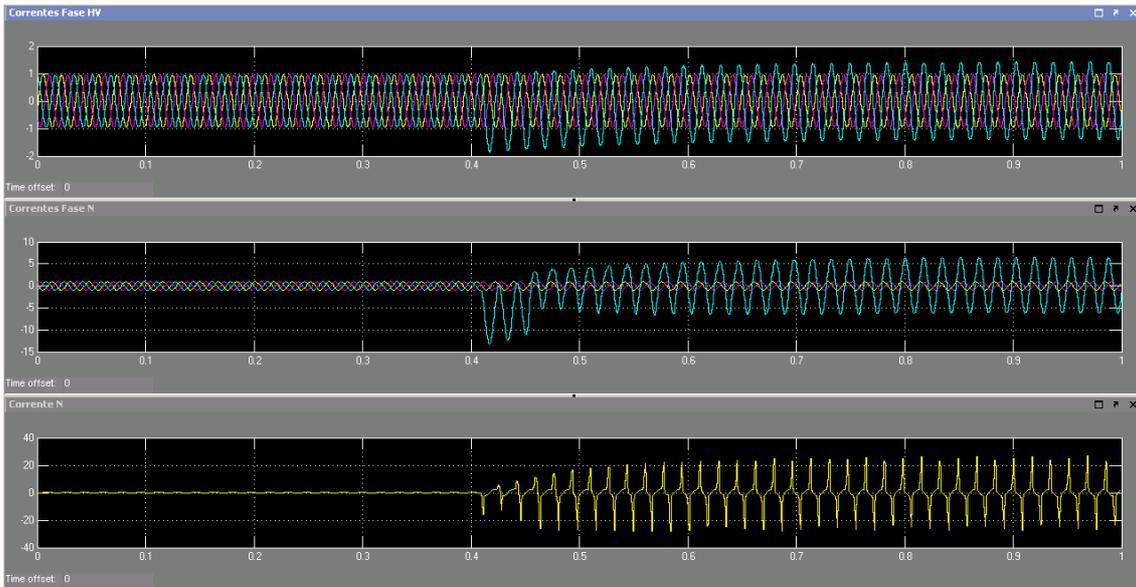


Figura 7.25 – Correntes do Caso 3-c – Modelo 1

A partir da Figura 7.26 observa-se a atuação apenas da unidade instantânea de sobrecorrente de neutro 50N. Quanto às unidades temporizadas, em até 1 s, não foi verificada atuação.

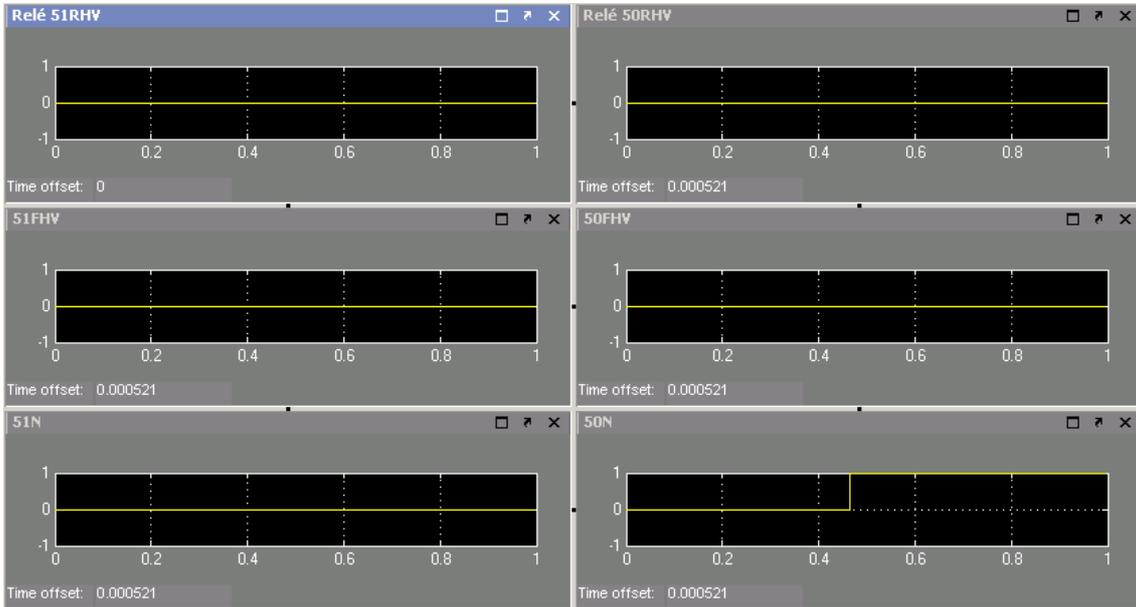


Figura 7.26 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 3-c – Modelo 1

A partir da Figura 7.27 observa-se a atuação das proteções diferenciais de fase e de terra restrita. As mesmas atuaram imediatamente após o início da falta, entretanto

observa-se que as funções com bloqueio por harmônicos foram bloqueadas, de forma intermitente, após aproximadamente 50 milissegundos das suas atuações, permanecendo assim até, aproximadamente, 200 ms do início da falta, sendo as mesmas liberadas em seguida. Este bloqueio ocorreu em função da presença de 2º harmônico provocado pela saturação dos TC de fase, próximo ao neutro do reator.

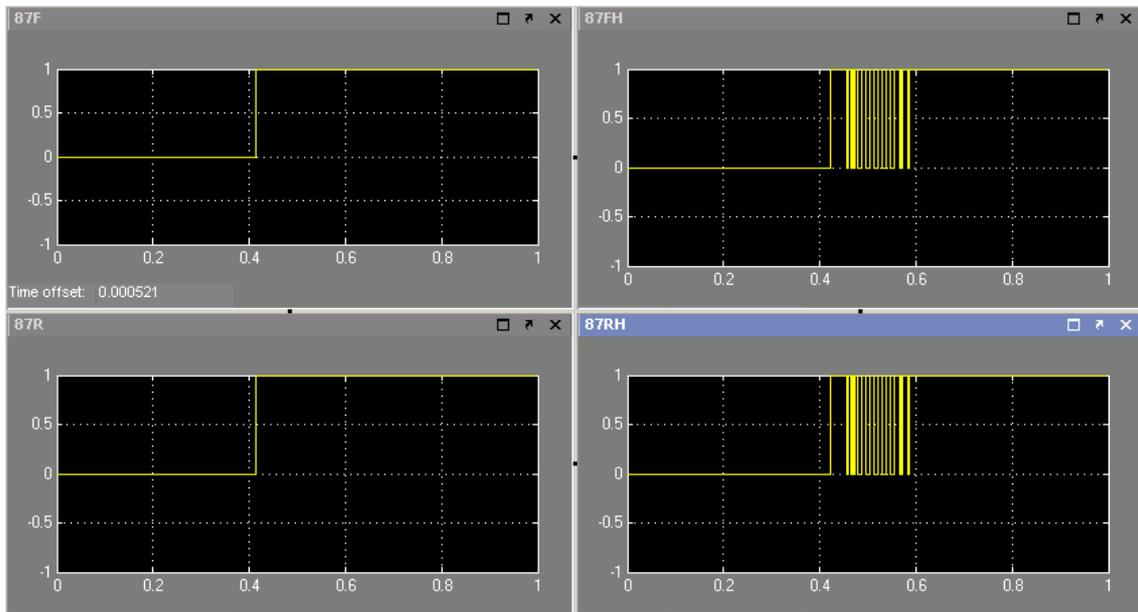


Figura 7.27 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 3-c – Modelo 1

#### 7.1.4 CASO 4 – FALHA EXTERNA – CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO EM BARRA PRÓXIMA AO REATOR

Curto-circuito monofásico, aplicado na barra próxima ao reator shunt. A falha foi aplicada em 400 ms, com duração de 100 ms. O tempo de simulação foi de 1s.

A partir da Figura 7.28, observa-se uma corrente de inrush no neutro do reator.

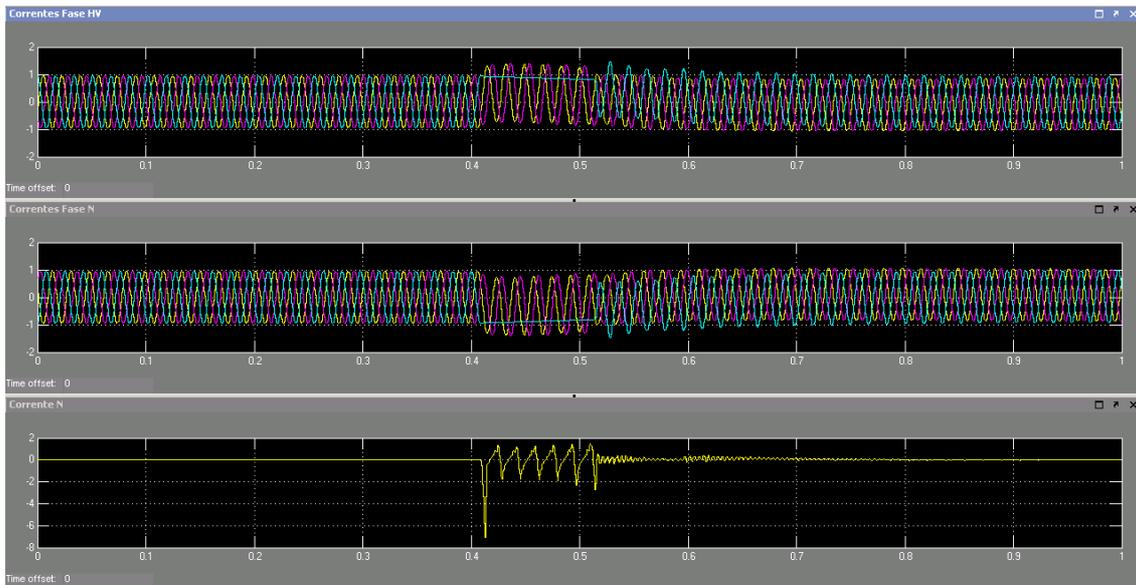


Figura 7.28 – Correntes do Caso 4 – Modelo 1

A partir da Figura 7.29 observa-se que não houve atuação de nenhuma unidade de sobrecorrente para esta falha externa.

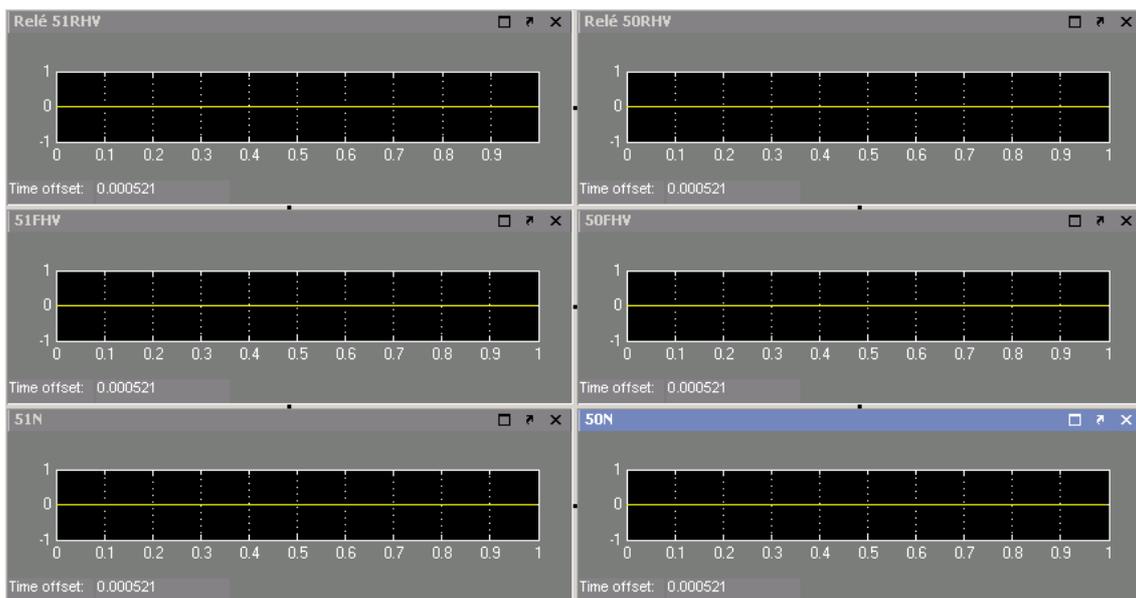


Figura 7.29 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 4 – Modelo 1

A partir da Figura 7.30 observa-se que não houve atuação de nenhuma proteção diferencial para esta falha externa.

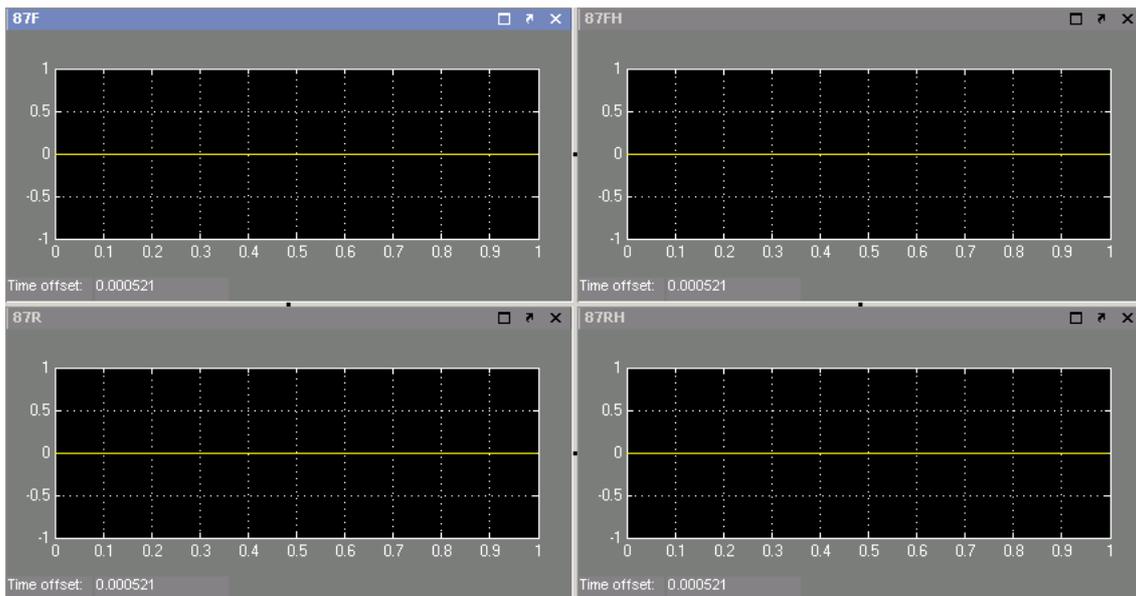


Figura 7.30 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 4 – Modelo 1

### 7.1.5 CASO 5 – FALHA EXTERNA – CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO-TERRA EM BARRA PRÓXIMA AO REATOR

Curto-circuito bifásico-terra, aplicado na barra próxima ao reator shunt. A falha foi aplicada em 400 ms, com duração de 100 ms. O tempo de simulação foi de 1s.

A partir da Figura 7.31, observa-se saturação no TC do neutro do reator.

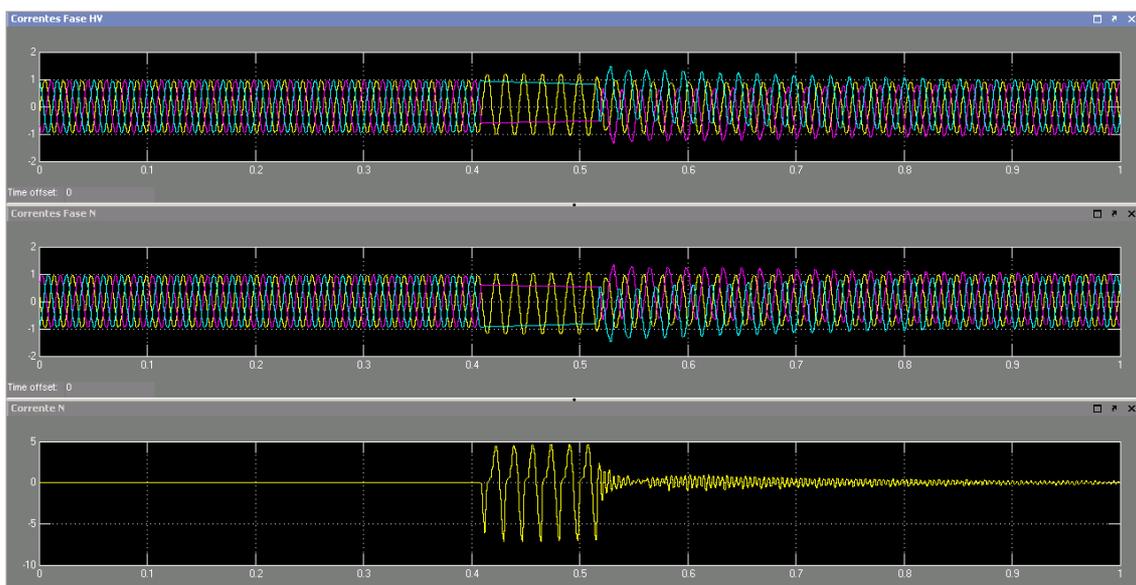


Figura 7.31 – Correntes do Caso 5 – Modelo 1

A partir da Figura 7.32 observa-se que não houve atuação de nenhuma unidade de sobrecorrente para esta falha externa.

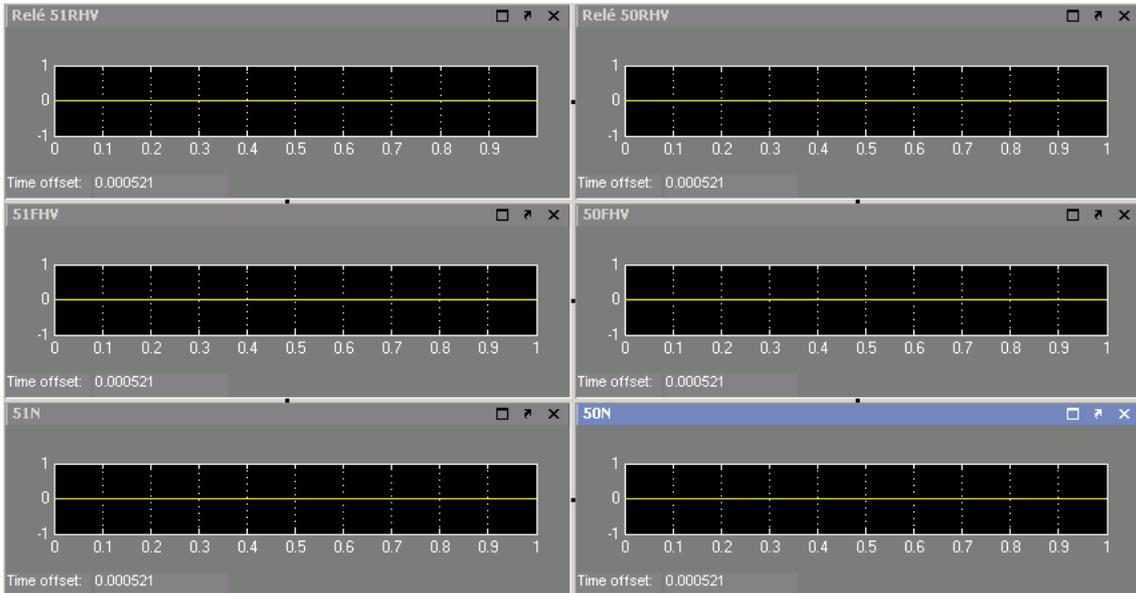


Figura 7.32 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 5 – Modelo 1

A partir da Figura 7.33 observa-se que não houve atuação de nenhuma proteção diferencial para esta falha externa.

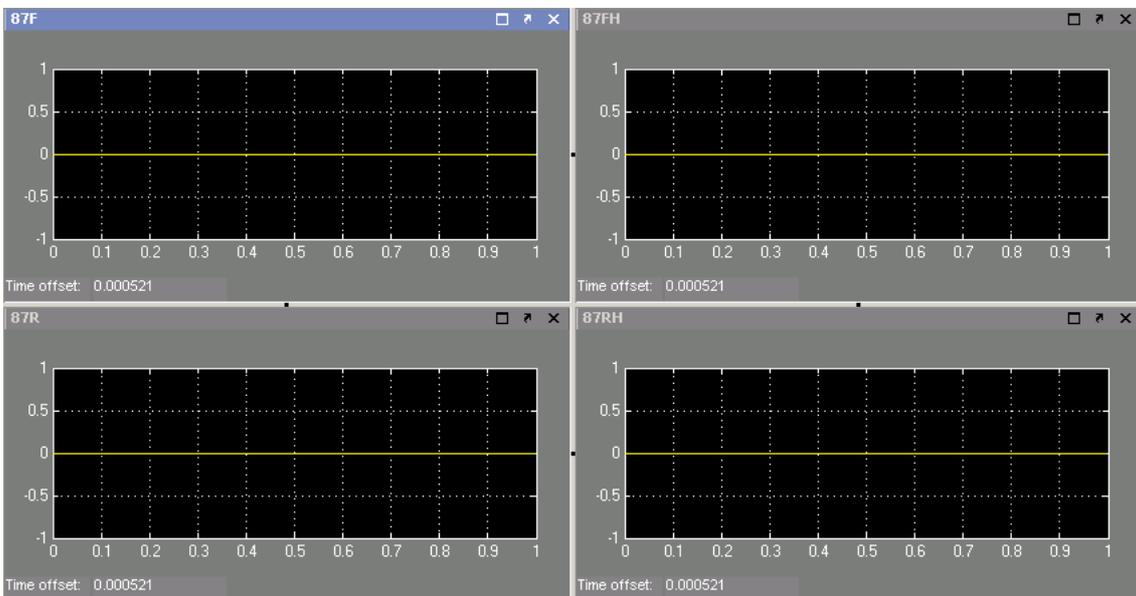


Figura 7.33 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 5 – Modelo 1

### 7.1.6 CASO 6 – FALHA EXTERNA – CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO EVOLUTIVO EM BARRA PRÓXIMA AO REATOR

Curto-circuito trifásico evolutivo, aplicado na barra próxima ao reator shunt. A falha foi aplicada da seguinte forma: teve início como monofásica em 400 ms, evoluiu para bifásica-terra em 415 ms e para trifásica-terra em 430 ms. A duração de cada falha foi de 60 ms. O tempo de simulação foi de 1s.

A partir da Figura 7.34, observa-se correntes no neutro do reator com elevado nível DC.

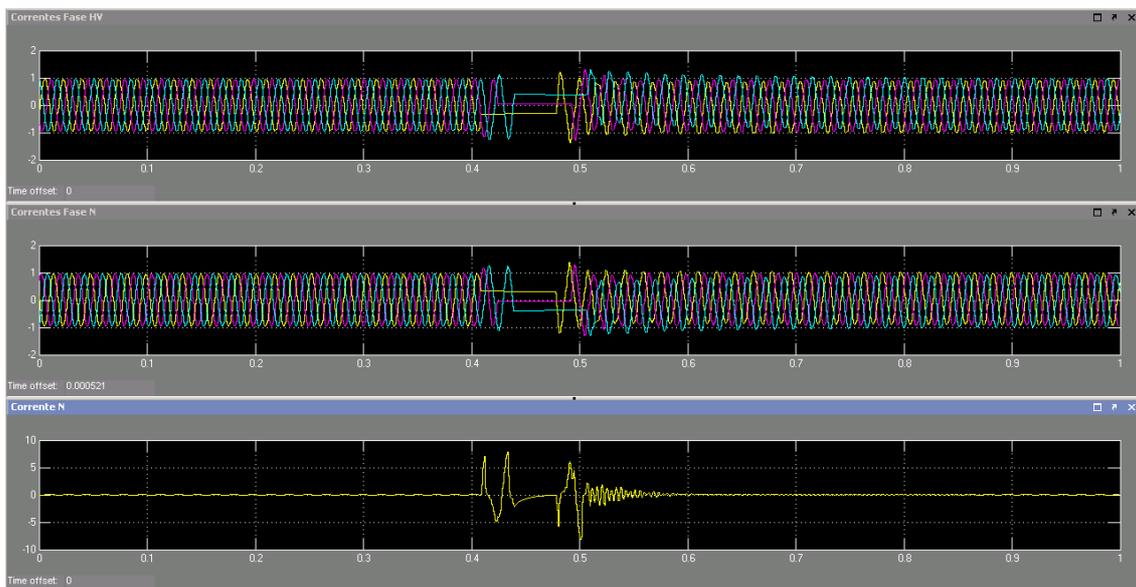


Figura 7.34 – Correntes do Caso 6 – Modelo 1

A partir da Figura 7.35 observa-se que não houve atuação de nenhuma unidade de sobrecorrente para esta falha externa.

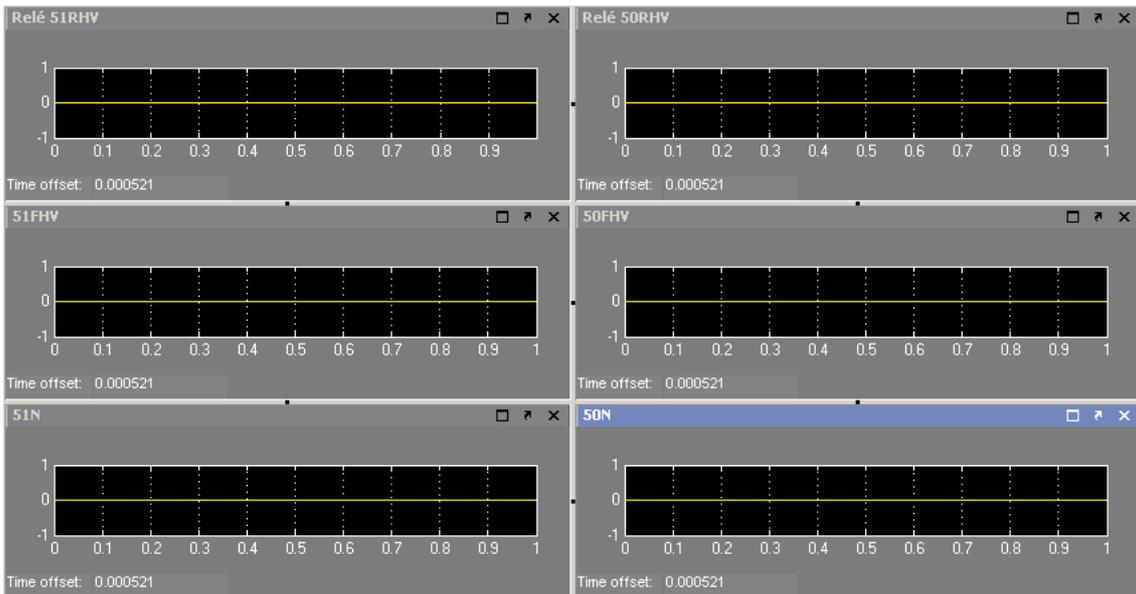


Figura 7.35 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 6 – Modelo 1

A partir da Figura 7.36 observa-se que não houve atuação de nenhuma proteção diferencial para esta falha externa.

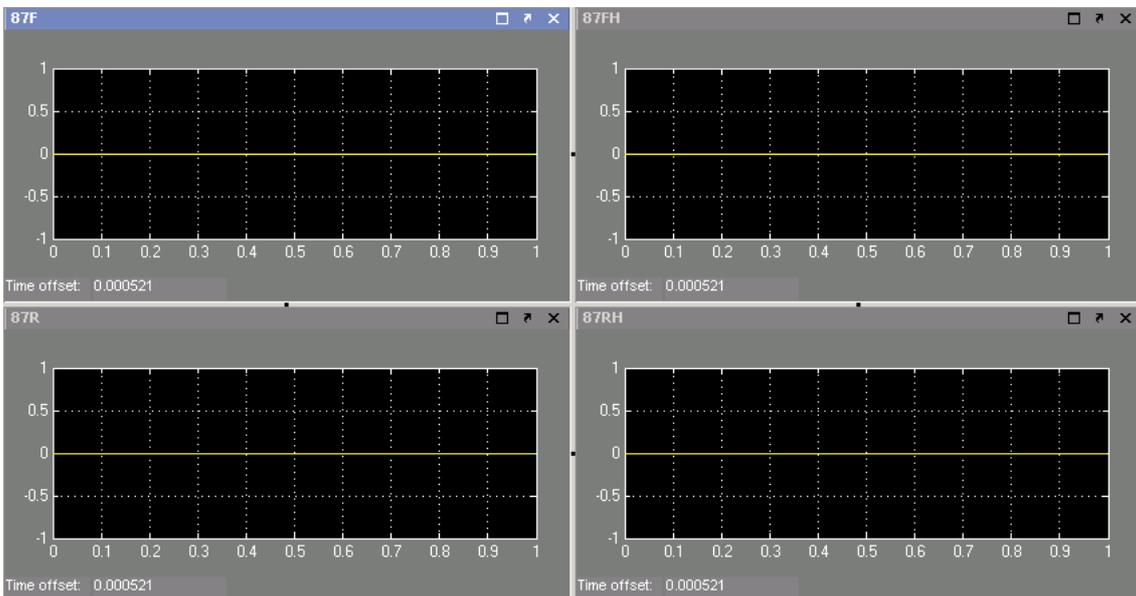


Figura 7.36 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 6 – Modelo 1

### 7.1.7 CASO 7 – MANOBRA DE FECHAMENTO DO REATOR PARA NORMALIZAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO

Foi simulado o fechamento do disjuntor do reator shunt em 400 ms, com a linha de transmissão desenergizada (LT 500 kV Adrianópolis – Cachoeira Paulista C2) e com os circuitos paralelos energizados (LT 500 kV Adrianópolis – Cachoeira Paulista C1 e C3), dando início ao processo de normalização da mesma. O tempo de simulação foi de 2 s.

A partir da Figura 7.37, observa-se uma corrente de magnitude elevada circulando através do neutro do reator, em função do acoplamento magnético entre os circuitos.

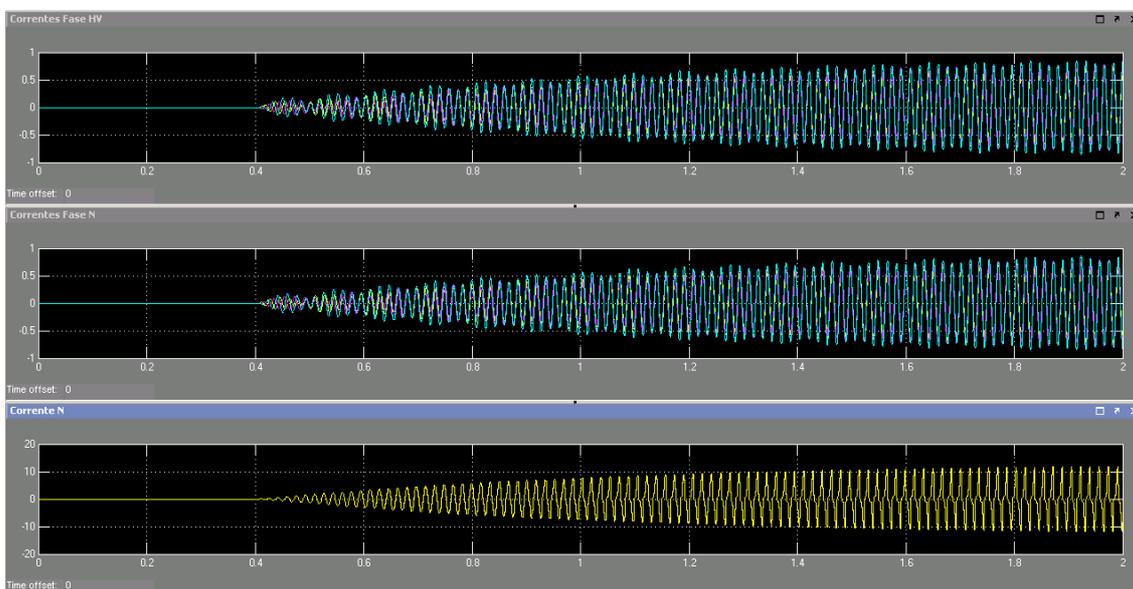


Figura 7.37 – Correntes do Caso 7 – Modelo 1

A partir da Figura 7.38 observa-se a atuação da unidade de sobrecorrente de neutro instantânea 50N, após, aproximadamente, 500 ms da manobra e da unidade de sobrecorrente residual instantânea 50RHV, após, aproximadamente, 1 s da manobra. Quanto às unidades temporizadas, observa-se a atuação da unidade residual 51RHV, após, aproximadamente, 1,35 s da manobra e da unidade de neutro 51N em aproximadamente 1,9 s, após a manobra.

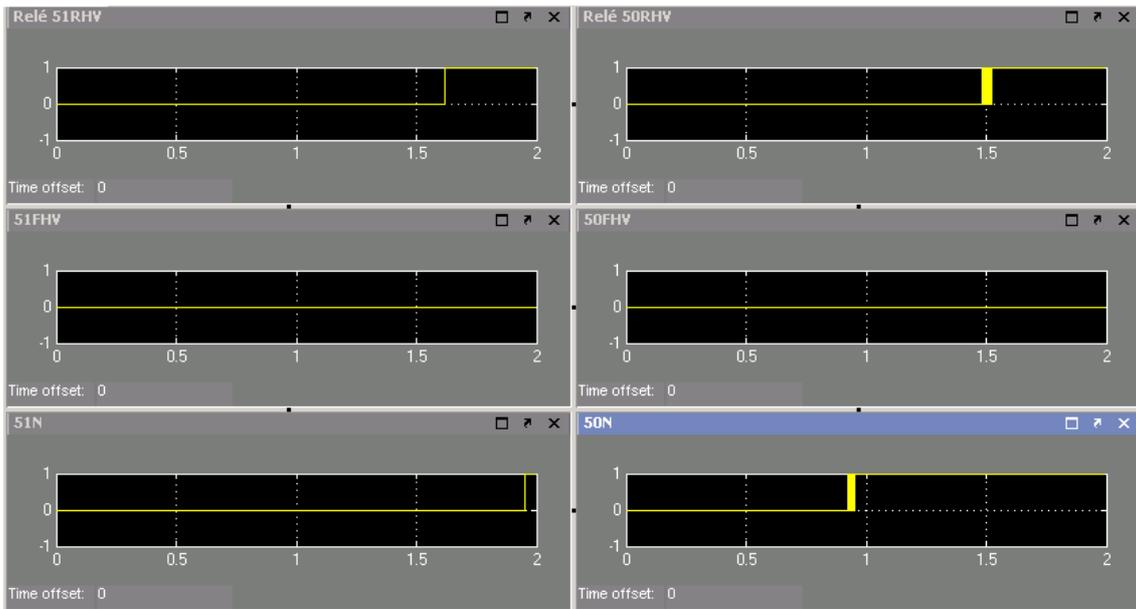


Figura 7.38 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 7 – Modelo 1

A partir da Figura 7.39 observa-se que não houve atuação de nenhuma proteção diferencial durante a manobra.

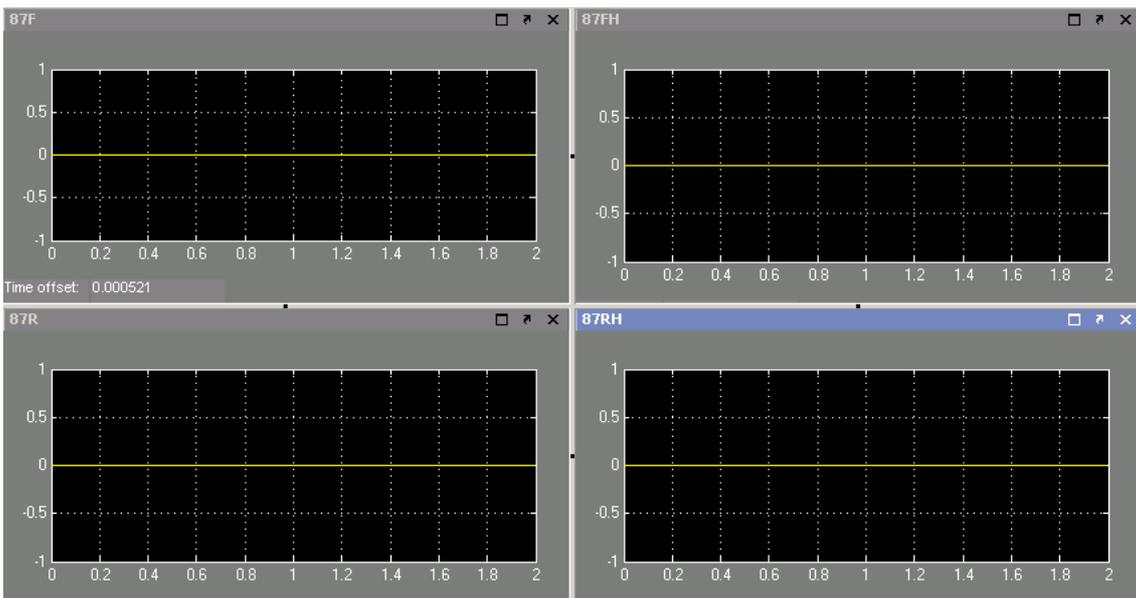


Figura 7.39 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 7 – Modelo 1

### 7.1.8 CASO 8 – FALHA EXTERNA - CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO A 10 % DA LINHA DE TRANSMISSÃO A PARTIR DA BARRA PRÓXIMA AO REATOR

Curto-circuito monofásico permanente a 10 % da linha de transmissão, a partir

da barra próxima ao reator shunt, em 400 ms. Foram simuladas as aberturas dos disjuntores da mesma em 460 ms no terminal próximo ao reator e 500 ms no terminal remoto. O tempo de simulação foi de 2 s.

A partir da Figura 7.40, observa-se uma corrente de magnitude elevada, sustentada, circulando através do neutro do reator, em função do acoplamento magnético entre os circuitos.

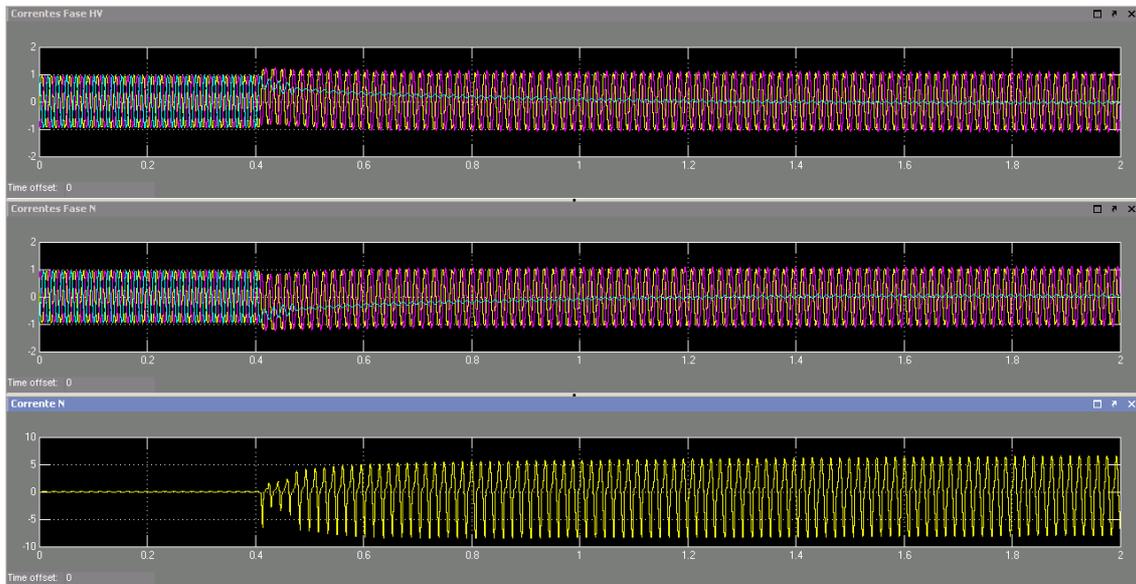


Figura 7.40 – Correntes do Caso 8 – Modelo 1

A partir da Figura 7.41 observa-se apenas a atuação da unidade de sobrecorrente de neutro instantânea 50N, após, aproximadamente, 1,8 s do início da falha. Quanto às unidades temporizadas, observa-se a atuação da unidade residual 51RHV, após, aproximadamente, 1,1 s da falha e da unidade de neutro 51N, em aproximadamente, 1,9 s, após a falha.

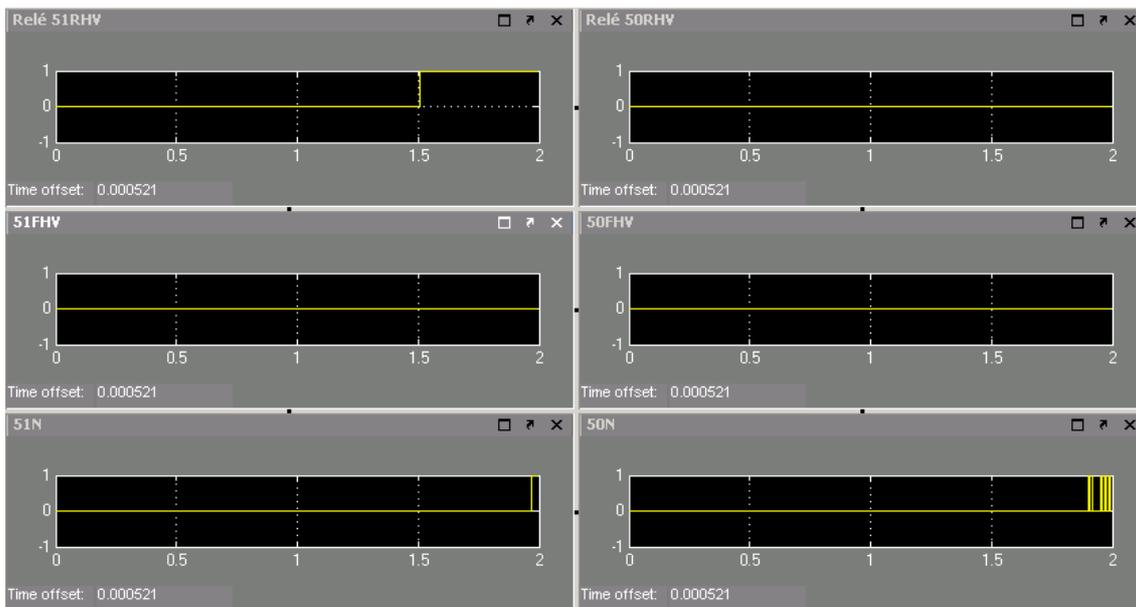


Figura 7.41 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 8 – Modelo 1

A partir da Figura 7.42 observa-se que não houve atuação de nenhuma proteção diferencial durante a falha na linha de transmissão.

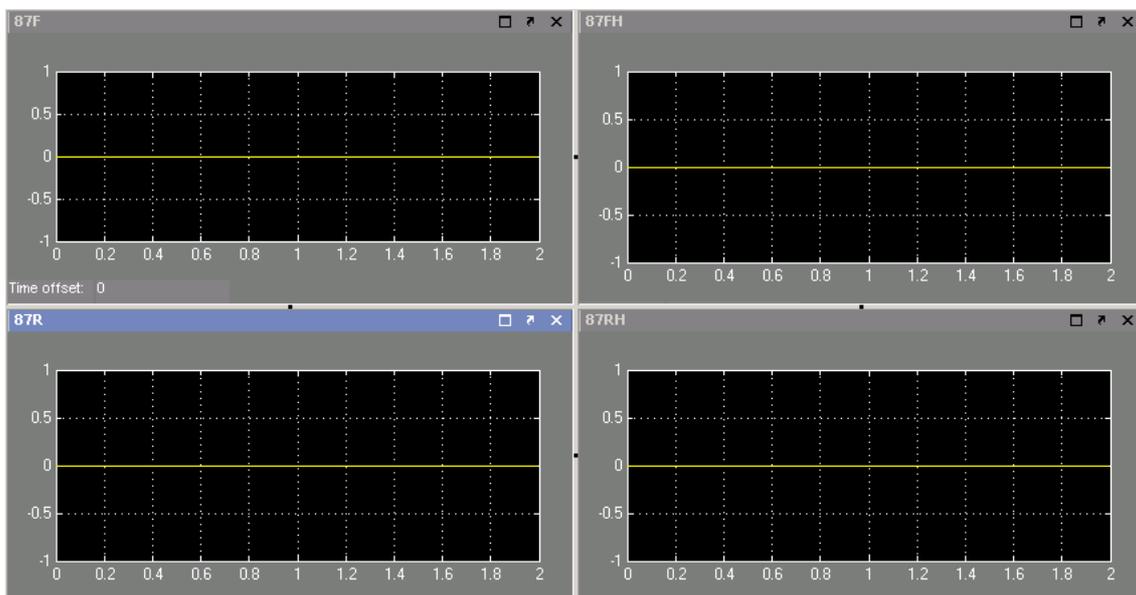


Figura 7.42 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 8 – Modelo 1

### 7.1.9 CASO 9 – FALHA EXTERNA - CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO A 10 % DA LINHA DE TRANSMISSÃO PARALELA, A PARTIR DA BARRA PRÓXIMA AO REATOR

Curto-circuito monofásico a 10 % da linha de transmissão paralela, a partir da

barra próxima ao reator shunt, em 400 ms. Foram simuladas as aberturas dos disjuntores da mesma em 460 ms no terminal próximo ao reator e 500 ms no terminal remoto. O tempo de simulação foi de 2 s.

A partir da Figura 7.43, observa-se uma corrente de inrush no neutro do reator.

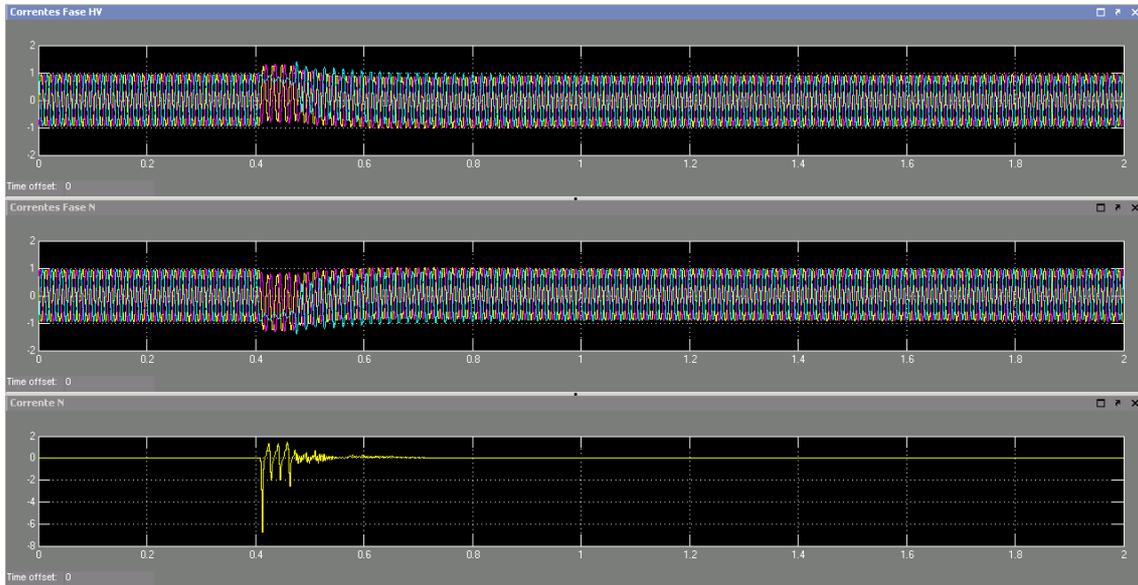


Figura 7.43 – Correntes do Caso 9 – Modelo 1

A partir da Figura 7.44 observa-se que não houve atuação de nenhuma unidade de sobrecorrente para esta falha externa.

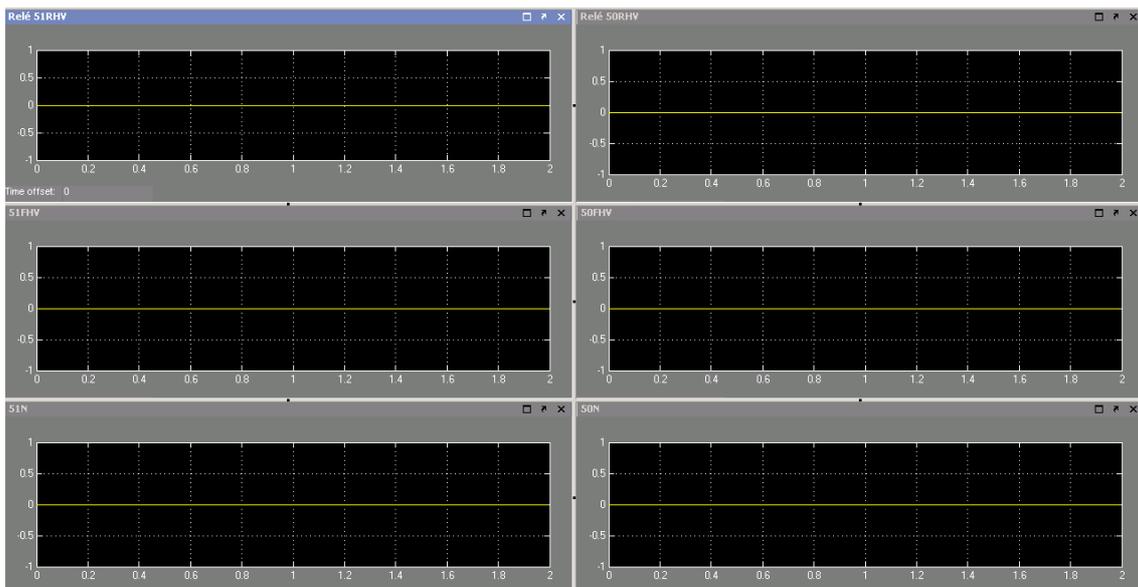


Figura 7.44 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 9 – Modelo 1

A partir da Figura 7.45 observa-se que não houve atuação de nenhuma proteção

diferencial durante a falha na linha de transmissão.

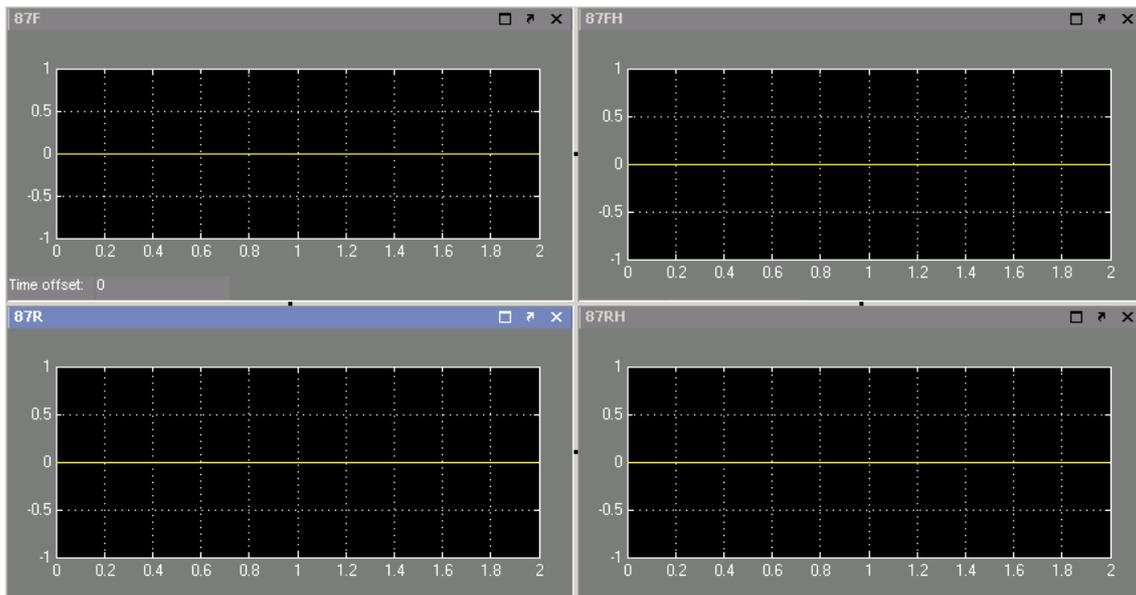


Figura 7.45 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 9 – Modelo 1

## 7.2 SIMULAÇÕES E RESULTADOS OBTIDOS DO MODELO 2

Os seguintes resultados foram obtidos a partir do Modelo 2, cujo reator 345 kV tem como característica estar conectado em linha de transmissão longa e com o neutro aterrado através de reator e resistor de aterramento.

### 7.2.1 CASO 1 – FALHA INTERNA A 10 % DO ENROLAMENTO DO REATOR

Curto-circuito monofásico, aplicado a 10 % do enrolamento do reator a partir da bucha do mesmo. A falha foi aplicada em 400 ms sem simulação de abertura de disjuntor com um tempo de simulação de 1s.

#### a) Fator de dispersão de 0.25

A partir da Figura 7.46 observa-se saturação nos TCs de fase do lado da bucha do reator e do TC de neutro.

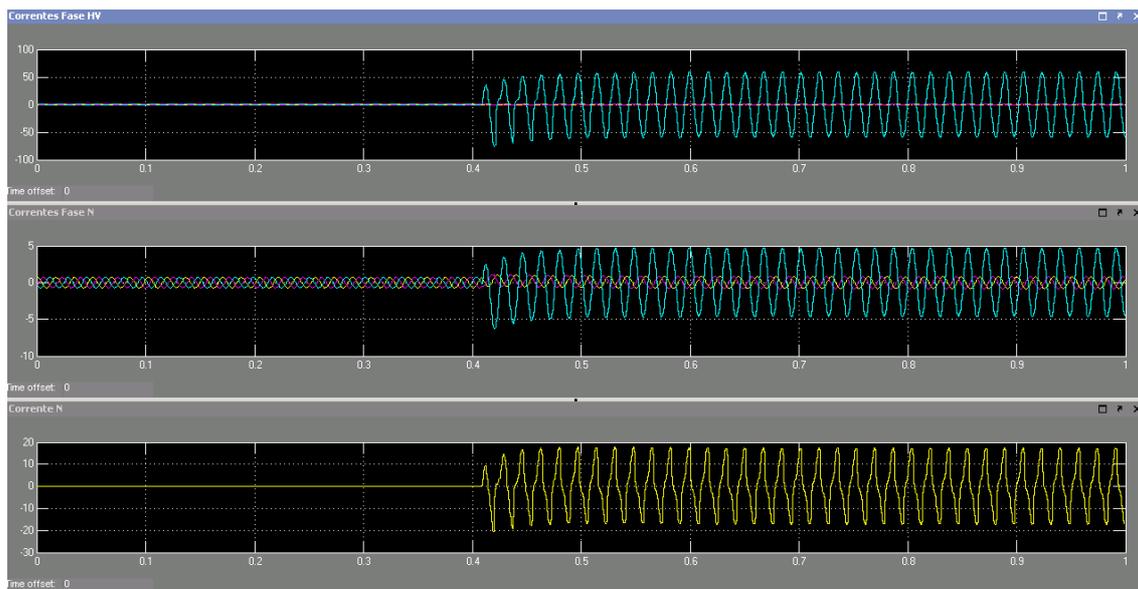


Figura 7.46 – Correntes do Caso 1-a – Modelo 2

A partir da Figura 7.47 observa-se a atuação de todas as unidades instantâneas de sobrecorrente. Quanto as unidades temporizadas, foi verificado a atuação da 51RHV, em pouco mais de 100 ms após o início da falta, e da 51FHV, em 400 ms após o início da falta. Em até 1 s, não foi verificado a atuação da função 51N.

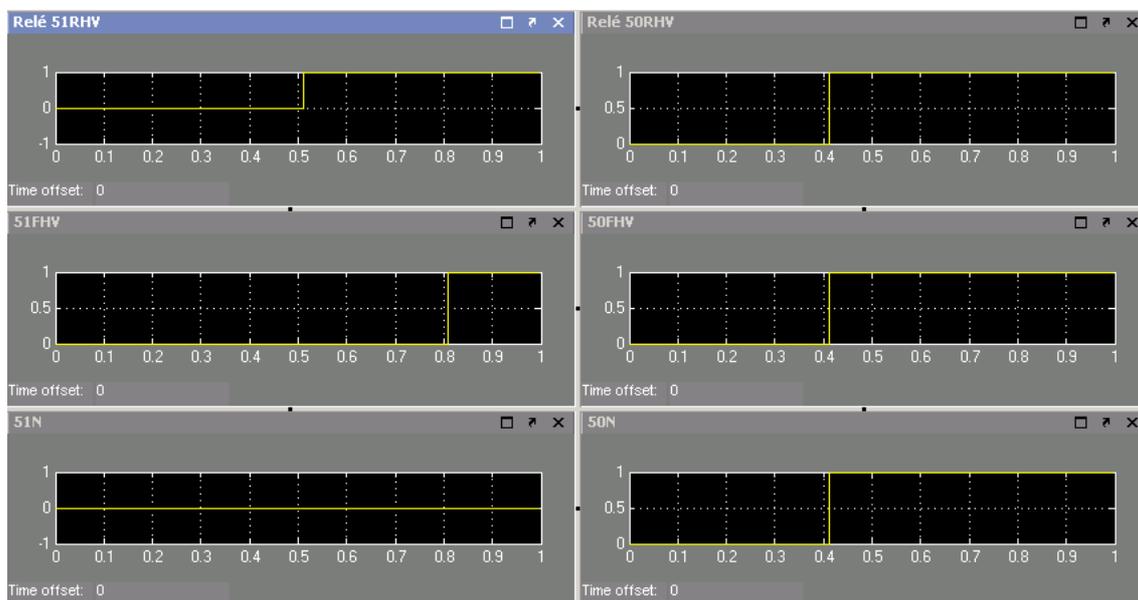


Figura 7.47 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 1-a – Modelo 2

A partir da Figura 7.48 observa-se a atuação das proteções diferenciais de fase e de terra restrita. As mesmas atuaram imediatamente após o início da falta, entretanto

observa-se que as funções com bloqueio por harmônicos, permaneceram bloqueadas por quase 80 ms após o início da falta, sendo as suas atuações liberadas em seguida. Este bloqueio ocorreu em função da presença de 2º harmônico provocado pela saturação dos TC de fase do lado da bucha do reator no início da falha.

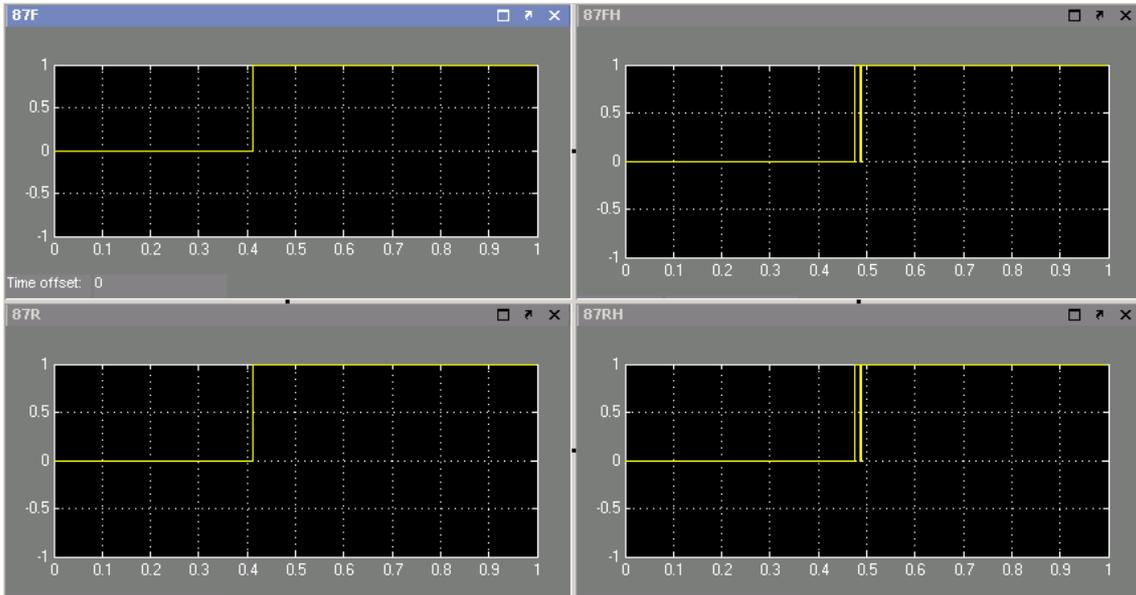


Figura 7.48 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 1-a – Modelo 2

### b) Fator de dispersão de 0.5

A partir da Figura 7.49 observa-se saturação nos TCs de fase do lado da bucha do reator e do TC de neutro.

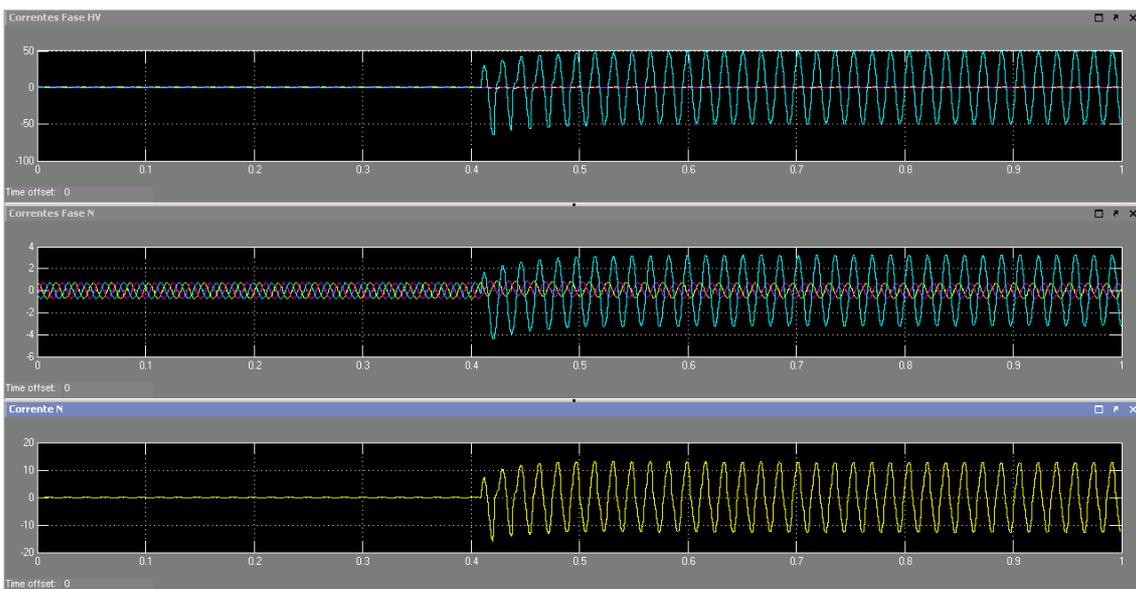


Figura 7.49 – Correntes do Caso 1-b – Modelo 2

A partir da Figura 7.50 observa-se a atuação de todas as unidades instantâneas de sobrecorrente. Quanto as unidades temporizadas, foi verificado a atuação da 51RHV, em 110 ms após o início da falta, e da 51FHV, em 400 ms após o início da falta. Em até 1 s, não foi verificado a atuação da função 51N. Os tempos verificados foram similares aos observados no caso 1-a.

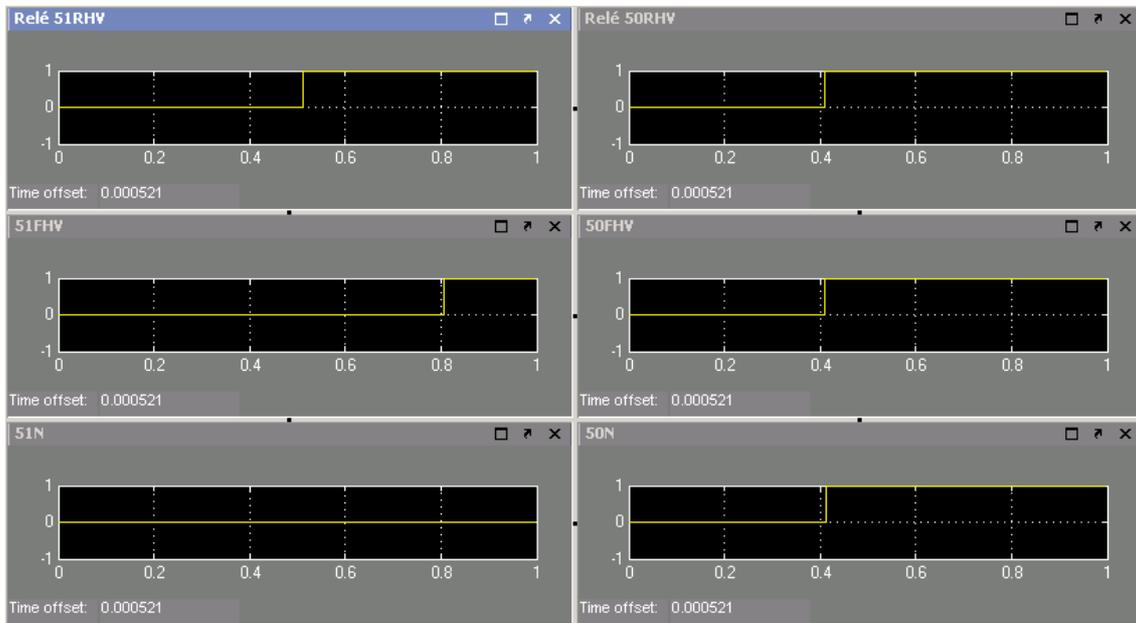


Figura 7.50 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 1-b – Modelo 2

A partir da Figura 7.51 observa-se a atuação das proteções diferenciais de fase e de terra restrita. As mesmas atuaram imediatamente após o início da falta, entretanto observa-se que as funções com bloqueio por harmônicos, permaneceram bloqueadas por quase 100 ms após o início da falta, sendo as suas atuações liberadas em seguida. Este bloqueio ocorreu em função da presença de 2º harmônico provocado pela saturação dos TC de fase do lado da bucha do reator. Os tempos verificados foram similares aos observados no caso 1-a.

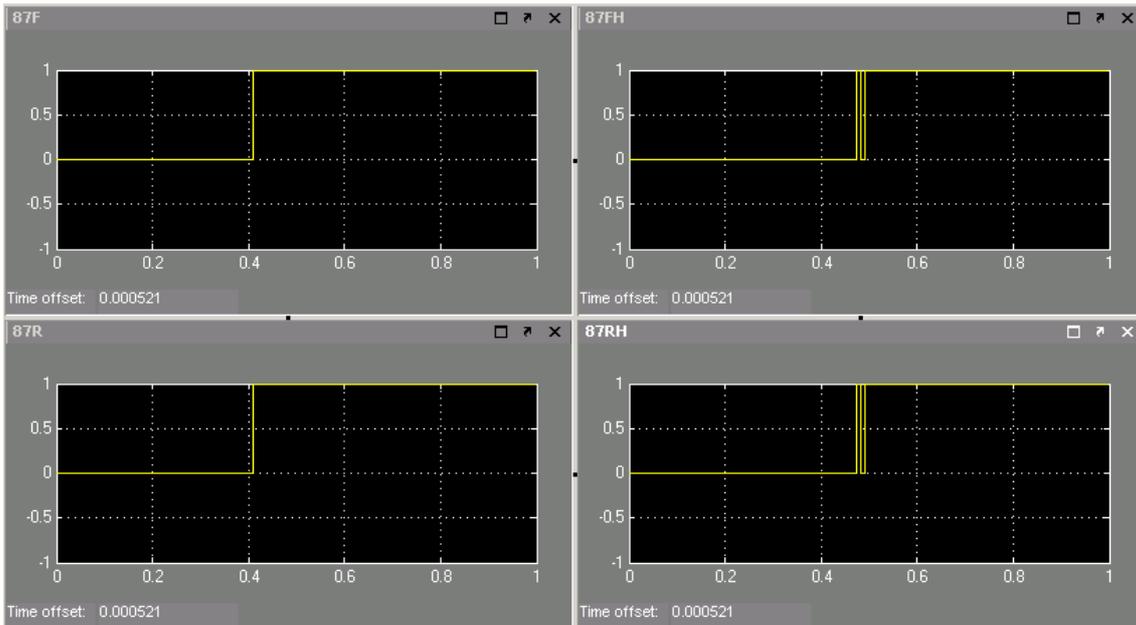


Figura 7.51 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 1-b – Modelo 2

**c) Fator de dispersão de 0.75**

A partir da Figura 7.52 observa-se saturação nos TCs de fase do lado da bucha do reator e do TC de neutro.

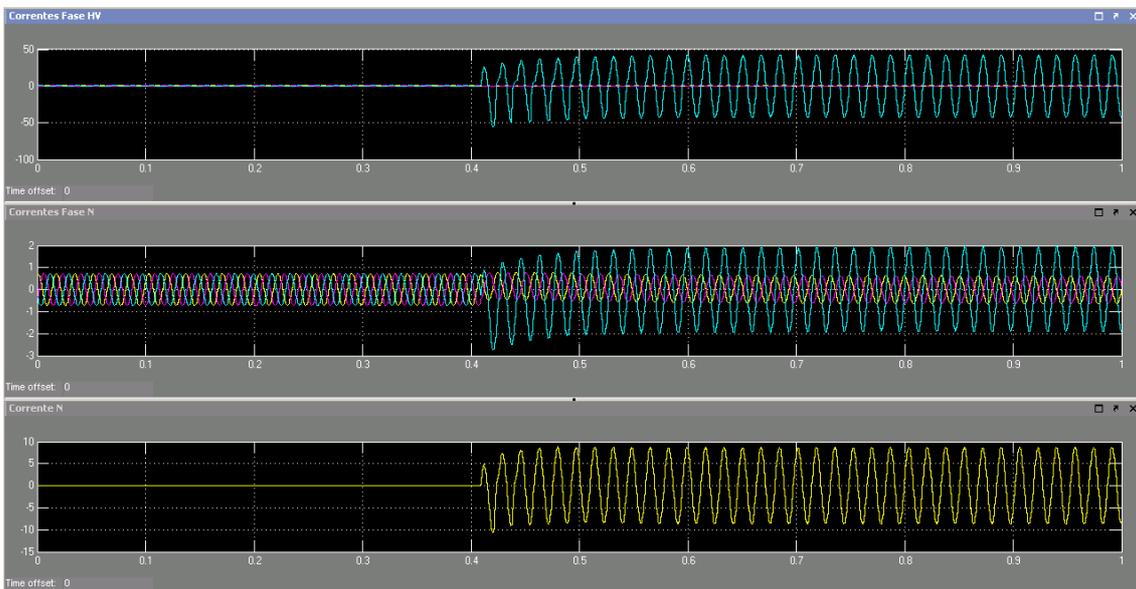


Figura 7.52 – Correntes do Caso 1-c – Modelo 2

A partir da Figura 7.53 observa-se a atuação de todas as unidades instantâneas de sobrecorrente. Quanto as unidades temporizadas, foi verificado a atuação da 51RHV,

em 100 ms após o início da falta, e da 51FHV, em 400 ms após o início da falta. Em até 1 s, não foi verificada a atuação da função 51N. Os tempos verificados foram similares aos observados nos casos 1-a e 1-b.

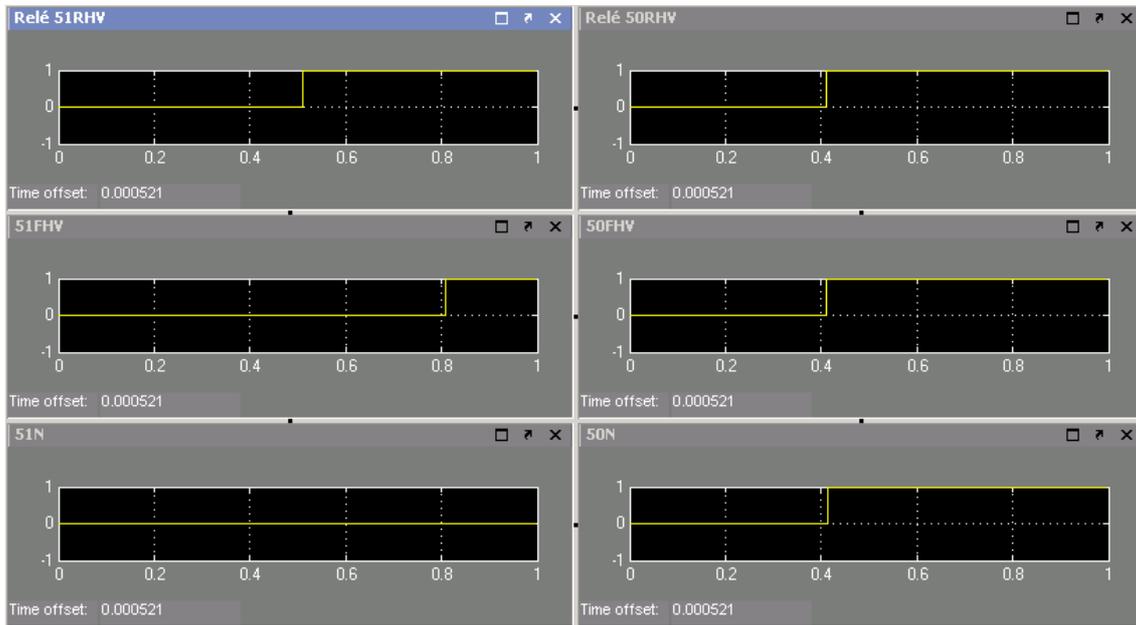


Figura 7.53 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 1-c – Modelo 2

A partir da Figura 7.54 observa-se a atuação das proteções diferenciais de fase e de terra restrita. As mesmas atuaram imediatamente após o início da falta, entretanto observa-se que as funções com bloqueio por harmônicos, permaneceram bloqueadas por quase 100 ms após o início da falta, sendo as suas atuações liberadas em. Este bloqueio ocorreu em função da presença de 2º harmônico provocado pela saturação dos TC de fase do lado da bucha do reator. Os tempos verificados foram similares aos observados no caso 1-a e 1-b.

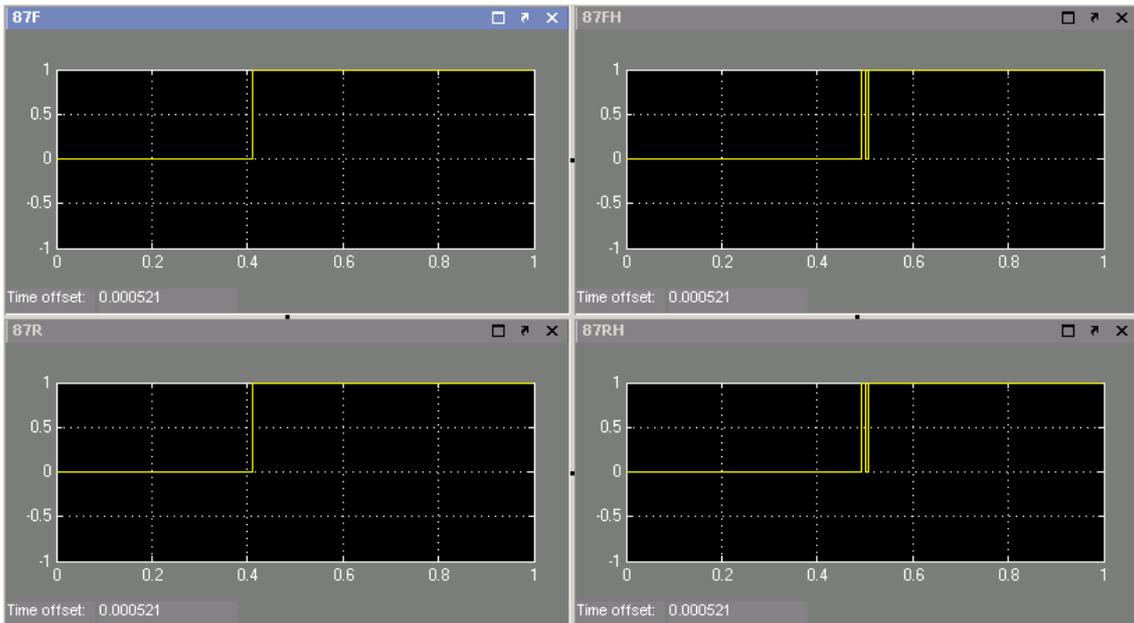


Figura 7.54 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 1-c – Modelo 2

### 7.2.2 CASO 2 – FALHA INTERNA A 50 % DO ENROLAMENTO DO REATOR

Curto-circuito monofásico, aplicado a 50 % do enrolamento do reator. A falha foi aplicada em 400 ms sem simulação de abertura de disjuntor com um tempo de simulação de 1s.

#### a) Fator de dispersão de 0.25

A partir da Figura 7.55 observa-se uma leve saturação no TC de neutro do reator, nos primeiros ciclos após o início da falta.

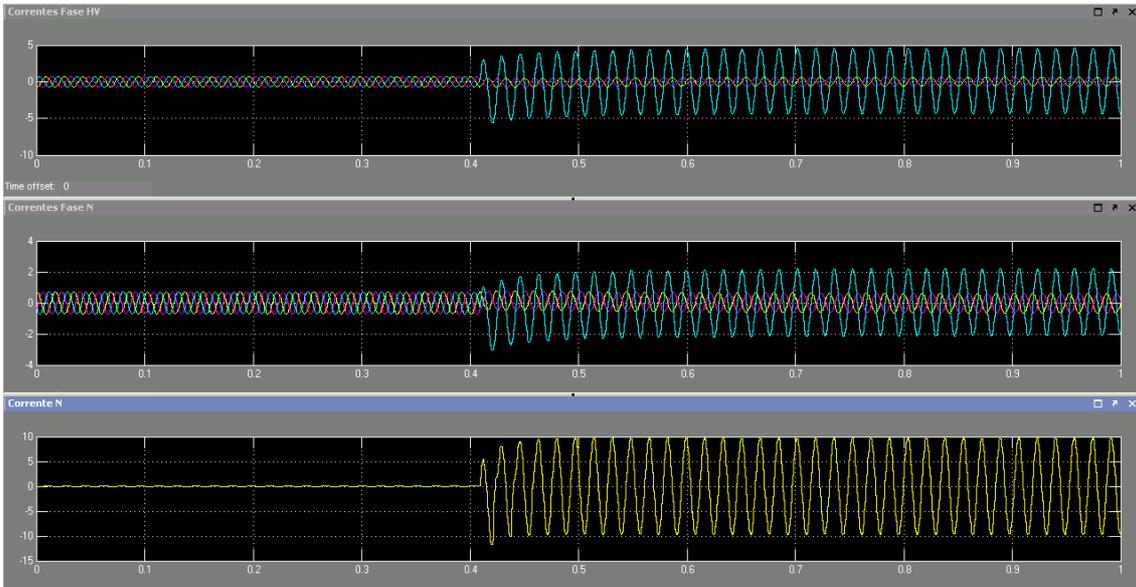


Figura 7.55 – Correntes do Caso 2-a – Modelo 2

A partir da Figura 7.56 observa-se a atuação de todas as unidades instantâneas de sobrecorrente. Quanto as unidades temporizadas, em até 1 s, foi verificado apenas a atuação da 51RHV, em, aproximadamente, 120 ms após o início da falta.

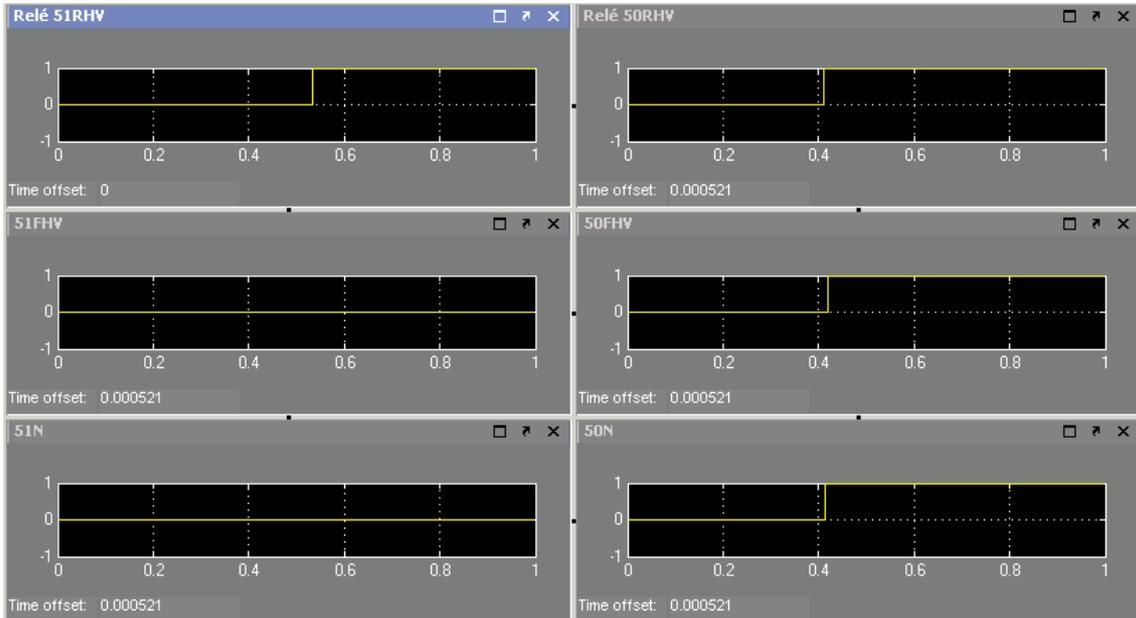


Figura 7.56 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 2-a – Modelo 2

A partir da Figura 7.57 observa-se a atuação das proteções diferenciais de fase e de terra restrita. As mesmas atuaram imediatamente após o início da falta. Não houve

bloqueio por harmônicos.

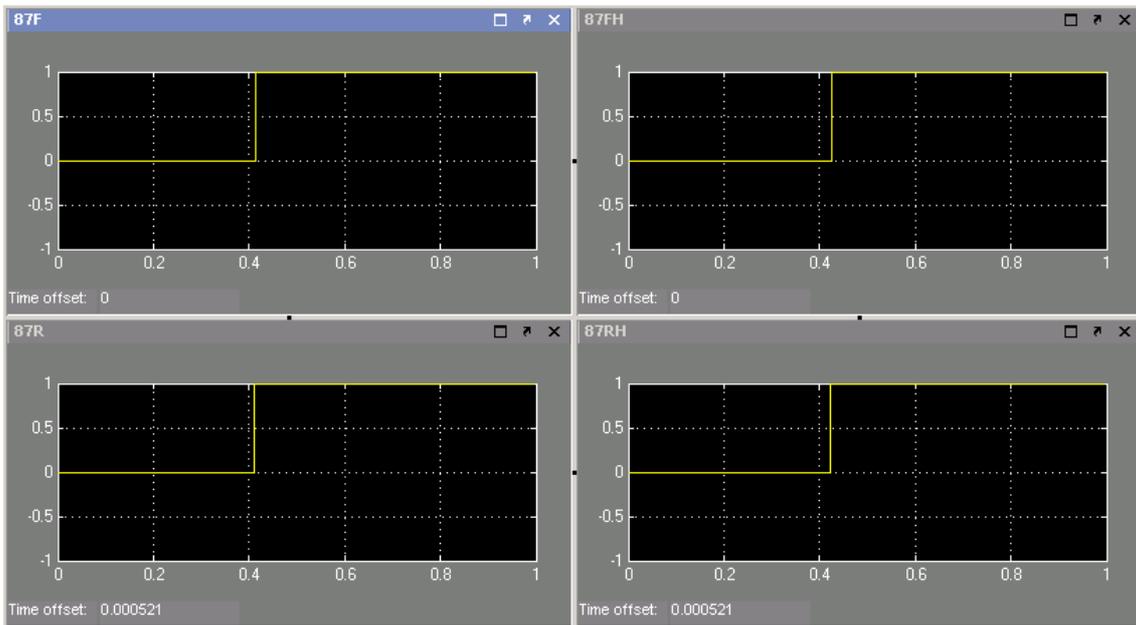


Figura 7.57 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 2-a – Modelo 2

### b) Fator de dispersão de 0.5

A partir da Figura 7.58 observa-se uma leve saturação no TC de neutro do reator, nos primeiros ciclos após o início da falta.

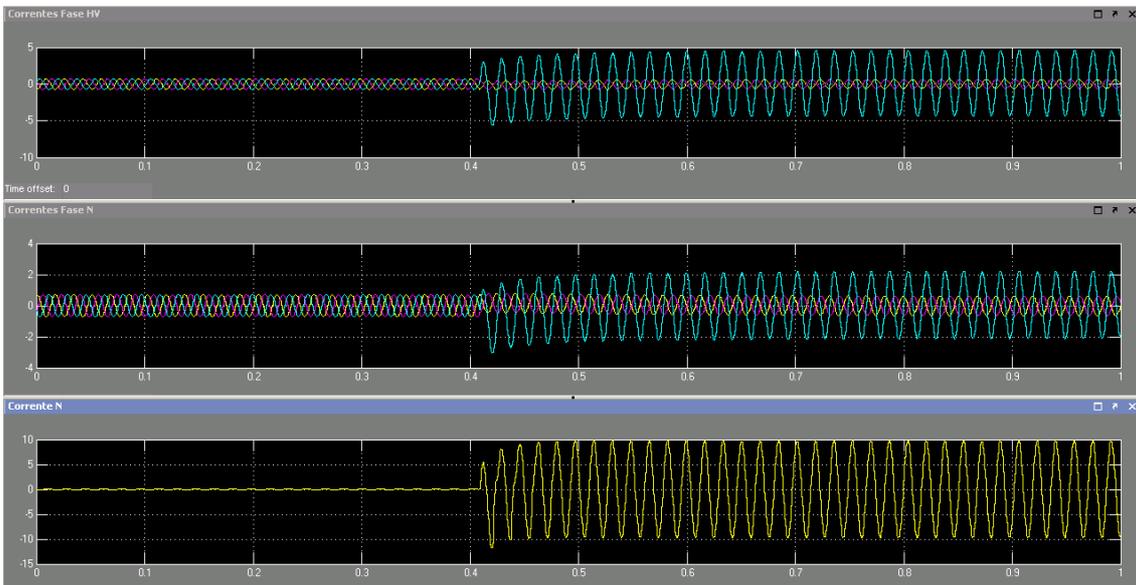


Figura 7.58 – Correntes do Caso 2-b – Modelo 2

A partir da Figura 7.59 observa-se a atuação de todas as unidades instantâneas

de sobrecorrente. Quanto as unidades temporizadas, em até 1 s, apenas foi verificada a atuação da unidade 51RHV, em aproximadamente 120 ms após o início da falta.

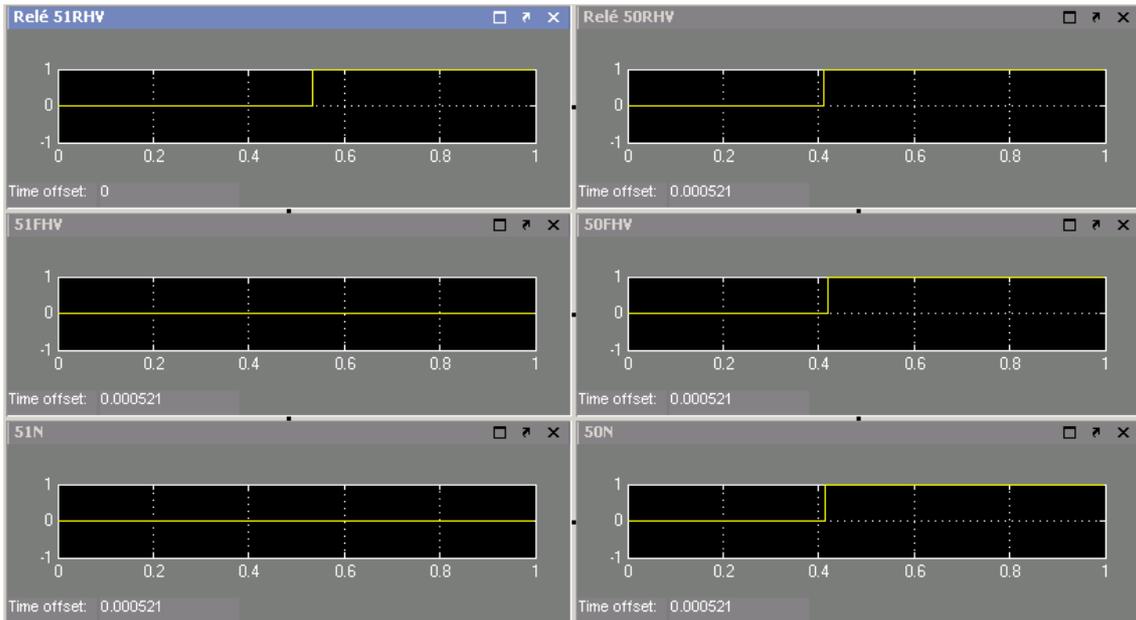


Figura 7.59 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 2-b – Modelo 2

A partir da Figura 7.60 observa-se a atuação das proteções diferenciais de fase e de terra restrita. As mesmas atuaram imediatamente após o início da falta. Não houve bloqueio por harmônicos.

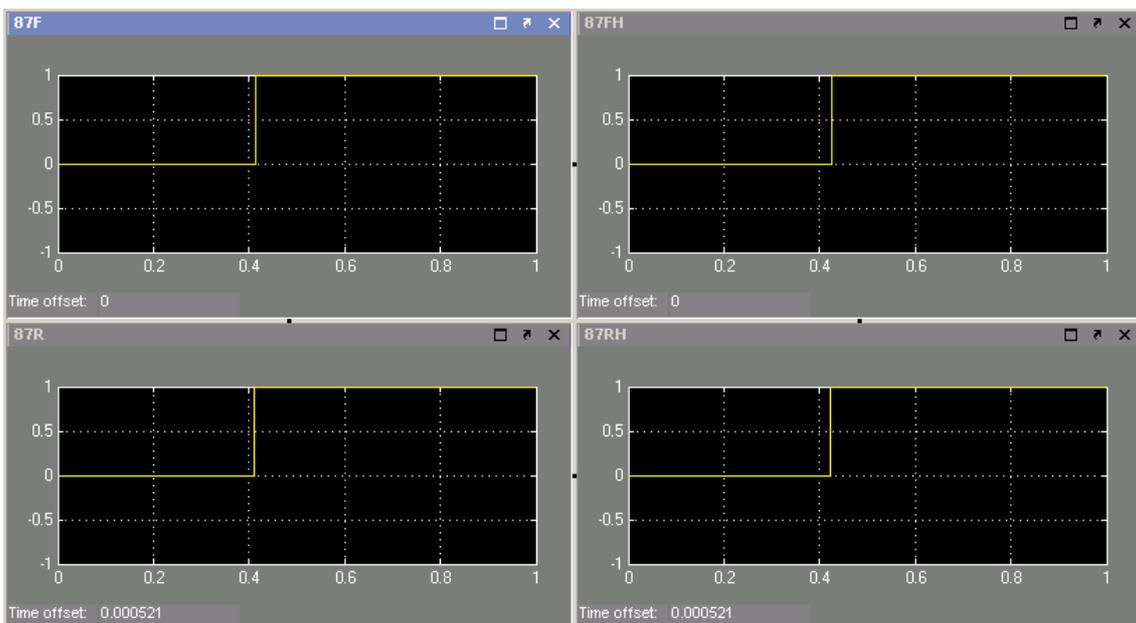


Figura 7.60 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 2-b – Modelo 2

### c) Fator de dispersão de 0.75

A partir da Figura 7.61 observa-se que não houve saturação de TC.

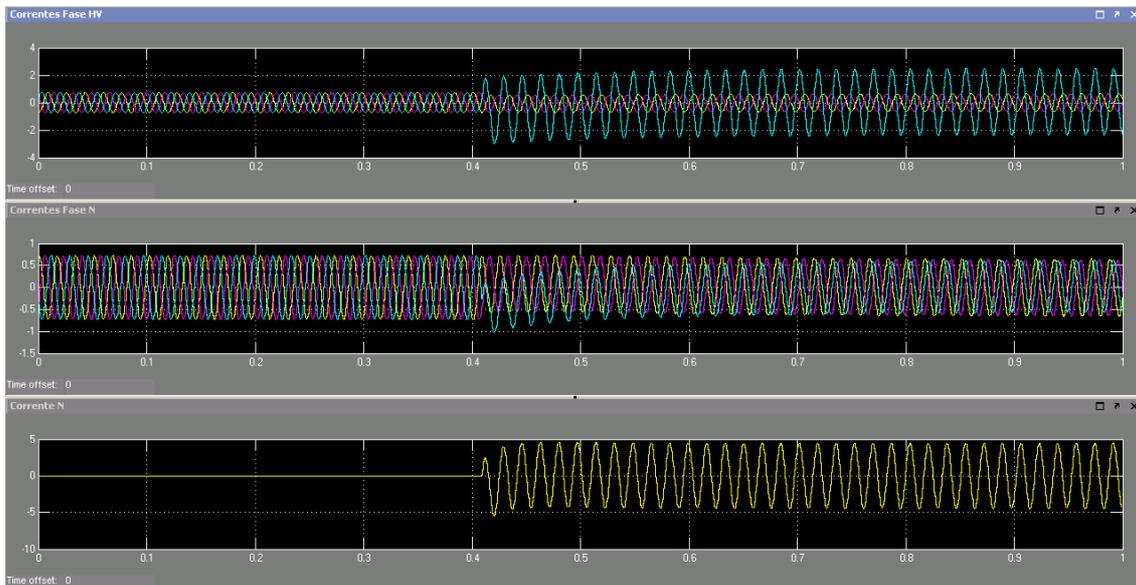


Figura 7.61 – Correntes do Caso 2-c – Modelo 2

A partir da Figura 7.62 observa-se que houve a atuação das unidades instantâneas de sobrecorrente 50RHV e 50N e que não houve a atuação da unidade instantânea 50FHV. Quanto às unidades temporizadas, em até 1 s, foi observada apenas a atuação da unidade 51RHV, em aproximadamente 190 ms do início da falta.

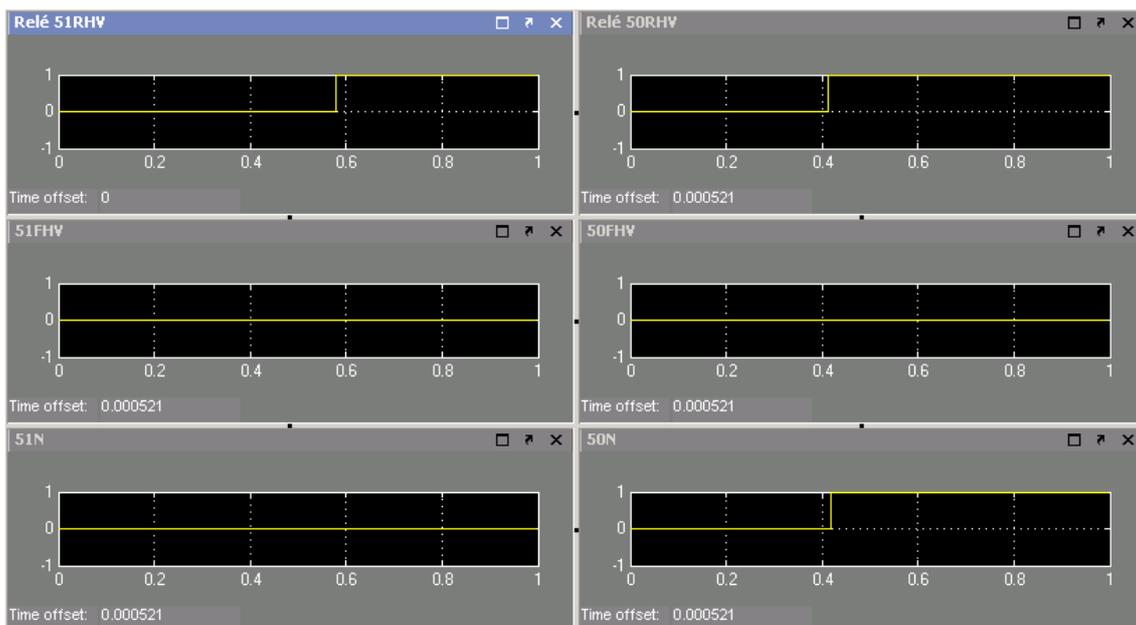


Figura 7.62 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 2-c – Modelo 2

A partir da Figura 7.63 observa-se a atuação das proteções diferenciais de fase e de terra restrita. As mesmas atuaram imediatamente após o início da falta, sem bloqueio por harmônicos.

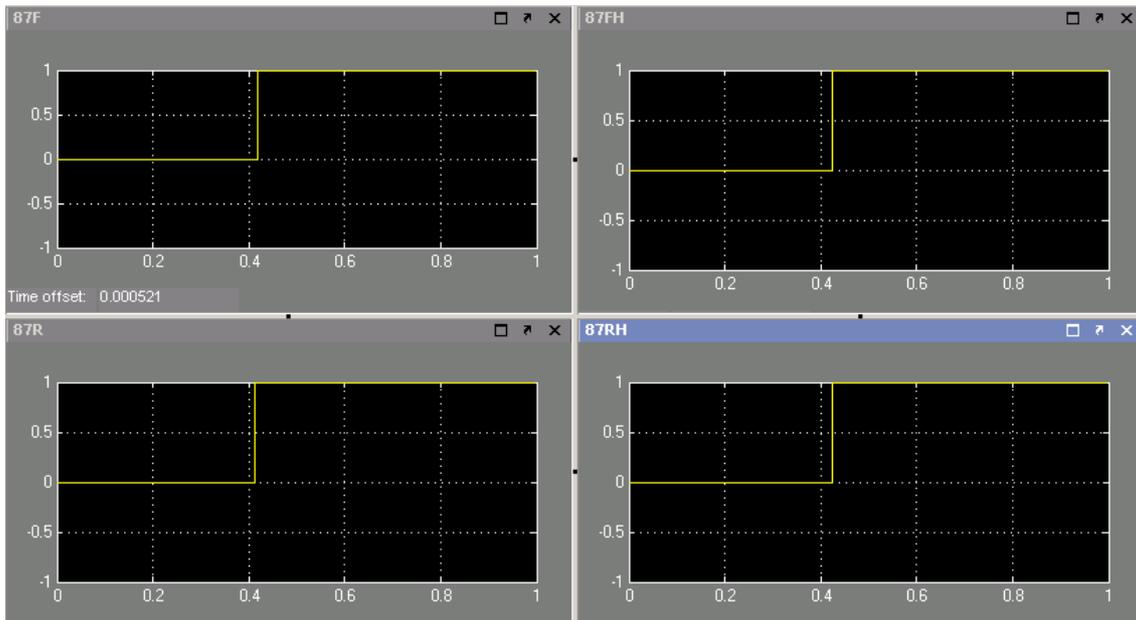


Figura 7.63 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 2-c – Modelo 2

### 7.2.3 CASO 3 – FALHA INTERNA A 90 % DO ENROLAMENTO DO REATOR

Curto-circuito monofásico, aplicado a 90 % do enrolamento do reator a partir da bucha do mesmo. A falha foi aplicada em 400 ms sem simulação de abertura de disjuntor com um tempo de simulação de 1s.

#### a) Fator de dispersão de 0.25

A partir da Figura 7.64, observa-se correntes de magnitude bem pequena na fase defeituosa.

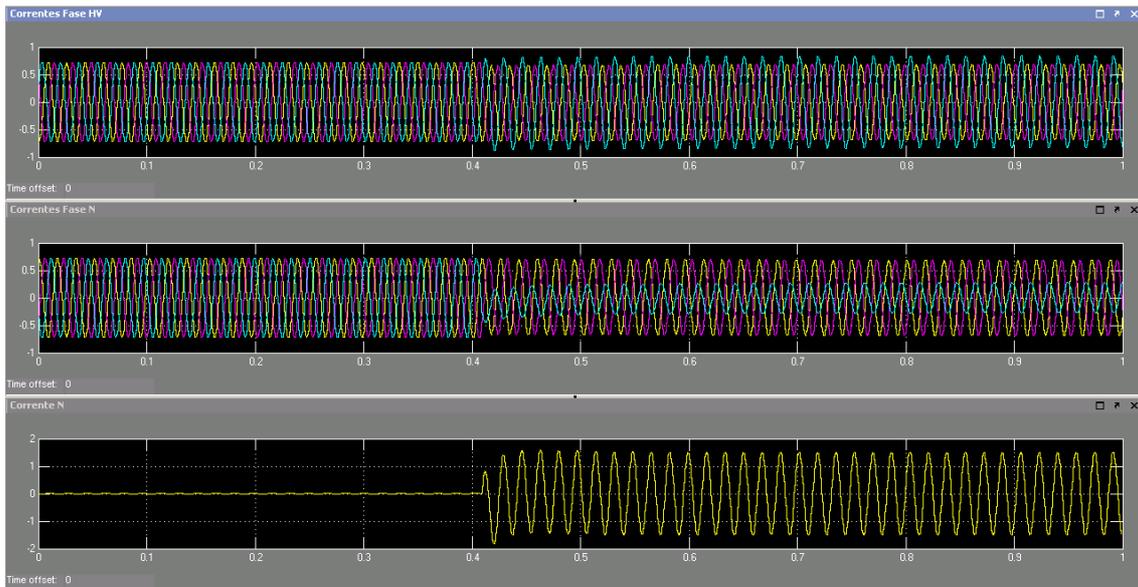


Figura 7.64 – Correntes do Caso 3-a – Modelo 2

A partir da Figura 7.65 observa-se apenas uma rápida atuação da unidade instantânea de sobrecorrente de neutro 50 N, após aproximadamente 20 ms do início da falta, vindo a desatuar em seguida. Quanto as unidades temporizadas, em até 1 s, não foi verificada nenhuma atuação.

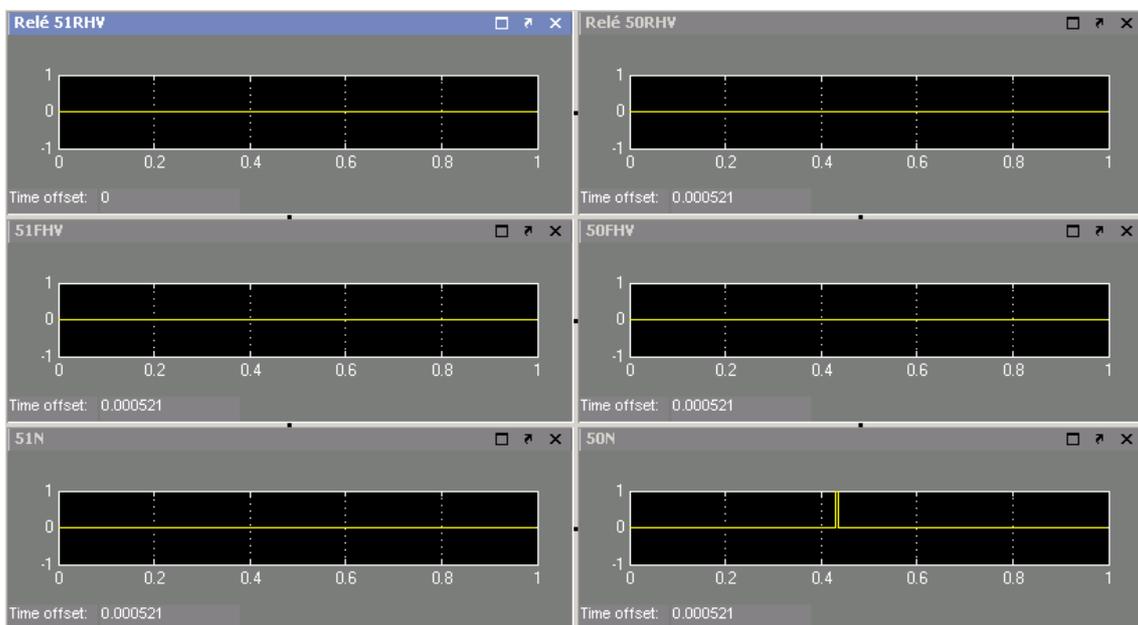


Figura 7.65 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 3-a – Modelo 2

A partir da Figura 7.66 observa-se apenas a atuação da proteção diferencial de terra restrita, imediatamente após o início da falta sem bloqueio por harmônicos.

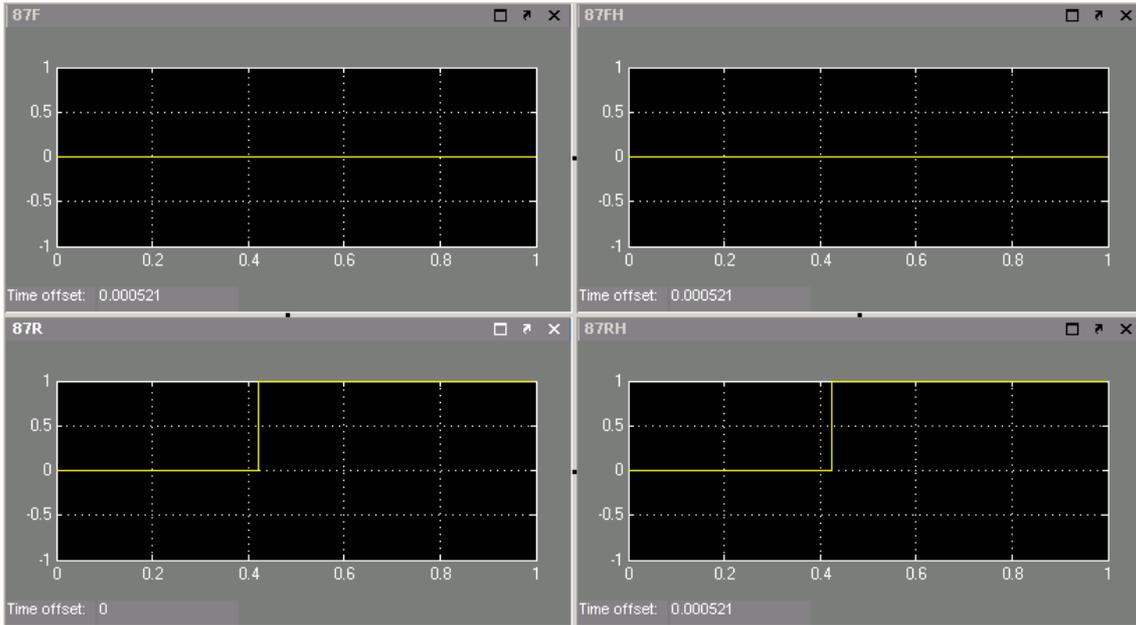


Figura 7.66 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 3-a – Modelo 2

### b) Fator de dispersão de 0.5

A partir da Figura 7.67, observa-se correntes de magnitude bem pequena na fase defeituosa.

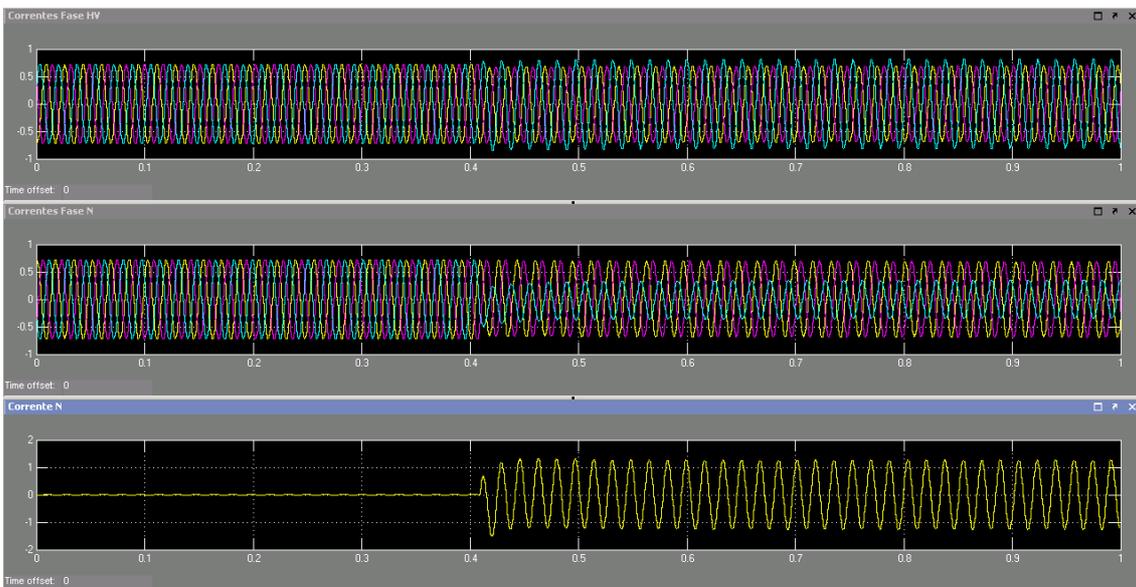


Figura 7.67 – Correntes do Caso 3-b – Modelo 2

A partir da Figura 7.68 observa-se que não houve atuação de nenhuma unidade de sobrecorrente.

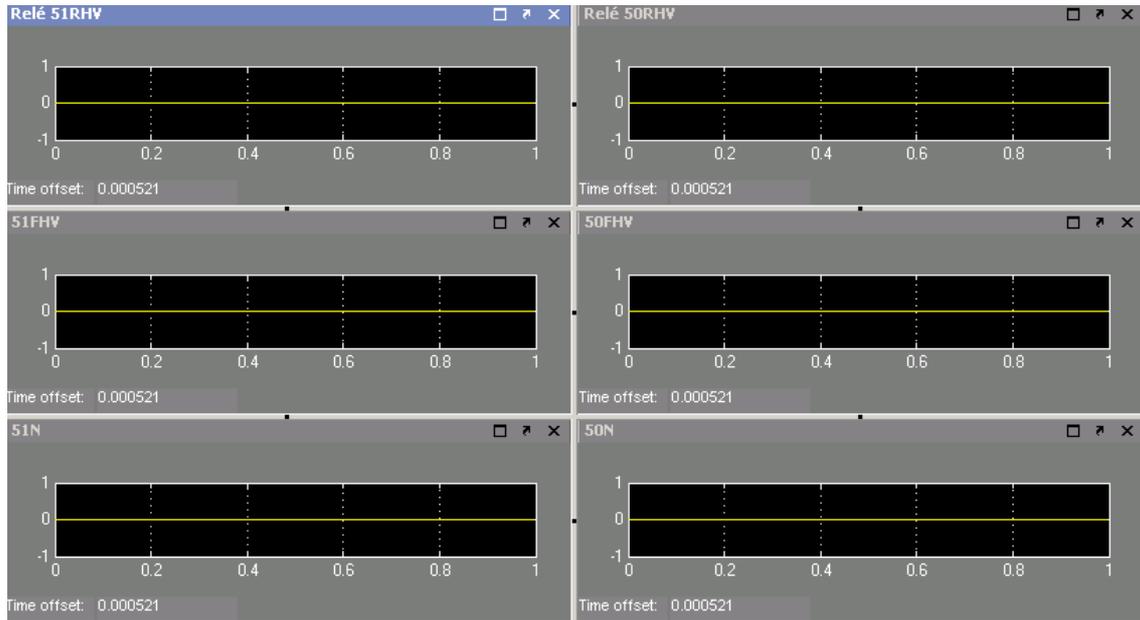


Figura 7.68 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 3-b – Modelo 2

A partir da Figura 7.69 observa-se apenas a atuação da proteção diferencial de terra restrita, imediatamente após o início da falta sem bloqueio por harmônicos.

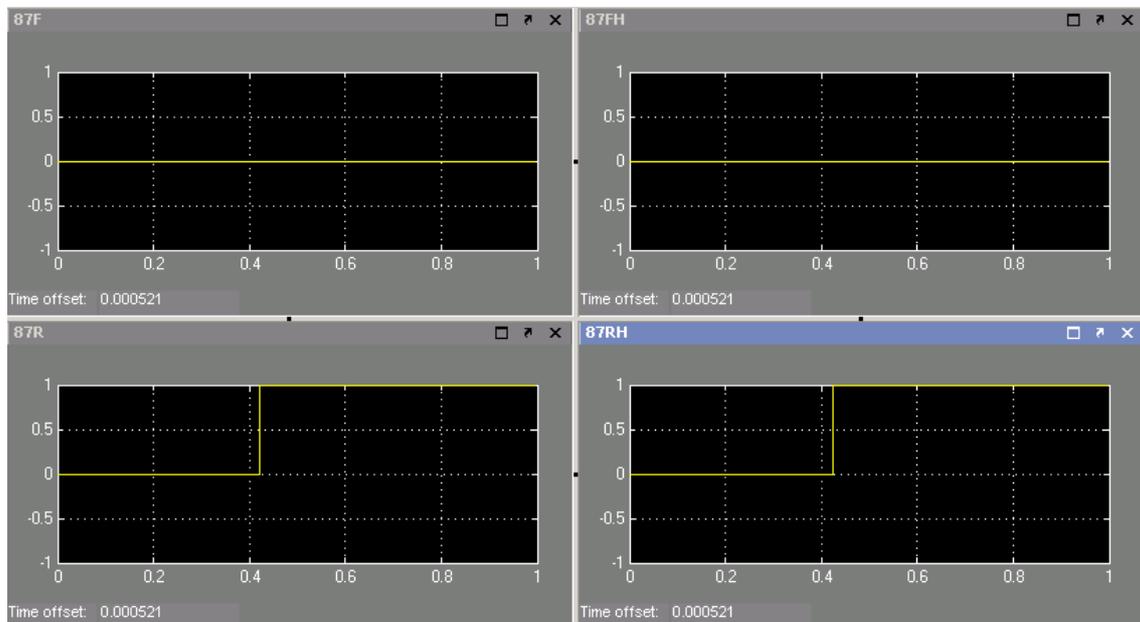


Figura 7.69 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 3-b – Modelo 2

### c) Fator de dispersão de 0.75

A partir da Figura 7.70, observa-se correntes de magnitude bem pequena na fase defeituosa.

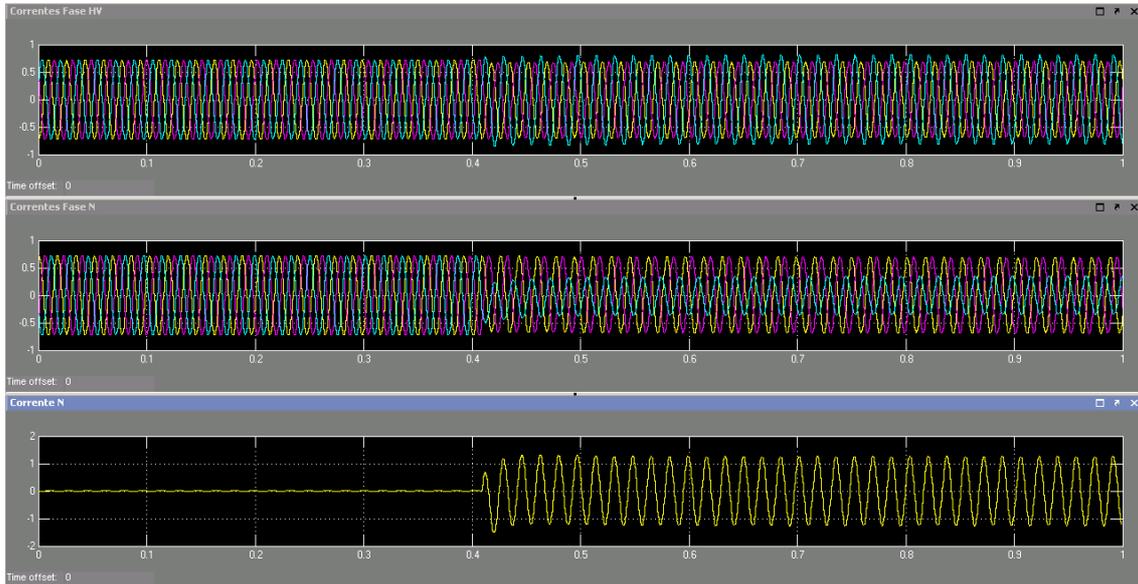


Figura 7.70 – Correntes do Caso 3-c – Modelo 2

A partir da Figura 7.71 observa-se que não houve atuação de nenhuma unidade de sobrecorrente.

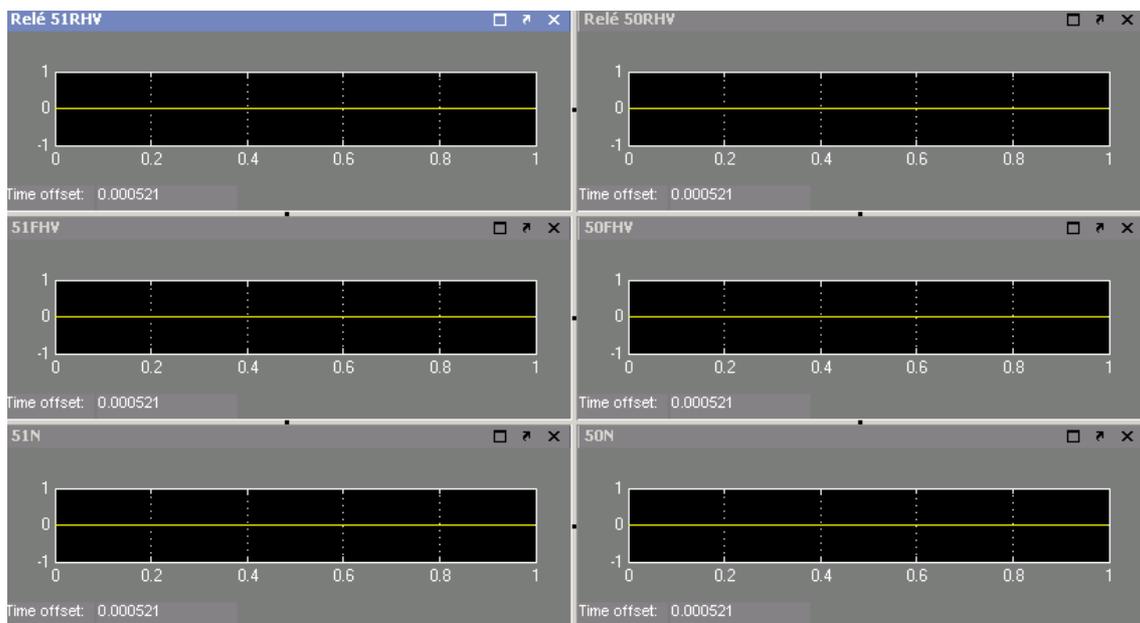


Figura 7.71 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 3-c – Modelo 2

A partir da Figura 7.72 observa-se apenas a atuação da proteção diferencial de terra restrita, imediatamente após o início da falta sem bloqueio por harmônicos.

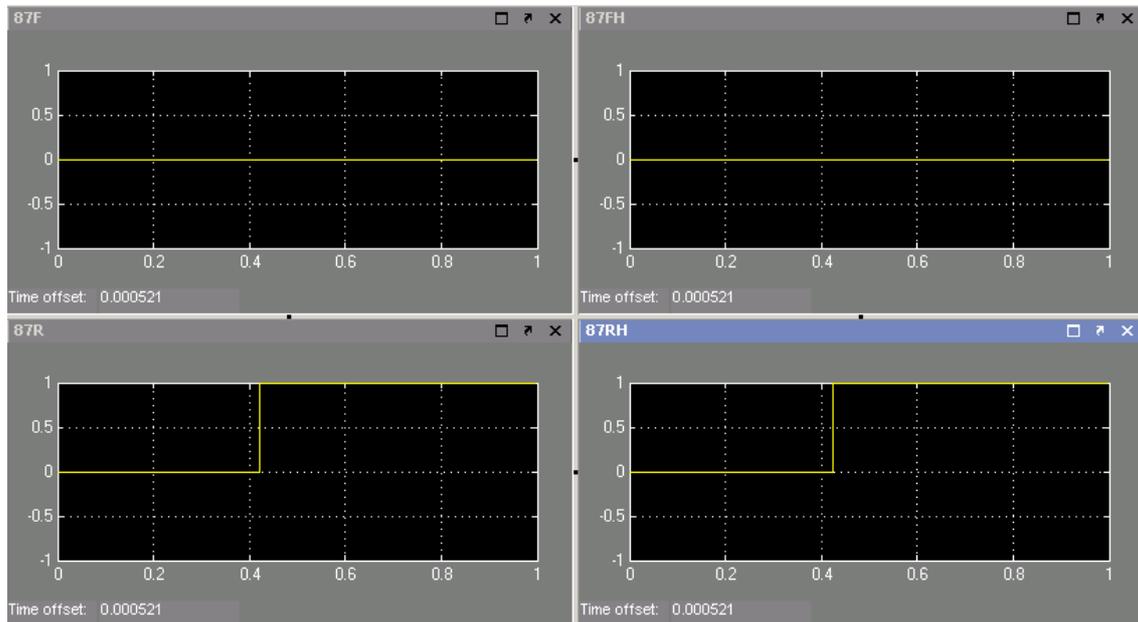


Figura 7.72 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 3-c – Modelo 2

#### 7.2.4 CASO 4 – FALHA EXTERNA – CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO EM BARRA PRÓXIMA AO REATOR

Curto-circuito monofásico, aplicado na barra próxima ao reator shunt. A falha foi aplicada em 400 ms, com duração de 100 ms. O tempo de simulação foi de 1s.

A partir da Figura 7.73, observa-se uma corrente de inrush no neutro do reator.

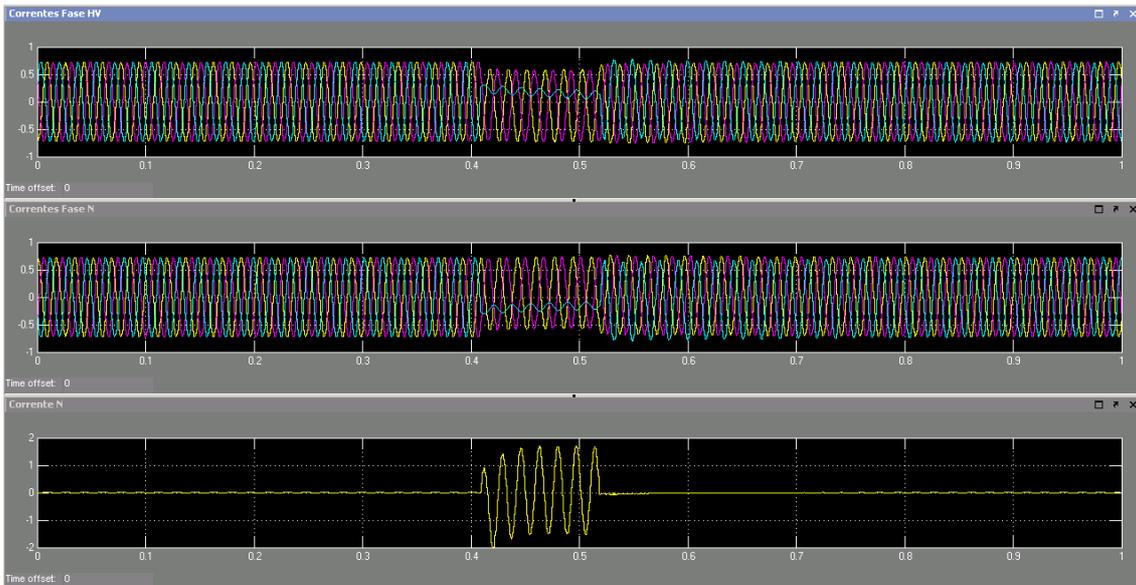


Figura 7.73 – Correntes do Caso 4 – Modelo 2

A partir da Figura 7.74 observa-se a atuação da unidade de sobrecorrente instantânea de neutro 50N para uma falha externa.

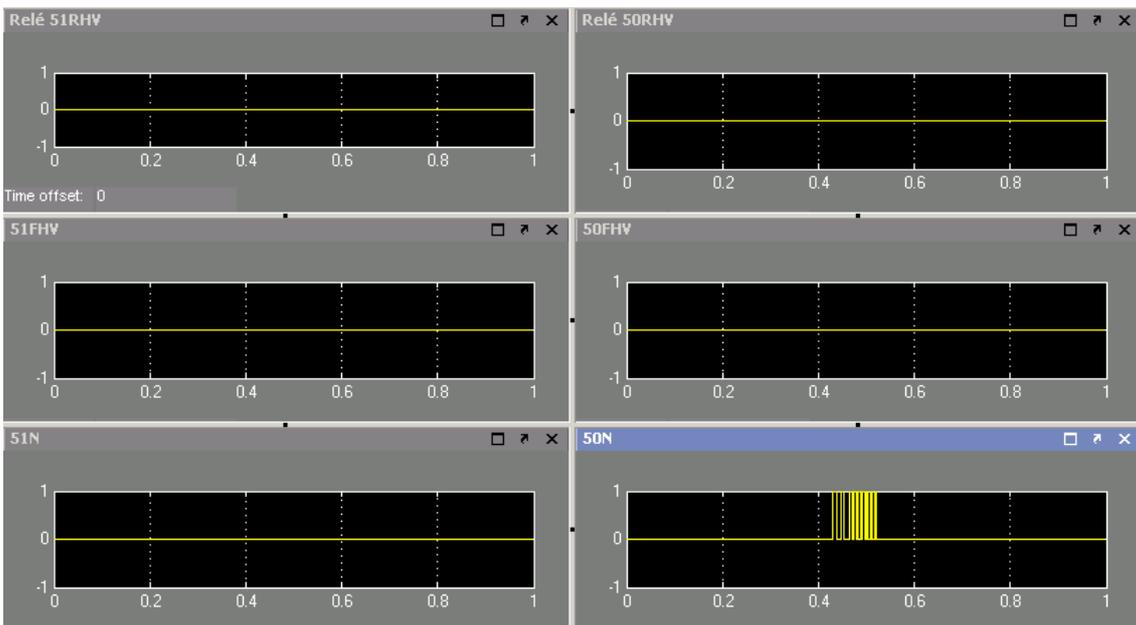


Figura 7.74 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 4 – Modelo 2

A partir da Figura 7.75 observa-se que não houve atuação de nenhuma proteção diferencial para esta falha externa.

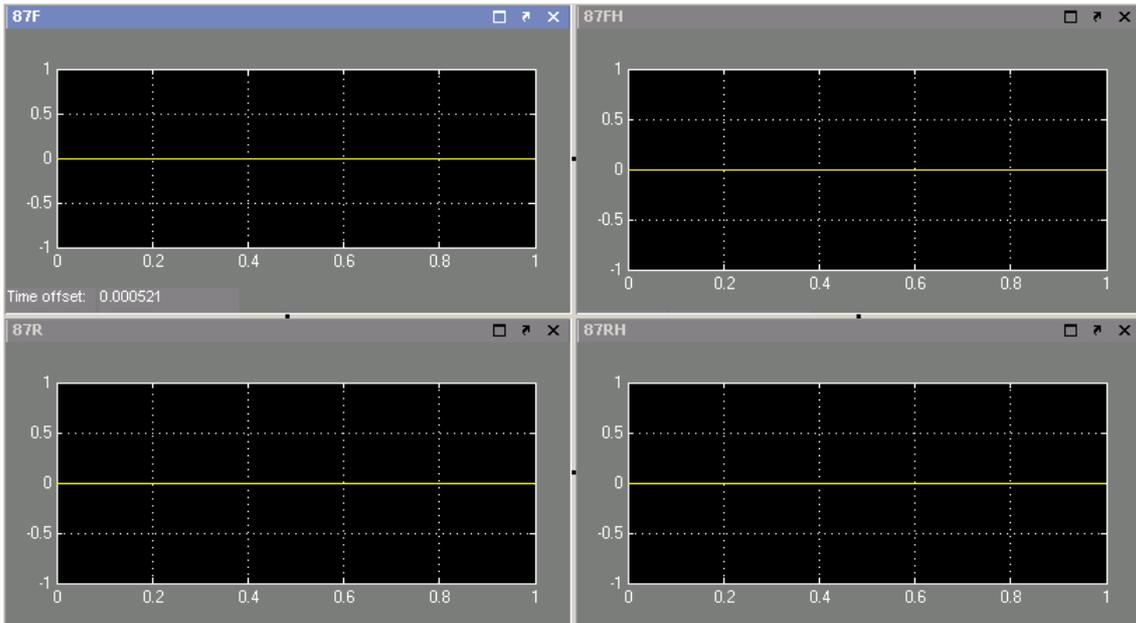


Figura 7.75 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 4 – Modelo 2

### 7.2.5 CASO 5 – FALHA EXTERNA – CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO-TERRA EM BARRA PRÓXIMA AO REATOR

Curto-circuito bifásico-terra, aplicado na barra próxima ao reator shunt. A falha foi aplicada em 400 ms, com duração de 100 ms. O tempo de simulação foi de 1s.

A partir da Figura 7.76, observa-se corrente de inrush no neutro do reator.

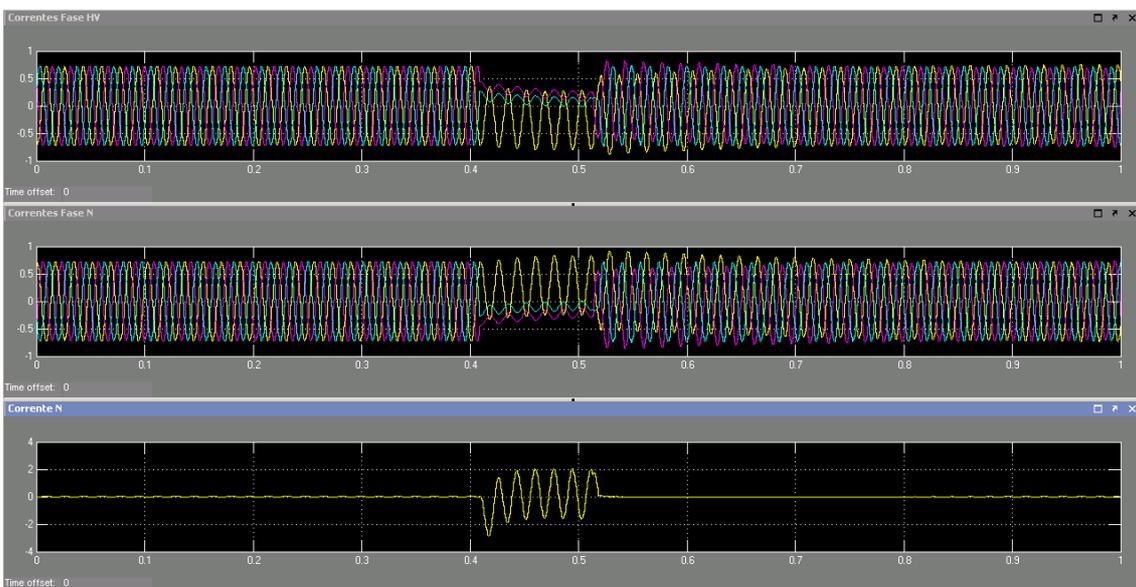


Figura 7.76 – Correntes do Caso 5 – Modelo 2

A partir da Figura 7.77 observa-se a atuação das unidades de sobrecorrente instantâneas de neutro, 50N, e residual de fase, 50RHV para uma falha externa.

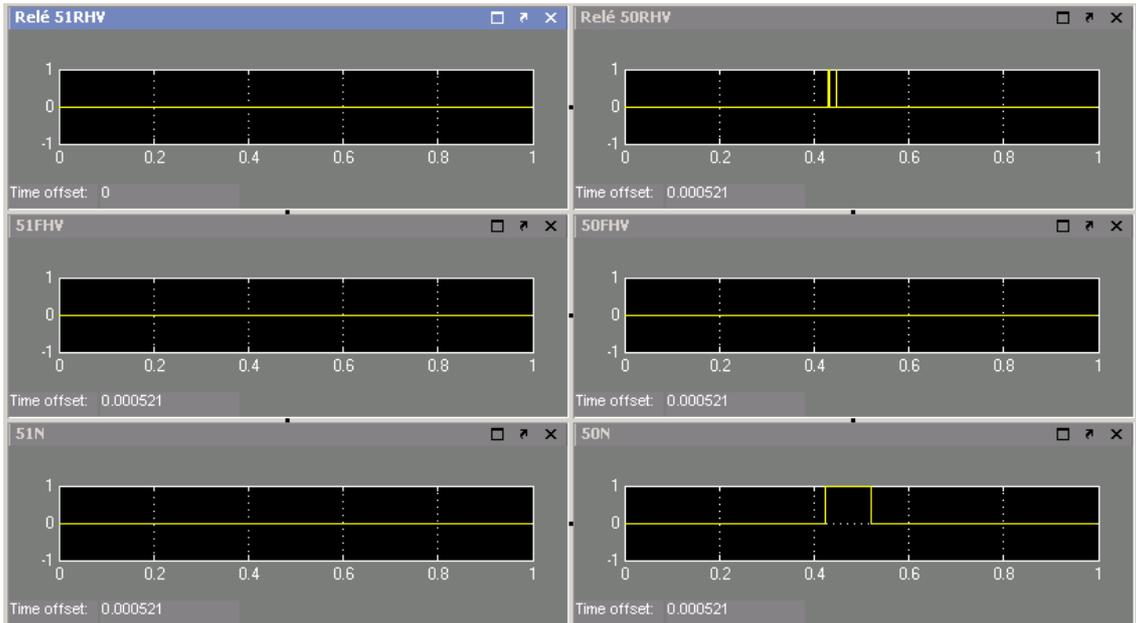


Figura 7.77 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 5 – Modelo 2

A partir da Figura 7.78 observa-se que não houve atuação de nenhuma proteção diferencial para esta falha externa.

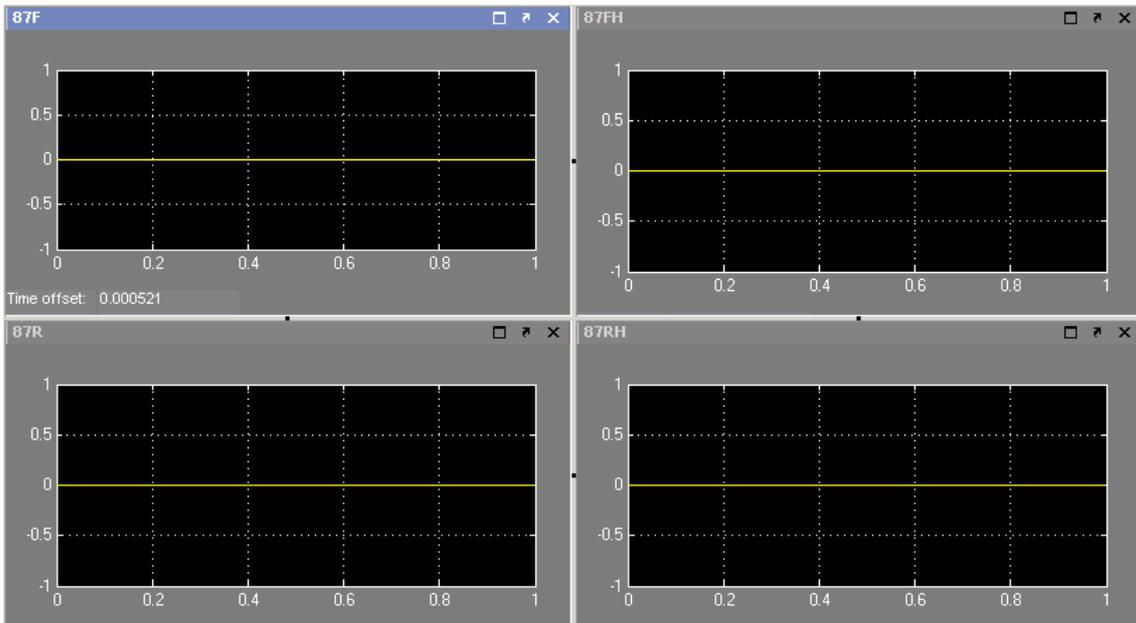


Figura 7.78 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 5 – Modelo 2

## 7.2.6 CASO 6 – FALHA EXTERNA – CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO EVOLUTIVO EM BARRA PRÓXIMA AO REATOR

Curto-circuito trifásico evolutivo, aplicado na barra próxima ao reator shunt. A falha foi aplicada da seguinte forma: teve início como monofásica em 400 ms, evoluiu para bifásica-terra em 415 ms e para trifásica-terra em 430 ms. A duração de cada falha foi de 60 ms. O tempo de simulação foi de 1s.

A partir da Figura 7.79, observa-se correntes no neutro do reator com elevado nível DC.

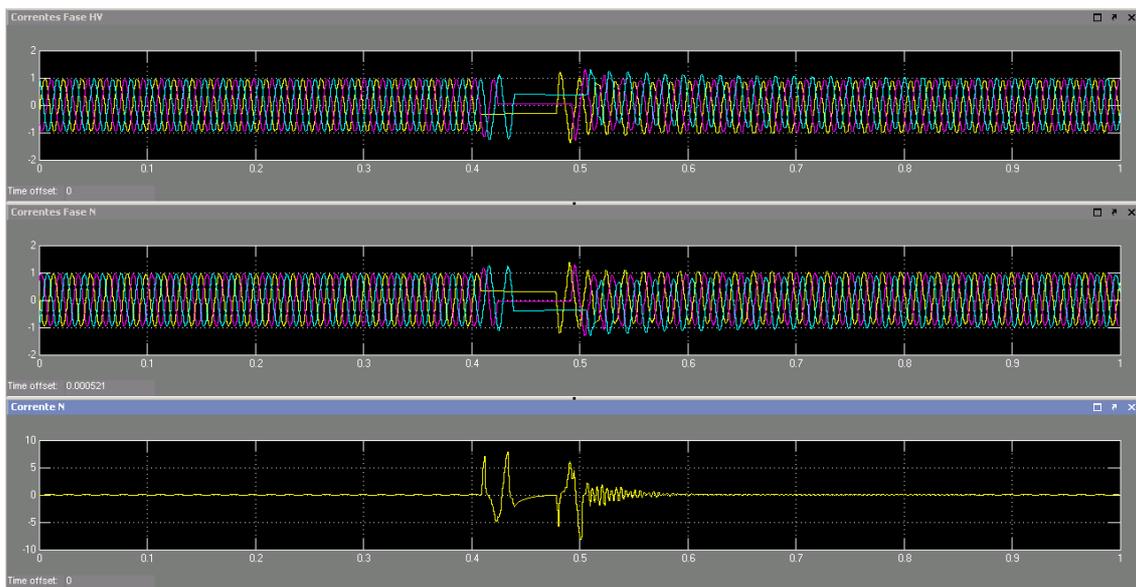


Figura 7.79 – Correntes do Caso 6 – Modelo 2

A partir da Figura 7.80 observa-se a atuação das unidades de sobrecorrente instantâneas de neutro, 50N, e residual de fase, 50RHV para uma falha externa.

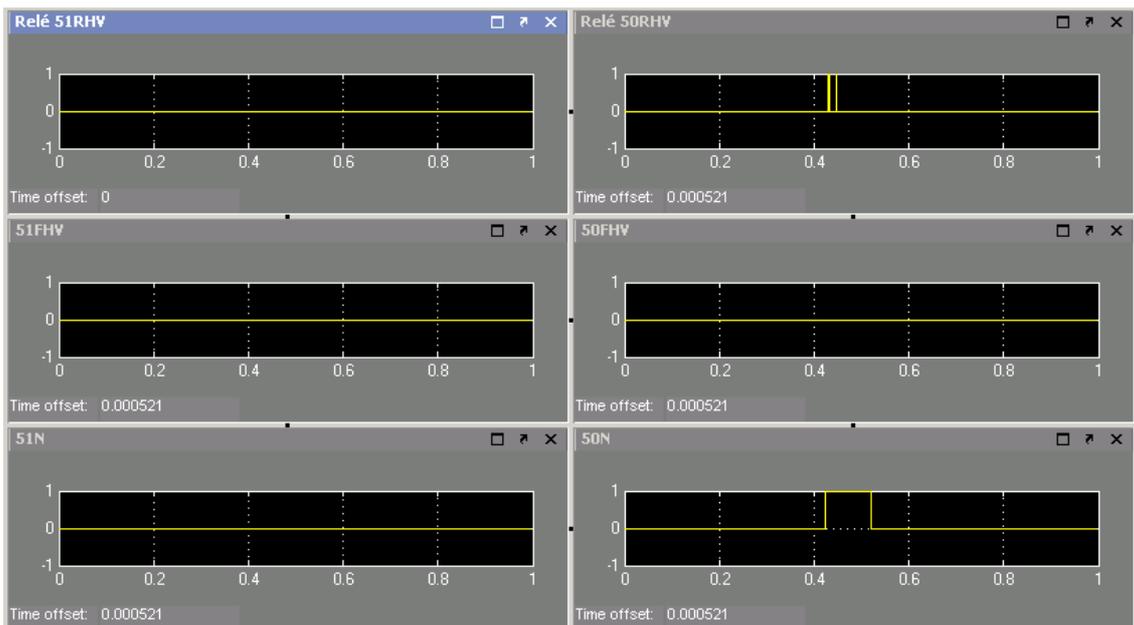


Figura 7.80 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 6 – Modelo 2

A partir da Figura 7.81 observa-se que não houve atuação de nenhuma proteção diferencial para esta falha externa.

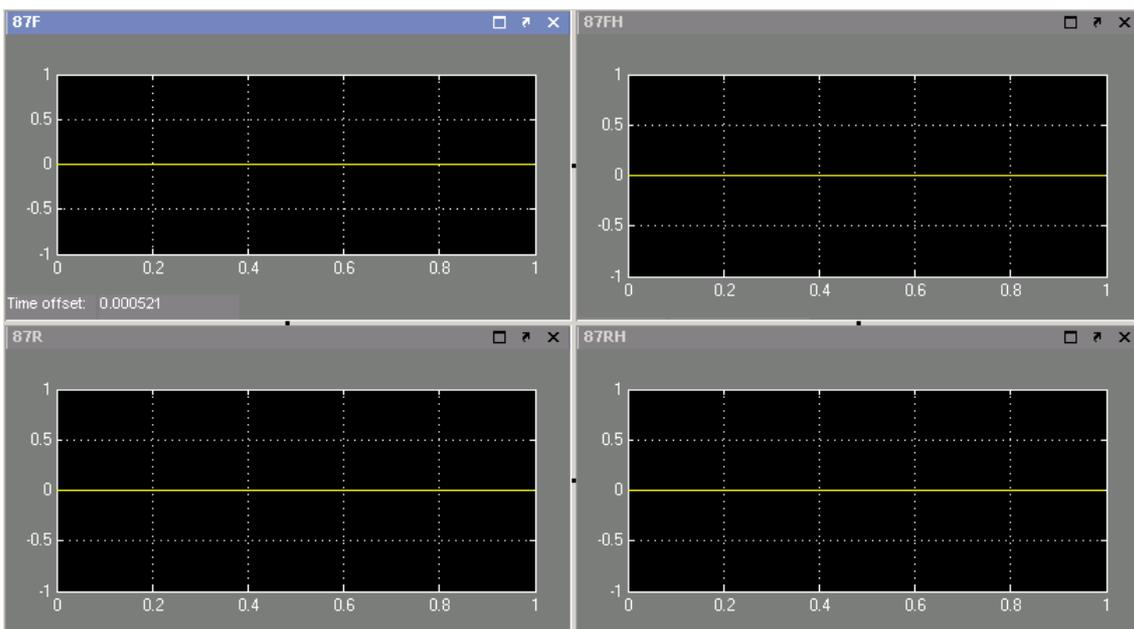


Figura 7.81 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 6 – Modelo 2

### 7.2.7 CASO 7 – MANOBRA DE NORMALIZAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO COM FECHAMENTO DE PARALELO ENTRE SUBSISTEMAS

Foi simulada a normalização da LT 345 kV Ouro Preto 2 – Vitória, com os reatores shunt inseridos nas duas pontas. O fechamento de paralelo entre subsistemas foi efetuado em vitória em 400 ms. O tempo de simulação foi de 2 s.

A partir da Figura 7.82, observa-se correntes de inrush quando da normalização da linha de transmissão.

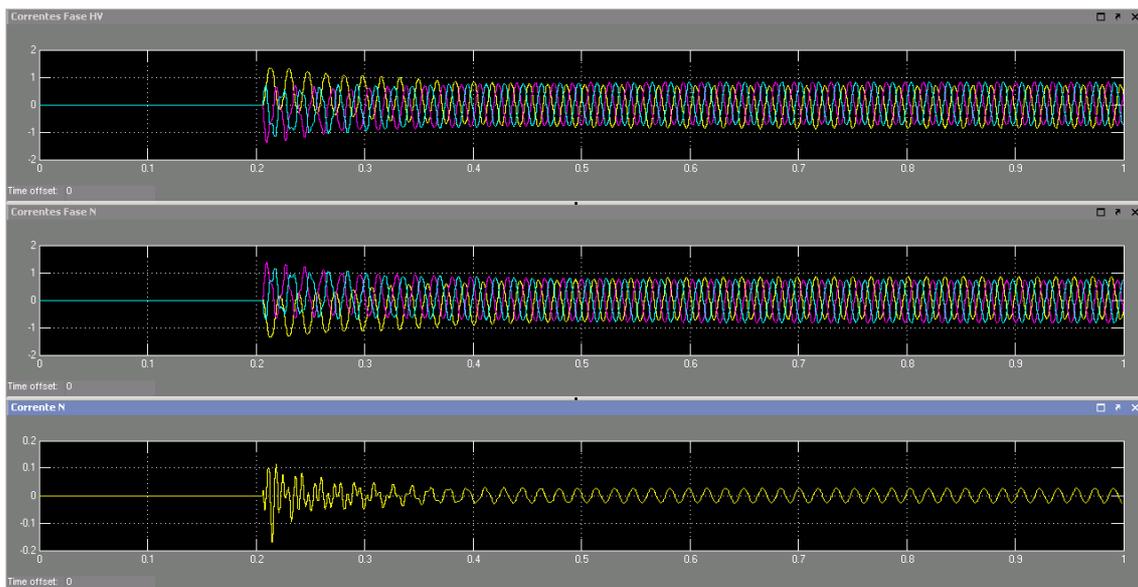


Figura 7.82 – Correntes do Caso 7 – Modelo 2

A partir da Figura 7.83 observa-se que não houve atuação de nenhuma unidade de sobrecorrente.

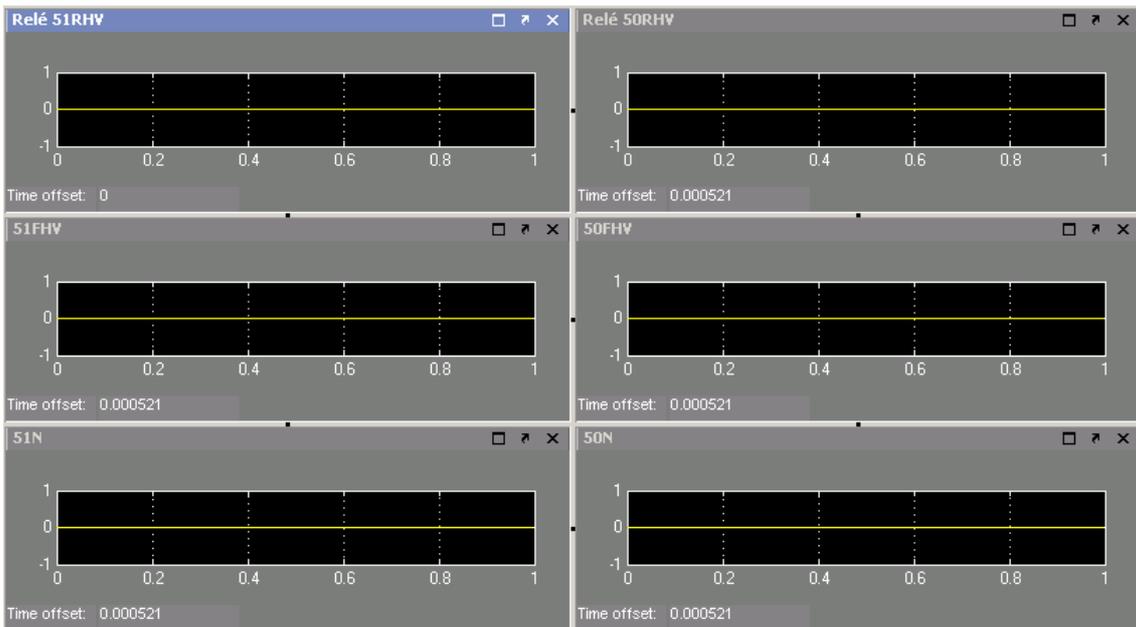


Figura 7.83 – Atuações das unidades de sobrecorrente do Caso 7 – Modelo 2

A partir da Figura 7.84 observa-se que não houve atuação de nenhuma proteção diferencial durante a manobra.

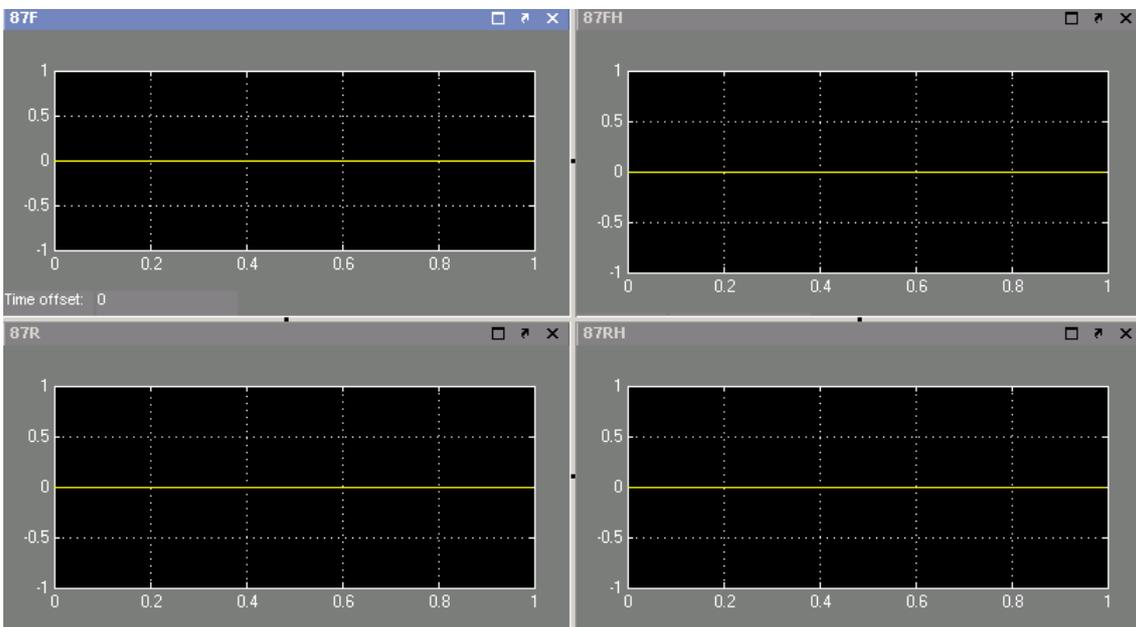


Figura 7.84 – Atuações das unidades diferenciais do Caso 7 – Modelo 2

### 7.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES EM FUNÇÃO DO FATOR FD

A seguir serão apresentadas juntamente, para fins de análise, as correntes medidas pelos TC, durante falhas internas, variando-se o FD nos valores de 0,25, 0,5 e 0,75, dos dois modelos de reatores.

#### a) Falha monofásica a 10% do enrolamento do reator.

— Modelo 1

As Figuras 7.85, 7.86 e 7.87 mostram, respectivamente, a corrente medida pelo TC de fase próximos ao lado de alta tensão, pelos TC de fase próximos ao neutro e pelo TC de neutro do reator, da fase defeituosa, para uma falha monofásica a 10% do enrolamento, a partir da bucha do mesmo. Observa-se que quanto menor o fator de dispersão, maior a magnitude das correntes de curto-circuito. Sendo a diferença entre as correntes mais evidente nas medições próximas ao neutro e no neutro do reator.

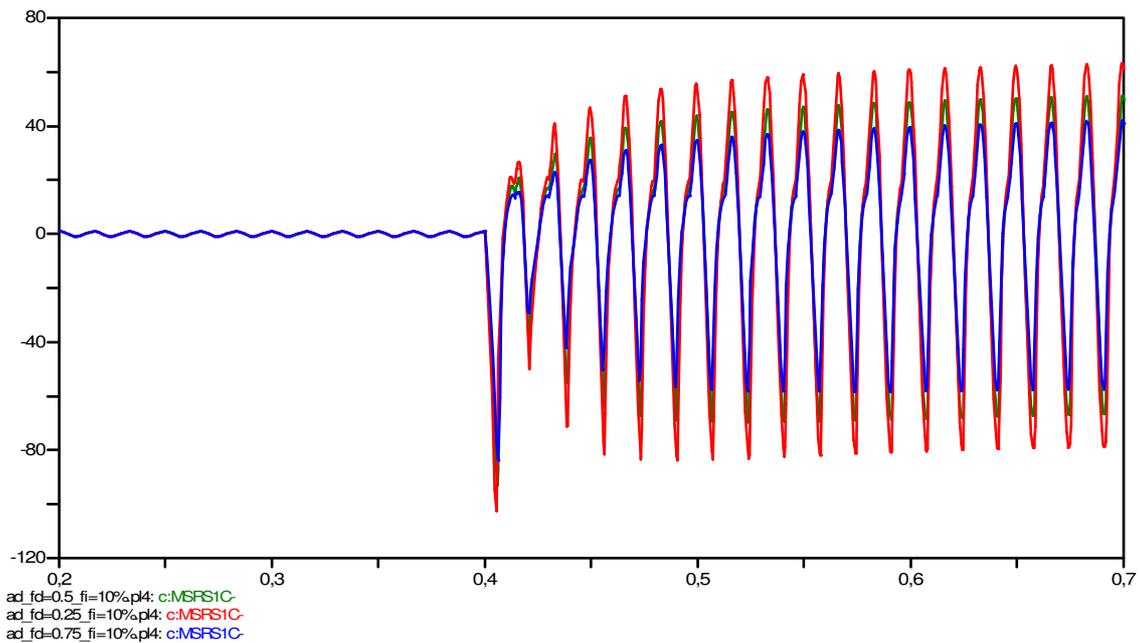


Figura 7.85 – Corrente da fase sob defeito (FI-10%) medida pelos TC de fase do lado de alta tensão do reator – Modelo 1

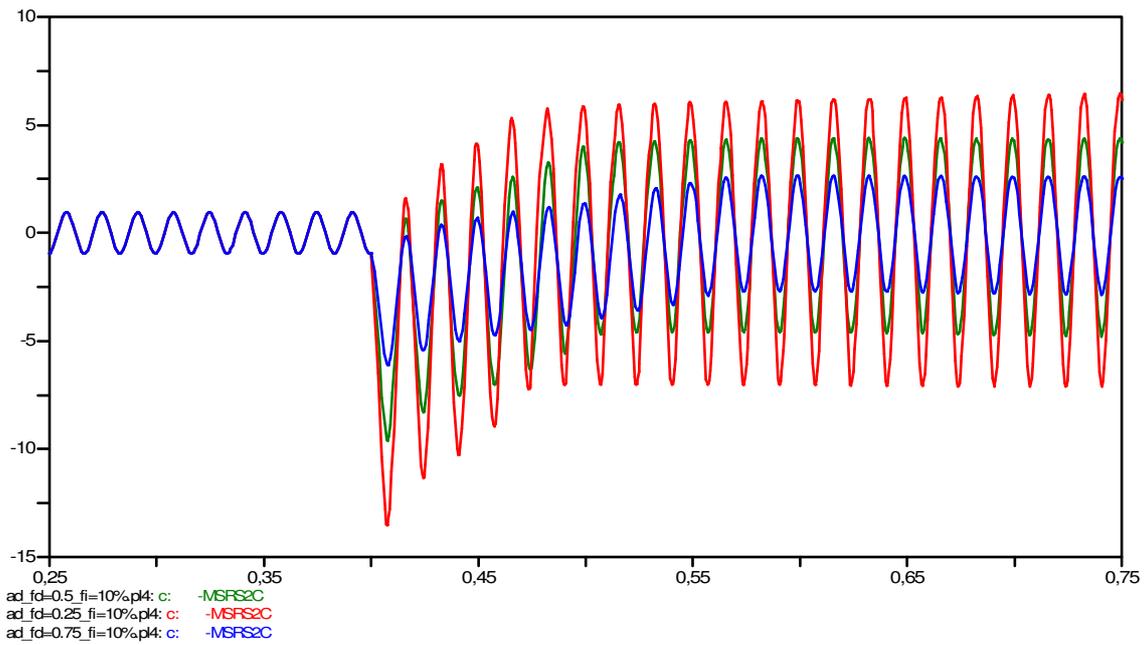


Figura 7.86 – Corrente da fase sob defeito (FI-10%) medida pelo TC de fase do lado de neutro do reator – Modelo 1

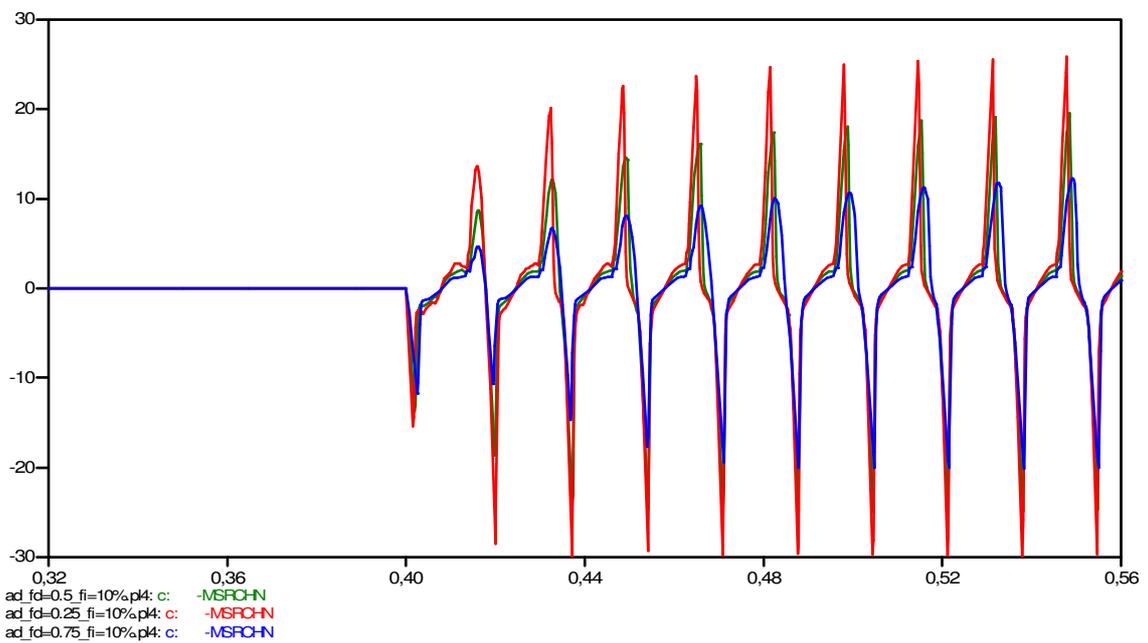


Figura 7.87 – Corrente de neutro medida pelo TC de neutro do reator (FI-10%) – Modelo 1

— Modelo 2

As Figuras 7.88, 7.89 e 7.90 mostram, respectivamente, a corrente medida pelo TC de fase próximos ao lado de alta tensão, pelos TC de fase próximos ao neutro e pelo TC de neutro do reator, da fase defeituosa, para uma falha monofásica a 10% do enrolamento, a partir da bucha do mesmo. Observa-se que quanto menor o fator de dispersão, maior a magnitude das correntes de curto-circuito. Sendo a diferença entre as correntes mais evidente nas medições próximas ao neutro e no neutro do reator, similar ao observado no modelo 1.

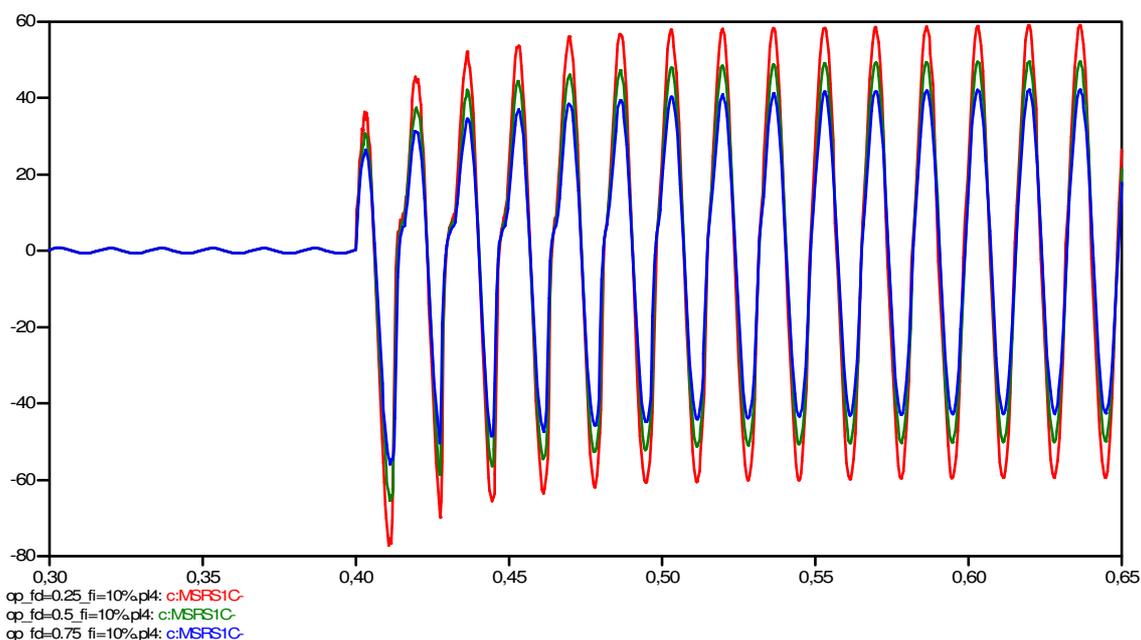


Figura 7.88 – Corrente da fase sob defeito (FI-10%) medida pelos TC de fase do lado de alta tensão do reator – Modelo 2

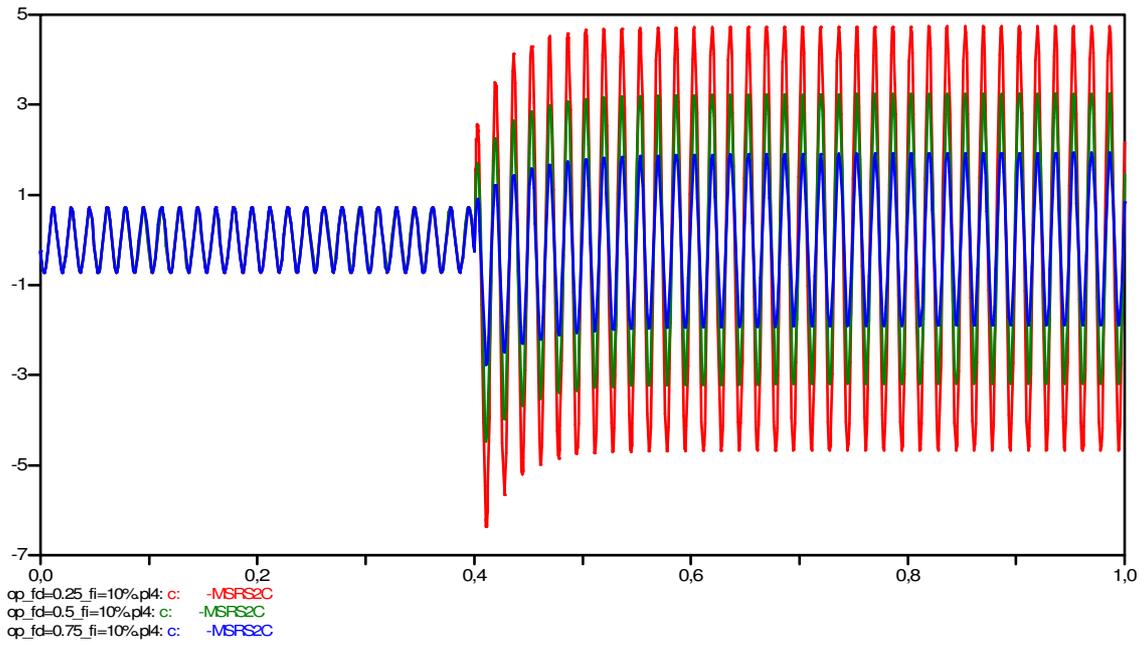


Figura 7.89 – Corrente da fase sob defeito (FI-10%) medida pelo TC de fase do lado de neutro do reator – Modelo 2

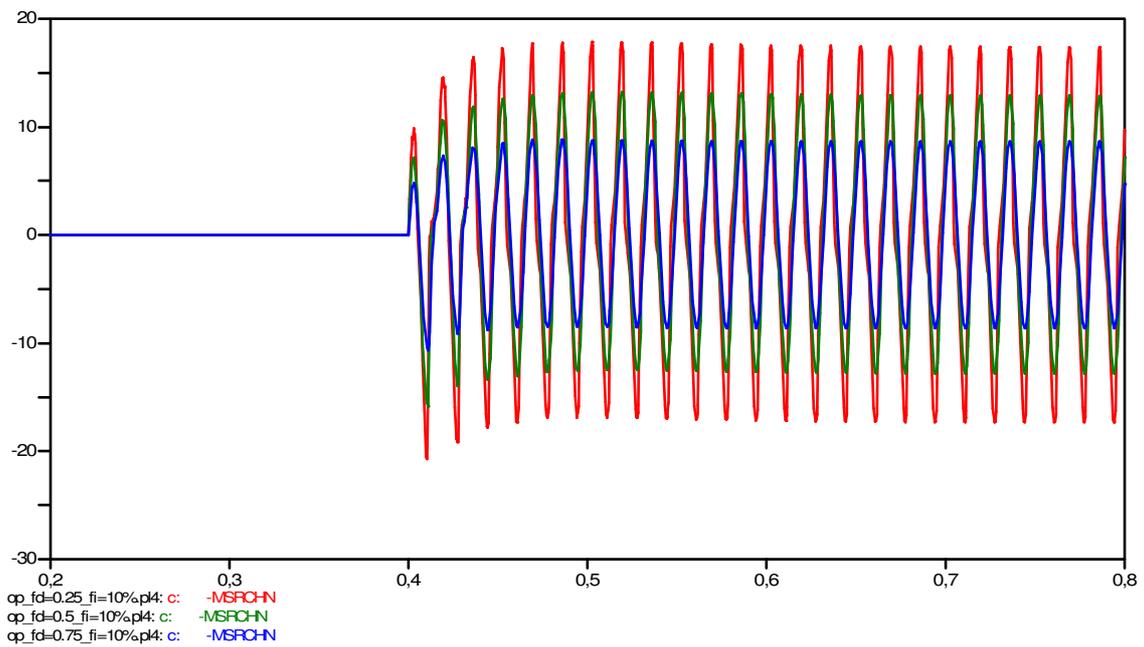


Figura 7.90 – Corrente de neutro medida pelo TC de neutro do reator (FI-10%) – Modelo 2

## b) Falha monofásica a 50% do enrolamento do reator.

— Modelo 1

As Figuras 7.91, 7.92 e 7.93 mostram, respectivamente, a corrente medida pelo TC de fase próximos ao lado de alta tensão, pelos TC de fase próximos ao neutro e pelo TC de neutro do reator, da fase defeituosa, para uma falha monofásica a 50% do enrolamento, a partir da bucha do mesmo. Observa-se que quanto menor o fator de dispersão, maior a magnitude das correntes de curto-circuito.

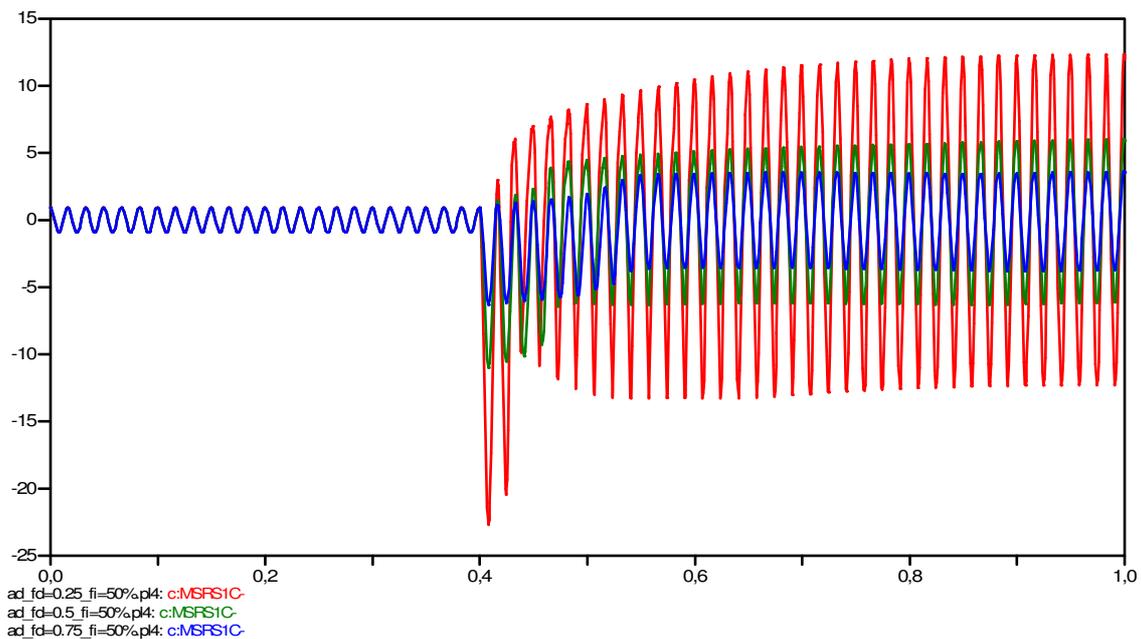


Figura 7.91 – Corrente da fase sob defeito (FI-50%) medida pelos TC de fase do lado de alta tensão do reator – Modelo 1

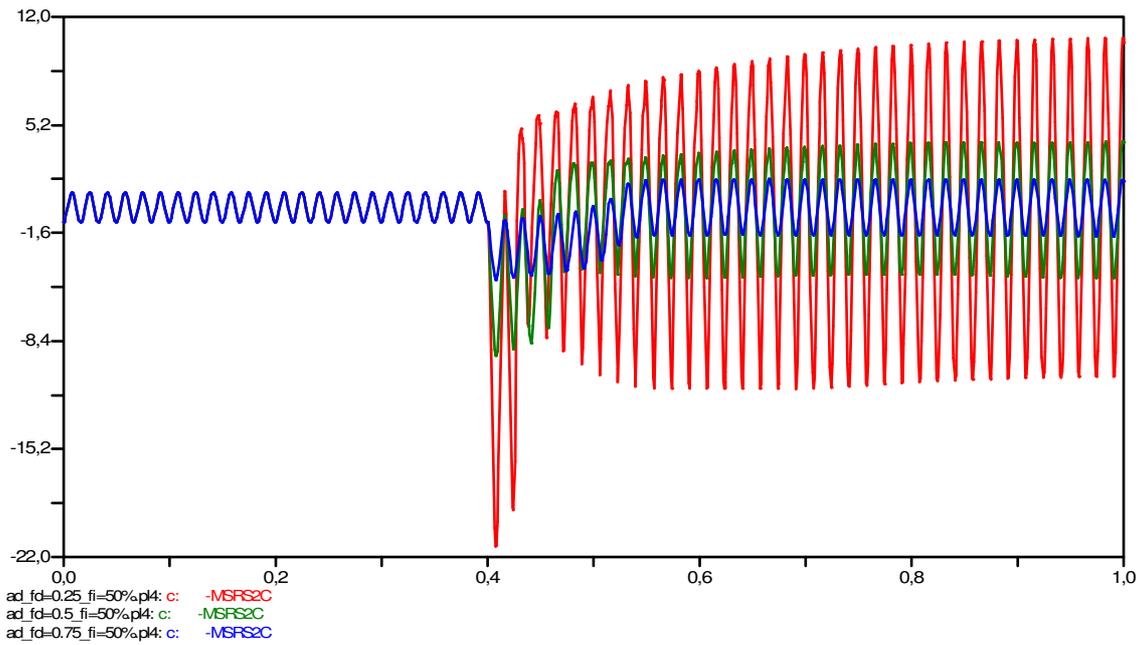


Figura 7.92 – Corrente da fase sob defeito (FI-50%) medida pelo TC de fase do lado de neutro do reator – Modelo 1

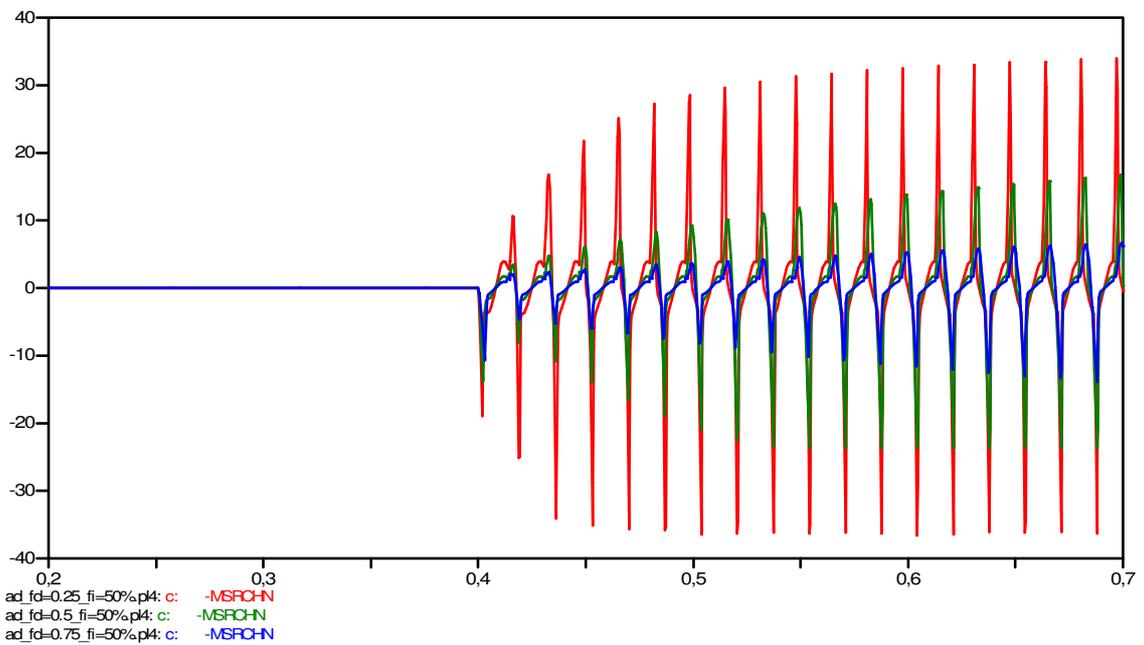


Figura 7.93 – Corrente de neutro medida pelo TC de neutro do reator (FI-50%) – Modelo 1

— Modelo 2

As Figuras 7.94, 7.95 e 7.96 mostram, respectivamente, a corrente medida pelo TC de fase próximo ao lado de alta tensão, pelos TC de fase próximo ao neutro e pelo TC de neutro do reator, da fase defeituosa, para uma falha monofásica a 50% do enrolamento, a partir da bucha do mesmo. Observa-se que quanto menor o fator de dispersão, maior a magnitude das correntes de curto-circuito.

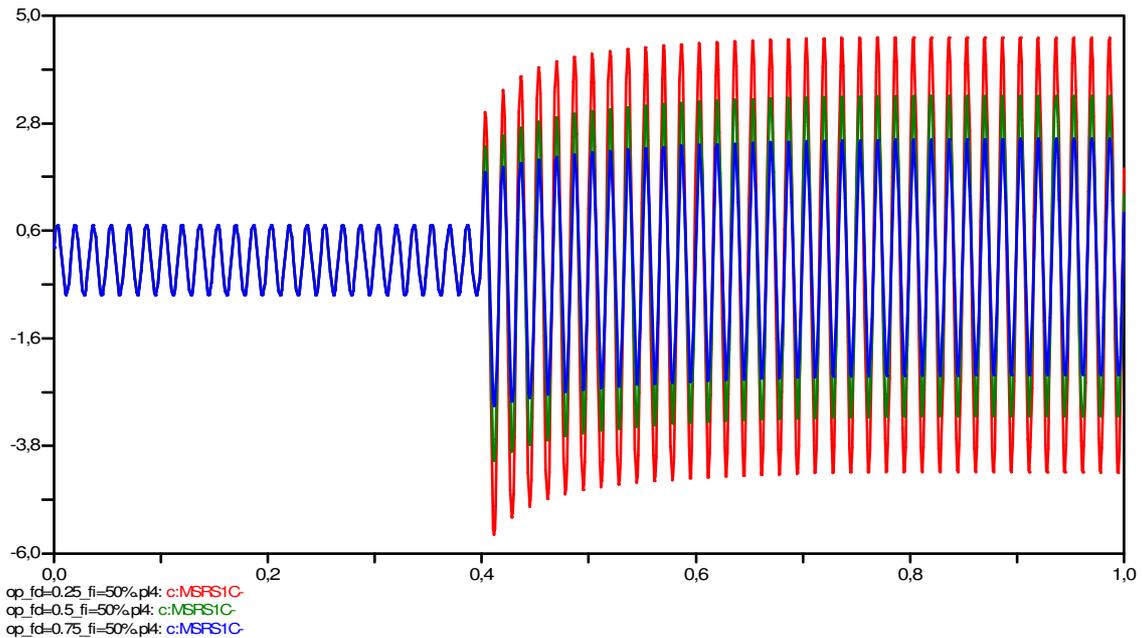


Figura 7.94 – Corrente da fase sob defeito (FI – 50%) medida pelos TC de fase do lado de alta tensão do reator – Modelo 2

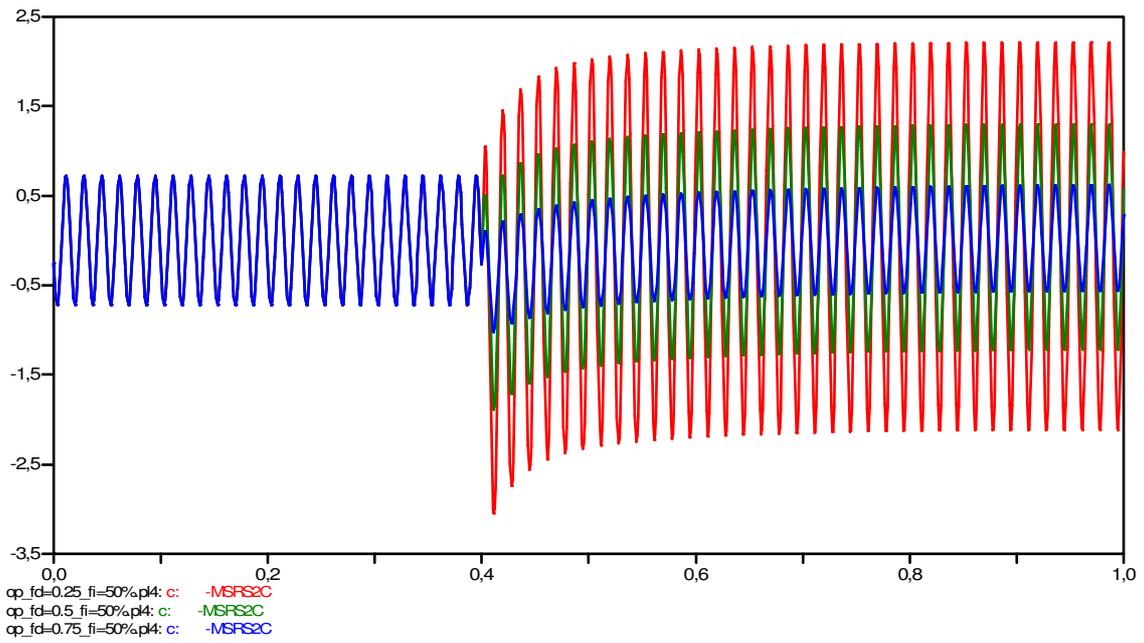


Figura 7.95 – Corrente da fase sob defeito (FI – 50%) medida pelo TC de fase do lado de neutro do reator – Modelo 2

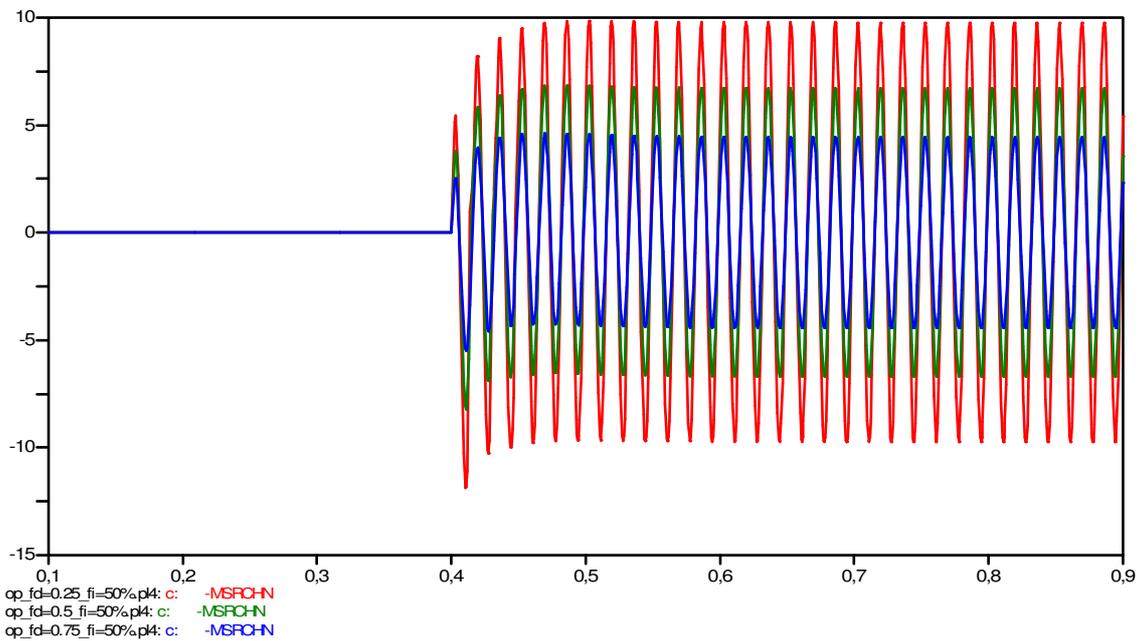


Figura 7.96 – Corrente de neutro medida pelo TC de neutro do reator (FI-50%) – Modelo 2

### c) Falha monofásica a 90% do enrolamento do reator.

— Modelo 1

As Figuras 7.97, 7.98 e 7.99 mostram, respectivamente, a corrente medida pelo TC de fase próximos ao lado de alta tensão, pelos TC de fase próximos ao neutro e pelo TC de neutro do reator, da fase defeituosa, para uma falha monofásica a 90% do enrolamento, a partir da bucha do mesmo. Observa-se que quanto menor o fator de dispersão, maior a magnitude das correntes de curto-circuito. Neste caso, caracterizado, por falhas próximas ao neutro do reator, a diferença da magnitude da corrente de fase é bastante significativa.

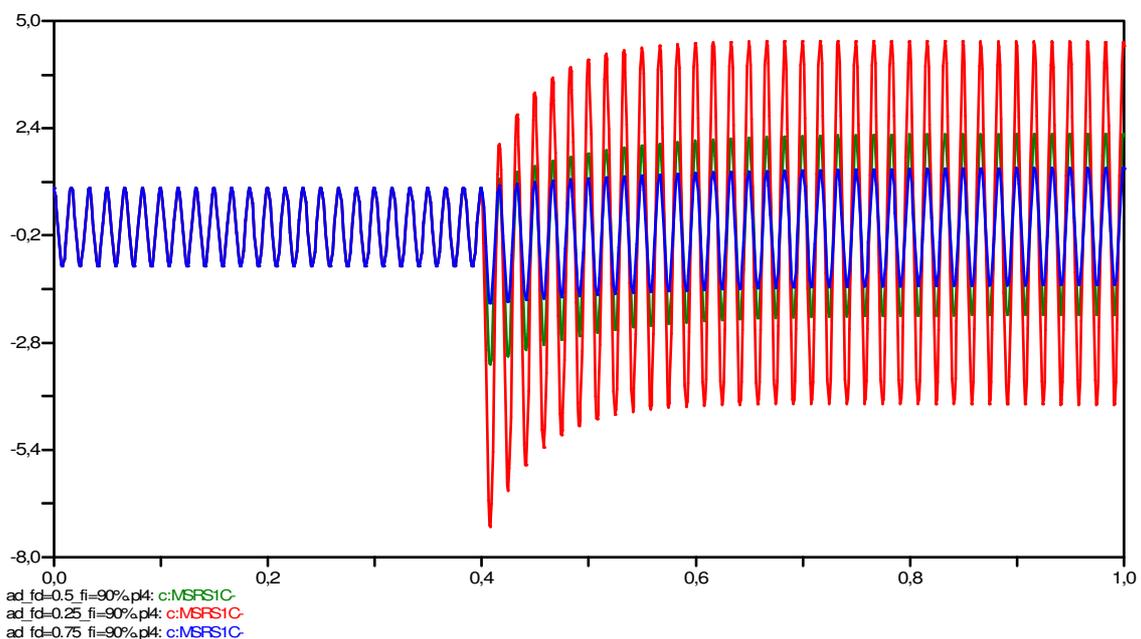


Figura 7.97 – Corrente da fase sob defeito (FI-90%) medida pelos TC de fase do lado de alta tensão do reator – Modelo 1

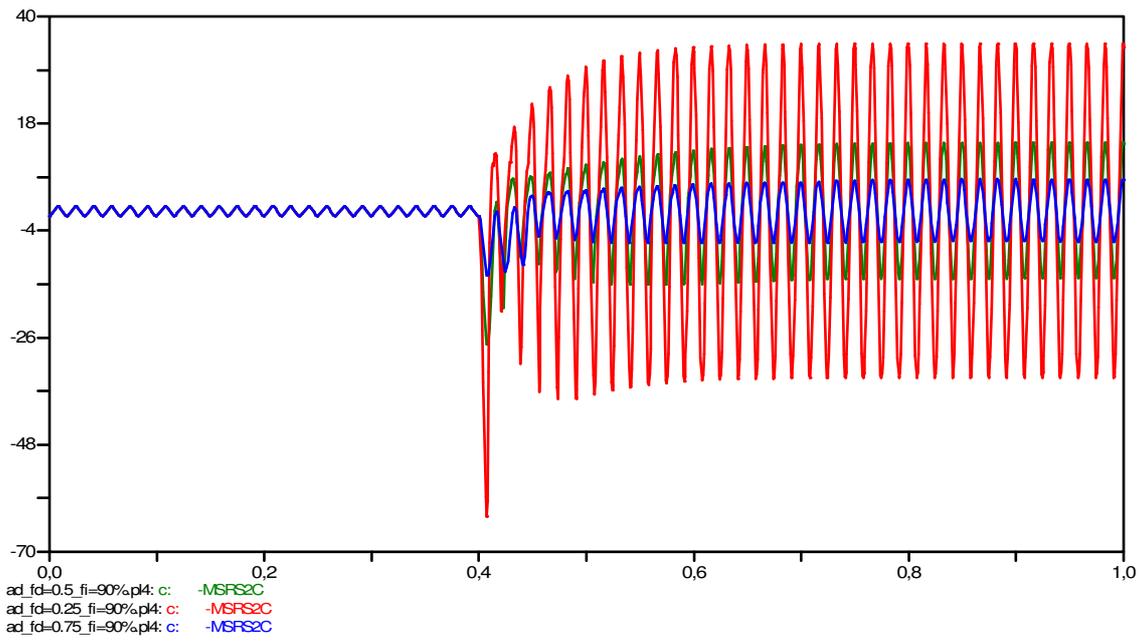


Figura 7.98 – Corrente da fase sob defeito (FI-90%) medida pelo TC de fase do lado de neutro do reator – Modelo 1

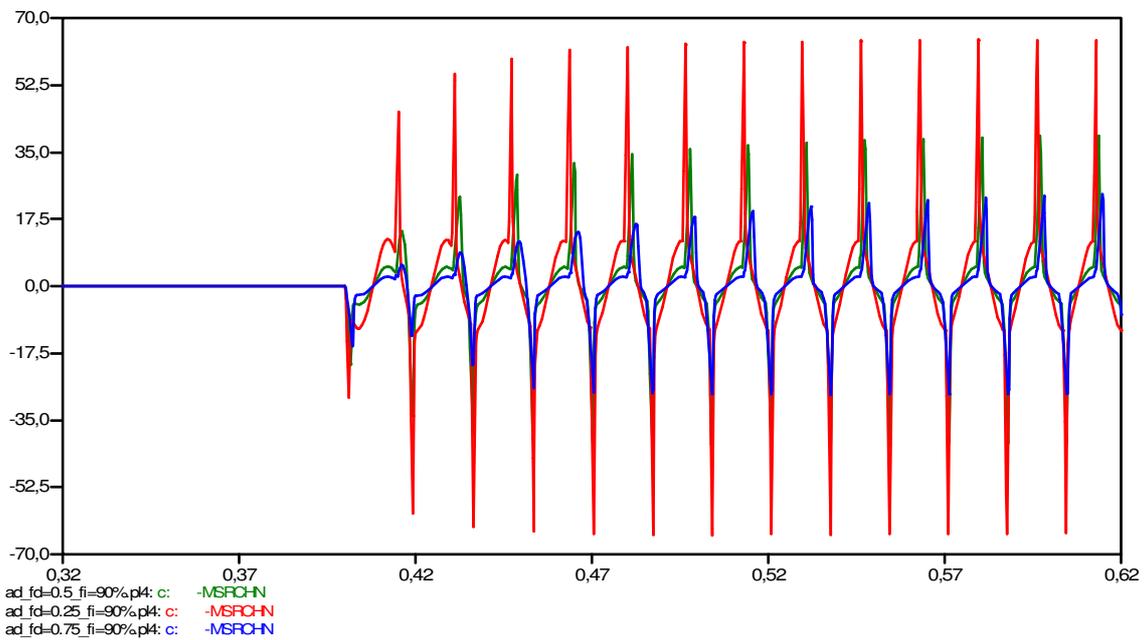


Figura 7.99 – Corrente de neutro medida pelo TC de neutro do reator (FI-90%) – Modelo 1

— Modelo 2

As Figuras 7.100, 7.101 e 7.102 mostram, respectivamente, a corrente medida pelo TC de fase próximos ao lado de alta tensão, pelos TC de fase próximos ao neutro e pelo TC de neutro do reator, da fase defeituosa, para uma falha monofásica a 90% do enrolamento, a partir da bucha do mesmo. Para o tipo de reator do modelo 2, as falhas próximas ao neutro provocam pouca variação na corrente da fase faltosa, vista pelos TC do lado de alta tensão, e até correntes de falta menores que a de carga, vista pelo TC de fase próximo ao neutro. A corrente de falta que circula pelo neutro do reator é a que apresenta diferença mais significativa, quando da alteração do fator FD.

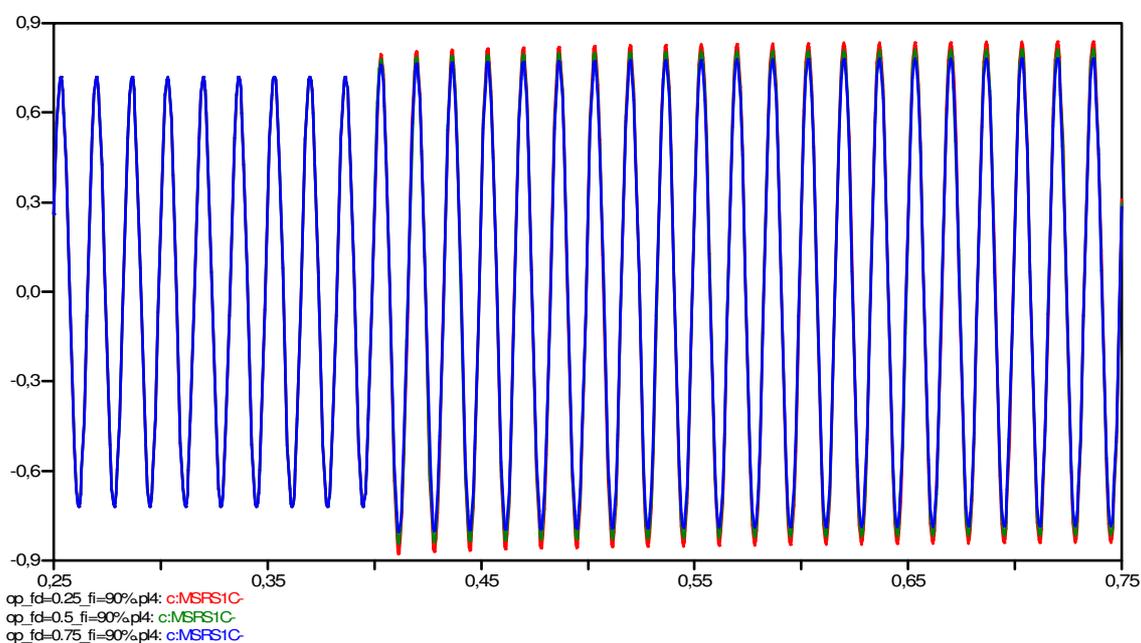


Figura 7.100 – Corrente da fase sob defeito (FI-90%) medida pelos TC de fase do lado de alta tensão do reator – Modelo 2

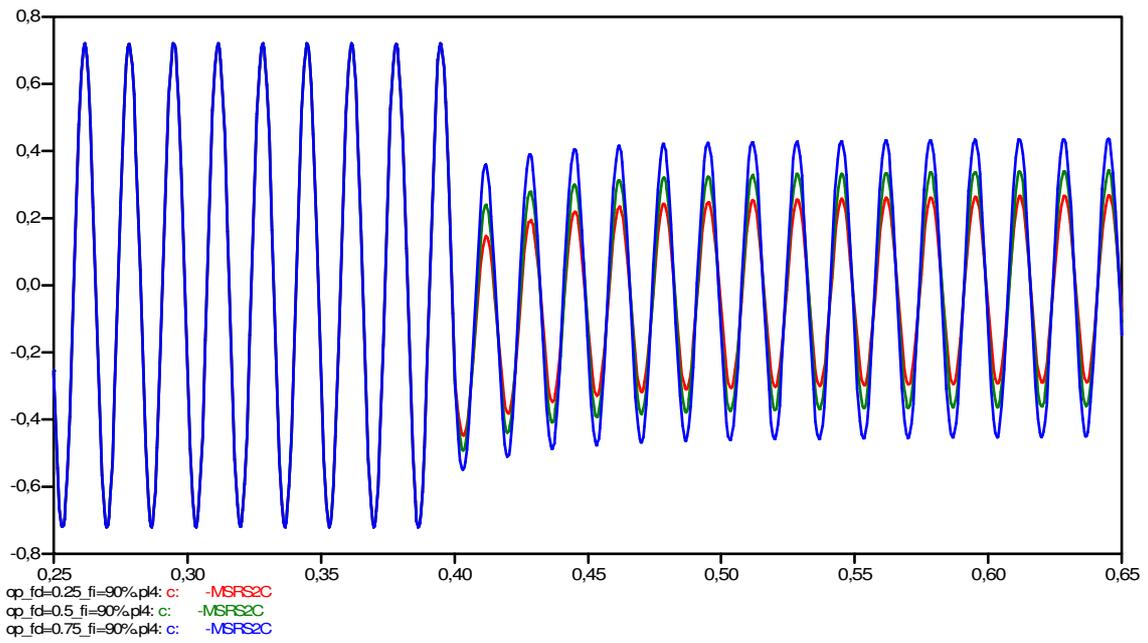


Figura 7.101 – Corrente da fase sob defeito (FI-90%) medida pelo TC de fase do lado de neutro do reator – Modelo 2

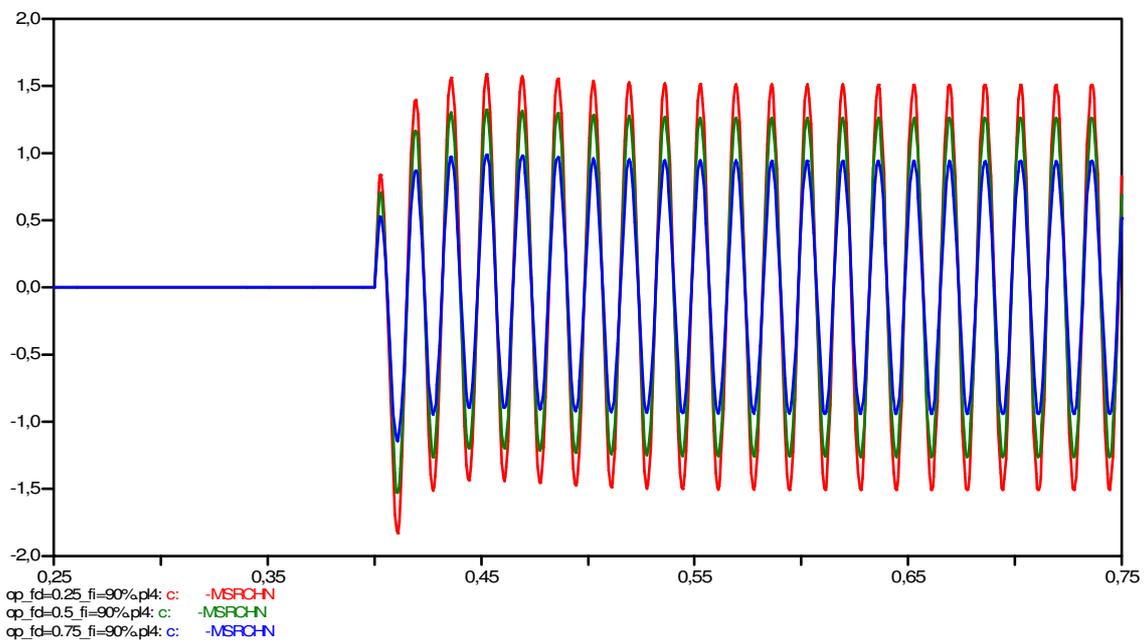


Figura 7.102 – Corrente de neutro medida pelo TC de neutro do reator (FI-90%) - Modelo 2

#### 7.4 VERIFICAÇÃO DA CORRENTE DE INRUSH

Nos resultados das simulações do Modelo 1 foi verificado a atuação do bloqueio por harmônico, por alguns ciclos, das proteções diferenciais em todos os casos de falhas internas. Como esta função é utilizada para evitar atuações incorretas das proteções diferenciais quando de manobras de energização e condições de sobreexcitação do reator, foram feitas simulações da energização do reator do modelo 1, para avaliar o comportamento das correntes.

A figura 7.103, apresentada a seguir mostra elevado nível DC nas correntes de fase, chegando a atingir quase o dobro da corrente nominal de operação nos primeiros ciclos.

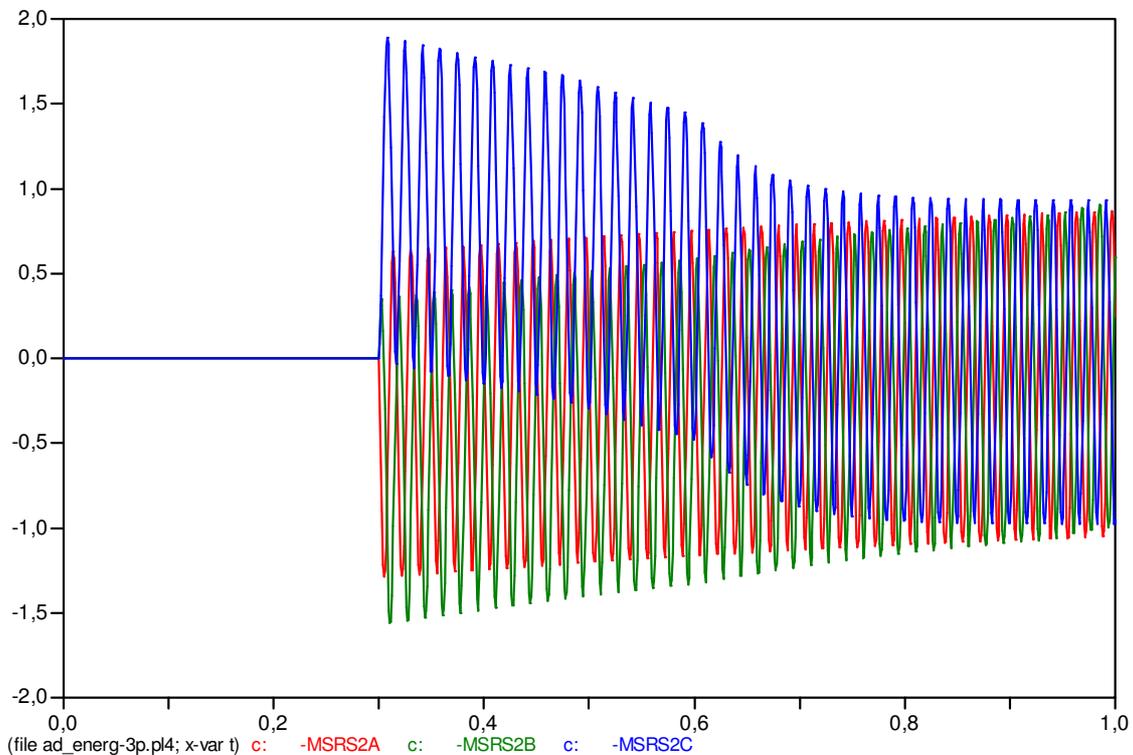


Figura 7.103 – Corrente de energização (fases) - Modelo 1

A figura 7.104, apresentada a seguir mostra que a amplitude da corrente de inrush que circula pelo neutro é bem pequena, sem efeito para a proteção.

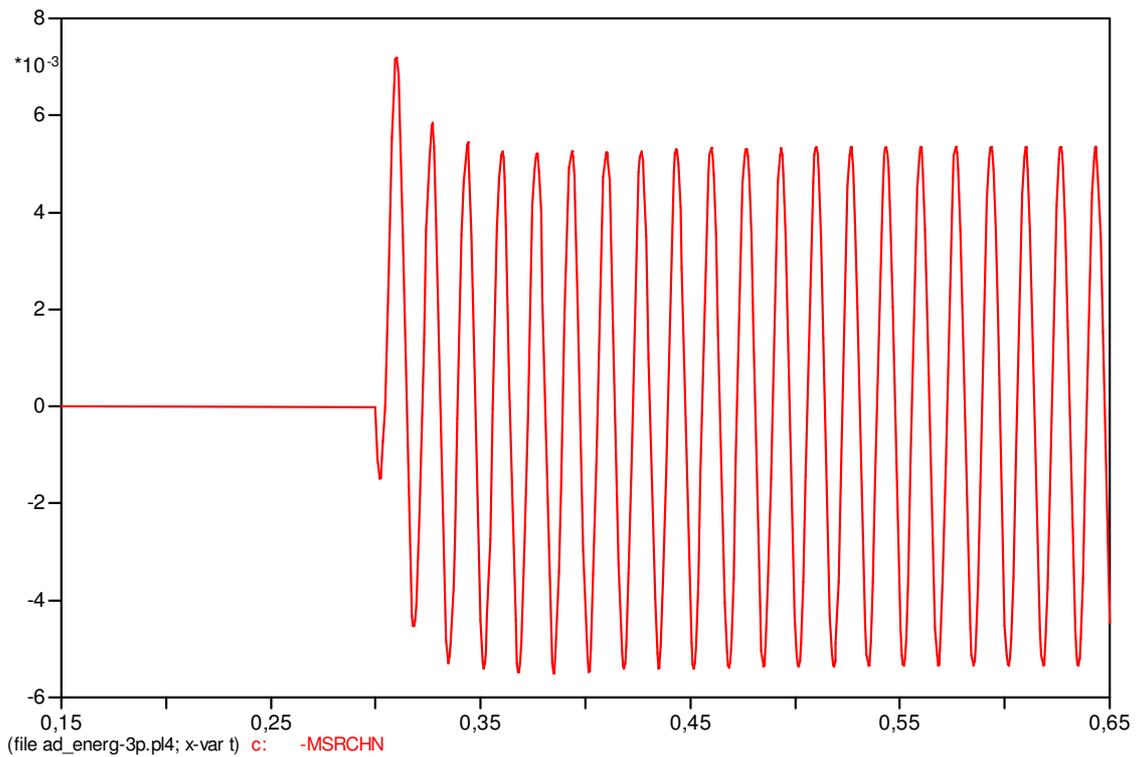


Figura 7.104 – Corrente de energização (neutro) - Modelo 1

## 7.5 SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES

A tabela apresentada a seguir, sintetiza os resultados das simulações. Para cada modelo, estão apresentados todos os casos simulados com as funções de proteção atuadas destacadas. Os casos de falhas externas e manobras foram destacados em vermelho na tabela.

Tabela 7.1 – Resultados das simulações do Modelo 1

MODELO 1								
CASOS SIMULADOS	ATUAÇÕES							
	51RHV	50RHV	51FHV	50FHV	51N	50N	87F	87R
1a - FI=10% - FD=0.25	x	x	x	x		x	x	x
1b - FI=10% - FD=0.5	x	x	x	x		x	x	x
1c - FI=10% - FD=0.75	x	x	x	x		x	x	x
2a - FI=50% - FD=0.25	x	x		x		x	x	x
2b - FI=50% - FD=0.5	x	x		x		x	x	x
2c - FI=50% - FD=0.75		x		x		x	x	x
3a - FI=90% - FD=0.25	x	x		x		x	x	x
3b - FI=90% - FD=0.5						x	x	x
3c - FI=90% - FD=0.75						x	x	x
4 - FE - 1F - Barra								
5 - FE - 2F - Barra								
6 - FE - 3F - Barra								
7 - Manobra Energ.	x	x			x	x		
8 - FE - 1F - 10% LT	x				x	x		
9 - FE - 1F - 10% LT PAR								

Tabela 7.2 – Resultados das simulações do Modelo 2

MODELO 2								
CASOS SIMULADOS	ATUAÇÕES							
	51RHV	50RHV	51FHV	50FHV	51N	50N	87F	87R
1a - FI=10% - FD=0.25	x	x	x	x		x	x	x
1b - FI=10% - FD=0.5	x	x	x	x		x	x	x
1c - FI=10% - FD=0.75	x	x	x	x		x	x	x
2a - FI=50% - FD=0.25	x	x		x		x	x	x
2b - FI=50% - FD=0.5	x	x		x		x	x	x
2c - FI=50% - FD=0.75	x	x				x	x	x
3a - FI=90% - FD=0.25						x		x
3b - FI=90% - FD=0.5								x
3c - FI=90% - FD=0.75								x
4 - FE - 1F - Barra						x		
5 - FE - 2F - Barra		x				x		
6 - FE - 3F - Barra		x				x		
7 - Manobra Energ.								

## 8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A princípio o sistema de proteção de reatores shunt parece não ter grande complexidade, pois, comumente, é composto por relés de sobrecorrente e diferenciais percentuais de fase, entretanto conforme verificado neste trabalho as suas aplicações requerem cuidados especiais, até por que, o desempenho insatisfatório destas proteções pode afetar a segurança operativa do SIN e até mesmo trazer prejuízos financeiros para o agente proprietário do reator, como perda de receita através de descontos de PV.

Desta forma para analisar e aprimorar a filosofia de proteção de reatores shunt e os procedimentos usuais para determinação dos seus ajustes foi modelado dois sistemas considerando dois modelos de reatores comumente encontrados no SIN, um com o neutro solidamente aterrado e o outro com o neutro aterrado através de resistor e reator de aterramento. Também foram reproduzidos os sistemas de proteção destes equipamentos, utilizando um ambiente híbrido de simulação computacional, através do ATPIntegrate, no qual os “motores” das ferramentas ATP e MATLAB/ SIMULINK são empregados, de forma simultânea e sincronizada.

A utilização desta ferramenta adicionou agilidade nas simulações, pois a visualização das atuações das proteções dos reatores acontecia simultaneamente com as simulações dos eventos no sistema, além de permitir, de forma simples, a utilização de modelos específicos de bibliotecas especializadas em sistemas elétricos de potência, oferecidas no ATP, integrados com modelos de bibliotecas especializadas em controle, condicionamento e processamento de sinais, oferecidas no MATLAB/ SIMULINK.

Foram simulados os eventos correspondentes a falhas internas, externas além de manobras no sistema. Para a simulação de falhas internas foi necessário utilizar um modelo de reator adequado para este tipo de simulação, que considera o acoplamento eletromagnético entre as sub-bobinas formadas durante o defeito. A maior dificuldade encontrada para a utilização deste modelo foi a necessidade de se obter o chamado fator de dispersão - FD, que depende da geometria dos enrolamentos e das dimensões físicas do núcleo do reator. Em função da ausência destes dados, foram considerados valores entre zero e um, sendo realizadas simulações considerando  $FD = 0,25, 0,5$  e  $0,75$ , a fim de indicar se a influencia do mesmo nas correntes que circulam no reator durante uma falha interna, é considerável para o sistema de proteção do reator.

A pós a análise das simulações, conclui-se: que o conhecimento e a aplicação do FD no referido modelo de reator é importante para a obtenção de resultados mais precisos, principalmente para análise de desempenho das proteções quando de falhas próximas ao neutro do reator, do tipo aterrado solidamente. Também foi observado que quanto menor o FD maiores serão as correntes de contribuição para falhas internas.

E finalmente, quanto aos aspectos de proteção, a partir da análise dos resultados das simulações foi possível tirar as seguintes conclusões gerais:

Primeiramente, foi observado que os resultados das simulações refletem problemas verificados na prática, e que através apenas de ferramentas computacionais, foi possível identificá-los. Isso, além de ratificar a necessidade de estudos especiais para a definição dos ajustes das proteções dos reatores, se reflete como uma alternativa, mais simples e de menor custo, aos tradicionais testes utilizando-se caixas de teste e relés ou até mesmo aos simuladores como o Real Time Digital Simulator – RTDS.

Foi verificado que, com os ajustes implementados, para os dois modelos, a única proteção que atuou para todas as falhas internas sem atuação incorreta durante manobras ou falhas externas foi a proteção diferencial de terra restrita, sendo recomendável a sua utilização em todos os reatores de alta tensão, independentemente da sua aplicação.

Foi observado que em todos os casos de falhas internas para o Modelo1 e nos casos de falhas internas próximas à bucha do reator para o Modelo 2, houve bloqueio por presença de harmônicos, em função de saturação de TCs, em pelo menos alguns ciclos. Este bloqueio prejudica o desempenho da proteção diferencial para eliminação de falhas internas. Como nos casos simulados, não houve a atuação das proteções diferenciais para falhas externas ou manobras, o ajuste de bloqueio por harmônicos pode ser reavaliado após análise harmônica das correntes de curto-circuito obtidas.

A partir do item 7.4, onde foi analisada a corrente de inrush da energização do reator do Modelo1, foi verificado que para efeito da proteção diferencial apenas o relé diferencial de fase, onde a amplitude das correntes foi considerável, pode ser afetado. Pois durante a energização o elevado nível DC destas correntes pode provocar respostas diferentes dos TCs que compõem a malha diferencial de fase, ocasionando atuação incorreta desta proteção, logo para este relé é importante a utilização da função de bloqueio por harmônico. Entretanto, para o relé diferencial de terra restrita que utiliza

apenas corrente residual, cuja amplitude é bem pequena nestas condições, a função de bloqueio por harmônicos deve ser dispensável. Isto melhora o seu desempenho na eliminação de falhas internas.

Em todos os casos simulados de falhas internas, tanto para o Modelo 1 quanto para o Modelo 2, o relé diferencial de terra restrita sem bloqueio por harmônicos atuou imediatamente após a falha.

Para os dois modelos, com os ajustes implementados visando a sua não atuação para falhas na barra em tempo inferior a 1,5 s, não se verificou a atuação da proteção de sobrecorrente de neutro temporizada 51N para falhas internas nos tempos de simulação praticados.

A se considerar que as simulações foram executadas para reatores com características e aplicações distintas:

- Reator de 500 kV aterrado solidamente e conectado a Linha de Transmissão submetida aos efeitos de indução mútua de Linhas paralelas.
- Reator de 345 kV aterrado através de Reator e Resistor de aterramento, em Linha de interligação entre subsistemas, caracterizada por ângulos elevados de fechamento de paralelismo.

Assim foram obtidas conclusões particulares para cada tipo de reator:

#### **a) Para Reatores solidamente aterrados – Modelo 1**

As proteções de sobrecorrente instaladas nos TC do lado de alta tensão dos reatores, tanto as de fase quanto as residuais, perdem a sensibilidade para as falhas próximas ao neutro do reator.

Foram observados vários casos de saturação de TC quando de falhas internas ao reator, o que pode provocar a atuação da função de bloqueio das proteções diferenciais, bloqueando-as para falhas internas e diminuição da sensibilidade das funções de sobrecorrente de neutro. Desta forma, nestes tipos de arranjos, com neutro solidamente

aterrado, deve-se ter maior cuidado na definição das características dos TCs (classe de exatidão e relações de transformação), tanto os de fase quanto o de neutro. Relações mais baixas aumentam a sensibilidade das proteções. Entretanto aumenta a probabilidade de saturação para falhas internas. Relações mais elevadas diminuem a probabilidade de saturação dos TCs. Entretanto diminuem também a sensibilidade das proteções.

Ainda em função da alta probabilidade de saturação dos TCs para falhas internas neste tipo de arranjo, ressalta-se a necessidade de cautela na utilização do método do bloqueio por harmônicos das proteções diferenciais, pois embora aumente a segurança das proteções diminui a “dependabilidade” para falhas internas.

Nos casos 4 e 5, foi verificada saturação do TC de neutro para falhas externas, nestes casos, se a proteção diferencial de terra restrita estivesse utilizando a corrente residual obtida dos TC de fase do lado da bucha do reator, juntamente com a corrente de neutro, opção apresentada por fabricantes de relés, poderia ocorrer atuações incorretas da mesma para falhas externas. Desta forma, é mais seguro, nestes tipos de reatores, a utilização da proteção de terra restrita conectada nos TCs de fase que possuem a mesma relação de transformação. Este detalhe deve ser previsto no projeto do reator.

No caso 7, foram verificadas as atuações das proteções de sobrecorrente de neutro e residuais, incorretamente, durante manobra de normalização do circuito. Estas atuações foram provocadas por uma sobrecorrente sustentada no neutro do reator shunt, que aparece mesmo com a linha de transmissão desenergizada, bastando que os circuitos paralelos estejam em operação. Isto ocorre em função do acoplamento mútuo existente entre os circuitos paralelos. A atuação incorreta destas funções impede a recomposição do circuito, imputando uma restrição operativa ao sistema elétrico. Nestes casos, é necessário desativar as proteções de sobrecorrente de neutro e residuais para evitar suas atuações incorretas, implicando na necessidade de utilização de proteção diferencial de terra restrita.

No caso 8, foram verificadas as atuações das proteções de sobrecorrente de neutro e residuais, incorretamente, após eliminação de defeito na linha de transmissão, provocadas por sobrecorrente sustentada no neutro do reator. Embora estas atuações não provoquem desligamentos adicionais à perturbação no sistema, as mesmas atuam sobre relé de bloqueio, o que demanda uma inspeção no reator, atrasando o processo de

recomposição da linha de transmissão.

## **b) Para Reatores aterrados através de Reator e Resistor de aterramento - Modelo 2**

Não houve atuação da proteção diferencial de fase para casos de falhas internas próximas ao neutro do reator. Desta forma, como a sensibilidade da proteção diferencial diminui à medida que a falha se aproxima do neutro, agravada nestes casos quando são utilizados resistor e reator de aterramento, é recomendável a utilização de proteção diferencial de terra restrita nestes tipos de reatores.

As proteções de sobrecorrente de fase são mais sensíveis para faltas próximas á bucha do reator, sendo observado no caso 2c a sua não atuação para uma falha a 50 % do reator, indicando que esta característica é agravada em reatores aterrados com resistor e reator de aterramento.

Também foi verificado que a aplicação da proteção de sobrecorrente de neutro e residual nestes tipos de arranjos é limitada, em função das baixas correntes de curto-circuito para falhas internas próximas ao neutro do mesmo, não ocorrendo a sua atuação quando se esperava maior eficiência das mesmas. Ressalta-se que o aumento da sensibilidade dessa proteção implica em risco de atuações incorretas da mesma, para falhas externas ou manobras no sistema, o que só poderia ser corrigido através do aumento de sua temporização. Desta forma, reforça-se a necessidade de utilização da proteção diferencial de terra restrita neste caso.

Mesmo com sensibilidade insuficiente para cobrir falhas em 100 % do reator, foram verificadas atuações das unidades instantâneas de sobrecorrente de neutro e residual para falhas externas. Desta forma, para se evitar este problema seria necessário a redução da sensibilidade das mesmas, o que reduziria mais ainda a efetividade destas funções. Desta forma, o mais seguro é a não utilização de unidades instantâneas nestes casos.

Enfim, como sugestão para estudos futuros, propõe-se a modelagem da proteção de distância e de sobrecorrente direcional, considerando inclusive as lógicas de teleproteção, para que se possa avaliar o desempenho de sistemas de proteção de linhas

de transmissão, com características diversas, de uma forma bem ampla, utilizando apenas o ambiente computacional.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ONS, **Relatório de Análise de Perturbação do dia 10/11/2009 às 22h13min envolvendo o desligamento dos três circuitos da LT 765 kV Itaberá - Ivaiporã**, Disponível em:

[http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/conselhos\\_comite/CMSE/2010/Anexo\\_2\\_-\\_Relatxrio\\_de\\_Anxlise\\_da\\_Perturbaxo\\_-\\_RAP\\_xONS-RE-3-252-2009x.pdf](http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/conselhos_comite/CMSE/2010/Anexo_2_-_Relatxrio_de_Anxlise_da_Perturbaxo_-_RAP_xONS-RE-3-252-2009x.pdf). Acesso em: 29 Jul. 2011, 17:08.

[2] GUZMÁN, A., ALTUVE, H., **Performance Analysis of Traditional and Improved Transformer Differential Protective Relays**, Schweitzer Engineering Laboratories, Pullman, Washington, 2000.

[3] IEEE Power Systems Relaying Committee, **IEEE Guide for the Protection of Shunt Reactors**, ANSI/IEEE C37.109-1988.

[4] ZORAN G., BIRGER H., FAHRUDIN M., **HV Shunt Reactor Secrets For Protection Engineers**, 30th Western Protective Relaying Conference, Spokane, Washington, USA, October 2003.

[5] AREVA T&D, **Shunt Reactors in Power Systems**, Disponível em: [http://www.arevausitr.com/pdf/TECH%20NEWS\\_SHUNT\\_71665.pdf](http://www.arevausitr.com/pdf/TECH%20NEWS_SHUNT_71665.pdf). Acesso em: 15 Ago. 2011, 18:05.

[6] FERNANDES JÚNIOR, J. C., **Comissionamento de Reator de Barra de 500 KV na Subestação Fortaleza II da Chesf**, Universidade Federal do Ceará – UFC, Dezembro 2010.

[7] NBR 6856/92, **Transformador de Corrente – Especificação**, Rio de Janeiro, Abril 1992.

[8] ONS, **Procedimentos de Rede Submódulo 23.3 - Diretrizes e critérios para estudos elétricos**.

[9] ONS, **Procedimentos de Rede Submódulo 2.6 - Requisitos mínimos para os sistemas de proteção e de telecomunicações**.

[10] P. BASTARD, P. BERTRAND, M. MEUNIER, **A Transformer Model For Winding Fault Studies**, IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 9. No. 2, April 1994.

[11] KEZUNOVIC M., GUO Y., **Modeling and Simulation of the Power Transformer Faults and Related Protective Relay Behavior**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, Janeiro 2000, pp. 44-50.

[12] WORKING GROUP C-5 OF THE IEEE PSRC, **Mathematical Models for Current, Voltage, and Coupling Capacitor Voltage Transformers**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, Janeiro 2000, pp. 62-72.

[13] SALLES, N. J., **Modelagem e Análise Dinâmica de Sistemas de Proteção de Redes de Distribuição de Energia Elétrica na Presença de Geradores Síncronos**, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

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

[15] ZOCHOLL, S.E., GUZMÁN, A., DAQING, H., **Transformer Modeling as Applied to Differential Protection**, 22nd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, USA, October 24-26, 1995.

[16] SEL- SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, **SEL-387A Relay Current Differential**, Instruction Manual, Date Code 20100324.

[17] DUARTE, A.C.R., ALVES, T.M.T.S., BARROS, H.M., LIMA R.C., SILVA FILHO, J.E., **Estudo de Eventos de Manobras e Falhas Internas e Externas em Reatores Shunt de Linhas de Transmissão Utilizando o Programa ATP para Verificação do Comportamento de suas Proteções**, IX STPC, Belo Horizonte, MG, Brasil, Junho de 2008.

[18] ENGELHARDT, K.H., **EHV Shunt Reactor Protection - Application and Experience**, Western Relay Conference, Spokane, Washington, USA, February 13, 1984.