

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**USO DO RTDS EM TESTES DE ESQUEMAS DE
TELEPROTEÇÃO APLICANDO O PADRÃO IEC 61850**

CARLOS ALBERTO VILLEGAS GUERRERO

Itajubá, Outubro de 2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CARLOS ALBERTO VILLEGAS GUERRERO

**USO DO RTDS EM TESTES DE ESQUEMAS DE
TELEPROTEÇÃO APLICANDO O PADRÃO IEC 61850**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. PAULO MÁRCIO DA SILVEIRA
Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

**Outubro de 2011
Itajubá – MG**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

V732u

Villegas Guerrero, Carlos Alberto

Uso do RTDS em testes de esquemas de teleproteção aplican_
do o Padrão IEC 61850/ Carlos Alberto Villegas Guerrero. --
Itajubá, (MG) : [s.n.], 2011.

157 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Márcio da Silveira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Esquemas de teleproteção. 2. RTDS. 3. GOOSE. 4. IEC
61850. I. Silveira, Paulo Márcio da, orient. II. Universidade
Federal de Itajubá. III. Título.



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

A N E X O II

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da **“Uso do RTDS em Testes de Esquemas de**
Dissertação: **Teleproteção aplicando o Padrão IEC 61850”**

Autor: **Carlos Alberto Villegas Guerrero**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
	A = Aprovado - R = Reprovado - I = Insuficiente	
1º	A	
2º	A	
3º	A	
4º	A	

Observações:

- (1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
- (2) O Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
- (3) O Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.

Este documento terá a validade de 60 (sessenta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.

Resultado Final: Conceito: A, ou seja, Aprovado

Observações: _____

Itajubá, 07 de Outubro de 2011.

Prof. Dr. Kleber Melo e Silva
1º Examinador - UNB

Prof. Dr. Thiago Clé de Oliveira
3º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. Ronaldo Rossi
2º Examinador - UNESP-FEG

Prof. Dr. Paulo Márcio da Silveira
4º Examinador (Orientador) - UNIFEI

Dedicatória

Dedico este trabalho com carinho a toda minha família, em especial aos meus pais, Alberto e Esperanza e meus irmãos Viviana, Joseph e Anizia.

Com muito amor para Laura, e a nossa filha Mía Valentina. Deus sempre abençoará nossas vidas.

Agradecimentos

Deus, por estar sempre no meu coração e orientar minhas decisões nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, Alberto e Esperanza, pelo amor, ensinamentos e apoio incondicional na realização dos meus sonhos.

A todos meus familiares, em especial a minha tia Martha, pelo incentivo e os conselhos ao longo desta caminhada.

À família Cabrera Cansióng, pela confiança, preocupação e apoio mesmo com a distância.

A minha esposa Laura, pelo amor e companheirismo incondicional, por ter acreditado em mim em todo momento e decidir caminhar juntos nesta luta por conseguir um melhor futuro para nossas vidas.

Ao professor Dr. Paulo Márcio da Silveira, pela orientação deste trabalho de dissertação. Obrigado também pela confiança, os ensinamentos, as oportunidades e especialmente por nossa amizade sincera.

À Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, pelo ensino de qualidade.

Aos professores e colegas do Grupo de Estudos da Qualidade da Energia Elétrica – GQEE, pelo companheirismo e torcida.

Ao meu amigo Guilherme Ramalho por compartilhar seus conhecimentos de telecomunicações e contribuir significativamente no desenvolvimento e redação deste trabalho de dissertação.

Ao meu amigo Aurélio Magalhães pela parceria em todo momento, seus conselhos e contribuição na edição final do texto.

À CAPES e ao GQEE, pelo apoio financeiro concedido.

À FAPEMIG, sem a qual não seria possível a aquisição do RTDS.

Resumo

Este trabalho de dissertação propõe dois circuitos de teste para esquemas de teleproteção DCB (*Directional Comparison Blocking*) utilizando o Simulador Digital em Tempo Real (RTDS – *Real Time Digital Simulator*). A metodologia aplicada é baseada na modelagem de esquemas de controle, que ao serem operados em tempo real, podem interagir com os esquemas lógicos de teleproteção dos relés utilizados.

Cada circuito de teste propõe técnicas diferentes de funcionamento. O primeiro emprega nas interfaces do esquema de teleproteção, as típicas entradas e saídas binárias dos dispositivos envolvidos. O segundo implementa as mesmas interfaces através da configuração de mensagens GOOSE, aplicando os aspectos relevantes do padrão IEC 61850. Ambos os circuitos são avaliados em tempo real através de simulações no módulo *RunTime* do programa RSCAD, o software do RTDS. Vários tipos de faltas são aplicados com o intuito de verificar o desempenho do esquema de teleproteção.

A comparação dos resultados obtidos nos testes aplicando interface convencional e GOOSE mostrará o impacto do padrão IEC 61850 nos esquemas de teleproteção.

Palavras-chave: Esquemas de Teleproteção; RTDS; GOOSE; IEC 61850

Abstract

This dissertation work introduces two test circuits for Directional Comparison Blocking (DCB) teleprotection schemes using the Real Time Digital Simulator (RTDS). The applied methodology is based on modeled control schemes, which interact with the teleprotection logics of relays at the same instant they are being operated in real time.

Each test circuit proposes two different implementation techniques. The former uses typical binary inputs and output contacts interfaces between the protective relay and the teleprotection equipment. The latter uses GOOSE messages based interfaces according to the relevant aspects of IEC 61850 standard. Both circuits are tested in real time from RunTime tool of RSCAD program, the RTDS software. Several fault types are simulated in order to check the performance of the teleprotection scheme.

A comparison between the performance of conventional and GOOSE interfaces will show the impact of IEC 61850 standard in teleprotection schemes.

Keywords: Teleprotection Schemes; RTDS; GOOSE; IEC 61850

Sumário

	Pág.
Dedicatória.....	iv
Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vi
Abstract.....	vii
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xvii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Unidades.....	xix
<u>CAPÍTULO 1</u>	
1. Introdução.....	1
1.1 Considerações Iniciais.....	2
1.2 Levantamento Histórico.....	2
1.3 Abordagem Principal e Objetivos.....	6
1.4 Estrutura da Dissertação.....	6
<u>CAPÍTULO 2</u>	
2. Teleproteção Baseada em Sinalização.....	9
2.1 Considerações Iniciais.....	10
2.2 Esquemas de Teleproteção por Sinalização.....	10
2.2.1 Transferência Direta de Disparo por Subalcance.....	11
2.2.2 Transferência Permissiva de Disparo por Subalcance.....	12
2.2.3 Transferência Permissiva de Disparo por Sobrealcance.....	14
2.2.4 Aceleração da Zona.....	15
2.2.5 Comparação Direcional por Bloqueio.....	16
2.2.6 Comparação Direcional por Desbloqueio.....	17
2.3 Estrutura do Esquema de Teleproteção.....	19
2.3.1 Sistema de Telecomunicação.....	20
2.3.1.1 Meios de Transmissão.....	21
2.3.1.2 Requisitos do Sistema de Telecomunicação.....	21
2.3.2 Sistema de Teleproteção.....	23
2.3.2.1 Equipamento de Teleproteção.....	24

2.3.2.2 Interfaces de Teleproteção.....	24
2.3.2.3 Tempo de Operação da Teleproteção (T_A).....	26
2.3.3 Desempenho dos Esquemas de Teleproteção.....	27
2.4 Análise Comparativa dos Esquemas de Teleproteção.....	28
2.5 Considerações Finais.....	30

CAPÍTULO 3

3. Padrão IEC 61850.....	31
3.1 Considerações Iniciais.....	32
3.2 Objetivo e Estrutura do Padrão IEC 61850.....	32
3.3 Principais Aspectos do Padrão IEC 61850.....	33
3.3.1 Alocação de Funções e Designação das Interfaces de Comunicação.....	33
3.3.2 Os Nós Lógicos e sua Aplicação.....	35
3.3.3 Modelos de Informação.....	39
3.3.4 Modelos de Serviços.....	42
3.3.4.1 Interface <i>peer-to-peer</i>	42
3.3.5 Requisitos de Tempo.....	43
3.3.5.1 Tempo de Transferência das Mensagens	43
3.3.5.2 Tipos de Mensagens.....	46
3.3.6 Mensagens GOOSE.....	48
3.4 Considerações Finais.....	52

CAPÍTULO 4

4. Simulador Digital em Tempo Real – RTDS.....	53
4.1 Considerações Iniciais.....	54
4.2 RTDS.....	54
4.2.1 Hardware do RTDS.....	54
4.2.2 Software do RTDS.....	58
4.2.2.1 RSCAD.....	58
4.2.2.2 Módulo RSCAD/ <i>CBuilder</i>	61
4.2.3 Operação do RTDS.....	62
4.2.4 Teste de Malha Fechada.....	64
4.2.4.1 Esquema Convencional para Teste de Malha Fechada Usando o RTDS.....	65

4.2.4.2 Esquema Moderno para Teste de Malha Fechada Usando o RTDS.....	66
4.3 Considerações Finais.....	67
<u>CAPÍTULO 5</u>	
5. Modelagem e Implementação no RTDS.....	68
5.1 Considerações Iniciais.....	69
5.2 Sistema de Potência Modelado.....	69
5.2.1 Fontes Equivalentes.....	71
5.2.1.1 Condições Operativas.....	71
5.2.2 Linhas de Transmissão.....	71
5.3 Circuitos de Controle Modelados.....	73
5.3.1 Circuito de Controle de Falta.....	74
5.3.2 Estimativa da Impedância Vista pelos Relés.....	75
5.3.2.1 Novos Componentes de Controle para Cálculo de Fasores.....	76
5.3.2.2 <i>Loops</i> de Falta para Estimativa da Impedância.....	79
5.3.3 Circuitos de Interface Digital.....	80
5.3.3.1 Interface Convencional.....	81
5.3.3.2 Interface via Mensagens GOOSE.....	84
5.3.4 Sistema de Teleproteção.....	90
5.3.4.1 Circuito de Teleproteção para Interface Convencional.....	90
5.3.4.2 Circuito de Teleproteção para Interface via Mensagens GOOSE.....	92
5.3.5 Interface de Sinais Analógicos.....	93
5.4 Implementação do <i>Hardware-in-the-Loop</i>	94
5.5 Considerações Finais.....	96
<u>CAPÍTULO 6</u>	
6. Resultados.....	98
6.1 Considerações Iniciais.....	99
6.2 Ajustes do Relé SEL 421.....	99
6.2.1 Esquema Lógico DCB.....	99
6.2.1.1 Tempo de Coordenação.....	99
6.2.1.2 Funções de Partida da Transmissão do Sinal de Bloqueio.....	101
6.2.1.3 Extensão do Sinal de Bloqueio.....	102
6.2.1.4 Funções de Parada da Transmissão do Sinal de Bloqueio.....	102

6.2.2 Ajustes das Funções de Proteção.....	103
6.2.2.1 Funções de Proteção de Distância (M1P, Z1G, M2P, Z2G, M3P e Z3G).....	103
6.2.2.2 Funções de Proteção de Sobrecorrente.....	105
6.2.2.3 Funções de proteção direcional de sobrecorrente residual (67G2 e 67G3).....	108
6.2.3 Representação Percentual dos Alcances das Funções de Proteção Utilizadas.....	108
6.3 Resultados dos Testes para o Esquema de Teleproteção com Interface Convencional.....	109
6.3.1 Resultados Obtidos para Falhas do Tipo Fase-Terra.....	110
6.3.1.1 Falta AN a 50% da LT principal.....	110
6.3.1.2 Falta AN a 0% da LT principal.....	113
6.3.1.3 Falta AN a -10% da LT principal (reversa).....	115
6.3.1.4 Falta AN a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação).....	118
6.3.2 Resultados Obtidos para Falhas entre Fases.....	120
6.3.2.1 Falta AB a 50% da LT principal.....	120
6.3.2.2 Falta Trifásica a 0% da LT principal.....	122
6.3.2.3 Falta BC a -10% da LT principal (reversa).....	125
6.3.2.4 Falta BC a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação).....	127
6.4 Comparação de Resultados entre o Esquema com Interface Convencional e o Esquema com Interface via Mensagens GOOSE.....	129
6.4.1 Comparação de Resultados para Falta Fase-Terra em Zona Reversa.....	129
6.4.2 Comparação de Resultados para Falta Fase-Fase em Zona Reversa.....	133
6.5 Considerações Finais.....	136
<u>CAPÍTULO 7</u>	
7. Conclusões.....	137
7.1 Conclusões Gerais.....	138
7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	139
Referências Bibliográficas.....	141

Apêndice.....	145
Apêndice A – Registros Sequenciais de Eventos dos Relés – Testes com Interface Convencional.....	146
Apêndice B – Relatórios Gráficos de Eventos dos Relés – Testes com Interface GOOSE.....	150

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 2.1: Esquema de Transferência Direta de Disparo por Subalcance.....	11
Figura 2.2: Esquema de Transferência Permissiva de Disparo por Subalcance.....	13
Figura 2.3: Esquema de Transferência Permissiva de Disparo por Sobrealcance.....	14
Figura 2.4: Esquema de Aceleração de Zona.....	15
Figura 2.5: Esquema de Comparação Direcional por Bloqueio.....	16
Figura 2.6: Esquema de Comparação Direcional por Desbloqueio.....	18
Figura 2.7: Estrutura geral de um esquema de teleproteção.....	19
Figura 2.8(a): Esquema de teleproteção com canal de comunicação dedicado.....	20
Figura 2.8(b): Esquema de teleproteção com canal de comunicação multiplexado.....	20
Figura 2.9: Valores típicos de tempos de operação para sistemas de teleproteção.....	26
Figura 3.1: Níveis e interfaces lógicas de um SAS e entre subestações.....	33
Figura 3.2: Interação dos nós lógicos.....	35
Figura 3.3: Estrutura do nó lógico XCBR (imagem virtual de um disjuntor).....	36
Figura 3.4: Estrutura genérica – Relação de Nós Lógicos de um IED.....	37
Figura 3.5: Dados do nó lógico de Teleproteção – PSCH.....	38
Figura 3.6: Dados do nó lógico de Proteção de Sobrecorrente – PIOC.....	40
Figura 3.7: Atributos do dado “Op” do nó lógico PIOC.....	40
Figura 3.8: Exemplo de árvore hierárquica implementada num IED.....	41
Figura 3.9: Métodos de Comunicação ACSI.....	42
Figura 3.10(a): Modelo de comunicação <i>peer-to-peer</i> para mensagens GOOSE.....	43
Figura 3.10(b): Modelo de comunicação <i>peer-to-peer</i> para valores amostrados.....	43
Figura 3.11: Tempo de transferência sobre comunicação serial.....	44
Figura 3.12: Tempo de transferência com interface convencional.....	44
Figura 3.13: Tempo de transferência com interface convencional – Esquema de Teleproteção.....	45
Figura 3.14: Mapeamento das mensagens GOOSE.....	49
Figura 3.15: Transmissão <i>multicast</i> de uma mensagem GOOSE.....	50
Figura 3.16: Tempo de transmissão de uma mensagem GOOSE.....	50
Figura 3.17: Inserção da VLAN dentro do quadro <i>ethernet</i>	51
Figura 4.1: Modelos típicos do RTDS.....	55
Figura 4.2: Estrutura do Hardware do RTDS.....	56
Figura 4.3: Módulos do RSCAD.....	58

Figura 4.4:	Tela do Módulo RSCAD/ <i>Draft</i>	59
Figura 4.5:	Tela do Módulo RSCAD/ <i>T-Line</i>	60
Figura 4.6:	Tela do Módulo RSCAD/ <i>RunTime</i>	61
Figura 4.7:	Tela do Módulo RSCAD/ <i>CBuilder</i>	62
Figura 4.8:	Esquema de operação do RTDS.....	63
Figura 4.9:	Esquema de teste de malha fechada.....	64
Figura 4.10:	Esquema de teste de malha fechada convencional.....	65
Figura 4.11:	Esquema de teste de malha fechada moderno.....	66
Figura 5.1:	Sistema de Potência Modelado.....	69
Figura 5.2:	Sistema de Potência modelado no módulo <i>Draft</i> do RSCAD.....	70
Figura 5.3:	Configuração da linha de transmissão.....	72
Figura 5.4:	Circuito de controle de falta.....	74
Figura 5.5:	Componente para cálculo de fasores dos sinais de tensão e corrente.....	76
Figura 5.6:	Componente para cálculo de fasores das componentes simétricas.....	77
Figura 5.7:	Gráficos dos fasores de tensão e corrente modelados no RSCAD/ <i>RunTime</i>	78
Figura 5.8:	Loops de falta implementados no RSCAD/ <i>Draft</i>	79
Figura 5.9:	Plano R-X criado no RSCAD/ <i>RunTime</i> para o loop de falta AN.....	80
Figura 5.10:	Estrutura geral de teleproteção implementada através do RTDS.....	81
Figura 5.11:	Esquema de interface convencional.....	82
Figura 5.12:	Circuito de controle para uso dos enlaces físicos no RSCAD/ <i>Draft</i>	83
Figura 5.13:	Esquema de interface via GOOSE.....	85
Figura 5.14:	Tela do <i>AcSELErator Architect</i> para configuração das mensagens GOOSE.....	86
Figura 5.15:	Tela do <i>SCD-Editor</i> para configuração das mensagens GOOSE.....	87
Figura 5.16:	Circuito de controle para uso dos enlaces virtuais no RSCAD/ <i>Draft</i>	89
Figura 5.17:	Circuito que representa a transmissão do sinal de bloqueio com interface convencional.....	90
Figura 5.18:	Circuito que representa a transmissão do sinal de bloqueio com interface GOOSE.....	92
Figura 5.19:	Modelagem do componente GTA0 de interface D/A.....	94
Figura 5.20:	<i>Hardware-in-the-loop</i> do caso teste.....	95
Figura 5.21:	Implementação real do <i>Hardware-in-the-loop</i> do caso teste.....	96
Figura 6.1:	Esquema lógico DCB do relé SEL-421.....	100
Figura 6.2(a):	Características quadrilaterais ajustadas no relé SEL-421.....	103
Figura 6.2(b):	Características MHO ajustadas no relé SEL-421.....	104
Figura 6.3(a):	Representação percentual dos alcances das funções de proteção de terra.....	108
Figura 6.3(b):	Representação percentual dos alcances das funções de proteção de fase.....	109

Figura 6.4(a):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta AN a 50% da LT principal.....	110
Figura 6.4(b):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta AN a 50% da LT principal.....	111
Figura 6.5(a):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta AN a 0% da LT principal.....	113
Figura 6.5(b):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta AN a 0% da LT principal.....	113
Figura 6.6(a):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta AN a -10% da LT principal.....	116
Figura 6.6(b):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta AN a -10% da LT principal.....	116
Figura 6.7(a):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta AN a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação).....	119
Figura 6.7(b):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta AN a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação).....	119
Figura 6.8(a):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta AB a 50% da LT principal.....	120
Figura 6.8(b):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta AB a 50% da LT principal.....	121
Figura 6.9(a):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta ABC a 0% da LT principal.....	123
Figura 6.9(b):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta ABC a 0% da LT principal.....	123
Figura 6.10(a):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta BC a -10% da LT principal.....	125
Figura 6.10(b):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta BC a -10% da LT principal.....	125
Figura 6.11(a):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta BC a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação).....	128
Figura 6.11(b):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta BC a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação).....	128
Figura B.1(a):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta AN a 50% da LT principal.....	150
Figura B.1(b):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta AN a 50% da LT principal.....	150

Figura B.2(a):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta AN a 0% da LT principal.....	151
Figura B.2(b):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta AN a 0% da LT principal.....	151
Figura B.3(a):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta AN a -10% da LT principal.....	152
Figura B.3(b):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta AN a -10% da LT principal.....	152
Figura B.4(a):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta AN a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação).....	153
Figura B.4(b):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta AN a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação).....	153
Figura B.5(a):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta AB a 50% da LT principal.....	154
Figura B.5(b):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta AB a 50% da LT principal.....	154
Figura B.6(a):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta ABC a 0% da LT principal.....	155
Figura B.6(b):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta ABC a 0% da LT principal.....	155
Figura B.7(a):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta BC a -10% da LT principal.....	156
Figura B.7(b):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta BC a -10% da LT principal.....	156
Figura B.8(a):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta BC a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação).....	157
Figura B.8(b):	Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta BC a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação).....	157

Lista de Tabelas

	Pág.
Tabela 2.1: Esquemas de Teleproteção baseada em Sinalização.....	11
Tabela 2.2: Requisitos no tempo de propagação.....	22
Tabela 2.3: Requisitos na largura de banda.....	23
Tabela 2.4: Requisitos na qualidade do sinal.....	23
Tabela 2.5: Requisitos no tempo de operação da teleproteção.....	27
Tabela 2.6: Análise comparativa dos esquemas de teleproteção.....	29
Tabela 3.1: Tipos de interfaces da estrutura de um SAS.....	34
Tabela 3.2: Categorias de Nós Lógicos.....	36
Tabela 3.3: Lista dos principais nós lógicos de proteção.....	39
Tabela 3.4: Tipos de Mensagens.....	47
Tabela 3.5: Categorização das mensagens de sincronização – Parte 1.....	47
Tabela 3.6: Categorização das mensagens de sincronização – Parte 2.....	48
Tabela 5.1: Impedâncias equivalentes das fontes de alimentação.....	71
Tabela 5.2: Condições operativas das fontes de alimentação.....	71
Tabela 5.3: Dados de configuração das linhas de transmissão.....	73
Tabela 5.4: Impedâncias de Sequência Positiva e Sequência Zero das LTs, obtidas no RSCAD/ <i>T-Line</i>	73
Tabela 5.5: Implementação física dos enlaces nos dispositivos usados.....	84
Tabela 5.6: Mensagens GOOSE parametrizadas.....	88
Tabela 6.1: Cálculo da temporização de 21SD e 67SD.....	101
Tabela 6.2: Ajustes das zonas de proteção de distância.....	104
Tabela 6.3: Ajustes das funções de sobrecorrente de fase.....	106
Tabela 6.4: Ajustes das funções de sobrecorrente residual.....	107
Tabela 6.5(a): Registros Sequenciais de Eventos (Falta Fase–Terra) – Interface Convencional.....	130
Tabela 6.5(b): Registros Sequenciais de Eventos (11° simulação) – Interface GOOSE.....	130
Tabela 6.6: Tempos de transferência medidos com interface GOOSE – Falta Fase-Terra..	131
Tabela 6.7(a): Registros Sequenciais de Eventos (Falta Fase–Fase) – Interface Convencional.....	133
Tabela 6.7(b): Registros Sequenciais de Eventos (11° simulação) – Interface GOOSE.....	133
Tabela 6.8: Tempos de transferência medidos com interface GOOSE – Falta Fase–Fase...	134
Tabela A.1: Registros Sequenciais de Eventos – Falta AN a 50% da LT principal.....	146

Tabela A.2:	Registros Sequenciais de Eventos – Falta AN a 0% da LT principal.....	146
Tabela A.3:	Registros Sequenciais de Eventos – Falta AN a -10% da LT principal.....	147
Tabela A.4:	Registros Sequenciais de Eventos – Falta AN a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação).....	147
Tabela A.5:	Registros Sequenciais de Eventos – Falta AB a 50% da LT principal.....	148
Tabela A.6:	Registros Sequenciais de Eventos – Falta ABC a 0% da LT principal.....	148
Tabela A.7:	Registros Sequenciais de Eventos – Falta BC a -10% da LT principal.....	149
Tabela A.8:	Registros Sequenciais de Eventos – Falta BC a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação).....	149

Lista de Abreviaturas, Siglas e Unidades

A/D	Conversor Analógico para Digital
AC	<i>Alternating Current</i>
ACSI	<i>Abstract Communication Service Interface</i>
BER	<i>Bit-Error-Rate</i>
bps	Bits por segundo
CID	<i>Configured IED Description</i>
cm	Centímetro - Unidade de medida de comprimento
CSMA/CD	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection</i>
D/A	Conversor Digital para Analógico
DC	<i>Direct Current</i>
DCB	<i>Directional Comparison Blocking</i>
DCUB	<i>Directional Comparison Unblocking</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
DNP	<i>Distributed Network Protocol</i>
DSP	<i>Digital Signal Processors</i>
DUTT	<i>Direct Underreach Transfer Tripping</i>
EPRI	<i>The Electric Power Research Institute</i>
F	<i>Functions</i>
FB	Unidade de medida de bloqueio
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
FZ1	Unidade de medida de subalcance
FZ1E	Unidade de medida FZ1 com alcance estendido
FZ2	Unidade de medida de sobrealcance
Gbps	Gigabits por segundo
GOOSE	<i>Generic Object Oriented Substation Event</i>
GPC	<i>Giga-Processor Card</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GTAI	<i>Gigabit Transceiver Analogue Input Card</i>
GTAO	<i>Gigabit Transceiver Analogue Output Card</i>
GTDI	<i>Gigabit Transceiver Digital Input Card</i>

GTDO	<i>Gigabit Transceiver Digital Output Card</i>
GTFPI	<i>Front Panel Interface Card</i>
GTNET	<i>Network Interface Card</i>
GTWIF	<i>WorkStation Interface Card</i>
Hz	Hertz
ICD	<i>IED Capability Description</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Comission</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IHM	Interface Homem-Máquina
IP	<i>Internet Protocol</i>
IRIG-B	<i>Inter-Range Instrumentation Group - time code B</i>
K0	Fator de compensação de sequência zero própria da LT
km	Quilômetro - Unidade de medida de comprimento
kV	Quilovolt - Unidade de medida de tensão elétrica
LAN	<i>Local Area Network</i>
LC	<i>Logical Conections</i>
LN	<i>Logical Nodes</i>
LT	Linha de Transmissão
m	Metro - Unidade de medida de comprimento
MAC	<i>The Media Access Control</i>
Mbps	Megabits por segundo
ms	Milisegundos - Unidade de medida de tempo
MVA _r	Megavoltampère reativo - Unidade de Potência Reativa
MW	Megavátio - Unidade de Potência Ativa
NTP	<i>Network Time Protocol</i>
Ohm.km	Unidade de resistividade do solo
Ohm/km	Unidade de impedância por unidade de comprimento
OPGW	<i>Optical Ground Wire</i>
PC	<i>Physical Conections</i>
PD	<i>Physical Devices</i>
PLC	<i>Power Line Carrier</i>
Pmc	<i>Probability of Missing Command</i>

POTT	<i>Permissive Overreach Transfer Tripping</i>
p.u.	Por unidade
Puc	<i>Probability of Unwanted Command</i>
PUTT	<i>Permissive Underreach Transfer Tripping</i>
R	Terminal receptor da LT principal
Rf	Terminal receptor da fonte equivalente do sistema
RTDS	<i>Real Time Digital Simulator</i>
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i>
RX	Recepção de sinal de telecomunicação
S	Terminal transmissor da LT principal
SAS	<i>Substation Automation System</i>
SCL	<i>System Configuration Language</i>
SEL	<i>Schweitzer Engineering Laboratories</i>
Sf	Terminal transmissor da fonte equivalente do sistema
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
T	Tempo de Coordenação
T _A	Tempo de operação da teleproteção
T _c	Tempo de eliminação da falta
TC	Transformador de Corrente
TC _L	Transformador de Corrente da LT
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TPC	Transformador de Potencial Capacitivo
TPC _B	Transformador de Potencial Capacitivo da Barra da Subestação
TPC _L	Transformador de Potencial Capacitivo da LT
Ts	Tempo de operação da proteção
TX	Transmissão de sinal de telecomunicação
UCA	<i>The Utility Communication Architecture</i>
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
V	Volt - Unidade de medida de tensão elétrica
VLAN	<i>Virtual Local Area Network</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
Δt	Passo de integração
μs	Microsegundos - Unidade de medida de tempo

Ω Ohm - Unidade de medida da resistência elétrica

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta um levantamento histórico sobre os principais tópicos relacionados ao tema “Uso do RTDS em testes de esquemas de teleproteção aplicando o padrão IEC 61850”, bem como a abordagem principal e os objetivos deste. No final, apresenta-se de forma geral o conteúdo de cada capítulo.

1.2 Levantamento Histórico

Com a contínua expansão dos centros urbanos e parques industriais, os sistemas elétricos interligados são uma necessidade para maior redundância de fontes a um conjunto de consumidores, entretanto as redes tornam-se cada vez mais complexas. Esta complexidade da rede acaba exigindo grandes desafios na área da proteção em termos de estabilidade e continuidade do serviço. É primordial que qualquer tipo de falta seja eliminada no menor tempo possível.

As linhas de transmissão, por percorrerem uma extensa área geográfica, estão sujeitas à maior probabilidade de ocorrência de eventos prejudiciais ao sistema elétrico de potência. Desta forma, o tempo de permanência de uma falta em uma linha de transmissão é crucial para o desempenho dos sistemas elétricos. Visando atender ao quesito ‘menor tempo possível’, a proteção de distância é considerada como uma boa solução, especialmente em linhas de transmissão que apresentam grandes comprimentos. Porém, a temporização de 20 a 30 ciclos para o trecho de segunda zona, dentro da linha protegida, poderá causar instabilidade no sistema, dependendo das condições operativas do mesmo, bem como do tipo de perturbação. O Grupo de Trabalho 34/35.11 do Cigré (2000) considera este fato a principal justificativa para o emprego de telecomunicações nos esquemas de proteção de linhas, pois assim, pode ser executado o comando de disparo entre 2 a 3 ciclos após a ocorrência da falta em qualquer ponto da linha.

Os esquemas de proteção que empregam telecomunicações são comumente conhecidos como esquemas de teleproteção. Na (IEC, 1999) definem-se três tipos de esquemas de teleproteção, quais sejam: esquema de disparo permissivo, esquema de disparo direto ou de transferência e esquema de bloqueio. A escolha por um ou outro esquema de teleproteção depende dos requisitos da aplicação, do canal de comunicação disponível e do protocolo de comunicação utilizado na subestação (APOSTOLOV, 2008).

A evolução tecnológica dos relés de proteção, desde os eletromecânicos aos relés numéricos, vem influenciando na implementação dos esquemas de proteção dentro de uma subestação. Os relés numéricos introduziram importantes funcionalidades dentro dos sistemas integrados de controle e proteção das subestações. Algumas funcionalidades se destacam, como: supervisão dos sinais de tensão e corrente dos transdutores, captura das oscilografias e registros dos eventos, comunicação serial com outros dispositivos, sincronização com uma referência global de tempo, programação de lógicas, provisão de vários grupos de ajustes, dentre outras. Com o advento dos relés numéricos, novos sistemas de automação em subestações puderam ser desenvolvidos, considerando que a automação de uma subestação é o emprego do estado da arte dos microprocessadores, comunicações e equipamentos de rede, visando aperfeiçoar as operações e facilitar a supervisão e controle remoto de forma rentável (USDA, 2001).

Kirkman (2008) ressalta que nas duas últimas décadas, devido a não interoperabilidade da comunicação e modelagem de dados, a integração do sistema de automação em uma subestação sempre foi complexa e arriscada. Assim, o usuário era frequentemente limitado a um único fabricante e o uso de conversores de protocolos sempre foi considerado essencial. Porém, a rápida disseminação da informação e comunicação e a demanda dos usuários por investimentos seguros e confiáveis, trouxeram a necessidade de padrões, interoperabilidade, confiabilidade e melhor desempenho.

Os dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs – *Intelligent Electronic Devices*), que são parte de um sistema de automação de uma subestação, passaram a fazer parte da supervisão, proteção e controle dos equipamentos de campo. Para operarem corretamente, tais dispositivos necessitam trocar informações entre si e com outros dispositivos de supervisão local e remota. Enquanto que no passado a troca de informações ocorria principalmente pela transmissão de sinais analógicos e binários por intermédio de fios, nas subestações modernas são empregadas redes de telecomunicações e comunicações de dados. Para padronizar a troca de informações e atingir a interoperabilidade entre IEDs, foi desenvolvido o padrão 61850 “*Communication Networks and Systems in Substations*” da *International Electrotechnical Commission* (IEC) (BRUNNER, 2008). Este padrão foi publicado no ano 2003 e surgiu da união de dois projetos “*The Utility Communication Architecture (UCA) 2.0*” e o “*IEC 61850*”. O primeiro projeto foi comissionado pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) e *The Electric Power Research Institute* (EPRI). O segundo projeto foi comissionado pelo Comitê Técnico 57 da IEC.

O padrão IEC 61850 permite o desenvolvimento de aplicações baseadas na comunicação *peer-to-peer* de alta velocidade. Uma destas aplicações é a troca de mensagens GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*) nos sistemas integrados de proteção e controle de uma subestação. Tais mensagens de alta prioridade permitem a substituição dos sinais binários, que tipicamente são utilizados na troca de informação entre IEDs através de fiação convencional. Diversos trabalhos foram publicados tentando mostrar através de testes as vantagens no emprego das mensagens GOOSE, quando comparadas com esquemas convencionais baseados em sinais binários. Um dos referidos trabalhos foi o publicado por Zhang e Nirmal-Kumar (2008). Aqui os autores fazem uma análise da interoperabilidade entre dois relés de fabricantes distintos, conectados a uma rede com topologia em estrela. Como resultado, obteve-se um tempo de 7ms para a mensagem GOOSE poder ir e voltar ao relé editor. Neste caso, o tempo de transmissão da mensagem deve ser calculado pela subtração do tempo de processamento do relé subscritor do tempo de 7ms, e posteriormente o valor resultante dividido por 2. Por outro lado, em (AGUILAR, 2010) é proposto um cenário de teste mais abrangente. Neste caso, foi analisada a seletividade de um sistema típico industrial, implementado com relés de vários fabricantes. Nos testes, foram analisadas as respostas de um esquema “falha de disjuntor” (*breaker failure*). Os resultados demonstraram que, o esquema de proteção implementado por mensagens GOOSE, apresenta um tempo entre 4 a 6 ms menor que o esquema tradicional, que utiliza entradas e saídas binárias dos relés. Outros trabalhos, onde o desempenho das mensagens GOOSE é analisado para casos práticos são propostos em (BRANTLEY, 2007), (APOSTOLOV, 2008) e (BONETTI, 2010).

Com o desenvolvimento e implementação de dispositivos e sistemas de automação de subestações que suportam o padrão IEC 61850, surgiu a necessidade de uma nova geração de dispositivos especializados em testes e metodologias para testes funcionais dos diferentes componentes do sistema. Uma primeira abordagem sobre este assunto se apresenta em (APOSTOLOV, 2005), no qual são descritas as novas metodologias aplicadas em testes funcionais de dispositivos baseados na norma IEC 61850. São apresentadas as semelhanças e diferenças entre a metodologia de teste convencional. Os autores ressaltam que a simulação do nível de processo e a monitoração do dispositivo sob teste, são completamente diferentes. Eles também destacam que dependendo da implementação do teste baseado na IEC 61850, a quantidade de fios tipicamente usados

nos testes convencionais, pode ser totalmente (em alguns casos parcialmente) substituída por uma única interface de comunicação.

Por outro lado Kuffel e Forsyth (2010) abordaram as vantagens de se usar um Simulador Digital em Tempo Real (RTDS – *Real Time Digital Simulator*) para a realização de testes em dispositivos que utilizam o padrão IEC 61850. A primeira vantagem apresentada por este artigo é a nova proposta de interface ao nível de processo, conforme o IEC 61850-9-2. Neste caso, o RTDS através de um novo cartão de comunicação GTNET, permite fornecer diretamente os valores amostrados das tensões e correntes requeridas pelo relé durante os testes. Deste modo, os dispositivos amplificadores e a fiação tipicamente associada ao esquema convencional de teste são totalmente substituídos por um único fio de comunicação entre o relé e o referido cartão. A segunda vantagem está relacionada com a nova proposta de interface ao nível de estação, conforme o IEC 61850-8-1. Aqui, através do mesmo cartão GTNET, o RTDS propõe uma comunicação *peer-to-peer* com os dispositivos sob teste, empregando as mensagens GOOSE. Nesta situação, tem-se um único fio de comunicação substituindo a fiação tipicamente associada aos sinais binários dos esquemas convencionais de teste.

Os testes dos esquemas de proteção desempenham um importante papel nos sistemas elétricos. Através da sua aplicação é possível garantir que as diferentes funções de proteção operem conforme estabelecido no projeto (YANG, 2010). Porém, ainda são escassos os trabalhos publicados sobre testes em esquemas de teleproteção aplicando o padrão IEC 61850. Um único artigo apresentado por Apostolov (2008) trata sobre as possíveis implementações dos esquemas de teleproteção aplicando o padrão IEC 61850. Neste trabalho, o autor salienta que, com disponibilidade de uma interface de comunicação serial nos modernos IEDs, torna-se possível implementar os esquemas de teleproteção sem necessidade de utilizar equipamentos dedicados em suas interfaces. Porém, sem a padronização da comunicação entre subestações, o protocolo empregado nesta transmissão deve ser proprietário. De acordo com a estrutura geral do esquema de teleproteção, segundo o padrão IEC 60834-1, o mesmo autor faz uma análise comparativa do tempo de transmissão entre o relé e o equipamento de teleproteção, considerando a implementação desta interface com fiação convencional e com mensagens GOOSE. Como resultado, conclui-se que existe uma melhora de 4ms em cada extremo da linha com o uso das interfaces GOOSE. Em outras palavras, tem-se um ganho de 8ms no tempo total de transmissão do sinal de teleproteção. Vale ressaltar que os testes foram desenvolvidos

usando uma caixa de teste convencional, analisando somente um extremo da linha de transmissão.

Com a publicação da parte 90-1 do IEC 61850, em março de 2010, a comunicação entre subestações passa a ser padronizada. Novas aplicações possivelmente surgirão na implementação dos esquemas de teleproteção.

1.3 Abordagem Principal e Objetivos

Este trabalho propõe dois circuitos de teste para esquemas de teleproteção DCB (*Directional comparison blocking*) utilizando o RTDS. A metodologia aplicada é baseada na modelagem de esquemas de controle, que ao serem operados em tempo real, podem interagir com os esquemas lógicos de teleproteção dos relés utilizados. Cada circuito de teste propõe técnicas diferentes de implementação. O primeiro circuito emprega nas interfaces, as típicas entradas e saídas binárias dos dispositivos envolvidos. O segundo circuito implementa as mesmas interfaces através da configuração de mensagens GOOSE, aplicando os principais aspectos do padrão IEC 61850.

O objetivo principal deste trabalho de dissertação é analisar em tempo real, o desempenho do esquema de teleproteção DCB e verificar as possíveis vantagens na aplicação do padrão IEC 61850 nos esquemas de teleproteção.

Têm-se como objetivos específicos os tópicos descritos abaixo:

- Avaliar as potencialidades do RTDS usando a maioria das suas ferramentas disponíveis.
- Avaliar as principais funções de proteção dos relés SEL-421.
- Entender os aspectos relevantes do padrão IEC 61850, necessários na aplicação prática.
- Identificar os principais aspectos da telecomunicação que um engenheiro da área de proteção precisa conhecer.

1.4 Estrutura da Dissertação

Este trabalho de dissertação está dividido em 7 capítulos, mais as referências bibliográficas e dois apêndices, a saber:

-
- No capítulo 1 são apresentados o levantamento histórico, a abordagem principal, os objetivos e estrutura da dissertação.
 - No capítulo 2 são apresentados os principais esquemas de teleproteção baseados em sinalização. Inicialmente são destacadas as características relevantes de cada esquema. Em seguida é apresentada uma análise da estrutura geral dos esquemas de teleproteção, destacando seus principais componentes e os requisitos de operação. Finalmente, este capítulo apresenta uma análise comparativa das vantagens e desvantagens de cada esquema de teleproteção.
 - No capítulo 3 são apresentados os aspectos relevantes do padrão IEC 61850, os quais são considerados na implementação do esquema de teleproteção com interfaces GOOSE.
 - No capítulo 4 é apresentado o simulador digital em tempo real (RTDS). Inicialmente é descrita a estrutura do hardware, seus principais componentes e características. Em seguida é apresentada a estrutura do software, dando maior ênfase na descrição das funcionalidades do programa RSCAD. Finalmente são apresentados os esquemas de teste de malha fechada que são aplicados através do RTDS.
 - No capítulo 5 é apresentada a modelagem e implementação dos circuitos de teste do esquema de teleproteção DCB no RTDS. São descritas duas etapas da modelagem: a primeira focada na definição do sistema de potência e a segunda na definição dos circuitos de controle. Dois esquemas de interface para teleproteção são considerados dentro da modelagem dos circuitos de controle. O primeiro esquema utiliza as típicas entradas e saídas binárias dos dispositivos envolvidos e o segundo esquema emprega as entradas e saídas virtuais de comunicação via mensagens GOOSE.
 - No capítulo 6 são mostrados e analisados os resultados obtidos dos testes no esquema de teleproteção realizados através do RTDS. Finalmente se faz uma análise comparativa entre os resultados obtidos empregando a interface convencional e resultados obtidos com interface através de mensagens GOOSE.
 - No capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões extraídas no desenvolver deste trabalho de dissertação, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

- Por fim, são listadas as referências bibliográficas utilizadas na elaboração deste texto e dois apêndices cujos conteúdos são descritos a seguir:
 - Apêndice A, Registros Sequenciais de Eventos dos Relés – Testes com Interface Convencional.
 - Apêndice B, Relatórios Gráficos de Eventos dos Relés – Testes com Interface GOOSE.

Capítulo 2

Teleproteção Baseada em Sinalização

2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta os esquemas de teleproteção por sinalização que comumente são aplicados em linhas de transmissão – LTs. Para cada esquema são descritas suas principais características operacionais. Posteriormente uma análise comparativa dessas características resumirá as vantagens e desvantagens no desempenho de cada esquema apresentado.

Na abordagem deste capítulo se analisará também a estrutura geral de um esquema de teleproteção. Aqui, pretende-se destacar seus principais componentes e os requisitos para uma adequada operação.

2.2 Esquemas de Teleproteção por Sinalização

Os Esquemas de Teleproteção por Sinalização (*Signalling*), também conhecidos como Esquemas de Comparação de Estados, são sistemas que através de telecomunicações conseguem melhorar a seletividade e o tempo de resposta dos esquemas *stand-alone* de proteção de linhas de transmissão. Seu princípio de funcionamento é baseado no uso de canais de comunicação que permitem aos relés de proteção trocar informações lógicas entre os terminais de uma linha de transmissão. Tais informações estão relacionadas com o estado das unidades direcionais dos relés.

O objetivo destes esquemas é conseguir com que os relés, em todos os terminais da linha de transmissão protegida, comparem suas respostas e determinem o sentido correto da falta. Isto permitirá acelerar a tomada de decisão do relé, tanto no bloqueio contra faltas externas como na eliminação de faltas internas em todo o comprimento da linha.

Os estados das unidades de medida ou partida dos relés de proteção de distância e sobrecorrente direcionais são usados tipicamente na implementação das lógicas de teleproteção. Cabe ressaltar que cada fabricante de relés implementa estas lógicas com ligeiras variações (ORDAGCI, 2010).

Na prática, dispõe-se de seis esquemas básicos de teleproteção, definidos de acordo com a característica da zona de impedância (subalcance ou sobrealcance) que fará a partida da transmissão do sinal no relé. A Tabela 2.1, (ORDAGCI, 2010), apresenta várias nomenclaturas comumente usadas na literatura técnica para descrição desses esquemas.

Tabela 2.1 – Esquemas de Teleproteção baseada em Sinalização

CIGRÉ	OUTROS	BRASIL (este texto)
<i>Intertripping Underreach Distance Protection</i>	<i>Direct Underreach Transfer Tripping (DUTT)</i>	Transferência Direta de Disparo por Subalcance
<i>Permissive Underreach Distance Protection</i>	<i>Permissive Underreach Transfer Tripping (PUTT)</i>	Transferência Permissiva de Disparo por Subalcance
<i>Permissive Overreach Distance Protection</i>	<i>Permissive Overreach Transfer Tripping (POTT)</i>	Transferência Permissiva de Disparo por Sobrealcance
<i>Accelerated Underreach Distance Protection</i>	<i>Zone Acceleration</i>	Aceleração de Zona
<i>Deblocking Overreach Distance Protection</i>	<i>Directional Comparison Unblocking (DCUB)</i>	Comparação Direcional por Desbloqueio
<i>Blocking Overreach Distance Protection</i>	<i>Directional Comparison Blocking (DCB)</i>	Comparação Direcional por Bloqueio

2.2.1 Transferência Direta de Disparo por Subalcance

A lógica do esquema de Transferência Direta de Disparo por Subalcance é mostrada na Figura 2.1. Observa-se que esta lógica utiliza uma unidade de medida de subalcance FZ1 em cada terminal da LT e apresenta uma interface de telecomunicação com duas funcionalidades de transmissão (TX1 e TX2) e duas funcionalidades de recepção (RX1 e RX2).

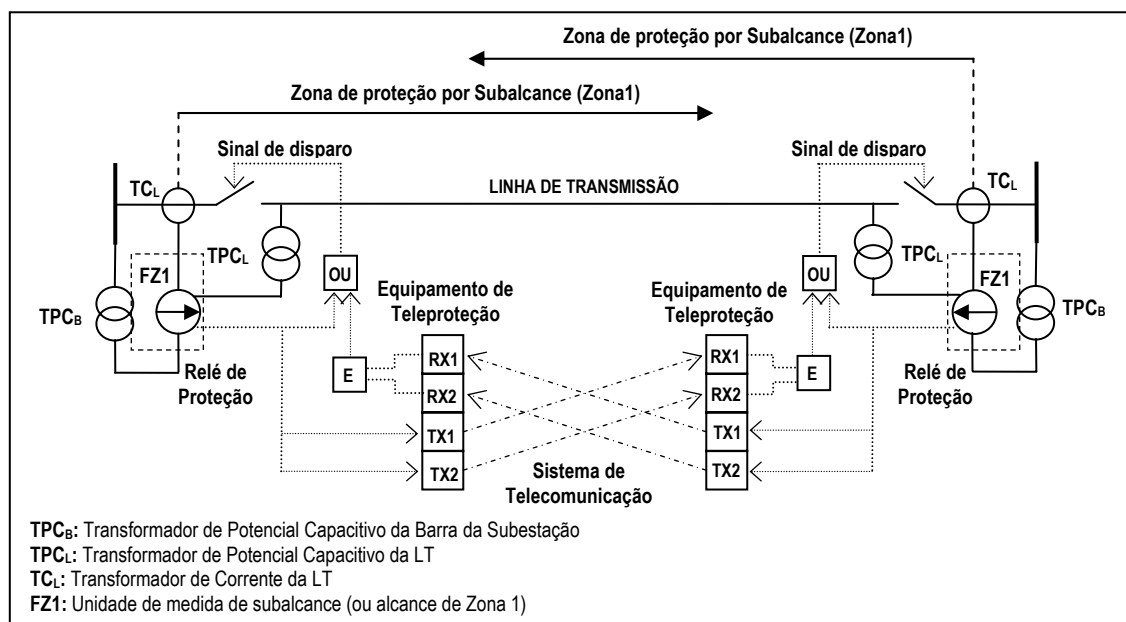


Figura 2.1 – Esquema de Transferência Direta de Disparo por Subalcance

Neste esquema destacam-se importantes características operacionais, que são detalhadas a seguir:

- As unidades de medida FZ1 comumente empregam as funções de proteção de distância na detecção de qualquer tipo de falta. Porém, para obter maior sensibilidade na detecção de faltas fase-terra utilizam-se também as funções de proteção direcional de sobrecorrente. A parametrização destas unidades deve garantir a superposição de zonas de proteção (zona 1) no trecho central da LT.
- O sistema de telecomunicação utiliza a técnica de modulação FSK (*Frequency Shift Keying*) no envio dos sinais de GUARD e TRIP. Para aumentar a segurança do esquema, emprega-se a redundância das funcionalidades de transmissão e recepção na interface de telecomunicação.
- O sistema de telecomunicação precisa de um meio de transmissão que não seja adversamente afetado por ruídos produzidos pelas faltas internas e nem por descargas atmosféricas.
- O sinal de GUARD é transmitido em condições normais de operação para monitoração contínua do canal de telecomunicação.
- A transmissão do sinal de TRIP é feita unicamente quando a unidade de medida FZ1 detecta a falta dentro do seu alcance. O sinal recebido no terminal remoto da LT atuará diretamente no circuito de comando do disjuntor.
- Elimina eficientemente qualquer falta dentro do trecho da LT onde o alcance de ambas as unidades FZ1 se superpõe.
- A aceleração no disparo do disjuntor local não terá sucesso para faltas além do alcance de zona 1 se o disjuntor remoto estiver aberto ou o canal de telecomunicação inoperante. Neste caso, as unidades de medida *stand alone* de sobrealcance temporizadas, fornecerão a respectiva proteção de retaguarda. Porém, existe a probabilidade de disparo errôneo para faltas externas ainda dentro do alcance de zona 2.

2.2.2 Transferência Permissiva de Disparo por Subalcance

A lógica do esquema de Transferência Permissiva de Disparo por Subalcance é apresentada na Figura 2.2. Observa-se que esta lógica utiliza duas unidades de medida em cada terminal da LT, uma de subalcance FZ1 e outra de sobrealcance FZ2. Este esquema apresenta uma interface de telecomunicação com uma única funcionalidade de transmissão (TX) e recepção (RX).

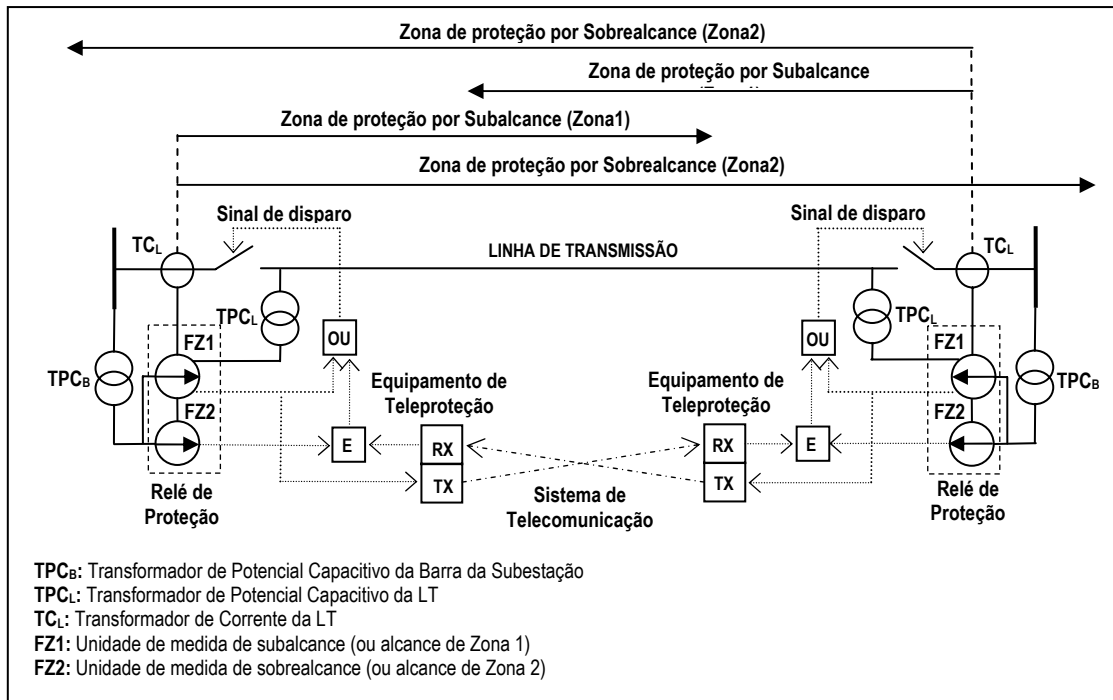


Figura 2.2 – Esquema de Transferência Permissiva de Disparo por Subalcança

Neste esquema destacam-se importantes características operacionais que são detalhadas a seguir:

- As unidades de medida FZ1 e FZ2 comumente utilizam as funções de proteção de distância na detecção de faltas entre fases. Para detecção de faltas fase-terra ambas unidades empregam tanto as funções de distância como as funções de proteção direcional de sobrecorrente. A parametrização das unidades FZ1 deve garantir a superposição de zonas no trecho central da LT.
- Emprega o mesmo sistema de telecomunicação descrito no item 2.2.1, porém sem redundância das funcionalidades de transmissão e recepção.
- A transmissão do sinal de TRIP é feita unicamente quando a unidade de medida FZ1 detecta a falta dentro do seu alcance. O sinal recebido no terminal remoto da LT é primeiramente supervisionado pela unidade de medida local FZ2 antes de atuar no circuito de comando do disjuntor.
- Elimina eficientemente qualquer falta dentro do trecho da LT onde o alcance de ambas as unidades FZ1 se superpõe.
- A aceleração no disparo do disjuntor local não terá sucesso para faltas além do alcance de zona 1 se o disjuntor remoto estiver aberto ou o canal de telecomunicação inoperante. Neste caso, as unidades de medida *stand alone* com alcance de zona 2,

temporizadas, fornecerão a respectiva proteção de retaguarda. Porém, existe a probabilidade de disparo errôneo para faltas externas ainda dentro do alcance de zona 2.

2.2.3 Transferência Permissiva de Disparo por Sobrealcance

A lógica do esquema de Transferência Permissiva de Disparo por Sobrealcance é mostrada na Figura 2.3. Observa-se que esta lógica utiliza uma unidade de medida de sobrealcance FZ2 em cada terminal da LT e apresenta também uma interface de telecomunicação duplex sem redundância.

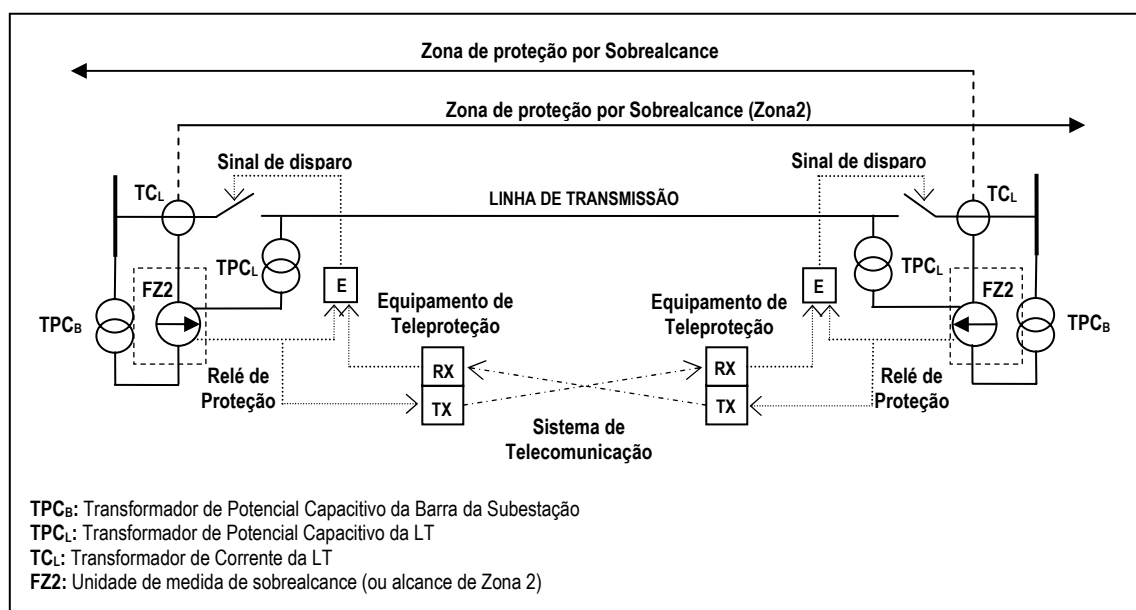


Figura 2.3 – Esquema de Transferência Permissiva de Disparo por Sobrealcance

Neste esquema destacam-se importantes características operacionais que são detalhadas a seguir:

- As unidades de medida FZ2 comumente empregam as funções de proteção de distância na detecção de todo tipo de falta. Porém, para obter maior sensibilidade na detecção de faltas fase-terra, utilizam-se também as funções de proteção direcional de sobrecorrente.
- Emprega o mesmo sistema de telecomunicação descrito no item 2.2.1, porém sem redundância das funcionalidades de transmissão e recepção.
- A transmissão do sinal de TRIP é feita unicamente quando a unidade de medida FZ2 detecta a falta dentro do seu alcance. O sinal recebido no terminal remoto primeiro é

supervisionado pela unidade de medida local FZ2 antes de atuar no circuito de comando do disjuntor. Isto garante a eliminação de faltas em todo o comprimento da LT.

- No caso de faltas externas, mesmo com a perda do canal de telecomunicação, não se produzirá um falso disparo do disjuntor local. Porém, quando da ocorrência de faltas internas nas mesmas condições, o esquema carece de confiabilidade.
- As unidades de medida *stand alone* com alcance de zona 2 temporizadas fornecerão a respectiva proteção de retaguarda.
- Pode não operar rapidamente para faltas próximas ao terminal associado a uma fonte forte, pois sua resposta dependerá da atuação da proteção no terminal fraco que pode ser lenta ou simplesmente não ocorrer.
- Pode utilizar uma lógica de ECO que permita a transmissão do sinal de disparo quando o disjuntor local estivesse antecipadamente aberto.

2.2.4 Aceleração de Zona

A lógica do esquema de Aceleração de Zona é apresentada na Figura 2.4. Observa-se que esta lógica utiliza uma unidade de medida de subalcance FZ1 em cada terminal da LT, com capacidade de estender seu alcance quando receber o sinal de TRIP do terminal remoto. Este esquema também apresenta uma interface de telecomunicação duplex sem redundância.

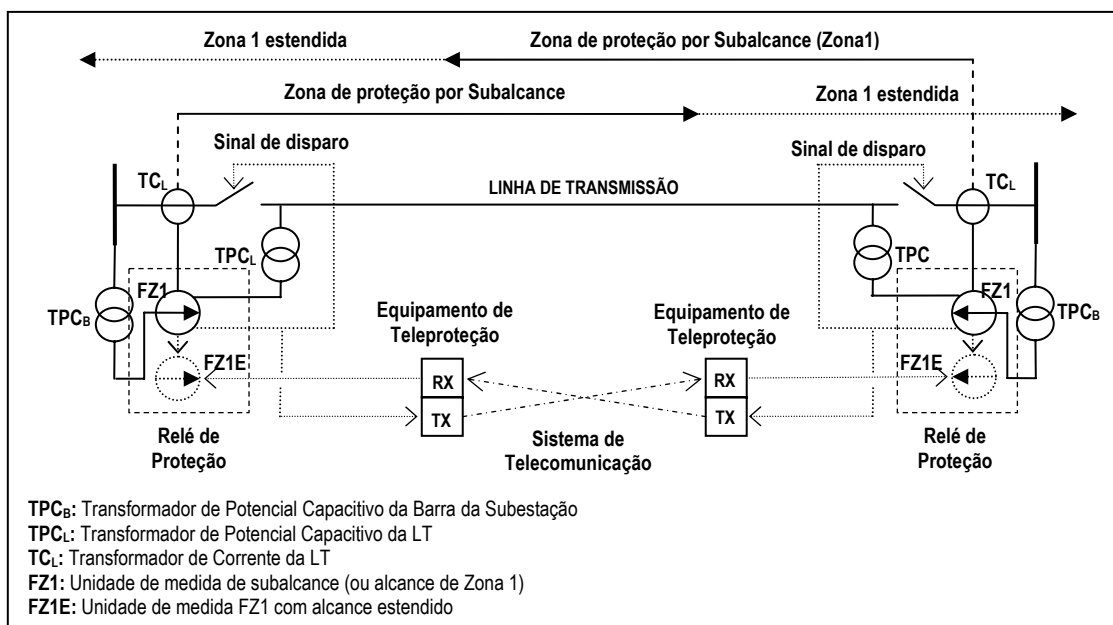


Figura 2.4 – Esquema de Aceleração de Zona

Neste esquema destacam-se importantes características operacionais que são detalhadas a seguir:

- As unidades de medida FZ1 comumente usam as funções de proteção de distância na detecção de faltas entre fases e faltas fase-terra. A parametrização destas unidades deve garantir a superposição de zonas no trecho central da LT.
- Emprega o mesmo sistema de telecomunicação descrito no item 2.2.1, porém sem redundância das funcionalidades de transmissão e recepção.
- A transmissão do sinal de TRIP é feita unicamente quando a unidade de medida FZ1 detecta a falta dentro do seu alcance. O sinal recebido é usado pelo relé para dar partida na extensão do seu alcance possibilitando a detecção de faltas internas próximas ao terminal remoto que inicialmente não são vistas pelo alcance de zona 1.
- Similar ao do item 2.2.3, este esquema carece de confiabilidade quando da ocorrência de faltas internas durante a perda do canal de comunicação. As unidades de medida *stand alone* de sobrealcance fornecerão a proteção de retaguarda.

2.2.5 Comparação Direcional por Bloqueio

A lógica do esquema de Comparação Direcional por Bloqueio é mostrada na Figura 2.5. Observa-se que esta lógica utiliza duas unidades de medida em cada terminal da LT, uma direta de sobrealcance FZ2 e outra reversa de bloqueio FB. Este esquema também apresenta uma interface de telecomunicação duplex sem redundância.

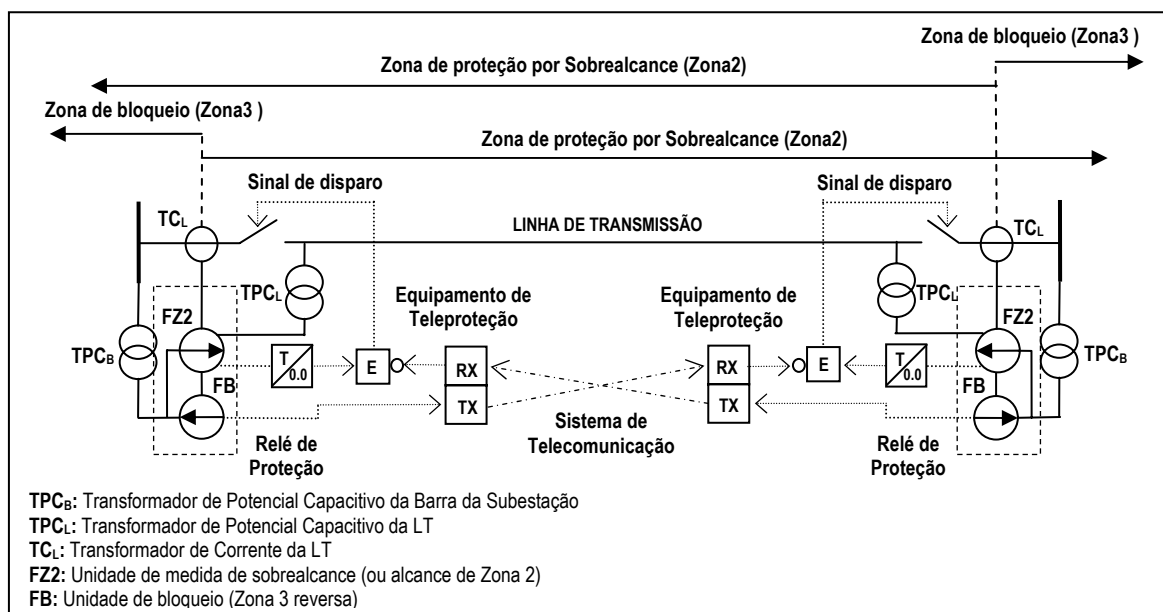


Figura 2.5 – Esquema de Comparação Direcional por Bloqueio

Neste esquema destacam-se importantes características operacionais que são detalhadas a seguir:

- As unidades de medida FZ2 e FZB comumente utilizam as funções de proteção de distância na detecção de faltas entre fases. Para detecção de faltas fase-terra, ambas as unidades empregam tanto as funções de distância como as funções de proteção direcional de sobrecorrente.

- Na partida da transmissão do sinal de bloqueio podem-se usar tanto funções de proteção direcionais como funções não-direcionais. Vale ressaltar que as primeiras apresentam uma resposta mais lenta do que as últimas devido ao atraso na determinação da direcionalidade da falta.

- O sistema de telecomunicação utiliza a técnica de modulação ON/OFF, sendo as próprias LTs usadas como meio de transmissão.

- Requer um esquema (automático ou manual) para testar periodicamente o canal de telecomunicação durante condições normais de operação onde o transmissor permanece em estado OFF. A verificação deve ser feita nos dois sentidos.

- A transmissão do sinal de bloqueio desde o terminal remoto é feita só na ocorrência de qualquer tipo de falta externa vista pela unidade reversa. A recepção deste sinal no terminal local bloqueia o disparo já iniciado pela unidade de sobrealcance.

- O comando de disparo da unidade de sobrealcance possui um retardo de tempo associado ao período de espera no recebimento do sinal de bloqueio. Este tempo, tipicamente de 1 a 2 ciclos, é chamado de Tempo de Coordenação T e deve ser calculado para compensar o tempo do canal, mais o tempo de propagação do sinal e mais uma margem de segurança. Se o sinal de bloqueio não chegar dentro do tempo T , o comando de disparo da unidade de sobrealcance será liberado.

- Sempre operará para faltas internas, embora exista perda do canal de comunicação. Porém, nas mesmas condições, existe a probabilidade de atuação indevida para faltas externas ainda dentro do alcance de zona 2.

- As unidades de medida direta podem não atuar em terminais fracos de uma LT.

2.2.6 Comparação Direcional por Desbloqueio

A lógica do esquema de Comparação Direcional por Desbloqueio é apresentada na Figura 2.6. Observa-se que esta lógica utiliza uma unidade de medida de sobrealcance FZ2

em cada terminal da LT e apresenta também uma interface de telecomunicação com uma funcionalidade para transmissão e outra para recepção.

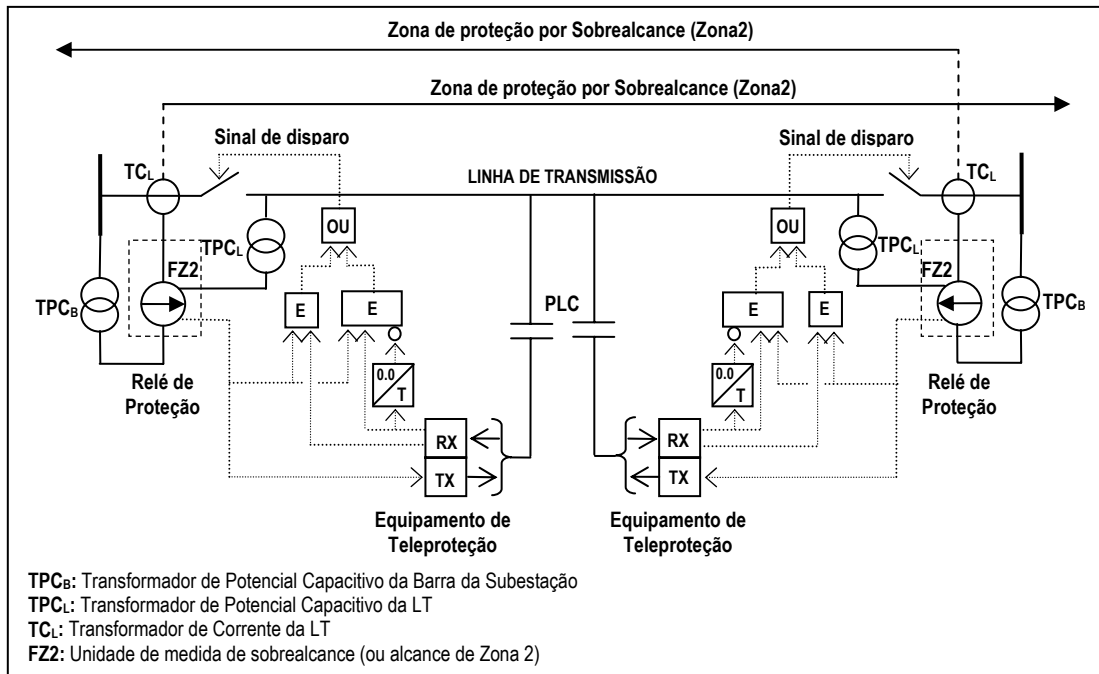


Figura 2.6 – Esquema de Comparação Direcional por Desbloqueio

Neste esquema destacam-se importantes características operacionais que são detalhadas a seguir:

- As unidades de medida FZ2 comumente empregam as funções de proteção de distância na detecção de todo tipo de falta. Porém, para obter maior sensibilidade na detecção de faltas fase-terra utilizam-se também as funções de proteção direcional de sobrecorrente.
- Emprega o mesmo sistema de telecomunicação descrito no item 2.2.1, porém sem redundância das funcionalidades de transmissão e recepção.
- Possui uma lógica que permite acomodar a perda do canal de comunicação quando da ocorrência de uma falta na LT protegida. Esta lógica precisa transmitir um sinal de GUARD em condições normais de operação para monitorar continuamente o canal de comunicação.
- A transmissão do sinal de TRIP é feita unicamente quando a unidade de medida FZ2 detecta a falta dentro do seu alcance. O sinal recebido no terminal remoto primeiro é supervisionado pela unidade de medida local FZ2 antes de atuar no circuito de comando do disjuntor. Isto garante a eliminação de faltas em todo o comprimento da LT.

- A lógica de desbloqueio habilita o disparo do disjuntor local por um período de 150 a 300 ms após detectar a perda do sinal de guarda junto com a partida da unidade de sobrealcance.
- A lógica de desbloqueio não é válida em situações de perda do sinal devido às faltas externas, pois trará como resultado um falso disparo do disjuntor. Este fato leva à aplicação da lógica de desbloqueio preferencialmente com meio de transmissão PLC-*Power Line Carrier*.

2.3 Estrutura do Esquema de Teleproteção

O CIGRÉ (2000) representa a estrutura geral do esquema de teleproteção segundo ilustrado na Figura 2.7. Nesta estrutura destacam-se três níveis hierárquicos, quais sejam: proteção, teleproteção e telecomunicação. Cada nível está associado aos diferentes equipamentos e/ou componentes que interagem no funcionamento do esquema de teleproteção.

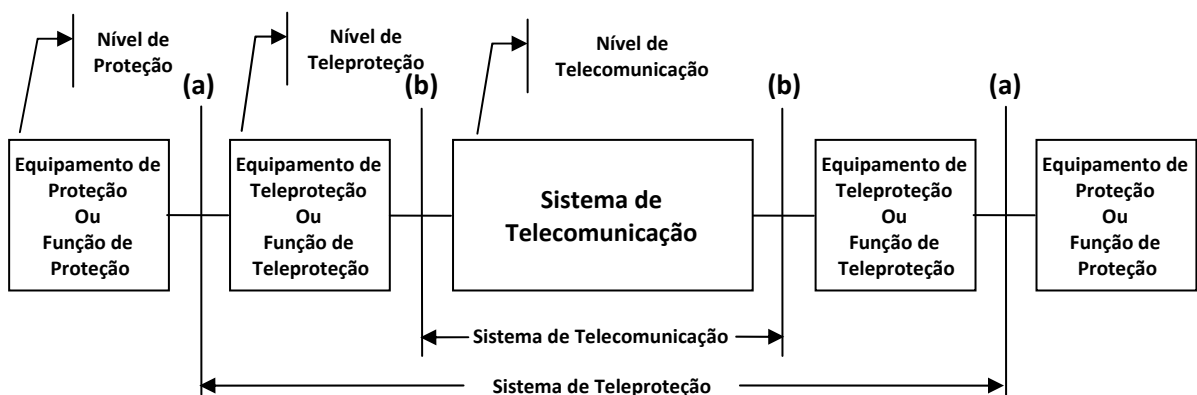


Figura 2.7 – Estrutura geral de um esquema de teleproteção

Observa-se na Figura 2.7, que as interfaces tipo (a) entre os níveis de proteção e teleproteção de ambos extremos da estrutura, estabelecem as fronteiras do sistema de teleproteção. Da mesma forma, as interfaces tipo (b) entre os níveis de teleproteção e telecomunicação de ambos extremos da estrutura, estabelecem as fronteiras do sistema de telecomunicação. No entanto, considera-se importante enfatizar que, o arranjo de um esquema de teleproteção e suas diferentes interfaces, dependerá se a teleproteção é ou não uma função integrada ao equipamento de proteção.

2.3.1 Sistema de Telecomunicação

Este sistema é constituído pelo meio físico de transmissão e os equipamentos de telecomunicações que compõe o esquema de teleproteção. A estrutura do sistema de telecomunicação deve ser projetada para permitir a transmissão dos sinais de proteção de forma rápida, segura e confiável. Tais requisitos dependem do esquema de teleproteção implementado e são definidos a partir de três parâmetros importantes, que são o tempo de propagação, largura de banda e qualidade do sinal. Estes parâmetros são pertinentes tanto na comunicação analógica como na comunicação digital. Porém, nos sistemas digitais costuma-se usar o termo taxa de bits ao invés de largura de banda, bem como expressar a qualidade do sinal em função da taxa de erros de bits (BER – *Bit-Error-Rate*) ao invés de relação sinal–ruído (SNR – *Signal-to-Noise Ratio*).

A tecnologia do equipamento de telecomunicação define se o circuito utilizado na interface de comunicação é analógico ou digital. Uma interface com formas de onda contínua de amplitude variante no tempo descreverá um circuito analógico e uma interface caracterizada por pulsos discretos de amplitude fixa descreve um circuito digital.

Independente se o circuito de comunicação é analógico ou digital, este pode ser um enlace dedicado ou multiplexado. Em um enlace dedicado, conforme ilustrado na Figura 2.8(a), o meio de transmissão é exclusivo a um único serviço. Para um enlace multiplexado, conforme apresentado na Figura 2.8(b), o meio de transmissão pode ser compartilhado entre dois ou mais serviços.

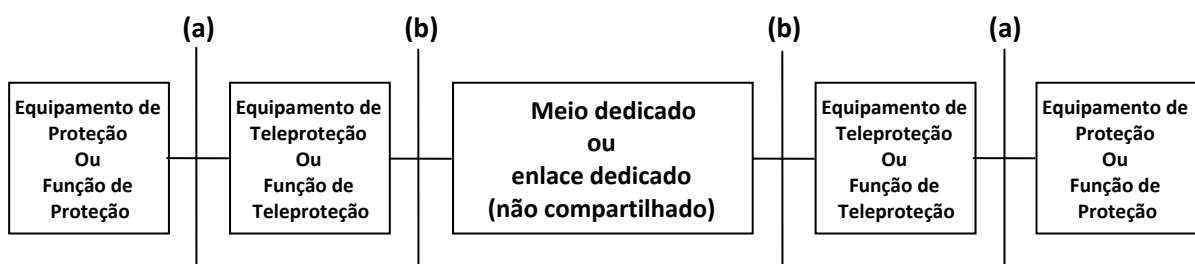


Figura 2.8(a) – Esquema de teleproteção com canal de comunicação dedicado

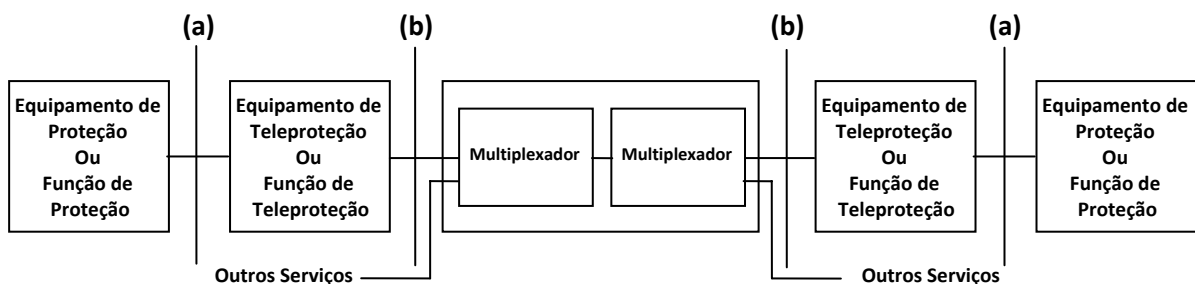


Figura 2.8(b) – Esquema de teleproteção com canal de comunicação multiplexado

Devido aos altos custos de implementação, os meios de transmissão utilizados em esquemas de teleproteção são comumente projetados para compartilhar vários serviços, como por exemplo, proteção, voz, e transferência de dados.

2.3.1.1 Meios de Transmissão

Os principais meios de transmissão empregados pelos sistemas de telecomunicação nos esquemas de teleproteção são:

- Fio piloto.
- Onda portadora em linhas de potência (PLC – *Power Line Carrier*),
- Enlaces microondas.
- Enlaces de fibra ótica.
- Enlaces via satélite.

Historicamente, os enlaces de rádio microondas e PLC foram amplamente utilizados na teleproteção baseada em sinalização. Porém, a preferência pelos esquemas de teleproteção que possibilitam usar as próprias linhas de transmissão como meio de comunicação permitiu aos enlaces PLC se destacarem dentre essas tecnologias.

No entanto, nos últimos anos a evolução na tecnologia de proteção numérica e a substituição dos cabos pára-raios convencionais por cabos OPGW (*Optical Ground Wire*) que possuem em seu interior várias fibras óticas, é uma alternativa na telecomunicação em sistemas elétricos. Como consequência disso, vem ocorrendo uma substituição gradativa dos enlaces convencionais.

2.3.1.2 Requisitos do Sistema de Telecomunicação

Conforme descrito no item 2.3.1, o tempo de propagação, a largura de banda e a qualidade do sinal, são considerados os principais parâmetros que definem os requisitos de um sistema de telecomunicação utilizado em esquemas de teleproteção. Os subitens a seguir descrevem estes parâmetros.

a) Tempo de Propagação

O tempo de propagação é o tempo gasto na transmissão do sinal através do sistema de telecomunicação sob condições estáveis de operação. Ou seja, é o tempo transcorrido pelo sinal entre as interfaces tipo (b) da Figura 2.7.

Este parâmetro é considerado um dos mais críticos dentro dos requisitos do sistema de telecomunicação, pois deve ser mantido o menor possível, de modo a garantir a rápida tomada de decisão do esquema de teleproteção. O valor de referência para este parâmetro depende do máximo tempo de atuação da proteção com relação à estabilidade do sistema e à capacidade térmica dos equipamentos de potência.

O CIGRÉ (2000) recomenda os requisitos de tempo de propagação conforme a Tabela 2.2, para implementação dos esquemas de teleproteção.

Tabela 2.2 – Requisitos no tempo de propagação

Parâmetro	Comparação Direcional por Bloqueio	Transferência Permissiva de Disparo por Subalcance	Transferência Permissiva de Disparo por Sobrealcance	Aceleração de zona	Transferência Direta de Disparo por Subalcance
Tempo de Propagação	<10ms	<10ms	<10ms	<10ms	<10ms

b) Largura de banda

Em circuitos analógicos este parâmetro representa a largura da faixa de frequência empregada no canal de comunicação e seu valor é expresso em unidades Hertz (Hz). Para os circuitos digitais, a largura de banda representa a quantidade de informação por unidade de tempo que pode ser transferida através do canal de comunicação e seu valor está expresso em bits por segundo (bps).

O CIGRÉ (2000) recomenda os requisitos de largura de banda conforme a Tabela 2.3 para implementação dos esquemas de teleproteção.

Tabela 2.3 – Requisitos na largura de banda

Parâmetro		Comparação Direcional por Bloqueio	Transferência Permissiva de Disparo por Subalcance	Transferência Permissiva de Disparo por Sobrealcance	Aceleração de zona	Transferência Direta de Disparo por Subalcance
Largura de Banda	Analógica	<3kHz	<3kHz	<3kHz	<3kHz	<3kHz
	Digital	<10kbps	<10kbps	<10kbps	<10kbps	<10kbps

c) Qualidade do Sinal

Na comunicação digital a qualidade do sinal está associada à taxa de erro de bits (BER) que pode ser gerada sob a presença de ruído no canal de comunicação. Os equipamentos de teleproteção possuem normalmente sistemas de detecção e correção de erro de bits que permitem manter uma taxa de erro residual aceitável para evitar uma operação errônea do esquema de teleproteção.

O CIGRÉ (2000) recomenda os requisitos da Tabela 2.4 na implementação dos esquemas de teleproteção.

Tabela 2.4 – Requisitos na qualidade do sinal

Parâmetro		Comparação Direcional por Bloqueio	Transferência Permissiva de Disparo por Subalcance	Transferência Permissiva de Disparo por Sobrealcance	Aceleração de zona	Transferência Direta de Disparo por Subalcance
<i>Bit Error Rate</i> (BER)	Condições normais de operação	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵	<10 ⁻⁵
	Durante falta no sistema de potência	<10 ⁻⁴	<10 ⁻⁴	<10 ⁻⁴	<10 ⁻⁴	<10 ⁻⁴

2.3.2 Sistema de Teleproteção

Este sistema é constituído pelo sistema de telecomunicação e os respectivos equipamentos de teleproteção instalados nos extremos da LT.

2.3.2.1 Equipamento de Teleproteção

O equipamento de teleproteção é um equipamento especialmente desenvolvido para estabelecer a interface entre o relé de proteção e o sistema de telecomunicação. Sua principal função é converter os sinais e mensagens enviados pelo relé de proteção em sinais e mensagens compatíveis com o sistema de telecomunicação.

A funcionalidade deste equipamento pode ser dedicada ou integrada através de algoritmos dentro dos próprios relés numéricos de proteção ou dentro dos equipamentos de telecomunicação.

2.3.2.2 Interfaces de Teleproteção

Um dos principais requisitos do sistema de teleproteção é utilizar interfaces compatíveis nas interconexões com o relé de proteção e o sistema de telecomunicação. Ambas as interfaces devem garantir a transmissão dos sinais e mensagens de forma contínua, com mínimo atraso e atenuação.

a) Interface entre o relé de proteção e o equipamento de teleproteção

Esta interface tem sido comumente implementada através de fios de cobre isolados interligando os contatos secos de um dispositivo com as entradas opto-isoladas do outro. Uma fonte de tensão DC, tipicamente de 125 volts, permite ao dispositivo transmissor alimentar as entradas do dispositivo receptor quando do fechamento dos seus contatos.

Esta técnica de interface é considerada simples e robusta, com a vantagem de permitir a interoperabilidade entre dispositivos de qualquer fabricante.

b) Interface entre o equipamento de teleproteção e o sistema de telecomunicação

Esta interface tem sido comumente implementada através da comunicação serial de dados elétrica ou ótica. Destaca-se a comunicação ótica principalmente pelas vantagens em termos de imunidade a interferências eletromagnéticas, normalmente presentes em ambientes de subestações elétricas.

Ambas as tecnologias citadas acima foram padronizadas como meios de camada física utilizados no estabelecimento da comunicação. Porém, isto não aconteceu com os protocolos de comunicação aplicados, onde a carência de um padrão mundial dificulta ou pode inviabilizar a interoperabilidade entre equipamentos de diferentes fabricantes.

Um primeiro esforço na padronização da camada de enlace como protocolo de comunicação veio com os padrões DNP e IEC-870-5-1 na comunicação entre IEDs e RTUs (*Remote Terminal Units*) das subestações. Porém, a aplicação destes protocolos ficou restrita ao continente de origem de cada padrão, sendo o DNP preferivelmente utilizado em países da América e o IEC-870-5-1 em países da União Européia.

Uma tentativa de se definir um padrão mundial veio com o advento da norma IEC 61850, foco do capítulo três desta dissertação. Esta norma, além das mensagens, também definiu as técnicas a serem empregadas nas camadas física e enlace em um ambiente de subestação. Para a camada de enlace é utilizado o protocolo CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*) definido na IEEE Std.802.3, comumente conhecido como *ethernet*. Na camada física podem ser aplicados os cabos metálicos ou óticos.

Segundo o padrão IEEE Std.802.3 (IEEE, 2005), a camada de controle de acesso ao meio (MAC – *The Media Access Control*) de cada dispositivo conectado na rede LAN (*Local Area Network*) deve suportar a mesma taxa e modo de transmissão. A padronização da taxa de transmissão evoluiu da primeira publicação da norma IEEE Std.802.3/1985, de 10Mbps para 100Gbps na revisão IEEE Std.802.3ba/2010. Da mesma forma, a transmissão inicialmente foi padronizada para operar em modo *half-duplex* e posteriormente na revisão IEEE Std.802.3z, para o modo *full-duplex*.

O modo de transmissão em *half-duplex* requer que apenas uma estação transmita enquanto que todas as outras aguardam em “silêncio”, característica básica de um meio físico compartilhado. O controle deste processo fica a cargo do método de acesso CSMA, onde qualquer estação pode transmitir quando “percebe” o meio livre. Pode ocorrer que duas ou mais estações transmitam simultaneamente, ocorrendo assim uma colisão, corrompendo os pacotes. Quando a colisão é detectada (CD), as estações irão retransmitir o quadro *ethernet* após um período de tempo aleatório. Isto implica que o CSMA/CD pode estar em três estados transmitindo, disputando ou inativo.

Opcionalmente a camada MAC permite operação *full-duplex*, na qual é possível a transmissão bidirecional simultânea em enlaces ponto a ponto. Como resultado existe mais

tempo disponível para transmissão, além de se ter o dobro da largura de banda. Outra característica neste modo é que o controle de acesso ao meio não é executado pela técnica CSMA/CD e sim por um protocolo de controle de fluxo (*flow control*), pois transmissão e recepção ocorrem em caminhos físicos distintos, mas pode acontecer que o volume de dados enviados seja maior que a capacidade de recepção do destino.

Vale ressaltar que a maioria dos dispositivos de proteção disponível no mercado dispõe taxa de transmissão de 100 Mbps e modo de operação *full-duplex*.

2.3.2.3 Tempo de Operação da Teleproteção (T_A)

O tempo de operação da teleproteção (T_A) corresponde ao tempo transcorrido entre o instante da mudança de estado na entrada do equipamento de teleproteção transmissor e a correspondente mudança de estado na saída do equipamento de teleproteção receptor. Inclui-se no cálculo de T_A , o tempo de formatação do quadro a ser enviado e codificação do canal (1ms a 5ms), tempo de propagação do sinal (0ms a 5ms), tempo de seleção e decisão (10ms a 30ms para circuitos analógicos e 2ms a 10ms para circuitos digitais) e tempo necessário para detecção e correção de erros no receptor devido à interferência e ruído, que são perturbações inerentes a qualquer canal de comunicação (0ms a 20ms). Estas referências de tempo são ilustradas na Figura 2.9, (CIGRÉ, 2000), na qual se apresenta a relação entre a estrutura do esquema de teleproteção e o tempo de operação T_A .

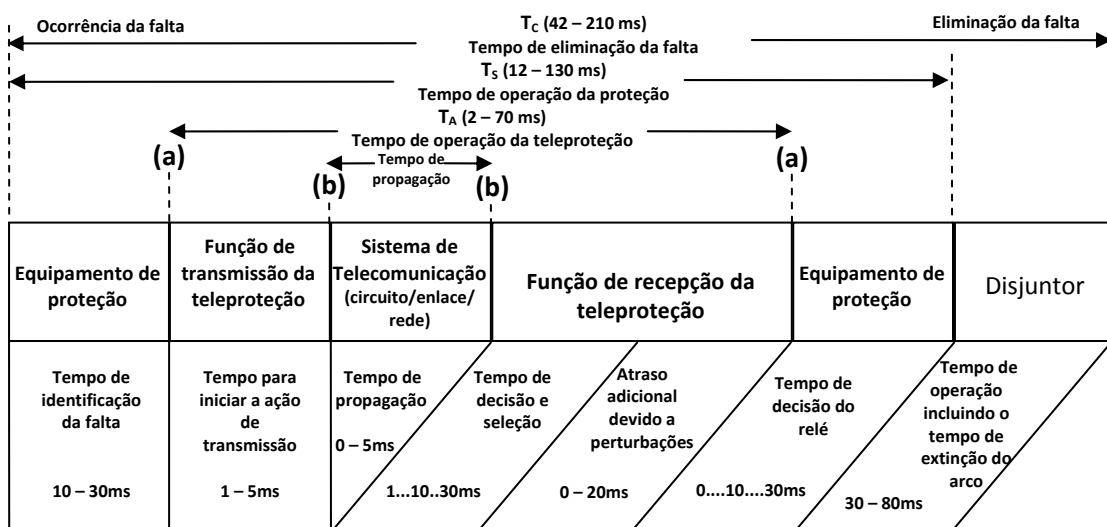


Figura 2.9 – Valores típicos de tempos de operação para sistemas de teleproteção

Pode-se observar na Figura 2.9, que a maior parcela de atraso dentro do cálculo de T_A corresponde ao tempo gasto dentro do equipamento de teleproteção no processamento da função de recepção. Este atraso dependerá do tipo de comunicação utilizada (analógica ou digital) e do nível de interferência e ruído contido no sinal recebido.

O tempo de propagação do sinal dependerá do comprimento do canal e do número e tipo de equipamentos envolvidos no sistema de telecomunicações. Por exemplo, no caso de se ter uma rede WAN (*Wide Area Network*) que abrange uma vasta área geográfica envolvendo vários dispositivos que podem apresentar comportamentos probabilísticos, pode não ser possível garantir um tempo de propagação menor do que 5ms. Cabe salientar que para redes WAN é obrigatório o emprego de tecnologia digital, que por sua vez compensa o atraso pela rapidez no processamento digital de sinais dentro do equipamento terminal de teleproteção.

O CIGRÉ (2000) recomenda os requisitos de tempo T_A conforme ilustrado na Tabela 2.5, na implementação dos esquemas de teleproteção.

Tabela 2.5 – Requisitos no tempo de operação da teleproteção

Parâmetro	Comparação Direcional por Bloqueio	Transferência Permissiva de Disparo por Subalcance	Transferência Permissiva de Disparo por Sobrealcance	Aceleração de zona	Transferência Direta de Disparo por Subalcance
Tempo de Operação da Teleproteção T_A	<25ms	<25...30ms	<25...30ms	<25...30ms	<50ms

2.3.3 Desempenho dos Esquemas de Teleproteção

O padrão IEC 60834-1 (IEC, 1999) define três parâmetros importantes que descrevem o desempenho dos esquemas de teleproteção, os quais são: segurança, confiabilidade e máximo tempo de operação. A segurança e confiabilidade são parâmetros que dependem das características do meio de transmissão utilizado e estes são mensuráveis em relação à sua imunidade ao ruído.

A segurança é a capacidade do receptor conseguir distinguir entre sinais realmente enviados pelo transmissor, dos sinais que podem ser interpretados como comandos, mas que de fato foram originados por ruídos no meio de transmissão. Este parâmetro é mensurável em termos da probabilidade em aparecer um comando desnecessário (P_{uc} – *Probability of Unwanted Command*).

A confiabilidade é a habilidade que o receptor possui em decodificar corretamente as mensagens enviadas pelo transmissor, que no meio de transmissão podem ser degradadas por ruídos e interferências. Este parâmetro é medido em termos da probabilidade de perder um comando (P_{mc} – *Probability of Missing Command*).

O máximo tempo de operação está associado ao tempo máximo permitido na eliminação da falta no sistema (T_c) sem produzir danos nos equipamentos e/ou perda da estabilidade. Este tempo é composto pela soma dos tempos de operação dos relés de proteção, operação do esquema de teleproteção (T_A) e o tempo de operação do disjuntor (incluindo o tempo de extinção do arco).

2.4 Análise Comparativa dos Esquemas de Teleproteção

A Tabela 2.6 apresenta uma análise comparativa das vantagens e desvantagens que caracterizam os esquemas de teleproteção baseados em sinalização. Esta análise objetiva esclarecer como o desempenho dos esquemas de teleproteção pode ser avaliado conforme as suas características operacionais. Portanto, utilizam-se os três parâmetros expostos pelo padrão IEC 60834-1 para análise do desempenho, que são confiabilidade, segurança e tempo máximo de operação.

Com o intuito de resumir a análise feita na Tabela 2.6, classificaram-se os esquemas de teleproteção em três tipos ou categorias, que são:

- a) Esquemas de transferência direta de disparo (*intertripping*).
- b) Esquemas de transferência permissiva de disparo.
- c) Esquemas de bloqueio.

Tabela 2.6 – Análise comparativa dos esquemas de teleproteção

ESQUEMA DE TELEPROTEÇÃO	DESVANTAGENS	VANTAGENS
<p align="center">Esquemas de Transferência Direta de Disparo (<i>Intertripping</i>)</p>	<p>Confiabilidade: O atraso ou perda do sinal de TRIP, devido a presença de ruído no canal durante faltas internas, ocasionará o atraso ou perda do comando de disparo do disjuntor.</p> <p>Segurança: Um comando desnecessário, devido a presença de ruído no canal sob condições normais, trará como resultado a operação indevida do disjuntor.</p> <p>Operação: O disparo acelerado do disjuntor local não terá sucesso para faltas além do alcance de zona 1 se o disjuntor remoto estiver aberto ou o canal de comunicação inoperante.</p>	<p>Tempo de Operação: O sinal de TRIP recebido atuará diretamente no circuito de comando do disjuntor.</p>
<p align="center">Esquemas de Transferência Permissiva de Disparo</p>	<p>Confiabilidade: O atraso ou perda do sinal TRIP, devido a presença de ruído no canal durante faltas internas, ocasionará o atraso ou perda do comando de disparo do disjuntor.</p> <p>Tempo de Operação: O sinal de TRIP recebido primeiro é supervisionado pela unidade de medida local de zona 2 antes de atuar sobre o circuito de comando do disjuntor.</p> <p>Operação (esquema de subalcance): O disparo acelerado do disjuntor local não terá sucesso para faltas além do alcance de zona 1 se o disjuntor remoto estiver aberto ou o canal de comunicação inoperante.</p> <p>Operação (esquema de sobrealcance): No caso de faltas internas com o canal de telecomunicação inoperante se produzirá um falso disparo do disjuntor local.</p>	<p>Segurança: Um comando desnecessário, devido a presença de ruído no canal sob condições normais, não trará a operação desnecessária do disjuntor, pois existe a supervisão da unidade de medida local de zona 2.</p> <p>Operação: Pode utilizar uma lógica de ECO que permita a transmissão do sinal de disparo quando o disjuntor local estiver antecipadamente aberto.</p>
<p align="center">Esquema de Comparação Direcional por Bloqueio</p>	<p>Confiabilidade: O atraso ou perda do sinal de bloqueio, devido a presença de ruído no canal durante faltas externas, não permitirá o bloqueio do disjuntor.</p> <p>Segurança: Um comando desnecessário devido a presença de ruído no canal durante faltas internas resultará no atraso ou bloqueio do disparo do disjuntor local.</p> <p>Operação: O bloqueio do disjuntor local não terá sucesso para faltas externas ainda dentro do alcance de zona 2 se o canal de comunicação estiver inoperante.</p>	<p>Operação: A necessidade de transmissão do sinal unicamente durante condições de falta externa tem levado ao aproveitamento das próprias linhas de transmissão como meio de comunicação.</p>

2.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou uma análise teórica dos esquemas de teleproteção baseados em sinalização. Aqui, identificaram-se as principais vantagens e desvantagens de cada esquema em termos de suas características operacionais.

Objetivando-se implementar um esquema real de teleproteção para testes, foi apresentado neste capítulo sua estrutura geral. Nesta abordagem se destacaram os principais componentes envolvidos, suas interfaces e os requisitos de operação.

Ordagci (2010) ressalta que, o esquema de comparação direcional por bloqueio (DCB – *Directional comparison blocking*) é um esquema muito aplicado no Sistema Elétrico Brasileiro. Baseado nesta premissa, considera-se utilizar o referido esquema no desenvolvimento deste trabalho de dissertação.

No capítulo três serão abordados os principais aspectos do padrão IEC 61850 que padroniza a comunicação local e remota entre IEDs de subestações. Estas informações serão utilizadas na implementação das mensagens GOOSE nas interfaces do esquema teleproteção a ser testado.

Capítulo 3

Padrão IEC 61850

3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados os principais aspectos do padrão IEC 61850 (*Communication Networks and Systems in Substations*) no que se refere à interoperabilidade entre dispositivos que implementam as funções de proteção dentro de um sistema de automação de subestações.

3.2 Objetivo e Estrutura do Padrão IEC 61850

O objetivo do padrão IEC 61850 é padronizar os aspectos de comunicação em sistemas de automação de subestações, garantindo a interoperabilidade entre dispositivos eletrônicos inteligentes.

A estrutura atual do padrão IEC 61850 é composta de 15 partes, distribuídas conforme apresentado a seguir:

- **Parte 1.-** Introdução e Visão Geral.
- **Parte 2.-** Glossário.
- **Parte 3.-** Requisitos Gerais.
- **Parte 4.-** Gerenciamento do Sistema e Projeto.
- **Parte 5.-** Requisitos de Comunicação para Funções e Modelos de Dispositivos.
- **Parte 6.-** Linguagem de Configuração para Comunicação em Subestações.
- **Parte 7-1.-** Estrutura de Comunicação Básica para Subestações - Princípios e Modelos.
- **Parte 7-2.-** Interface de Serviços de Comunicação Abstrata (ACSI).
- **Parte 7-3.-** Classe de Dados Comum (CDC).
- **Parte 7-4.-** Classes de Nós Lógicos Compatíveis e Classes de Dados.
- **Parte 8-1.-** Mapeamento de Serviços de Comunicação Específica – Mapeamento para MMS ISO/IEC 9506 (Parte 1 e 2) e para ISO/IEC 8802-3.
- **Parte 9-1.-** Valores Amostrados Sobre Enlace Serial Ponto a Ponto Unidirecional.
- **Parte 9-2.-** Valores Amostrados sobre ISO/IEC 8802-3.
- **Parte 10.-** Testes de Conformidade.
- **Parte 90-1.-** Uso do IEC 61850 para Comunicação entre Subestações.

3.3 Principais Aspectos do Padrão IEC 61850

Os principais aspectos do padrão IEC 61850 necessários para o entendimento do desenvolvimento deste trabalho de dissertação estão apresentados a seguir.

3.3.1 Alocação de Funções e Designação das Interfaces de Comunicação

A parte 5 do IEC 61850 (IEC, 2003e) recomenda estruturar o sistema de automação de subestações (SAS – *Substation Automation System*) em três diferentes níveis hierárquicos conforme se apresenta no Bloco 1 da Figura 3.1. Nestes níveis, as diferentes funções já conhecidas de proteção, controle e supervisão, podem ser logicamente alocadas.

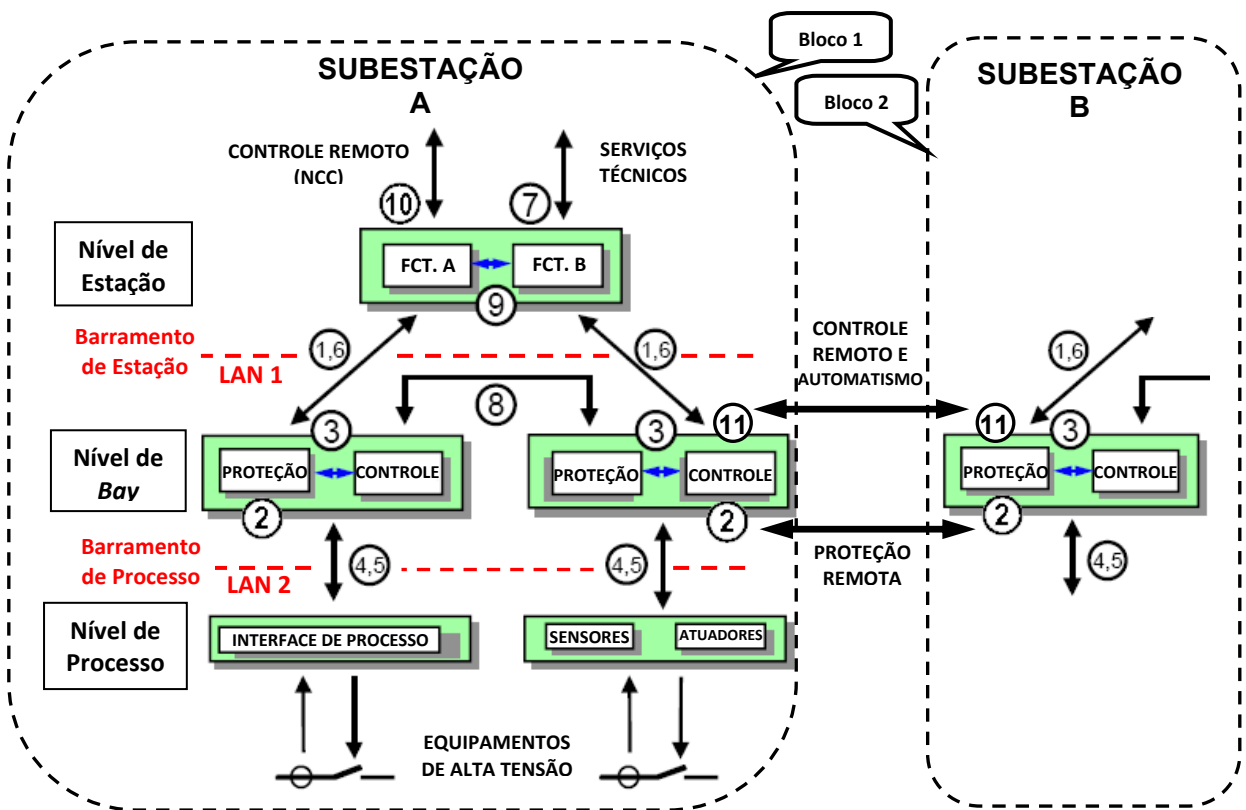


Figura 3.1 – Níveis e interfaces lógicas de um SAS e entre subestações
Fonte: (IEC, 2003e); (IEC, 2010)

Os principais dispositivos instalados nos níveis da estrutura ilustrada na Figura 3.1, são apresentados a seguir:

- **Nível de Processo:** sensores inteligentes e atuadores em equipamentos de campo. Comumente conhecidos como *Merging Units*.

- **Nível de Bay:** relés de proteção, controladores de *bay*, registradores de perturbações e equipamentos de teleproteção.
- **Nível de Estação:** Interface Homem-Máquina – IHM, equipamentos de telecomunicações, base de dados do sistema de automação e outros.

Observa-se que a estrutura ilustrada na Figura 3.1 define dois barramentos de interfaces de comunicações, que são: barramento de “Estação” e barramento de “Processo”. Ambos dão origem a duas redes LAN distintas (LAN 1 e LAN 2). Os numeradores destacados na Figura 3.1 descrevem os serviços aplicados em cada interface. Estes serviços são detalhados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Tipos de interfaces da estrutura de um SAS
Fonte: (IEC, 2010)

Interface	Funcionalidade
1	Troca de dados de proteção entre o nível de estação e o nível de <i>bay</i>
2	Troca de dados de proteção entre subestações (dados analógicos para proteção diferencial de linhas e dados binários para proteção de distância)
3	Troca de dados entre dispositivos do mesmo <i>bay</i>
4	Troca de valores amostrados dos Transformadores de Corrente (TCs) e Transformadores de Potencial (TPs) entre o nível de processo e o nível de <i>bay</i>
5	Troca de dados de controle entre o nível de processo e o nível de <i>bay</i>
6	Troca de dados de controle entre o nível de <i>bay</i> e o nível de estação
7	Troca de dados entre o nível de estação e um ponto de monitoração remota dentro da mesma LAN
8	Troca de dados entre <i>bays</i> – Destaca-se aplicações de funções de intertravamento
9	Troca de dados entre dispositivos do nível de estação
10	Troca de dados de controle entre uma subestação e o centro de controle remoto
11	Troca de dados entre subestações (dados binários para intertravamentos ou automatismos entre subestações)

Cabe salientar, que a parte 5 do IEC 61850 (IEC, 2003e) padroniza unicamente a alocação de funções de proteção, controle e supervisão, nas interfaces lógicas locais 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9. A alocação de funções nas interfaces lógicas remotas 2, 10 e 11 é padronizada na parte 90-1 do IEC 61850 (IEC, 2010), conforme ilustrado pelo Bloco 2 da Figura 3.1.

3.3.2 Os Nós Lógicos e sua Aplicação

Conforme ilustrado na Figura 3.2, todas as funções de um SAS (F – *Functions*) são decompostas em nós lógicos (LN – *Logical Nodes*), que são alocados em um ou mais dispositivos físicos (PD – *Physical Devices*). Para possibilitar a troca de dados, os LNs são interligados por conexões lógicas (LC – *Logical Connections*), alocadas em uma ou mais conexões físicas (PC – *Physical Connections*).

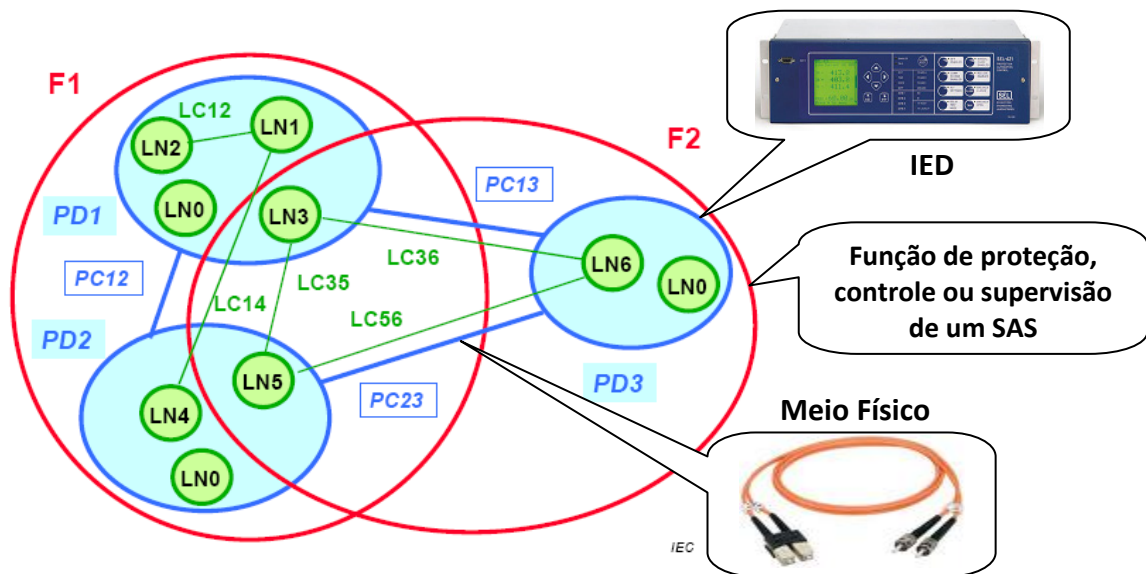


Figura 3.2 – Interação dos nós lógicos.
Fonte: (IEC, 2003e)

Vale ressaltar da Figura 3.2, que PDs representam todos os IEDs interligados no SAS, e PCs representam o meio físico de comunicação utilizado na rede LAN.

O objetivo do padrão IEC 61850 é decompor em nós lógicos as principais funções de supervisão, controle e proteção de um SAS. Conforme ilustrado na Figura 3.2, cada IED, ou PD, possui um grupo de nós lógicos que além de interagir internamente, podem interagir externamente com nós lógicos de outros dispositivos. Os LNs são entidades que possuem uma lista de dados composta de vários atributos relacionados a uma funcionalidade específica, como por exemplo, proteção, controle, medição, monitoração e imagem virtual dos principais equipamentos da subestação. A Figura 3.3 ilustra a estrutura do nó lógico XCBR que representa a imagem virtual de um disjuntor.

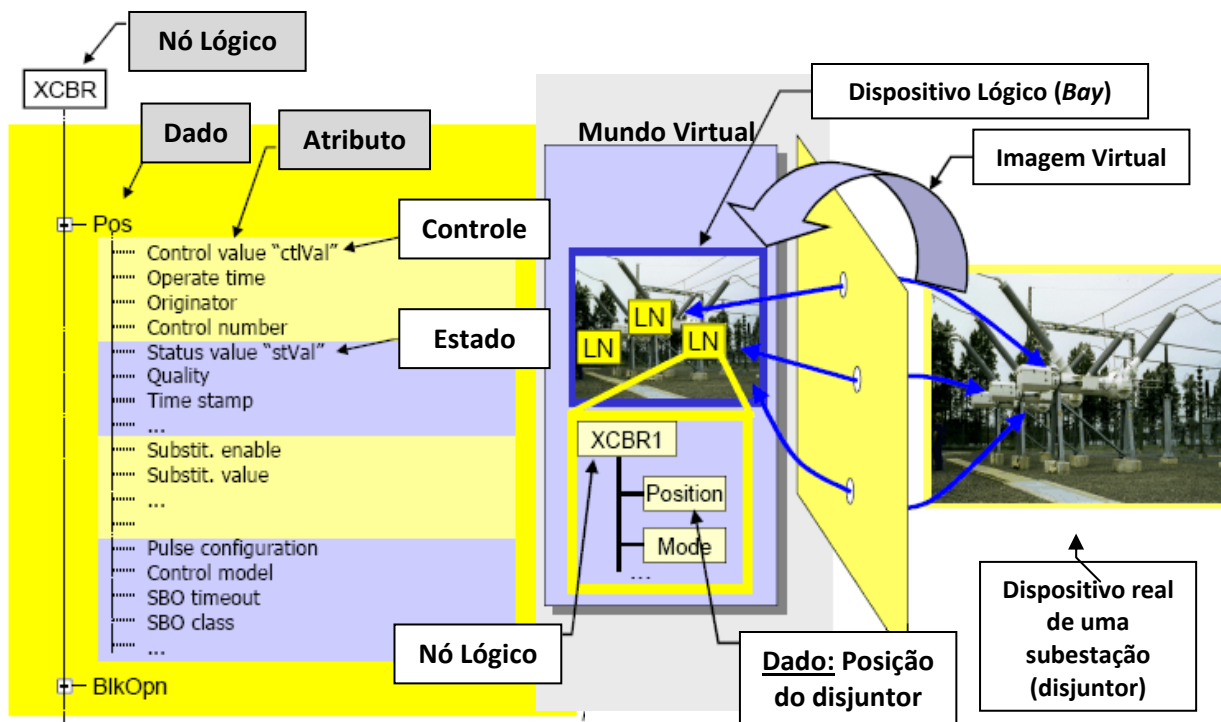


Figura 3.3 – Estrutura do nó lógico XCBR (imagem virtual de um disjuntor)
 Fonte: (IEC, 2003d)

A primeira edição da parte 7-4 do IEC 61850 (IEC, 2003a) define aproximadamente 92 nós lógicos, agrupados em categorias funcionais conforme apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Categorias de Nós Lógicos
 Fonte: (IEC, 2003a)

Grupo Indicador	Grupo de Nó Lógico
A	Controle Automático
C	Controle Supervisionado
G	Função Genérica
I	Interfaces e Arquivamento
L	Nós Lógicos do Sistema
M	Medição
P	Funções de Proteção
R	Funções Relacionadas a Proteção
S	Sensores, Monitoração
T	Transformador de Instrumentos
X	Disjuntores e Chaves Seccionadoras
Y	Transformadores de Potência e Funções Relacionadas
Z	Outros Equipamentos do Sistema de Potência

Todos os nós lógicos e seus respectivos dados são detalhados na parte 7-4 do IEC 61850 (IEC, 2003a). Na primeira edição deste padrão, foram definidos 28 LNs para funções de proteção e 10 LNs para funções relacionadas a proteção.

Um IED que segue o padrão IEC 61850 possui uma estrutura genérica de nós lógicos, que define as informações específicas e necessárias para o SAS. Esta estrutura é apresentada na Figura 3.4.

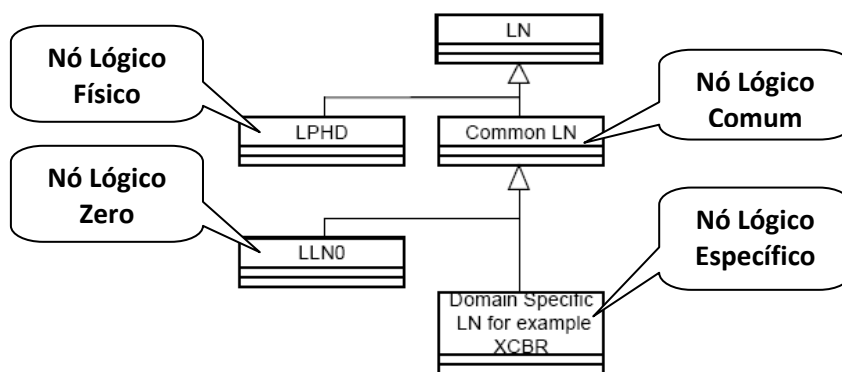


Figura 3.4 – Estrutura genérica – Relação de Nós Lógicos de um IED
Fonte: (IEC, 2003a)

Os índices apresentados na Figura 3.4 são referidos como:

- **LPHD**: nó lógico independente do domínio de aplicação que gerencia as informações relacionadas ao IED.
- **LLN0**: nó lógico que gerencia as informações relacionadas aos dispositivos lógicos.
- **Common LN**: define uma estrutura comum onde os dados mandatórios (M), são herdados pelo nó lógico zero (LLN0) e por todos os nós lógicos habilitados dentro do dispositivo lógico de um IED.

Todos os nós lógicos definidos dentro da parte 7-4 do IEC 61850 (IEC, 2003a) são considerados especializações do nó lógico comum. A Figura 3.5 apresenta um exemplo de dados relacionados ao nó lógico de teleproteção PSCH, onde são descritos o nome, tipo de atributos e características.

Dados Mandatórios do Nó Lógico Comum

Common Logical Node class				
Attribute Name	Attr. Type	Explanation	T	M/O
LNNName		Shall be inherited from Logical-Node Class (see IEC 61850-7-2)		
Data				
<i>Mandatory Logical Node Information (Shall be inherited by ALL LN but LPHD)</i>				
Mod	INC	Mode		M
Beh	INS	Behaviour		M
Health	INS	Health		M
NamPlt	LPL	Name plate		M

Nó Lógico de Teleproteção

PSCH class				
Attribute Name	Attr. Type	Explanation	T	M/O
LNNName		Shall be inherited from Logical-Node Class (see IEC 61850-7-2)		
Data				
<i>Common Logical Node Information</i>				
		LN shall inherit all Mandatory Data from Common Logical Node Class		M
OpCntRs	INC	Resetable operation counter		O
Status Information				
ProTx	SPS	Teleprotection signal transmitted	T	M
ProRx	SPS	Teleprotection signal received	T	M
Str	ACD	Carrier Send		M
Op	ACT	Operate	T	M

Figura 3.5 – Dados do nó lógico de Teleproteção - PSCH
 Fonte: (IEC, 2003a)

Os indicadores numéricos destacados na Figura 3.5, descrevem os dados relevantes do nó lógico, conforme é apresenta abaixo:

- 1) Nome do Dado. Por exemplo: “ProTx” para o sinal transmitido da teleproteção.
- 2) Tipo de atributos – Classe de dados Comum (CDC), que define a estrutura dos dados do nó lógico.
- 3) Explicação da funcionalidade do dado.
- 4) T: significa que o estado dos dados com esta designação é momentâneo e deve ser registrado ou informado.
- 5) M/O: define se os dados são Mandatórios (M) ou Opcionais (O).

Na Tabela 3.3, apresenta-se uma lista das principais funções de proteção e os respectivos nós lógicos.

Tabela 3.3 – Lista dos principais nós lógicos de proteção

Função de Proteção	Referência IEEE C37.2	Nó Lógico segundo IEC 61850 (parte 7-4)
Distância	21	PDIS
Volts/Hz	24	PVPH
Subtensão	27	PTUV
Sobretensão	59	PTOV
Direcional de Potência	32	PDPR
Perda de Excitação	40	PUEX
Sobrecarga	49	PTTR
Sobrecorrente Instantâneo	50	PIOC
Sobrecorrente Temporizado	51	PTOC
Direcional de Sobrecorrente	67	PTOC
Frequência	81	PTOF (sobrefrequência) PTUF (subfrequência)
Teleproteção (<i>carrier</i> ou fio piloto)	85	PSCH
Diferencial	87	PDIF

3.3.3 Modelos de Informação

De forma geral, a parte 7 do padrão IEC 61850, define como modelar a informação produzida e utilizada pelas aplicações e informações necessárias na interoperabilidade entre IEDs. O método utilizado é baseado em programação orientada a objetos.

A parte 7-4 (IEC, 2003a) define os nós lógicos e as correspondentes classes de dados. A parte 7-3 (IEC, 2003b) define as classes de dados comuns e a parte 7-2 (IEC, 2003c) define os modelos de serviços. Os nomes padronizados dos nós lógicos e os dados definem a semântica das informações que os IEDs trocam entre si. As classes de dados que compõe um nó lógico são agrupadas em categorias e classificadas por classes de dados comuns (CDC), que definem seus tipos de atributos. A figura 3.6 apresenta um exemplo de dados e atributos relacionados ao nó lógico de proteção de sobrecorrente PIOC.

PIOC class						
Attribute Name	Attr. Type	Explanation			T	M/O
LNNName		Shall be inherited from Logical-Node Class (see IEC 61850-7-2)				
Data						
<i>Common Logical Node Information</i>						
		LN shall inherit all Mandatory Data from Common Logical Node Class				M
OpCntRs	INC	Resetable operation counter				O
<i>Status Information</i>						
Str	ACD	Start				O
Op	ACT	Operate			T	M
<i>Settings</i>						
StrVal	ASG	Start Value				O

Figura 3.6 – Dados do nó lógico de Proteção de Sobrecorrente – PIOC
 Fonte: (IEC, 2003a)

Observa-se na Figura 3.6, que o dado mandatório “Op” do nó lógico PIOC, herda todos os atributos relacionados com a classe de dados comum ACT (*Protection Activation Information*). O dado “Op” representa a atuação da função de proteção. Os atributos associados à ACT são apresentados na Figura 3.7.

ACT class					
Attribute Name	Attribute Type	FC	TrgOp	Value/Value Range	M/O/C
DataName	Inherited from Data Class (see IEC 61850-7-2)				
DataAttribute					
<i>status</i>					
general	BOOLEAN	ST	dchg		M
phsA	BOOLEAN	ST	dchg		O
phsB	BOOLEAN	ST	dchg		O
phsC	BOOLEAN	ST	dchg		O
neut	BOOLEAN	ST	dchg		O
q	Quality	ST	qchg		M
t	TimeStamp	ST			M
<i>configuration, description and extension</i>					
operTm	TimeStamp	CF			O
d	VISIBLE STRING255	DC		Text	O
dU	UNICODE STRING255	DC			O
cdcNs	VISIBLE STRING255	EX			AC_DLND_A_M
cdcName	VISIBLE STRING255	EX			AC_DLND_A_M
dataNs	VISIBLE STRING255	EX			AC_DLN_M
Services					
As defined in Table 13					

Figura 3.7 – Atributos do dado “Op” do nó lógico PIOC
 Fonte: (IEC, 2003b)

Na lista de atributos disponíveis pela classe de dados comum ACT, aparecem tanto atributos mandatórios como atributos opcionais. Por exemplo, o atributo mandatório

general, destacado pelo indicador (1) na Figura 3.7, representa a atuação da função de proteção em quaisquer das fases do sistema. Este atributo possui um formato BOOLEAN de 0 ou 1 e uma limitação funcional ST (*Status Information*). A limitação funcional (FC – *Functional Constraint*) especifica o serviço que fornece o atributo em referência. Neste caso, ST representa um serviço de informação de estado.

O padrão IEC 61850 recomenda que pelo menos os atributos mandatórios dos respectivos dados mandatórios devem ser empregados por uma aplicação. Deste modo, o projetista deve decidir quais atributos são requeridos para satisfazer uma dada ou determinada funcionalidade.

Vale ressaltar que a organização hierárquica dos dados através da concatenação dos nomes das instâncias, nós lógicos, dados e atributos de dados, permite criar o modelo de informação hierárquica (*ObjectReference*) ou árvore hierárquica, como ilustrado na Figura 3.8.

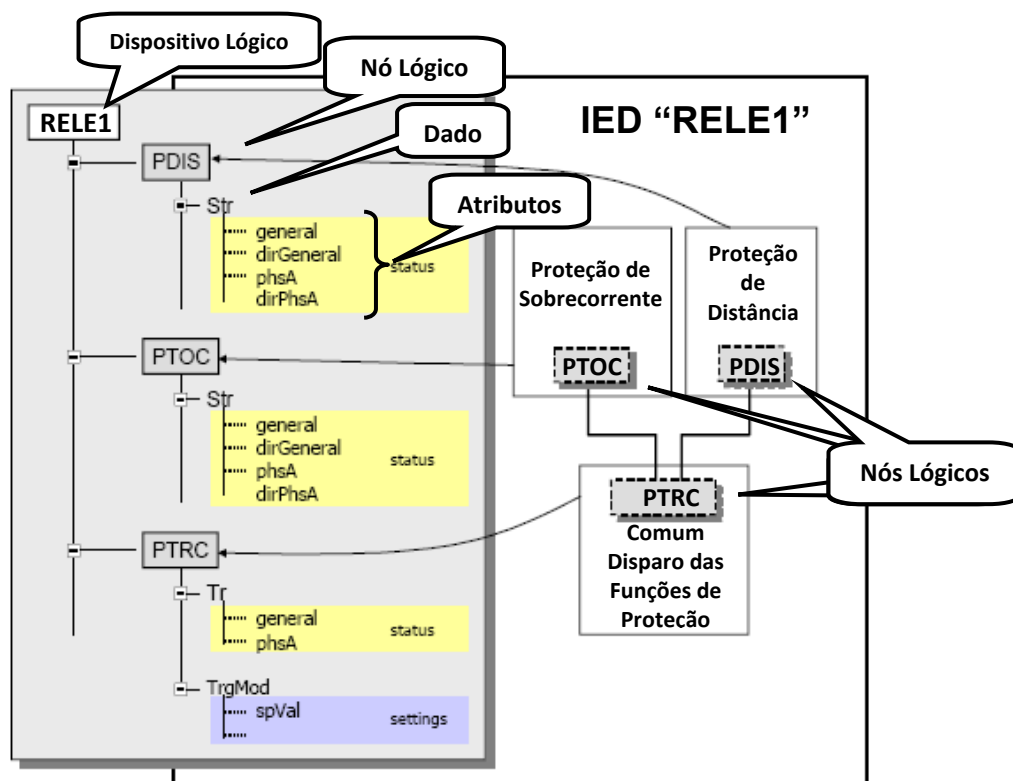


Figura 3.8 – Exemplo de árvore hierárquica implementada num IED
Fonte: (IEC, 2003d)

De acordo com a parte 6 do IEC 61850 (IEC, 2004a), o modelo de informação é usado como uma base para a linguagem de configuração da subestação (SCL – *System Configuration Language*).

3.3.4 Modelos de Serviços

A informação contida em um modelo hierárquico é comunicada através de interfaces de serviços de comunicação abstrata (ACSI – *Abstract Communication Service Interface*). Na parte 7-2 do padrão IEC 61850 (IEC, 2003c), são definidos dois tipos de interfaces, que são Cliente – Servidor e *peer-to-peer*. Ambos os modelos são apresentados na Figura 3.9.

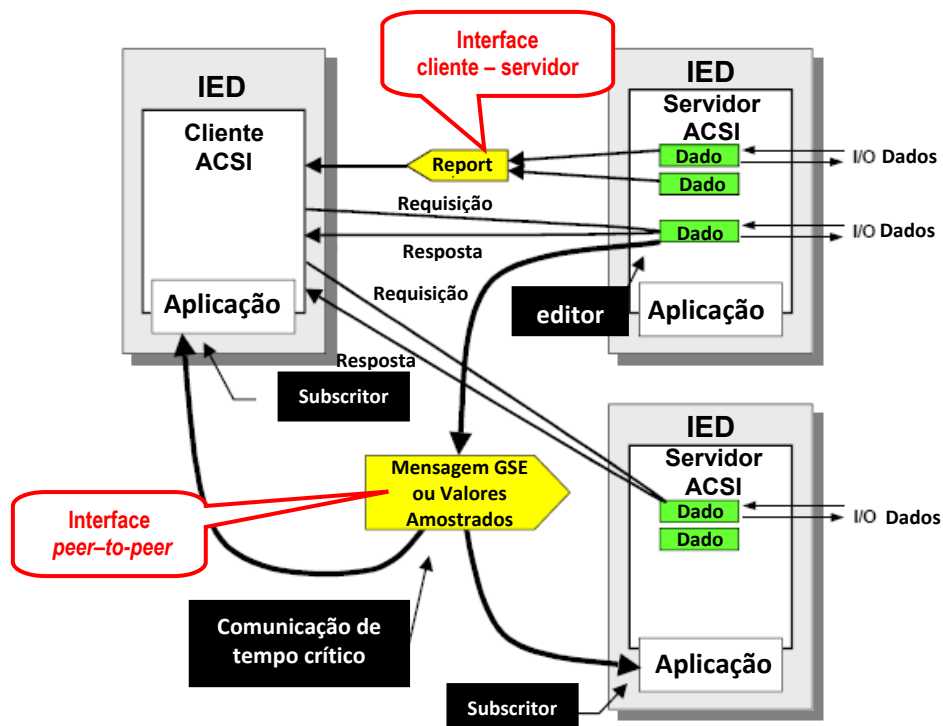


Figura 3.9 – Métodos de Comunicação ACSI
Fonte: (IEC, 2003d)

3.3.4.1 Interface *peer-to-peer*

É uma interface abstrata para rápida e confiável distribuição de eventos em todo o sistema, entre uma aplicação de um dispositivo e muitas aplicações remotas em diferentes dispositivos (editor/subscritor). A comunicação *peer-to-peer* provê serviços para troca de mensagens GOOSE de tipo *multicast*, e para troca de valores amostrados (*sampled values*) de tipo *multicast* ou *unicast*. Conforme indicado na Figura 3.10(a) e 3.10(b), estes modelos de dados são publicados e agrupados em conjuntos chamados *data sets*.

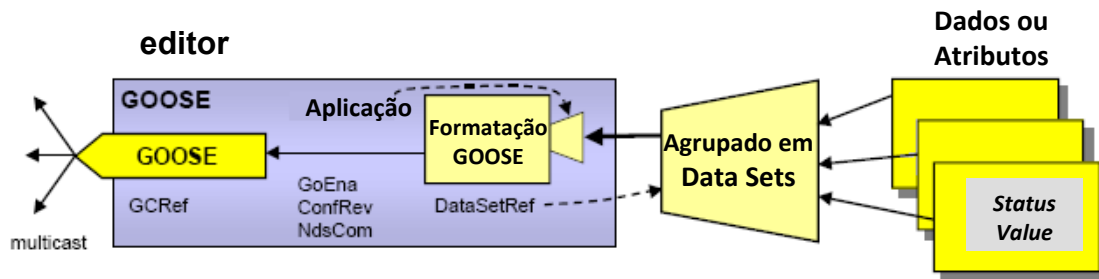


Figura 3.10(a) – Modelo de comunicação *peer-to-peer* para mensagens GOOSE
 Fonte: (IEC, 2003d)

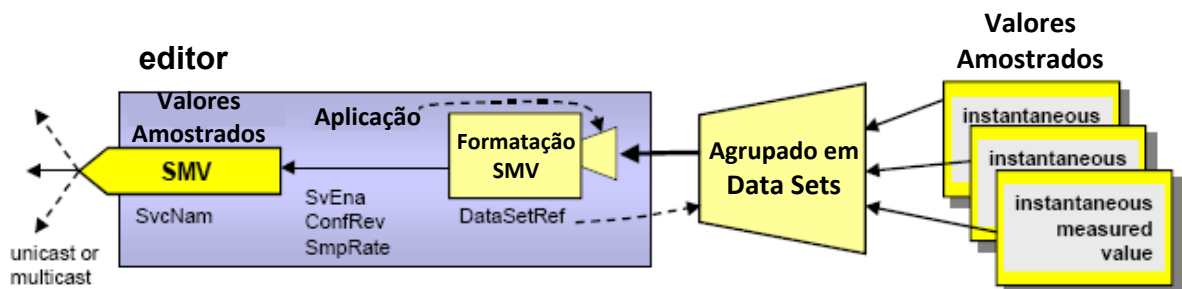


Figura 3.10(b) – Modelo de comunicação *peer-to-peer* para valores amostrados
 Fonte: (IEC, 2003d)

3.3.5 Requisitos de Tempo

3.3.5.1 Tempo de Transferência das Mensagens

Na parte 90-1 do IEC 61850 (IEC, 2010) é definido o tempo de transferência (*transfer time*) de uma mensagem como o tempo gasto na comunicação entre aplicações de dois dispositivos físicos (IEDs). Em outras palavras, é o tempo desde o instante que o dispositivo transmissor coloca o quadro de dados na parte superior da pilha de transmissão, até o instante que o dispositivo receptor extrai os dados da sua pilha de recepção. Conforme indicado na Figura 3.11, o tempo de transferência (t), entre dois dispositivos físicos, é composto pela soma dos tempos t_a , t_b e t_c . Os tempos t_a e t_c correspondem aos tempos de codificação e decodificação do quadro em cada dispositivo respectivamente. O tempo t_b , é o tempo de propagação do quadro no meio físico utilizado.

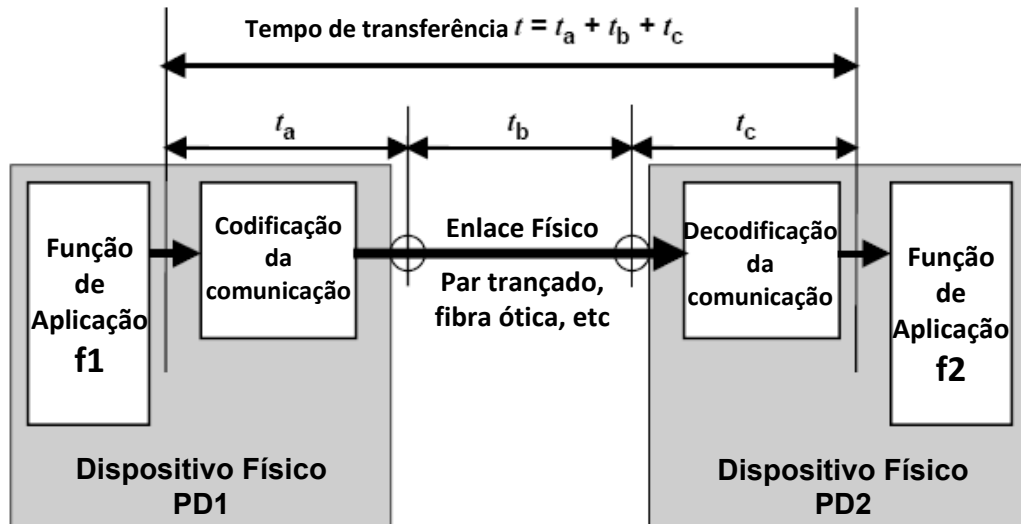


Figura 3.11 – Tempo de transferência sobre comunicação serial
 Fonte: (IEC, 2010)

Vale ressaltar, que o tempo t_b apresentado na Figura 3.11, deve incluir o tempo gasto pelos roteadores e/ou outros dispositivos que compreendem a rede de telecomunicações. No caso da conexão direta entre dispositivos, o tempo t_b é considerado desprezível, pois este depende unicamente da velocidade de propagação do sinal no enlace, aproximadamente igual à velocidade da luz.

Dentro da parte 90-1 do IEC 61850 (IEC, 2010), apresenta-se uma analogia do tempo de transferência, entre o esquema com interface serial empregando mensagens GOOSE, conforme foi apresentado na Figura 3.11, e o esquema convencional utilizando entradas e saídas binárias dos dispositivos, conforme se apresenta na Figura 3.12.

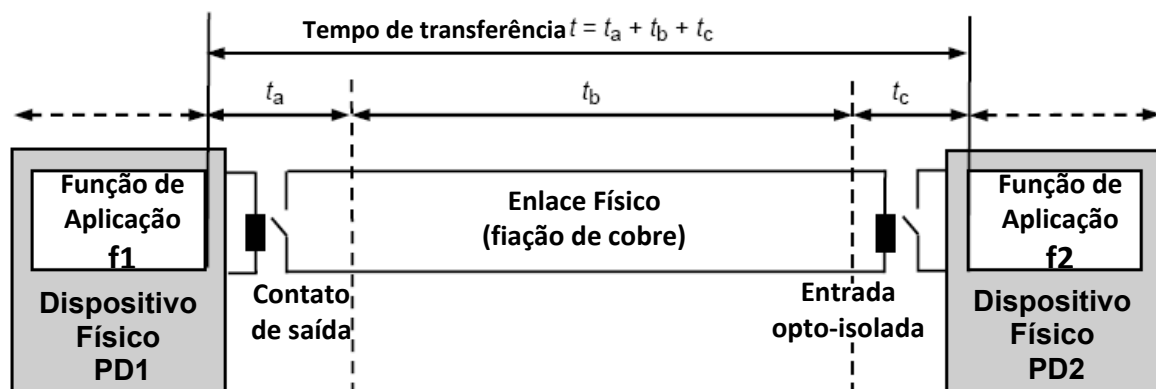


Figura 3.12 – Tempo de transferência com interface convencional
 Fonte: (IEC, 2010)

No esquema da Figura 3.12, observa-se que as entradas e saídas binárias dos relés substituem os blocos de codificação e decodificação, representados no esquema da Figura 3.11. Apostolov (2008) cita como valores típicos, um tempo de 3ms na operação de um contato de saída e entre 2ms a 8ms o tempo de *pick-up* de uma entrada opto-isolada de um relé.

A partir, do exposto nas Figuras 3.11 e 3.12, o IEC 61850-90-1 aplica o mesmo raciocínio na determinação do tempo de transferência entre dispositivos remotos. Este caso está tipicamente relacionado com os esquemas de teleproteção de linhas de transmissão. Conforme ilustrado na Figura 3.13, o tempo tb que no esquema da Figura 3.12 representava unicamente o tempo gasto na conexão física entre dispositivos, agora representa os atrasos nos diferentes dispositivos envolvidos nas interfaces do esquema de teleproteção.

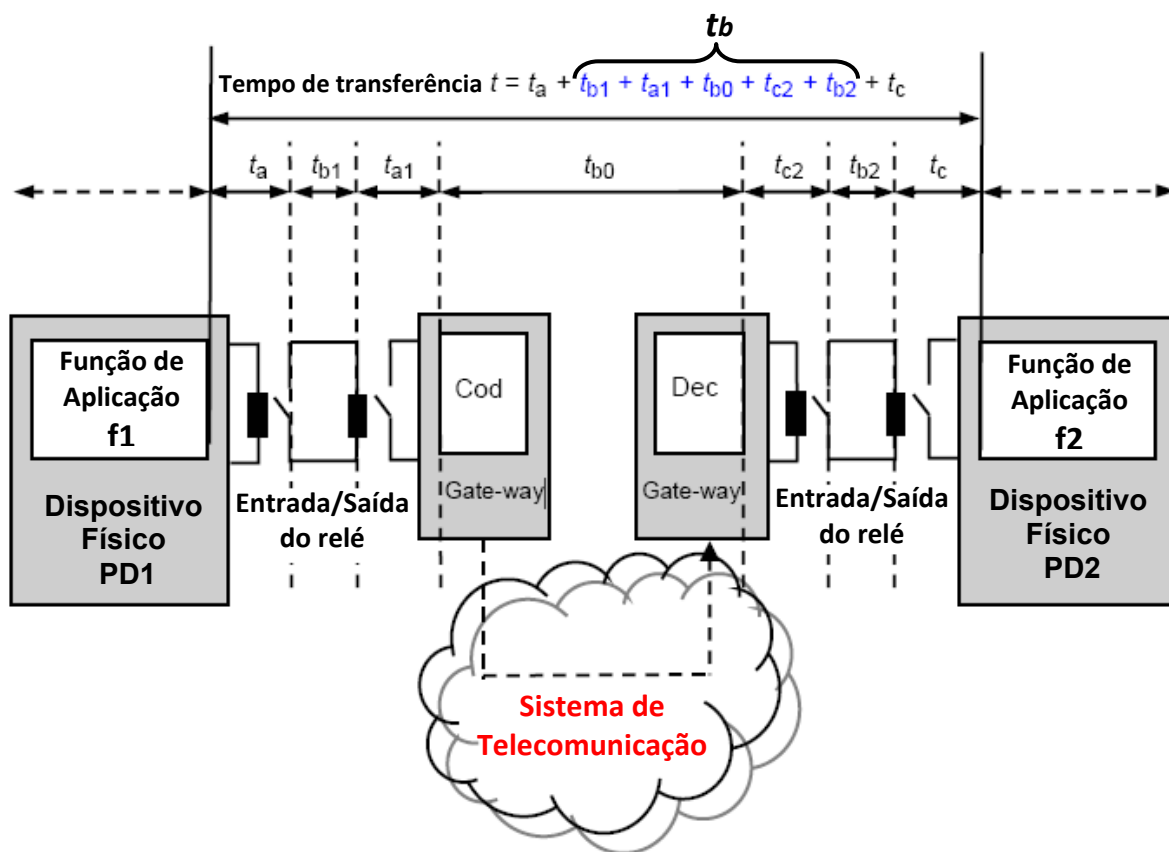


Figura 3.13 – Tempo de transferência com interface convencional – Esquema de teleproteção
Fonte: (IEC, 2010)

O padrão IEC 61850 recomenda executar testes e verificações do tempo de transferência durante os ensaios de aceitação em campo. Isto se justifica devido à possível mescla de dispositivos físicos e equipamentos de rede de diversos fabricantes.

3.3.5.2 Tipos de Mensagens

Enlaces distintos de comunicação, dentro do SAS, são requeridos para transportar mensagens de complexidade variada. Os tipos de mensagens transportados variam de acordo com as condições operativas da subestação e do sistema. Na parte 5 do padrão IEC 61850 (IEC, 2003e), definem-se dois grupos de classe de desempenho para as mensagens, conforme se detalha a seguir:

- Classes de desempenho para propósitos de controle e proteção. Nesta categoria, destacam-se as seguintes classes:
 - **Classe P1:** aplicada em *bays* de distribuição,
 - **Classe P2:** aplicada em *bays* de transmissão,
 - **Classe P3:** aplicada em *bays* de transmissão com características de sincronização de desempenho superior.

- Classes de desempenho para propósitos de medição e qualidade da energia:
 - **Classe M1:** medição com classe de precisão 0.5 (IEC 62053-22) e 0.2 (IEC 60044-8), e medição de qualidade até 5th harmônico.
 - **Classe M2:** medição com classe de precisão 0.2 (IEC 62053-22) e 0.1 (IEC 60044-8), e medição de qualidade até 13th harmônico.
 - **Classe M3:** medição de qualidade até 40th harmônico.

A relação estabelecida pelo IEC 61850-5 entre os tipos de mensagens e as diferentes classes de desempenho, é apresentada na Tabela 3.4

Tabela 3.4 – Tipos de Mensagens
Fonte: (IEC, 2003e)

Tipos de mensagens e Classes de Desempenhos			
Tipo	Descrição	Classe	Tempo (ms)
1	Mensagens de alta velocidade:		
1A	Disparos, interbloqueios, interdisparos, discriminação lógica entre funções de proteção	P1	8,33
		P2/P3	4,16
1B	Outros: fechamentos, religamentos, partidas, paradas, bloqueios, desbloqueios, permissivos, variações de estado (mensagens típicas para interfaces 3, 8 e 9 da Figura 3.1)	P1	100
		P2/P3	20
2	Mensagens de velocidade média: Informação de estados, medições simples r.m.s. (mensagens típicas para interfaces 3, 8 e 9 da Figura 3.1)	---	<100
3	Mensagens lentas: Transmissão de registros de eventos, leituras e mudanças de ajustes, alarmes e medições não elétricas (mensagens típicas para todas as interfaces da Figura 3.1, com exceção de 2, 10 e 11)	---	<500
4	Grande volume de dados: Dados digitalizados dos transdutores TCs e TPs		
	Tensão	P1	10
	Corrente		
	Tensão	P2/P3	3
Corrente			
5	Funções de transferência de arquivos: Extensos arquivos de dados para registros, supervisão e ajustes.	---	≥ 1000

Além dos tipos de mensagens descritos na Tabela 3.4, ainda existem:

- **Tipo 6 (mensagens de sincronização de tempo):** mensagens empregadas para sincronizar os relógios dos IEDs dentro de um SAS. Sua classe de precisão é um requisito funcional e depende do propósito, conforme descrito nos itens a seguir:

a) Sincronização de IEDs para eventos de controle e proteção – Vide Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Categorização das mensagens de sincronização – Parte 1
Fonte: (IEC, 2003e)

Classe de desempenho	Exatidão (ms)	Finalidade
T1	+ - 1	Estampa de tempo dos eventos
T2	+ - 0,1	Estampa de tempo quando do cruzamento por zero e de dados para o <i>synchrocheck</i> distribuído. Estampa de tempo para suportar o ponto sobre a onda na operação do disjuntor.

- b) Sincronização de IEDs para transformadores de instrumentação – Vide Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Categorização das mensagens de sincronização – Parte 2

Fonte: (IEC, 2003e)

Classe de desempenho	Exatidão (µs)	Referência		Ângulo de fase (50Hz)	Ângulo de fase (60Hz)	Localização da falta (m)
T3	+ - 25	P1		27	32	7500
T4	+ - 4	P2	M1	4	5	1200
T5	+ - 1	P3	M2/3	1	1	300

- **Tipo 7 (mensagens de comando com controle ao acesso):** mensagem utilizada para transferir mensagens tipo 3, com controle adicional de acesso (*password* e/ou procedimentos de verificação).

Para assegurar que estes tempos de transmissão sejam atendidos nas diferentes condições de operação e contingências da subestação, o comportamento dinâmico do sistema deve ser estudado na etapa de planificação. Devido à diversidade de projetos existentes e aos diferentes esquemas de proteção e funções de controle, cada projeto de uma subestação deve ser avaliado separadamente.

3.3.6 Mensagens GOOSE

As mensagens GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*), são mensagens de alta prioridade na transmissão. Dentro do contexto da parte 8-1 do IEC 61850 (IEC, 2004b), consideram-se como mensagens GOOSE, às mensagens tipo 1 e 1A de alta velocidade e prioridade, conforme foram descritas na Tabela 3.4.

As mensagens GOOSE contemplam informações que permite ao dispositivo receptor tomar conhecimento da ocorrência de um novo evento, sabendo qual foi e quando ocorreu este evento. Com estas informações, o IED deve tomar uma ação apropriada. Apostolov (2008) destaca que uma mensagem GOOSE não deve ser considerada como um comando entre IEDs, dado que esta não diz para o dispositivo receptor qual ação tomar.

Destacam-se a seguir, as principais características de uma mensagem GOOSE:

- Conforme apresentado no esquema da Figura 3.14, uma mensagem GOOSE é mapeada diretamente em quadros *ethernet* usando o cabeçalho *ethertype* com o valor 88-B8. Segundo o IEEE Std. 802.1Q (IEEE, 2003), o referido cabeçalho é reservado para aplicações da parte 8-1 do IEC 61850 (IEC, 2004b). Esta característica otimiza a decodificação da mensagem no dispositivo receptor, representando menor tempo de tratamento e transferência da mensagem.

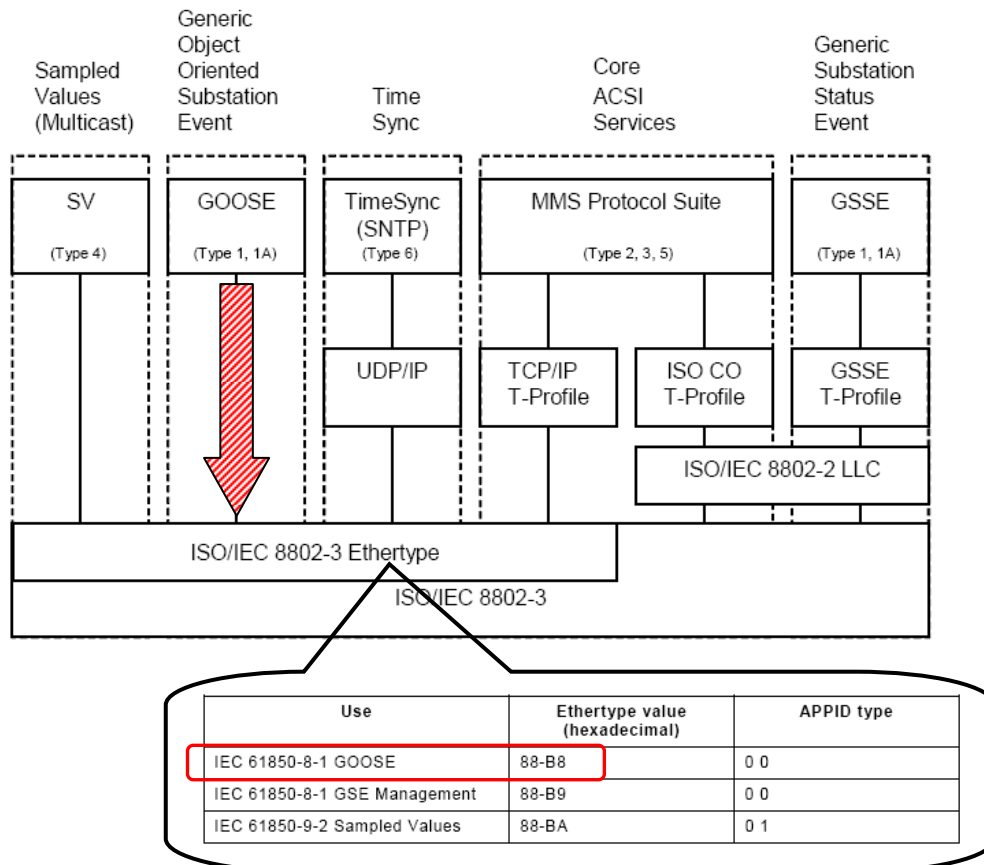


Figura 3.14 – Mapeamento das mensagens GOOSE
Fonte: (IEC, 2004b)

- Uma mensagem GOOSE utiliza o método de transmissão *multicast* dentro de uma rede LAN. Conforme ilustrado na Figura 3.15, em uma transmissão *multicast* a mensagem é copiada e enviada de um dispositivo transmissor para um conjunto específico de IEDs, ou dispositivos receptores.

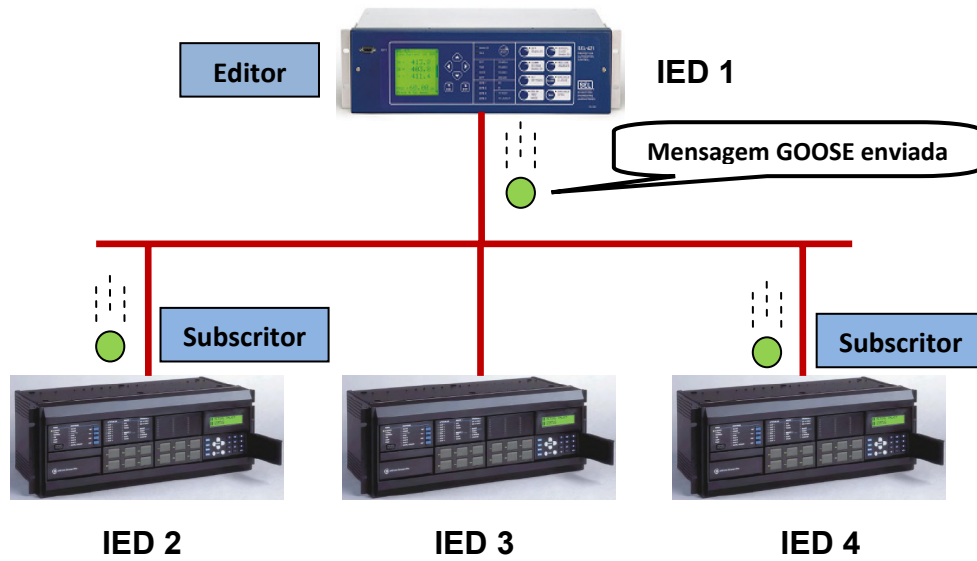
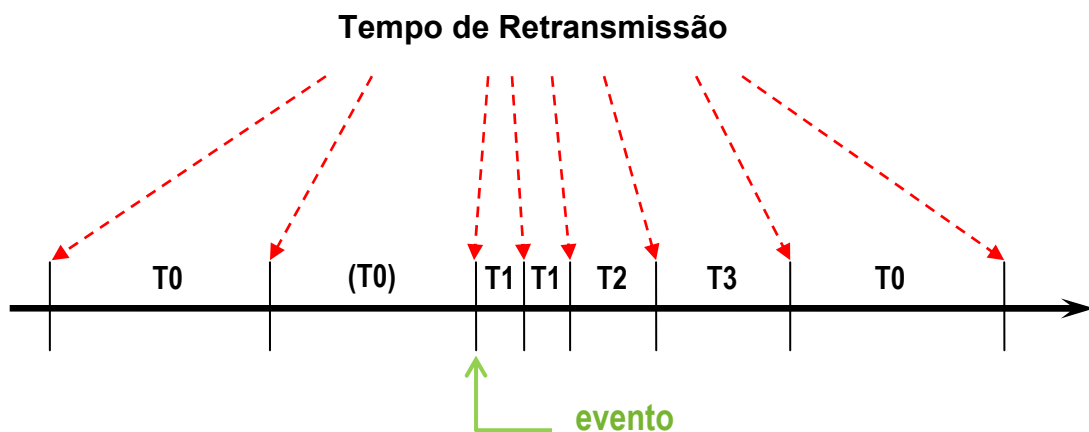


Figura 3.15 – Transmissão *multicast* de uma mensagem GOOSE

- De acordo ao modelo de serviço GOOSE, definido na parte 7-2 do IEC 61850 (IEC, 2003c), a transmissão de uma mensagem GOOSE deve ser rápida e confiável. Conforme ilustrado na Figura 3.16, esta confiabilidade está relacionada com a característica de retransmissão da mensagem em curtos intervalos de tempo T1, da ordem de poucos milisegundos, no instante da ocorrência do evento.



- T0 retransmissão em condições estáveis (sem evento durante muito tempo).
- (T0) retransmissão em condições estáveis sendo interrompida por um evento.
- T1 tempos de retransmissão mais curtos após o evento.
- T2, T3 incremento do tempo de transmissão até alcançar as condições estáveis.

Figura 3.16 – Tempo de transmissão de uma mensagem GOOSE
Fonte: (IEC, 2004b)

Conforme destacado por T2 e T3 na Figura 3.16, observa-se que os intervalos de retransmissão T1 vão incrementando até alcançar um tempo máximo T0, que representa a retransmissão da mensagem, já em condições estáveis do sistema. Cabe ressaltar que cada mensagem na sequência de retransmissão transmite um parâmetro conhecido como “tempo permitido para viver” (*timeAllowedToLive*), que informa ao dispositivo receptor o máximo tempo que deve aguardar pelo recebimento da próxima retransmissão. Se a nova mensagem não é recebida dentro deste intervalo, o dispositivo receptor assume que a informação foi perdida.

- Para melhorar a segurança e o desempenho dos esquemas de proteção, implementados em um SAS, as mensagens GOOSE utilizam o protocolo VLAN (*Virtual Local Area Network*) sobre redes *ethernet*. De acordo com a norma IEEE Std. 802.1Q (IEEE, 2003), este protocolo permite a inserção de um identificador (*tag*) de 4 bytes dentro do quadro *ethernet*, que permite aos dispositivos da rede identificar a VLAN da qual o quadro pertence. Desta forma, é possível criar grupos lógicos ou redes virtuais entre IEDs que se encontram conectados fisicamente em uma mesma rede LAN. O uso de grupos lógicos permite que as mensagens de alta prioridade melhorem o desempenho de uma função de proteção distribuída em vários IEDs, especialmente no instante da ocorrência da falta, onde a rede LAN pode experimentar um elevado tráfego de mensagens. A Figura 3.17 ilustra a implementação das VLANs no quadro *ethernet*.

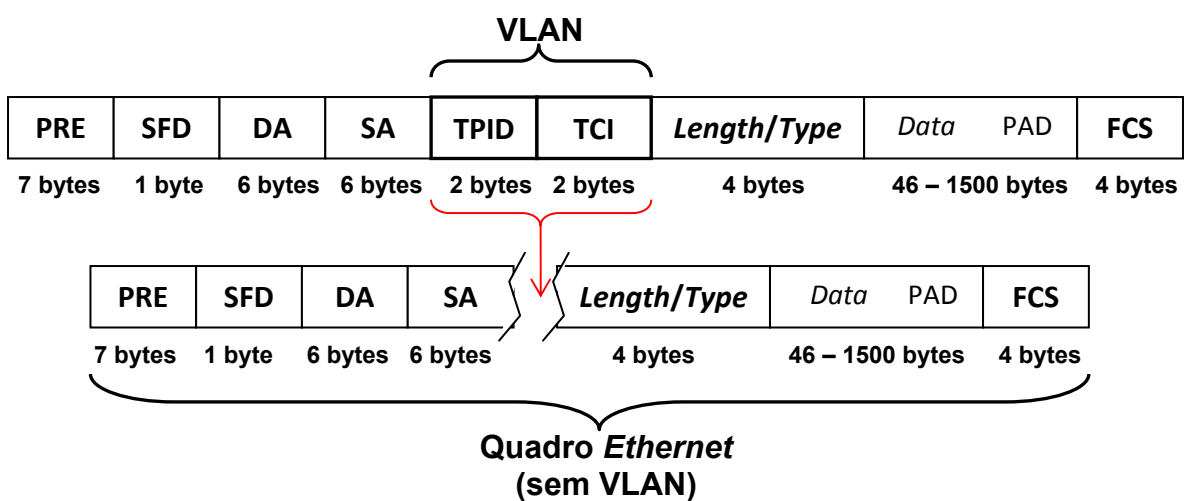


Figura 3.17 – Inserção da VLAN dentro do quadro *ethernet*

3.4 Considerações Finais

Neste capítulo abordaram-se os aspectos básicos relacionados com modelos de informação definidos no padrão IEC 61850. Com a identificação dos referidos aspectos, tem-se uma guia para parametrizar a semântica das mensagens GOOSE a serem utilizadas nos testes de interoperabilidade dentro deste trabalho de dissertação.

Os outros aspectos abordados, relacionados aos modelos de serviços de interface e requisitos de tempo na transferência de mensagens, são considerados importantes para avaliar o desempenho da interoperabilidade.

Capítulo 4

Simulador Digital em Tempo Real - RTDS

4.1 Considerações Iniciais

Este capítulo faz uma introdução sobre o Simulador Digital em Tempo Real (RTDS – *Real-Time Digital Simulator*), sua operação, seus principais componentes e como estes interagem entre si para o funcionamento do RTDS.

Estas informações visam subsidiar ao leitor quanto os requisitos para o entendimento de capítulos subsequentes onde esta ferramenta será aplicada na validação do trabalho de dissertação.

4.2 RTDS

O RTDS é um equipamento especialmente desenvolvido para estudos em tempo real de fenômenos transitórios eletromagnéticos pertinentes aos sistemas elétricos de potência.

Além de ser utilizado como plataforma computacional de simulação, este equipamento disponibiliza respostas em tempo real para aplicações de testes de malha fechada (*hardware-in-the-loop*). Desta forma, dispositivos de controle e proteção são conectados ao RTDS para interações com simulações em sistemas elétricos de potência, considerando-se esta sua principal característica.

A estrutura computacional do RTDS se dá por processamento distribuído entre placas ou cartões, que podem ser comparados a computadores. Deste modo, constitui-se de hardware e software.

4.2.1 Hardware do RTDS

O hardware do RTDS é composto de vários Processadores de Sinal Digital (DSPs – *Digital Signal Processors*) em arquitetura de processamento paralelo. Este processamento possibilita alcançar a velocidade computacional requerida para manter sua operação contínua em tempo real.

Os cartões que compõe o hardware do RTDS estão montados em unidades chamadas *racks*, que são abrigadas em armários de diferentes dimensões. Cada armário do RTDS possui no máximo três destes *racks* dependendo do modelo fornecido pelo

fabricante RTDS–*Technologies*. Existem quatro modelos típicos de RTDS, segundo ilustrado na Figura 4.1.

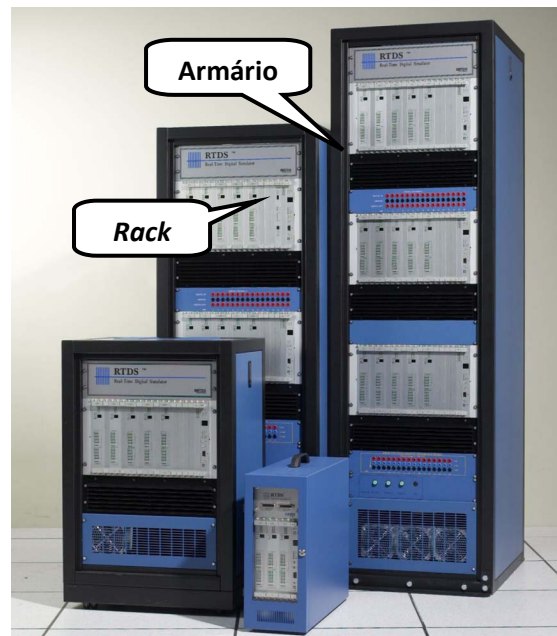


Figura 4.1 – Modelos típicos do RTDS

Além dos cartões de processamento, a estrutura do hardware do RTDS possui outros cartões de interface de comunicação e interface de sinais analógicos e digitais, que são utilizados na interação com os dispositivos externos de proteção e controle.

Na Figura 4.2 ilustra-se a estrutura operacional do hardware do RTDS. Nesta figura, pode-se observar que só os cartões GTWIF e GTNET estabelecem a interface de comunicação entre o RTDS e os dispositivos externos ligados na rede LAN. O cartão GTWIF troca informações unicamente com o computador de Interface Homem - Máquina – IHM onde o programa RSCAD está sendo utilizado. Por outro lado, o cartão GTNET pode estabelecer uma comunicação *peer-to-peer* com um ou vários IEDs ligados na rede LAN através de protocolos abertos de comunicação, tais como DNP3 e aplicações baseadas no padrão IEC 61850. Este cartão, igual que qualquer outro IED ligado na rede, poderá ser sincronizado com o sistema GPS (*Global Position System*) através de um servidor NTP (*Network Time Protocol*).

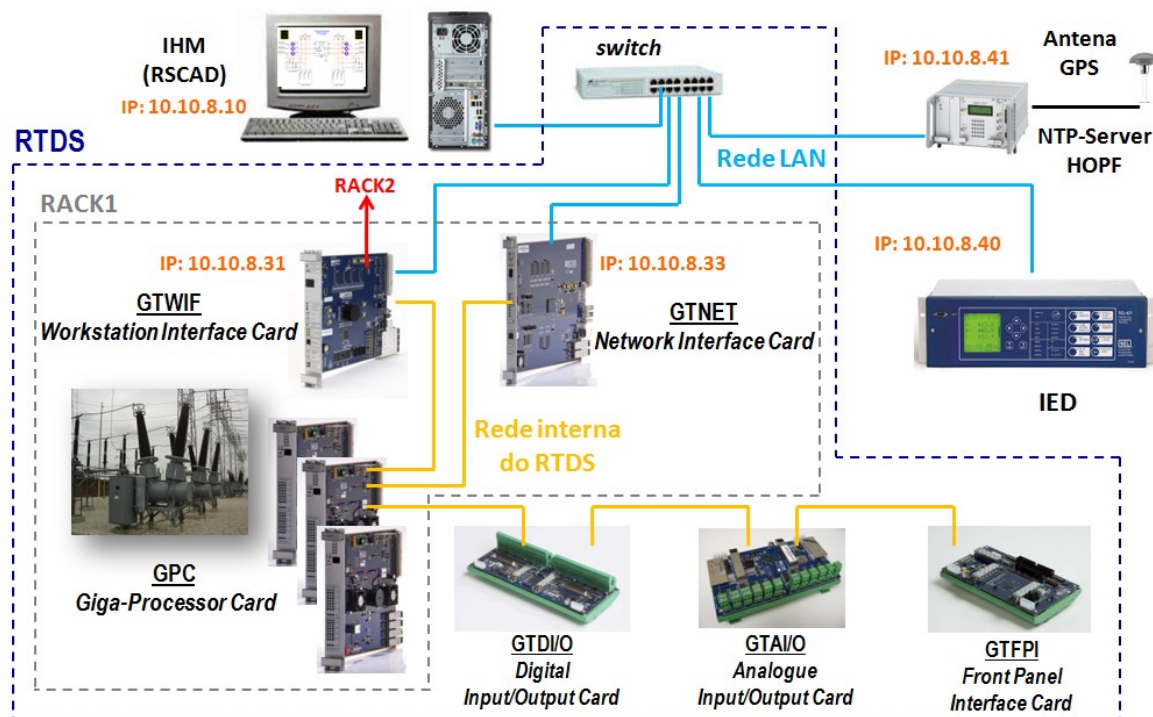


Figura 4.2 – Estrutura do Hardware do RTDS

Observa-se na Figura 4.2, que dentro da estrutura do RTDS todos os cartões de interface externa GTWIF, GTNET, GTAI/O, GTDI/O e GTFPI, estão comunicando diretamente com os cartões de processamento GPC por meio de uma rede interna de fibra ótica.

Detalha-se a seguir a funcionalidade de cada cartão utilizado na estrutura do hardware do RTDS:

a) Cartão GTWIF (*WorkStation Interface Card*)

Este cartão possui varias funcionalidades, dentre as quais, destacam-se: interface de comunicação via *ethernet* TCP/IP entre os *racks* do RTDS e o computador de IHM, comunicação e sincronização de dois ou mais *racks* em simulações *multi-rack*, comunicação entre os cartões GPC do mesmo *rack* e teste automático de diagnóstico em todos os cartões pertencentes ao mesmo *rack*.

b) Cartão GPC (*Giga-Processor Card*)

Cartão de processamento usado na resolução dos modelos numéricos que representam os componentes do sistema de controle e os componentes do sistema de potência dentro do RTDS. Um *rack* tipicamente dispõe de 2 a 6 cartões GPC, sendo que

cada cartão possui dois processadores IBM modelo PC750GX de 1 GHz. O cartão GPC executa as funcionalidades de alocação de componentes de potência e controle dentro dos processadores no instante da simulação, resolução da rede do sistema de potência e comunicação com os cartões I/O (GTAO, GTAI, GTDO, GTDI, GTFPI e GTNET).

c) Cartão GTNET (*Network Interface Card*)

Este cartão é aplicado como um conversor de protocolos o qual recebe pacotes de informação da rede LAN, extrai os dados contidos e envia estes dados para o cartão GPC. Da mesma forma, dados gerados durante a simulação podem ser enviados do cartão GPC para o cartão GTNET onde serão empacotados e enviados para a rede LAN.

O cartão GTNET está projetado para suportar quatro diferentes protocolos que são GSE/GOOSE (IEC-61850-8-1), *Sampled Values* (IEC-61850-9-2), DNP3 e *Playback*. Somente um destes protocolos pode ser usado em um determinado teste.

d) Cartão GTA0 (*Gigabit Transceiver Analogue Output Card*)

Este cartão é utilizado na interface de sinais analógicos do RTDS para um dispositivo externo. Sua estrutura disponibiliza 12 canais de saída analógica com tensão de ± 10 Volts AC, sendo que cada canal é associado internamente com um conversor D/A de 16 *bits*.

e) Cartão GTAI (*Gigabit Transceiver Analogue Input Card*)

Este cartão é utilizado na interface de sinais analógicos de um dispositivo externo para o RTDS. Sua estrutura disponibiliza 12 canais de entrada analógica com tensão de ± 10 Volts AC, sendo que cada canal é associado internamente com um conversor A/D de 16 *bits*.

f) Cartão GTDO (*Gigabit Transceiver Digital Output Card*)

Este cartão é utilizado na interface de sinais digitais do RTDS para um dispositivo externo. Sua estrutura disponibiliza 64 saídas digitais isoladas opticamente e com faixa de tensão de operação de +5 a +24 Volts DC, fornecidos externamente.

g) Cartão GTDI (*Gigabit Transceiver Digital Input Card*)

Este cartão é utilizado na interface de sinais digitais de um dispositivo externo para o RTDS. Sua estrutura disponibiliza 64 entradas digitais isoladas opticamente.

h) Cartão GTFPI (*Front Panel Interface Card*)

Este cartão é utilizado na interface do cartão GPC com os canais de sinais digital I/O e os canais de alta tensão disponíveis no painel frontal do RTDS. Disponibilizam-se 16 canais digitais de saída, 16 canais digitais de entrada e 16 canais de alta tensão DC de 0 a 250 Volts.

4.2.2 Software do RTDS

O software do RTDS está organizado em três níveis hierárquicos, que são:

- alto nível → Interface gráfica com o usuário.
- nível intermédio → Sistema operacional e Compilador.
- baixo nível → Componentes da Biblioteca.

O usuário do RTDS unicamente tem acesso ao alto nível do software através do programa RSCAD. Através das aplicações deste nível são acessados automaticamente os níveis inferiores do software.

4.2.2.1 RSCAD

O RSCAD é um programa especialmente desenvolvido para prover uma interface gráfica ao usuário na modelagem e simulação de casos dentro do RTDS. Os principais módulos que conformam a estrutura operacional deste programa são ilustrados na Figura 4.3.

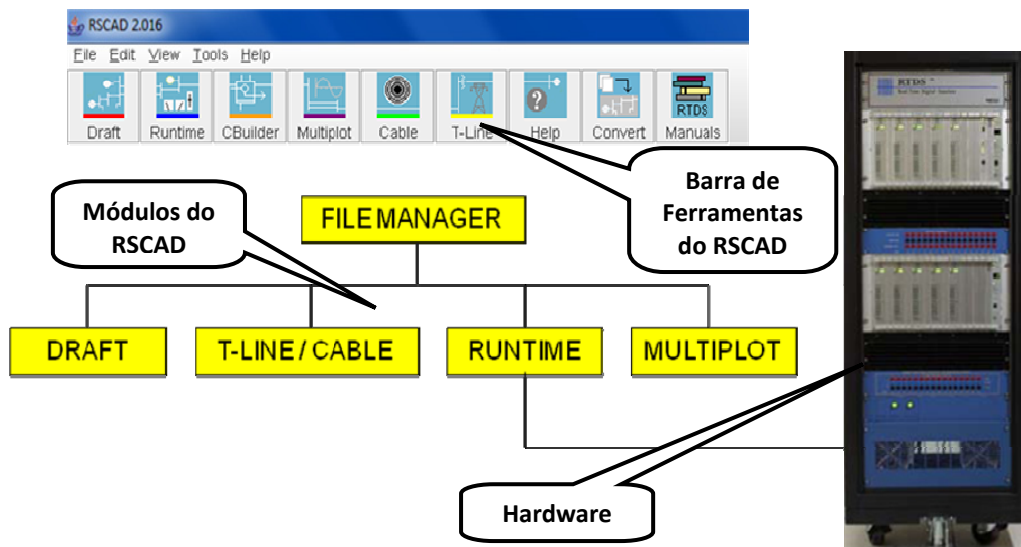


Figura 4.3 – Módulos do RSCAD

Detalha-se a seguir a funcionalidade de cada módulo utilizado no RSCAD:

a) RSCAD/*FileManager*

Este módulo representa a interface de entrada ao RSCAD e é usado no gerenciamento dos casos teste e na organização das informações a serem trocadas entre usuários. Todos os módulos do RSCAD são vinculados a este módulo.

b) RSCAD/*Draft*

Este módulo é usado na modelagem de circuitos e parametrização dos componentes envolvidos. Na Figura 4.4 pode-se observar que a tela deste módulo esta dividida em duas seções, a seção da biblioteca e a seção de modelagem. Os componentes fornecidos dentro da biblioteca são escolhidos segundo a necessidade do usuário e alocados dentro da seção de modelagem. Na seção da biblioteca, encontram-se os principais equipamentos utilizados nos sistemas de potência, tais como linhas de transmissão, disjuntores, fontes AC e DC, transformadores de potência, transformadores de instrumentação, pára-raios, componentes RLC, máquinas rotativas, capacitores série, compensadores estáticos, dentre outros. Também se disponibilizam elementos de proteção, controle e automação, tais como relés de proteção, funções lógicas, funções de transferência, funções não lineares, geradores e processadores de sinais, medidores, temporizadores, *switchs*, seletores, dentre outros.

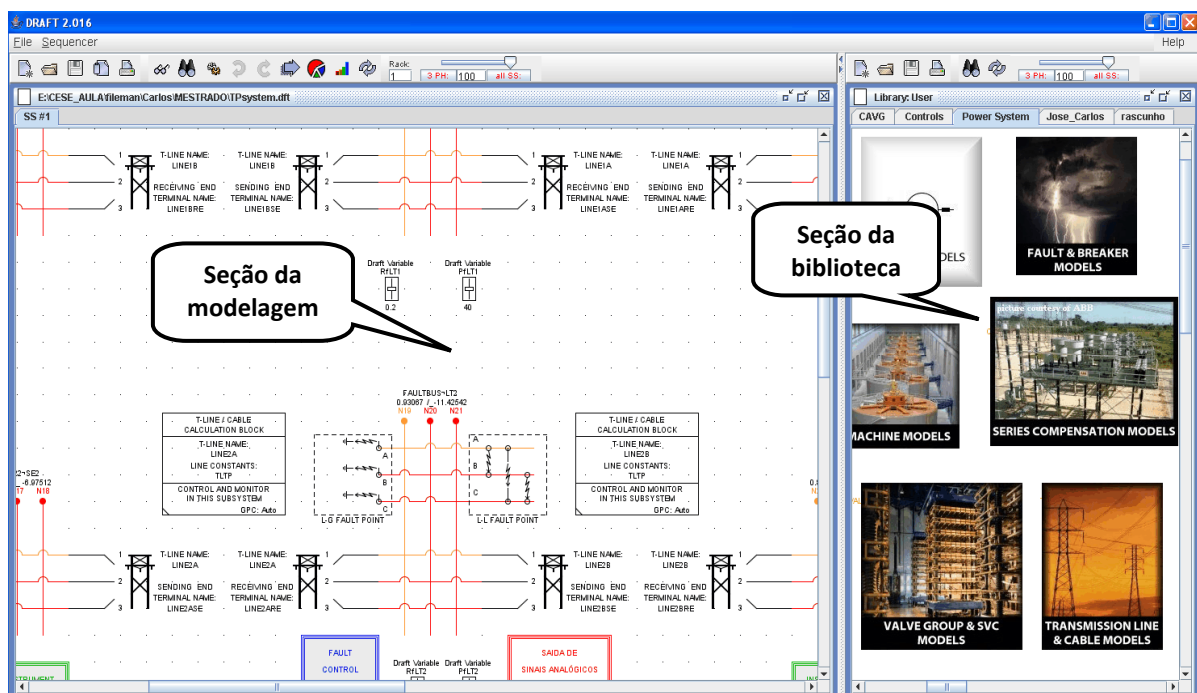


Figura 4.4 – Tela do Módulo RSCAD/*Draft*

c) RSCAD/T-Line

Este módulo é usado na definição da geometria e parâmetros dos condutores que compõem uma linha de transmissão. A partir desta configuração calculam-se as respectivas impedâncias de seqüência positiva e zero da linha, que são utilizadas posteriormente na simulação do sistema. Na Figura 4.5 ilustra-se a tela de parametrização deste módulo.

O RTDS pode representar as linhas de transmissão seja pelo modelo de ondas viajantes (parâmetros distribuídos) ou pelo modelo de seção PI (parâmetros concentrados). Este fato permite a modelagem de qualquer tipo de linha de transmissão, podendo ser curta, média ou longa. Cabe destacar que o comprimento característico de uma linha curta no RTDS está relacionado ao passo de integração (Δt) do processamento. Deste modo, se o tempo de trânsito da linha for menor do que Δt , esta pode ser considerada curta.

Dentro do RTDS, a resolução das equações de uma linha de transmissão representada através do modelo de parâmetros distribuídos é feita no domínio da frequência pelos métodos *Frequency Dependant* e *Bergeron*. Porém, a representação da linha de transmissão através do modelo PI pode se resolver unicamente pelo método *Bergeron*.

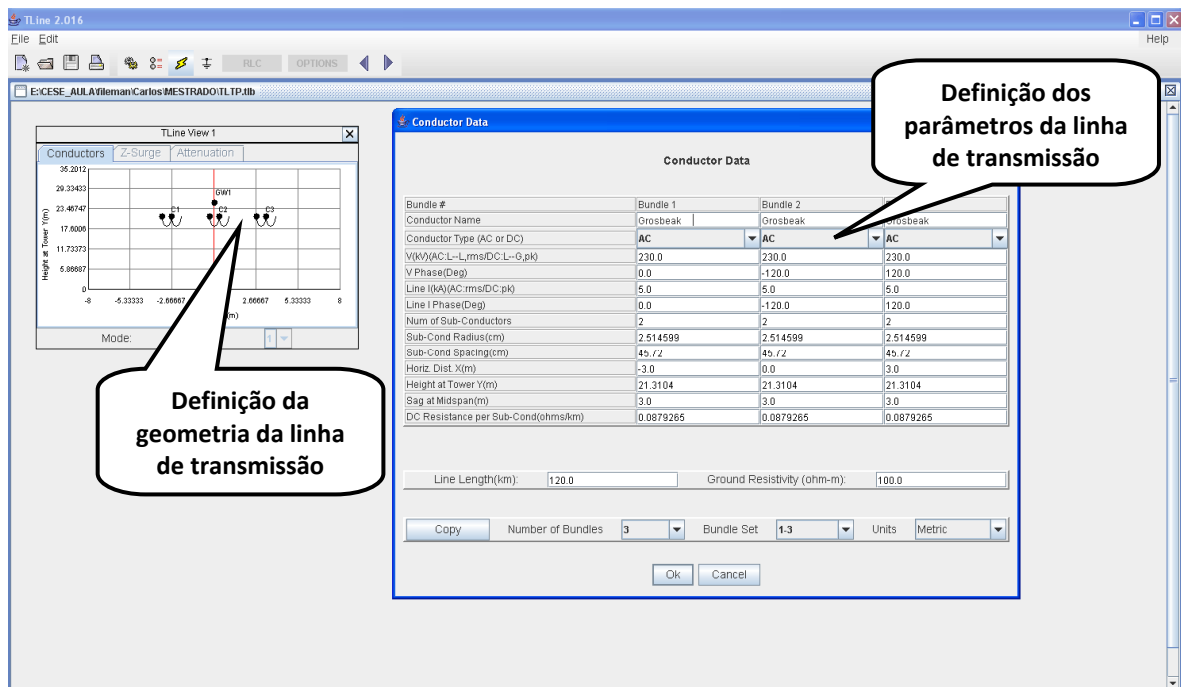


Figura 4.5 – Tela do Módulo RSCAD/T-Line

d) RSCAD/RunTime

Este módulo é usado para controlar e monitorar a simulação executada no hardware do RTDS. Todas as variáveis de monitoração definidas no RSCAD/Draft podem ser associadas neste módulo a gráficos, medidores, indicadores de luz, etc. Da mesma forma, *switchs*, seletores, botoeiras e variadores modelados no RSCAD/Draft, podem ser implementados e operados em tempo real na tela do RSCAD/RunTime. Ilustra-se na Figura 4.6 a tela deste módulo.

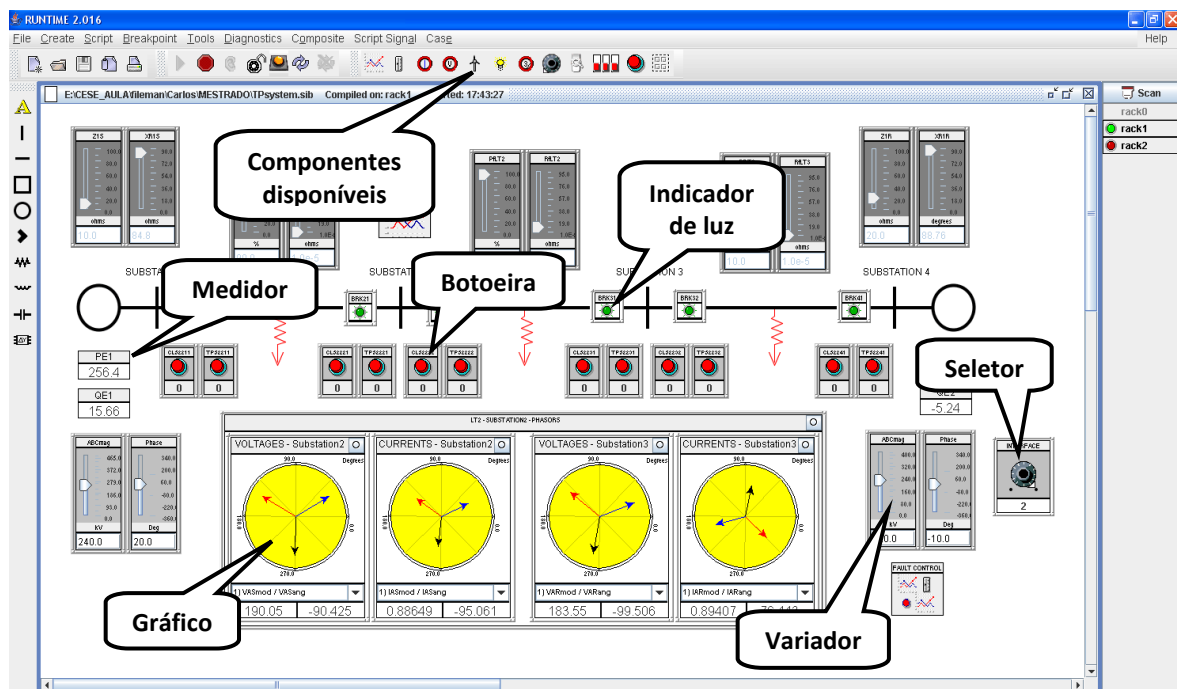


Figura 4.6 – Tela do Módulo RSCAD/RunTime

e) RSCAD/MultiPlot

Este módulo é usado no pós-processamento e análise de resultados capturados nos gráficos do RSCAD/RunTime durante as simulações.

4.2.2.2 Módulo RSCAD/CBuilder

Este módulo do RSCAD permite ao usuário desenvolver seu próprio modelo de componente de potência ou controle. Todo componente novo criado através desta ferramenta é disponibilizado dentro da biblioteca do RSCAD/Draft, possibilitando-se posteriormente seu uso na modelagem de qualquer sistema.

O módulo RSCAD/*CBuilder* fornece uma estrutura didática para o desenho de novos componentes. Na Figura 4.7 pode-se observar que a tela deste módulo possui uma seção onde o componente é modelado graficamente definindo-se suas interfaces de entrada e saída e outra seção onde as variáveis que representam cada uma dessas interfaces são parametrizadas e associadas à resolução de um algoritmo.

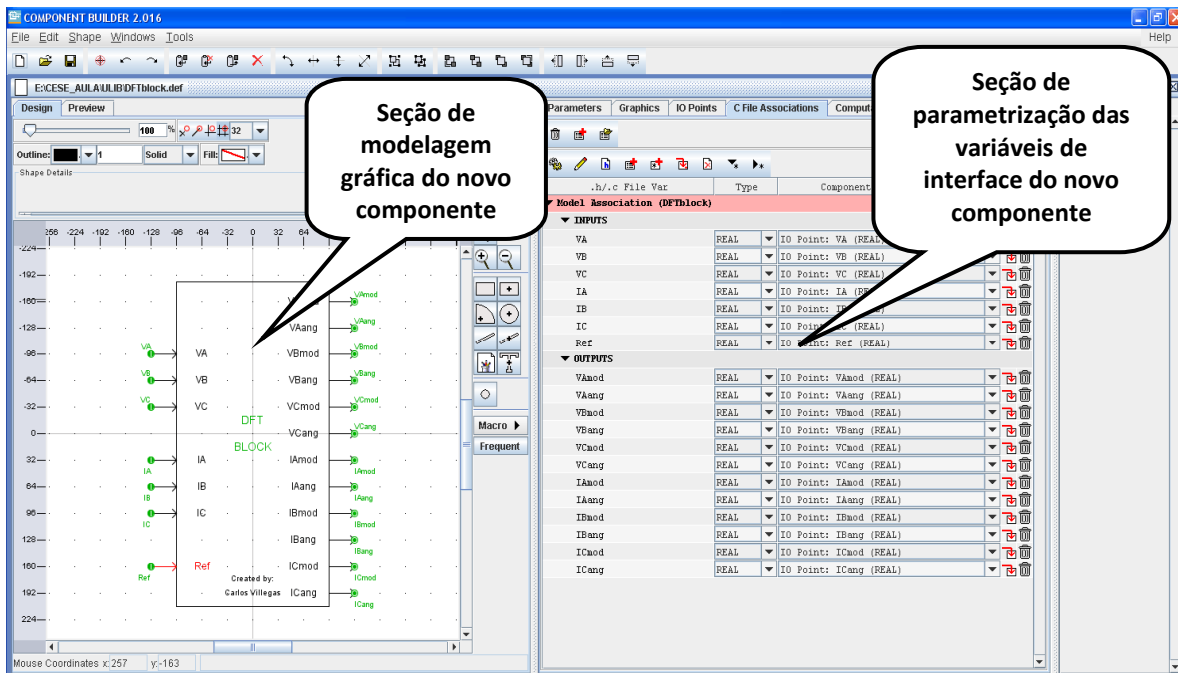


Figura 4.7 – Tela do Módulo RSCAD/*CBuilder*

Como todo componente existente na biblioteca do RSCAD/*Draft*, o funcionamento de um componente criado é também baseado na execução contínua de um algoritmo a cada passo de integração (Δt), aplicado pelo cartão GPC na resolução do sistema. O referido algoritmo é desenvolvido na própria plataforma do RSCAD/*CBuilder* e sua programação é feita em linguagem C. Um comando de compilação dentro do RSCAD/*CBuilder* permite transformar o código C do *script* criado, para o código executável usado pela biblioteca do RSCAD/*Draft*.

4.2.3 Operação do RTDS

A operação do RTDS baseia-se na execução dos comandos de compilação e simulação. O comando de simulação feito a partir do RSCAD/*RunTime* é processado com sucesso caso seja encontrado o código executável. Por outro lado, quem gera previamente

este código executável é o comando de compilação feito a partir do RSCAD/*Draft* após verificar a correta modelagem do sistema.

Cabe mencionar que o comando de compilação citado acima é processado a através de um conjunto de programas de software nomeados coletivamente de RTDS *Compiler*. Conforme ilustrado na Figura 4.8, estes programas usam três arquivos básicos para cumprir seu objetivo: arquivo *.dft* (*Data File from DRAFT*), arquivo *.lib* (*RTDS library file*) e o arquivo *config_file* (*RTDS Config. File*).

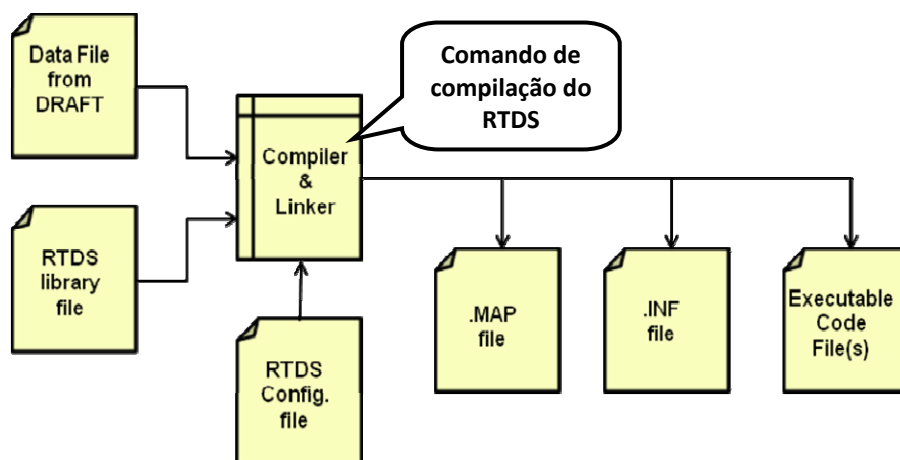


Figura 4.8 – Esquema de operação do RTDS

O arquivo *.dft* é gerado pelo RSCAD/*Draft* no processo de modelagem. O arquivo *.lib* é fornecido na instalação do programa RSCAD e contém blocos de códigos de linguagem de baixo nível que representam todos os componentes de potência, controle e proteção disponíveis na biblioteca do RSCAD/*Draft*. O arquivo *config_file* é gerado no momento da instalação do programa RSCAD no computador de interface com usuário e este fornece informações sobre a configuração atual do Hardware (número de *racks* disponíveis, cartões instalados em cada *rack*, endereço IP de cada *rack*, etc.).

Pode-se observar também na Figura 4.8 que o RTDS *Compiler* gera outros arquivos de interesse tais como *.map* (*.MAP file*) e *.inf* (*.INF file*). O arquivo *.map* provê informação detalhada sobre alocação de componentes nos processadores, condições iniciais do sistema, tempo de comunicação entre cartões, passo de simulação (Δt) usado, dentre outras. Por outro lado, o arquivo *.inf* provê unicamente uma lista de todas as variáveis criadas no RSCAD/*Draft* e que ficam disponíveis para controle e monitoração no RSCAD/*RunTime*.

4.2.4 Teste de Malha Fechada

O teste de malha fechada, ou também conhecido na área de proteção como *hardware-in-the-loop*, é um tipo de teste que além de mostrar a resposta do relé na simulação de uma falta, permite também observar a reação do sistema na operação do relé. Este esquema de teste pode ser representado conforme ilustrado na Figura 4.9.

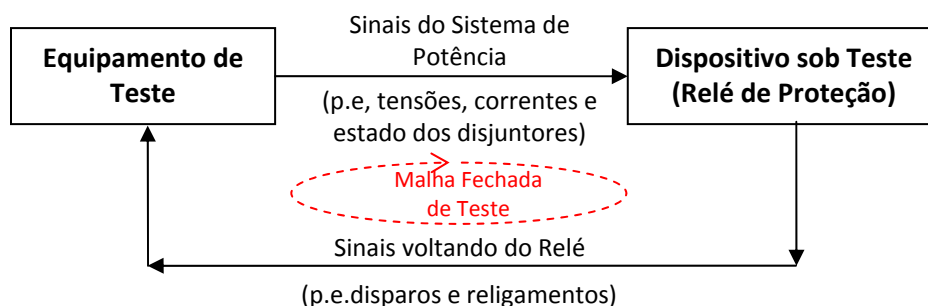


Figura 4.9 – Esquema de teste de malha fechada

Com base na Figura 4.9, observa-se que o circuito de malha fechada se deriva da implementação física dos sinais necessários para o teste em ambos os sentidos. Deste modo, vários circuitos primeiramente levam os sinais de tensão, corrente e estado dos disjuntores do equipamento de teste ao relé de proteção e posteriormente, outro grupo de circuitos retorna os sinais de disparo e de religamento (quando houver) do relé de proteção ao equipamento de teste.

A execução de testes de malha fechada em relés de proteção pode ser considerada a principal característica do RTDS. Sua aplicação é única dentre os equipamentos de teste existentes, pois só o RTDS permite executar este esquema em tempo real aplicando a dinâmica do sistema no mundo real no qual o dispositivo sob teste será posteriormente instalado.

O RTDS possui a capacidade de implementar o esquema de teste de malha fechada através de duas tecnologias de interface, as quais são detalhadas nos itens subsequentes.

4.2.4.1 Esquema Convencional para Teste de Malha Fechada Usando o RTDS

Neste esquema o RTDS utiliza os cartões GTA0 e GTFPI para estabelecer as interfaces com o relé de proteção. Sua implementação é realizada conforme ilustrado na Figura 4.10.

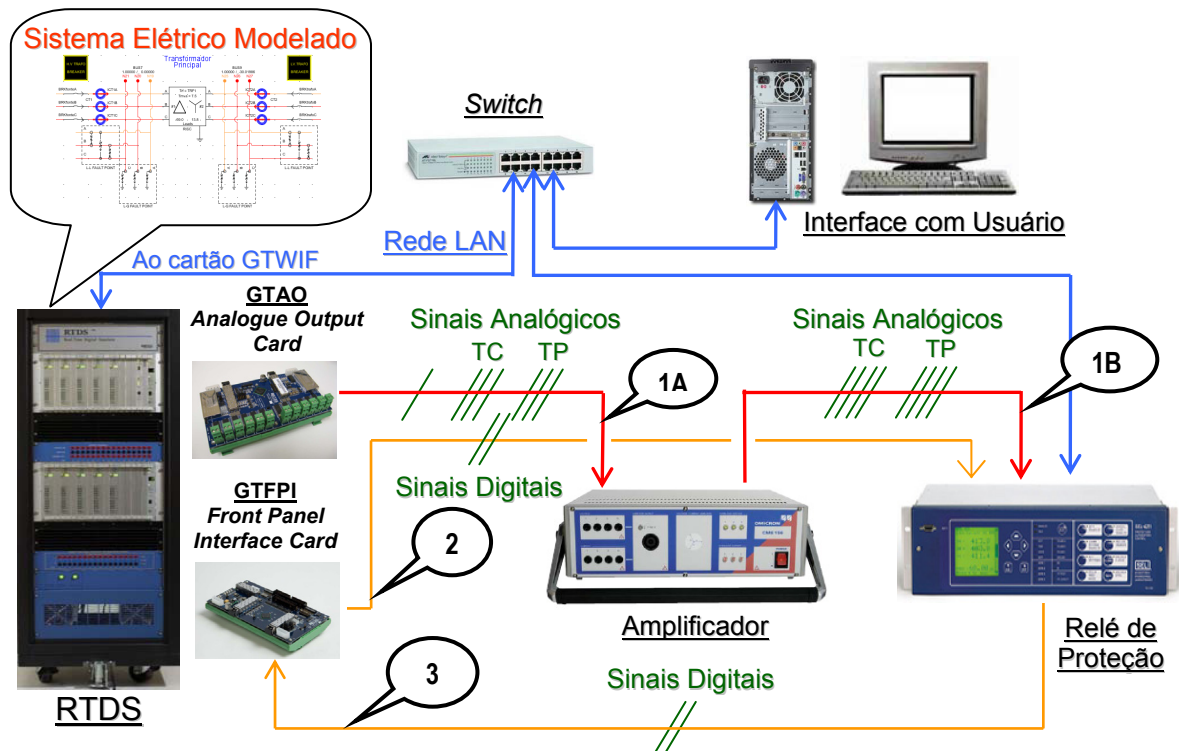


Figura 4.10 – Esquema de teste de malha fechada convencional

Pode-se observar na Figura 4.10 que o circuito de malha fechada é estabelecido pelos enlaces 1A, 1B, 2 e 3. Os sinais secundários de tensão e corrente (TP e TC), a serem utilizados pelo relé de proteção, são primeiramente fornecidos pelo cartão GTA0 em um nível baixo de tensão $\pm 10\text{Vac}$, através do enlace (1A). Um amplificador recebe estes sinais e os converte para padrões de tensão e de corrente de 115 volts e 5 ampères nominais, respectivamente. Esses sinais finalmente amplificados são entregues para o relé através do enlace (1B).

Os enlaces (2) e (3) mostrados na Figura 4.10 correspondem à transmissão dos sinais digitais. Através do enlace (2), um contato seco associado ao cartão GTFPI transmite para o relé o sinal de estado do disjuntor modelado no RTDS. Por outro lado, um ou mais

contatos secos do relé retornam através do enlace (3) os sinais de disparo e religamento para uma ou varias entradas digitais associadas ao cartão GTFPI.

4.2.4.2 Esquema Moderno para Teste de Malha Fechada Usando o RTDS

Neste esquema o RTDS utiliza unicamente o cartão GTNET para estabelecer as interfaces com o relé de proteção. Assim, todos os sinais analógicos e digitais que no esquema anterior eram implementados através de fiação convencional usando os cartões GTA0 e GTFPI, agora serão digitalizados e enviados ao relé por meio de pacotes de dados através da rede LAN. Ilustra-se na Figura 4.11 a implementação deste esquema.

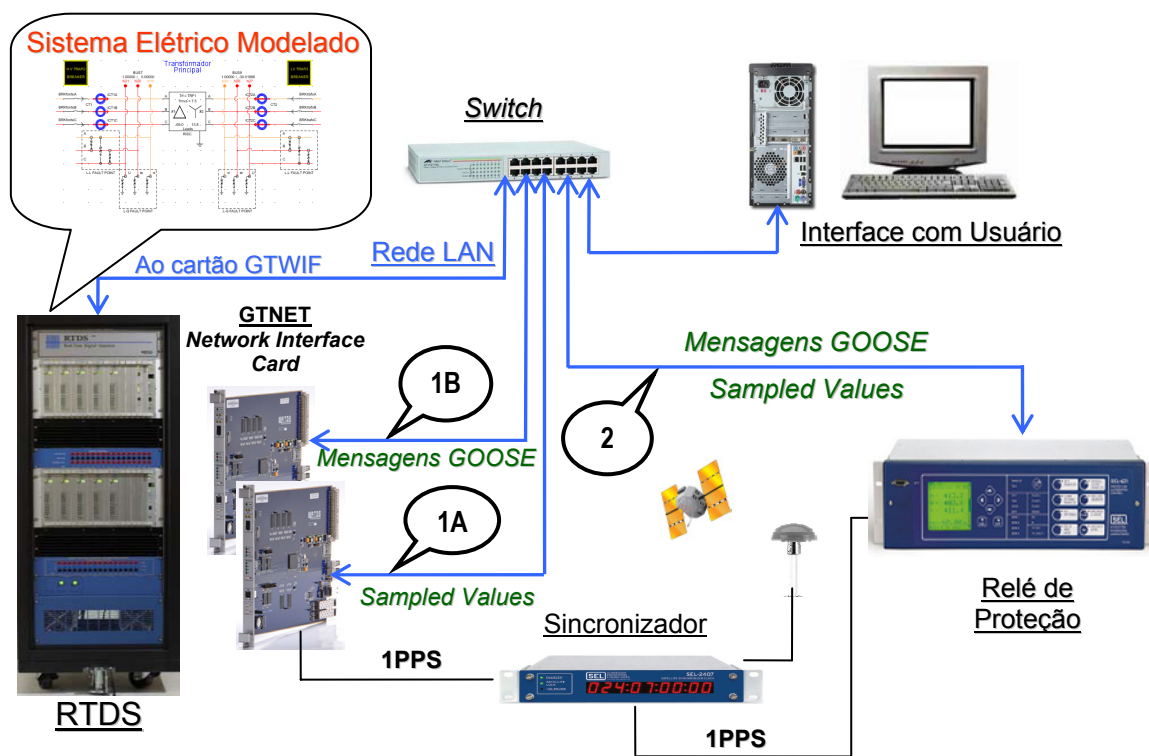


Figura 4.11 – Esquema de teste de malha fechada moderno

Observa-se no esquema da Figura 4.11 que a comunicação entre os cartões GTNET e o relé de proteção é implementada via *ethernet* através dos enlaces físicos (1A), (1B) e (2). Neste caso, os cartões GTNET aplicam o padrão IEC 61850 e estabelecem uma interface de comunicação *peer-to-peer* com o relé de proteção. Assim, serviços para troca de mensagens com valores amostrados (*Sampled Values*) são utilizados na transmissão dos sinais secundários de tensão e corrente, e serviços para troca de mensagens GOOSE são

utilizados na transmissão dos sinais de disparo, religamento e réplica do estado dos disjuntores do sistema. Na operação do RTDS, só um destes serviços pode ser implementado por cada cartão GTNET, deste modo, precisa-se no mínimo de dois cartões GTNET para estabelecer o esquema de teste de malha fechada baseado 100% em interfaces de comunicação.

Devem-se destacar duas particularidades do esquema mostrado na Figura 4.11 quando comparado com o esquema de teste convencional da Figura 4.10:

- a) O circuito de malha fechada não pode ser visível fisicamente com a implementação dos enlaces de comunicação entre o relé e o RTDS.
- b) O RTDS e os relés de proteção precisam estar sincronizados com um sinal de um Pulso Por Segundo (1PPS – *One Pulse Per Second*). Este sinal de sincronização é necessário na estampa de tempo dos pacotes com valores amostrados gerados pelo cartão GTNET.

Um relógio externo (sincronizador) pode ser utilizado para gerar o sinal de sincronização requerido pelo cartão GTNET e os dispositivos externos envolvidos. No entanto, o próprio GTNET tem a capacidade de fornecer este sinal como referência para os dispositivos externos.

Vale ressaltar que existe a possibilidade de estabelecer um esquema de teste de malha fechada misto, ou seja, composto tanto de interfaces convencionais como de interfaces modernas de comunicação.

4.3 Considerações Finais

Este capítulo teve como objetivo resumir o funcionamento do RTDS. A fim de introduzir suas características de relevância, detalharam-se as funções de cada um dos principais componentes da estrutura do hardware e do software.

Abordaram-se duas tecnologias diferentes aplicadas pelo RTDS na implementação de esquemas de teste de malha fechada. Ambas serão aplicadas na validação deste trabalho de dissertação.

Capítulo 5

Modelagem e Implementação no RTDS

5.1 Considerações Iniciais

Este capítulo objetiva apresentar a modelagem e implementação dos circuitos de teste do esquema de teleproteção DCB no RTDS. Utiliza-se como referência a estrutura geral dos esquemas de teleproteção conforme ilustrado na Figura 2.7 do capítulo 2.

A modelagem será abordada em duas etapas: a primeira focada exclusivamente na definição do sistema de potência e a segunda na definição dos circuitos de controle. Dentro da modelagem dos circuitos de controle serão definidas duas tecnologias de interface entre o relé de proteção e o RTDS. Uma através de contatos secos e entradas opto-isoladas de ambos os dispositivos e outra através de entradas e saídas virtuais de comunicação aplicando mensagens GOOSE.

5.2 Sistema de Potência Modelado

Para os testes do esquema de teleproteção modelou-se um sistema de potência composto de três LTs de comprimento médio, conectadas em série e todas contendo um único circuito de 230KV. Conforme ilustrado na Figura 5.1, uma das três linhas opera como principal e as outras como adjacentes. Em ambos os extremos do esquema utilizaram-se fontes equivalentes, sendo a fonte do terminal transmissor “Sf” parametrizada em condições de “forte” e a fonte do terminal receptor “Rf” parametrizada em condições de “fraca”.

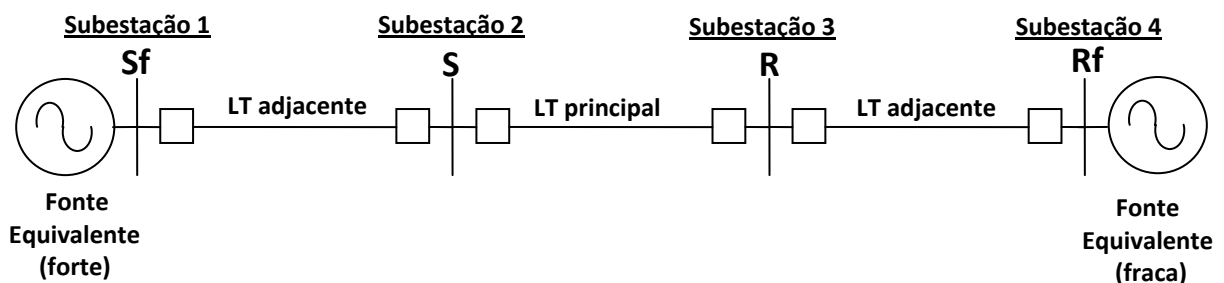


Figura 5.1 – Sistema de Potência Modelado

A modelagem deste sistema dentro do módulo *Draft* do RSCAD é apresentada na Figura 5.2.

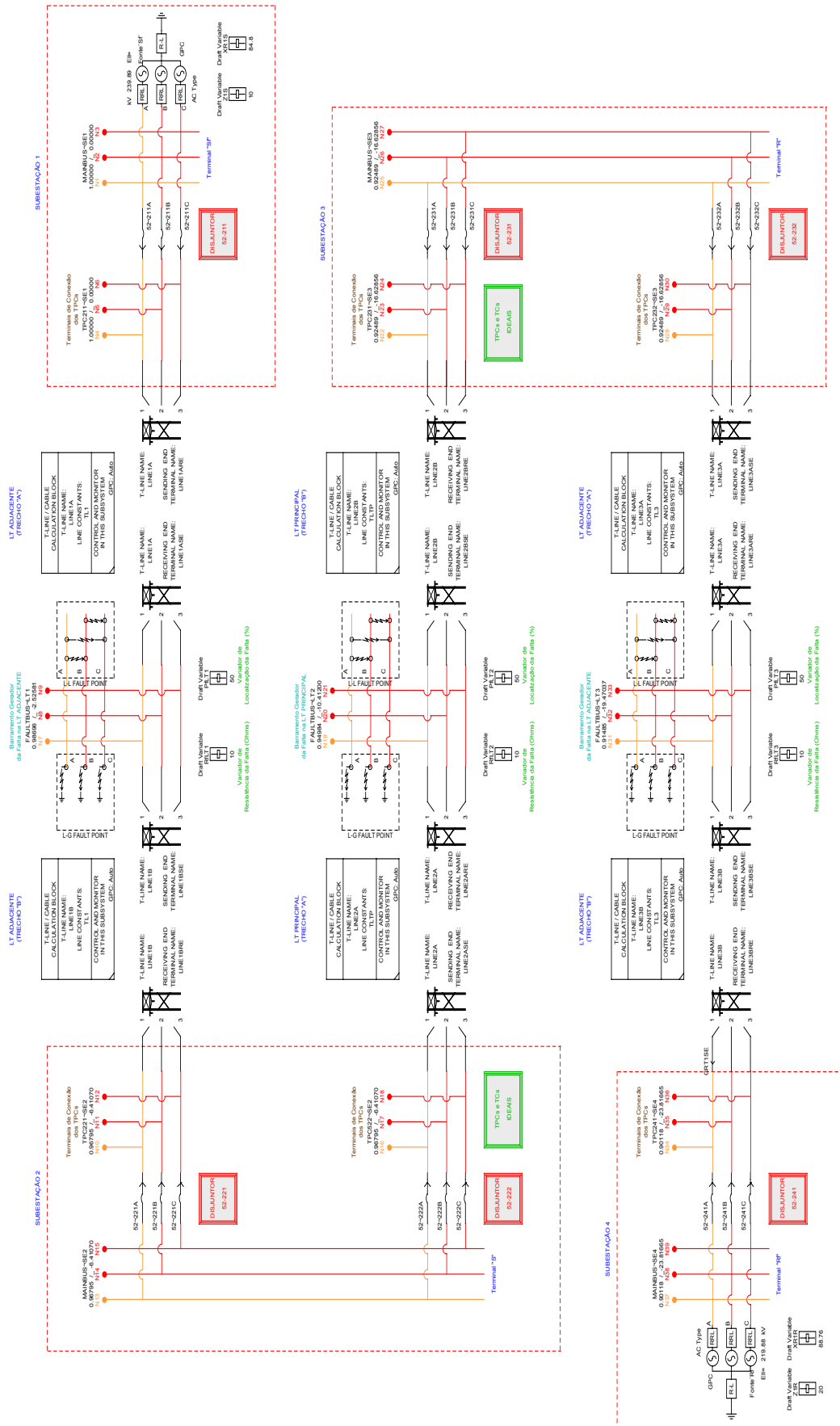


Figura 5.2 – Sistema de Potência modelado no módulo *Draft* do RSCAD

5.2.1 Fontes Equivalentes

As impedâncias de sequência positiva e sequência zero das fontes equivalentes são parâmetros que precisam ser alterados continuamente nos testes de funcionalidade dos relés de proteção. Deste modo, a confiabilidade do esquema de proteção é garantida para todas as possíveis condições operativas do sistema. No entanto, para o desenvolvimento dos testes do esquema de teleproteção, escolheu-se como referência a impedância equivalente das fontes conforme mostrado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Impedâncias equivalentes das fontes de alimentação

Fonte Equivalente	Impedância de Sequência Positiva [Ohm]		Impedância de Sequência Zero [Ohm]	
	Coordenadas Retangulares	Coordenadas Polares	Coordenadas Retangulares	Coordenadas Polares
Terminal “Sf”	0,906+j9,959	10,000@84,80°	0,0895+j5,512	5,513@89,07°
Terminal “Rf”	0,433+j19,995	20,000@88,76°	0,234+j9,496	9,499@88,59°

5.2.1.1 Condições Operativas

Procurando estabelecer para os testes um fluxo de potência PQ unidirecional no sentido do terminal transmissor “Sf” ao terminal receptor “Rf”, fixaram-se na tela do RSCAD/*Runtime* as condições operativas das fontes segundo mostrado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Condições operativas das fontes de alimentação

Fonte Equivalente	Tensão [pu]	Potência Ativa [MW]	Potência Reativa [MVar]
Terminal “Sf”	1,043@20,00°	252,300	17,380
Terminal “Rf”	0,956@-10,00°	-237,800	-5,993

5.2.2 Linhas de Transmissão

As três linhas de transmissão foram representadas por um único circuito trifásico de dois condutores por fase. Conforme ilustrado na Figura 5.3, os grupos de cabos condutores e pára-raios são dispostos simetricamente em relação ao eixo vertical da torre.

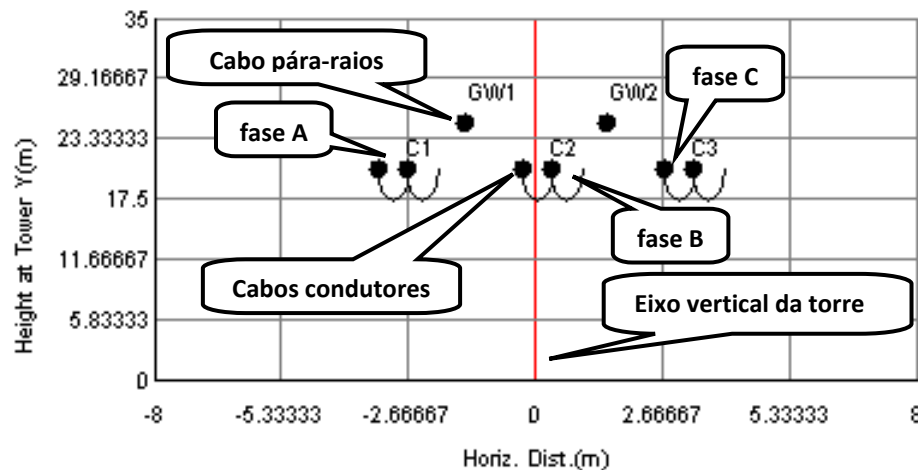


Figura 5.3 – Configuração da linha de transmissão

Para obtenção das impedâncias de sequência positiva e sequência zero das LTs, foram feitas as seguintes configurações no módulo RSCAD/*T-Line*:

- a) Aplicação do método de *Bergeron* na resolução das equações diferenciais da linha de transmissão no domínio da frequência. (Representação através do modelo de parâmetros distribuídos)
- b) Uso de transposição na configuração da linha de transmissão.
- c) Permissão de interpolação automática no tempo de trânsito para resolução das equações da linha, permitindo o chaveamento automático do modelo de parâmetros distribuídos para o modelo de parâmetros concentrados quando o comprimento da linha for menor do que 15.15km (tempo de propagação de 50,50 μ s).
- d) Uso da frequência de 60Hz na resolução do método de *Bergeron*.
- e) Estabelecimento do cálculo das impedâncias de sequência da LT com base na sua configuração geométrica e nos dados fornecidos do projeto conforme se apresenta na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Dados de configuração das linhas de transmissão

Comprimento [km]	120 (para LT principal) 80 (para LTs Adjacentes)				
	100				
Resistividade do solo [Ohm.km]	100				
Grupo	C1	C2	C3	GW1	GW2
Fase	A	B	C	Pára-raios	Pára-raios
Apelido	<i>Grosbeak</i>	<i>Grosbeak</i>	<i>Grosbeak</i>	<i>7/16 Steel</i>	<i>7/16 Steel</i>
Resistência DC [Ohm/km]	0,0879265	0,0879265	0,0879265	2,8645	2,8645
Raio do Sub-Conductor [cm]	2,514599	2,514599	2,514599	0,55245	0,55245
Número de Sub-Contutores	2	2	2	1	1
Espaçamento entre Sub-Condutores [cm]	45,72	45,72	45,72	----	----
Posição Vertical [m]	20,5	20,5	20,5	25,0	25,0
Posição Horizontal [m]	-3,0	0,0	3,0	-1,5	1,5
Comprimento da Flecha [m]	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0

Na Tabela 5.4 são apresentadas as impedâncias de sequência obtidas para cada LT a partir das configurações detalhadas acima.

Tabela 5.4 – Impedâncias de Sequência Positiva e Sequência Zero das LTs, obtidas no RSCAD/T-Line

Linha de Transmissão	Impedância de Sequência Positiva [Ohm]		Impedância de Sequência Zero [Ohm]	
	Coordenadas Retangulares	Coordenadas Polares	Coordenadas Retangulares	Coordenadas Polares
Adjacente	3,58+j22,40	22,68@80,92°	34,62+j109,80	115,12@72,50°
Principal	5,36+j33,60	34,04@80,92°	51,92+j164,68	172,68@72,50°

5.3 Circuitos de Controle Modelados

Para fins de controle, operação e avaliação do sistema de potência modelado, criaram-se também dentro do módulo RSCAD/Draft vários circuitos de controle. Estes circuitos foram modelados para cumprir diferentes funcionalidades, que são:

- Abertura e fechamento dos disjuntores do sistema.
- Escolha do tipo, localização, duração e ângulo de incidência das faltas.

- Modelagem dos transformadores de corrente (TCs) e transformadores de potencial capacitivos (TPCs) ideais a serem utilizados nos terminais da LT principal.
- Estimativa da impedância vista pelos relés da LT principal.
- Extração de fasores (módulo e ângulo) dos sinais de tensão e corrente usados pelos relés da LT principal.
- Implementação da interface externa de sinais secundários de tensão e corrente a serem utilizados pelos relés da LT principal.
- Implementação de dois tipos de interfaces para o esquema de teleproteção.
- Representação do sistema de teleproteção do esquema DCB.

5.3.1 Circuito de Controle de Falta

Buscando analisar a resposta do esquema de teleproteção modelado para os diferentes cenários de curto-circuito, implementou-se um circuito de controle de falta dinâmico conforme ilustrado na Figura 5.4.

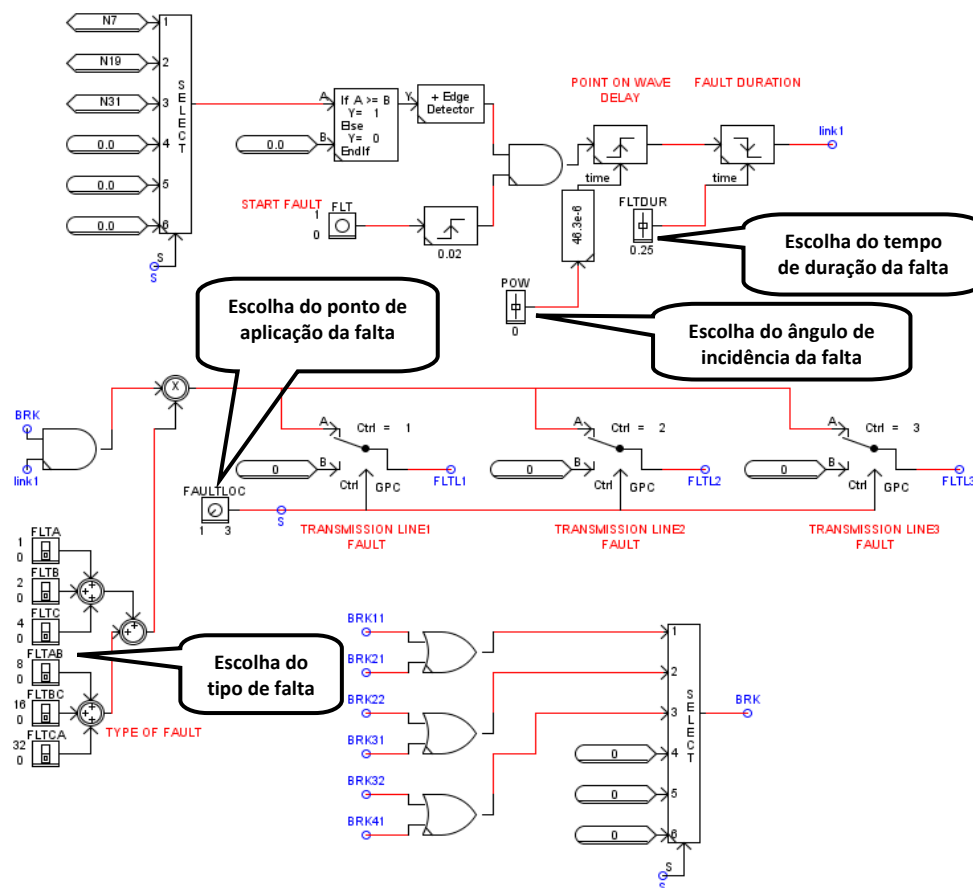


Figura 5.4 –Circuito de controle de falta

Com base na Figura 5.4 detalham-se a seguir as principais funcionalidades que o circuito de controle modelado possui:

- 1) Escolha do ângulo de incidência da falta.
- 2) Escolha do tempo de duração da falta na simulação.
- 3) Escolha do ponto de aplicação da falta dentro do sistema (LT principal ou LTs adjacentes).
- 4) Escolha do tipo de falta a se aplicar: A-T, B-T, C-T, AB-T, BC-T, AC-T, AB, BC, AC e ABC.

Cabe ressaltar que este circuito foi desenvolvido com base em um modelo existente no capítulo 8 do tutorial do RTDS (RTDS, 2008), com modificações que permitiram acoplá-lo às necessidades do sistema em estudo.

5.3.2 Estimativa da Impedância Vista pelos Relés

No desenvolvimento dos testes em tempo real do esquema de teleproteção, considera-se importante visualizar no plano R-X a trajetória dinâmica da impedância medida pelos relés de distância. Tal funcionalidade possibilita identificar as operações indevidas do relé frente às diferentes complexidades operacionais do sistema que surgem durante uma perturbação. Outras situações relacionadas com a direcionalidade da falta, acomodação da resistência de falta e resposta ao carregamento pré-falta, podem ser verificadas através da observação da dinâmica dessa impedância no plano R-X.

O módulo *RSCAD/Draft* do RTDS dispõe das ferramentas necessárias que possibilitam o cálculo dinâmico da impedância vista pelos relés e sua respectiva representação no plano R-X. Neste caso, torna-se necessário modelar o circuito real de processamento digital de sinais utilizado por esses dispositivos de proteção. Assim sendo, a biblioteca do *RSCAD/Draft* dispõe dos principais componentes requeridos, tais como, amostradores, filtros digitais, estimador de fasores baseado em transformadas discretas de Fourier (DFT – *Discrete Fourier Transform*), dentre outros.

No entanto, com intuito de mostrar as vantagens do RTDS no desenvolvimento de algoritmos que podem ser testados em tempo real, modelou-se no *RSCAD/Builder* um componente de controle cujo algoritmo permite obter os respectivos fasores dos sinais de tensão e corrente utilizados pelos dispositivos de proteção. Desta forma, a interação do

novo componente criado com outros já existentes dentro do RSCAD/*Draft* permitiu estabelecer os vários *loops* de falta utilizados pelos relés no cálculo da impedância.

5.3.2.1 Novos Componentes de Controle para o Cálculo de Fasores

O componente de controle criado para o cálculo de fasores foi identificado dentro da biblioteca do RSCAD/*Draft* com o nome “DFT BLOCK”. Conforme ilustra a Figura 5.5, este componente recebe como entrada os sinais senoidais de tensão e corrente de um terminal da LT principal e entrega como resultado nas saídas os respectivos fasores desses sinais em módulo e ângulo.

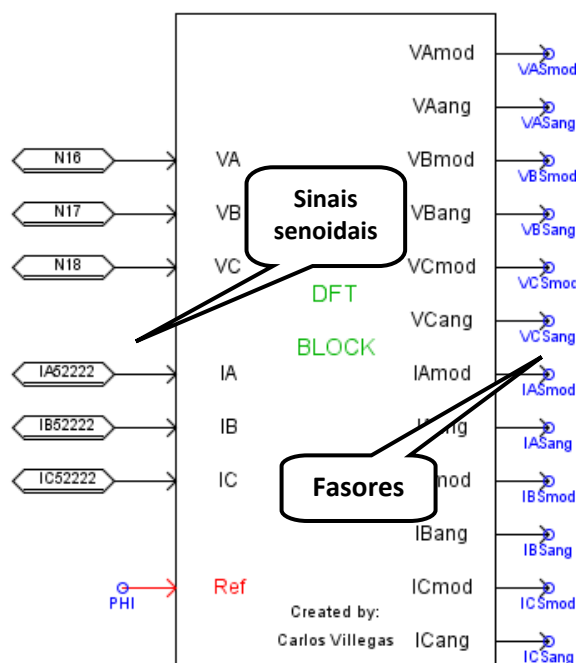


Figura 5.5 – Componente para cálculo de fasores dos sinais de tensão e corrente

Os sinais de entrada deste componente são os sinais processados pelo algoritmo. Tais sinais são valores digitalizados pelo cartão GPC de acordo com a taxa de processamento $50,50\mu\text{s}$, estabelecida previamente na resolução do sistema. O primeiro passo do algoritmo é a reamostragem dos sinais com uma taxa de 360Hz (6 amostras por ciclo). Em seguida, essas amostras obtidas são processadas por duas DFTs de ciclo completo, as quais entregam como resultado os respectivos fasores de tensão e de corrente em coordenadas retangulares (valor real e imaginário). Finalmente, o formato dos fasores é transformado para coordenadas polares (módulo e ângulo), sendo estes últimos

disponibilizados nas saídas do componente. Vale ressaltar que, o período de 6 amostras/ciclo foi escolhido objetivando-se processar exatamente 55 passos de integração entre cada amostra. Assim, cada janela de amostragem de um ciclo apresenta um número inteiro de 330 passos de integração (equivalente a 0,01666 ms).

A mesma sequência de operação do algoritmo detalhado acima foi utilizada na criação de outro componente de controle que permite obter os fasores das componentes de sequência positiva, negativa e zero dos sinais de tensão e corrente. Apenas, tornou-se necessário incluir a resolução das equações de *Fortescue* detalhadas em (Grainger e Stevenson, 2001), após o processo de obtenção dos fasores pelas DFTs.

Este novo componente de controle foi identificado dentro da biblioteca do RSCAD/*Draft* com o nome “SEQUENCE COMPONENTS”. Conforme ilustrado na Figura 5.6, a estrutura deste componente é genérica, ou seja, esta desenhada para processar sinais senoidais de tensão ou corrente. Como resultado da resolução do algoritmo, entrega-se nas respectivas saídas os fasores de sequência positiva, negativa e zero, em módulo e ângulo.

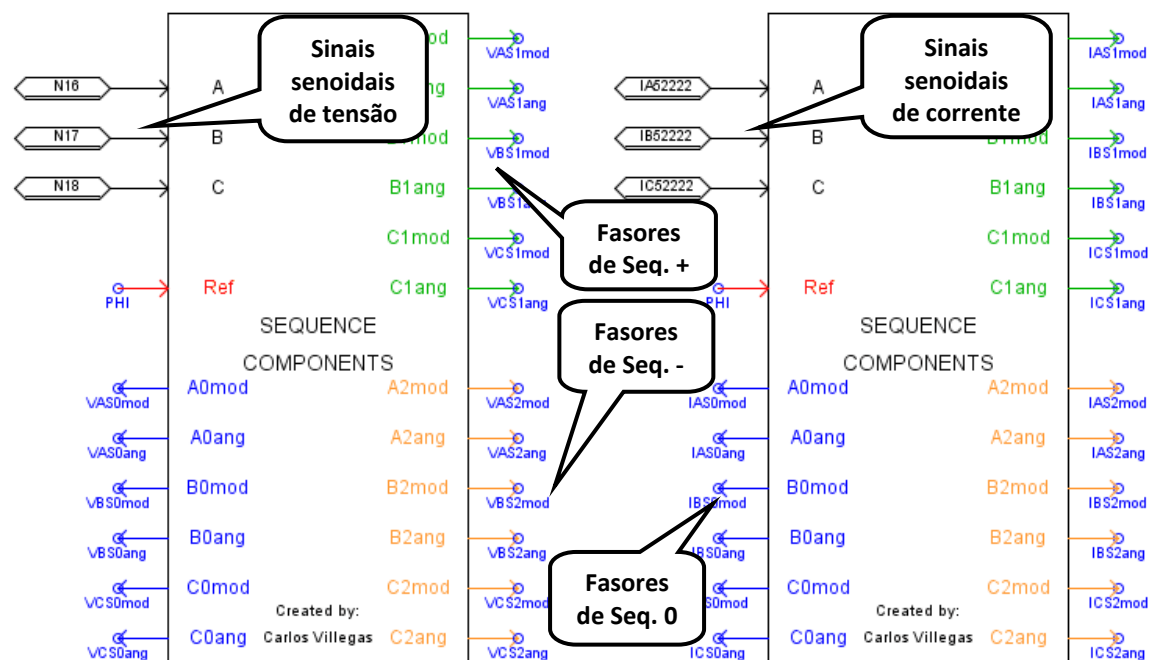


Figura 5.6 – Componente para cálculo de fasores das componentes simétricas

Os fasores de tensão e de corrente obtidos através destes algoritmos, além de serem utilizados na estimativa da impedância vista pelos relés físicos, servem também na

representação vetorial dentro da tela do RSCAD/*RunTime*. Observando a dinâmica destes fasores em tempo real durante as diferentes perturbações simuladas no sistema, conseguiu-se verificar o correto comportamento dos dispositivos reais de proteção. A Figura 5.7 ilustra um exemplo onde se apresenta o comportamento dos fasores de tensão e de corrente do terminal “S” para uma falta monofásica sólida na fase A em 25% da LT principal.

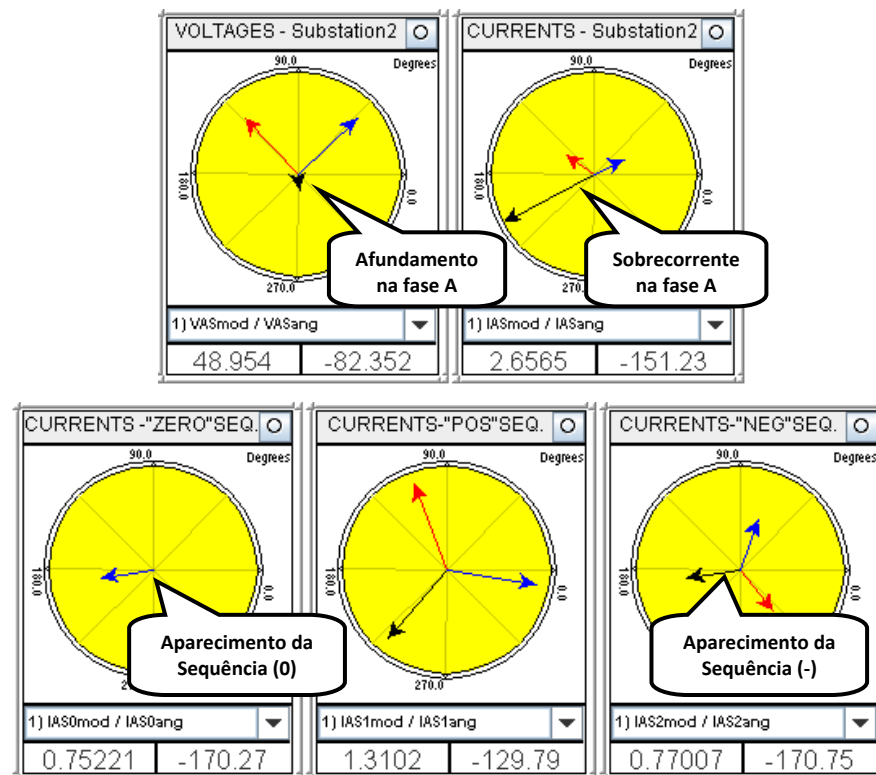


Figura 5.7 – Gráficos dos fasores de tensão e corrente modelados no RSCAD/*RunTime*

Observando a Figura 5.7 podem-se identificar as seguintes respostas do sistema durante a falta:

- Desequilíbrio nos fasores de tensão – Fase sob defeito (A) apresenta afundamento.
- Desequilíbrio e assimetria nos fasores de corrente – Fase sob defeito (A) apresenta acréscimo de amplitude e desfasamento.
- Aparecimento das componentes de sequência negativa e zero devido ao desequilíbrio gerado pela falta.

Cabe salientar que o nível de sequência zero obtido através da análise destes fasores serviu na determinação da sensibilidade das unidades de sobrecorrente residuais utilizadas no esquema de teleproteção.

5.3.2.2 Loops de Falta para Estimativa da Impedância

Conforme foi mencionado no início do item 5.3.2, os fasores de tensão e de corrente obtidos pelos componentes de controle criados são utilizados na implementação dos *loops* de falta dentro do RSCAD/Draft. Assim, por se tratar de um sistema trifásico aterrado, implementaram-se seis *loops* AN, BN, CN, AB, BC e CA, segundo ilustrado na Figura 5.8.

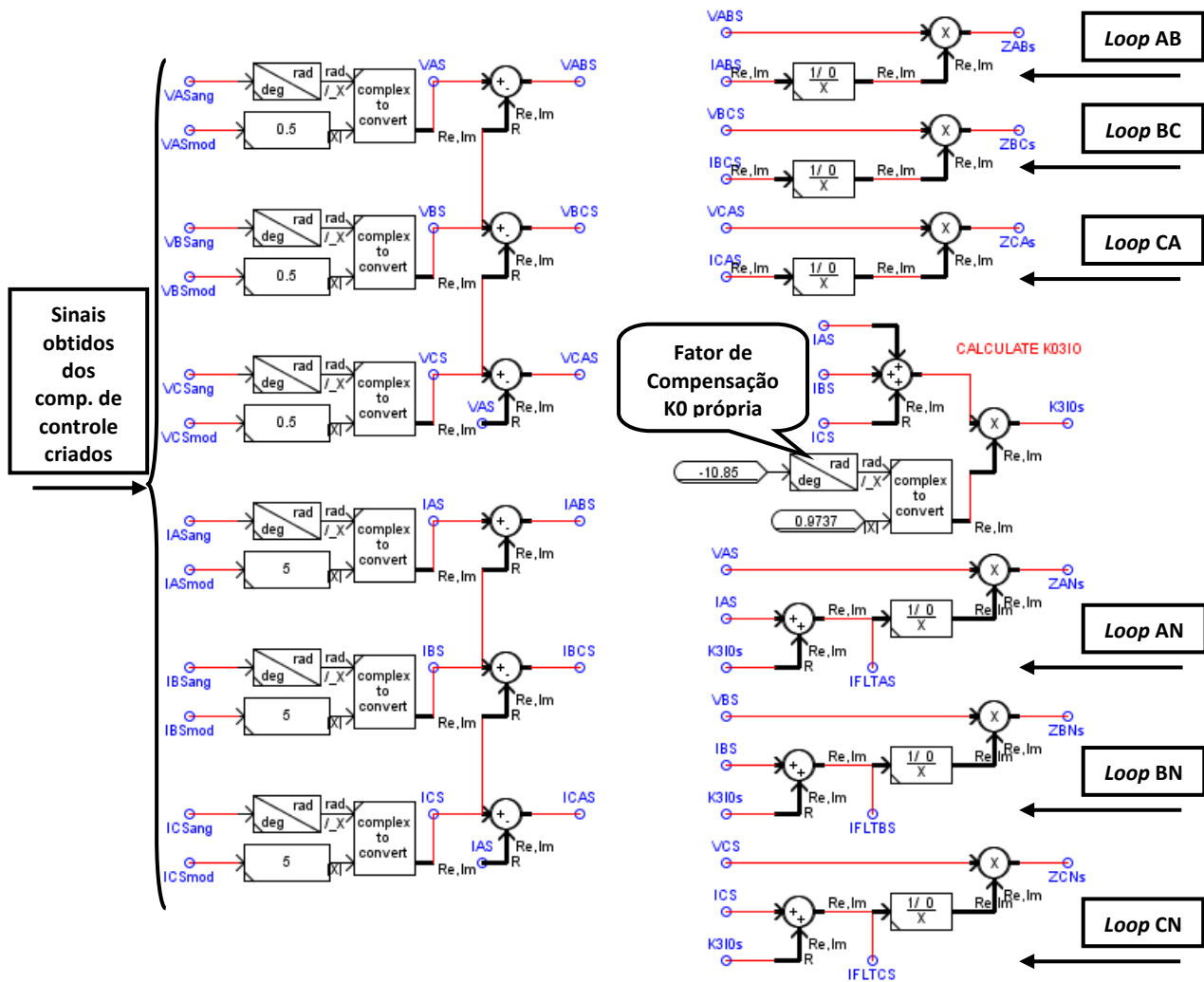


Figura 5.8 – Loops de falta implementados no RSCAD/Draft

Pode-se observar na Figura 5.8 que as variáveis de saída dos *lopps* de falta ZANs, ZBNs, ZCNs, ZABs, ZBCs e ZCAs, representam as impedâncias vistas pelo relé físico do terminal “S” da LT principal. Tais variáveis são utilizadas pelo módulo RSCAD/*RunTime* na criação do plano R-X onde a trajetória da impedância medida é representada graficamente durante as simulações. Uma ferramenta disponível dentro das propriedades do gráfico criado possibilita incluir adicionalmente a modelagem das zonas de proteção conforme a parametrização no relé real. A Figura 5.9 ilustra um exemplo onde o plano R-X modelado no RSCAD/*RunTime*, apresenta a trajetória da impedância ZANs para uma falta monofásica simulada em 50% da LT principal e envolvendo uma resistência de 10Ω.

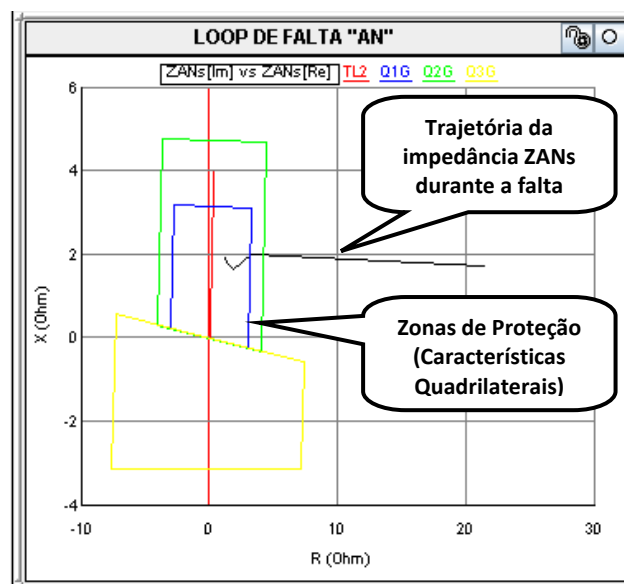


Figura 5.9 – Plano R-X criado no RSCAD/*RunTime* para o *loop* de falta AN

Sabendo-se que a estrutura da linha de transmissão está constituída de um único circuito trifásico, considerou-se na determinação das impedâncias ZANs, ZBNs e ZCNs dentro do cálculo dos *loops* de falta, o emprego do fator de compensação de sequência zero própria “K0”.

5.3.3 Circuitos de Interface Digital

Para implementação dos circuitos de teste do esquema DCB no RTDS, utilizou-se a estrutura geral dos esquemas de teleproteção que foi apresentada na Figura 2.7 do capítulo 2. Assim, com o intuito de vislumbrar as potencialidades do RTDS na interoperabilidade

com qualquer dispositivo de proteção, escolheu-se a interface entre o relé de proteção e o equipamento de teleproteção no emprego de duas tecnologias. A primeira, utilizando contatos secos e entradas opto-isoladas via fiação convencional e a segunda, utilizando entradas e saídas virtuais via mensagens GOOSE.

Conforme ilustra a Figura 5.10, na implementação da estrutura geral do esquema de teleproteção se utiliza o RTDS para representar o sistema de teleproteção. Esta representação está baseada na implementação do tempo de operação da teleproteção T_A . Conforme foi descrito no item 2.3.2.3 do capítulo 2, o tempo T_A está associado ao tempo gasto pelos diferentes componentes envolvidos no sistema de teleproteção.

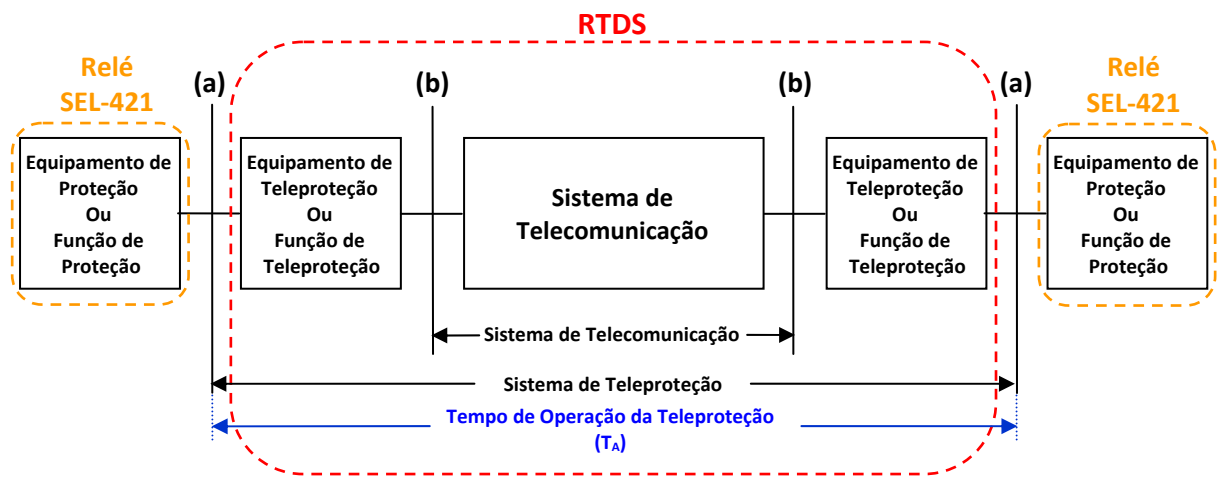


Figura 5.10 – Estrutura geral de teleproteção implementada através do RTDS

Considera-se também dentro da implementação da estrutura geral do esquema de teleproteção, conforme ilustrado na Figura 5.10, o emprego de dois relés numéricos de proteção de linhas de transmissão (SEL-421 – *Schweitzer Engineering Laboratories*) para representação dos equipamentos de proteção.

5.3.3.1 Interface Convencional

Neste esquema, conforme se ilustra na Figura 5.11, as interfaces entre os relés de proteção e o RTDS foram implementadas através de fiação convencional de cobre (enlaces) que interliga os contatos secos e entradas opto-isoladas de ambos dispositivos.

No RTDS tais contatos e entradas opto-isoladas estão relacionados com os canais digitais I/O e de alta tensão (0–250Vdc) disponíveis no painel frontal do armário.

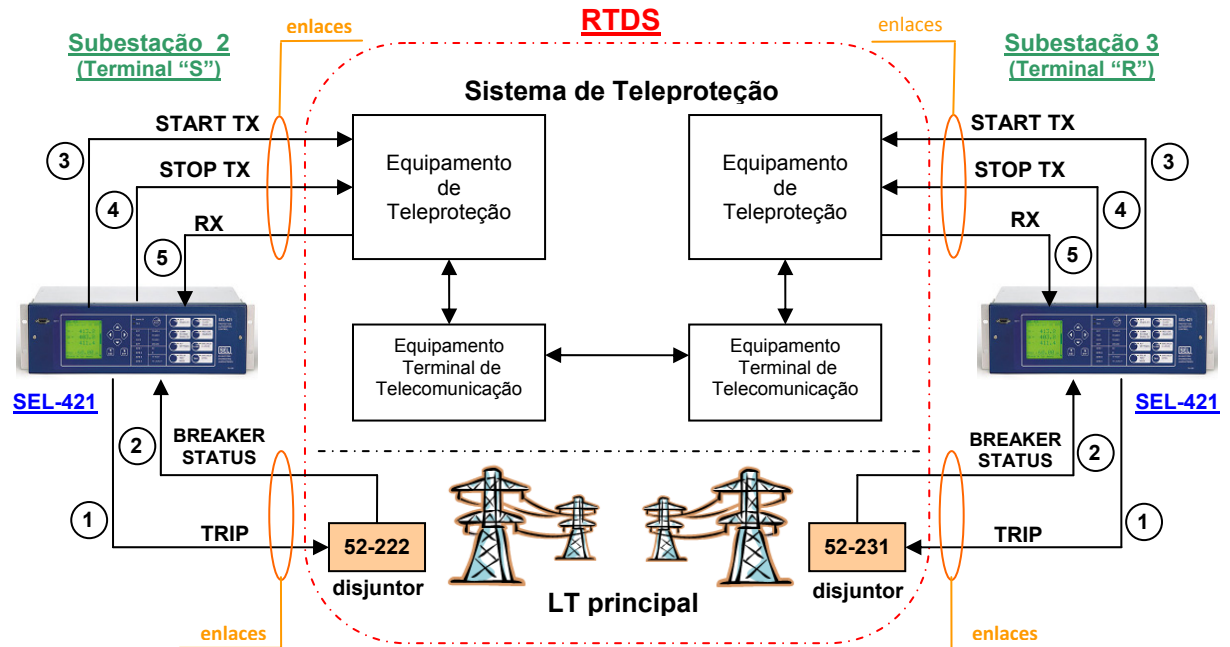


Figura 5.11 – Esquema de interface convencional

Observando a Figura 5.11, descrevem-se a seguir as funcionalidades de cada enlace implementado nas interfaces convencionais:

- 1) Envio do comando de disparo (TRIP) do relé ao disjuntor modelado no RTDS.
NOTA: O disjuntor nomeado de 52-222 pertence ao terminal "S" e o disjuntor 52-231 pertence ao terminal "R" da LT principal.
- 2) Transmissão do estado (fechado ou aberto) do disjuntor modelado no RTDS ao relé.
- 3) Envio do comando de partida da transmissão (START TX) do relé ao equipamento de teleproteção representado no RTDS. A sensibilização de uma entrada digital do RTDS, no recebimento deste comando, iniciará a transmissão do sinal de bloqueio para o outro extremo da LT.
- 4) Envio do comando de parada da transmissão (STOP TX) do relé ao equipamento de teleproteção representado no RTDS. A sensibilização de uma entrada digital do RTDS, no recebimento deste comando, deterá a transmissão do sinal de bloqueio já iniciada pelo comando (START TX).

5) Confirmação da chegada do sinal de bloqueio (RX) do equipamento de teleproteção representado no RTDS ao relé. A sensibilização de uma entrada digital do relé, no recebimento deste comando, bloqueará imediatamente a operação da unidade de sobrealcance (zona 2).

Conforme foi dito no item 4.2.1 do capítulo 4, o cartão GTFPI é o responsável pela interface de todas as entradas e saídas binárias do painel frontal do RTDS com o cartão GPC. Esta característica permite associar cada enlace físico com uma variável qualquer dentro do RSCAD/Draft. Deste modo, as cinco funcionalidades (enlaces) descritas acima foram implementadas na modelagem do sistema teste. Porém, precisou-se modelar um circuito de controle conforme se ilustra na Figura 5.12.

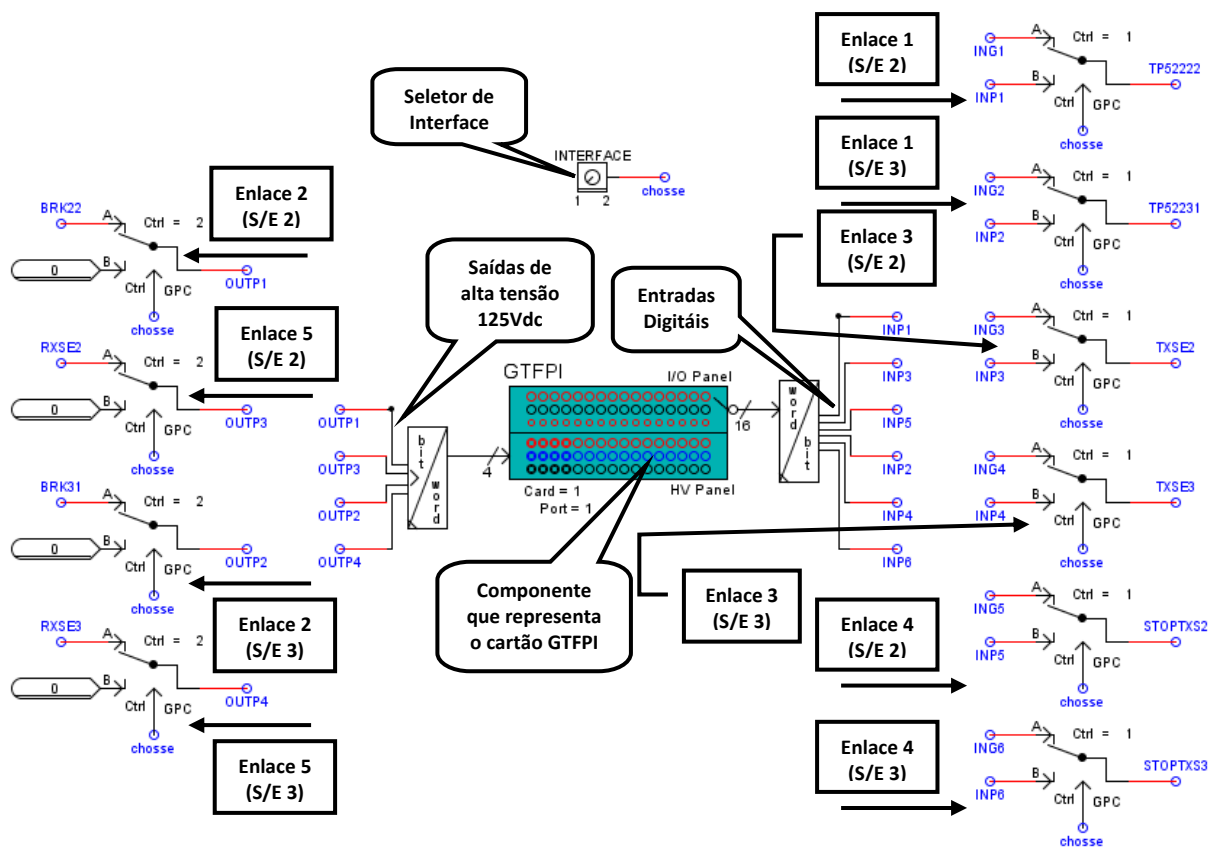


Figura 5.12 – Circuito de controle para uso dos enlaces físicos no RSCAD/Draft

Nesta figura observa-se a representação do cartão GTFPI dentro do RSCAD/Draft. Cada canal deste cartão é associado a uma variável, sendo INP1, INP2, ..., INP6 as variáveis definidas para os canais digitais de entrada e OUTP1, OUTP2, ..., OUTP4 as variáveis definidas para os canais de alta tensão HV (125Vdc) na saída. O componente

seletor (INTERFACE) permite escolher o tipo de interface a ser aplicada nos testes, emprega-se (2) para escolher a interface via fiação convencional. Na Tabela 5.5 descreve-se a implementação física de cada enlace mostrado.

Tabela 5.5 – Implementação física dos enlaces nos dispositivos usados

Enlace Físico	Origem	Destino	Função	Comando
(1)	Contato seco OUT101 Relé SEL-421 (Subestação 2)	Entrada Digital INP1 GTFPI (RTDS)	Envio do comando de disparo do relé ao disjuntor modelado no RTDS.	TRIP 52-222
(1)	Contato seco OUT101 Relé SEL-421 (Subestação 3)	Entrada Digital INP2 GTFPI (RTDS)	Envio do comando de disparo do relé ao disjuntor modelado no RTDS.	TRIP 52-231
(3)	Contato seco OUT102 Relé SEL-421 (Subestação 2)	Entrada Digital INP3 GTFPI (RTDS)	Envio do comando de partida da transmissão do relé ao equipamento de teleproteção representado no RTDS.	START TX
(3)	Contato seco OUT102 Relé SEL-421 (Subestação 3)	Entrada Digital INP4 GTFPI (RTDS)	Envio do comando de partida da transmissão do relé ao equipamento de teleproteção representado no RTDS.	START TX
(4)	Contato seco OUT103 Relé SEL-421 (Subestação 2)	Entrada Digital INP5 GTFPI (RTDS)	Envio do comando de parada da transmissão do relé ao equipamento de teleproteção representado no RTDS.	STOP TX
(4)	Contato seco OUT103 Relé SEL-421 (Subestação 3)	Entrada Digital INP6 GTFPI (RTDS)	Envio do comando de parada da transmissão do relé ao equipamento de teleproteção representado no RTDS.	STOP TX
(2)	Contato seco OUTP1 GTFPI (RTDS)	Entrada Opto-isolada IN101 Relé SEL-421 (Subestação 2)	Transmissão do estado (fechado ou aberto) do disjuntor modelado no RTDS ao relé.	BREAKER STATUS 52-222
(2)	Contato seco OUTP2 GTFPI (RTDS)	Entrada Opto-isolada IN101 Relé SEL-421 (Subestação 3)	Transmissão do estado (fechado ou aberto) do disjuntor modelado no RTDS ao relé.	BREAKER STATUS 52-231
(5)	Contato seco OUTP3 GTFPI (RTDS)	Entrada Opto-isolada IN102 Relé SEL-421 (Subestação 2)	Confirmação da chegada do sinal de bloqueio do equipamento de teleproteção representado no RTDS ao relé.	RX
(5)	Contato seco OUTP4 GTFPI (RTDS)	Entrada Opto-isolada IN102 Relé SEL-421 (Subestação 3)	Confirmação da chegada do sinal de bloqueio do equipamento de teleproteção representado no RTDS ao relé.	RX

5.3.3.2 Interface via Mensagens GOOSE

Neste esquema, conforme se ilustra na Figura 5.13, as interfaces entre os relés de proteção e o RTDS foram implementadas via comunicação serial utilizando mensagens GOOSE.

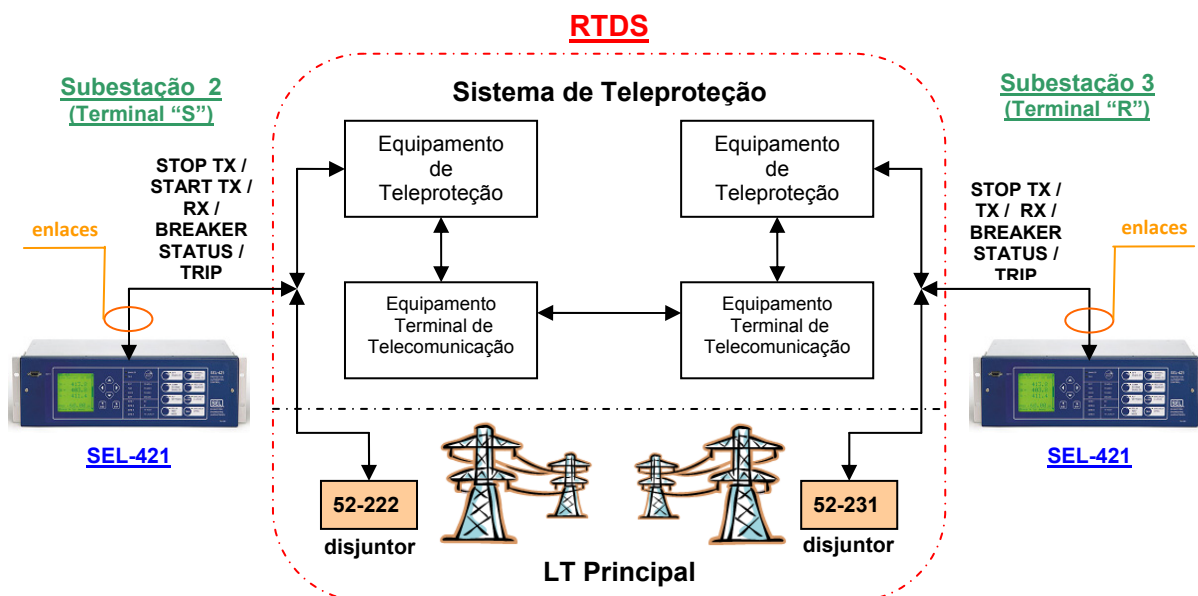


Figura 5.13 – Esquema de interface via GOOSE

No esquema apresentado nesta figura fica difícil identificar visualmente os enlaces físicos das interfaces entre os relés e o RTDS. Esta é uma particularidade da aplicação da norma IEC 61850 em sistemas de automação de subestações. Neste caso, os mesmos enlaces definidos no esquema convencional da Figura 5.11 estão sendo implementados através da configuração de mensagens GOOSE nos relés e o RTDS.

Cada fabricante fornece uma ferramenta de configuração das mensagens GOOSE. Neste caso, a ferramenta *SCD-Editor* fornecida pelo RTDS *Technologies* foi utilizada na configuração das mensagens no cartão GTNET e a ferramenta *AcSElator Architect* fornecida pela *Schweitzer Engineering Laboratories* foi utilizada na configuração das mensagens nos relés SEL-421.

Iniciou-se o processo de configuração das mensagens GOOSE importando o arquivo ICD (*IED Capability Description*) do RTDS dentro da ferramenta *AcSElator Architect*. Este arquivo trouxe todos os nós lógicos disponíveis no único *DataSet* compartilhado pelo cartão GTNET. Conforme se ilustra na Figura 5.14, na criação do arquivo CID (*Configured IED Description*) do relé SEL-421 da subestação 2 (SEL 421_SE2), utilizaram-se os nós lógicos OUT_GGIO1 e OUT_GGIO3 do cartão GTNET para estabelecer os respectivos enlaces com as entradas virtuais CCIN101 e CCIN102 do relé.

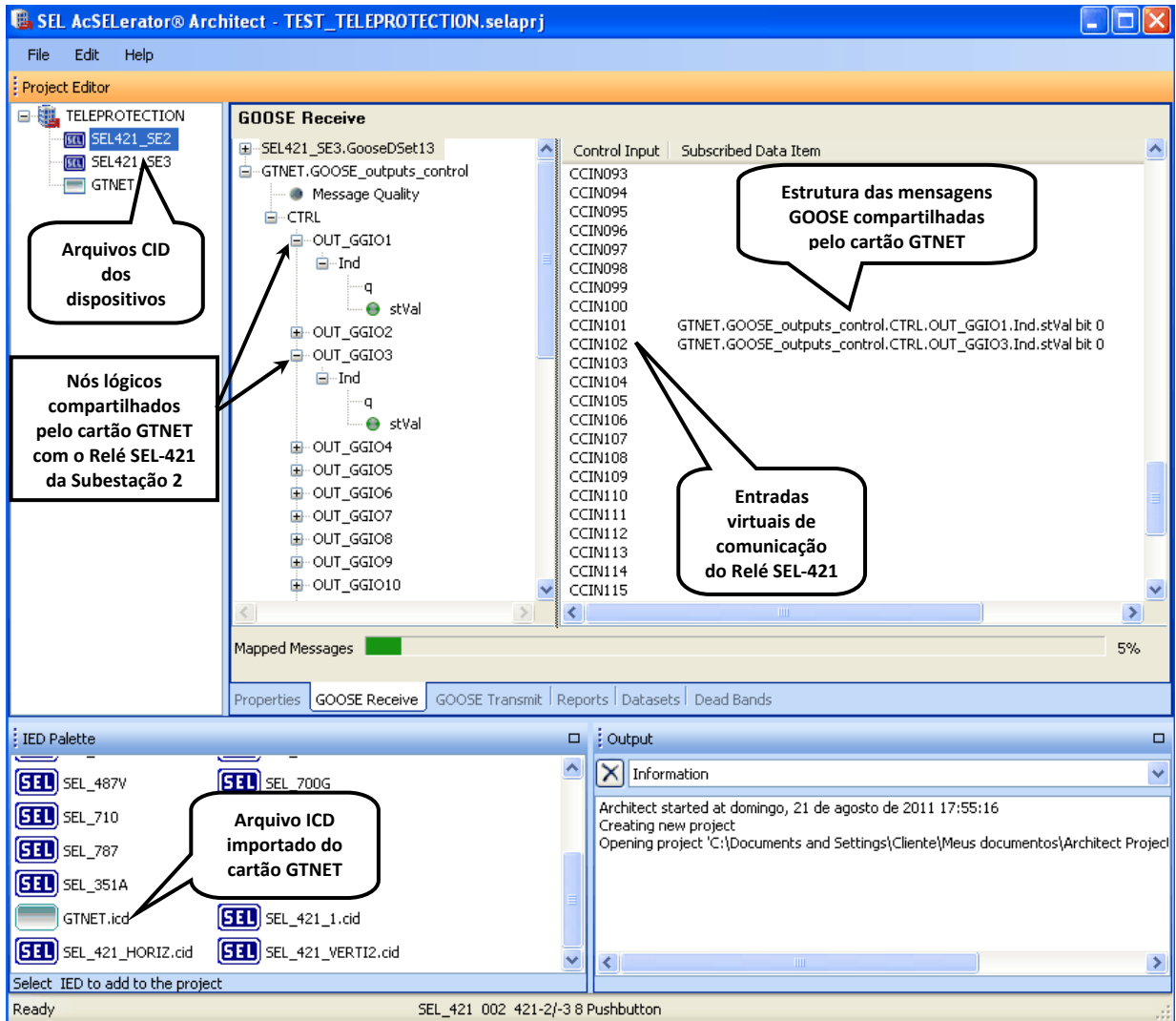


Figura 5.14 – Tela do *AcSELeRator Architect* para configuração das mensagens GOOSE

De forma similar na criação do arquivo CID do relé SEL-421 da subestação 3 (SEL 421_SE3), utilizaram-se os nós lógicos OUT_GGIO2 e OUT_GGIO4 do cartão GTNET para estabelecer um enlace similar com as entradas virtuais CCIN101 e CCIN102 do relé. Conforme será visto na Tabela 5.6, os enlaces aqui configurados via mensagens GOOSE estão relacionados com os comandos BREAKER STATUS e RX enviados do RTDS aos relés de proteção.

Para criação do arquivo CID do cartão GTNET não foi possível utilizar o mesmo aplicativo *AcSELeRator Architect*, pois as ferramentas para configuração das mensagens GOOSE são dedicadas a cada fabricante e não existe compatibilidade entre elas. Esta situação pode ser considerada um dos maiores problemas na viabilização da interoperabilidade dentro do ambiente de subestações conforme o padrão IEC 61850 estabelece. À medida que aumenta o número de dispositivos de diferentes fabricantes

dentro de uma subestação, o tempo e esforço para estabelecer a interoperabilidade entre eles também aumenta. Neste caso, observa-se na Figura 5.15 que os arquivos CID de ambos os relés SEL-421 são importados do *AcSELErator Architect* à ferramenta *SCD-Editor* do RTDS para estabelecer os respectivos enlaces.

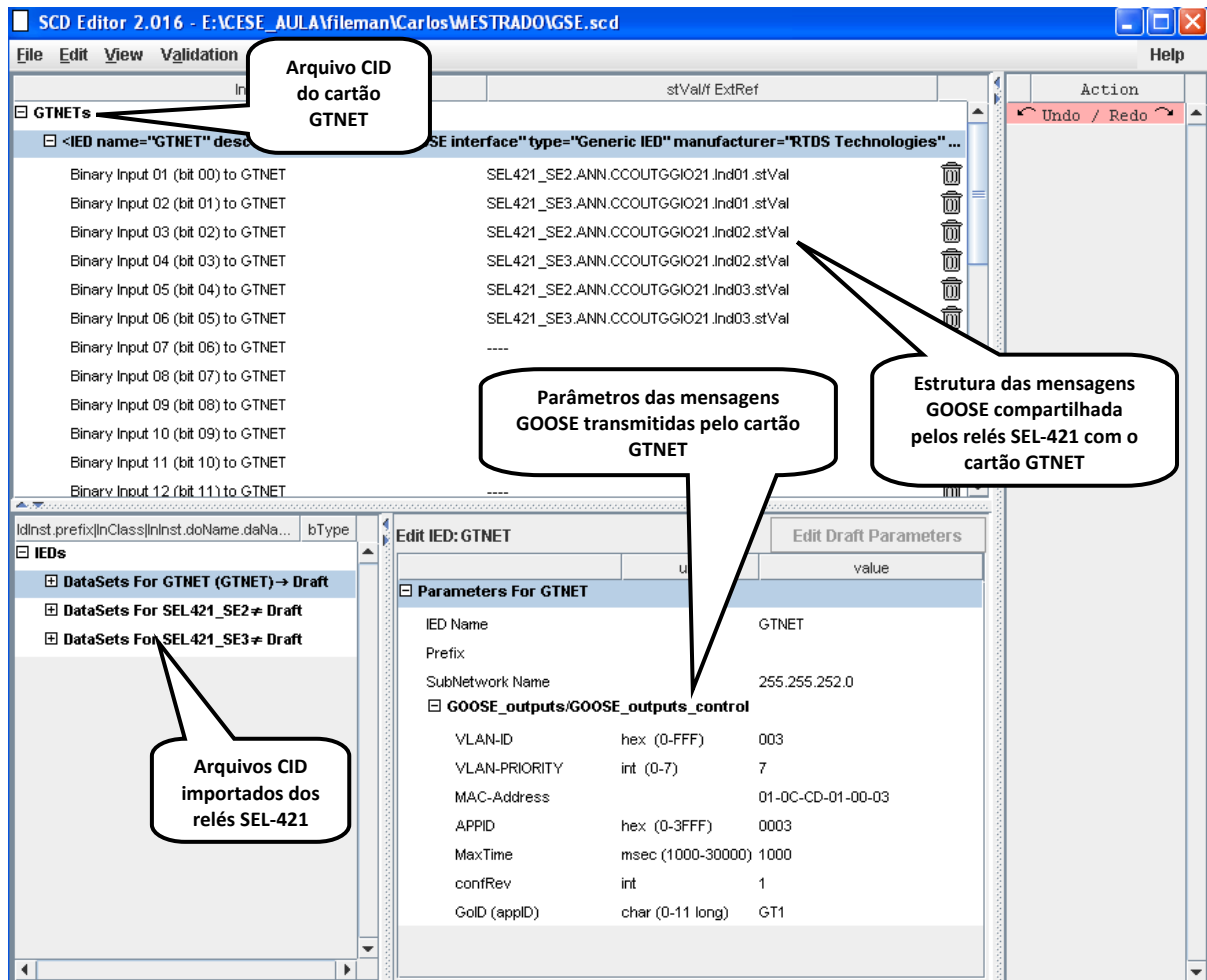


Figura 5.15 – Tela do SCD-Editor para configuração das mensagens GOOSE

Cada arquivo trouxe somente os nós lógicos escolhidos para serem compartilhados pelo relé através de um *DataSet* (*DataSet13 CCOUT Status*). Segundo ilustrado na Figura 5.15, na criação do arquivo CID do cartão GTNET, utilizaram-se três nós lógicos CCOUTGGIO21 de cada relé para estabelecer os respectivos enlaces com as entradas virtuais (*Binary Input*) bit00, bit01, bit02, bit03, bit04, bit05 e bit06. Conforme apresenta a Tabela 5.6, os enlaces aqui configurados via mensagens GOOSE estão relacionados com os comandos TRIP, START TX e STOP TX, enviados dos relés de proteção ao RTDS.

Tabela 5.6 – Mensagens GOOSE parametrizadas

MENSAGENS GOOSE			
Origem	Destino	Estrutura	Função
Saída Virtual CCOUT01 Relé SEL-421 (Subestação 2)	Entrada Virtual ING1 (bit00) GTNET (RTDS)	SEL421_SE2.ANN.CCOOUGGIO21.Ind01.stVal	TRIP 52-222
Saída Virtual CCOUT01 Relé SEL-421 (Subestação 3)	Entrada Virtual ING2 (bit01) GTNET (RTDS)	SEL421_SE3.ANN.CCOOUGGIO21.Ind01.stVal	TRIP 52-231
Saída Virtual CCOUT02 Relé SEL-421 (Subestação 2)	Entrada Virtual ING3 (bit02) GTNET (RTDS)	SEL421_SE2.ANN.CCOOUGGIO21.Ind02.stVal	START TX
Saída Virtual CCOUT02 Relé SEL-421 (Subestação 3)	Entrada Virtual ING4 (bit03) GTNET (RTDS)	SEL421_SE3.ANN.CCOOUGGIO21.Ind02.stVal	START TX
Saída Virtual CCOUT03 Relé SEL-421 (Subestação 2)	Entrada Virtual ING5 (bit04) GTNET (RTDS)	SEL421_SE2.ANN.CCOOUGGIO21.Ind03.stVal	STOP TX
Saída Virtual CCOUT03 Relé SEL-421 (Subestação 3)	Entrada Virtual ING6 (bit05) GTNET (RTDS)	SEL421_SE3.ANN.CCOOUGGIO21.Ind03.stVal	STOP TX
Saída Virtual OUTG1 (bit00) GTNET (RTDS)	Entrada Virtual CCIN101 Relé SEL-421 (Subestação 2)	GTNET.GOOSE_outputs_control.CTRL..OUT_GGIO1.Ind.stval	BREAKER STATUS 52-222
Saída Virtual OUTG2 (bit01) GTNET (RTDS)	Entrada Virtual CCIN101 Relé SEL-421 (Subestação 3)	GTNET.GOOSE_outputs_control.CTRL..OUT_GGIO2.Ind.stval	BREAKER STATUS 52-231
Saída Virtual OUTG3 (bit02) GTNET (RTDS)	Entrada Virtual CCIN102 Relé SEL-421 (Subestação 2)	GTNET.GOOSE_outputs_control.CTRL..OUT_GGIO3.Ind.stval	RX
Saída Virtual OUTG4 (bit03) GTNET (RTDS)	Entrada Virtual CCIN102 Relé SEL-421 (Subestação 3)	GTNET.GOOSE_outputs_control.CTRL..OUT_GGIO4.Ind.stval	RX

Pode-se observar que todas as mensagens GOOSE configuradas para implementação do esquema de teleproteção DCB estão resumidas na Tabela 5.6. Somente através desta informação se torna possível conhecer e entender todos os enlaces estabelecidos entre os dispositivos físicos do esquema de teleproteção implementado.

Conforme foi dito no item 4.2.1 do capítulo 4, toda informação recebida da rede LAN pelo cartão GTNET é retransmitida para o GPC. Da mesma forma, toda informação recebida do cartão GPC pelo GTNET, pode ser retransmitida para a rede LAN. Esta característica permite associar cada enlace virtual (conexão lógica) implementado via mensagens GOOSE, com uma variável qualquer dentro do RSCAD/*Draft*. Portanto,

modelou-se no RSCAD/Draft um circuito de controle que permite interpretar binariamente a informação recebida do cartão GTNET e também transformar os bits existentes no RSCAD/Draft em informação que possa ser retransmitida pelo cartão GTNET. A Figura 5.16 ilustra o circuito de controle implementado.

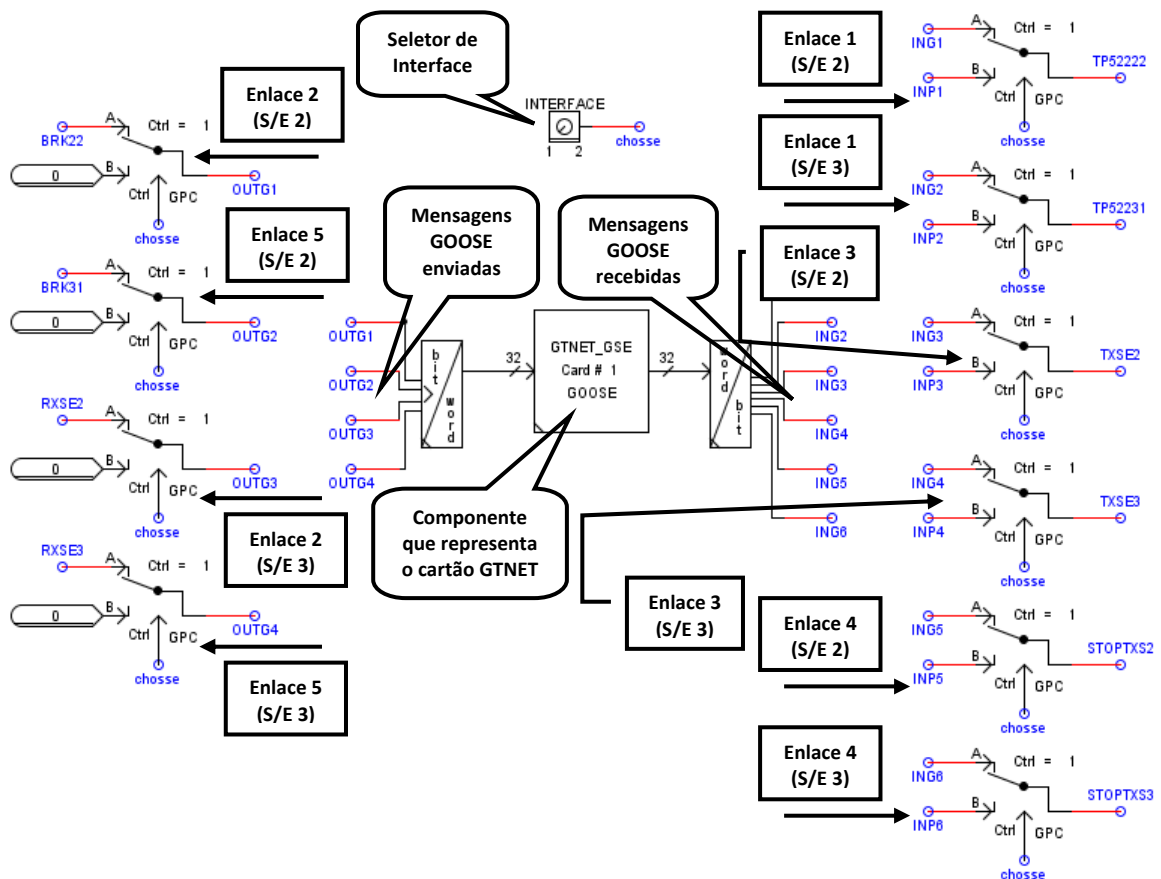


Figura 5.16 – Circuito de controle para uso dos enlaces virtuais no RSCAD/Draft

Nesta figura observa-se a representação do cartão GTNET dentro do RSCAD/Draft. Cada mensagem enviada ou recebida por este cartão é associada a uma variável, sendo ING1, ING2, ..., ING6 as variáveis definidas para as mensagens GOOSE recebidas e OUTG1, OUTG2, ..., OUTG4 as variáveis definidas para as mensagens GOOSE enviadas. O componente seletor (INTERFACE) permite escolher o tipo de interface a ser aplicada nos testes, empregando-se (1) para escolher a interface via mensagens GOOSE. Na Tabela 5.6 foi descrita a implementação física de cada enlace mostrado na Figura 5.16.

- Depois de concluído o tempo de *debounce*, inicia-se a contagem do tempo T_{A2} que representa a segunda parcela do tempo total T_A . O cálculo deste tempo é dado pela equação (5.1):

$$T_{A2} = T_{ST} + T_{pu\,input} + T_{pu\,output} \quad (5.1)$$

onde:

T_{ST} : tempo do sistema de telecomunicação.

$T_{pu\,input}$: tempo de operação da entrada binária do equipamento de teleproteção do terminal transmissor “S”.

$T_{pu\,output}$: tempo de operação do contato de saída do equipamento de teleproteção do terminal receptor “R”.

Seguindo os requisitos expostos na Tabela 2.5 do capítulo 2, adota-se o valor máximo de $T_A=24\text{ms}$ para os testes do esquema DCB. Assim, considerando a primeira parcela $T_{A1}=3\text{ms}$, define-se a segunda parcela como $T_{A2}=21\text{ms}$. O valor de T_{A2} é calculado considerando os valores de $T_{pu\,input}=2\text{ms}$ e $T_{pu\,output}=4\text{ms}$, similares aos atrasos apresentados pelas entradas e saídas binárias do relé SEL-421. Os 15ms restantes de T_{A2} são considerados como o tempo de atraso do sinal de bloqueio no sistema de telecomunicação.

NOTA: Vale ressaltar que as entradas e saídas binárias do RTDS apresentam uma latência baixa na operação, da ordem dos micro-segundos. Este fato justifica a compensação dos tempos $T_{pu\,input}$ e $T_{pu\,output}$ dentro da lógica de controle implementada.

- Terminada a temporização de T_{A2} , a variável RXSE3 é ativada e um comando de confirmação (RX) é enviado ao relé SEL-421 do terminal receptor “R” (subestação 3). Este comando indica ao relé a chegada do sinal de bloqueio.

Outras variáveis de interesse são consideradas no circuito da Figura 5.17. Por exemplo, a variável DISCOMM permite simular a perda do canal de telecomunicação durante os testes. A variável STOPTXS2 está associada com o comando de parada da

transmissão do sinal de bloqueio enviado pelo próprio relé do terminal “S” após determinar corretamente o sentido da falta.

5.3.4.2 Circuito de Teleproteção para Interface via Mensagens GOOSE

De modo similar ao item 5.3.4.1, foram também modelados nesta etapa dois circuitos de controle para representar a transmissão do sinal de bloqueio de ambos extremos da LT principal. Ambos os circuitos são apresentados na Figura 5.18.

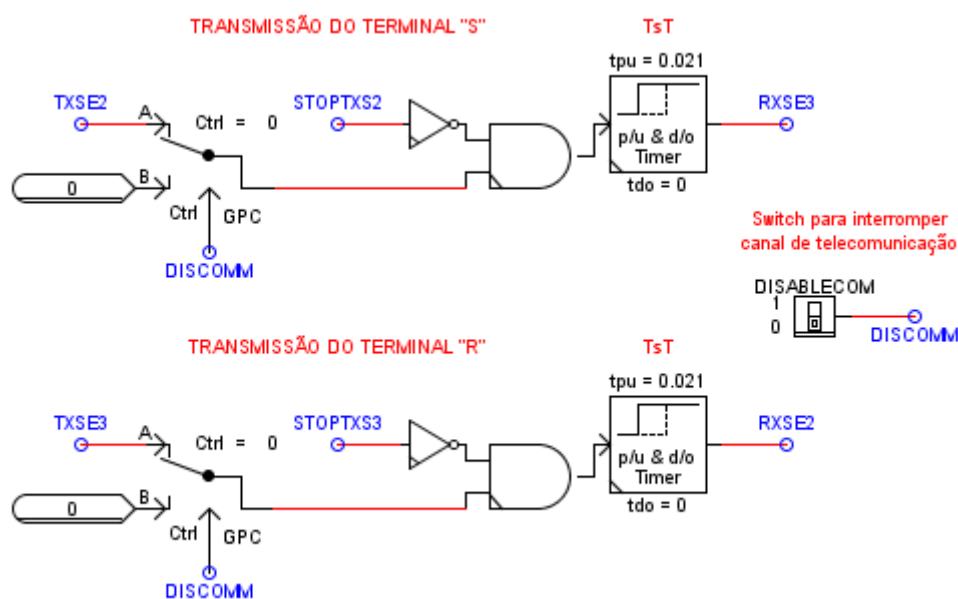


Figura 5.18 – Circuito que representa a transmissão do sinal de bloqueio com interface GOOSE

Baseados no circuito que representa a transmissão do terminal “S”, explica-se seu funcionamento na seguinte sequência:

1. A variável de entrada TXSE2 é ativada quando o relé SEL-421 do terminal transmissor “S” (subestação 2) envia uma mensagem GOOSE (START TX) ao RTDS, indicando a partida da transmissão do sinal de bloqueio.
NOTA: A variável TXSE2 é ativada após o cartão GTNET decodificar a mensagem GOOSE enviada pelo relé.
2. Imediatamente, depois de ativada a variável TXSE2, inicia-se a contagem do tempo do sistema de telecomunicação $T_{ST}=21\text{ms}$. Este valor é determinado considerando o tempo de $T_A=24\text{ms}$, onde os 3ms restantes representam o tempo

gasto na decodificação e nova codificação da mensagem GOOSE “START TX” no cartão GTNET.

NOTA: Conforme foi mencionado no item 3.3.5.1, as entradas e saídas binárias do esquema de interface convencional são substituídas pela codificação e decodificação das respectivas mensagens GOOSE. Enquanto, as entradas e saídas binárias do RTDS apresentam uma latência da ordem dos micro-segundos na operação, o tempo total gasto na decodificação e codificação de uma mensagem GOOSE neste equipamento, apresenta um valor típico de 3ms.

3. Terminada a temporização de T_{ST} , a variável RXSE3 é ativada e uma nova mensagem GOOSE (RX) é posteriormente codificada no cartão GTNET e enviada ao relé SEL-421 do terminal receptor “R” (subestação 3), confirmando a chegada do sinal de bloqueio.

Destaca-se também neste circuito o uso da variável DISCOMM para simular a perda do canal de telecomunicação durante os testes e o uso da variável STOPTXS2 para deter a transmissão do sinal de bloqueio.

5.3.5 Interface de Sinais Analógicos

Para avaliar o esquema de teleproteção implementado com os recursos do RTDS, torna-se necessário fornecer aos relés físicos (SEL-421) os sinais analógicos de tensão e de corrente da LT principal. Conforme foi mencionado no item 4.2.1 do capítulo 4, o RTDS permite o fornecimento destes sinais através do cartão de interface externa GTA0. No entanto, o componente que representa este cartão dentro do RSCAD/*Draft* precisa ser previamente parametrizado. Resumem-se a seguir os principais parâmetros definidos:

- a) Número de canais utilizados: seis canais (três de tensão e três de corrente) para o terminal transmissor “S” e outros seis canais (três de tensão e três de corrente) para o terminal receptor “R”.
- b) Escala de conversão D/A: 25unidades/5V para os sinais de corrente e 250unidades/5V para os sinais de tensão.

Cabe recordar que os sinais analógicos fornecidos pelo cartão GTA0 são de baixa tensão (máximo ± 10 Volts AC) e precisam ser amplificados antes de serem injetados nos relés. Deste modo, dois amplificadores OMICRON CMS 156 foram utilizados na interface analógica com os relés, ambos com uma taxa de amplificação similar à taxa de conversão D/A do cartão GTA0 (1V/5A para os sinais de corrente e 1V/50V para os sinais de tensão).

O componente GTA0 utilizado na modelagem dentro do RSCAD/*Draft* é ilustrado na Figura 5.19. As variáveis de entrada Ia52-222, Ib52-222, Ic52-222 e Va52-222, Vb52-222, Vc52-222 representam, respectivamente, as correntes e as tensões secundárias do terminal “S” da LT principal, que são recebidas externamente pelo relé SEL-421 da Subestação 2. As variáveis Ia52-231, Ib52-231, Ic52-231 e Va52-231, Vb52-231, Vc52-231 representam as correntes e as tensões secundárias do terminal “R” da LT principal, que são recebidas externamente pelo relé SEL-421 da Subestação 3.

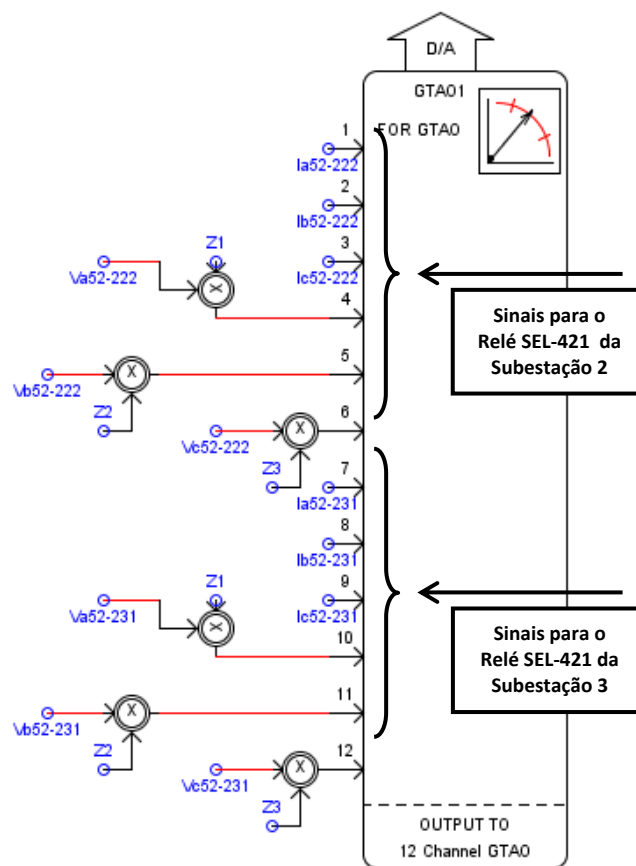


Figura 5.19 – Modelagem do componente GTA0 de interface D/A

5.4 Implementação do *Hardware-in-the-Loop*

Juntando os circuitos de interface digital descritos no item 5.3.3, com os circuitos de interface analógica descritos no item 5.3.5, obtém-se o esquema de teste de malha fechada (*Hardware-in-the-loop*) conforme ilustrado na Figura 5.20. Com base neste esquema executaram-se todas as simulações necessárias dentro do RTDS que permitiram avaliar o desempenho do esquema de teleproteção implementado.

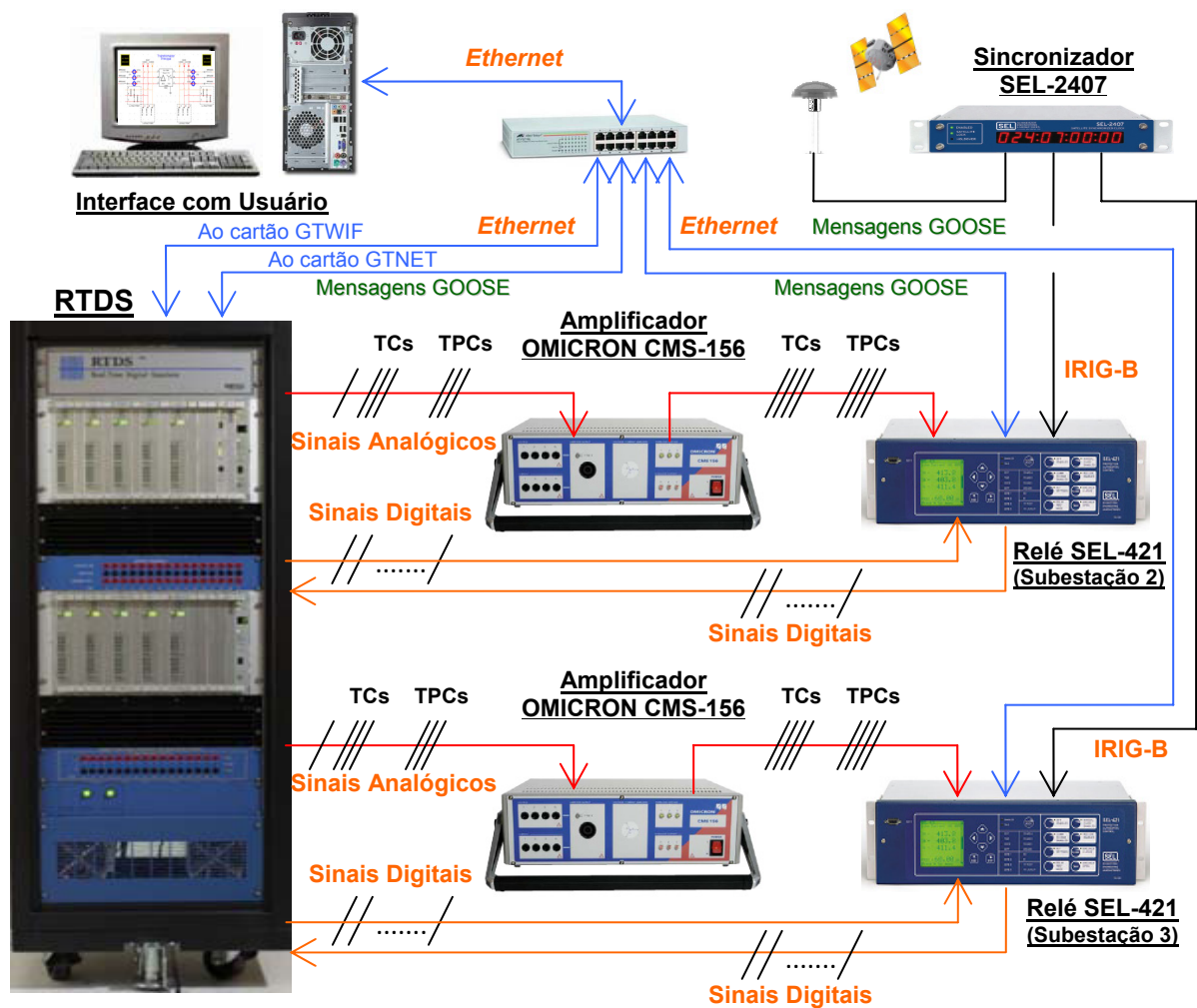


Figura 5.20 – *Hardware-in-the-loop* do caso teste

Pode-se observar na Figura 5.20 que ambos os relés SEL-421 mantiveram-se sincronizados com a referência de tempo do sistema GPS (*Global Positioning System*) através do dispositivo SEL-2407. O formato de sincronização IRG-B demodulado com

exatidão de tempo de $\pm 100\text{ns}$ (média) foi escolhido dentre os formatos disponíveis neste dispositivo. A fim de se comunicar os pulsos de sincronização, estabeleceram-se ligações diretas entre o dispositivo SEL-2407 e cada um dos relés SEL-421 através de cabo coaxial com conectores tipo BNC-BNC.

A sincronização com significativa exatidão dos dispositivos de proteção e a operação do RTDS em tempo real são aspectos fundamentais na análise da resposta no domínio do tempo do esquema de teleproteção, sendo esta análise o foco principal deste trabalho de dissertação.

Na Figura 5.21 apresenta-se uma foto da montagem real do esquema da Figura 5.20, feita no “Laboratório de Proteção de Sistemas Elétricos” do “Grupo de Estudos da Qualidade da Energia Elétrica – GQEE” da “Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI”.

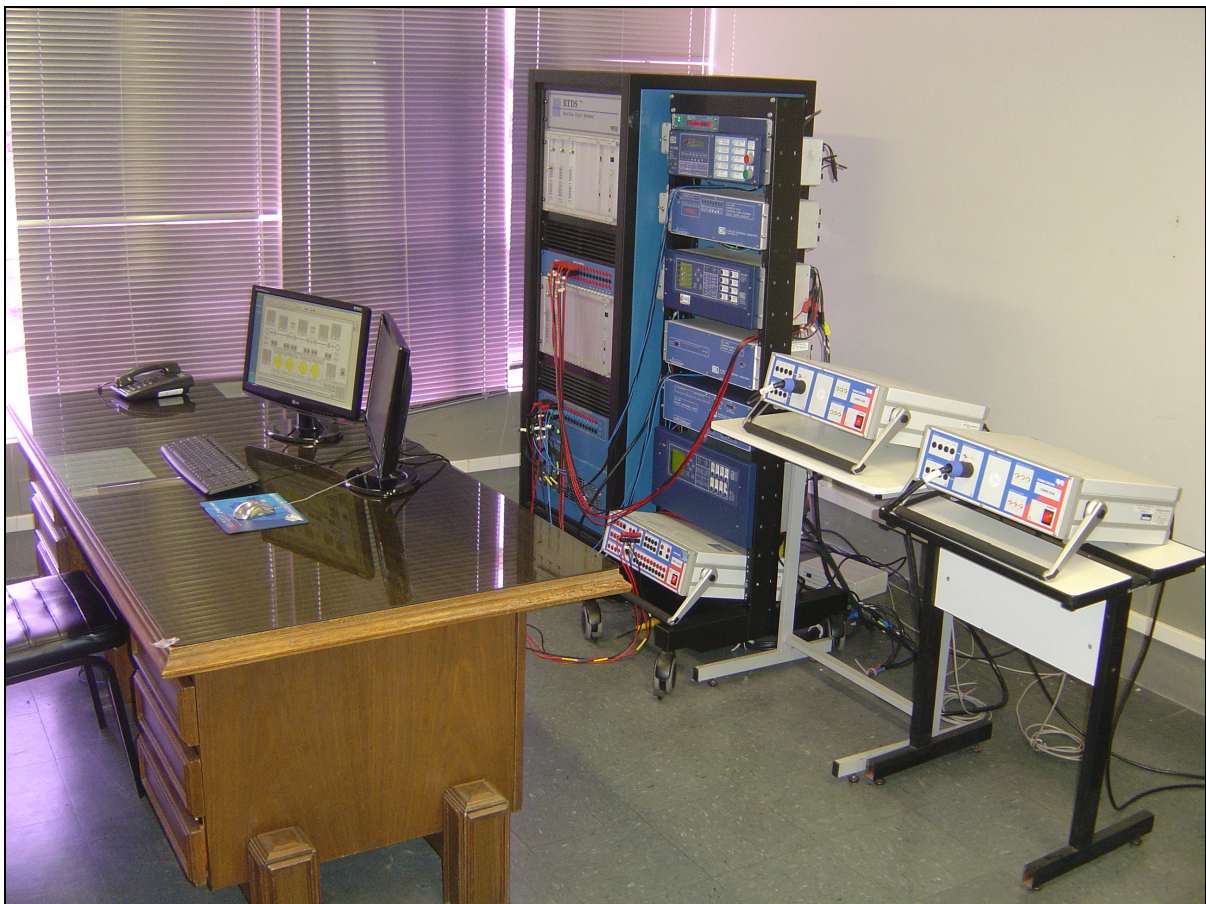


Figura 5.21 – Implementação real do *Hardware-in-the-loop* do caso teste

5.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram aplicados os principais recursos do RTDS na modelagem e implementação dos circuitos de testes do esquema de teleproteção DCB. Neste desenvolvimento buscou-se destacar as potencialidades do RTDS.

Finalmente, foram propostas duas metodologias de testes para o esquema de teleproteção, uma com interface convencional e outra com interface via mensagens GOOSE. Neste sentido, cabe no capítulo a seguir analisar unicamente os resultados das simulações, bem como as vantagens e as desvantagens que ambas as metodologias apresentam no desempenho do esquema de teleproteção.

Capítulo 6

Resultados

6.1 Considerações Iniciais

O objetivo deste capítulo é apresentar e analisar os resultados obtidos dos testes do esquema de teleproteção DCB.

Primeiramente, apresentam-se os principais critérios adotados na parametrização das funções de proteção, envolvidas no funcionamento da lógica DCB do relé SEL-421.

Na sequência, são apresentados os resultados obtidos dos testes utilizando a interface convencional entre o relé de proteção e o RTDS. Mediante testes dentro e fora da LT principal se analisa o desempenho do esquema de teleproteção implementado. Nesta análise são utilizados os registros sequenciais de eventos e os relatórios gráficos disponibilizados por cada relé.

Finalmente, utilizando os mesmos cenários de teste, realiza-se uma comparação entre os resultados obtidos empregando interface convencional e os resultados obtidos com interface via mensagens GOOSE.

6.2 Ajustes do Relé SEL-421

Para dar subsídios ao trabalho, são descritas a seguir as principais funções do relé SEL-421, necessárias na operação do esquema de teleproteção implementado.

6.2.1 Esquema Lógico DCB

O relé SEL-421 possui um esquema lógico DCB conforme ilustra a Figura 6.1. Neste esquema, destacam-se quatro funcionalidades importantes, que são: o tempo de coordenação, as funções de partida da transmissão do sinal de bloqueio, extensão do sinal de bloqueio e as funções de parada da transmissão do sinal de bloqueio.

6.2.1.1 Tempo de Coordenação

O tempo de coordenação do esquema DCB é representado pelas temporizações 21SD e 67SD do esquema lógico mostrado na Figura 6.1. O temporizador 21SD está associado com a operação das funções de proteção de distância de zona 2 de fase (M2P) e terra (Z2G). O temporizador 67SD é associado com a operação das funções de proteção

direcional de sobrecorrente residual (67G2) e de sequência negativa (67Q2), ambas de nível 2. Se o sinal de bloqueio não chegar dentro do período de tempo estabelecido nesses temporizadores, as respectivas funções de proteção enviarão o comando de disparo ao disjuntor através dos *Word Bits* Z2PGS e 67QG2S associados a uma saída binária ou uma saída virtual do relé.

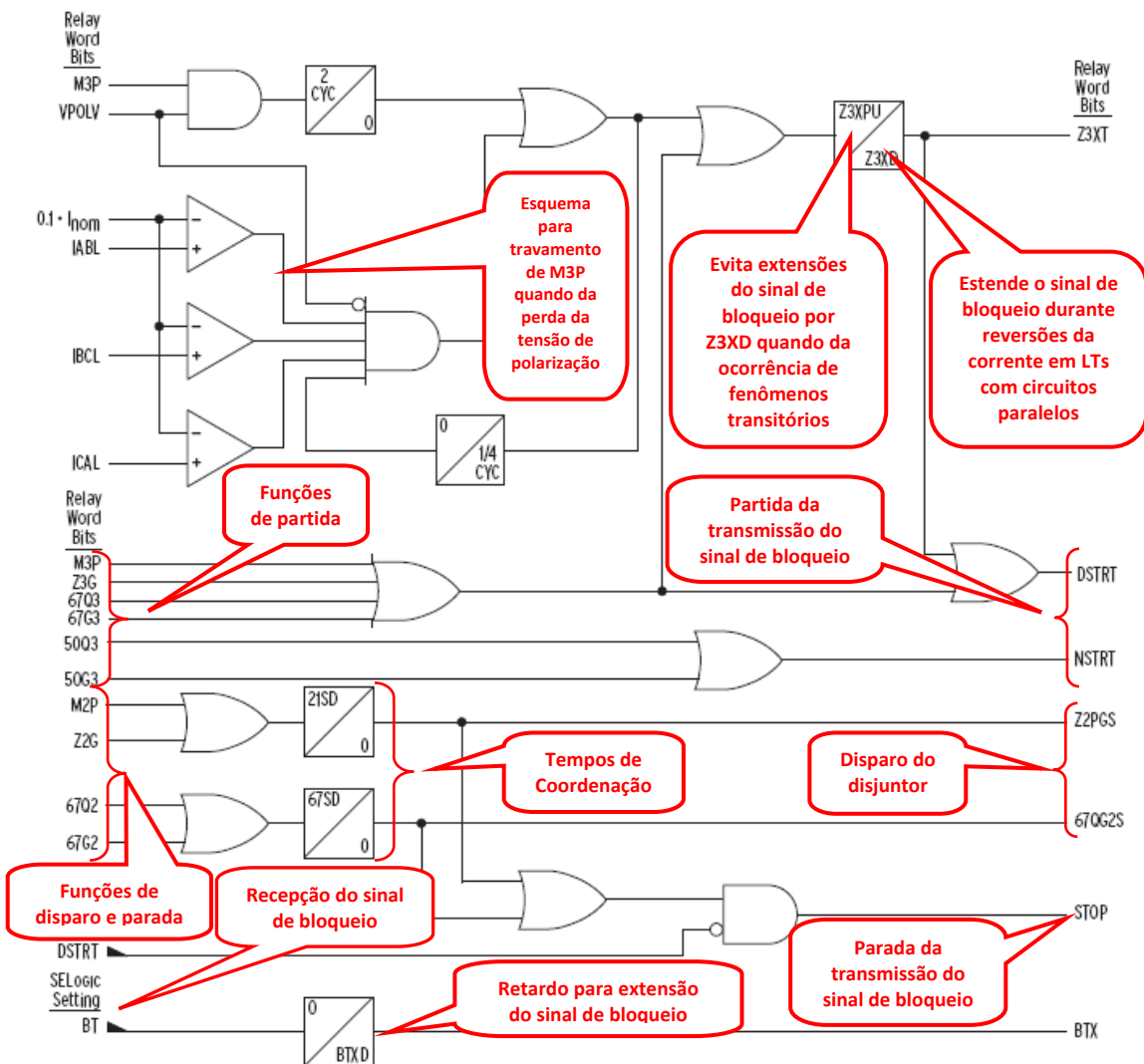


Figura 6.1 – Esquema lógico DCB do relé SEL-421

No esquema de teleproteção implementado por interface convencional, foi utilizado o contacto seco OUT101 do relé para transmissão do sinal de disparo ao disjuntor modelado no RTDS. Similarmente, para o esquema implementado por interface que utiliza mensagens GOOSE, emprega-se a saída virtual CCOUT01 do relé. Em ambos os casos as temporizações de 21SD e 67SD foram parametrizadas em 2 ciclos, com base no valor total apresentado na última linha da Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Cálculo da temporização de 21SD e 67SD

Períodos	Detalhe	Tempo (em ms.)
T ₁	Tempo de operação da teleproteção (T _A). (máximo valor recomendado na Tabela 2.5)	24,00
T ₂	Tempo de operação do contato seco do relé do terminal transmissor “S”	4,00
T ₃	Tempo de operação da entrada opto-isolada do relé do terminal receptor “R”.	2,00
T ₄	Compensação de <i>debounce</i> na entrada do relé do terminal receptor “R”.	3,00
	TOTAL (T₁+T₂+T₃+T₄)	33,00 (1,98 ciclos)

6.2.1.2 Funções de Partida da Transmissão do Sinal de Bloqueio

No esquema da Figura 6.1, observa-se que as funções de partida da transmissão do sinal de bloqueio podem ser direcionais e não direcionais. Dentro do grupo não direcional, associado ao *Word Bit* NSTRT, encontram-se as funções de proteção de sobrecorrente residual de nível 3 (50G3) e de sequência negativa (50Q3). Por outro lado, dentro do grupo direcional, associado ao *Word Bit* DSTRT, encontram-se as funções de distância de zona 3 de fase (M3P) e de terra (Z3G) e as funções de proteção direcional de sobrecorrente residual de nível 3 (67G3) e de sequência negativa (67Q3). Ambos *Word Bits* NSTRT e DSTRT permitem operar uma saída binária ou saída virtual do relé, para comunicar a partida da transmissão do sinal de bloqueio ao equipamento de teleproteção.

As funções não direcionais são empregadas nesta lógica objetivando ter um menor tempo na transmissão do sinal de bloqueio. Porém, quando da atuação destas funções de proteção para faltas diretas, cria-se o problema de transmissão indevida do sinal de bloqueio. Esta operação indevida é corrigida pela atuação das funções diretas M2P, Z2G, 67G2 e 67Q2, conforme será abordado posteriormente no subitem 6.2.1.4.

No esquema de teleproteção implementado com interface convencional, foi utilizado o contacto seco OUT102 do relé para dar partida na transmissão do sinal bloqueio ao equipamento de teleproteção modelado no RTDS. Similarmente, para o esquema com interface GOOSE, emprega-se a saída virtual CCOUT02 do relé. Os critérios de ajuste adotados na parametrização das funções direcionais e não direcionais de nível 3 e zona 3, são apresentados no item 6.2.2.

6.2.1.3 Extensão do Sinal de Bloqueio

A extensão do sinal de bloqueio evita que interrupções momentâneas na transmissão do sinal (*carrier holes*), ocasionem um falso disparo do disjuntor. Este retardo de tempo é habilitado através do temporizador BTXD, presente no esquema lógico da Figura 6.1. Sua sensibilização (*pick-up*) resultará do recebimento do sinal de bloqueio através de uma entrada binária ou uma entrada virtual do relé. O *Word Bit* BTX, que representa a saída do temporizador BTXD, bloqueará o comando de disparo executado pelos *Word Bits* Z2PGS e 67QG2S, depois de concluídos os tempos de coordenação 21SD e 67SD.

No esquema de teleproteção implementado através do RTDS, descarta-se a presença de interrupções momentâneas na transmissão do sinal de bloqueio. Deste modo, uma temporização de zero é parametrizada no componente BTXD. Na implementação com interface convencional, a entrada opto-isolada IN102 do relé foi habilitada para receber o sinal de bloqueio do equipamento de teleproteção representado no RTDS. No caso do esquema com interface via GOOSE, emprega-se a entrada virtual CCIN102 do relé.

6.2.1.4 Funções de Parada da Transmissão do Sinal de Bloqueio

Observa-se no esquema da Figura 6.1, que as funções de distância de zona 2 de fase (M2P) e de terra (Z2G) e as funções de proteção direcional de sobrecorrente residual de nível 2 (67G2) e de sequência negativa (67Q2), são empregadas na parada da transmissão do sinal de bloqueio. Toda vez que os *Word Bits* Z2PGS e 67QG2S forem habilitados sem existir a operação de uma das funções direcionais DSTRT, o *Word Bit* STOP permitirá operar uma saída binária ou virtual do relé para comunicar a parada da transmissão do sinal de bloqueio ao equipamento de teleproteção.

No esquema de teleproteção implementado, com interface convencional, foi utilizado o contato seco OUT103 do relé para transmissão do comando de parada ao equipamento de teleproteção representado no RTDS. Similarmente, no esquema com interface via GOOSE, emprega-se a saída virtual CCOUT03 do relé. Os critérios de ajuste adotados na parametrização das funções direcionais de nível 2 ou zona 2 são apresentados no item 6.2.2.

6.2.2 Ajustes das Funções de Proteção

Conforme apresentado no item 6.2.1, o esquema lógico DCB implementado pelo relé SEL-421 envolve três tipos de funções de proteção que são: proteção de distância, de sobrecorrente e proteção direcional de sobrecorrente. Para atender as funcionalidades básicas do esquema de teleproteção, vários critérios de ajuste foram adotados na parametrização destas funções de proteção. Estes são apresentados nos subitens a seguir.

6.2.2.1 Funções de Proteção de Distância (M1P, Z1G, M2P, Z2G, M3P e Z3G)

As funções de proteção de distância foram empregadas na proteção contra todo tipo de falta dentro da LT principal e na detecção de faltas dentro das LTs adjacentes. As funções de distância com características MHO (M1P, M2P e M3P) são utilizadas na proteção contra faltas entre fases e as funções com características quadrilaterais (Z1G, Z2G e Z3G) na proteção contra faltas do tipo fase-terra. Três zonas de proteção foram estabelecidas para ambas as funções. A zona 1 e zona 2 com ajuste em sentido direto para proteção total da LT principal e a zona 3 com ajuste em sentido reverso unicamente para detecção de faltas nas LTs adjacentes. As Figuras 6.2(a) e 6.2(b) ilustram as características de distância ajustadas no relé SEL-421.

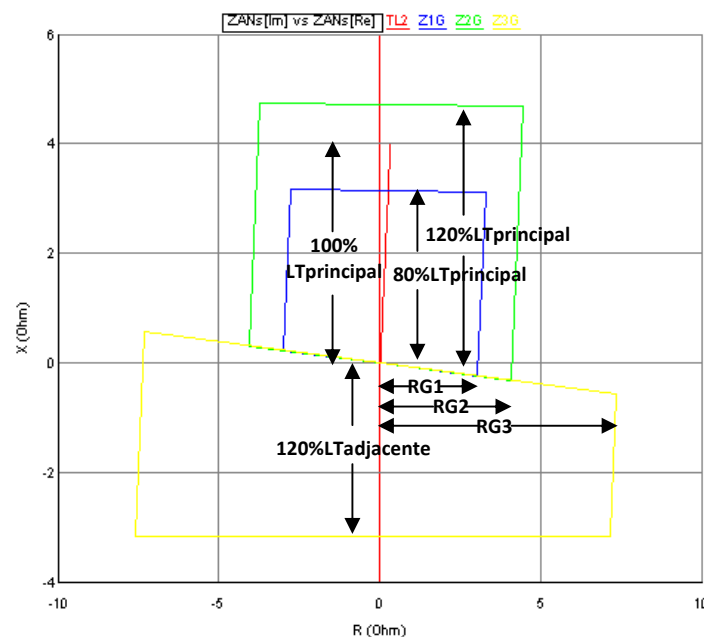


Figura 6.2(a) – Características Quadrilaterais ajustadas no relé SEL-421

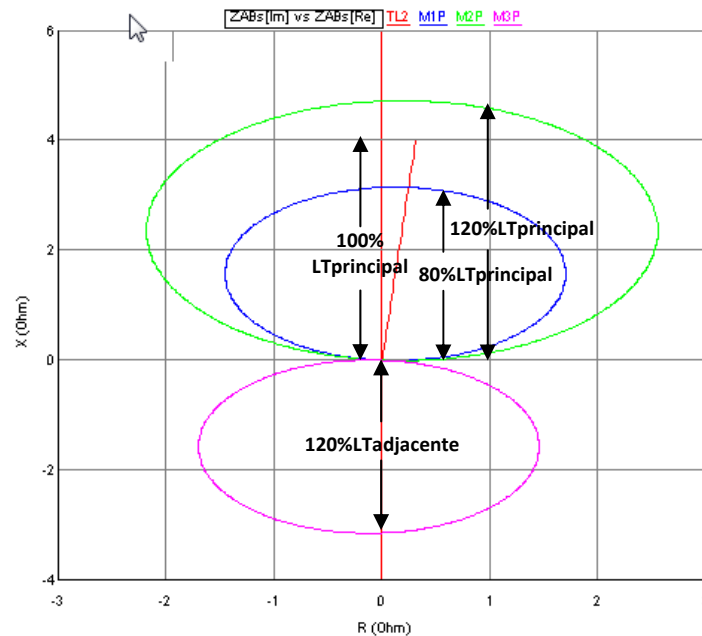


Figura 6.2(b) – Características MHO ajustadas no relé SEL-421

Pode-se observar nestas figuras que os alcances das zonas de proteção são similares para ambas as características. O alcance de zona 1 foi configurado para abranger 80% da LT principal e o alcance de zona 2, 120% desta mesma linha. Diferentemente, o alcance de zona 3 foi configurado para abranger 120% da LT adjacente. Os alcances resistivos RG1, RG2 e RG3, das características quadrilaterais, foram calculados com base nos critérios estabelecidos na Seção 1 do *Application Handbook* do relé SEL-421 (SEL, 2010). Todos os parâmetros correspondentes aos ajustes das zonas de proteção se apresentam na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Ajustes das zonas de proteção de distância

Zonas de Proteção	Característica MHO	Característica Quadrilateral					
	Alcance (Ohms)	Alcance (Ohms)		Corrente de Polarização		Ângulo de Correção da Não Homogeneidade do Sistema (°)	
	Z	XG	RG	Terminal Transmissor	Terminal Receptor	Terminal Transmissor	Terminal Receptor
Zona 1	2,72	2,72	2,45	Corrente de Sequência Zero	Corrente de Sequência Negativa	0,637	0,599
Zona 2	4,08	4,08	3,48				
Zona 3	2,72	2,72	4,35				

Conforme ilustra a Figura 6.1, somente as unidades de zona 2 e zona 3 instantâneas, são empregadas no esquema lógico DCB do relé SEL-421. No entanto, cabe mencionar que as unidades de zona 1 instantânea e zona 2 temporizada foram aplicadas na proteção *stand alone* da LT principal.

6.2.2.2 Funções de Proteção de Sobrecorrente

a) Proteção de sobrecorrente de fase (50P1 e 51S1T)

As funções instantânea (50P1) e temporizada (51S1T) de sobrecorrente de fase não são requeridas pelo esquema lógico DCB do relé SEL-421. Porém, estas funções foram aplicadas na proteção *stand alone* da LT principal. São detalhados a seguir os critérios de ajuste adotados nestas unidades:

- A unidade instantânea deve ser ajustada em função do curto-circuito trifásico máximo para falta externa (ORDAGCI, 2010), conforme apresenta a equação (6.1).

$$I_{\text{PICK-UP}} \geq \text{FS} \cdot \frac{I_{\text{CC3}\Phi\text{MÁX}}}{\text{RTC}} \quad (6.1)$$

onde

FS: fator de segurança cujo valor típico de 1,25, aplica-se a todas as tecnologias de relés, eletromecânica, estática e digital.

$I_{\text{PICK-UP}}$: valor eficaz da corrente de operação da unidade instantânea.

$I_{\text{CC3}\Phi\text{MÁX}}$: valor eficaz da corrente de curto-circuito trifásico máximo, considerando uma resistência de falta $R_f=0\Omega$.

RTC: relação de transformação do TC. (1000:5)

- O tap da unidade temporizada deve ser calculado considerando o máximo carregamento e o curto-circuito bifásico mínimo no fim da LT adjacente, eletricamente mais longa (ORDAGCI, 2010), conforme apresenta a equação (6.2).

$$\frac{I_{\text{CARGA MÁX}}}{\text{RTC}} < \text{TAP} < \frac{I_{\text{CC2}\Phi\text{MÍN}}}{M \cdot \text{RTC}} \quad (6.2)$$

onde

$I_{\text{CARGA MÁX}}$: valor eficaz da corrente de máximo carregamento da LT.

$I_{\text{CC2}\Phi\text{MÍN}}$: valor eficaz da corrente de curto-circuito bifásico mínimo, considerando uma resistência de falta $R_f=0\Omega$.

M: múltiplo do tap ajustado.

A partir de vários testes no sistema de potência modelado no RTDS, determinaram-se os valores de referência de corrente de curto-circuito para cálculo destes critérios de ajuste. Na Tabela 6.3, resumem-se os ajustes finalmente adotados nas funções de proteção.

Tabela 6.3 – Ajustes das funções de sobrecorrente de fase

Terminal da LT	Funções de Sobrecorrente de Fase			
	50P1 (TAP)	51S1T		
		TAP	TIME DIAL	Característica
Transmissor	13	5	0,05	Normalmente Inversa
Receptor	11	5	0,05	Normalmente Inversa

b) Proteção de sobrecorrente residual (50G2, 51S2T e 50G3)

Conforme ilustrado na Figura 6.1, somente a função instantânea de proteção de sobrecorrente residual de nível 3 (50G3) é necessária pelo esquema lógico DCB do relé SEL-421. O *pick-up* desta função deve ser ajustado para oferecer um alcance maior do que a zona 2 da função de distância de terra (Z2G) no terminal remoto (SEL, 2010).

As funções instantânea (50G2) e temporizada (51S2T) de sobrecorrente residual de nível 2 foram aplicadas na proteção *stand alone* da LT principal. Os critérios adotados nos ajustes destas unidades são detalhados a seguir:

- A unidade instantânea deve ser ajustada em função do curto-circuito monofásico máximo para falta externa (ORDAGCI, 2010), conforme apresenta a equação (6.3).

$$I_{\text{PICK-UP}} \geq \text{FS} \cdot \frac{I_{\text{CC1}\Phi\text{MÁX}}}{\text{RTC}} \quad (6.3)$$

onde

FS: fator de segurança, cujo valor típico de 1,25, aplica-se a todas as tecnologias de relés, eletromecânica, estática e digital.

$I_{\text{PICK-UP}}$: valor eficaz da corrente de operação da unidade instantânea.

$I_{\text{CC1}\Phi\text{MÁX}}$: valor eficaz da corrente de curto-circuito monofásico máximo, considerando uma resistência de falta $R_f=10\Omega$.

RTC: relação de transformação do TC. (1000:5)

- O tap da unidade temporizada deve ser calculado considerando o máximo desbalanço e curto-circuito monofásico mínimo no fim da LT adjacente, eletricamente mais longa (ORDAGCI, 2010), conforme apresenta a equação (6.4).

$$\frac{I_{\text{DESBAL. MÁX}}}{\text{RTC}} < \text{TAP} < \frac{I_{\text{CC1}\Phi\text{MÍN}}}{M \cdot \text{RTC}} \quad (6.4)$$

onde

$I_{\text{DESBAL. MÁX}}$: valor eficaz da corrente de máximo desbalanço na LT.

$I_{\text{CC1}\Phi\text{MÍN}}$: valor eficaz da corrente de curto-circuito monofásico mínimo, considerando uma resistência de falta $R_f=10\Omega$.

M: múltiplo do tap ajustado.

A partir de vários testes no sistema de potência modelado no RTDS, determinaram-se os valores de corrente de curto-circuito para cálculo dos critérios de ajuste citados acima. Na Tabela 6.4, resumem-se os ajustes finalmente adotados para estas funções no relé.

Tabela 6.4 – Ajustes das funções de sobrecorrente residual

Terminal da LT	Funções de Sobrecorrente Residual				
	50G3 (TAP)	50G2 (TAP)	51S2T		
			TAP	TIME DIAL	Característica
Transmissor	1,80	5,00	0,75	0,06	Normalmente Inversa
Receptor	1,80	5,00	0,50	0,06	Normalmente Inversa

6.2.2.3 Funções de proteção direcional de sobrecorrente residual (67G2 e 67G3)

As funções de proteção direcional de sobrecorrente residual de nível 2 (67G2) e nível 3 (67G3) foram empregadas no esquema lógico DCB. Ambas são supervisionadas pela função direcional de terra 32G. A declaração direcional 32GF para faltas diretas é utilizada pela função direcional de nível 2 e a declaração direcional 32GR para faltas reversas é utilizada pela função de nível 3.

6.2.3 Representação Percentual dos Alcances das Funções de Proteção Utilizadas

A representação percentual dos alcances das funções de proteção utilizadas resume de forma clara e didática, os ajustes aplicados nos relés. Estas percentagens foram determinadas executando-se vários testes ao longo do sistema de potência modelado no RTDS. De acordo com os testes executados na análise do esquema de teleproteção, escolheram-se quatro tipos de faltas: fase A–terra, fase A–fase B, fase B–fase C e trifásicas. No caso das faltas monofásicas, foi empregada uma resistência de falta de 10Ω e no caso das faltas entre fases uma resistência de 0Ω (sólida). As Figuras 6.3(a) e 6.3(b) apresentam os resultados obtidos.

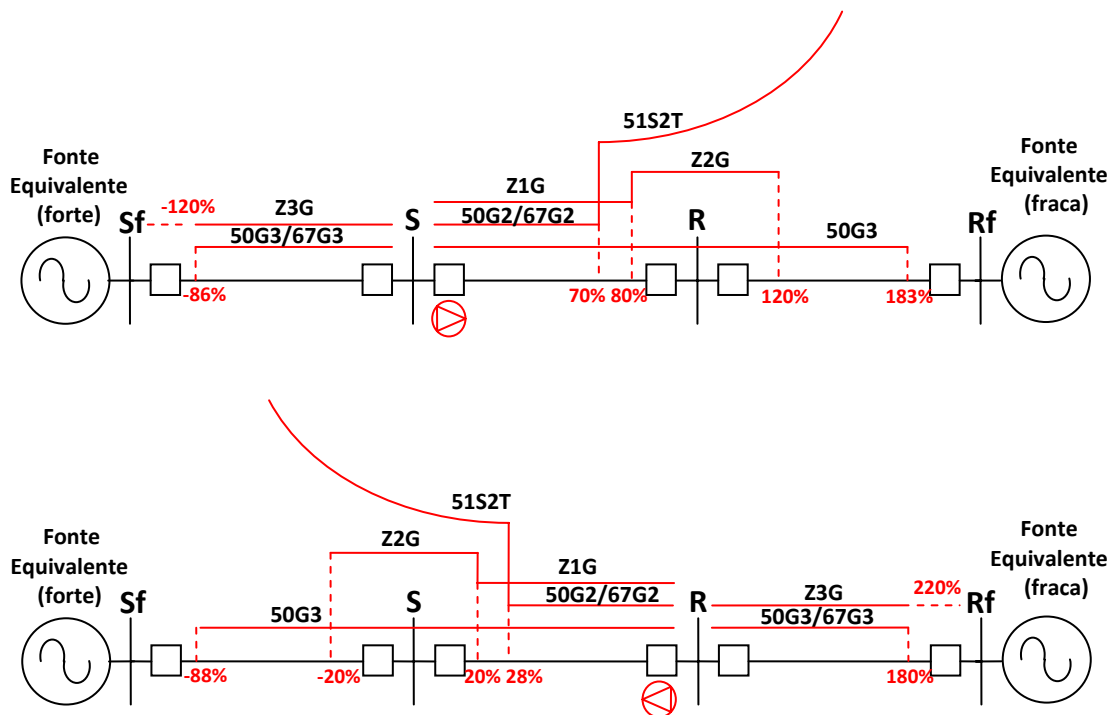


Figura 6.3(a) – Representação percentual dos alcances das funções de proteção de terra

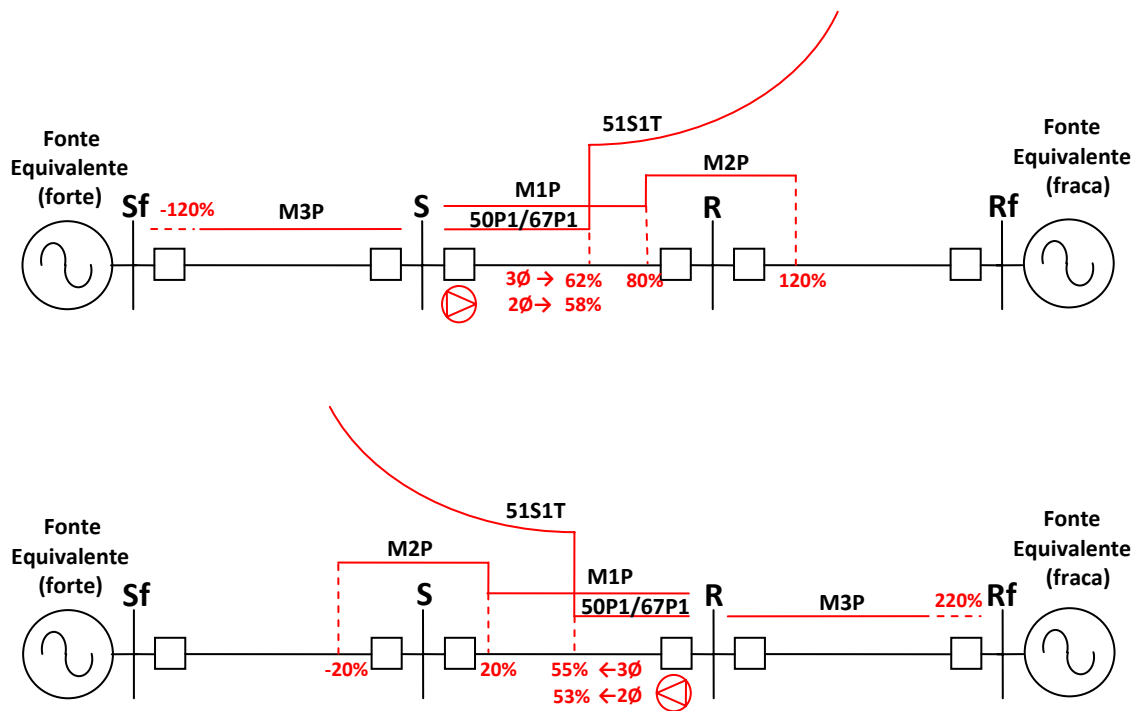


Figura 6.3(b) – Representação percentual dos alcances das funções de proteção de fase

6.3 Resultados dos Testes para o Esquema de Teleproteção com Interface Convencional

Na execução dos testes no esquema de teleproteção implementado, consideraram-se as condições operativas do sistema, conforme detalhado no item 5.2.1.1. Para o sistema modelado foram determinados três pontos de interesse para aplicação de faltas monofásicas e entre fases. Dois pontos foram escolhidos dentro da LT principal para aplicação das faltas, que foram em 0% e 50% e um ponto na LT adjacente a -10% do terminal “S”. As seguintes premissas foram consideradas na execução dos testes:

- Os sinais secundários de tensão e corrente injetados nos relés provêm de TCs e TPCs ideais modelados no RTDS. Portanto, foi descartada a influência na resposta do relé quanto aos efeitos da saturação nos TCs e afundamentos transitórios nos TPCs.

- Nas faltas do tipo fase-terra tem-se como referência a fase “A”. Para cada falta foi considerada uma resistência de falta (R_f) igual a 10Ω .
- Nas faltas entre fases, aplica-se uma falta fase A–fase B a 50% da LT principal, uma falta trifásica a 0% da LT principal e uma falta fase B–Fase C a -10% da LT principal. Todas as faltas entre fases foram consideradas sólidas.
- Os relatórios gráficos de eventos foram capturados com a máxima taxa de amostragem permitida pelo relé SEL–421, que é de 8 amostras/ciclo.

Apresentam-se nos itens subsequentes a análise dos resultados obtidos.

6.3.1 Resultados Obtidos para Faltas do Tipo Fase-Terra

6.3.1.1 Falta AN a 50% da LT principal

As Figuras 6.4(a) e 6.4(b) apresentam os relatórios gráficos de eventos capturados pelos relés SEL–421, durante a simulação da falta AN a 50% da LT principal.

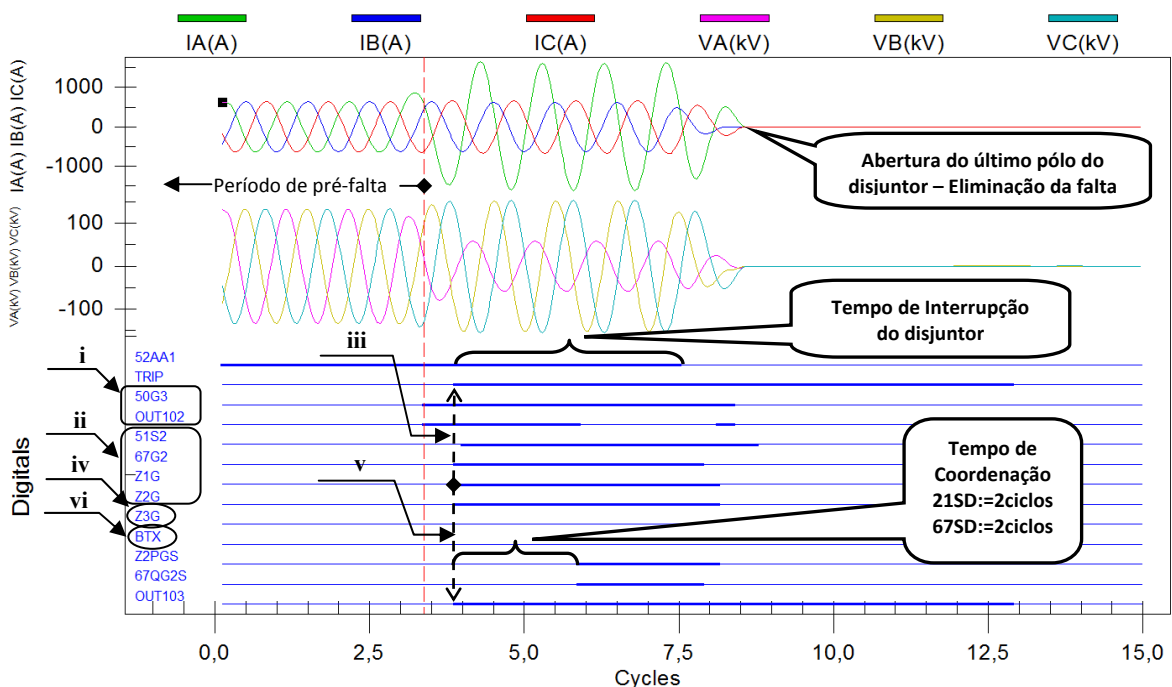


Figura 6.4(a) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta AN a 50% da LT principal

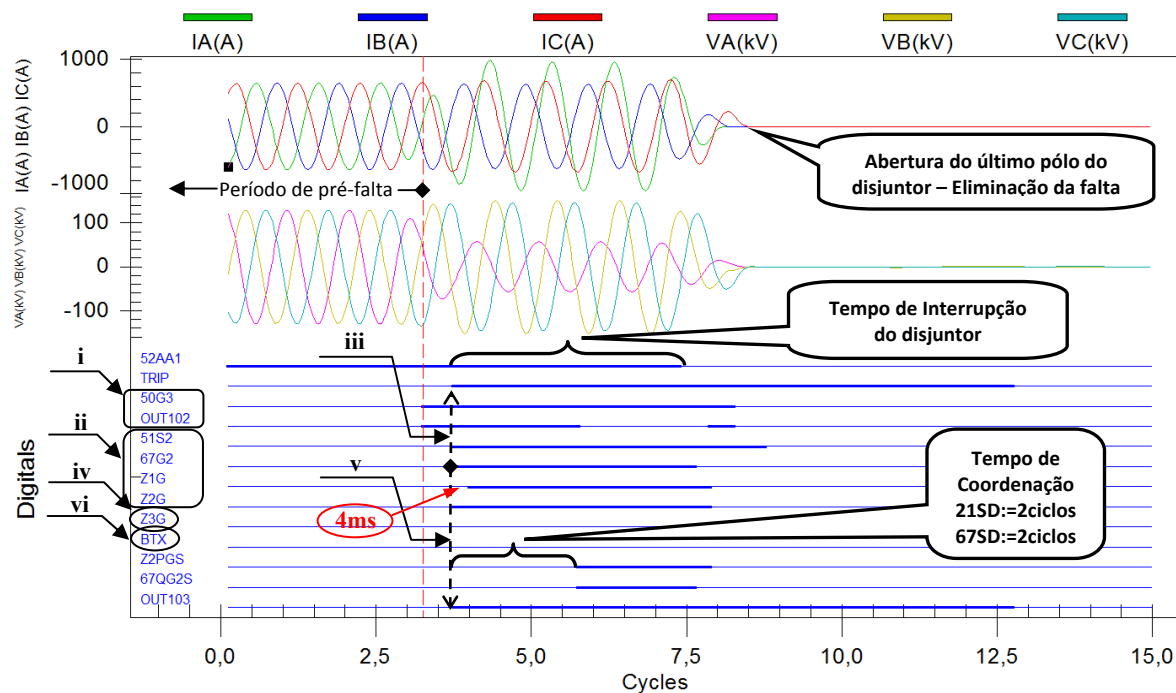


Figura 6.4(b) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta AN a 50% da LT principal

Analisando os gráficos ilustrados nas Figuras 6.4(a) e 6.4(b) e os dados fornecidos pelo registrador sequencial de eventos (SER – *Sequential Events Recorder*) de cada relé (apresentados no apêndice A.1), extrai-se a seguinte análise:

a) Devido ao ajuste de maior sensibilidade para a função 50G3, observa-se que esta é a função que primeiro atua após a ocorrência da falta. Pode-se verificar que esta função, por ser parte do grupo das funções de partida não direcionais NSTRT do esquema DCB, executa imediatamente o fechamento do contato seco OUT102 para então iniciar à transmissão do sinal de bloqueio. Estas atuações foram destacadas nas Figuras 6.4(a) e 6.4(b) pelo indicador (i).

b) Por se tratar de uma falta a 50% da LT, onde existe superposição das zonas diretas de proteção de ambos os relés, tem-se a sensibilização imediata das funções 67G2, Z1G e Z2G, conforme indicado pelo indicador (ii) nas Figuras 6.4(a) e 6.4(b). Cabe salientar que a sensibilização de 51S2 representa a partida da função de sobrecorrente temporizada 51S2T. Conseqüentemente, esta função não é habilitada para comandar diretamente o disparo do disjuntor.

c) Observa-se que o comando de disparo do disjuntor (TRIP) é executado instantaneamente pelas funções 67G2 e Z1G de cada relé, conforme indicado pelo indicador (iii) nas Figuras 6.4(a) e 6.4(b). Para o relé do terminal “S”, tem-se que ambas as funções atuaram simultaneamente. Porém, no relé do terminal “R”, a função Z1G apresenta um atraso de 4ms na atuação em relação à função 67G2. A partir das oscilografias de corrente, pode-se observar que ambos os disjuntores executaram a eliminação da falta em tempos aproximadamente iguais.

d) Com a partida da função Z2G, inicia-se a contagem da temporização de 20 ciclos da proteção *stand alone* de zona 2 e a contagem da temporização de 2 ciclos do tempo de coordenação.

e) A função Z3G, de zona reversa destacada pelo indicador (iv) nas Figuras 6.4(a) e 6.4(b), como esperado, não atuou perante a falta a 50% da LT, pois esta falta ocorre fora da sua zona de atuação.

f) Constata-se nos registros do apêndice A.1, que ambos os relés fecham o contato OUT103 em 8ms, após a atuação do contato OUT102. Em outras palavras, 8ms depois de iniciada a transmissão errônea do sinal de bloqueio, esta é interrompida. A atuação de OUT103 é executada pelo comando de TRIP das funções diretas, conforme o destacado pelo indicador (v) das Figuras 6.4(a) e 6.4(b).

g) Observa-se que não existe recepção do sinal de bloqueio BTX em ambos os relés, pois a interrupção da transmissão deste sinal, feita pelo contato OUT103, conforme apresentado no item (f), não permite atingir o tempo de operação da teleproteção ($T_A=24\text{ms.}$), configurado no RTDS. Nas Figuras 6.4(a) e 6.4(b), destaca-se este evento através do indicador (vi).

h) Pode-se verificar nas Figuras 6.4(a) e 6.4(b), a existência de um atraso de tempo na atuação dos *Word Bits* Z2PGS e 67QG2S em relação à partida das funções Z2G e 67G2. Este atraso corresponde ao tempo de coordenação do esquema DCB, ajustado em dois ciclos ou 33ms nos temporizadores 21SD e 67SD do relé.

Através desta análise, conclui-se que o esquema de teleproteção atuou corretamente, discriminando o local de ocorrência da falta. Foi comprovado que, por se tratar de uma falta interna, os relés de ambos extremos da LT comandaram corretamente a abertura dos disjuntores.

6.3.1.2 Falta AN a 0% da LT principal

As Figuras 6.5(a) e 6.5(b) apresentam os relatórios gráficos de eventos capturados pelos relés SEL-421, durante a simulação da falta AN a 0% da LT principal.

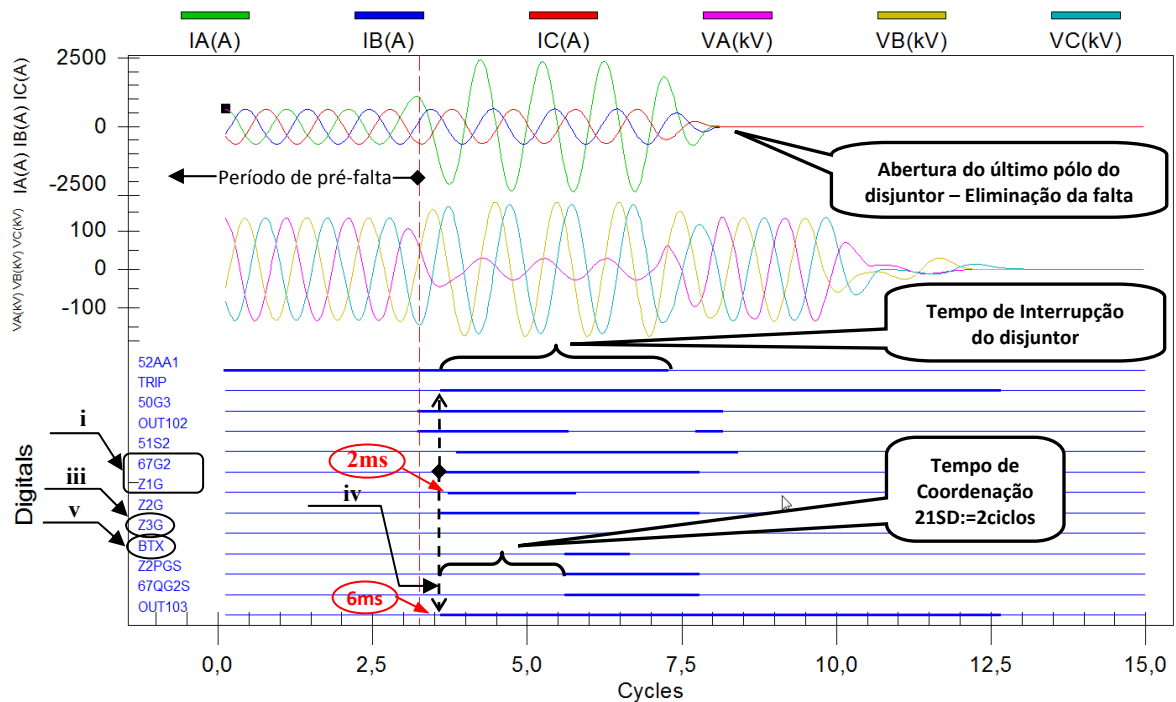


Figura 6.5(a) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta AN a 0% da LT principal

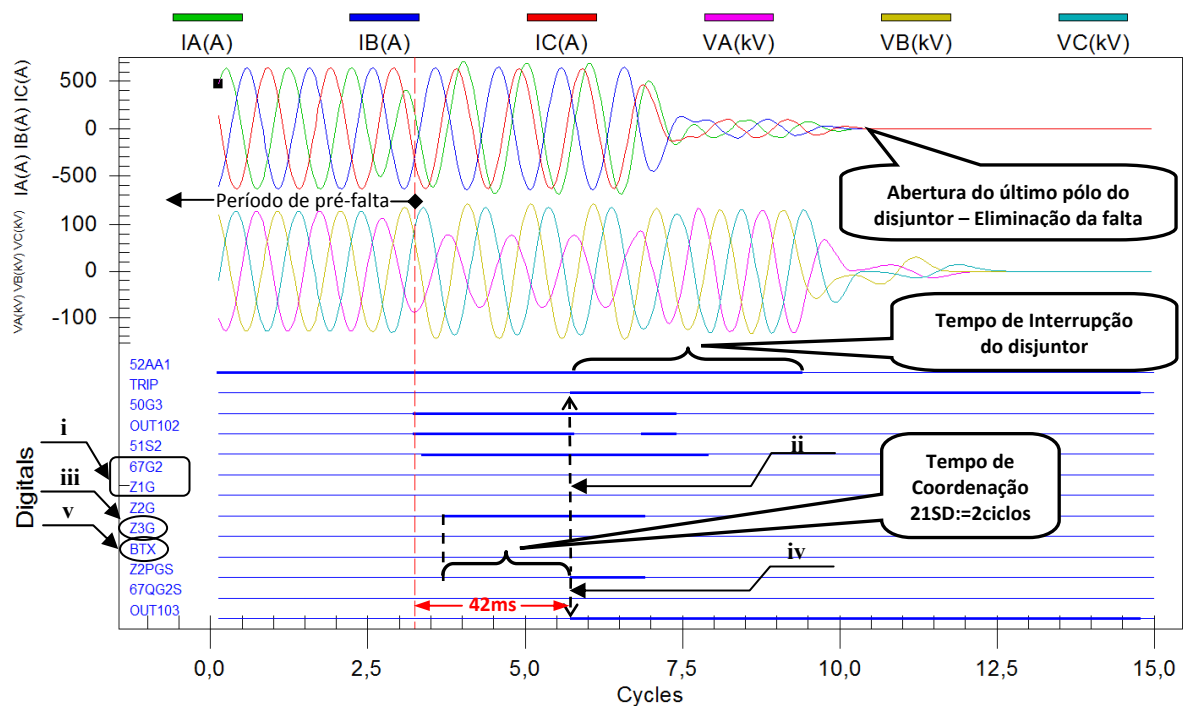


Figura 6.5(b) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta AN a 0% da LT principal

Analisando os gráficos ilustrados nas Figuras 6.5(a) e 6.5(b) e os dados fornecidos pelo registrador sequencial de eventos de cada relé apresentado no apêndice A.2, extrai-se a seguinte análise:

- a) Cita-se novamente o comentário exposto no item (a) de 6.3.1.1
- b) Observou-se nos registros do apêndice A.2, que a localização da falta influencia no tempo de resposta das funções de proteção de cada relé. A função 50G3, do relé no terminal “R”, é sensibilizada 6ms depois da função 50G3 do relé no terminal “S” próximo ao ponto de falta.
- c) Nota-se que as funções 67G2 e Z1G do terminal “R”, destacadas pelo indicador (i) na Figura 6.5(b), não atuaram para falta próxima ao terminal “S”. Este fato comprova que o ponto de localização da falta está fora do alcance ajustado em ambas as funções. Para um melhor entendimento, vide Figura 6.3(a) no item 6.2.3.
- d) Devido à não atuação do 67G2 e Z1G, conforme explicado em (c), observa-se que o comando de disparo do disjuntor (TRIP) no terminal “R” é iniciado pelo *Word Bit* Z2PGS após concluído o tempo de coordenação de 2 ciclos. Este evento é destacado pelo indicador (ii) na Figura 6.5(b)
- e) Observa-se que as funções 67G2 e Z1G, do terminal “S”, destacadas pelo indicador (i) na Figura 6.5(a), são sensibilizadas corretamente executando o envio do sinal de TRIP ao disjuntor. Segundo os registros do apêndice A.2, a função 67G2 inicia o disparo do disjuntor 2ms antes da função Z1G.
- f) Dos itens (d) e (e), comprova-se que o esquema de teleproteção discriminou corretamente a falta interna, embora esta ocorra próxima da zona reversa do relé no terminal “S”. Observando o comportamento dos disjuntores do sistema, através da atuação do *Word Bit* 52AA1 das Figuras 6.5(a) e 6.5 (b), conclui-se que mesmo em instantes distintos, ambos os relés permitiram eliminar a falta na LT. Este fato pode ser confirmado claramente através da análise das oscilografias de corrente.
- g) Com base no indicador (iii), observa-se nas Figuras 6.5(a) e 6.5(b) que as funções de zona reversa Z3G não atuam, discriminando-se corretamente o sentido da falta.

h) Para cada relé o contato OUT103 atua em instantes diferentes. Para o relé do terminal “S”, conforme indicado pelo indicador (iv) na Figura 6.5(a), o fechamento do contato OUT103 é iniciado pelo comando de TRIP em 6ms após a atuação do contato OUT102. No caso do relé do terminal “R”, conforme indicado pelo indicador (iv) na Figura 6.5(b), o fechamento do contato OUT103 é executado pelo sinal de TRIP, 42ms após a atuação do contato OUT102. Pode-se concluir que a demora em discriminar o envio errôneo do sinal de bloqueio depende do tempo de atuação da função de proteção direta, sendo instantâneo para funções de subalcance e temporizado para funções de sobrealcance.

i) A demora na atuação do contato OUT103 influencia no recebimento do sinal de bloqueio (BTX). Pelo indicador (v) da Figura 6.5(b), observa-se que o relé do terminal “R” não recebe o sinal BTX. Este fato se dá porque o contato OUT103 no terminal “S” interrompe a transmissão do sinal de bloqueio antes do tempo $T_A=24\text{ms}$ configurado no RTDS. Ao contrário, com base no indicador (v) da Figura 6.5(a), observa-se que o relé do terminal “S” recebe o sinal BTX. Neste caso, o atraso de 42ms na atuação do contato OUT103 no relé do terminal “R”, permite ao RTDS esgotar o tempo T_A e simular a recepção do sinal de bloqueio no terminal “S”.

j) Cita-se novamente o comentário exposto no item (h) de 6.3.1.1.

Através desta análise, conclui-se que o esquema de teleproteção atuou corretamente discriminando o local de ocorrência da falta. Comprovou-se que, por se tratar de uma falta interna, os relés de ambos os extremos da LT comandaram corretamente a abertura dos disjuntores.

6.3.1.3 Falta AN a -10% da LT principal (reversa)

As Figuras 6.6(a) e 6.6(b) apresentam os relatórios gráficos de eventos capturados pelos relés SEL-421, durante a simulação da falta AN a -10% da LT principal. Vale ressaltar que durante as simulações, esta falta não produz a abertura dos disjuntores da LT adjacente.

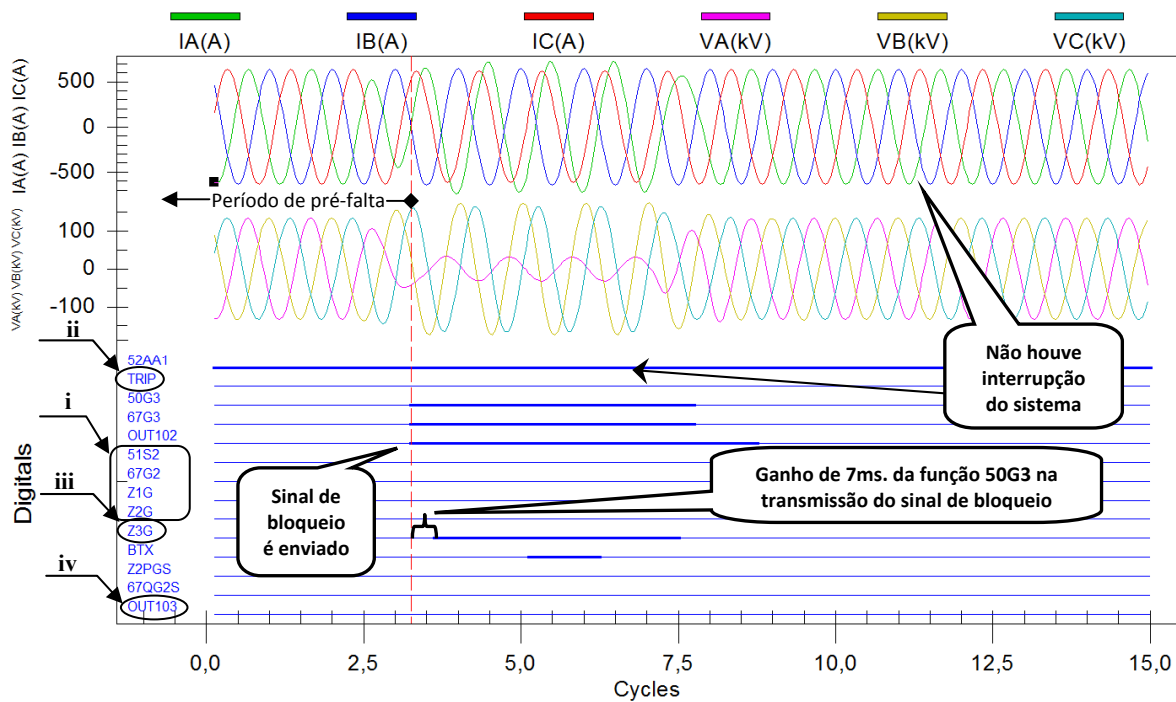


Figura 6.6(a) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta AN a -10% da LT principal

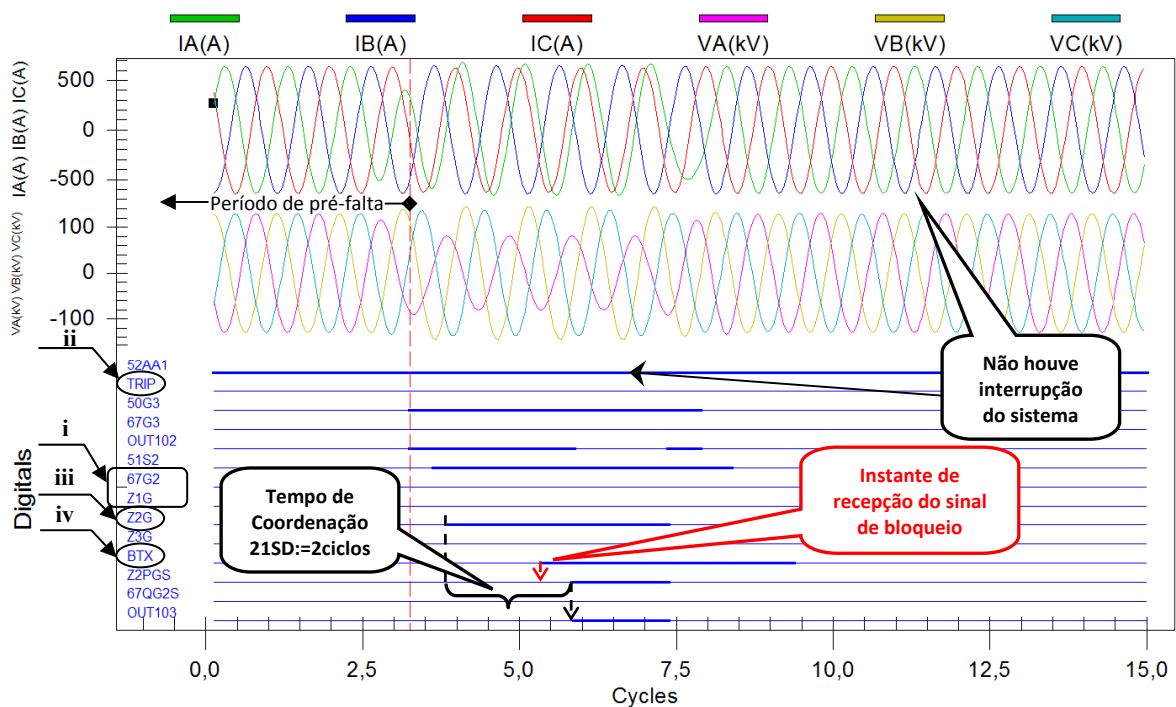


Figura 6.6(b) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta AN a -10% da LT principal

Analisando os gráficos ilustrados nas Figuras 6.6(a) e 6.6(b), e os dados fornecidos pelo registrador sequencial de eventos de cada relé, apresentados no apêndice A.3, extrai-se a seguinte análise:

- a) Cita-se novamente o comentário exposto no item (a) de 6.3.1.1
- b) Nota-se que as funções diretas 67G2, Z1G e Z2G do terminal “S”, destacadas pelo indicador (i) na Figura 6.6(a), não atuaram perante a falta vista em zona reversa. Este fato explica o motivo da não atuação do comando de TRIP, conforme indicado pelo indicador (ii) na mesma Figura 6.6(a).
 - c) Com base no indicador (iii) da Figura 6.6(a), observa-se que a função de zona reversa Z3G atua corretamente identificando o sentido da falta. Torna-se importante neste ponto, ressaltar o ganho de tempo que a função 50G3 apresenta na partida antecipada da transmissão do sinal de bloqueio, quando comparada com o instante da atuação da função Z3G. Conforme os registros apresentados no apêndice A.3, este ganho é da ordem de 7ms. Pode também existir um ganho de tempo em relação à própria função 67G3. No entanto, neste caso observa-se que a determinação da direcionalidade por 67G3 foi imediata, atuando no mesmo instante que 50G3.
 - d) Nota-se que as funções 67G2 e Z1G do relé no terminal “R”, destacadas pelo indicador (i) na Figura 6.6(b), não atuaram para falta além do terminal “S”. Este fato comprova que o ponto de localização da falta está fora do alcance ajustado em ambas as funções. Vide Figura 6.3(a) do item 6.2.3.
 - e) Nota-se pelo indicador (iii) na Figura 6.6(b), que a função Z2G do relé no terminal “R” inicia sua partida perante a falta em -10% do terminal “S” (ou 110% do terminal “R”). Este fato comprova que a impedância aparente do relé se encontra corretamente dentro da zona de sobrealcance ajustada para esta função, em 120% segundo indicado pela Figura 6.3(a) do item 6.2.3. Com a partida de Z2G, inicia-se a contagem da temporização de 20ciclos, da proteção *stand alone* de zona 2 e a contagem do tempo de coordenação de 2ciclos, do esquema DCB.
 - f) Pelos indicadores (ii) e (iv) da Figura 6.6(a), constata-se que devido à ausência do comando de TRIP, o contato OUT103 não atua. Esta situação é considerada correta, dado que a falta é vista pelo relé em zona reversa e o comando de disparo só é habilitado com a atuação das funções de zona direta Z1G, 67G2 e Z2G. Pode-se concluir que não existe interrupção do sinal de bloqueio no terminal “S”, desde que o ponto de localização da falta está identificado na zona reversa.

g) Não existindo interrupção da transmissão do sinal de bloqueio no terminal “S”, o comando BTX é recebido com sucesso no relé do terminal “R”. Conforme destaca o indicador (iv) da Figura 6.6(b), este sinal foi recebido dentro do intervalo de tempo de coordenação 21SD, do esquema DCB. A permanência deste sinal por um tempo maior que o *drop-out* do temporizador 21SD, bloqueia o disparo do disjuntor iniciado pela atuação do *Word Bit* Z2PGS. Conforme o apresentado pelos registros do apêndice A.3, o sinal de bloqueio no terminal “R” é recebido 25ms após o início da contagem do temporizador 21SD. Conclui-se então que, se não houvesse o ganho de 7ms, conforme descrito em (c), o sinal de bloqueio seria recebido 32ms após o início da contagem do temporizador 21SD, valor muito próximo do seu limiar de 33ms.

Através desta análise, conclui-se que o esquema de teleproteção atuou corretamente discriminando a localização da falta. Comprovou-se que, por se tratar de uma falta externa, o relé local que enxerga esta falta em zona reversa, envia corretamente o sinal de bloqueio ao relé remoto. Da mesma forma, o relé remoto que vê tal falta em zona direta de sobrealcance, com a recepção do sinal de bloqueio dentro do tempo de coordenação, evita o disparo indevido do disjuntor.

Observando os *Word Bits* 52AA1 das Figuras 6.6(a) e 6.6(b), comprova-se que não houve abertura dos disjuntores. Da mesma maneira, nas oscilografias das correntes vistas por cada relé, é possível verificar que não ocorreu interrupção do sistema durante a falta na LT adjacente.

6.3.1.4 Falta AN a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação)

As Figuras 6.7(a) e 6.7(b) apresentam os relatórios gráficos de eventos capturados pelos relés SEL-421, durante a ocorrência da falta AN a -10% da LT principal. Neste caso, aplicando-se o mesmo cenário de teste do item 6.3.1.3, simula-se a interrupção do canal de comunicação.

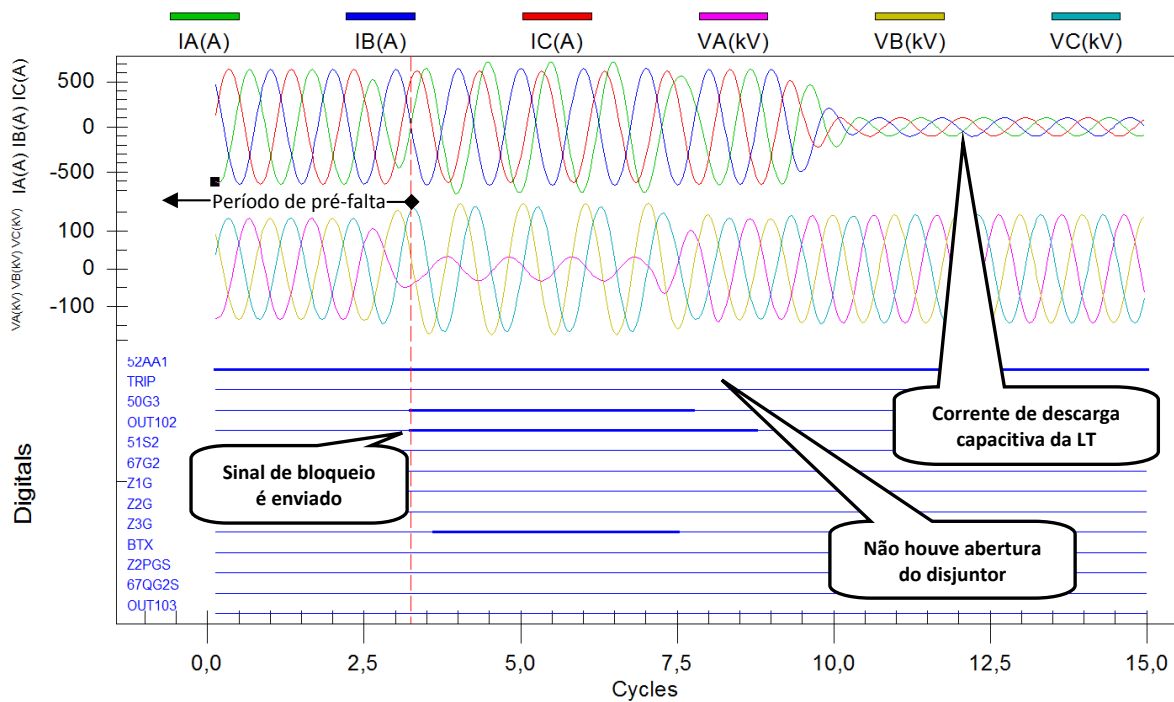


Figura 6.7(a) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta AN a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação)

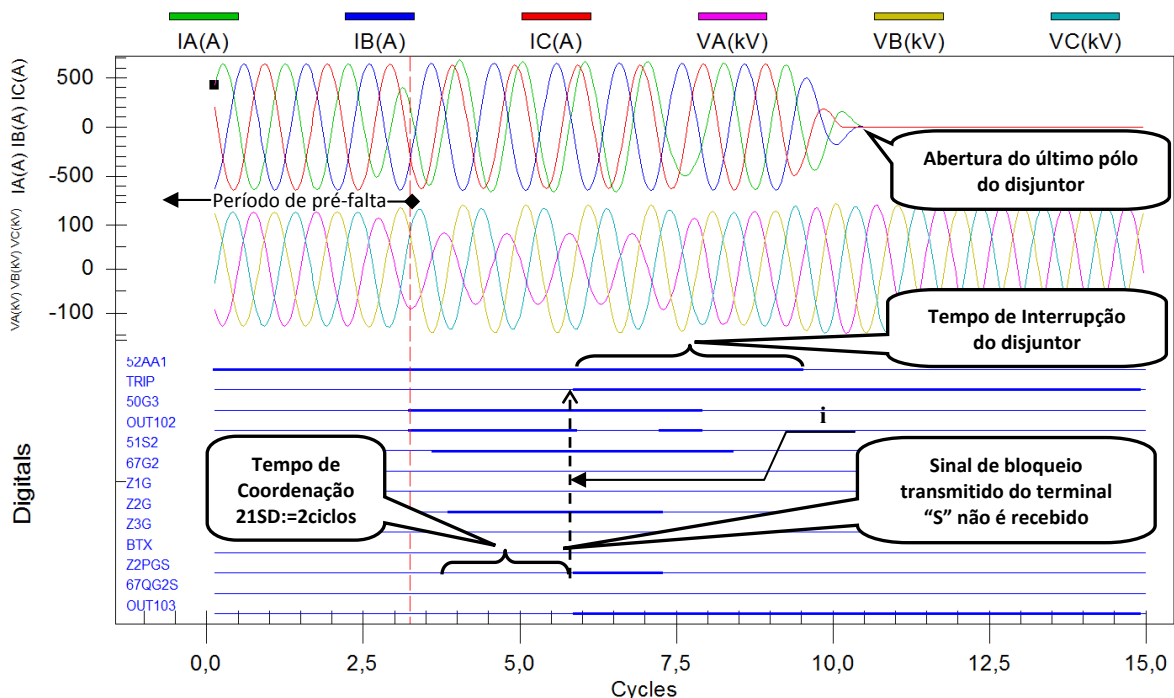


Figura 6.7(b) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta AN a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação)

Observa-se na Figura 6.7(b), que com a perda do canal de comunicação o sinal de bloqueio BTX, transmitido pelo relé do terminal “S”, não é recebido pelo relé no terminal “R”. Pelo indicador (i) da Figura 6.7(b), verifica-se que o término do tempo de coordenação 21SD, sem recepção do sinal de bloqueio, permite que o *Word Bit Z2PGS* execute o comando de disparo do disjuntor. O *Word Bit 52AA1*, da mesma Figura 6.7(b), ilustra a abertura indevida do disjuntor no terminal “R” após o período de falta na LT adjacente. Em contrapartida, observa-se na Figura 6.7(a), que o disjuntor do terminal “S” permanece fechado.

Conclui-se que, se o canal de comunicação estiver interrompido durante a ocorrência de uma falta externa, o bloqueio do comando de disparo do disjuntor associado ao relé que vê esta falta dentro da zona de sobralcance, não obtém êxito.

6.3.2 Resultados Obtidos para Falta entre Fases

6.3.2.1 Falta AB a 50% da LT principal

As Figuras 6.8(a) e 6.8(b) apresentam os relatórios gráficos de eventos capturados pelos relés SEL-421, durante a simulação da falta AB a 50% da LT principal.

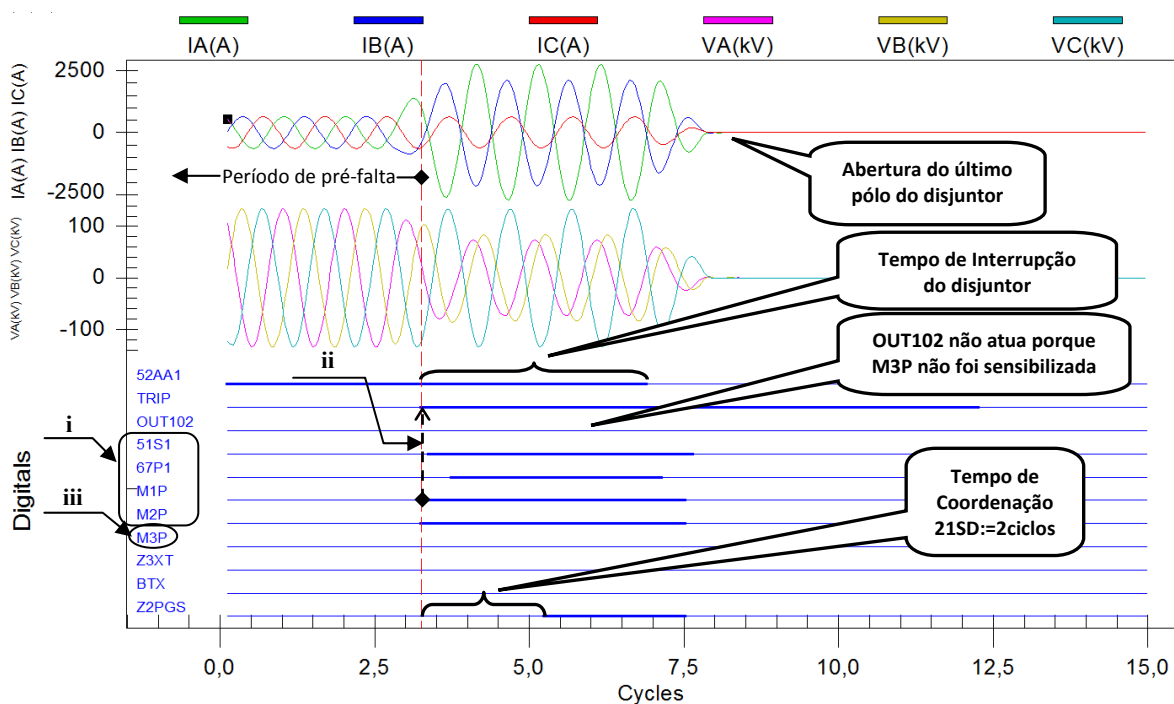


Figura 6.8(a) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta AB a 50% da LT principal

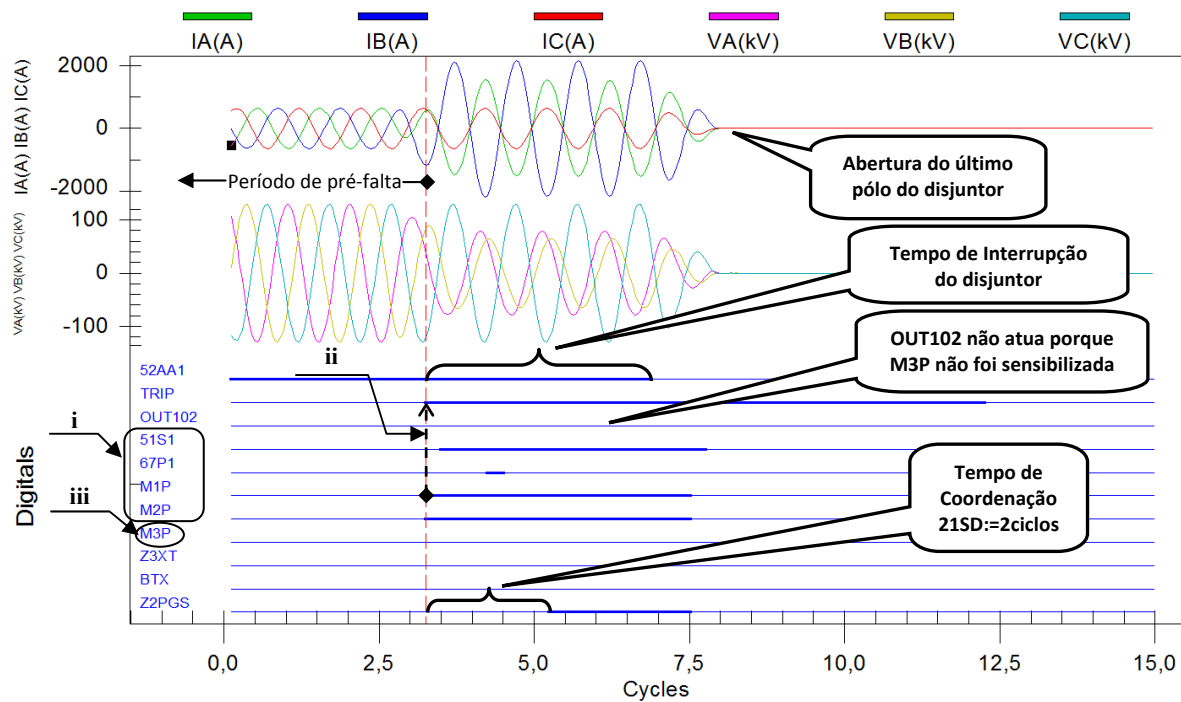


Figura 6.8(b) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta AB a 50% da LT principal

Analisando os gráficos ilustrados nas Figuras 6.8(a) e 6.8(b), juntamente com os dados fornecidos pelo registrador sequencial de eventos de cada relé, apresentados no apêndice A.5, extrai-se a seguinte análise:

a) Por se tratar de uma falta a 50% da LT, onde existe superposição das zonas diretas de proteção de ambos os relés, tem-se a sensibilização imediata das funções 67P1, M1P e M2P, conforme indicado pelo indicador (i) nas Figuras 6.8(a) e 6.8(b). Cabe salientar que a atuação de 51S1 simplesmente representa a partida da função de sobrecorrente temporizada 51S1T e esta não é habilitada para comandar diretamente o disparo do disjuntor.

NOTA: O comportamento atípico apresentado pela função 67P1 na Figura 6.8(b) deve-se à operação próxima ao limiar do seu alcance. Segundo detalhado na Figura 6.3(b) o ponto de falta a 50% da LT está muito próximo do alcance máximo da função 67P1 (53%).

b) O comando de disparo do disjuntor (TRIP) é executado instantaneamente pelas funções M1P de cada relé, conforme indicado pelo indicador (ii) nas Figuras 6.8(a) e 6.8(b). A partir das oscilografias de corrente pode-se observar que ambos os disjuntores executaram a eliminação da falta em tempos aproximadamente iguais.

NOTA: Apesar da função 67P1 ser instantânea, verifica-se claramente neste caso que existe um ganho em sensibilização por parte da função M1P.

c) Com base nos registros do apêndice A.5, observa-se que as funções M1P e M2P foram sensibilizadas no mesmo instante. A partida de M2P inicia a contagem da temporização de 20 ciclos da proteção *stand alone* de zona 2 e a contagem do tempo de coordenação de 2 ciclos do esquema DCB.

d) A função M3P de zona reversa, destacada pelo indicador (iii) nas Figuras 6.8(a) e 6.8(b), não atuou para falta a 50% da LT, pois se encontra fora da sua zona de atuação. Verifica-se que sem atuação da função M3P, não existe o fechamento do contato OUT102. Vale ressaltar para este caso de falta entre fases, não existe sensibilização da função residual 50G3, que no caso de faltas monofásicas diretas ou reversas sempre permite o fechamento instantâneo do contato OUT102. Deste modo, descarta-se no caso de faltas entre fases, o emprego da lógica de parada da transmissão do sinal de bloqueio feita através do contato OUT103.

e) Sem o fechamento do contato OUT102, não há envio do sinal de bloqueio e conseqüentemente o *Word Bit* BTX do relé receptor, não muda seu estado.

f) Existe um atraso de tempo de dois ciclos ou 33ms, na atuação do *Word Bit* Z2PGS em relação à partida da função M2P. Este atraso corresponde ao tempo de coordenação do esquema DCB ajustado no temporizador 21SD do relé.

Através desta análise pode-se concluir que o esquema de teleproteção atuou corretamente discriminando o local de ocorrência da falta. Comprovou-se que, por se tratar de uma falta interna, os relés de ambos os terminais da LT comandam imediatamente a abertura dos respectivos disjuntores, sem aguardar a recepção do sinal de bloqueio.

6.3.2.2 Falta Trifásica a 0% da LT principal

As Figuras 6.9(a) e 6.9(b) apresentam os relatórios gráficos de eventos capturados pelos relés SEL-421, durante a simulação da falta trifásica a 0% da LT principal.

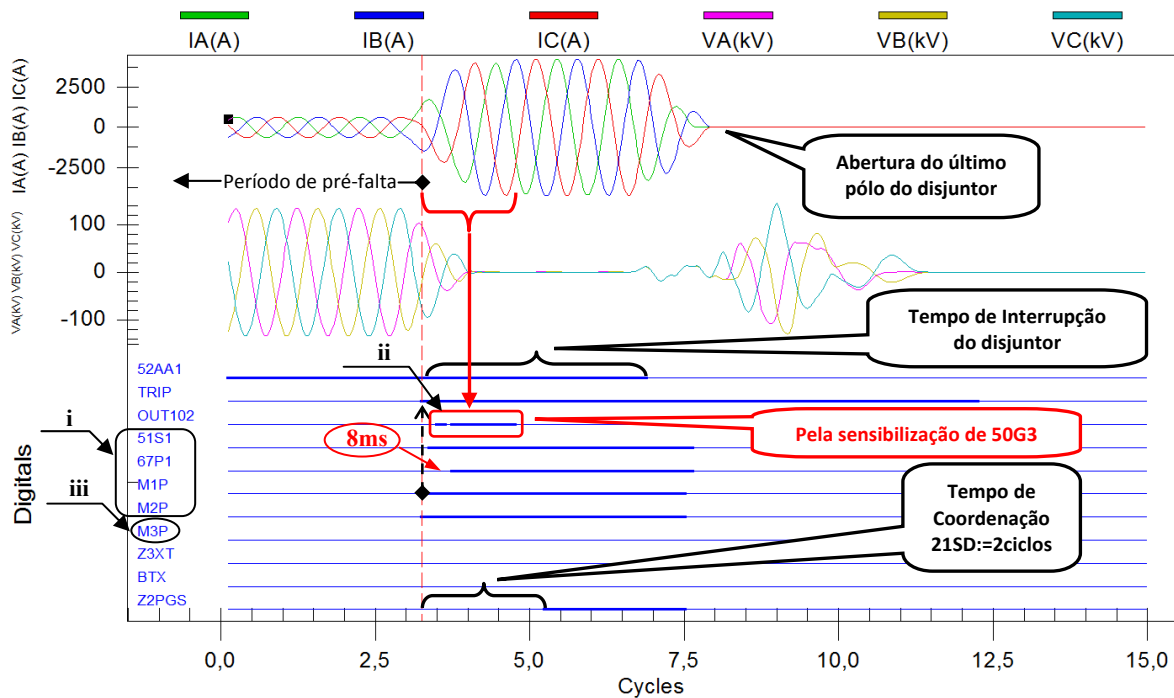


Figura 6.9(a) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta ABC a 0% da LT principal

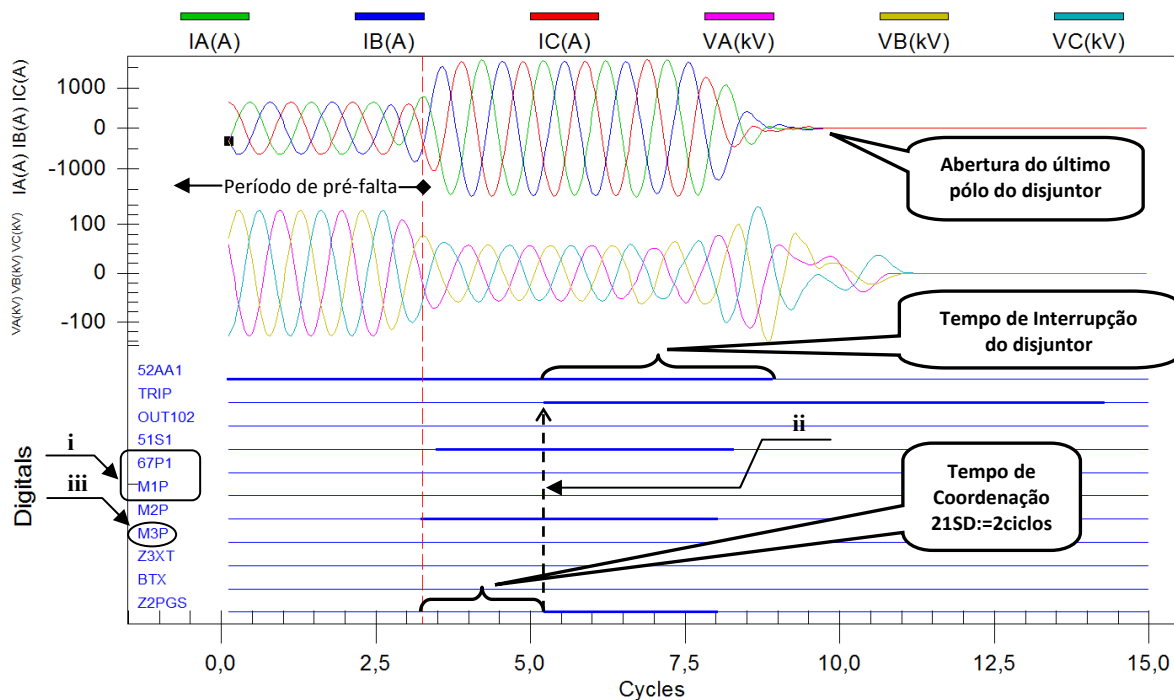


Figura 6.9(b) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta ABC a 0% da LT principal

Analisando os gráficos ilustrados nas Figuras 6.9(a) e 6.9(b), juntamente com os dados fornecidos pelo registrador sequencial de eventos de cada relé, apresentados no apêndice A.6, extrai-se a seguinte análise:

a) Nota-se que as funções 67P1 e M1P do terminal “R”, destacadas pelo indicador (i) na Figura 6.9(b), não atuaram para falta próxima ao terminal “S”. Este fato comprova que o ponto de localização da falta está fora do alcance ajustado em ambas as funções. Para um melhor entendimento, vide Figura 6.3(b) no item 6.2.3.

b) Devido à não atuação de 67P1 e M1P, conforme explicado em (a), observa-se que o comando de disparo do disjuntor (TRIP) no terminal “R” é iniciado pelo *Word Bit* Z2PGS após concluído o tempo de coordenação de 2 ciclos. Este evento é destacado pelo indicador (ii) na Figura 6.9(b)

c) Observa-se que as funções 67P1 e M1P do terminal “S”, destacadas pelo indicador (i) na Figura 6.9(a), são sensibilizadas corretamente e ambas executam o envio do sinal de TRIP ao disjuntor. Segundo os registros do apêndice A.6, a função M1P inicia o disparo do disjuntor 8ms antes da função 67P1. Deste modo, destaca-se novamente o ganho em sensibilização apresentado pela função de distância M1P frente a 67P1.

d) Dos itens (b) e (c), comprova-se que o esquema de teleproteção discriminou corretamente a falta interna, embora esta ocorra próxima da zona reversa do relé no terminal “S”. Observando o comportamento dos disjuntores do sistema, através da atuação do *Word Bit* 52AA1 das Figuras 6.9(a) e 6.9(b), conclui-se que, mesmo em instantes distintos ambos os relés permitiram eliminar a falta na LT. Este fato pode ser confirmado claramente através da análise das oscilografias de corrente.

e) A função M3P de zona reversa, destacada pelo indicador (iii) nas Figuras 6.9(a) e 6.9(b), como esperado, não atuou perante a falta trifásica ainda dentro da LT, pois esta ocorre fora da sua zona de atuação. Verifica-se na Figura 6.9(b) que sem atuação da função M3P não existe o fechamento do contato OUT102 que dá início da transmissão do sinal de bloqueio. Porém, na Figura 6.9(a) através do indicador (ii) observa-se que, mesmo sem atuação da função M3P o contato OUT102 fecha. Este comportamento, não esperado, deve-se à sensibilização da função de sobrecorrente residual 50G3 durante a evolução inicial da falta trifásica, período de aproximadamente 1,5 ciclos no qual se observa claramente o desequilíbrio das correntes de falta.

f) Citam-se novamente os comentários expostos pelos itens (e) e (f) em 6.3.2.1

Através desta análise, conclui-se que o esquema de teleproteção atuou corretamente discriminando o local de ocorrência da falta.

6.3.2.3 Falta BC a -10% da LT principal (reversa)

As Figuras 6.10(a) e 6.10(b) apresentam os relatórios gráficos de eventos capturados pelos relés SEL-421, durante a simulação da falta BC a -10% da LT principal. Vale ressaltar que durante as simulações, esta falta não produz a abertura dos disjuntores da LT adjacente.

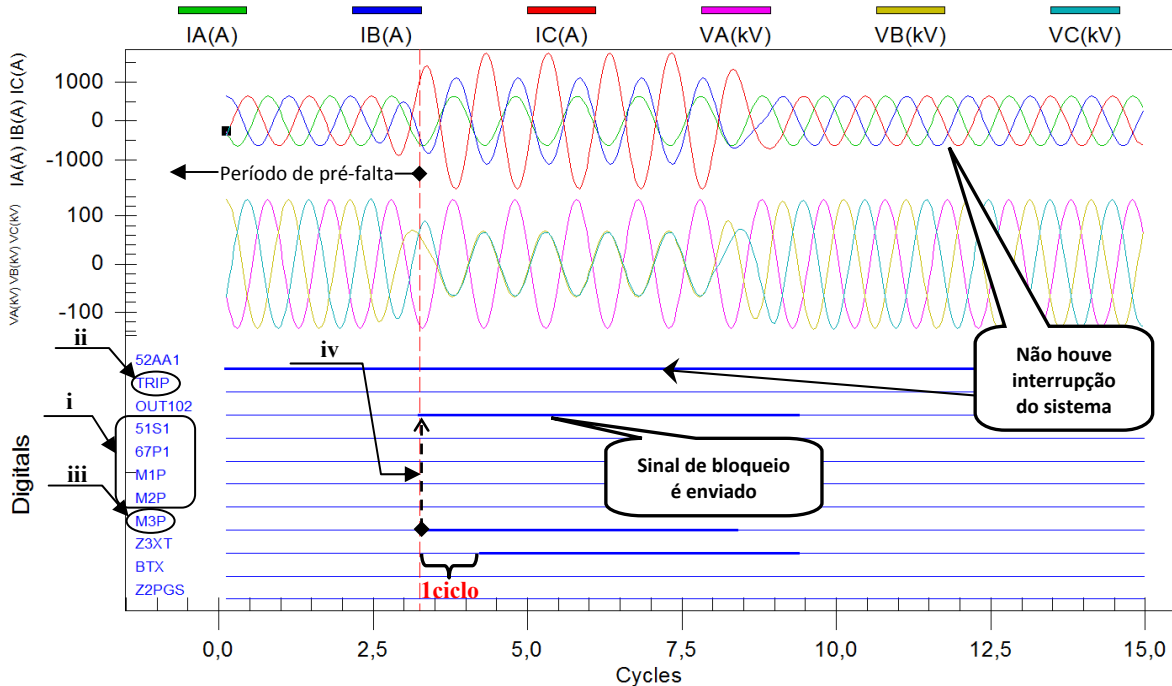


Figura 6.10(a) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta BC a -10% da LT principal

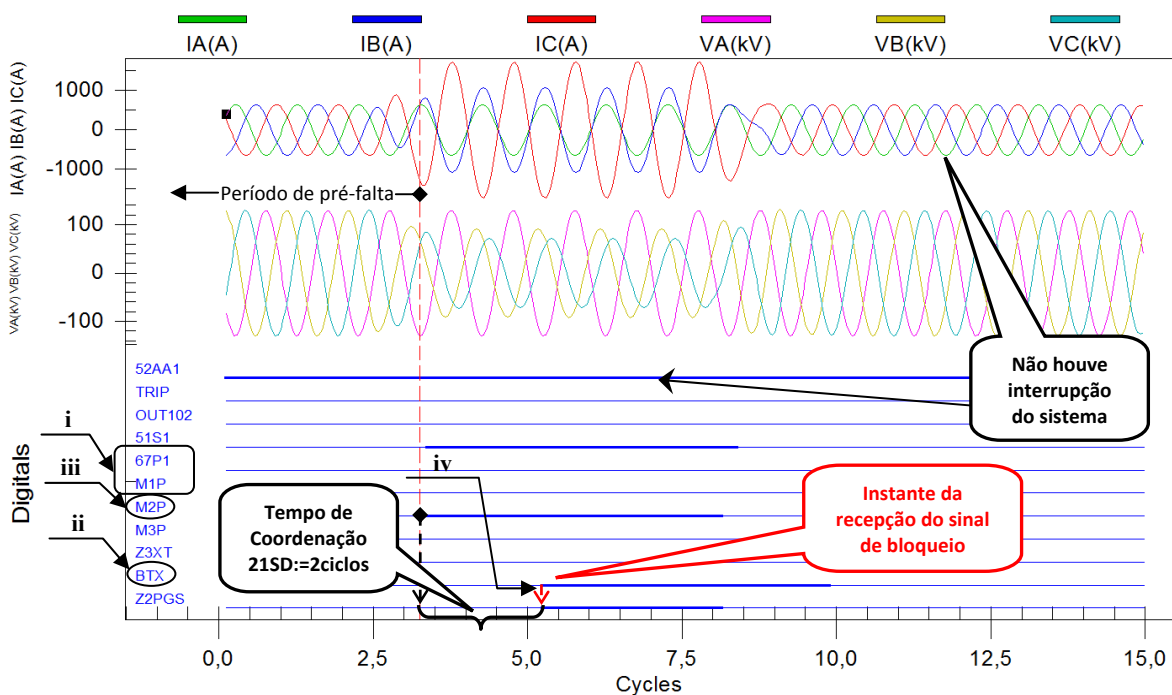


Figura 6.10(b) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta BC a -10% da LT principal

Analisando os gráficos ilustrados nas Figuras 6.10(a) e 6.10(b), juntamente com os dados fornecidos pelo registrador sequencial de eventos de cada relé, apresentados no apêndice A.7, extrai-se a seguinte análise:

a) Nota-se que as funções diretas 67P1, M1P e M2P do terminal “S”, destacadas pelo indicador (i) na Figura 6.10(a), não atuaram perante a falta vista em zona reversa. Este fato explica a não atuação do comando de TRIP, conforme indicado pelo indicador (ii) na mesma Figura 6.10(a).

b) Com base no indicador (iii) da Figura 6.10(a), observa-se que a função de zona reversa M3P atua corretamente identificando o sentido da falta. Conforme indicado pelo indicador (iv) da mesma Figura 6.10(a), confirma-se que a atuação de M3P permite o fechamento simultâneo do contato OUT102. A operação deste contato inicia a transmissão do sinal de bloqueio. Pode-se apreciar também na Figura 6.10(a), que 1 ciclo após a sensibilização de M3P, tem-se a atuação do *Word Bit* Z3XT. Conforme detalhado no esquema lógico da Figura 6.1, este atraso de um ciclo, que é ajustado no temporizador Z3XPU, evita estender o sinal de bloqueio através de Z3XD, quando da ocorrência de fenômenos transitórios na zona reversa que possam sensibilizar o relé. Cabe ressaltar que, o *Word Bit* Z3XT somente é ativado no caso de perda da memória de polarização da função M3P. Nos casos teste aplicados, este cenário não foi considerado.

c) Nota-se que as funções 67P1 e M1P do relé no terminal “R”, destacadas pelo indicador (i) na Figura 6.10(b), não atuaram para falta além do terminal “S”. Este fato comprova que o ponto de localização da falta está fora do alcance ajustado em ambas as funções. Vide figura 6.3(b) do item 6.2.3.

d) Conforme indicado pelo indicador (iii) na Figura 6.10(b), a função M2P do relé no terminal “R”, inicia sua partida perante a falta em -10% do terminal “S” (ou 110% do terminal “R”). Este fato comprova que a impedância aparente do relé se encontra corretamente dentro da zona de sobrealcance ajustada para esta função, em 120% segundo indicado pela Figura 6.3(b) do item 6.2.3. Com a partida de M2P, inicia-se a contagem da temporização de 20 ciclos da proteção *stand alone* de zona 2 e a contagem do tempo de coordenação de 2 ciclos do esquema DCB.

e) Observa-se na Figura 6.10(b), que o sinal de bloqueio BTX enviado do relé no terminal “S” é recebido com sucesso no relé do terminal “R”. Conforme destaca o indicador (iv) da Figura 6.10(b), este sinal foi recebido no limiar do intervalo de tempo de coordenação 21SD, do esquema DCB. A permanência deste sinal por um tempo maior que o *drop-out* do temporizador 21SD, bloqueia o disparo do disjuntor iniciado pela atuação do *Word Bit Z2PGS*. Conforme o apresentado nos registros do apêndice A.7, o sinal de bloqueio no terminal “R” é recebido 34ms após o início da contagem do temporizador 21SD, justamente no instante que o *Word Bit Z2PGS* é sensibilizado. Conclui-se então que, para faltas entre fases, não existe o ganho de tempo da função 50G3.

Através desta análise, conclui-se que o esquema de teleproteção atuou corretamente discriminando a localização da falta. Comprovou-se que, por se tratar de uma falta externa, o relé local que ‘enxerga’ esta falta em zona reversa, envia corretamente o sinal de bloqueio ao relé remoto. Da mesma forma, o relé remoto que ‘enxerga’ tal falta em zona direta de sobrealcance, com a recepção do sinal de bloqueio dentro do tempo de coordenação, evita o disparo indevido do disjuntor.

Observando os *Word Bits* 52AA1, das Figuras 6.10(a) e 6.10(b), comprova-se que não houve abertura dos disjuntores. Da mesma maneira, nas oscilografias das correntes vistas por cada relé, é possível verificar que não ocorreu interrupção do sistema durante a falta na LT adjacente.

6.3.2.4 Falta BC a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação)

As Figuras 6.11(a) e 6.11(b) apresentam os relatórios gráficos de eventos capturados pelos relés SEL-421, durante a ocorrência da falta BC a -10% da LT principal. Neste caso, aplicando-se o mesmo cenário de teste do item 6.3.2.3, simula-se a interrupção do canal de comunicação.

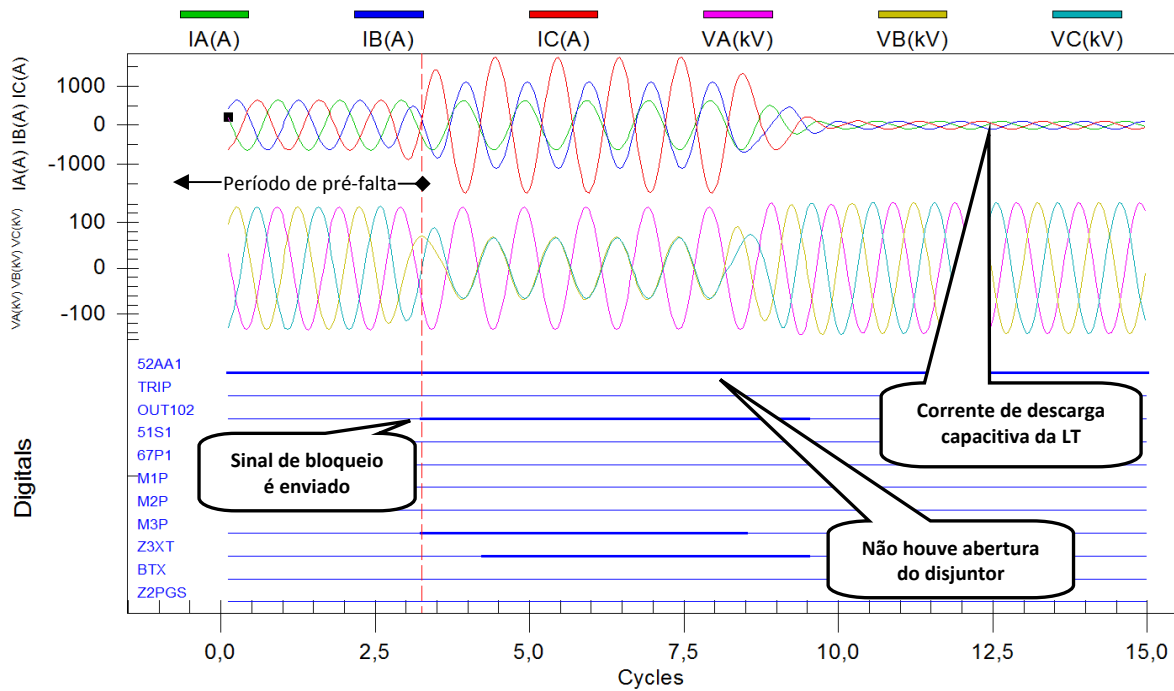


Figura 6.11(a) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta BC a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação)

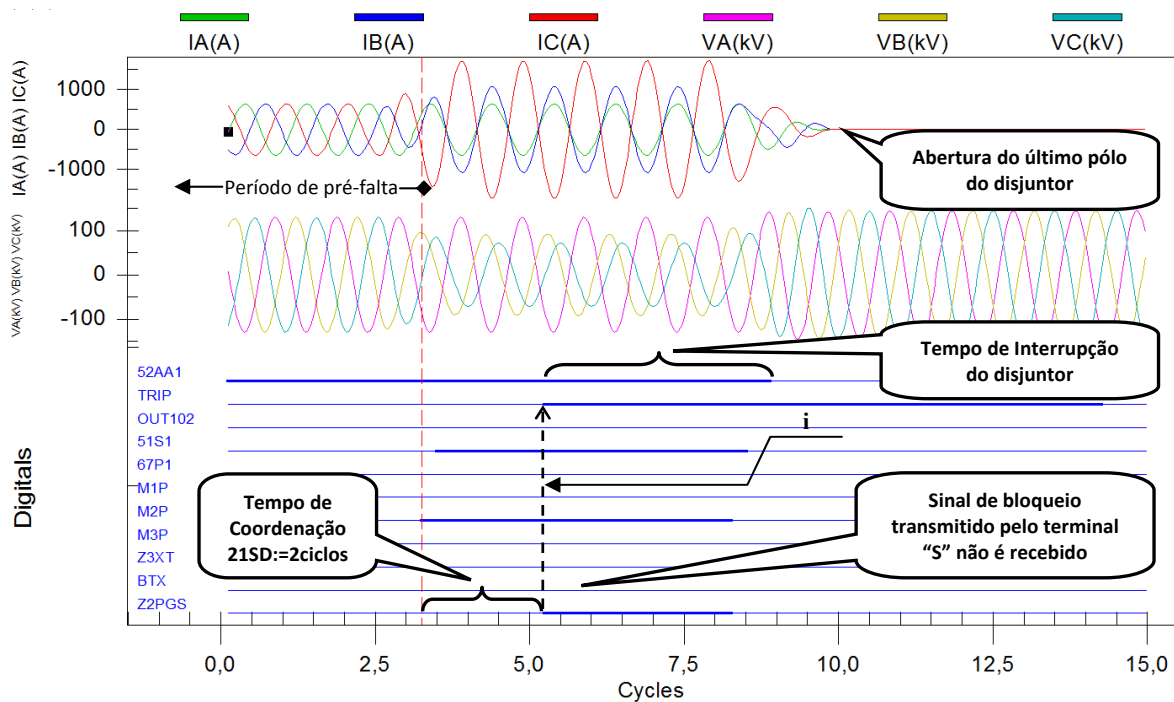


Figura 6.11(b) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta BC a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação)

Observa-se na Figura 6.11(b), que com a perda do canal de comunicação o sinal de bloqueio BTX transmitido pelo relé do terminal “S”, não é recebido pelo relé no terminal

“R”. Através do indicador (i) da Figura 6.11(b) verifica-se que o término do tempo de coordenação 21SD, sem recepção do sinal de bloqueio, permite que o *Word Bit Z2PGS* execute o comando de disparo do disjuntor. O *Word Bit 52AA1*, da mesma Figura 6.11(b), ilustra a abertura indevida do disjuntor no terminal “R” após o período de falta na LT adjacente. Em contrapartida observa-se na Figura 6.11(a), que o disjuntor do terminal “S” permanece fechado.

Conclui-se que, se o canal de comunicação estiver interrompido durante a ocorrência de uma falta externa, o bloqueio do comando de disparo do disjuntor, associado ao relé que vê esta falta dentro da zona de sobralcance, não obtém êxito.

6.4 Comparação de Resultados entre o Esquema com Interface Convencional e o Esquema com Interface via Mensagens GOOSE

Os mesmos cenários de teste aplicados no esquema de teleproteção com interface convencional, conforme descrito no item 6.3, foram aplicados no esquema de teleproteção com interface via mensagens GOOSE. Ao se obter respostas semelhantes das funções de proteção utilizadas, são aproveitados os mesmos comentários que foram expostos nos itens 6.3.1 e 6.3.2. No entanto, no apêndice B apresentam-se os relatórios gráficos de eventos capturados pelos relés em cada caso teste aplicados com interface GOOSE.

Considerando a importância do tempo no desempenho dos sistemas de teleproteção, a comparação de resultados entre os esquemas de interface convencional e GOOSE é baseada na análise do tempo total de transferência do sinal de teleproteção (sinal de bloqueio) entre relés. Nesta análise comparativa empregara-se unicamente o cenário de teste com falta em zona reversa (em -10% da LT principal), para os casos de falta monofásica e falta entre fases.

Sabendo-se que uma rede LAN apresenta um inerente comportamento probabilístico, em cada caso teste usando interface GOOSE, foram executadas várias simulações visando determinar uma média dos tempos de transferência medidos.

6.4.1 Comparação de Resultados para Falta Fase-Terra em Zona Reversa

Para esta análise primeiramente apresentam-se nas Tabelas 6.5(a) e 6.5(b) os registros sequenciais de eventos fornecidos pelos relés SEL-421, para os testes com interface convencional e interface GOOSE.

Tabela 6.5(a) – Registros Sequenciais de Eventos (Falta Fase–Terra) – Interface Convencional

Registro Sequencial de Eventos do Relé SEL–421 do Terminal “S” da LT Principal					Registro Sequencial de Eventos do Relé SEL–421 do Terminal “R” da LT Principal				
					Tempo de Coordenação				
#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE	#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE
12	08/31/2011	21:21:10.435	50G3	PICK-UP	16	08/31/2011	21:21:10.433	50G3	PICK-UP
11	08/31/2011	21:21:10.435	67G3	PICK-UP	15	08/31/2011	21:21:10.433	OUT102	SENDING
10	08/31/2011	21:21:10.435	OUT102	SENDING	14	08/31/2011	21:21:10.440	51S2	PICK-UP
9	08/31/2011	21:21:10.442	Z3G	PICK-UP	13	08/31/2011	21:21:10.444	Z2G	PICK-UP
8	08/31/2011	21:21:10.452	Z3XT	PICK-UP	12	08/31/2011	21:21:10.469	IN102	RECEIVING
7	08/31/2011	21:21:10.467	IN102	RECEIVING	11	08/31/2011	21:21:10.477	Z2PGS	PICK-UP
6	08/31/2011	21:21:10.485	IN102	DEASSERTED	10	08/31/2011	21:21:10.477	OUT103	SENDING
5	08/31/2011	21:21:10.506	Z3G	DEASSERTED	9	08/31/2011	21:21:10.477	OUT102	DEASSERTED
4	08/31/2011	21:21:10.510	50G3	DEASSERTED	8	08/31/2011	21:21:10.502	Z2G	DEASSERTED
3	08/31/2011	21:21:10.510	67G3	DEASSERTED	7	08/31/2011	21:21:10.502	Z2PGS	DEASSERTED
2	08/31/2011	21:21:10.527	Z3XT	DEASSERTED	6	08/31/2011	21:21:10.502	OUT102	SENDING
1	08/31/2011	21:21:10.527	OUT102	DEASSERTED	5	08/31/2011	21:21:10.502	OUT103	DEASSERTED
					4	08/31/2011	21:21:10.510	50G3	DEASSERTED
					3	08/31/2011	21:21:10.510	OUT102	DEASSERTED
					2	08/31/2011	21:21:10.519	51S2	DEASSERTED
					1	08/31/2011	21:21:10.535	IN102	DEASSERTED

Tabela 6.5(b) – Registros Sequenciais de Eventos (11º simulação) – Interface GOOSE

Registro Sequencial de Eventos do Relé SEL–421 do Terminal “S” da LT Principal					Registro Sequencial de Eventos do Relé SEL–421 do Terminal “R” da LT Principal				
					Tempo de Coordenação				
#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE	#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE
12	09/26/2011	09:47:07.237	50G3	PICK-UP	16	09/26/2011	09:47:07.239	50G3	PICK-UP
11	09/26/2011	09:47:07.237	CCOUT02	SENDING	15	09/26/2011	09:47:07.239	CCOUT02	SENDING
10	09/26/2011	09:47:07.239	67G3	PICK-UP	14	09/26/2011	09:47:07.243	51S2	PICK-UP
9	09/26/2011	09:47:07.246	Z3G	PICK-UP	13	09/26/2011	09:47:07.247	Z2G	PICK-UP
8	09/26/2011	09:47:07.256	Z3XT	PICK-UP	12	09/26/2011	09:47:07.266	CCIN102	RECEIVING
7	09/26/2011	09:47:07.267	CCIN102	RECEIVING	11	09/26/2011	09:47:07.280	Z2PGS	PICK-UP
6	09/26/2011	09:47:07.287	CCIN102	DEASSERTED	10	09/26/2011	09:47:07.280	CCOUT03	SENDING
5	09/26/2011	09:47:07.310	Z3G	DEASSERTED	9	09/26/2011	09:47:07.280	CCOUT02	DEASSERTED
4	09/26/2011	09:47:07.314	50G3	DEASSERTED	8	09/26/2011	09:47:07.305	Z2G	DEASSERTED
3	09/26/2011	09:47:07.314	67G3	DEASSERTED	7	09/26/2011	09:47:07.305	Z2PGS	DEASSERTED
2	09/26/2011	09:47:07.331	Z3XT	DEASSERTED	6	09/26/2011	09:47:07.305	CCOUT02	SENDING
1	09/26/2011	09:47:07.331	CCOUT02	DEASSERTED	5	09/26/2011	09:47:07.305	CCOUT03	DEASSERTED
					4	09/26/2011	09:47:07.314	50G3	DEASSERTED
					3	09/26/2011	09:47:07.314	CCOUT02	DEASSERTED
					2	09/26/2011	09:47:07.322	51S2	DEASSERTED
					1	09/26/2011	09:47:07.339	CCIN102	DEASSERTED

Dado que no esquema convencional o tempo de transferência entre dispositivos não apresenta variações, os registros de um único teste conforme apresentados na Tabela 6.5(a) foram utilizados para calcular o tempo de transferência do sinal de bloqueio entre relés. Este cálculo se dá pela subtração do tempo do registro OUT102 no relé transmissor (Terminal “S”) do tempo do registro IN102 no relé receptor (Terminal “R”). Dos valores apresentados na Tabela 6.5(a), obtém-se como resultado um tempo de 34ms para a transferência do sinal de bloqueio.

No caso do esquema com interface GOOSE, foram considerados 20 simulações para coleta dos tempos de transferência, empregando-se as mesmas condições de teste do esquema de teleproteção convencional. A Tabela 6.5(b) apresenta os registros do décimo primeiro teste, da qual se extrai o tempo de transferência do sinal de bloqueio pela subtração do tempo do registro CCOUT02 no relé transmissor (Terminal “S”) do tempo do

registro CCIN102 no relé receptor (Terminal “R”). Na Tabela 6.6 são apresentados os tempos de transferência calculados.

Tabela 6.6 – Tempos de transferência medidos com interface GOOSE – Falta Fase-Terra

Simulação	Tempo de Transferência do Sinal de Bloqueio (ms)	Simulação	Tempo de Transferência do Sinal de Bloqueio (ms)
1	29	11	29
2	28	12	28
3	28	13	29
4	28	14	29
5	29	15	28
6	28	16	30
7	29	17	29
8	28	18	30
9	28	19	30
10	28	20	29

Nesta tabela pode-se observar que existe um comportamento aleatório dos tempos de transferência medidos. Uma possível justificativa para isto está na estrutura de teste implementada. Conforme ilustra a Figura 5.20, os dois relés e o único cartão GTNET do RTDS estão conectados ao mesmo switch. Imaginando que ambos os relés percebam a falta no mesmo instante e, simultaneamente enviam a mensagem de bloqueio ao GTNET, pode ocorrer colisão. Quando duas entradas estão acessando a mesma saída, o switch deve memorizar os dados de uma das entradas, transmitindo os dados da outra entrada para o destino comum. Ao término do envio do quadro *ethernet* gerado por um dos relés, o *switch* inicia a transferência dos dados gerados pelo outro relé, que foi memorizado para tratamento posterior quando o destino estiver livre de transferência de dados.

O acesso simultâneo dos relés ao cartão GTNET é uma situação inevitável para este caso teste, pois a função 50G3 de ambos, independentemente da localização da falta, sempre habilitará a transmissão simultânea dos sinais de bloqueio. De acordo com a estrutura de teste implementada, uma transmissão simultânea significa o acesso simultâneo dos relés ao RTDS. No caso do esquema de teste com interface GOOSE, o acesso dos relés aos canais de telecomunicação representados no RTDS, é feito unicamente pelo cartão GTNET. Nesta mesma linha de raciocínio, tendo-se no RTDS um único cartão GTNET recebendo as mensagens GOOSE de dois dispositivos externos, mais de uma mensagem

deve ser processada concomitantemente, entretanto somente uma destas é processada de cada vez.

Conforme exposto no item 5.3.4.1, dentro do tempo T_A (24ms), usado na modelagem do esquema convencional, 9ms correspondem ao tempo dispensado nas entradas e saídas binárias dos equipamentos de teleproteção ($T_{AI}+T_{puinput}+T_{puoutput}$) e 15ms são referidos ao tempo máximo requerido pelo sistema de telecomunicação (T_{ST}). Deste modo, ao considerar o tempo de transferência calculado em 34ms e subtraindo-se 15ms do sistema de telecomunicação, conclui-se que o tempo gasto nas interfaces convencionais entre o relé e o equipamento de teleproteção de ambos extremos da LT é de 19ms. Em outras palavras, tem-se 9,5ms para cada extremo.

Devido ao comportamento aleatório dos tempos apresentados na Tabela 6.6, para efeitos de comparação entre os esquemas de interface convencional e GOOSE, tem-se a seguinte análise:

a) Ao considerar o valor mínimo de 28ms da Tabela 6.6, e subtraindo-se 21ms referentes ao sistema de telecomunicação (T_{ST}) do esquema GOOSE, conclui-se que 7ms correspondem ao tempo gasto nas interfaces entre o relé e o equipamento de teleproteção de ambos extremos da LT. Ou seja, 3,5ms para cada extremo. Por outro lado, ao comparar o valor de 34ms do esquema convencional, com o valor mínimo de 28ms obtido no esquema GOOSE, conclui-se também que existe um ganho de tempo de aproximadamente 6ms na transmissão do sinal de bloqueio entre relés. Além deste ganho, tem-se também um ganho de 6ms no tempo de operação da teleproteção T_A , correspondente ao tempo gasto pelas entradas e saídas binárias dos equipamentos de teleproteção, para o caso do esquema convencional.

b) Ao considerar o valor máximo de 30ms da Tabela 6.6, e subtraindo-se 21ms referentes ao sistema de telecomunicação, conclui-se que 9ms correspondem ao tempo gasto nas interfaces entre o relé e o equipamento de teleproteção de ambos os extremos da LT. Ou seja, 4,5ms para cada extremo. Por outro lado, ao comparar o valor de 34ms do esquema convencional, com o valor máximo de 30ms obtido no esquema GOOSE, conclui-se também que existe um ganho de tempo de aproximadamente 4ms na transmissão do sinal de bloqueio entre relés. Além deste ganho, tem-se também um ganho de 6ms no tempo de operação da teleproteção T_A , correspondente ao tempo gasto pelas entradas e saídas binárias dos equipamentos de teleproteção, para o caso do esquema convencional.

A partir desta análise é possível concluir, que a estrutura de comunicação implementada nos testes, influenciou na resposta da mensagem GOOSE. No pior dos casos, observou-se que o tempo de 4.5ms da interface entre cada relé e o RTDS, é maior que ¼ de ciclo estabelecido pelo padrão IEC 61850 como o tempo máximo para as mensagens prioritárias tipo 1A. Comprova-se que mesmo com um atraso maior na transmissão da mensagem GOOSE, o tempo de transferência do sinal de bloqueio no esquema de teste baseado no IEC 61850, é menor que o tempo de transferência apresentado no esquema convencional.

6.4.2 Comparação de Resultados para Falta Fase-Fase em Zona Reversa

Para esta análise, são apresentadas nas Tabelas 6.7(a) e 6.7(b) os registros sequenciais de eventos fornecidos pelos relés SEL-421, para os testes com interface convencional e interface GOOSE.

Tabela 6.7(a) – Registros Sequenciais de Eventos (Falta Fase-Fase) – Interface Convencional

Registro Sequencial de Eventos do Relé SEL-421 do Terminal “S” da LT Principal					Registro Sequencial de Eventos do Relé SEL-421 do Terminal “R” da LT Principal				
#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE	#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE
6	09/03/2011	19:12:08.660	M3P	PICK-UP	12	09/03/2011	19:12:08.660	M2P	PICK-UP
5	09/03/2011	19:12:08.660	OUT102	SENDING	11	09/03/2011	19:12:08.662	51S1	PICK-UP
4	09/03/2011	19:12:08.676	Z3XT	PICK-UP	10	09/03/2011	19:12:08.694	BTX	RECEIVING
3	09/03/2011	19:12:08.745	M3P	DEASSERTED	9	09/03/2011	19:12:08.694	Z2PGS	PICK-UP
2	09/03/2011	19:12:08.762	Z3XT	DEASSERTED	8	09/03/2011	19:12:08.694	IN102	RECEIVING
1	09/03/2011	19:12:08.762	OUT102	DEASSERTED	7	09/03/2011	19:12:08.694	OUT103	SENDING
					6	09/03/2011	19:12:08.742	M2P	DEASSERTED
					5	09/03/2011	19:12:08.742	Z2PGS	DEASSERTED
					4	09/03/2011	19:12:08.742	OUT103	DEASSERTED
					3	09/03/2011	19:12:08.746	51S1	DEASSERTED
					2	09/03/2011	19:12:08.771	BTX	DEASSERTED
					1	09/03/2011	19:12:08.771	IN102	DEASSERTED

Tabela 6.7(b) – Registros Sequenciais de Eventos (11º simulação) – Interface GOOSE

Registro Sequencial de Eventos do Relé SEL-421 do Terminal “S” da LT Principal					Registro Sequencial de Eventos do Relé SEL-421 do Terminal “R” da LT Principal				
#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE	#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE
6	09/27/2011	11:28:53.394	M3P	PICK-UP	12	09/27/2011	11:28:53.395	M2P	PICK-UP
5	09/27/2011	11:28:53.394	CCOUT02	SENDING	11	09/27/2011	11:28:53.399	51S1	PICK-UP
4	09/27/2011	11:28:53.410	Z3XT	PICK-UP	10	09/27/2011	11:28:53.422	BTX	RECEIVING
3	09/27/2011	11:28:53.464	M3P	DEASSERTED	9	09/27/2011	11:28:53.422	CCIN102	RECEIVING
2	09/27/2011	11:28:53.481	Z3XT	DEASSERTED	8	09/27/2011	11:28:53.428	Z2PGS	PICK-UP
1	09/27/2011	11:28:53.481	CCOUT02	DEASSERTED	7	09/27/2011	11:28:53.428	CCOUT03	SENDING
					6	09/27/2011	11:28:53.459	M2P	DEASSERTED
					5	09/27/2011	11:28:53.459	Z2PGS	DEASSERTED
					4	09/27/2011	11:28:53.459	CCOUT03	DEASSERTED
					3	09/27/2011	11:28:53.461	51S1	DEASSERTED
					2	09/27/2011	11:28:53.489	BTX	DEASSERTED
					1	09/27/2011	11:28:53.489	CCIN102	DEASSERTED

Neste cenário de teste que considera a falta entre fases dentro da zona reversa, aplicam-se os mesmos critérios expostos no item 6.4.1 para o cálculo do tempo de transferência do sinal de bloqueio, tanto para o esquema convencional como para o esquema GOOSE.

Para o esquema implementado com interface convencional, usando os registros da Tabela 6.7(a), obtém-se o mesmo tempo de transferência de 34ms, calculado no item 6.4.1. Já no esquema implementado via mensagens GOOSE, baseado em vinte simulações, foram obtidos os tempos apresentados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Tempos de transferência medidos com interface GOOSE – Falta Fase–Fase

Simulação	Tempo de Transferência do Sinal de Bloqueio (ms)	Simulação	Tempo de Transferência do Sinal de Bloqueio (ms)
1	28	11	28
2	28	12	28
3	28	13	28
4	28	14	28
5	28	15	28
6	28	16	28
7	28	17	28
8	28	18	28
9	28	19	28
10	28	20	28
Média		28	

Observa-se nesta tabela que os valores medidos não apresentam um comportamento aleatório e são iguais para as vinte simulações executadas. Ao contrário do caso exposto no item 6.4.1, considera-se que para este caso de falta externa entre fases, a estrutura de teste implementada não influencia na operação do esquema DCB. Uma possível justificativa para isto é a declaração unidirecional do sinal de bloqueio feita unicamente pelo relé que vê a falta em zona reversa. Em outras palavras, só o relé transmissor percebe a falta em zona reversa e tenta acessar ao cartão GTNET para envio do sinal de bloqueio ao relé receptor, o qual enxerga a falta em zona de sobrealcance. Deste modo, descartam-se possíveis colisões na troca de informações entre dispositivos durante a perturbação.

Cabe ressaltar que para faltas entre fases em zona reversa, a função 50G3 não é sensibilizada, portanto, não existe envio simultâneo do sinal de bloqueio feito por ambos os relés independentemente do sentido da falta.

Pode-se considerar então que a média dos vinte valores apresentados na Tabela 6.8, que é de 28ms, representa certamente o tempo de transferência do sinal de bloqueio para o esquema com interface GOOSE. Com base no exposto, são apresentados os seguintes comentários:

- a) Conforme já mencionado no item 6.4.1, do tempo de transferência de 34ms calculado para o esquema com interface convencional, 19ms correspondem ao tempo gasto nas interfaces entre o relé e o equipamento de teleproteção de ambos extremos da LT. Em outras palavras, tem-se 9,5ms para cada extremo.
- b) Seguindo o mesmo raciocínio do item (a) de 6.4.1, ao considerar o tempo de transferência calculado de 28ms para o esquema com interface GOOSE e subtraindo-se os 21ms do sistema de telecomunicação, conclui-se que 7ms correspondem ao tempo gasto nas interfaces entre o relé e o equipamento de teleproteção de ambos extremos da LT, ou seja, 3,5ms para cada extremo.

Para este caso, onde as mensagens GOOSE não apresentaram comportamentos aleatórios, é possível fazer uma comparação entre os tempos de transferência medidos. Ao comparar o valor de 34ms do esquema convencional, com o valor de 28ms obtido no esquema GOOSE, pode-se concluir que para este último existe um ganho de tempo de aproximadamente 6ms na transmissão do sinal de bloqueio entre relés. Além deste ganho, tem-se também um ganho de 6ms no tempo de operação da teleproteção T_A , correspondente ao tempo gasto pelas entradas e saídas binárias dos equipamentos de teleproteção, para o caso do esquema convencional. Conclui-se que, o tempo de transferência total de 34ms obtido para o esquema convencional, pode ser reduzido para um valor de 22ms na implementação do mesmo esquema via mensagens GOOSE. Com este menor tempo de transferência do sinal de bloqueio, é possível diminuir o tempo de coordenação do esquema DCB e conseqüentemente diminuir o tempo de atuação das funções de sobrealcance de cada relé.

Finalmente, conclui-se que o valor de 3,5ms, representando o tempo gasto na troca de mensagens GOOSE entre o relé e o equipamento de teleproteção representado no RTDS, é menor que $\frac{1}{4}$ de ciclo estabelecido pelo padrão IEC 61850 como o tempo máximo para as mensagens prioritárias tipo 1A.

6.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou a análise dos resultados obtidos dos testes no esquema de teleproteção DCB implementado através do RTDS. Aqui, foram avaliadas duas metodologias de testes para o esquema de teleproteção, uma com interface convencional e outra empregando as mensagens GOOSE. Da comparação dos resultados entre metodologias, comprovaram-se as vantagens das mensagens GOOSE nos esquemas de teleproteção.

A partir dos resultados obtidos neste capítulo, apresenta-se no capítulo seguinte a abordagem das conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 7

Conclusões

7.1 Conclusões Gerais

Neste trabalho foram propostos dois circuitos de teste para esquemas de teleproteção DCB utilizando o RTDS. O primeiro baseado na implementação das interfaces entre os relés e o RTDS através de fiação convencional, usando as entradas e saídas binárias de ambos dispositivos. O segundo baseado na implementação das mesmas interfaces convencionais através de mensagens GOOSE, usando as entradas e saídas virtuais de comunicação dos dispositivos.

Ambos os circuitos foram avaliados em tempo real através de simulações no ambiente *RunTime* do programa RSCAD. Vários cenários de teste foram aplicados com o intuito de se obter conclusões sobre o desempenho do esquema de teleproteção implementado. Tais conclusões são descritas abaixo:

a) Os resultados obtidos mostraram, de forma geral, a correta atuação do esquema de teleproteção DCB ora com interface convencional, ora com interface GOOSE. Em ambos os casos, constatou-se que o esquema de teleproteção discriminou corretamente a localização da falta.

b) Para faltas do tipo fase–terra a lógica de teleproteção implementada nos relés SEL–421 apresentou um ganho no tempo de transmissão do sinal de bloqueio, quando comparada para situações de faltas entre fases. Comprovou-se que este fato se deve ao uso das funções de proteção não direcionais (50G3) na partida inicial da transmissão do sinal de bloqueio.

c) A perda do canal de comunicação durante a ocorrência de uma falta em zona reversa mostrou ser um cenário desfavorável para o esquema DCB. Existe a operação indevida do relé que enxerga a falta em zona de sobrealcance.

d) Os resultados mostraram que, para o esquema com interface convencional, o tempo gasto nas interfaces entre o relé de proteção e o equipamento de teleproteção de ambos extremos da LT, representa mais de 50% do tempo de transferência total do sinal de bloqueio.

e) Constatou-se que para um cenário de comunicação livre de colisões, as mensagens GOOSE apresentam um ganho de 6ms no tempo total de transferência do sinal de bloqueio, quando comparadas com as respostas dos esquemas convencionais.

f) Além do ganho de 6ms descrito no item (e), constatou-se também um ganho de 6ms no tempo de operação da teleproteção T_A , correspondente ao tempo gasto pelas entradas e saídas binárias usadas no esquema convencional. Deste modo, obteve-se um ganho total de 12ms no esquema de teleproteção utilizando mensagens GOOSE.

g) Da implementação física dos esquemas de teste, constatou-se a substituição total dos 20 fios de cobre utilizados nas interfaces convencionais entre os relés e o RTDS, por três únicos cabos de rede utilizados nas interfaces com mensagens GOOSE. Este fato reflete a significativa redução de custos que é obtida na implementação do padrão IEC 61850, dentro dos sistemas de automação das subestações.

h) Na implementação do esquema de teleproteção com interface GOOSE, comprovou-se que o levantamento das conexões físicas não esclarece as conexões lógicas implementadas nos relés. Foi preciso documentar as conexões lógicas para entender os enlaces estabelecidos entre os relés e o RTDS, conforme se apresentou na Tabela 5.6 do item 5.3.3.2. Este fato permite concluir que no caso da implementação do padrão IEC 61850 dentro dos sistemas de automação de subestações, os esforços nas etapas de construção e comissionamento podem ser razoavelmente maiores.

i) Para estabelecer a interoperabilidade na parametrização das mensagens GOOSE, precisa-se dominar as ferramentas de configuração (softwares) de cada fabricante dos dispositivos envolvidos. Constatou-se a necessidade de transferir continuamente os arquivos de configuração (ICD ou CID) entre ferramentas para definir as conexões lógicas dos IEDs. Este fato demonstra a dificuldade no estabelecimento da interoperabilidade quando da existência de uma maior quantidade de dispositivos de diferentes fabricantes numa subestação.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Com o objetivo de prosseguir com novas análises das metodologias de teste implementadas, bem como estudos mais profundos dos aspectos relevantes do padrão IEC 61850, são apresentadas em seguida algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar o desempenho do esquema de teleproteção DCB para um sistema de potência composto de linhas paralelas. Recomenda-se analisar o desempenho deste esquema nas condições de reversão de corrente.

-
- Implementar as interfaces GOOSE do esquema de malha fechada através de dois cartões GTNET, conectando independentemente um cartão com cada relé. Isto permitirá verificar se os resultados aleatórios do tempo de transferência das mensagens GOOSE, obtidos no item 6.4.1, resultaram de possíveis colisões no acesso simultâneo dos relés a um único cartão GTNET.
 - Implementar outros esquemas de teleproteção baseados em sinalização e realizar uma análise comparativa dos resultados com o esquema utilizado neste trabalho de dissertação.
 - Considerar as influências da saturação dos TCs e os fenômenos transitórios dos TPCs na resposta dos relés de proteção utilizados.
 - Programar um script para simular simultaneamente vários tipos de falta em diferentes pontos do sistema, objetivando-se determinar gráficos estatísticos.
 - Substituir no nível de processo os sinais analógicos de tensão e corrente por sinais amostrados, seguindo os requisitos de comunicação expostos na parte 9-2 do padrão IEC 61850. Para isto, recomenda-se acrescentar o RTDS com mais um cartão GTNET, pois o uso de um protocolo de comunicação é permitido de cada vez.
 - Realizar um estudo mais profundo da parte 90-1 do IEC 61850 e desenvolver novas aplicações nos testes de esquemas de teleproteção.

Referências Bibliográficas

(AGUILAR, 2010) Aguilar R, Ariza J. *Testing and Configuration of IEC 61850 Multivendor Protection Schemes*. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE/PES, New Orleans – USA , June 2010.

(APOSTOLOV, 2005) Apostolov A., Vandiver B. *Functional Testing of IEC 61850 Based IEDs and Systems*. Power Systems Conference and Exposition, 2004 IEEE/PES, New York – USA, April 2005.

(APOSTOLOV, 2008) Apostolov A.P. *Implementation of Accelerated Transmission Line Protection Schemes in Substations with IEC 61850*, Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008 IEEE/PES, Bogotá – Colombia, May 2008.

(AREVA, 2000) Areva. *Network Protection and Automation Guide*. USA, 2000.

(BONETTI, 2010) Bonetti A., Douib R. *Transfer time measurement for protection relay applications with the IEC 61850 standard*. IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2010, San Diego – California, June 2010.

(BRANTLEY, 2007) Brantley R., Donahoe K., Theron J., Udren E. *The Application of IEC 61850 to Replace Auxiliary Devices Including Lockout Relays*. Study Case, 2007.

(BRUNNER, 2008) Brunner Christoph. *IEC 61850 for Power System Communication*. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008 IEEE/PES, Bogotá – Colombia, May 2008.

(CIGRÉ, 2000) Cigré SC34 WG 34-35.11. *Protection Using Telecommunications*, TB 13, December 2000.

(GRAINGER, 2001) Grainger, John J.; Stevenson, William D..*Análisis de Sistemas de Potencia*. México: McGraw-Hill, 2001.

(IEC, 1999) International Electrotechnical Commission – IEC, *Teleprotection Equipment of Power Systems – Performance and Testing*, IEC Standard 60834-1 – 1999.

(IEC, 2003a) International Electrotechnical Commission – IEC, *Part 7-4: Basic Communication Structure for Substation and Feeder Equipment – Compatible Logical Node Classes and Data Classes*, IEC Standard 61850-7-4 – 2003/05.

(IEC, 2003b) International Electrotechnical Commission – IEC, *Part 7-3: Basic Communication Structure for Substation and Feeder Equipment – Common Data Classes*, IEC Standard 61850-7-3 – 2003/05.

(IEC, 2003c) International Electrotechnical Commission – IEC, *Part 7-2: Basic Communication Structure for Substation and Feeder Equipment – Abstract Communication Service Interface (ACSI)*, IEC Standard 61850-7-2 – 2003/05.

(IEC, 2003d) International Electrotechnical Commission – IEC, *Part 7-1: Basic Communication Structure for Substation and Feeder Equipment – Principles and Models*, IEC Standard 61850-7-1 – 2003/07.

(IEC, 2003e) International Electrotechnical Commission – IEC, *Part 5: Communication Requirements for Functions and Device Models*, IEC Standard 61850-5 – 2003/07.

(IEC, 2004a) International Electrotechnical Commission – IEC, *Part 6: Configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs*, IEC Standard 61850-6 – 2004/03.

(IEC, 2004b) International Electrotechnical Commission – IEC, *Part 8-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM) Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3*, IEC Standard 61850-8-1 – 2004/05.

(IEC, 2010) International Electrotechnical Commission – IEC, *Part 90-1: Use of IEC 61850 for the Communication Between Substation*, IEC Standard 61850-90-1 – 2010/03.

(IEEE, 2003) Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE, *Standards for Local and metropolitan area networks: Virtual Bridged Local Area Networks*, IEEE Standard 802.1Q – 2003/05.

(IEEE, 2005) Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE, *Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access method and Physical Layer Specifications*, IEEE Std.802.3 – 2005/12.

(KIRKMAN, 2008) Kirkman Robert. *Development in Substation Automation Systems*. Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies – DRPT 2008, Nanjing China, April 2008.

(KUFFEL, 2010) Kuffel R., Forsyth P., Ouellette D. *Real Time Simulation and Testing Using IEC 61850*. Modern Electric Power Systems (MEPS) / 2010 Proceedings of the International Symposium, Wroclaw – Poland, September 2010.

(ORDAGCI, 2010) Ordacgi, J.M. *Proteção de Linhas de Transmissão: Teleproteção*. CEPSE 2010 Campinas, Outubro 2010.

(RTDS, 2008) RTDS Technologies. *Real Time Digital Simulator Tutorial Manual (RSCAD Version)*. Canadá: RTDS Technologies, 2008.

(SEL, 2010) Schweitzer Engineering Laboratories. *SEL – 421 Relay Application Handbook*. March 2010.

(USDA, 2001) United States Department of Agriculture. *Design Guide for Rural Substations*. RUS Bulletin 1724E-300, June 2001.

(YANG, 2010) Yang L., Crossley P., Sun X., Redfern M., An W., Grasset H. *Protection Performance Testing in IEC 61850 Based Systems*. 10th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2010), Manchester – UK, July 2010

(ZHANG, 2009) Zhang L.X, Nirmal-Kumar C Nair. *Testing Protective Relays in IEC 61850 Framework*. Power Engineering Conference Australasian Universities – AUPEC 2008, Sydney – Australia, April 2009.

Apêndices

Apêndice A – Registros Sequenciais de Eventos dos Relés – Testes com Interface Convencional.

- Apêndice A.1 – Registros Sequenciais de Eventos dos relés SEL-421 para falta AN a 50% da LT principal

Tabela A.1 – Registros Sequenciais de Eventos – Falta AN a 50% da LT principal

Relé SEL-421 do Terminal “S” da LT Principal					Relé SEL-421 do Terminal “R” da LT Principal				
#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE	#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE
26	08/31/2011	21:08:56.225	50G3	PICK-UP	26	08/31/2011	21:08:56.225	50G3	PICK-UP
25	08/31/2011	21:08:56.225	OUT102	SENDING	25	08/31/2011	21:08:56.225	OUT102	SENDING
24	08/31/2011	21:08:56.233	Z2G	PICK-UP	24	08/31/2011	21:08:56.233	Z2G	PICK-UP
23	08/31/2011	21:08:56.233	Z1G	PICK-UP	23	08/31/2011	21:08:56.233	50G2	PICK-UP
22	08/31/2011	21:08:56.233	50G2	PICK-UP	22	08/31/2011	21:08:56.233	67G2	PICK-UP
21	08/31/2011	21:08:56.233	67G2	PICK-UP	21	08/31/2011	21:08:56.233	51S2	PICK-UP
20	08/31/2011	21:08:56.233	TRIP	SENDING	20	08/31/2011	21:08:56.233	TRIP	SENDING
19	08/31/2011	21:08:56.233	OUT101	SENDING	19	08/31/2011	21:08:56.233	OUT101	SENDING
18	08/31/2011	21:08:56.233	OUT103	SENDING	18	08/31/2011	21:08:56.233	OUT103	SENDING
17	08/31/2011	21:08:56.235	51S2	PICK-UP	17	08/31/2011	21:08:56.237	Z1G	PICK-UP
16	08/31/2011	21:08:56.266	67QG2S	PICK-UP	16	08/31/2011	21:08:56.266	67QG2S	PICK-UP
15	08/31/2011	21:08:56.266	Z2PGS	PICK-UP	15	08/31/2011	21:08:56.266	Z2PGS	PICK-UP
14	08/31/2011	21:08:56.266	OUT102	DEASSERTED	14	08/31/2011	21:08:56.266	OUT102	DEASSERTED
13	08/31/2011	21:08:56.300	50G2	DEASSERTED	13	08/31/2011	21:08:56.298	50G2	DEASSERTED
12	08/31/2011	21:08:56.300	67G2	DEASSERTED	12	08/31/2011	21:08:56.298	67G2	DEASSERTED
11	08/31/2011	21:08:56.300	67QG2S	DEASSERTED	11	08/31/2011	21:08:56.298	67QG2S	DEASSERTED
10	08/31/2011	21:08:56.304	Z2G	DEASSERTED	10	08/31/2011	21:08:56.302	Z2G	DEASSERTED
9	08/31/2011	21:08:56.304	Z1G	DEASSERTED	9	08/31/2011	21:08:56.302	Z1G	DEASSERTED
8	08/31/2011	21:08:56.304	Z2PGS	DEASSERTED	8	08/31/2011	21:08:56.302	Z2PGS	DEASSERTED
7	08/31/2011	21:08:56.304	OUT102	SENDING	7	08/31/2011	21:08:56.302	OUT102	SENDING
6	08/31/2011	21:08:56.308	50G3	DEASSERTED	6	08/31/2011	21:08:56.308	50G3	DEASSERTED
5	08/31/2011	21:08:56.308	OUT102	DEASSERTED	5	08/31/2011	21:08:56.308	OUT102	DEASSERTED
4	08/31/2011	21:08:56.314	51S2	DEASSERTED	4	08/31/2011	21:08:56.316	51S2	DEASSERTED
3	08/31/2011	21:08:56.383	TRIP	DEASSERTED	3	08/31/2011	21:08:56.383	TRIP	DEASSERTED
2	08/31/2011	21:08:56.383	OUT101	DEASSERTED	2	08/31/2011	21:08:56.383	OUT101	DEASSERTED
1	08/31/2011	21:08:56.383	OUT103	DEASSERTED	1	08/31/2011	21:08:56.383	OUT103	DEASSERTED

- Apêndice A.2 – Registros Sequenciais de Eventos dos relés SEL-421 para falta AN a 0% da LT principal

Tabela A.2 – Registros Sequenciais de Eventos – Falta AN a 0% da LT principal

Relé SEL-421 do Terminal “S” da LT Principal					Relé SEL-421 do Terminal “R” da LT Principal				
#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE	#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE
28	08/31/2011	21:16:55.711	50G3	PICK-UP	18	08/31/2011	21:16:55.717	50G3	PICK-UP
27	08/31/2011	21:16:55.711	OUT102	SENDING	17	08/31/2011	21:16:55.717	OUT102	SENDING
26	08/31/2011	21:16:55.717	Z2G	PICK-UP	16	08/31/2011	21:16:55.719	51S2	PICK-UP
25	08/31/2011	21:16:55.717	50G2	PICK-UP	15	08/31/2011	21:16:55.726	Z2G	PICK-UP
24	08/31/2011	21:16:55.717	67G2	PICK-UP	14	08/31/2011	21:16:55.759	TRIP	SENDING
23	08/31/2011	21:16:55.717	TRIP	SENDING	13	08/31/2011	21:16:55.759	Z2PGS	PICK-UP
22	08/31/2011	21:16:55.717	OUT101	SENDING	12	08/31/2011	21:16:55.759	OUT101	SENDING
21	08/31/2011	21:16:55.717	OUT103	SENDING	11	08/31/2011	21:16:55.759	OUT103	SENDING
20	08/31/2011	21:16:55.719	Z1G	PICK-UP	10	08/31/2011	21:16:55.759	OUT102	DEASSERTED
19	08/31/2011	21:16:55.721	51S2	PICK-UP	9	08/31/2011	21:16:55.778	Z2G	DEASSERTED
18	08/31/2011	21:16:55.720	67QG2S	PICK-UP	8	08/31/2011	21:16:55.778	Z2PGS	DEASSERTED
17	08/31/2011	21:16:55.750	Z2PGS	PICK-UP	7	08/31/2011	21:16:55.778	OUT102	SENDING
16	08/31/2011	21:16:55.750	IN102	RECRIVING	6	08/31/2011	21:16:55.786	50G3	DEASSERTED
15	08/31/2011	21:16:55.750	OUT102	DEASSERTED	5	08/31/2011	21:16:55.786	OUT102	DEASSERTED
14	08/31/2011	21:16:55.752	Z1G	DEASSERTED	4	08/31/2011	21:16:55.794	51S2	DEASSERTED
13	08/31/2011	21:16:55.767	IN102	DEASSERTED	3	08/31/2011	21:16:55.909	TRIP	DEASSERTED
12	08/31/2011	21:16:55.786	Z2G	DEASSERTED	2	08/31/2011	21:16:55.909	OUT101	DEASSERTED
11	08/31/2011	21:16:55.786	50G2	DEASSERTED	1	08/31/2011	21:16:55.909	OUT103	DEASSERTED
10	08/31/2011	21:16:55.786	67G2	DEASSERTED					
9	08/31/2011	21:16:55.786	67QG2S	DEASSERTED					
8	08/31/2011	21:16:55.786	Z2PGS	DEASSERTED					
7	08/31/2011	21:16:55.786	OUT102	SENDING					
6	08/31/2011	21:16:55.792	50G3	DEASSERTED					
5	08/31/2011	21:16:55.792	OUT102	DEASSERTED					
4	08/31/2011	21:16:55.796	51S2	DEASSERTED					
3	08/31/2011	21:16:55.867	TRIP	DEASSERTED					
2	08/31/2011	21:16:55.867	OUT101	DEASSERTED					
1	08/31/2011	21:16:55.867	OUT103	DEASSERTED					

- **Apêndice A.3 – Registros Sequenciais de Eventos dos relés SEL–421 para falta AN a -10% da LT principal**

Tabela A.3 – Registros Sequenciais de Eventos – Falta AN a -10% da LT principal

Relé SEL–421 do Terminal “S” da LT Principal					Relé SEL–421 do Terminal “R” da LT Principal				
#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE	#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE
12	08/31/2011	21:21:10.435	50G3	PICK-UP	16	08/31/2011	21:21:10.433	50G3	PICK-UP
11	08/31/2011	21:21:10.435	67G3	PICK-UP	15	08/31/2011	21:21:10.433	OUT102	SENDING
10	08/31/2011	21:21:10.435	OUT102	SENDING	14	08/31/2011	21:21:10.440	51S2	PICK-UP
9	08/31/2011	21:21:10.442	Z3G	PICK-UP	13	08/31/2011	21:21:10.444	Z2G	PICK-UP
8	08/31/2011	21:21:10.452	Z3XT	PICK-UP	12	08/31/2011	21:21:10.469	IN102	RECEIVING
7	08/31/2011	21:21:10.467	IN102	RECEIVING	11	08/31/2011	21:21:10.477	Z2PGS	PICK-UP
6	08/31/2011	21:21:10.485	IN102	DEASSERTED	10	08/31/2011	21:21:10.477	OUT103	SENDING
5	08/31/2011	21:21:10.506	Z3G	DEASSERTED	9	08/31/2011	21:21:10.477	OUT102	DEASSERTED
4	08/31/2011	21:21:10.510	50G3	DEASSERTED	8	08/31/2011	21:21:10.502	Z2G	DEASSERTED
3	08/31/2011	21:21:10.510	67G3	DEASSERTED	7	08/31/2011	21:21:10.502	Z2PGS	DEASSERTED
2	08/31/2011	21:21:10.527	Z3XT	DEASSERTED	6	08/31/2011	21:21:10.502	OUT102	SENDING
1	08/31/2011	21:21:10.527	OUT102	DEASSERTED	5	08/31/2011	21:21:10.502	OUT103	DEASSERTED
					4	08/31/2011	21:21:10.510	50G3	DEASSERTED
					3	08/31/2011	21:21:10.510	OUT102	DEASSERTED
					2	08/31/2011	21:21:10.519	51S2	DEASSERTED
					1	08/31/2011	21:21:10.535	IN102	DEASSERTED

- **Apêndice A.4 – Registros Sequenciais de Eventos dos relés SEL–421 para falta AN a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação)**

Tabela A.4 – Registros Sequenciais de Eventos – Falta AN a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação)

Relé SEL–421 do Terminal “S” da LT Principal					Relé SEL–421 do Terminal “R” da LT Principal				
#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE	#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE
10	09/03/2011	19:27:13.514	50G3	PICK-UP	18	09/03/2011	19:27:13.512	50G3	PICK-UP
9	09/03/2011	19:27:13.514	67G3	PICK-UP	17	09/03/2011	19:27:13.512	OUT102	SENDING
8	09/03/2011	19:27:13.514	OUT102	SENDING	16	09/03/2011	19:27:13.519	51S2	PICK-UP
7	09/03/2011	19:27:13.520	Z3G	PICK-UP	15	09/03/2011	19:27:13.523	Z2G	PICK-UP
6	09/03/2011	19:27:13.530	Z3XT	PICK-UP	14	09/03/2011	19:27:13.556	TRIP	SENDING
5	09/03/2011	19:27:13.584	Z3G	DEASSERTED	13	09/03/2011	19:27:13.556	Z2PGS	PICK-UP
4	09/03/2011	19:27:13.589	50G3	DEASSERTED	12	09/03/2011	19:27:13.556	OUT101	SENDING
3	09/03/2011	19:27:13.589	67G3	DEASSERTED	11	09/03/2011	19:27:13.556	OUT103	SENDING
2	09/03/2011	19:27:13.605	Z3XT	DEASSERTED	10	09/03/2011	19:27:13.556	OUT102	DEASSERTED
1	09/03/2011	19:27:13.605	OUT102	DEASSERTED	9	09/03/2011	19:27:13.579	Z2G	DEASSERTED
					8	09/03/2011	19:27:13.579	Z2PGS	DEASSERTED
					7	09/03/2011	19:27:13.579	OUT102	SENDING
					6	09/03/2011	19:27:13.590	50G3	DEASSERTED
					5	09/03/2011	19:27:13.590	OUT102	DEASSERTED
					4	09/03/2011	19:27:13.598	51S2	DEASSERTED
					3	09/03/2011	19:27:13.706	TRIP	DEASSERTED
					2	09/03/2011	19:27:13.706	OUT101	DEASSERTED
					1	09/03/2011	19:27:13.706	OUT103	DEASSERTED

- **Apêndice A.5 – Registros Sequenciais de Eventos dos relés SEL–421 para falta AB a 50% da LT principal**

Tabela A.5 – Registros Sequenciais de Eventos – Falta AB a 50% da LT principal

Relé SEL–421 do Terminal “S” da LT Principal					Relé SEL–421 do Terminal “R” da LT Principal				
#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE	#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE
18	09/03/2011	18:59:10.052	M2P	PICK-UP	18	09/03/2011	18:59:10.052	M2P	PICK-UP
17	09/03/2011	18:59:10.052	M1P	PICK-UP	17	09/03/2011	18:59:10.052	M1P	PICK-UP
16	09/03/2011	18:59:10.052	TRIP	SENDING	16	09/03/2011	18:59:10.052	TRIP	SENDING
15	09/03/2011	18:59:10.052	OUT101	SENDING	15	09/03/2011	18:59:10.052	OUT101	SENDING
14	09/03/2011	18:59:10.052	OUT103	SENDING	14	09/03/2011	18:59:10.052	OUT103	SENDING
13	09/03/2011	18:59:10.054	51S1	PICK-UP	13	09/03/2011	18:59:10.057	51S1	PICK-UP
12	09/03/2011	18:59:10.061	67P1	PICK-UP	12	09/03/2011	18:59:10.069	67P1	PICK-UP
11	09/03/2011	18:59:10.061	50P1	PICK-UP	11	09/03/2011	18:59:10.069	50P1	PICK-UP
10	09/03/2011	18:59:10.085	Z2PGS	PICK-UP	10	09/03/2011	18:59:10.073	67P1	DEASSERTED
9	09/03/2011	18:59:10.117	67P1	DEASSERTED	9	09/03/2011	18:59:10.073	50P1	DEASSERTED
8	09/03/2011	18:59:10.117	50P1	DEASSERTED	8	09/03/2011	18:59:10.086	Z2PGS	PICK-UP
7	09/03/2011	18:59:10.123	M2P	DEASSERTED	7	09/03/2011	18:59:10.123	M2P	DEASSERTED
6	09/03/2011	18:59:10.123	M1P	DEASSERTED	6	09/03/2011	18:59:10.123	M1P	DEASSERTED
5	09/03/2011	18:59:10.123	Z2PGS	DEASSERTED	5	09/03/2011	18:59:10.123	Z2PGS	DEASSERTED
4	09/03/2011	18:59:10.125	51S1	DEASSERTED	4	09/03/2011	18:59:10.127	51S1	DEASSERTED
3	09/03/2011	18:59:10.202	TRIP	DEASSERTED	3	09/03/2011	18:59:10.202	TRIP	DEASSERTED
2	09/03/2011	18:59:10.202	OUT101	DEASSERTED	2	09/03/2011	18:59:10.202	OUT101	DEASSERTED
1	09/03/2011	18:59:10.202	OUT103	DEASSERTED	1	09/03/2011	18:59:10.202	OUT103	DEASSERTED

- **Apêndice A.6 – Registros Sequenciais de Eventos dos relés SEL–421 para falta ABC a 0% da LT principal**

Tabela A.6 – Registros Sequenciais de Eventos – Falta ABC a 0% da LT principal

Relé SEL–421 do Terminal “S” da LT Principal					Relé SEL–421 do Terminal “R” da LT Principal				
#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE	#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE
22	09/03/2011	19:07:00.042	M2P	PICK-UP	12	09/03/2011	19:07:00.047	M2P	PICK-UP
21	09/03/2011	19:07:00.042	M1P	PICK-UP	11	09/03/2011	19:07:00.051	51S1	PICK-UP
20	09/03/2011	19:07:00.042	TRIP	SENDING	10	09/03/2011	19:07:00.081	TRIP	SENDING
19	09/03/2011	19:07:00.042	OUT101	SENDING	9	09/03/2011	19:07:00.081	Z2PGS	PICK-UP
18	09/03/2011	19:07:00.042	OUT103	SENDING	8	09/03/2011	19:07:00.081	OUT101	SENDING
17	09/03/2011	19:07:00.044	51S1	PICK-UP	7	09/03/2011	19:07:00.081	OUT103	SENDING
16	09/03/2011	19:07:00.046	OUT102	SENDING	6	09/03/2011	19:07:00.126	M2P	DEASSERTED
15	09/03/2011	19:07:00.048	OUT102	DEASSERTED	5	09/03/2011	19:07:00.126	Z2PGS	DEASSERTED
14	09/03/2011	19:07:00.050	67P1	PICK-UP	4	09/03/2011	19:07:00.131	51S1	DEASSERTED
13	09/03/2011	19:07:00.050	50P1	PICK-UP	3	09/03/2011	19:07:00.231	TRIP	DEASSERTED
12	09/03/2011	19:07:00.050	OUT102	SENDING	2	09/03/2011	19:07:00.231	OUT101	DEASSERTED
11	09/03/2011	19:07:00.067	OUT102	DEASSERTED	1	09/03/2011	19:07:00.231	OUT103	DEASSERTED
10	09/03/2011	19:07:00.075	Z2PGS	PICK-UP					
9	09/03/2011	19:07:00.113	M2P	DEASSERTED					
8	09/03/2011	19:07:00.113	M1P	DEASSERTED					
7	09/03/2011	19:07:00.113	Z2PGS	DEASSERTED					
6	09/03/2011	19:07:00.115	67P1	DEASSERTED					
5	09/03/2011	19:07:00.115	50P1	DEASSERTED					
4	09/03/2011	19:07:00.115	51S1	DEASSERTED					
3	09/03/2011	19:07:00.192	TRIP	DEASSERTED					
2	09/03/2011	19:07:00.192	OUT101	DEASSERTED					
1	09/03/2011	19:07:00.192	OUT103	DEASSERTED					

- **Apêndice A.7 – Registros Sequenciais de Eventos dos relés SEL–421 para falta BC a -10% da LT principal**

Tabela A.7 – Registros Sequenciais de Eventos – Falta BC a -10% da LT principal

Relé SEL–421 do Terminal “S” da LT Principal					Relé SEL–421 do Terminal “R” da LT Principal				
#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE	#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE
6	09/03/2011	19:12:08.660	M3P	PICK-UP	12	09/03/2011	19:12:08.660	M2P	PICK-UP
5	09/03/2011	19:12:08.660	OUT102	SENDING	11	09/03/2011	19:12:08.662	51S1	PICK-UP
4	09/03/2011	19:12:08.676	Z3XT	PICK-UP	10	09/03/2011	19:12:08.694	BTX	RECEIVING
3	09/03/2011	19:12:08.745	M3P	DEASSERTED	9	09/03/2011	19:12:08.694	Z2PGS	PICK-UP
2	09/03/2011	19:12:08.762	Z3XT	DEASSERTED	8	09/03/2011	19:12:08.694	IN102	RECEIVING
1	09/03/2011	19:12:08.762	OUT102	DEASSERTED	7	09/03/2011	19:12:08.694	OUT103	SENDING
					6	09/03/2011	19:12:08.742	M2P	DEASSERTED
					5	09/03/2011	19:12:08.742	Z2PGS	DEASSERTED
					4	09/03/2011	19:12:08.742	OUT103	DEASSERTED
					3	09/03/2011	19:12:08.746	51S1	DEASSERTED
					2	09/03/2011	19:12:08.771	BTX	DEASSERTED
					1	09/03/2011	19:12:08.771	IN102	DEASSERTED

- **Apêndice A.8 – Registros Sequenciais de Eventos dos relés SEL–421 para falta BC a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação)**

Tabela A.8 – Registros Sequenciais de Eventos – Falta BC a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação)

Relé SEL–421 do Terminal “S” da LT Principal					Relé SEL–421 do Terminal “R” da LT Principal				
#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE	#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE
6	09/03/2011	19:17:02.653	M3P	PICK-UP	12	09/03/2011	19:17:02.654	M2P	PICK-UP
5	09/03/2011	19:17:02.653	OUT102	SENDING	11	09/03/2011	19:17:02.658	51S1	PICK-UP
4	09/03/2011	19:17:02.670	Z3XT	PICK-UP	10	09/03/2011	19:17:02.687	TRIP	SENDING
3	09/03/2011	19:17:02.740	M3P	DEASSERTED	9	09/03/2011	19:17:02.687	Z2PGS	PICK-UP
2	09/03/2011	19:17:02.757	Z3XT	DEASSERTED	8	09/03/2011	19:17:02.687	OUT101	SENDING
1	09/03/2011	19:17:02.757	OUT102	DEASSERTED	7	09/03/2011	19:17:02.687	OUT103	SENDING
					6	09/03/2011	19:17:02.737	M2P	DEASSERTED
					5	09/03/2011	19:17:02.737	Z2PGS	DEASSERTED
					4	09/03/2011	19:17:02.741	51S1	DEASSERTED
					3	09/03/2011	19:17:02.837	TRIP	DEASSERTED
					2	09/03/2011	19:17:02.837	OUT101	DEASSERTED
					1	09/03/2011	19:17:02.837	OUT103	DEASSERTED

Apêndice B – Relatórios Gráficos de Eventos dos Relés – Testes com Interface GOOSE.

- Apêndice B.1 – Relatórios Gráficos de Eventos dos relés SEL-421 para falta AN a 50% da LT principal

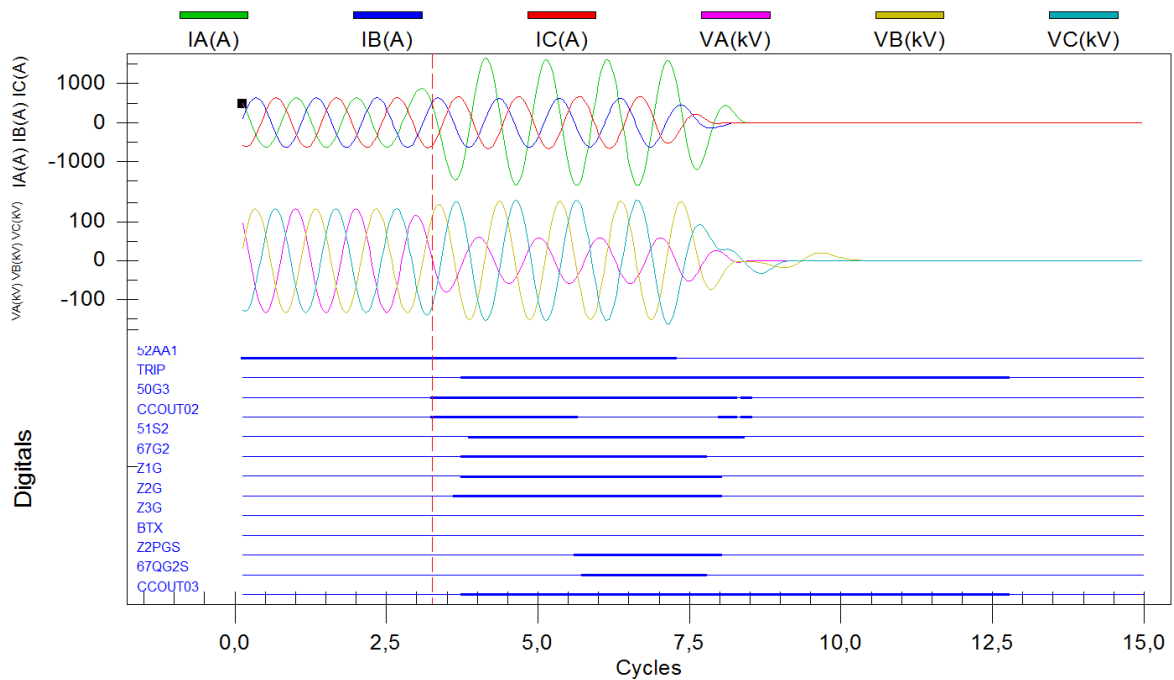


Figura B.1(a) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta AN a 50% da LT principal

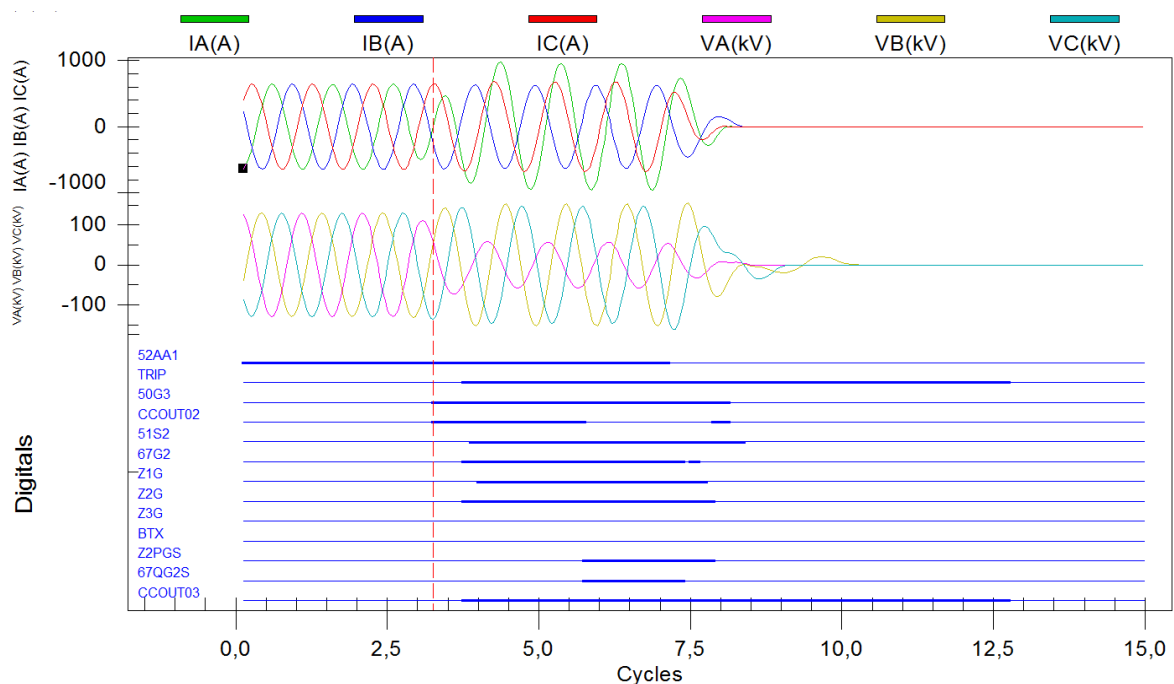


Figura B.1(b) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta AN a 50% da LT principal

• **Apêndice B.2 – Relatórios Gráficos de Eventos dos relés SEL-421 para falta AN a 0% da LT principal**

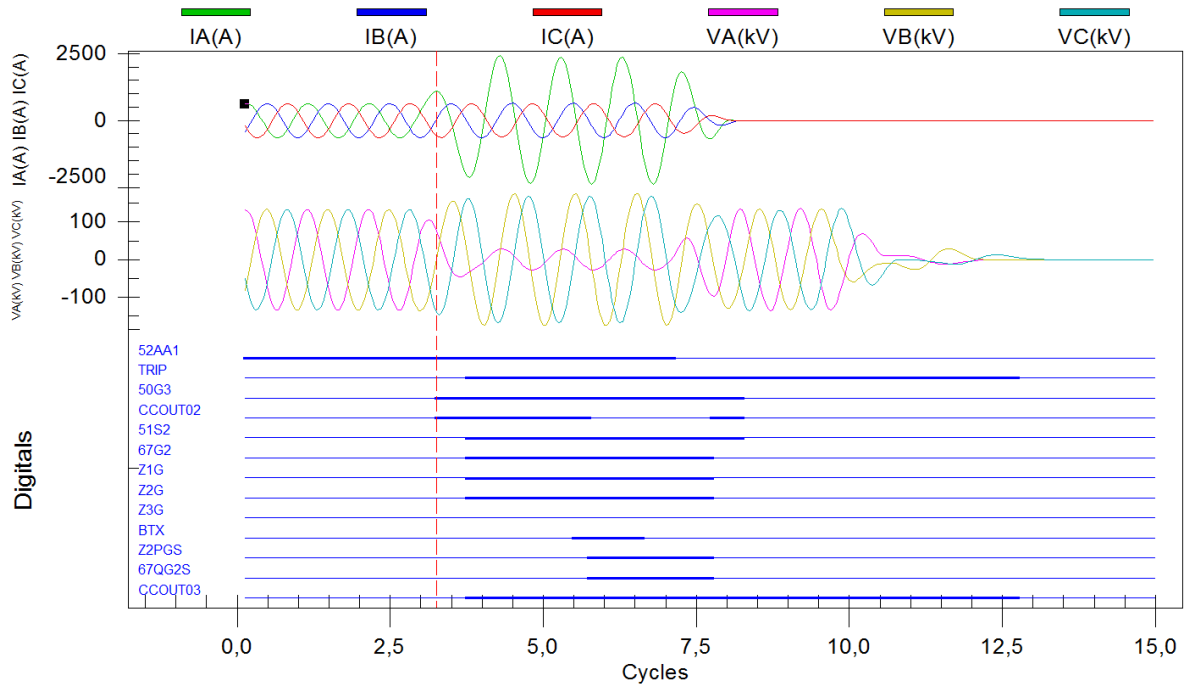


Figura B.2(a) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta AN a 0% da LT principal

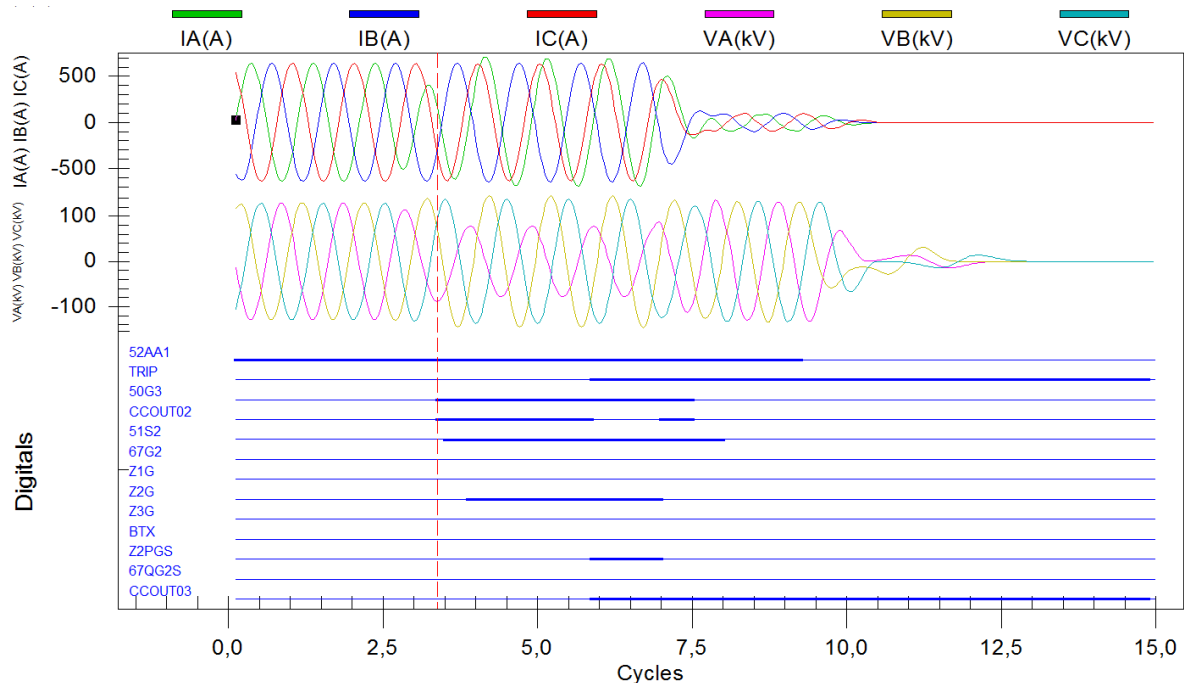


Figura B.2(b) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta AN a 0% da LT principal

- **Apêndice B.3 – Relatórios Gráficos de Eventos dos relés SEL-421 para falta AN a -10% da LT principal**

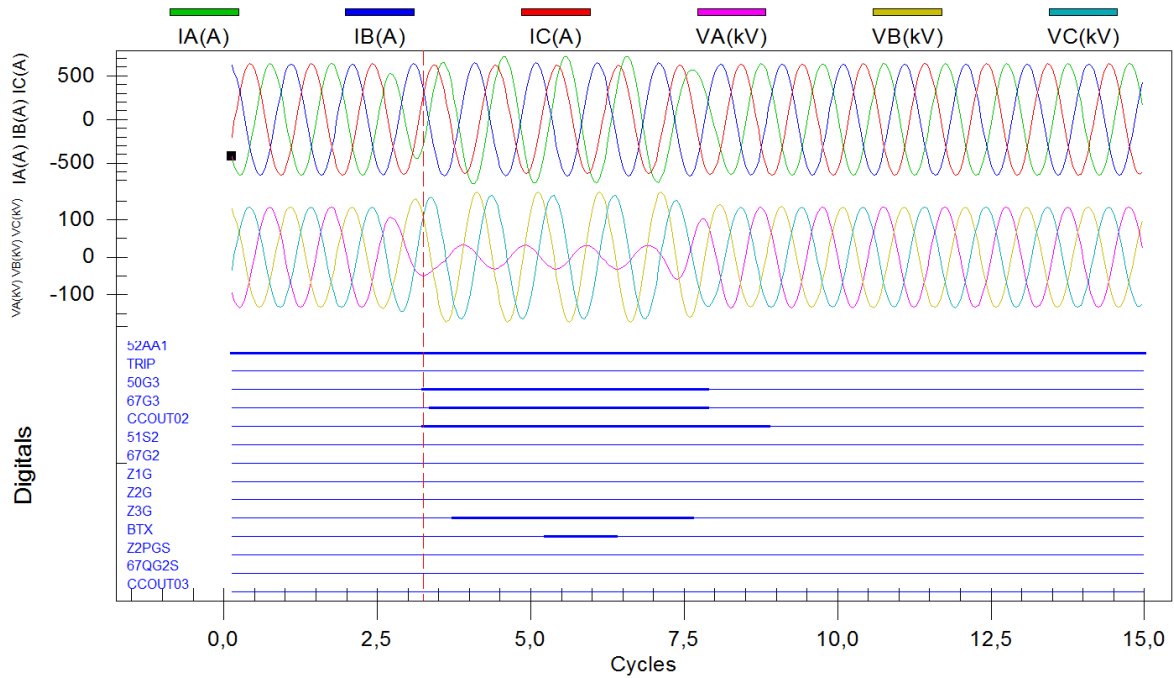


Figura B.3(a) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta AN a -10% da LT principal

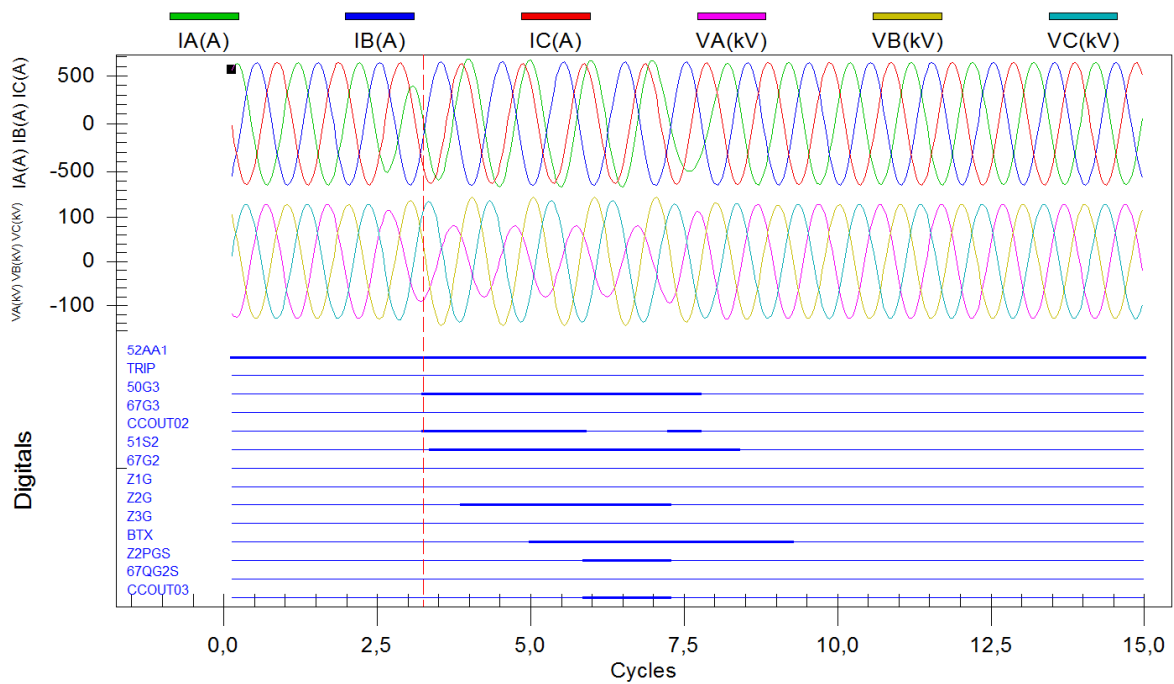


Figura B.3(b) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta AN a -10% da LT principal

- **Apêndice B.4 – Relatórios Gráficos de Eventos dos relés SEL-421 para falta AN a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação)**

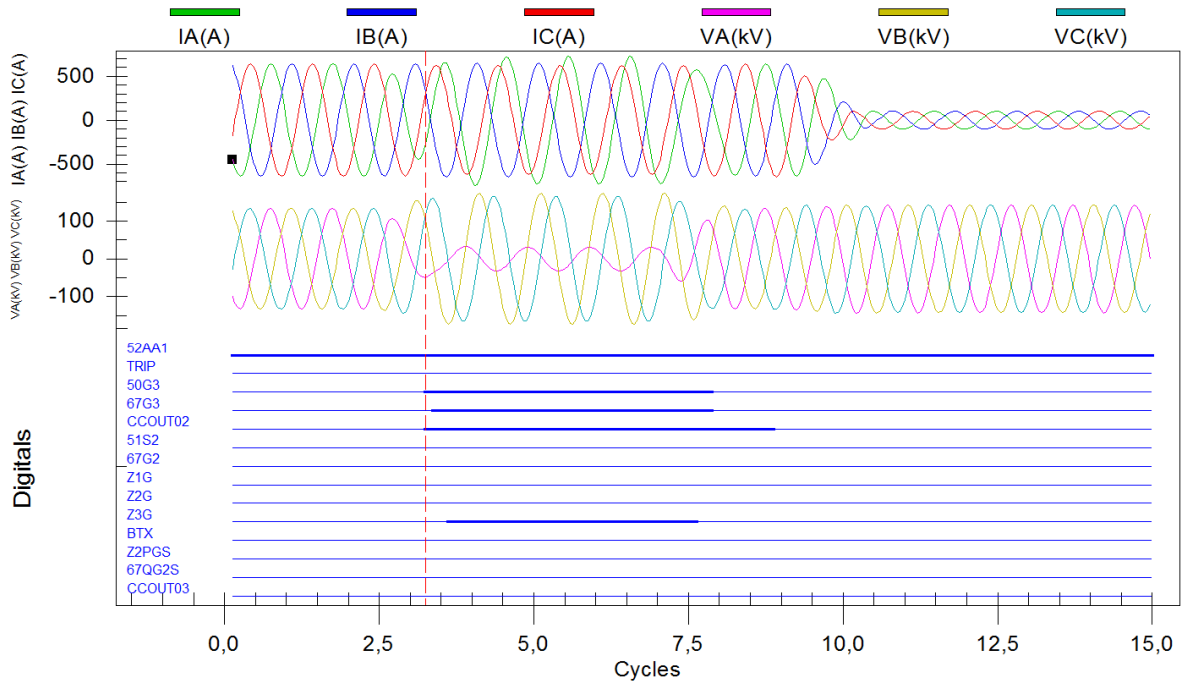


Figura B.4(a) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta AN a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação)

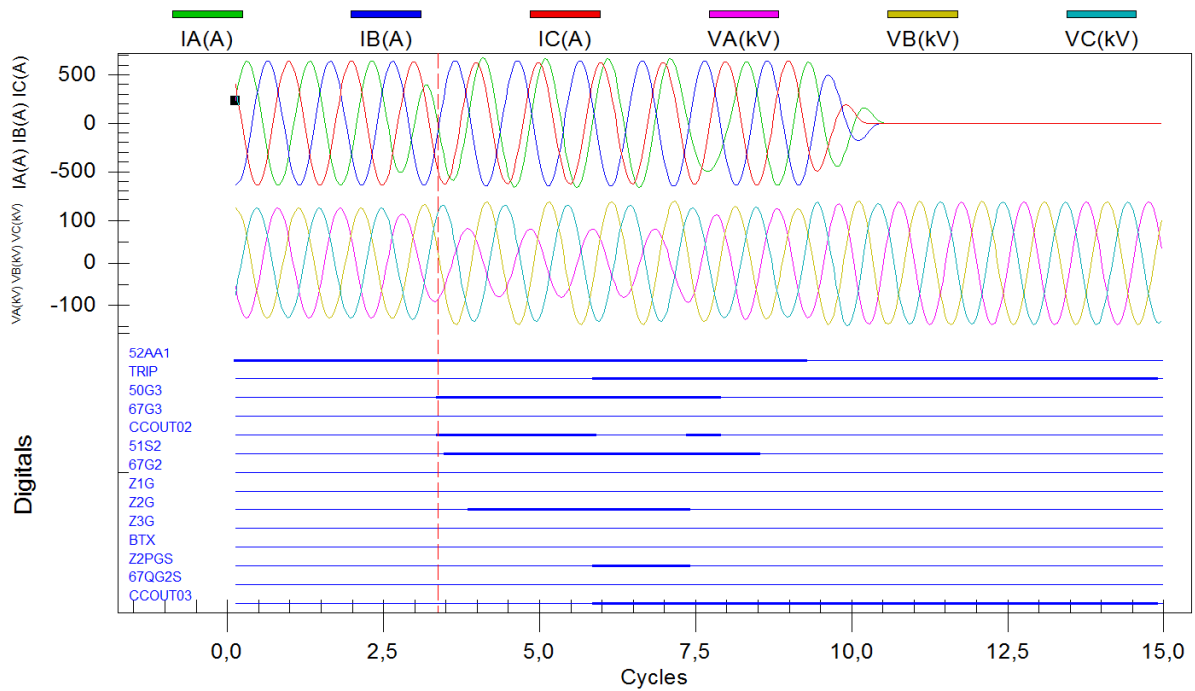


Figura B.4(b) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta AN a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação)

• **Apêndice B.5 – Relatórios Gráficos de Eventos dos relés SEL-421 para falta AB a 50% da LT principal**

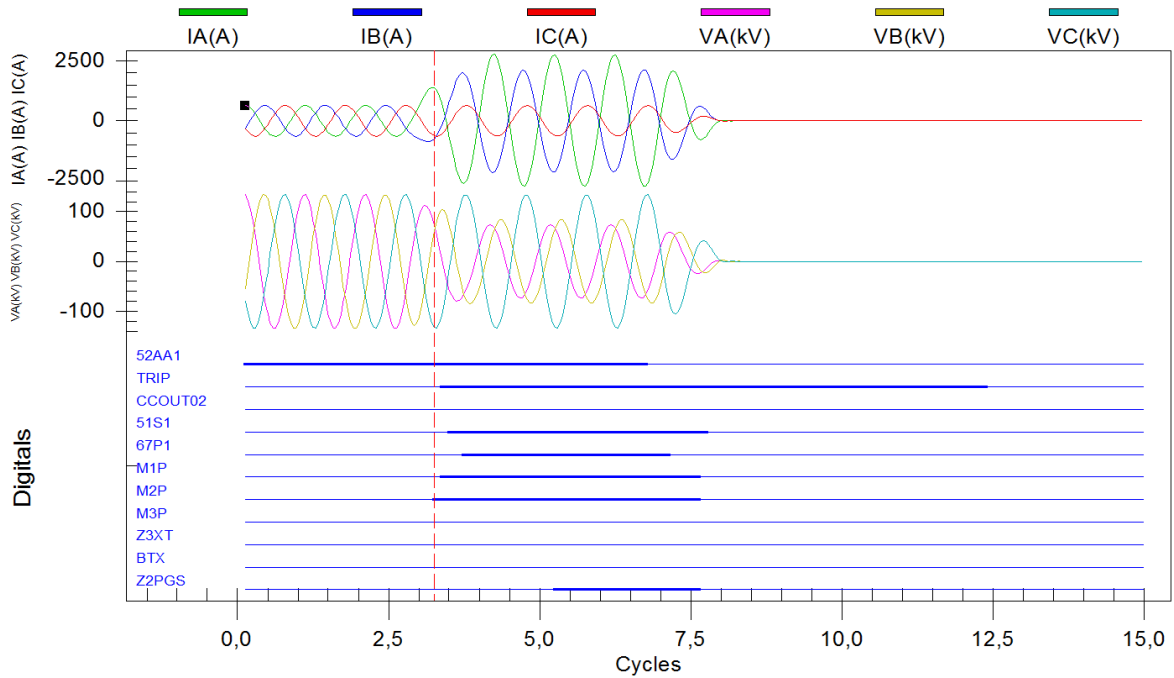


Figura B.5(a) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta AB a 50% da LT principal

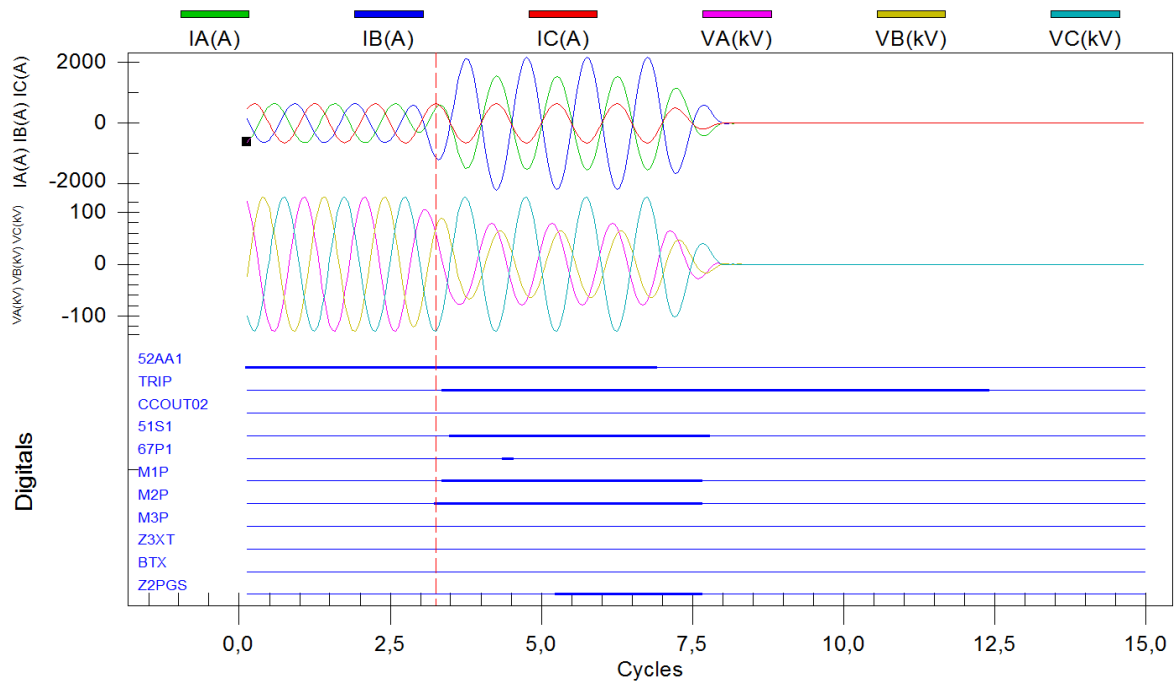


Figura B.5(b) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta AB a 50% da LT principal

• **Apêndice B.6 – Relatórios Gráficos de Eventos dos relés SEL-421 para falta ABC a 0% da LT principal**

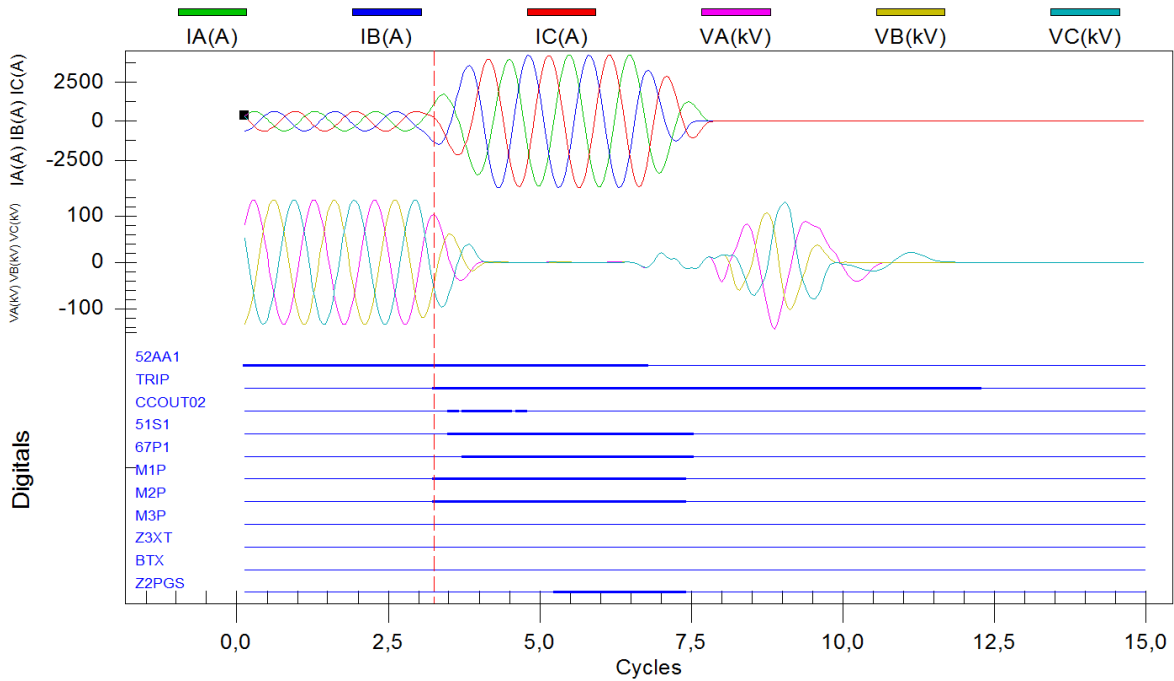


Figura B.6(a) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta ABC a 0% da LT principal

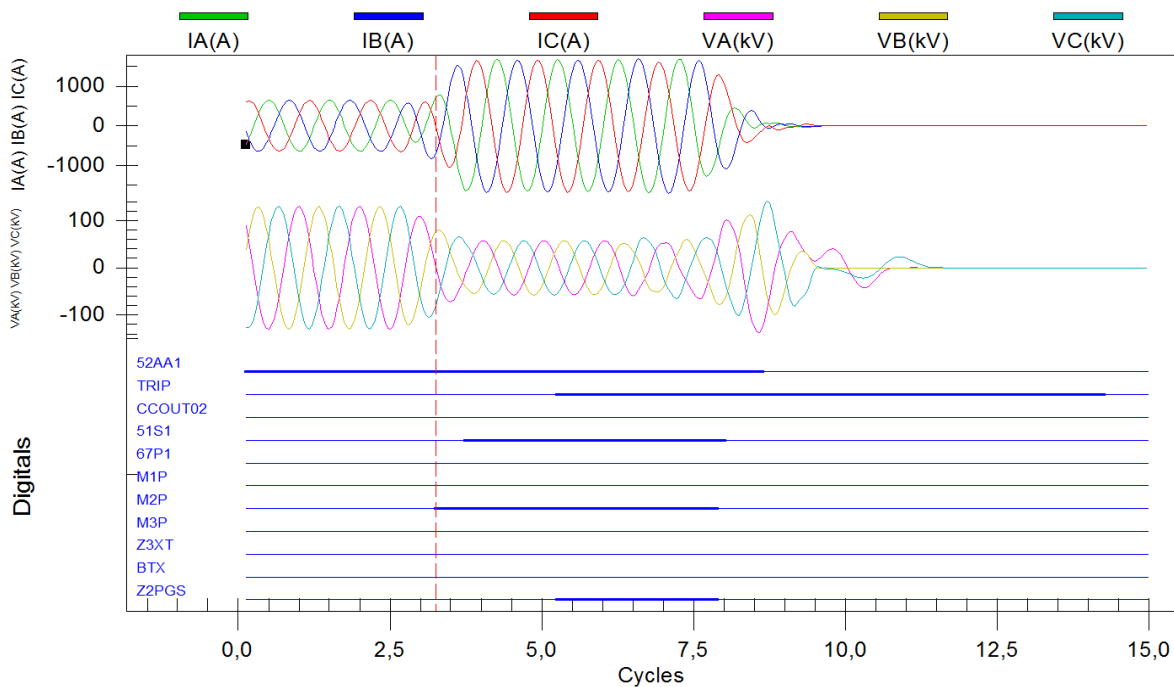


Figura B.6(b) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta ABC a 0% da LT principal

• **Apêndice B.7 – Relatórios Gráficos de Eventos dos relés SEL-421 para falta BC a -10% da LT principal**

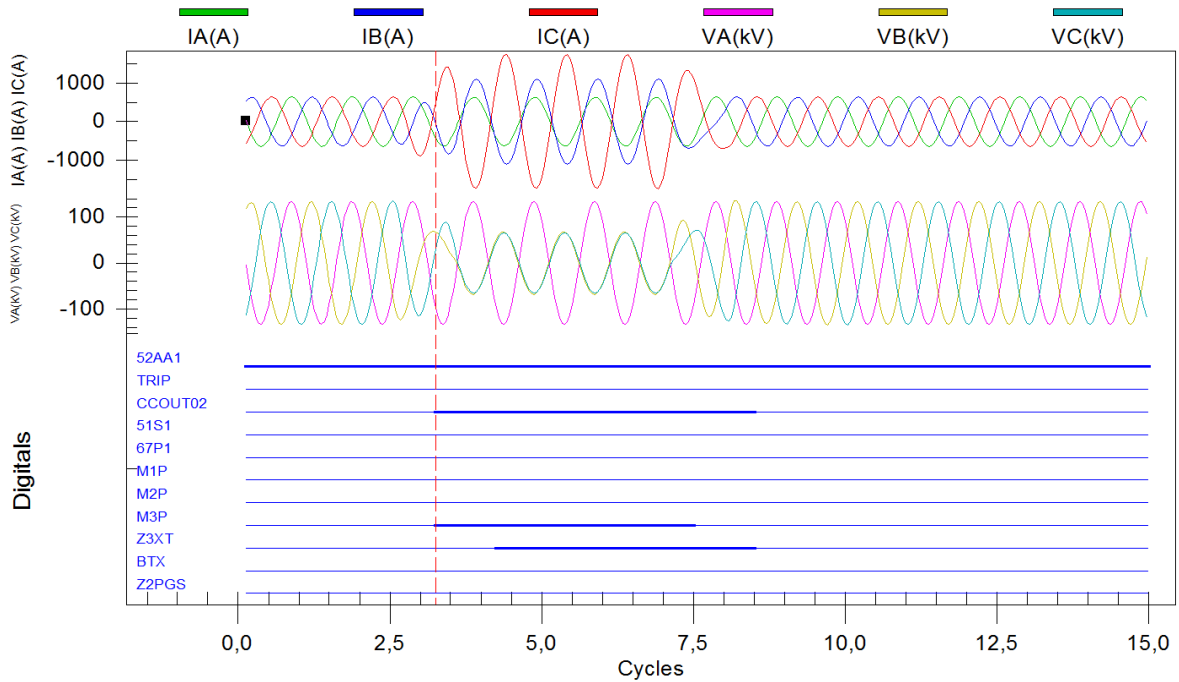


Figura B.7(a) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta BC a -10% da LT principal

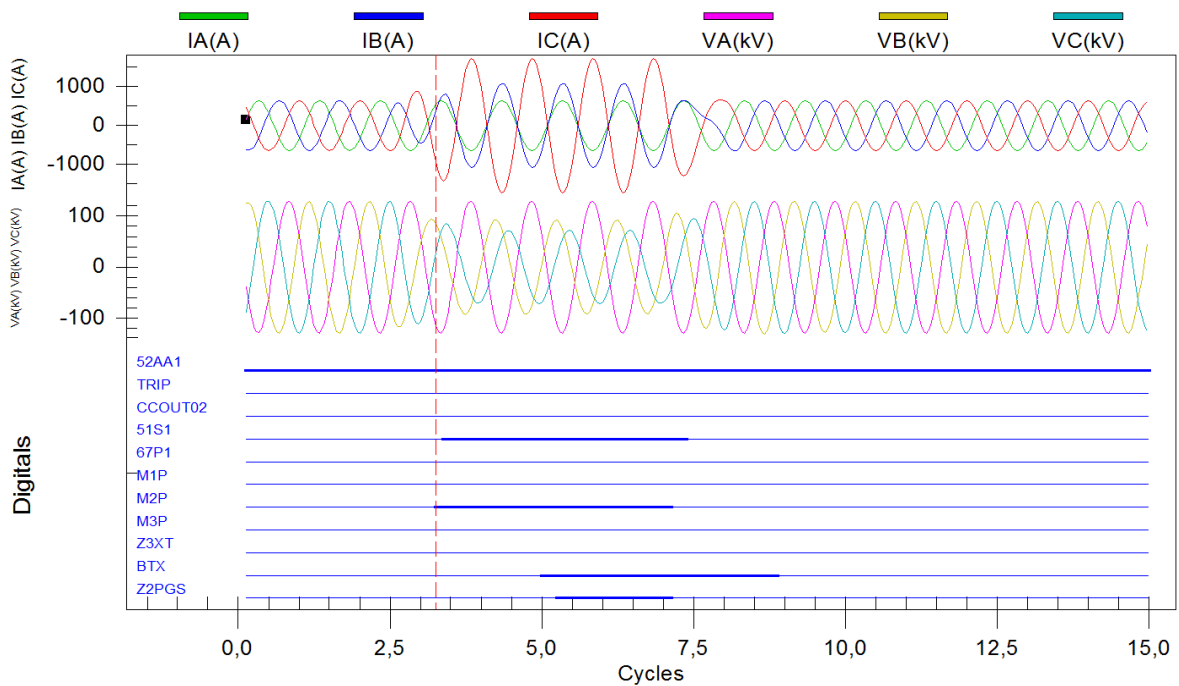


Figura B.7(b) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta BC a -10% da LT principal

- **Apêndice B.8 – Relatórios Gráficos de Eventos dos relés SEL-421 para falta BC a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação)**

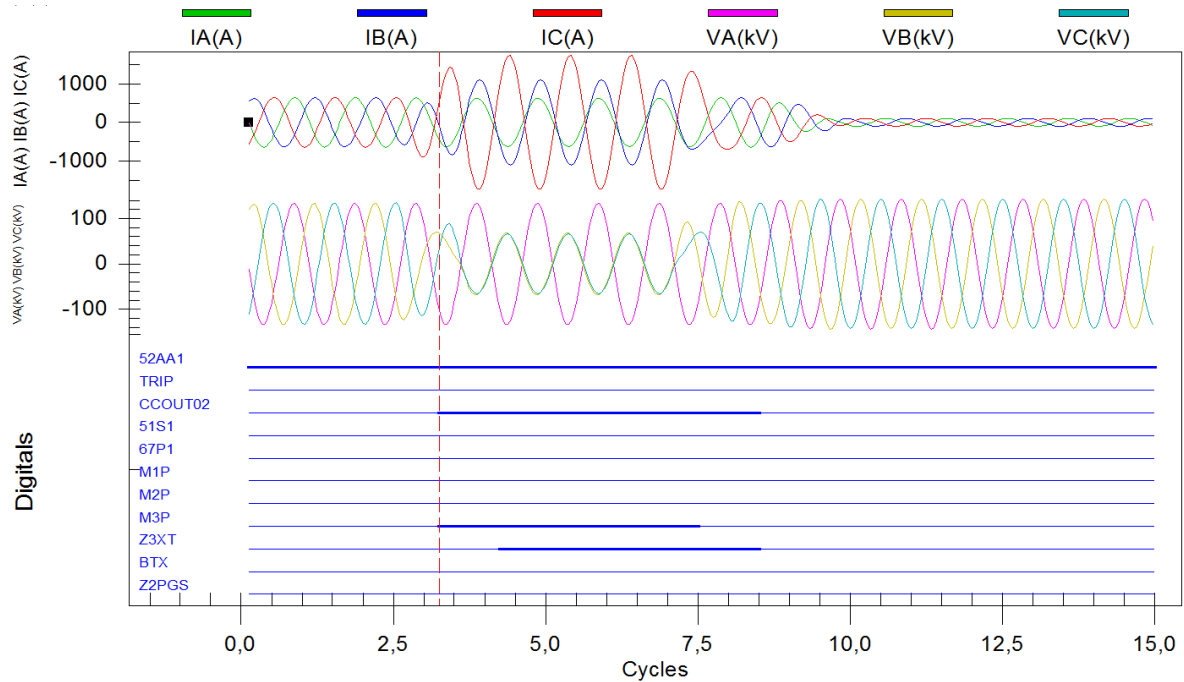


Figura B.8(a) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “S” – Falta BC a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação)

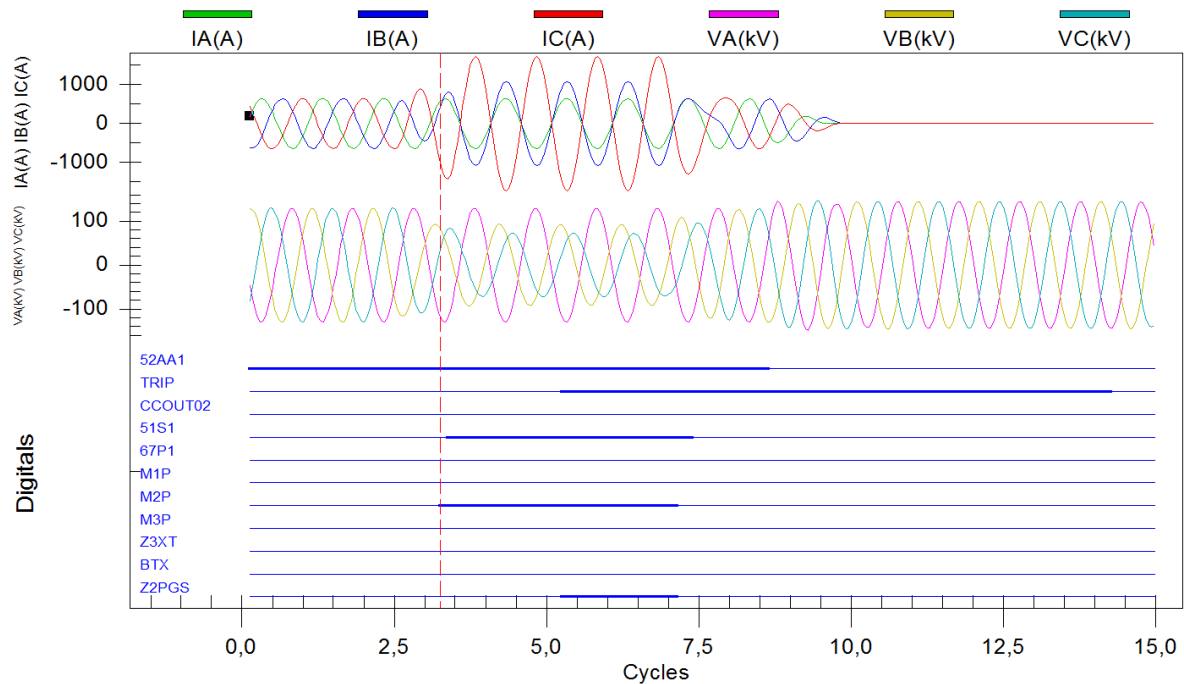


Figura B.8(b) – Relatório gráfico de eventos do relé no terminal “R” – Falta BC a -10% da LT principal (com perda do canal de comunicação)